



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Gerson Marques dos Santos

**COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO DE SOLO E DAS MISTURAS
SOLO-COMPOSTO UTILIZADOS EM CAMADAS DE COBERTURA NO
ATERRO EXPERIMENTAL DA MURIBECA, PERNAMBUCO**

RECIFE

2015

Gerson Marques dos Santos

**COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DE SOLO E DAS MISTURAS
SOLO-COMPOSTO UTILIZADOS EM CAMADAS DE COBERTURA NO
ATERRO EXPERIMENTAL DA MURIBECA, PERNAMBUCO**

Tese submetida ao corpo docente da
Coordenação dos Programas de Pós-
Graduação da Universidade Federal de
Pernambuco, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Doutor em
Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Linha de Pesquisa: Geotecnia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira

RECIFE

2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S237c Santos, Gerson Marques dos.

Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-composto utilizados em camadas de cobertura no aterro experimental da Muribeca, Pernambuco / Gerson Marques dos Santos. - Recife: O Autor, 2015.
196 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Camada de cobertura. 3. Curva de retenção. 4.
Histerese. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-198



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

**COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DE SOLO E DAS MISTURAS SOLO-COMPOSTO
UTILIZADOS EM CAMADAS DE COBERTURA NO ATERRO EXPERIMENTAL DA
MURIBECA, PERNAMBUCO**

defendida por

Gerson Marques dos Santos

Considera o candidato APROVADO

Recife, 27 de fevereiro de 2015

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira – UFPE
(orientador)

Prof.^a Dr.^a Stela Fucale – UPE
(examinadora externa)

Prof.^a Dr.^a Maria Odete Holanda Mariano – UFPE
(examinadora externa)

Prof.^a Dr.^a Lícia Mouta da Costa – UFPE
(examinadora interna)

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá – UFPE
(examinador interno)

A meus pais, Otaviano Marques dos Santos – *in memorian*

Maria José Ramos dos Santos – *in memorian*

A meus irmãos, Edson Marques dos Santos

Marlucia Marques dos Santos

Edilene Marques dos Santos

Eliane Marques dos Santos

Aline Marques dos Santos

Josélia Marques dos Santos

Ivane Marques dos Santos

Arnaldo Marques dos Santos

Normando Marques dos Santos

Airton Marques dos Santos

Renata da Silva Martins

Uma dedicação especial

À minha tia, Maria do Carmo Marques dos Santos – *in memorian*

AGRADECIMENTOS

Se eu fosse relacionar todas as pessoas que me ajudaram ao longo do doutorado, certamente tomaria mais da metade desta tese. Mas, não poderia deixar de registrar o profundo agradecimento a Deus, que com sua eterna paciência e carinho se manteve sempre ao meu lado e nos momentos em que eu pensava que não ia conseguir, ele me dava sempre a mão na forma de um pensamento positivo ou enviando uma pessoa para me ajudar. Entre as pessoas enviadas por Deus, gostaria de agradecer pela consecução deste trabalho:

Ao Professor Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira, pela paciência, confiança, orientação e por proporcionar as condições necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa no campo e no laboratório.

Ao amigo e irmão William de Paiva, pela ajuda durante a modelagem matemática e pela familiarização com os softwares utilizados.

Ao Professor Dr. André Maciel Netto, pela maestria com que nos transmitiu os conhecimentos a respeito de umidade no solo.

A minha noiva Karla Vitória pelo carinho, pelos pensamentos positivos e pelas palavras incentivadoras que sempre sinalizam um porto seguro.

Ao Professor Dr. José Fernando Thomé Jucá, pela motivação que nos transmitiu, não apenas durante as aulas como também fora do ambiente acadêmico.

Ao Professor Dr. Jaime Cabral, que sempre se mostrou disposto a nos ajudar nas horas difíceis.

Ao amigo, Engenheiro Calculista, Heitor Lobo Mesel, pois, num desses momentos em que eu estava em dificuldades, ele, misteriosamente apareceu e me forneceu informações imprescindíveis para que pudesse dar continuidade aos meus estudos.

À secretária de pós-graduação Sra. Andréa Negromonte, pela simpatia, carinho, amizade e pela competência demonstrada na condução dos trabalhos nesta secretaria.

Ao Diretor da Escola Superior de Marketing, Professor José Lavanére Lemos, que através da sua simplicidade e de seu exemplo de vida, me proporcionou as condições necessárias para ingressar no campo da docência o que motivou meu ingresso no mestrado e no doutorado.

Ao Engenheiro e Laboratorista Antônio Brito, pela maneira responsável com que nos transmitiu as informações necessárias para a condução dos ensaios relacionados à pesquisa.

Ao professor Dr. Ivaldo Pontes, pela grande ajuda durante o doutorado.

A professora Dra. Lícia Costa, pela paciência com que nos transmitiu o conhecimento em sala de aula.

Ao laboratorista Severino, pela incansável presença no laboratório de mecânica dos solos e sempre disposto a nos ajudar.

Aos laboratoristas Gutembergue, Leandro e Rodrigo pelo auxílio e apoio durante a realização dos ensaios de campo e de laboratório.

Ao professor Tiago Rolim, pela confecção dos tubos-shelbes e acessórios do equipamento de extração de amostras.

Ao professor Sérgio, do laboratório de química da UNICAP, pela grande ajuda nos ensaios químicos.

Ao professor Washington Moura de Amorin Jr, pelo incentivo e amizade.

Aos colegas da Pós-Graduação: Ricardo, Kelma, Régia, Jeam. Saul e Magdalena.

Ao amigo Virgílio Henrique, pelo livro presenteado (A arte da prudência – de Baltasar Gracián). Aconselhamentos no momento oportuno.

A FACEPE, pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de estudo, cuja contribuição foi imprescindível para realização dessa pesquisa.

“É também função do pesquisador: observar e tentar traduzir para linguagem humana, num determinado referencial de espaço-tempo, aquilo que a natureza tem para lhe dizer”

Gerson Marques dos Santos

RESUMO

Um dos maiores desafios da Engenharia Geotécnica é a identificação de um sistema de cobertura final para aterro de resíduos sólidos urbanos (RSU) com a utilização de materiais de baixo custo, que minimize a infiltração de água e que possa reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Esta pesquisa tem o objetivo de avaliar o comportamento hidromecânico de um solo e da sua mistura com composto orgânico. Amostras do solo da Formação Barreiras e do composto orgânico utilizado na camada de cobertura da célula experimental do Aterro da Muribeca, Pernambuco, foram coletadas. Os ensaios foram realizados em amostras compactadas em campo e em laboratório no solo natural e nas misturas solo-composto nas proporções, em volume, de 3:1 e 1:1. Em campo, foram avaliados o grau de compactação e a resistência de ponta com uso do penetrômetro dinâmico DPL (Dynamic Penetrometer Light). Em laboratório, foram realizados ensaios de caracterização física e química. Nas amostras compactadas, em laboratório, na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo foram obtidas as curvas de retenção de água no ramo de secagem e de umedecimento (histerese) e realizadas avaliação de velocidade da perda de umidade em relação à sucção, avaliação da resistência ao cisalhamento e da resistência de ponta. As camadas de cobertura de campo foram simuladas em lisímetros com as mesmas espessuras de campo e compactadas nas condições ótimas de laboratório e avaliada a resistência de ponta com uso dos penetrômetros dinâmico (DPL) e estático CPT (Cone Penetration Test). As curvas experimentais de retenção de água foram ajustadas utilizando o modelo de van Genuchten (1980). O solo natural e as misturas solos-composto apresentam granulometria similares constituída de silte de baixa compressibilidade. O acréscimo do composto ao solo natural provocou uma diminuição no peso específico aparente seco, um aumento na umidade ótima, um acréscimo na capacidade de retenção de umidade até a sucção de 1000 kPa, não apresentando diferenças significativas para sucções superiores. O aumento do composto ao solo elevou a saturação de base para valores acima de 50%, tornando as misturas eutróficas (férteis) propícias para o desenvolvimento de vegetais, aumento da histerese e redução da resistência ao cisalhamento e de ponta do solo. A condutividade hidráulica saturada do solo e das misturas solo-composto é da ordem de 10^{-8} m/s. O perfil formado por uma camada de 0,30 m de solo natural sobreposta por uma camada de 0,30 m de solo-composto na proporção de 3:1 foi o que apresentou melhor capacidade de retenção de água, maior resistência de ponta e ao cisalhamento.

PALAVRAS-CHAVE: Camada de Cobertura. Curva de Retenção. Histerese.

ABSTRACT

One of the greatest challenges of geotechnical engineering is the identification of a final cover system for landfill of municipal solid waste (MSW) with the use of inexpensive materials, which minimize water infiltration and can reduce greenhouse gas emissions greenhouse (GHG). This research aims to evaluate the hydro-mechanical behavior of a soil and mixing it with compost. Samples of soil formation barriers and the organic compound used in the cover layer of the experimental cell Muribeca Landfill were collected. The tests were performed on samples compacted in the laboratory and in the field in the natural soil and soil-compound mixtures in ratios by volume of 3:1 and 1:1. In the field, we assessed the level of compression and tip resistance with use of dynamic penetrometer DPL (Dynamic Light Petermeter). In the laboratory, physical and chemical characterization tests were performed. The compacted samples in the laboratory at optimum moisture content and maximum dry apparent specific gravity were obtained water retention curve in the drying branch and damping (hysteresis), speed evaluation of moisture loss on suction, evaluation of resistance shear and tip resistance. The field of coating layers were simulated in lysimeters with the same field of thicknesses and compacted under optimal laboratory conditions and evaluated the tip resistance with use of dynamic penetrometers (DPL) and static CPT (Cone Penetration Test). The experimental water retention curves were fitted using the model of Van Genuchten (1980). The natural soil and compost-soil mixtures have similar particle size consisting of low compressibility silt. The natural soil composed of the increase caused a decrease in apparent dry specific weight, an increase in the optimum moisture content, an increase in moisture retention capacity up to 1000 kPa suction and no significant differences for higher sucks. The increase of the compound to the soil increased the base saturation for values above 50%, and eutrophic mixtures (fertile) conducive to the development of plants, there is an increased hysteresis and reduced shear strength and edge ground. The saturated hydraulic conductivity of soil and ground-compound mixtures is of 10^{-8} m/s. The profile formed by a layer of natural soil 0.30 m overlapped by a layer of 0.30 m Soil-compound in a ratio of 3:1 showed the best water retention capacity, higher peak resistance and shear.

KEYWORDS: Cover Layer. Retention Curve. Hysteresis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Vazadouro a céu aberto (lixão), forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos – antigo lixão de Bongaba – Majé/RJ (Majé Online, 2012)	25
Figura 2	Representação da camada de cobertura definitiva e das intermediárias de um aterro sanitário (CONDER/BA, 2013)	32
Figura 3	Curva padrão de temperatura para o processo de compostagem (Pereira Neto; Stenfiford, 1992)	40
Figura 4	Curva de compactação e graus de saturação (Ferreira, 1995)	43
Figura 5	Formas de curva de compactação encontradas em diferentes tipos de solos (Lee e Suedkamp, 1972)	45
Figura 6	Modelo de comportamento de curva de compactação para umidade à esquerda do ramo ascendente Maccarini et al (1988)	46
Figura 7	Curvas de compactação de solos expansivos argilosos e colapsíveis arenosos (Oliveira e Ferreira, 2012)	46
Figura 8	Curvas de retenção de água típicas de diferentes texturas de solos (Fredlund e Xing, 1994)	51
Figura 9	Variação da quantidade de água em diferentes áreas da curva de retenção (Vanapalli et al, 1996)	54
Figura 10	Curvas de Retenção de água para solos tropicais: a) Futai (2002); g) Feuerharmet et al, (2004)	55
Figura 11	Elementos da curva de retenção de água (adaptado de Fredlund e Xing, 1994)	58
Figura 12	Ponto de entrada de ar (adaptado de Maciel, 2003)	59
Figura 13	Ponto de entrada de ar (adaptado de Vieira, 2005)	59
Figura 14	Ponto de entrada de ar (adaptado de Guzelini, 2011)	60
Figura 15	Ponto de entrada de ar (adaptado de Lopes, 2011)	61
Figura 16	Curvas de retenção experimentais de um corpo poroso rígido (Poulovassilis, 1962)	65
Figura 17	Histerese de uma argila contráctil-expansiva (Santos, 2008) ..	66

Figura 18	Ângulo de avanço e recuo (Marinho, 1994)	67
Figura 19	Relação da perda de umidade versus tempo, para diferentes umidades relativas (Kayyal, 1995)	71
Figura 20	Relação da velocidade de perda de umidade versus tempo, para diferentes umidades relativas (Kayyal, 1995)	72
Figura 21	Penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar-Stolf	75
Figura 22	Envoltória estendida de Mohr-Coulomb de um solo não saturado (Campos, 1997; apud Soares, 2008)	80
Figura 23	Vista geral da jazida de coleta da amostra	82
Figura 24	Disposição dos furos nas camadas de cobertura	84
Figura 25	Divisões das camadas de cobertura experimentais (modificado de Maciel, 2009 e Lopes, 2011)	86
Figura 26	Perfil típico das camadas de coberturas (modificado de Lopes 2011)	87
Figura 27	Confecção do lisímetros	88
Figura 28	Penetrômetro dinâmico DPL	89
Figura 29	Ensaio de campo: a) localização dos furos; b) realização do ensaio com o penetrômetro de impacto	90
Figura 30	Confecção dos corpos de prova: a) solo compactado (proctor normal); b) e c) moldagem dos corpos de prova; d) umedecimento das amostras por capilaridade	97
Figura 31	Ensaio com penetrômetro estático em laboratório	107
Figura 32	Curvas granulométricas dos solos pesquisados	112
Figura 33	Localização dos três solos na carta de plasticidade	112
Figura 34	Curvas de compactação e determinação gráfica da umidade de saturação	120
Figura 35	Fases do solo e das misturas solo-composto	121
Figura 36	Resistência de ponta, com DPL, das camadas de cobertura da célula experimental: a) Solo Natural; b) Perfil 1 e c) Perfil 2	125
Figura 37	Curvas de retenção de água	127
Figura 38	Relação entre a umidade gravimétrica e a sucção matricial	129
Figura 39	Relação entre grau de saturação e sucção matricial	130

Figura 40	Curvas de retenção ajustadas através do modelo de van Genuchten (1980)	131
Figura 41	Condutividade hidráulica não saturada em função do grau de saturação	133
Figura 42	Ponto de entrada generalizada de ar no Solo Natural compactado na umidade ótima	134
Figura 43	Ponto de entrada generalizada de ar no Solo-Composto 3:1 compactado na umidade ótima	135
Figura 44	Ponto de entrada generalizada de ar no Solo-Composto 1:1 compactado na umidade ótima	135
Figura 45	Relação entre umidade ótima e umidade gravimétrica de entrada de ar	136
Figura 46	Curvas de velocidade de perda de água	138
Figura 47	Curvas de perda de água por evaporação	140
Figura 48	Histerese das curvas experimentais de retenção de água no laboratório e no campo	141
Figura 49	Trajetórias de secagem e de umedecimento dos solos compactados em laboratório ajustadas através do modelo de van Genuchten (1980)	143
Figura 50	Trajetórias de secagem e de umedecimento dos solos coletados na camada de cobertura da célula experimental, ajustadas através do modelo de van Genuchten (1980)	144
Figura 51	Perfis referentes ao Solo Natural em laboratório	149
Figura 52	Perfis referentes ao Solo-Composto 3:1 em laboratório	150
Figura 53	Perfis referentes ao Solo-Composto 1:1 em laboratório	151
Figura 54	Perfis dos três solos compactados em laboratório referentes aos ensaios com penetrômetro estático e dinâmico	152
Figura 55	Curvas tensão versus deslocamento para o Solo Natural e Misturas Solo-Composto compactados em laboratório (sem inundação)	157

Figura 56	Envoltórias de resistência ao cisalhamento em laboratório (sem inundação); a) para critério de ruptura da tensão máxima, b) para grandes deslocamentos 8,0 mm (16% de deformação)	157
Figura 57	Curvas de tensão versus deslocamento para o Solo Natural e misturas Solo-Composto compactados em laboratório (inundado)	158
Figura 58	Envoltória de resistência ao cisalhamento em laboratório (ensaio inundado); a) para critério de ruptura de pico, b) para grandes deslocamentos 8 mm (16% de deformação)	158
Figura 59	Curvas tensão versus deslocamento para o Solo Natural e misturas Solo-Composto indeformados retirados da camada de cobertura da célula experimental (sem inundação)	159
Figura 60	Envoltórias de resistência das amostras indeformadas retiradas da camada de cobertura da célula experimental (sem inundação); a) para critério de ruptura de pico, b) para grandes deslocamentos 8 mm (16% de deformação)	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Funções da camada de cobertura de aterro sanitário	38
Tabela 2	Requisitos ou recomendações que deve atender uma camada de cobertura	38
Tabela 3	Características de compressibilidade (Ferreira, 1995)	44
Tabela 4	Modelos utilizados no ajuste da curva de retenção de água no solo	63
Tabela 5	Determinação de condutividade hidráulica não saturada com uso de modelos matemáticos	70
Tabela 6	Possíveis combinações de variáveis de estado de tensões para os solos não saturados (Fredlund e Rahardjo, 1993) ...	79
Tabela 7	Características do solo, composto e misturas utilizados nesta pesquisa	111
Tabela 8	Resumo das características dos solos utilizados nesta pesquisa e dos solos analisados por Maciel (2003), Lopes (2011) e Oliveira (2013)	114
Tabela 9	Caracterização química do solo, composto e das misturas solo-composto	115
Tabela 10	Síntese dos efeitos da adição do composto ao solo	118
Tabela 11	Fases do solo e das misturas solo-composto, em percentual	121
Tabela 12	Grau de compactação e desvio de umidade em relação a umidade ótima	123
Tabela 13	Valores médios da resistência de ponta obtidos em campo com o DPL	126
Tabela 14	Resumo da capacidade de retenção	129
Tabela 15	Parâmetros das curvas de retenção ajustadas através do modelo de van Genuchten (1980)	131
Tabela 16	Parâmetros utilizados na correlação entre umidade ótima e umidade gravimétrica de entrada generalizada de ar	137
Tabela 17	Quantidade de água evaporada com relação a umidade gravimétrica através da superfície dos três solos estudados	140

Tabela 18	Classificação dos coeficientes de determinação, parâmetros de ajustes das curvas de secagem e de umedecimento e, valores de histerese	145
Tabela 19	Valores médios de resistência de ponta obtidos com penetrômetro estático e dinâmico em campo e em laboratório	153
Tabela 20	Valores médios de resistência de ponta obtidos com penetrômetro estático e dinâmico em campo e em laboratório para o Solo Natural e mistura solo-composto na proporção de 3:1 e 1:1	154
Tabela 21	Classificação dos parâmetros de resistência obtidos no ensaio de cisalhamento direto	160

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	20
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
1.2 JUSTIFICATIVA	24
1.3 OBJETIVOS	26
1.3.1 Objetivo geral	26
1.3.2 Objetivos específicos	26
1.4 ESTRUTURA DA TESE	27
 CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 29
2.1 ASPECTOS DA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM ATERRO	29
2.2 CAMADA DE COBERTURA DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	32
2.2.1 Camada convencional	33
2.2.2 Barreira capilar	34
2.2.3 Camada bioreativa	35
2.2.4 Aspectos da camada de cobertura da célula experimental da Muribeca	36
2.2.5 Síntese das funções da camada de cobertura	37
2.2.6 Composto orgânico utilizado em camada de cobertura	38
2.3 COMPACTAÇÃO	41
2.3.1 Controle convencional de compactação	47
2.3.2 Controle de compactação com o uso do penetrômetro DPL	47
2.4 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	49
2.4.1 Influência do tipo de solo sobre a curva de retenção de água	51
2.4.2 Entrada generalizada de ar	57
2.5 AJUSTE DAS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	61

2.6	HISTERESE DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO ...	64
2.7	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	68
2.8	VELOCIDADE DA PERDA DE UMIDADE	70
2.9	RESISTÊNCIA DE PONTA DO SOLO	73
2.9.1	Equipamento utilizado na medição da resistência de ponta do solo	74
2.10	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO	76
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS		81
3.1	COLETAS DAS AMOSTRAS DE SOLO, COMPOSTO E PREPARAÇÃO DAS MISTURAS SOLO-COMPOSTO	82
3.1.1	Coleta do solo	82
3.1.2	Coleta do composto	84
3.1.3	Preparação das amostras para os ensaios de caracterização física e química	84
3.1.4	Preparação dos corpos de prova em lisímetros	85
3.2	ENSAIOS REALIZADOS NA CAMADA DE COBERTURA DO ATERRO	89
3.3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	92
3.4	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	93
3.4.1	Determinação do potencial hidrogênico (pH) em KCl, H ₂ O e CaCl ₂	94
3.4.2	Capacidade de troca catiônica (com pH 7,0)	94
3.4.3	Determinação do carbono orgânico e matéria orgânica	94
3.4.4	Análise dos resultados da caracterização química	95
3.5	CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	95
3.5.1	Velocidade da perda de água	99
3.5.2	Histerese	99
3.5.3	Ajustes das curvas experimentais	82
3.6	ENTRADA GENERALIZADA DE AR	102
3.7	FASES DO SOLOE DAS MISTURAS SOLO-COMPOSTO	102
3.8	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	102
3.9	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PONTA EM LABORATÓRIO	105

3.9.1	Penetrômetro dinâmico	105
3.9.2	Penetrômetro estático	106
3.10	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM LABORATÓRIO.....	108

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES 109

4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	109
4.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	115
4.3	COMPACTAÇÃO E HOMOGENEIZAÇÃO	119
4.4	RESISTÊNCIA DE PONTA EM CAMPO	124
4.5	CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	126
4.6	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	132
4.7	RELAÇÃO ENTRE UMIDADE DE ENTRADA DE AR E UMIDADE ÓTIMA	133
4.8	VELOCIDADE DA PERDA DE ÁGUA	138
4.9	HISTERESE	141
4.10	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PONTA EM LABORATÓRIO	146
4.11	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM LABORATÓRIO	155

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS 161

5.1	INTRODUÇÃO	161
5.1.1	Considerações finais	161
5.1.2	Sugestões para novas pesquisas	164
	REFERÊNCIAS	166
	APÊNDICE – A	175
	APÊNDICE – B	178
	APÊNDICE – C	186

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Individualmente ou em coletividade, o ser humano sempre produziu e continuará produzindo resíduos. A forma pela qual os resíduos são manejados pode gerar divisas e energia, como também pode causar danos irreparáveis à natureza e conseqüentemente ao próprio ser humano.

No momento em que o ser humano deixou a vida nômade e passou a fixar residência, geralmente em locais com abundância de água e vegetação, os problemas relacionados ao acúmulo de resíduos começaram a surgir naquelas comunidades, uma vez que os resíduos eram acumulados em forma de lixões ou lançados em cursos d'água.

A história antiga menciona métodos praticados por alguns povos para o tratamento dos resíduos, como por exemplo: a queima e o aterramento. Lukiantchuki e Esquivel (2009) citando Lima (2004) relata que na Mesopotâmia, aproximadamente 2500 anos antes de Cristo, os nabateus enterravam seus resíduos domésticos e agrícolas em trincheiras cavadas no solo.

O lixo é tecnicamente chamado de Resíduos Sólidos. Conceituado como qualquer material quando seu proprietário ou produtor não o considera mais com o valor suficiente para conservá-lo; por outro lado, o lixo resulta da atividade humana por isso considerado inesgotável, é diretamente proporcional à intensidade industrial e ao crescimento populacional.

O crescimento populacional e o desenvolvimento industrial e tecnológico, ocorridos nos últimos séculos, acentuados após a 2ª guerra mundial, impôs a criação de novas opções de consumo à população, gerando assim muitos problemas para o meio ambiente através da geração de resíduos industrializados, geralmente de difícil degradabilidade e elevado teor de toxicidade. Nessa fase da industrialização, os recursos naturais eram utilizados

como se fossem infinitos e a população começou a devolver esses novos tipos de resíduos à natureza, indiscriminadamente, através de duas vertentes: a primeira na forma tradicional de lixões responsáveis pela contaminação de lençol freático e de mananciais através do lixiviado (chorume) e proliferação de doenças além da emissão do gás metano (CH_4); e, a segunda na forma de fumaça expelida pelas chaminés e escapamento de motores, composta de gases de efeito estufa (GEE), contaminando a atmosfera causando danos à natureza e provocando sérias doenças respiratórias.

A geração de resíduos sólidos de diversas origens (domiciliares, hospitalares, industriais e agrícolas) e de diversas naturezas (biodegradáveis, não biodegradáveis, resistentes ou contrários à vida) é atualmente um dos principais problemas ambientais do mundo (PACHECO et. al, 2004).

Diante das primeiras respostas sinalizadas pela natureza através de epidemias e eventos meteorológicos de grandes proporções provocados pela atividade econômica predatória, causando devastações e mortes, o ser humano começou a perceber que as consequências de um impacto natural localizado poderiam não se restringir, apenas, a determinada cidade ou determinado país e sim a todo planeta. Dessa maneira, o ser humano deixou de pensar de forma isolada ou cartesiana, passando a perceber um sistema ecológico interligado mundialmente, ou seja, começou a pensar de maneira holística.

Nesse contexto, surgiu a necessidade de ampliar as discussões, relacionadas ao meio ambiente e desenvolvimento, a nível mundial. As questões ambientais entraram em pauta nas discussões mundiais a partir da Conferência de Estocolmo na Suécia em 1972. Após esta conferência foi instituído o Programa do Meio Ambiente das Nações Unidas. O relatório de Brundtland em 1987 onde o tema "Desenvolvimento sustentável" recebeu maior divulgação, cuja abordagem tenta conciliar as questões sociais, econômicas e ambientais. Em 1992 na Conferência da ONU no Rio de Janeiro "RIO-92" foi adotada a Agenda 21 no propósito da redução da degradação em todo mundo. O Protocolo de Kyoto em 1997 propôs a redução de emissões dos

gases de efeito estufa, nas nações desenvolvidas em 5,2%; instituiu o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) através de projetos de apoio ao desenvolvimento sustentável; e, a criação do crédito de carbono.

Entre os projetos certificados pelo MDL encontra-se o de aterro sanitário, que é uma forma de disposição de RSU segura tanto do ponto de vista sanitário quanto ambiental, desde que siga os critérios de engenharia e normas operacionais adequadas (CAMPELO NETO, 2005).

Dentre os elementos que compõem um aterro sanitário, podem ser citados: drenagem das águas superficiais, impermeabilização da camada de cobertura e da camada inferior, a drenagem e o tratamento dos lixiviados e gases, bem como o plano de monitoramento para avaliar o impacto causado pela obra, os métodos de operação do aterro e as sugestões de uso futuro da área após encerramento das atividades.

O principal problema ambiental nos aterros sanitários é o risco de poluição das águas subterrâneas e superficiais. Em consequência dos processos de decomposição (químicos, físicos e biológicos) aos quais o RSU é submetido, forma-se um líquido (lixiviado) com carga poluidora várias vezes maior que a do esgoto doméstico (TORRES et al, 1997).

O lixiviado tem origem em várias fontes: da umidade natural dos resíduos que podem reter líquidos através da absorção capilar; de fontes externas, como água de chuvas, superficiais e de mananciais subterrâneos, de água de constituição da matéria orgânica e das bactérias que expelem enzimas que dissolvem a matéria orgânica para a formação de líquidos.

O biogás gerado pela decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos é rico em metano (CH_4). Esse gás tem grande potencial combustível e é um grande contribuinte antrópico para o aquecimento global, conseqüentemente é considerado, também, um gás de efeito estufa.

A disposição de resíduos sólidos no Brasil tem se constituído num grande desafio, sobretudo no que diz respeito à necessidade de se melhorar os

índices de tratamento e destino final adequado tanto em pequenos quanto grandes municípios. De acordo com a ABRELPE (2013) a destinação final dos RSU no Brasil manteve-se praticamente inalterada em relação a 2012. O índice de 58,3% correspondente a destinação final adequada no ano de 2013 permanece significativo, porém a quantidade de RSU destinado inadequadamente cresceu em relação ao ano anterior, totalizando 28,8 milhões de toneladas que seguiram para lixões ou aterros controlados, que do ponto de vista ambiental pouco se diferenciam dos lixões, pois não possuem o conjunto de sistemas necessários para a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

Nos aterros sanitários as maiores preocupações ambientais dizem respeito aos subprodutos gerados pelo processo de biodegradação: o lixiviado e o biogás. Esses componentes têm relação com as técnicas de engenharia que confinam os resíduos tais como a existência de camadas de cobertura final e intermediária, a composição e o grau de compactação dos resíduos, dentre outros fatores. A necessidade da compreensão dos mecanismos de biodegradação da massa de lixo e sua influência no comportamento dos aterros, da capacidade de retenção de líquidos, da geração de biogás e das emissões desses subprodutos para o ambiente externo ao aterro, ensejam novas pesquisas na área, com intuito de procurar soluções adequadas à realidade nacional, que sejam tecnicamente corretas e ambientalmente seguras.

Aterros sanitários possuem como principal premissa o confinamento seguro dos resíduos sólidos urbanos (RSU), do ponto de vista geotécnico e ambiental. Os aspectos da geotecnia ambiental aplicada a aterros de resíduos sólidos enfatizam a investigação experimental de laboratório e de campo, através do monitoramento e observação direta de várias obras de aterros sanitários.

Entre os estudos do RSU que contribuem para a compreensão do comportamento do aterro de resíduos sólidos, tem-se a estabilidade de taludes,

capacidade de carga, recalques, fluxo de líquidos e gases em meios saturados e não saturados. A diversidade dos materiais envolvidos, sua composição e alteração de propriedades com o tempo justificam o crescimento de pesquisas associando problemas geotécnicos aos ambientais, o que amplia a complexidade do assunto, bem como, a necessidade de estudos multidisciplinares.

No desenvolvimento deste trabalho, que tem como base a camada de cobertura de uma célula experimental do Aterro Controlado da Muribeca, localizado no Município de Jaboatão dos Guararapes (PE), procura-se explorar os aspectos interdisciplinares do tema, envolvendo a Geotecnia Ambiental e a Física do Solo, analisando parâmetros relacionados ao solo e a mistura solo composto utilizados nessa camada.

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar da existência de diversas legislações ambientais e das recomendações do Ministério Público em relação à coleta, ao tratamento e à destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos, ainda existem no Brasil inúmeros municípios que utilizam lixões (Figura 1) como destino final dos resíduos produzidos por sua população.

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela lei nº 12.305 de agosto de 2010, objetivou como meta mais imediata, o fim dos lixões até o final de 2014. De acordo com estudo do IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica), é praticamente impossível ao Brasil extinguir os seus 2.906 lixões até esta data, como prevê o Plano Nacional dos Resíduos Sólidos. Como havia previsto os estudos do IPEA, esta meta não foi atingida pelos municípios.

Figura 1 - Vazadouro a céu aberto (lixão), forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos – antigo lixão de Bongaba – Magé/RJ



Fonte: MAGÉ ONLINE, 2012

Ainda de acordo com o relatório do IPEA (2012), os lixões estão espalhados por 2.810 municípios brasileiros. Isto significa que cada um desses municípios tem que aplicar parte de seus recursos, muitas vezes escassos, na elaboração de projetos que possibilitem a construção de aterros sanitários tecnicamente e harmoniosamente integrados com o meio ambiente e com o bem estar da população, além de despesas com a remediação e consequente erradicação de seus lixões, como previsto em lei.

Os recursos disponibilizados pelo Ministério das Cidades para a gestão de resíduos sólidos urbanos e erradicação dos lixões no Brasil, para o período de 2011 a 2014, foi da ordem de dezenas de bilhões de reais, de acordo com informações publicadas no JORNAL CÂMARA (2011).

Neste contexto, é justificável a aplicação de recursos e esforços na elaboração de pesquisas com o objetivo de ampliar os conhecimentos que envolvam técnicas racionais e menos onerosas de logística de coleta, manejo e destinação final dos Resíduos Sólidos Urbanos.

A motivação desta pesquisa para o estudo de camada de cobertura tem origem em duas vertentes, a primeira refere-se ao fato de que uma grande quantidade de municípios ainda se apresentam incapazes de gerenciar seus resíduos sólidos, lançando-os em lixões, como relatado acima. A segunda vertente respalda-se no fato de que, diversas pesquisas já foram realizadas nas camadas de cobertura do aterro da Muribeca e, em particular, na camada de cobertura da célula experimental.

Dentre estas pesquisas cita-se Maciel (2003) com o estudo da geração, percolação e emissões de gases, Maciel (2009) estudando, a geração de biogás e energia em aterro experimental, Lopes (2011) com pesquisa referente a infiltração de água e fluxo de metano em acamadas de coberturas e Oliveira (2013) analisando as emissões de biogás em camadas de coberturas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem o objetivo de avaliar as propriedades geotécnicas e o comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-composto utilizados na camada de cobertura do aterro experimental da Muribeca-PE com vista a redução de emissões de gases de efeito estufa e retenção de infiltração de água para o interior do aterro.

1.3.2 Objetivos Específicos

Especificamente, este trabalho objetiva:

- analisar o grau de compactação e a homogeneidade do solo e das misturas solo-composto na camada de cobertura do aterro experimental da Muribeca-PE;

- avaliar a velocidade de evaporação e os efeitos de secagem e molhagem;
- avaliar a condutividade hidráulica saturada e não saturada do solo e das misturas solo-composto, em amostras compactadas em laboratório;
- avaliar a homogeneidade e a resistência de ponta do solo e das misturas solo-composto em amostras compactadas em laboratório simulando as condições geométricas (espessuras e disposição) das camadas de cobertura.
- Avaliar a resistência ao cisalhamento do solo e das misturas solo-composto, também, em amostras compactadas em laboratório.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução na qual se procurou abordar o assunto através da contextualização, delimitação do problema de pesquisa, justificativa do trabalho, indicação dos objetivos gerais e específicos e da formulação das questões de pesquisa.

O Capítulo 2 está formado pela Revisão Bibliográfica, que compreende o tema principal e suas interfaces. São apresentados inicialmente conceitos relativos à disposição de resíduos sólidos em aterro, aos tipos de camadas de cobertura e seus componentes que auxiliaram em algumas definições de elementos utilizados neste trabalho. São apresentados, também, elementos teóricos da Mecânica dos Solos e da prática da Engenharia Geotécnica.

No Capítulo 3 são abordados alguns conceitos e as principais informações relativas aos materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa. São enfocados os materiais, as características e a geometria das camadas de cobertura da célula experimental, bem como a metodologia adotada nas análises de campo e de laboratório.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos no estudo, através de tabelas e figuras com as correspondentes análises. Os resultados são analisados de forma comparativa para as três camadas de cobertura e para os materiais constituídos, onde cada resultado é apresentado com as respectivas discussões.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões mais relevantes acerca dos principais aspectos abordados na pesquisa, assim como algumas recomendações para o direcionamento de investigações e estudos futuros.

No Apêndice estão apresentados os gráficos referentes aos ajustes dos dados experimentais, produzidos pelo programa computacional STATISTICA® utilizando o modelo de van Genuchten (1980), considerando as trajetórias de secagem e de umedecimento. As integrais definidas utilizadas para o cálculo da histerese também são apresentadas utilizando-se as equações produzidas pelo programa. O Apêndice também apresenta as planilhas onde foram anotadas as informações do ensaio de determinação da sucção e umidade para a confecção das curvas de retenção de água dos solos compactados em laboratório.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS DA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM ATERRO

A disposição adequada de resíduos sólidos urbanos em aterro deve ser estabelecida de forma ordenada e observando normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança bem como minimizar os impactos ambientais adversos.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004a), os resíduos sólidos são “aqueles nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades da comunidade e são de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos de água ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”.

Os resíduos sólidos urbanos são aqueles gerados pela comunidade, com exceção de resíduos industriais, de mineração e agrícolas. Incluem os resíduos de origem doméstica e resíduos procedentes de: comércio, escritórios, serviços, limpeza de vias públicas, mercados, feiras e festejos bem como móveis, materiais e eletrodomésticos inutilizados (TCHOBANOGLOUS et al., 1993). Esses resíduos, denominados vulgarmente de lixo e que constituem numa mistura heterogênea de materiais sólidos que podem ser parcialmente reciclados e reutilizados, vêm se constituindo em um dos maiores problemas da sociedade moderna.

A rigor, os impactos ambientais negativos relacionados ao RSU já devem ter surgido juntamente com o aparecimento dos primeiros aglomerados humanos e foram se intensificando com o surgimento de aldeias, vilas, cidades

e grandes regiões metropolitanas. Atualmente o problema se agrava não só porque são produzidas maiores quantidades de resíduos por habitante, mas também porque esses resíduos possuem cada vez mais substâncias recalcitrantes e que apresentam propriedades tóxicas. Assim, o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos urbanos tem assumido, cada vez mais, um papel relevante no controle da qualidade ambiental.

Diversos processos são utilizados para o tratamento de RSU que incluem reutilização, reciclagem, compostagem, incineração, digestão anaeróbia em reatores e disposição em aterros sanitários. Dentre as práticas atualmente empregadas para o tratamento e disposição final de RSU, o aterro sanitário figura como uma das mais comuns e, mesmo sendo uma técnica bastante antiga, ainda é largamente utilizada, especialmente nos países em desenvolvimento, devido à facilidade de operação, por ser de custo relativamente baixo e, também, em virtude dos aspectos sociais envolvidos.

A prática de aterrar resíduos sólidos como forma de destino final já era adotada há milhares de anos, e o aprimoramento contínuo dessa prática fez surgir o que hoje se conhece por aterro sanitário, que é uma das técnicas mais utilizadas no presente, em virtude de sua relativa simplicidade de execução, tendo como fator limitante a disponibilidade de áreas próximas aos centros urbanos (LIMA, 1995). De acordo com Hilger & Barlaz (2002), o aterro é a alternativa predominante, porque é um método de baixo custo em relação à incineração. Mesmo em países desenvolvidos, nos quais a política de gerenciamento dos resíduos sólidos tem dado ênfase à redução, reutilização e reciclagem, o aterro sanitário continua sendo uma alternativa importante, porque, pelas características dos RSU e por limitações técnicas, sanitárias e econômicas, somente parte desses resíduos podem ser reutilizados ou reciclados e, ainda, a utilização de outras técnicas de tratamento, como incineração e compostagem também são geradoras de resíduos. Sendo assim, em um sistema de gestão integrada de resíduos sólidos, o aterro se constitui em um elemento praticamente obrigatório. De acordo com United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2006), apesar do aumento da

reciclagem, compostagem e incineração, aproximadamente 54% da massa de RSU gerada nos Estados Unidos, no ano de 2005, ainda era depositada em aterros.

O aterro sanitário, que na concepção moderna deve ser visto como local de tratamento de resíduos, é um processo utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, particularmente resíduo domiciliar, que, fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite um confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública. Nos aterros pode-se distinguir processos de tratamento por digestão anaeróbia, digestão aeróbia e digestão semi-anaeróbia (D'ALMEIDA & VILHENA, 2000). No Brasil, a imensa maioria dos aterros sanitários são projetados para tratar os resíduos por digestão anaeróbia.

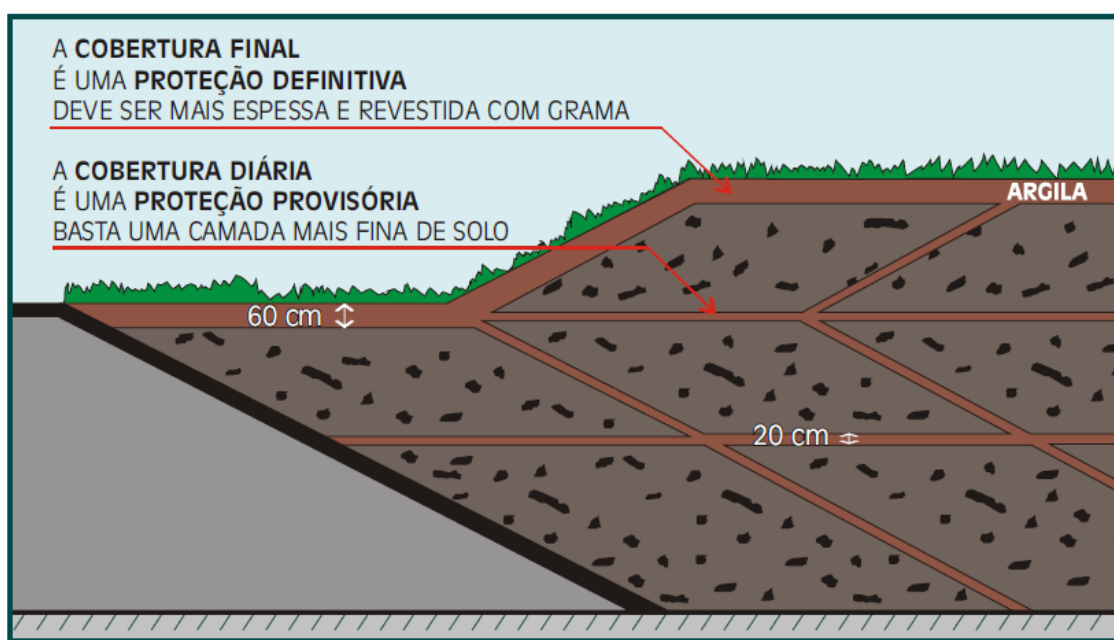
O aterro de RSU é um sistema dinâmico que envolve reações metabólicas num ambiente formado pela massa de resíduos com suas características físicas, químicas e suas inter-relações, formando um sistema complexo. Dentro do ecossistema do aterro de lixo, processos físicos, químicos e biológicos promovem a degradação da fração orgânica de RSU com geração de efluentes líquidos e gasosos, modificando a pressão no interior da massa de resíduos, que é contida por sistemas de impermeabilização de base e de cobertura (ALCÂNTARA, 2007).

Vários estudos têm sido desenvolvidos para melhor compreender os processos de estabilização da fração biodegradável dos RSU sob condições anaeróbias que, de acordo com Warith et al. (2005), podem servir de base para o desenvolvimento de tecnologias que visem acelerar a biodegradação dentro do aterro. Atualmente, os aterros sanitários tendem a serem operados como verdadeiros biorreatores de grandes dimensões, apresentando como vantagens o aumento da densidade efetiva dos resíduos e, conseqüentemente, da capacidade do aterro, a maior eficiência na recuperação de energia devido à maior taxa de produção de gás e à aceleração da decomposição dos resíduos reduzindo o período de monitoramento e o custo global do empreendimento (BARLAZ et al., 1990; REINHART et al., 2002; BENSON et al., 2007).

2.2 CAMADA DE COBERTURA DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

As camadas de cobertura têm como objetivo principal prevenir a infiltração de água para a massa de resíduos, assim como ser capaz de controlar as emissões de biogás, sendo a permeabilidade um dos principais parâmetros que fornecerá informações relativas ao comportamento da camada de cobertura ao longo do tempo. A Figura 2 apresenta de forma esquemática, um aterro sanitário, com detalhes das camadas intermediárias e a camada de cobertura definitiva.

Figura 2 - Representação da camada de cobertura definitiva e das intermediárias de um aterro sanitário



Fonte: CONDER-BA, 2013

Dentre as principais características geotécnicas que podem influenciar na permeabilidade e devem ser observadas na execução das camadas de cobertura, são citadas: umidade de compactação, estrutura do solo, grau de

saturação, sucção do solo e conteúdo volumétrico de ar, dentre outros fatores (LAMBE, 1958; MITCHELL et al. 1965 citado por BOSCOV, 2008; DANIEL, 1990; MACIEL, 2003; VIEIRA, 2005, TEIXEIRA, 2008; MARIANO, 2008).

No Brasil, a maioria dos aterros de RSU possui cobertura com camada homogênea de solo compactado, em grande parte usando solos argilosos. Esses materiais são geralmente utilizados devido as suas características de baixa permeabilidade à água e ao baixo custo do material, principalmente quando as jazidas se encontram próximas às áreas de aterro (MARIANO 2008). O sistema de cobertura deve minimizar a infiltração de água no aterro, exigir pouca manutenção, não estar sujeito à erosão, acomodar os assentamentos sem grandes deformações e possuir coeficiente de permeabilidade inferior ao da área do aterro.

Para Qian et al, (2002), as camadas de cobertura são sistemas que tem por objetivo minimizar a infiltração e a erosão. E para atingir esses objetivos devem ser compostas de pelo menos 450 mm de espessura de solo que tenha permeabilidade igual ou menor que a condutividade hidráulica da camada de base ou subsolo presente, ou a permeabilidade não ser maior que $1,0 \times 10^{-7}$ m/s; além de possuir uma camada de prevenção de erosão de no mínimo 150 mm de material que seja capaz de sustentar o crescimento de plantas nativas.

2.2.1 Camada Convencional

Zornberg et al, (2003) observeram que camadas de cobertura confeccionadas, apenas com solos argilosos não funcionam adequadamente em regiões áridas. Esta afirmação teve como base o aparecimento de fissuras na camada monitorada, pois, ao longo do tempo ocorreram modificações significativas nos principais aspectos que afetam a eficiência da camada de cobertura e que as características iniciais do projeto não foram mantidas, provocando aumento do custo de manutenção do aterro. Os autores relatam que este tipo de camada apresentam desempenho satisfatório em climas úmidos.

Em seus estudos, Fourie e Moonsammy (2002) relatam que, em locais de clima semi-árido, árido ou em locais com longos períodos de seca, o aparecimento de fissuras, devido à secagem, podem aumentar a condutividade hidráulica do sistema, tornando-o ineficiente. E que, o desempenho satisfatório das camadas resistivas tem sido observado em climas úmidos temperados, onde o excesso de chuva tende a manter saturada a cobertura de argila compactada.

Nos EUA, a regulamentação corrente para camada de cobertura está baseada no emprego do conceito de barreiras que utilizam o princípio de camadas resistivas, isto é, uma camada que tenha baixa condutividade hidráulica saturada. Esse conceito geralmente é alcançado com a utilização de camadas de argila compactada ou camadas de argila com geossintético (GCL) com ou sem geomembrana (ABICHOU et. al. 2003).

2.2.2 Barreira Capilar

Catapreta (2008) relata que barreiras capilares são sistemas de cobertura final de aterro de resíduos sólidos, formados por uma camada de solo fino de baixa permeabilidade, semelhante ao utilizado na camada convencional, sobreposta a uma camada de solo granular, geralmente cascalho ou areia que impede a passagem da água infiltrada para o depósito de resíduos. Para Oliveira e Marinho (2007) a camada superior funciona como uma esponja que retêm parte da água da chuva que posteriormente é liberada para a atmosfera por evaporação.

Zornberg et al, (2003) comenta que este tipo de camada é mais adequada em locais de clima árido, devido a capacidade de armazenamento de água no solo ser limitada. Em locais de muita precipitação o funcionamento não satisfaz aos critérios de infiltração de líquidos, causando taxas excessivas para a massa de resíduos. Um fator importante a se considerar é a necessidade da instalação adequada da camada de cobertura que leve em consideração um projeto apropriado, de acordo com os materiais a serem

utilizados, além de medidas de controle de qualidade requeridas, de forma que se analisem, para as camadas alternativas, os efeitos dos fatores ambientais ao longo do tempo.

2.2.3 Camada bioreativa

As camadas de coberturas denominadas metanotróficas ou oxidativas incorporam o conceito de camadas bioreativas ou biocoberturas e estão sendo utilizadas como alternativa de gerenciamento para as emissões de gases produzidos em aterros sanitários. Segundo o IPCC (2007) elas representam uma alternativa economicamente atraente para o tratamento de emissões fugitivas de metano (CH_4).

Essas camadas de cobertura têm como características a utilização de materiais (geralmente compostos orgânicos) para criar condições adequadas no desenvolvimento de micro-organismos que consomem CH_4 , sendo denominadas mais especificamente de biocoberturas (HUBER-HUMER et al., 2009).

Alguns materiais vêm sendo testados tanto em laboratório quanto em campo, com a finalidade de reduzir as emissões de CH_4 , tais como composto orgânico (produtos resultantes da compostagem), produtos similares proveniente de tratamento mecânico biológico de resíduos (MBT), aparas de madeira, palha ou casca de fruta e materiais inorgânicos, cinzas, areias e solos, como também misturas de materiais orgânicos e inertes (BORJESSON, 1996; BORJESSON e SVENSON, 1997; MAURICE e LAGERKVIST, 2004; POWELSON et al., 2006; ROSE et al., 2007; AIT-BENICHOU et al., 2008; JUGNIA et al., 2008; BOHN e JAGER, 2009; PARK et al., 2009).

A camada bioreativa favorece o processo de oxidação do metano o que consiste na conversão de CH_4 para H_2O , CO_2 e biomassa através da atividade microbiana, pois este tipo de camada propicia um ambiente onde estão presentes CH_4 e O_2 ao mesmo tempo.

Essa camada pode ser muito importante para aterros de pequeno e médio porte, onde a exploração do biogás não é viável economicamente. Nesses casos a cobertura oxidativa tem um papel ainda mais relevante para a redução de emissões principalmente no Brasil, onde segundo o IBGE (2010) ainda existem 50,2% dos municípios lançando seus resíduos em lixões e onde os pequenos aterros não são tecnicamente operados ou monitorados.

2.2.4 Aspectos da camada de cobertura da célula experimental da Muribeca

Por meio de ensaio de placa de fluxo nas camadas de cobertura da célula experimental do aterro da muribeca/PE, Maciel (2009) verificou que as emissões superficiais na Barreira Capilar e na Camada Metanotrófica foram 10 vezes inferiores que as emissões da Camada Convencional, na estação seca, devido a presença da camada drenante sob a cobertura da Barreira Capilar, além da existência da mistura Solo-Composto que facilitou a oxidação do CH_4 na Camada Matanotrófica. Com relação ao perfil de umidade, verificou que a Camada Metanotrófica apresentou umidade média superior à Camada Convencional e à Barreira Capilar, devido ao maior teor de matéria orgânica na Camada Metanotrófica, proporcionando maior retenção de umidade.

Lopes (2011) observou que a adição de solo ao composto orgânico em duas proporções alterou as características físico-químicas dos materiais, pois este, apresentaram características de silte de alta plasticidade (MH), com alteração nos limites de consistência. Observou ainda que a capacidade diferencial de umidade dos dois materiais foi modificada em função da proporção, em volume, de composto orgânico adicionado. Para a adição de 50% em volume de composto orgânico ao solo essa capacidade aumentou para 4% e para a adição de 25% de composto orgânico ao solo passou para 3%.

Lopes (2011) verificou que devido às diferenças de compactação em campo a barreira capilar apresentou uma permeabilidade saturada 30 vezes

superior às camadas convencionais. Utilizando-se a similaridade da curva de sucção matricial em função do grau de saturação para prever o comportamento da curva de permeabilidade ao ar, as duas camadas apresentaram formatos semelhantes com comportamento dividido em três partes. A permeabilidade ao ar máxima ocorreu para valores de saturação inferior a 65% e 75% na barreira capilar e na camada convencional, respectivamente. Até 90% de saturação houve um decréscimo lento à permeabilidade ao ar com aumento da saturação e a partir de 90% é que a permeabilidade ao ar decresceu drasticamente com pequenos aumentos de umidade, atingindo seu valor mínimo ou próximo de zero para as duas camadas.

Estudando as emissões de biogás, Oliveira (2013) observou que, para todas as camadas estudadas, os parâmetros inerentes ao biogás produzidos pelos resíduos enterrados, principalmente a pressão, possuem uma nítida correlação com as emissões fugitivas pelas camadas. E que, os períodos secos ou chuvosos provoca maior ou menor dificuldade na emissão de biogás por estas camadas.

2.2.5 Síntese das funções da camada de cobertura

As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, um resumo das funções e recomendações para a construção de uma camada de cobertura de aterro de resíduos sólidos urbanos. Alguns cuidados especiais que deve atender as camadas de coberturas devem ser observados, como por exemplo:

- O ciclo de secagem e umedecimento pode provocar o surgimento de fissuras propiciando o aumento da condutividade à água e aos gases, aumentando o custo de manutenção, USEPA (2003).
- O desempenho a longo prazo de um aterro sanitário está diretamente relacionado a um sistema de cobertura eficiente e eficaz requerendo monitoramento, Vieira (2005), Oliveira e Marinho (2007) e Catapreta (2008).

Tabela 1 - Funções da camada de cobertura de aterro sanitário

Função	Referências
• Reduzir ou controlar a entrada de líquido no interior do corpo do aterro • Reduzir ou controlar a saída de gases do corpo do aterro para a atmosfera • Isolar o resíduo do ambiente • Minimizar a geração de lixiviado após o fechamento do aterro restringindo a infiltração de água • Auxiliar no escoamento superficial da água • Diminuir o espalhamento do resíduo e acomodar possíveis recalques • Diminuir possíveis riscos de incêndios e controlar proliferação de vetores	Fourie e Moosammy (2002), Abichou et al (2003), Huse (2007) e Mariano (2008) Abichou et al (2003), Huse (2007) e Mariano (2008) e Teixeira (2008) Mariano (2008) Teixeira (2008) Fourie e Moosammy (2002) e Teixeira (2008) Abichou et al (2003) e Teixeira (2008) Abichou et al (2003) e Teixeira (2008)

Tabela 2 - Requisitos ou recomendações que deve atender uma camada de cobertura

Requisito	Condições	Referências
• Baixa condutividade hidráulica saturada. • O solo não deve apresentar a formação de micro e macroestrutura em regiões de clima árido e semi-árido. • Em resíduos não perigosos a condutividade hidráulica do material de cobertura do aterro (K_{cc}) deve ter condutividade hidráulica menor do que a camada de base (K_{cb}). • Espessura de camadas evapotranspirativas.	$K < 10^{-7}$ m/s Solo não deve apresentar micro e macrofissuras $K_{cc} < K_{cb}$ 0,15 m cobertura vegetal e 0,60 m a segunda camada	USEPA (2003), Catapreta (2008) USEPA (2003) USEPA (2007) Catapreta (2008)

2.2.6 Composto orgânico utilizado em camada de cobertura

A compostagem é um processo biológico de biodegradação e biossíntese aeróbio de biomoléculas orgânicas com produção de gás carbônico, água e biomoléculas que farão parte da constituição dos novos organismos e de produtos de seu metabolismo (Glória, 1992). No fim deste processo o material, que não apresenta condições de ser incorporado no solo,

adquire características físicas e químicas que propiciam efeitos benéficos sobre as propriedades do solo quando nele incorporado.

Para que os microrganismos promovam as transformações dos resíduos, parte da energia gerada durante o processo de compostagem é usada para o crescimento da população microbiana e o restante é liberado como calor. A atuação e o crescimento da população de microrganismos decompositores dependem: da granulometria, umidade, arejamento, relação carbono/nitrogênio (C/N) do material a ser compostado, pH e das dimensões da pilha de compostagem. Segundo Costa (1985), desde que se tenha condições ótimas para o desenvolvimento microbiano a compostagem acelera a decomposição do material orgânico.

Uma granulometria pequena do material provoca um aumento na superfície específica facilitando o ataque pelos microrganismos e favorece a homogeneização do material em termos de densidade, composição e temperatura, no entanto partículas demasiadamente pequenas prejudicam o processo uma vez que a circulação de água e de oxigênio é comprometida aumentando o risco de aparecimento de anaerobiose (KIEHL, 2004).

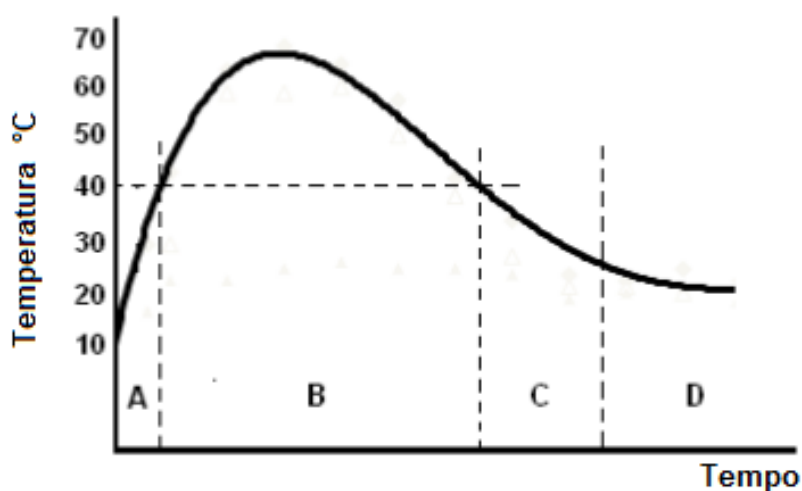
Uma umidade de 50 a 60% é considerado indicado para a compostagem. Abaixo de 35-40% de umidade a decomposição da matéria orgânica é fortemente reduzida e abaixo de 30% de umidade é praticamente interrompida. Uma umidade superior a 65% retarda a decomposição, além de provocar maus odores em zonas de anaerobiose localizadas no interior da pilha de compostagem (BRITO, 2006).

Kiehl (1985) recomenda que a relação C/N, para uma rápida e eficiente compostagem, deve estar entre os limites 26 e 35. Em situações em que a relação C/N é superior a 35 os materiais mais comumente usados na correção são: resíduos de matadouros, fertilizantes minerais nitrogenados, tortas vegetais e esterco.

A curva padrão de temperatura apresentada na Figura 3, indica que a primeira fase é a fase mesófila (A), sendo caracterizada pela faixa de

temperatura ótima de 40°C. Prosseguindo com a elevação de temperatura inicia-se a fase termófila (B), que corresponde à fase mais longa do processo e apresenta temperaturas ótimas na faixa de 50-60°C. Com a queda de temperatura uma nova fase mesófila (C) é originada, sendo que nesta fase o composto já se encontra bioestabilizado. Na última fase (D), a temperatura volta a se equilibrar com a temperatura ambiente e o processo atinge a chamada fase de maturação ou cura, em que ocorrem reações que levam à humificação do produto (PEREIRA NETO; STENFIFORD, 1992).

Figura 3 - Curva padrão de temperatura para o processo de compostagem



Fonte: PEREIRA NETO; STENFIFORD, 1992

LOPES (2011) observou que o composto orgânico utilizado na mistura de solo apresentou uma relação carbono/nitrogênio (C/N) inferior a 18 e um pH básico acima de 7,5, o que demonstrou um composto estabilizado. Também observou que a adição de composto ao solo alterou propriedades físicas tais como aumento da aeração através do aumento da porosidade, aumento da permeabilidade e da capacidade de retenção de água e diminuição do peso específico seco máximo.

De acordo com Pereira (2010) a matéria orgânica compostada se liga às partículas (areia, silte e argila) formando pequenos grânulos que ajudam na retenção e drenagem da água, além de melhorar a aeração. Pereira Neto (2007) afirma que a vantagem da mistura solo e composto orgânico seria reduzir os efeitos da erosão e suas consequências no solo.

Huber-Humer et al (2009) verificaram que a utilização de composto orgânico como substrato nas camadas de cobertura, altera as propriedades específicas em relação ao solo convencional no que diz respeito à permeabilidade ao gás, as características físicas, incluindo a capacidade de retenção de água e a textura e consequentemente sobre a atividade de oxidação do CH₄. O composto com alto teor de matéria orgânica fornece uma elevada superfície específica, uma alta capacidade de retenção de água combinada com adequada porosidade e textura para a troca gasosa (significando um elevado volume de poros cheios de ar, mesmo em maiores umidades) e baixa condutividade térmica.

2.3 COMPACTAÇÃO

O processo de compactação tem o objetivo de melhorar e estabilizar o solo através de processo manual ou mecânico, visando reduzir o volume de vazios, aumentar o entrosamento entre os grãos e tornar o aterro mais homogêneo melhorando as suas características de resistência, deformabilidade e reduzindo a permeabilidade.

Barden (1965) considera que a oclusão ocorre para graus de saturação em torno de 90%, Lloret e Alonso (1980) e Chang e Duncan (1983) consideram que ocorre para graus acima de 85%. A condição de oclusão para Fredlund (1979) ocorre entre 85% e 90% e, neste caso, as teorias convencionais de solos saturados podem ser aplicadas, considerando o fluido intersticial como compressível, Fredlund (1976). O processo de deformabilidade dos solos argilosos compactados foi classificado por Barden et al (1969), em função do grau de saturação, em cinco grupos. Alonso e Lloret (1985) classificaram a

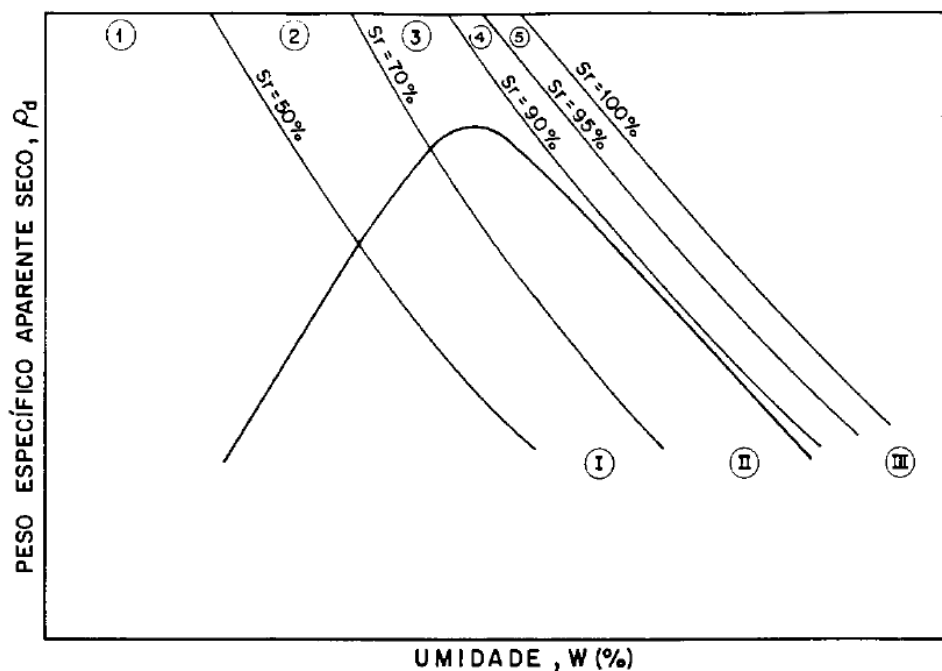
deformabilidade dos solos não saturados na condição não drenada em três tipos, também em função do grau de saturação. A Figura 4 apresenta a curva de compactação e as curvas de saturação para melhor visualização deste conceito. A Tabela 3 apresenta de forma resumida como flui o ar e a água e, o processo de deformação do solo com o grau de saturação em solo compactado, segundo Barden (1965) e Lloret (1985).

Fortes (2002) observou que para uma mesma energia de compactação, solos de granulometria distintas apresentam diferentes umidades ótimas e massa específica aparente seca, sendo que quanto maior o valor da umidade ótima menor é a massa específica aparente seca. Para solos arenosos a umidade ótima apresenta valores entre 7% a 12%, e massa específica na ordem de 20 kN/m³. Nos solos siltosos, a umidade ótima varia entre 18% a 25% e a massa específica é da ordem de 16 kN/m³. Sendo os solos argilosos os que apresentam maior umidade ótima variando de 30% a 40%, e menor massa específica, situando-se em torno de 13 kN/m³.

É de fundamental importância a determinação da umidade ótima, pois quando ocorre a compactação a baixas umidades não se consegue uma significativa redução de vazios visto que ocorre muito atrito entre as partículas, além de ser pouco trabalhável. A adição de água ao solo até a umidade ótima, provoca efeito lubrificante entre as partículas, fazendo com que estas se acomodem em um arranjo mais compacto consequentemente apresentando maiores valores de massa específica (KOHLE, 2009).

A curva de compactação mais comumente encontrada nos solos, tem a forma de sino, Figura 5a. Entretanto, muitos ensaios em laboratório, dependendo da umidade do solo seco ao ar, da quantidade de água adicionada e do tempo de equalização da umidade, o solo pode apresentar outras formas de curva de compactação, Oliveira & Ferreira (2012).

Figura 4 – Curva de compactação e graus de saturação



Fonte: FERREIRA,1995

A compactação é empregada em diversas obras de engenharia, como: aterros para diversas utilidades, camadas constitutivas dos pavimentos, construção de barragens de terra, preenchimento com terra do espaço atrás de muros de arrimo e reenchimento das inúmeras valetas que se abrem diariamente nas ruas das cidades. O tipo de obra e a granulometria do solo disponível vão ditar o processo de compactação a ser empregado, a umidade em que o solo deve se encontrar na ocasião e a densidade a ser atingida.

Quando se compacta com umidade baixa, o atrito entre as partículas é muito alto e não se consegue uma significativa redução dos vazios. Para umidade mais elevadas, a água provoca um certo efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto.

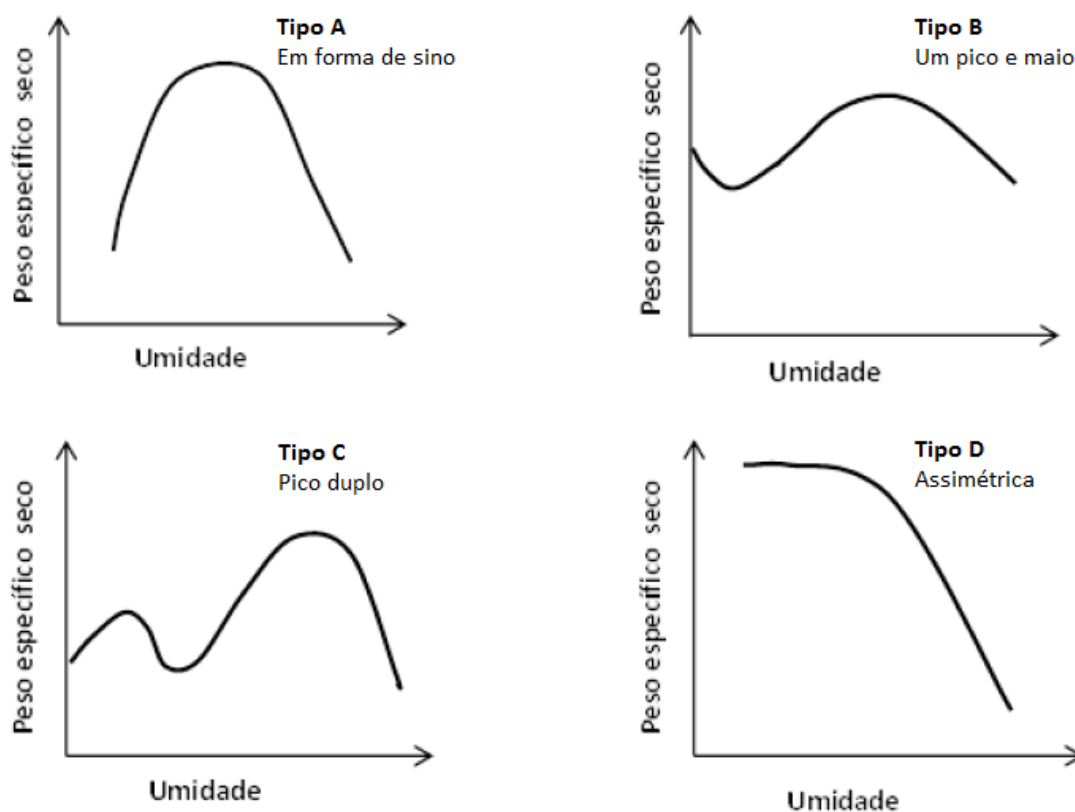
Tabela 3 – Características de compressibilidade

Grau de saturação Referências	1	2	3	4	5
	Sr < 50%	50% < Sr < 90%	Sr Associado à umidades próximas da ótima	90% < Sr < 95%	Sr > 95%
Barden (1965) , consolidação de argila compactada.	- Água ligada ao esqueleto sólido por forças capilares. - Ar contínuo. - Só o ar flui na consolidação.	- Só o ar flui. - Ar contínuo.	Água e ar fluem juntos ou separados.	- Ar ocluso. - O ar não flui separadamente, mas sim com a água. - Ar ligado ao esqueleto sólido.	- A água que flui no solo é praticamente incompressível. - Ar preso ao esqueleto sólido.
Alonso e Lloret (1985) , condição não drenada.	I	II		III	
	Sr < 70%	70% < Sr < 90%		Sr > 90%	
	- A rigidez da mistura ar e água é praticamente nula. - A deformação do solo depende da deformação do esqueleto sólido.	- A compressibilidade do esqueleto sólido é da mesma ordem de grandeza que a mistura água-ar. - A rigidez do esqueleto sólido tem influência na deformação.		- A mistura água-ar é muito mais rígida do que o esqueleto sólido. - O acréscimo de pressão na água é igual ao acréscimo no ar é igual ao carregamento. - As deformações instantâneas são menores à medida que diminui o grau de saturação.	

Fonte: FERREIRA, 1995

A Figura 5 apresenta quatro tipos de curvas de compactação publicadas por Lee e Suedkamp (1972), após a análise de 35 curvas de compactação de diversas amostras. A curva tipo A, é encontrada nos solos argilosos com Limites de Liquidez entre 30% e 70%, apresentando um único pico. Solos com Limites de Liquidez menores do que 30% são caracterizados pelas curvas do tipo B e C, onde são denominadas respectivamente de curvas de um pico e meio e curvas de pico duplo. As curvas assimétricas ou curvas do tipo D não apresentam pico definido, e representam materiais com Limites de Liquidez maiores do que 70%.

Figura 5 – Formas de curvas de compactação encontradas em diferentes tipos de solos

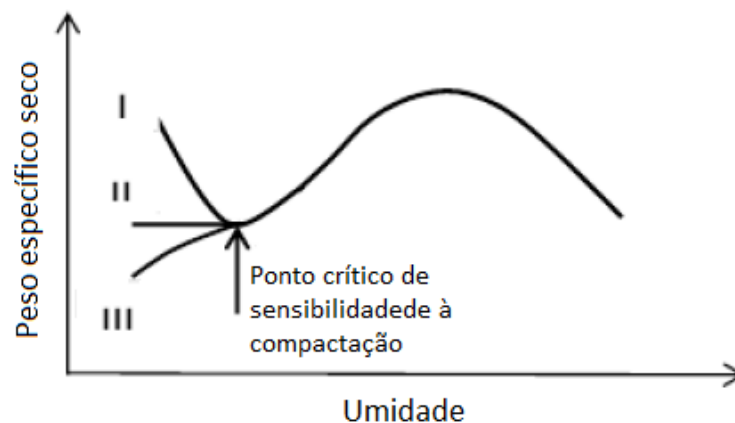


Fonte: LEE & SUEDEKAMP, 1972

Maccarini et al (1988) utilizaram o conceito de ponto crítico de sensibilidade à compactação apresentado em Faure (1980), para representar três tipos de curvas de compactação diferenciadas no ramo ascendente, Figura

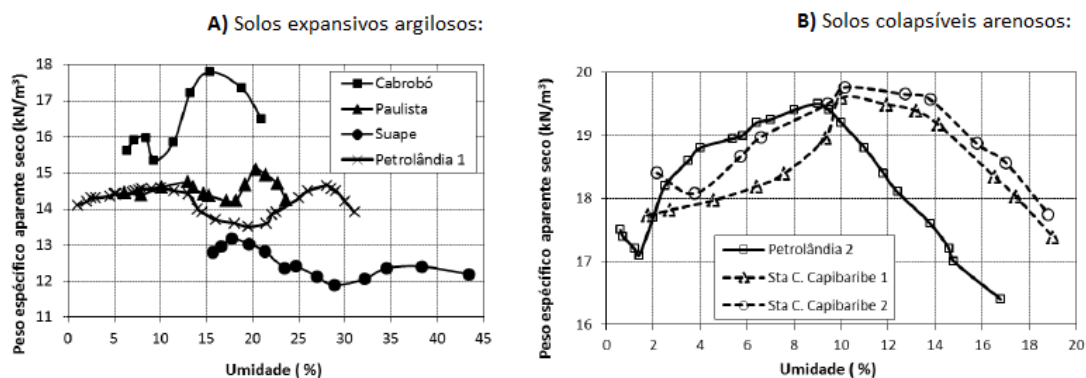
6. Nas curvas do tipo I, à medida que se aumenta a umidade diminui o peso específico seco do solo até o ponto crítico de sensibilidade à compactação. Nas do tipo II, ocorre que os pesos específicos aparentes secos são praticamente constantes, quando se varia a umidade até o ponto crítico. Nas curvas do tipo III há um acréscimo do peso específico aparente seco quando se aumenta a umidade. A Figura 7, mostra as diferenças das curvas de compactação entre os solos expansíveis argilosos e os solos colapsíveis arenosos apresentadas em Oliveira e Ferreira (2012).

Figura 6 – Modelo de comportamento da curva de compactação para umidade à esquerda do ramo ascendente



Fonte: Maccarini *et al* (1988).

Figura 7 – Curvas de compactação de solos expansivos argilosos e colapsíveis arenosos



Fonte: OLIVEIRA & FERREIRA, 2012

A relação entre as três fases do solo (sólida, líquida e gasosa) é de fundamental importância para se estudar o comportamento hidromecânico dos solos. Os volumes ocupados pelo ar, pela água e pelas partículas sólidas podem se encontrar num dos seguintes arranjos:

- as bolhas de ar encontram-se totalmente envolvidas pela água e pelas partículas sólidas, as bolhas encontram-se oclusas e não se comunicam, isto ocorre quando o grau de saturação é elevado, acima de 85% ou 90%, sendo esta a razão pela qual a curva de compactação passa a decrescer quando este grau de saturação é atingido;
- o ar todo intercomunicado, assim como a água, formando canais que se entrelaçam no espaço;
- o ar todo interconectado e a água se concentrando nos contatos entre as partículas, além de molhá-las por delgada camada de água adsorvida, isto ocorre quando o grau de saturação é muito baixo.

2.3.1 Controle convencional de compactação

O controle de compactação em campo é feito, tradicionalmente, determinando-se a massa específica aparente e a umidade do material compactado, para a determinação do grau de compactação da camada. O grau de compactação é determinado dividindo-se a massa específica aparente seca em campo pela massa específica aparente seca máxima, obtida na curva de compactação. Caso o grau de compactação atinja o valor preestabelecido em projeto, se aprova a camada, caso contrário, a camada é reprovada. A determinação da umidade em campo serve tanto para a obtenção da massa específica aparente seca quanto para a comparação com a umidade ótima.

2.3.2 Controle de compactação com o uso do penetrômetro DPL

Segundo RÖHM (1984), a penetração de uma haste no terreno é uma técnica que vem sendo utilizada há muito tempo para se obter medidas de

resistência das camadas de um terreno. Engenheiros e arquitetos valiam-se da introdução de varas de madeira ou hastes metálicas no solo já no início do século XIX com o objetivo de comparar locais construídos com outros a serem explorados, baseados na resistência oferecida pelo terreno à introdução da haste. A evolução deste processo rudimentar deu origem aos penetrômetros hoje usados principalmente na obtenção de informações da subsuperfície em locais onde a amostragem ou outros tipos de determinações tornam-se difíceis ou até mesmo impossíveis, economicamente inviáveis ou ainda incompatíveis com o ritmo de construção de uma obra. Basicamente o equipamento consiste de uma haste metálica munida de uma ponta que pode ser introduzida no terreno através de um processo dinâmico ou estático.

Clauss (2014) apresenta uma proposta para avaliar o grau de compactação e a homogeneidade de uma camada de solo compactada utilizando o penetrômetro de impacto DPL (Dynamic Petermeter Light) através do seguinte procedimento:

1º Passo - realizar ensaio de compactação em laboratório e à medida que se determina a umidade e o peso específico úmido do solo, avalia-se, utilizando o DPL, o valor médio do deslocamento por impacto (DN) até dois terços (2/3) da altura da camada;

2º Passo - em laboratório calcula-se o grau de compactação (GC) em cada determinação de umidade e peso específico aparente seco e traça-se a curva de grau de compactação em função do deslocamento por impacto (1º Passo), estabelecendo a melhor equação que ajusta os pontos em função do coeficiente de correlação;

3º Passo – em campo e durante o processo de compactação, seleciona cinco seções transversais ao eixo de compactação, determina-se a umidade do solo e o deslocamento por impacto, com o DPL, em toda a espessura da camada compactada no momento do espalhamento e regularização da camada para a compactação e a cada quatro passadas do rolo pé de carneiro;

4º Passo – com os deslocamentos por impactos obtidos com a profundidade em cada passada do rolo compactador (3º Passo), calcula-se por meio da equação estabelecida no 2º Passo o grau de compactação, obtendo-se a curva grau de compactação que relaciona a profundidade com o número de passadas do rolo compactador;

5º Passo – fazer análise dos resultados, comparando-se o que foi obtido em campo com os especificados para a camada no projeto e apresenta-se o parecer.

2.4 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

O estudo do movimento da água no solo pode ser caracterizado através de definições e operações que envolvem o conteúdo e a energia da água no solo. Importantes exemplos disto são dados para pelas equações de Darcy-Buckingham e de Richards, cujas soluções dependem do conhecimento da curva de retenção, a qual é capaz de fornecer informações a respeito da energia ou potencial da água no solo.

A curva de retenção da água no solo relaciona o potencial mátrico (ψ) e a umidade do solo (θ), o que a torna bastante útil para a estimativa de valores de potenciais mátricos a partir de valores de umidade, que são mais fáceis de serem estimados (COILE, 1953; REGINATO & VAN BAVEL, 1962; DANE et al., 1992; JALBERT & DANE, 2001).

O conhecimento do potencial matricial da água nos solos, mediante a curva de retenção, pode ser associado a outros parâmetros do solo e ambientais para avaliar processos hidrológicos, a condutividade hidráulica e os potenciais de expansão ou retenção do solo (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003), o que permite melhores intervenções antrópicas relativas à vegetação e à produção agrícola, assim como no que concerne à estabilidade de obras de terra (DIENE; MAHLER, 2007).

A curva de retenção, uma vez que relaciona o potencial matricial e a umidade do solo, é parte fundamental da caracterização das propriedades hidráulicas deste (CICHOTA; VAN LIER, 2004). A curva faz-se necessária em estudos de balanço e disponibilidade de água às plantas, de dinâmica da água e solutos no solo e de infiltração (TORMENA; SILVA, 2002). As equações de Darcy-Buckingham e Richards, que permitem quantificar o movimento da água no solo, por exemplo, são modelos que dependem do conhecimento da curva de retenção da água no solo para suas soluções (CÁSSARO et al., 2008).

A natureza da relação sucção-umidade ou sucção versus grau de saturação está diretamente associada à composição granulométrica, estrutura do solo e história de tensões.

De uma forma geral a geometria dos poros, o percentual e composição mineralógica da fração fina são decisivos na posição relativa, forma e inclinação da curva de retenção de água no solo. O teor de umidade em solos submetidos a pequenos valores de sucção depende principalmente do efeito capilar e da distribuição de poros, portanto, de sua estrutura. Por outro lado, em solos submetidos a elevados valores de sucção, quando a água retida deve estar praticamente adsorvida às partículas, a importância da textura e da superfície específica do material é superior à da estrutura. Isto explica o fato de que, para um determinada sucção, os valores do teor de umidade em argilas são superiores a dos siltes e areias.

Os solos arenosos com granulometria uniforme apresentam grande variação de umidade para pequenas variações de sucção, pois, somente uma pequena quantidade de água está adsorvida às partículas. Em um solo bem graduado cuja fração fina pode reter uma maior quantidade de água, a variação de umidade com a sucção é mais suave.

A inclinação da curva característica será chamada de capacidade diferencial de umidade (C), sendo obtida através da Equação 01:

$$C = \frac{\Delta w}{\Delta \log \psi} \quad \text{Equação (01)}$$

Onde:

Δw = variação da umidade gravimétrica;

$\Delta \log \psi$ = variação do logaritmo da sucção.

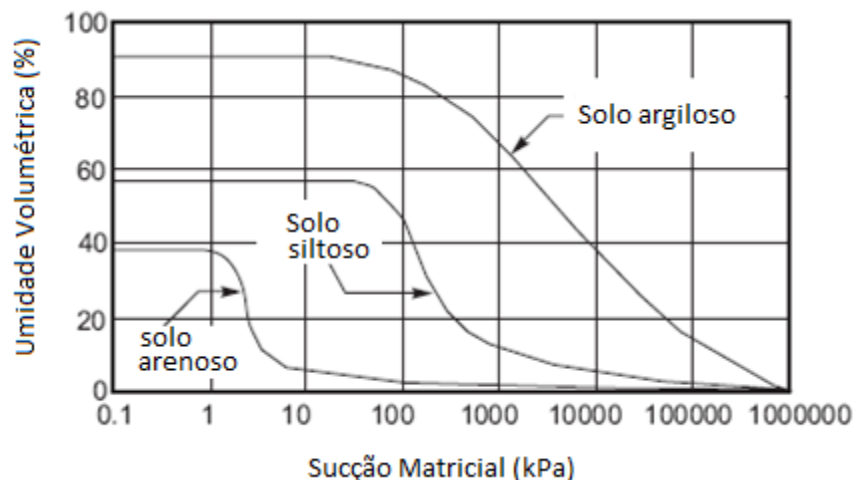
O valor de (C) tem uma grande importância no movimento da água em meios não saturados, representando a quantidade de água ganha ou perdida pelo solo devido à variação do potencial de água.

Com relação às variações volumétricas na ausência de cargas externas, Croney (1952) indica a complexidade que se soma a interpretação da relação sucção-umidade, onde a densidade seca ou o índice de vazios varia ao longo da curva. Wood (1979) citado por Jucá (1990) afirma que nestes solos a relação sucção-umidade representada apenas pela umidade gravimétrica é incompleta. Segundo afirma o autor, é necessário conhecer a variação do índice de vazios quando se utiliza a umidade gravimétrica. Por outro lado, utilizando-se o grau de saturação (S) ficam incluídos os dois anteriores.

2.4.1 Influência do tipo de solo sobre a curva de retenção de água

Materiais porosos, em geral, possuem a capacidade de reter líquidos. A forma da curva de retenção varia de acordo com o tipo de solo analisado. A Figura 8 ilustra o aspecto geral da curva de retenção da água dos solos argilosos, siltosos e arenosos.

Figura 8 - Curvas de retenção de água típicas de diferentes texturas de solos



Fonte: FREDLUND & XING, 1994

Existem fatores físicos e químicos que podem afetar a retenção da água pelo solo, alterando o formato de suas curvas de retenção. RAWLS et al. (2003) avaliaram o efeito da matéria orgânica do solo nas curvas de retenção e mostraram que a adição de carbono orgânico as afeta de maneira distinta para diferentes potenciais e texturas. MUELLER et al. (2003), a partir de dados de curva de retenção, estimaram valores ótimos de umidade para os quais o solo pode ser manejado de forma adequada no cultivo agrícola. HODNETT & TOMASELLA (2002), com base em ajustes da curva de retenção, desenvolveram uma nova função de pedotransferência para retenção da água em solos tropicais.

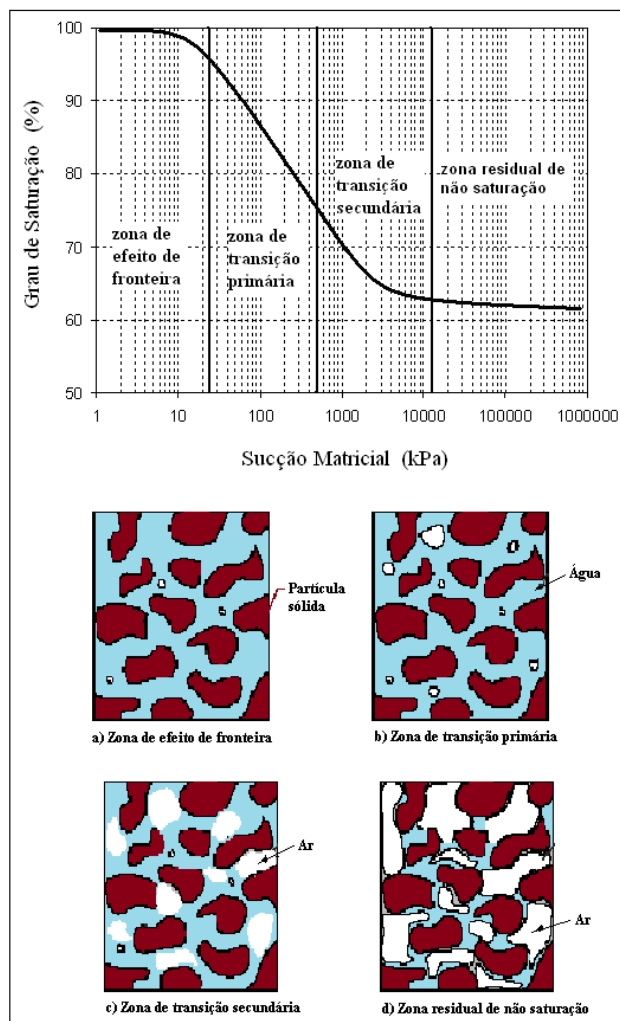
A curva de retenção de água nas areias apresenta patamares. Como as areias retêm água por capilaridade, a existência de faixas uniformes de vazios que perdem água quando se aplica uma determinada sucção leva à formação desses patamares. Podem ocorrer diversos patamares conforme a quantidade de faixas uniformes de vazios. O mesmo fenômeno não é observado na maioria dos solos argilosos, pois estes, além de apresentarem maior heterogeneidade nos tamanhos dos poros, com conseqüente melhor distribuição granulométrica e porosimétrica, também retêm água por fenômenos eletroquímicos (Fredlund, 1996).

Em solos argilosos o mecanismo de retenção de água ao longo da curva varia de acordo com o nível de sucção. Para baixos valores de sucção, a retenção depende mais do efeito capilar e, portanto, da estrutura do solo. Para valores elevados de sucção, onde a quantidade de água presente no solo se reduz, os fenômenos de adsorção passam a predominar sobre os efeitos capilares. Nesta situação, a composição mineralógica do solo passa a ter maior importância como fator controlador do comportamento do solo (Fredlund, 1996).

Diversos autores dividem a curva característica de um solo em diferentes regiões, de acordo com o fenômeno de retenção envolvido. Fredlund (1996) divide a curva característica, em quatro regiões, Figura 9.

- a) região de fronteira: o solo se apresenta saturado, sem a fase gasosa livre;
- b) região primária de transição: após a dessaturação, a fase líquida começa a perder sua continuidade, dando espaço à entrada de ar. A dessaturação é bastante rápida predominando os efeitos capilares no aumento da sucção;
- c) região de transição secundária: apresenta o mesmo comportamento da região anterior, porém com o predomínio de forças de adsorção sobre forças capilares;
- d) região residual: a fase líquida é descontínua, aparecendo como água adsorvida, e a fase gasosa é contínua ocupando a maior parte dos poros. Esta é a região de umidade residual, onde, para a retirada de uma quantidade mínima de água, é necessário um grande aumento na sucção.

Figura 9 - Variação da quantidade de água em diferentes áreas da curva de retenção

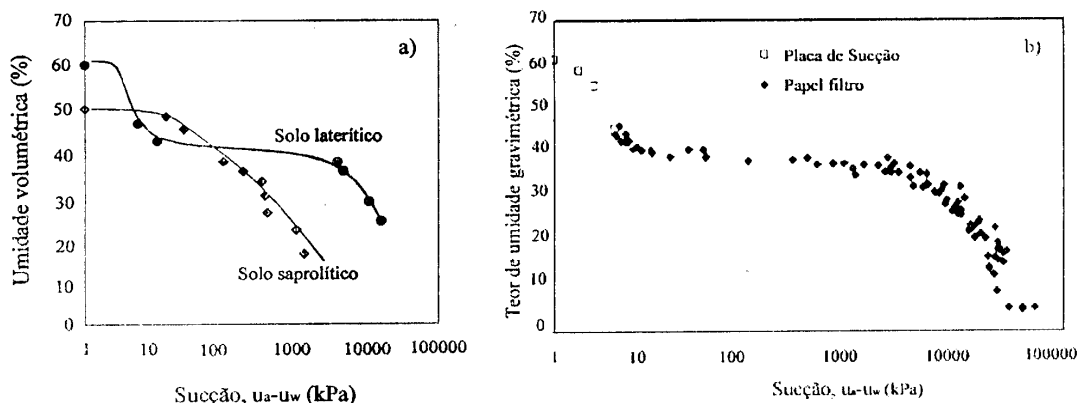


Fonte: Vanapalli et al., (1996)

Os solos tropicais não apresentam necessariamente comportamento similar às curvas de retenção de água apresentada na Figura 10. Devido à estrutura e à distribuição dos poros nestes solos, suas curvas de retenção de água podem apresentar patamares, causados pela ausência de poros que definem a faixa de sucção para este patamar. Futai, 2002, apud Cardoso Junior, 2006, mostrou que um solo laterítico, mesmo sendo mais argiloso que outro solo saprolítico, pode apresentar valor de sucção menor no ponto de entrada de ar (Figura 10a). Feuerharmel et al. (2004) apresentaram a curva de retenção de água para um solo coluvionar. A curva sugere comportamento

intermediário entre uma areia e uma argila com formato semelhante a uma “sela”, (Figura 7, b). Esse formato de curva é semelhante ao encontrado por Futai (2002) para uma argila laterítica superficial.

Figura 10 - Curvas de retenção de água para solos tropicais



Fonte: a) FUTAI, 2002; b) Feuerharmet et al. (2004)

Alcântara (2007) estudando solos da camada de cobertura no aterro da Muribeca no estado de Pernambuco, com amostras compactadas na umidade ótima (21%) e acima da ótima (25,5%), observou que as curva de retenção (em função da umidade volumétrica e mesmo em função do grau de saturação, cujo intervalo de variação é bem maior), praticamente se sobrepuseram. Sugerindo que a umidade de compactação da amostra não influenciou, significativamente, a curva de retenção de água. Entretanto, para valores de sucção maiores que 3000 kPa correspondente a graus de saturação menores que 62%, a perda de saturação foi levemente maior que para a amostra compactada acima da umidade ótima. Contudo, para valores de sucção menores que 3000 kPa, esse comportamento pareceu se inverter, sugerindo que camadas de cobertura compactadas acima da umidade ótima poderiam apresentar, na faixa de saturação menor que 62 %, valores de k_{ar} (permeabilidade ao ar) relativamente maiores e, para saturação maior que 62 %, valores relativamente menores se comparado com o solo compactado na umidade ótima.

A curva característica pode ser utilizada para estimar a capacidade de campo do solo. Esse parâmetro, muito utilizado na agronomia e que corresponde a umidade retida no solo depois de saturado e deixando-se drenar livremente, é importante para o estudo do balanço hídrico e do teor de água disponível para as plantas. Em aterro de resíduos sólidos, é útil para estimar a capacidade máxima de retenção de água pelo solo da camada de cobertura que vai influenciar na geração de lixiviado. Estritamente, conforme Cortazar (2003), a capacidade de campo é definida como o teor de umidade do solo, 48 horas depois de saturado e mantido em equilíbrio com uma pressão de sucção de 33 kPa. Assim, a intensidade com que o solo retém a umidade é equivalente ao valor da pressão de extração aplicada. Entretanto, não há um consenso sobre o valor da tensão associada à capacidade de campo (cc), tendo muitos trabalhos utilizado tensões de 33 kPa e 10 kPa que seriam correspondentes à umidade retida na capacidade de campo *in situ* (SWAIN e SCOTTER, 1988). Na prática, valores de 33 kPa seriam mais indicados para siltes e argilas.

Lins (2003) analisou amostras de um solo siltoso do Aterro de Muribeca e encontrou valores de “cc” (capacidade de campo) num intervalo de 30 % a 39 %. Muitos autores citam valores de capacidade de campo na faixa de 34,7 % a 40,65 % para solo com textura argilosa (AZEVEDO, 1976; FREIRE, 1979; CARVALHO et al., 1995).

Lopes (2012) estudando amostras, obtidas *in situ*, nas camadas de cobertura da célula experimental da Muribeca, observou uma linearidade que se estende até a sucção de 1000 kPa na curva de retenção de água. Sendo que, a camada convencional e barreira capilar apresentaram variação de umidade gravimétrica de aproximadamente 5% e 8% respectivamente. Já as camadas alternativas Metanotrófica 01 (mistura em volume de 1 para 3 de composto orgânico e solo respectivamente) e Metanotrófica 02 (mistura em volume de 1 para 1 de composto e solo), apresentaram nessa mesma faixa de variação de sucção, uma variação de umidade gravimétrica de aproximadamente 13% e 11% respectivamente. Sugerindo que, as camadas alternativas do tipo metanotrófica possuem uma característica de perda ou

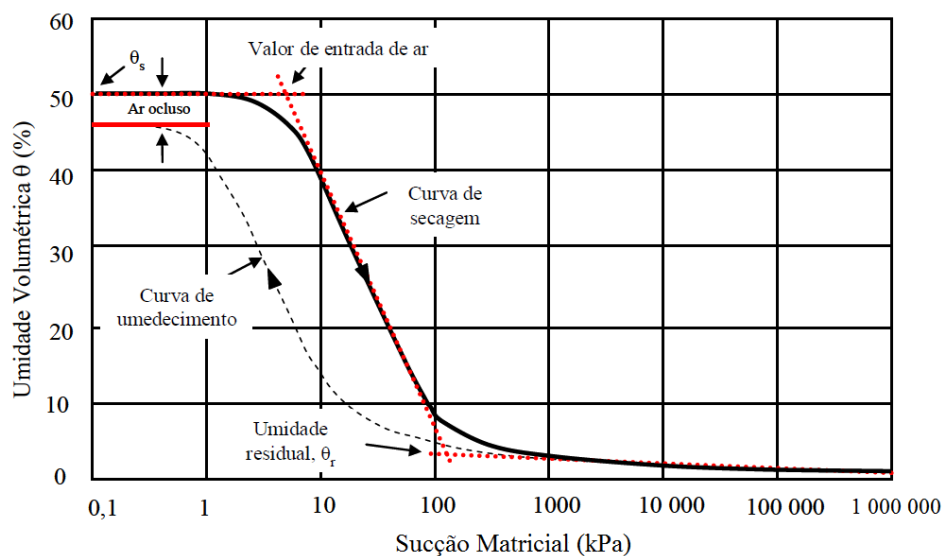
ganho de umidade mais rápido para a mesma faixa de variação de sucção, do que a camada convencional e barreira capilar.

Lopes (2012) observou ainda que as curvas de retenção de umidade apresentaram um formato semelhantes as curvas de solos finos. E, de acordo com a capacidade de sucção, relação entre variação de umidade e sucção ($C = \Delta w / \Delta \log \text{Sucção}$), a camada metanotrófica 01 apresentou maior capacidade diferencial de umidade do que a metanotrófica 02, barreira capilar e a convencional respectivamente.

De acordo com Jucá (1993) o valor de C depende das propriedades do solo (textura e limites de consistência), variações de umidade e efeito da histerese nas amostras, sendo equivalente à capacidade de retenção de umidade.

2.4.2 Entrada generalizada de ar

Deve-se fazer uma distinção entre o ponto de dessaturação ou ponto de entrada de ar e o ponto de entrada generalizada de ar (GAE). Quando o solo está inicialmente saturado, este apresenta, literalmente, um único ponto onde o ar entra na amostra, levando-a à dessaturação, conhecido como ponto de dessaturação. No caso de solos compactados, com grau de saturação menor que 100%, observa-se que existe um ponto ao longo da curva de secagem em que o gradiente de redução da saturação é significativamente alterado, que é denominado ponto de entrada generalizada de ar (Figura 11).

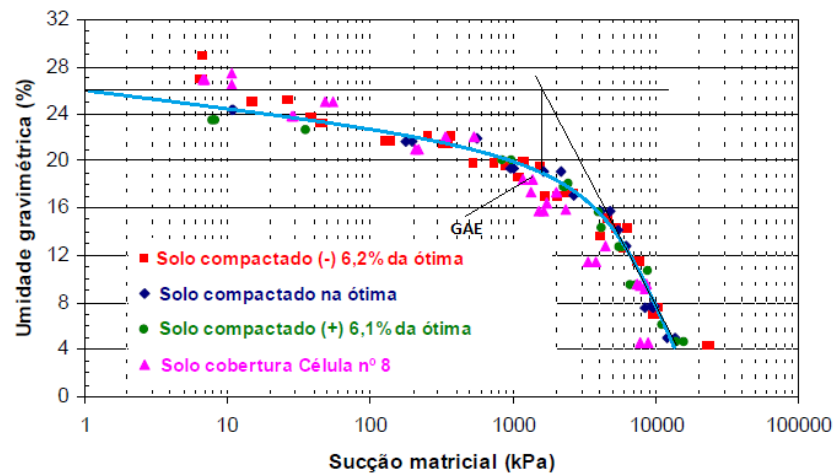
Figura 11 – Elementos da curva de retenção de água

Fonte: adaptado de Fredlund & Xing (1994)

Os solos argilosos apresentam ponto de dessaturação, ponto de entrada generalizada de ar e ponto de saturação residual para valores de sucção maiores que os valores de sucção de solos granulares. Isto ocorre devido a maior heterogeneidade da distribuição de diâmetros de poros e à existência de fenômenos de adsorção nas partículas argilo-minerais. Pelas mesmas razões, não se observa a existência de um ponto bem definido de dessaturação e de entrada generalizada de ar em solos argilosos, ao passo que areias ou solos mal graduados costumam apresentar um ponto claro de dessaturação.

Maciel (2003) apresenta a relação entre umidade gravimétrica e sucção matricial, estudando a geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE, referente ao solo da camada de cobertura caracterizado por argila de alta plasticidade. Nesta relação, o ponto de entrada generalizada de ar apresenta sucção em torno de 2000 kPa e umidade gravimétrica compatível com a umidade de compactação que foi de 23% (Figura 12).

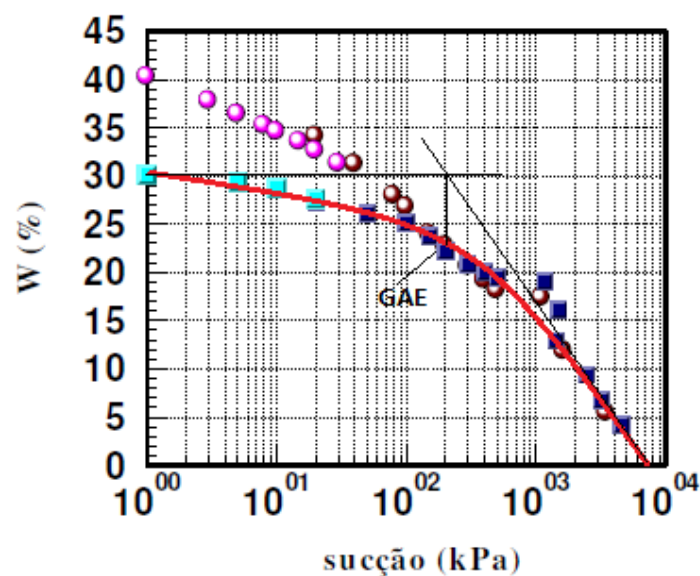
Figura 12 – Ponto de entrada de ar



Fonte: adaptado de Maciel (2003)

Vieira (2005) apresenta uma curva de retenção em função da umidade gravimétrica de um solo utilizado no estudo de barreiras capilares como cobertura final de aterro de resíduos, de um solo cuja característica é de um silte de baixa compressibilidade. Nesta curva, o ponto de entrada generalizada de ar apresentou sucção de 200 kPa e umidade gravimétrica semelhante a umidade ótima de 23,4% (Figura 13).

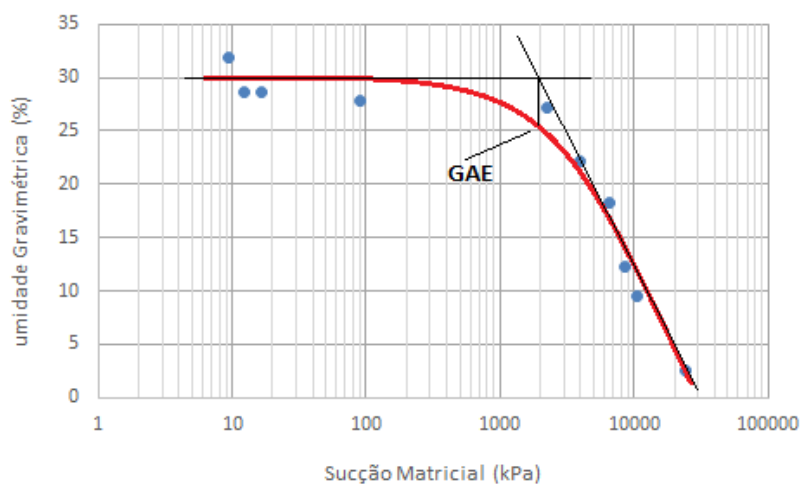
Figura 13 – Ponto de entrada de ar



Fonte: adaptado de Vieira (2005)

Guizelini (2011) em seu estudo do comportamento hidromecânico de solos visando a construção de sistemas de cobertura alternativos para aterros sanitários, utilizando um silte inorgânico de alta plasticidade compactado na umidade ótima de 31%, produziu valores de umidade gravimétricas relacionados as respectivas sucções matriciais, onde o ponto de entrada generalizada de ar possui coordenadas com sucção de entrada de ar de 2000 kPa e umidade gravimétrica de entrada de ar semelhante a umidade ótima (Figura 14).

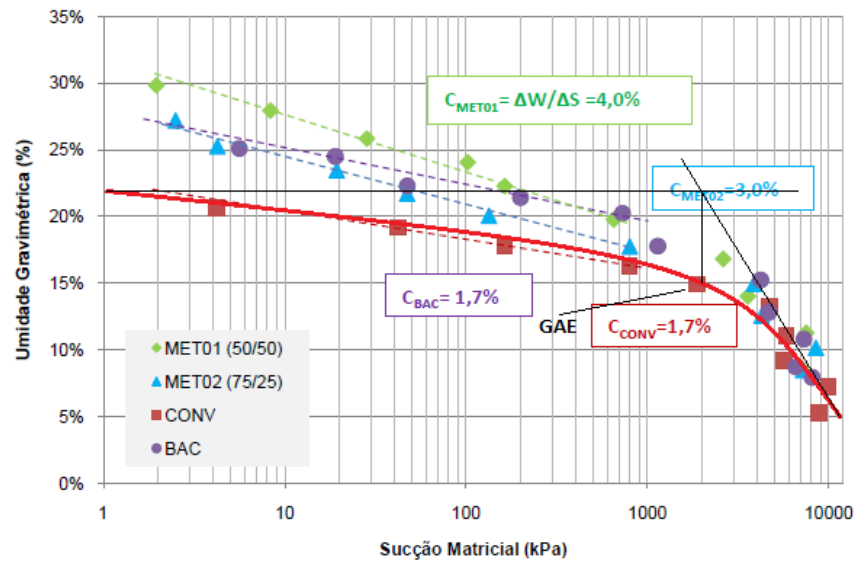
Figura 14 – Ponto de entrada de ar



Fonte: gráfico elaborado a partir dos dados de Guzelini (2011)

Lopes (2011) estudando a infiltração de água e fluxo de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos, verificou que o solo compactado utilizado na camada convencional e na barreira capilar caracterizado por solo siltoso de baixa plasticidade, apresentou uma umidade ótima de 19,9%. Valor compatível com a umidade gravimétrica do ponto de entrada generalizada de ar cuja sucção observada foi de 500 kPa. É importante observar que na análise das camadas com adição de composto orgânico, também verificou-se a relação umidade gravimétrica e umidade ótima (Figura 15).

Figura 15 – Ponto de entrada de ar



Fonte: adaptado de Lopes (2011)

2.5 AJUSTE DAS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Alguns estudos têm mostrado que existe uma relação entre a forma da curva de retenção de água e as propriedades dos solos não saturados (e. g. van Genuchten, 1980; Mualem, 1976; Fredlund et al., 1994). As correlações entre a curva de retenção de água e as propriedades hidráulicas e mecânicas dos solos não saturados exigem que se tenha uma precisa caracterização da curva de retenção de água. Isto é feito através do ajuste matemático de algum tipo de equação aos dados experimentais.

Gerscovich (2001) relata que dentre as modelagens existentes na literatura geotécnica, a maioria leva em consideração a forma da curva característica e a distribuição de tamanho de poros. Entretanto, alguns modelos representam estimativas diretas a partir da distribuição granulométrica e de propriedades físicas do solo, sem considerar a influência de aspectos como arranjo estrutural, estado de tensões, umidade inicial e energia de compactação.

A maioria dos ajustes utiliza a umidade volumétrica, os demais são relacionados com o grau de saturação. Observa-se ainda que grande parte dos modelos tratam de ajustar a curva de secagem. A curva de umedecimento possui o mesmo formato e pode ser também ajustada pelos diversos ajustes. A Tabela 4 apresenta diversos modelos de ajustes de curvas de retenção de água no solo.

Geralmente, as curvas experimentais de retenção de água são constituídas a partir de um conjunto de pares ordenados, compostos pela umidade e sua correspondente sucção aplicada.

Santos (2008) e Santos et al., (2011) aplicaram o critério de escolha proposto por Gerscovich e Sayão (2002), para os modelos de Gardner (1956), van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994), utilizados no ajuste das curvas experimentais de retenção de água de uma argila expansiva da cidade do Paulista, região metropolitana do Recife no Estado de Pernambuco. Neste estudo observou-se que os três modelos apresentaram resultados bastante semelhantes, sendo o modelo de Fredlund & Xing (1994) o que mais se aproximou dos parâmetros estabelecidos pelo critério de escolha.

Tabela 4 - Modelos utilizados no ajuste da curva de retenção de água no solo

Autor	Modelos	Parâmetros
Burdine (1953)	$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right]^m}$	α, n, m
Gardner (1956)	$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + \alpha \psi^n)}$	α, n
Gardner (1958)	$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{1 + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n}$	α, n
Brooks & Corey (1964)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^{-n}$	α
Mualem (1976)	$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right]^m}$	α, n, m
Van Genuchten (1980)	$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha \psi)^n\right]^m}$	α, n, m
Fredlund & Xing (1994)	$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n \right] \right\}^m}$	$\alpha, n \text{ e } m$
Gitirana Jr. & Fredlund (2004)	$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left(\psi / \sqrt{\psi_b \psi_{res}}\right)^d}$	d

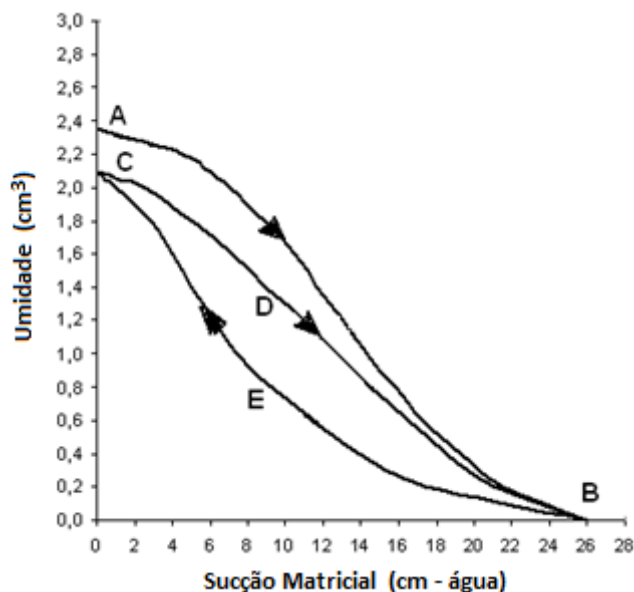
Onde: θ é a umidade do solo, ψ é a sucção matricial, θ_r é a umidade residual, θ_s é a umidade na saturação, α refere-se ao inverso da sucção de entrada de ar, n refere-se à distribuição de tamanho de poros que afeta a inclinação da função de retenção (VAN GENHCHTEN, LEIJ e YATES, 1994)

2.6 HISTERESE DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

O fenômeno da histerese devido à variação da umidade faz com que os parâmetros relacionados com a quantidade de água no solo tenham valores diferentes no umedecimento e na secagem. Poulovassilis (1962) apresenta uma breve descrição das curvas decorrentes da variação da quantidade de água nos poros de um meio poroso estudado. Admitindo que um meio poroso saturado fique submetido a valores crescentes de sucção matricial até um valor denominado de S_{max} , Figura 16, a relação entre a quantidade de água contida nos poros do corpo e a sucção matricial é descrita pela curva AB. Durante o umedecimento desse corpo poroso, com o relaxamento da sucção matricial de S_{max} até zero, a mesma relação é representada pela curva BEC. A diferença AC, entre as quantidades de água relativas ao início e o fim do processo (sucção matricial = 0), representa a quantidade de ar ocluso nos vazios durante o umedecimento do corpo.

Fredlund (1996) admite que o mesmo comportamento possa vir a ocorrer em alguns solos, de forma que a umidade saturada inicial não seja mais atingida devido ao ar ocluso nos poros. Ao secar o corpo novamente, a relação entre a quantidade de água e a sucção matricial mostra-se como a trajetória CDB. Quando se permite um novo umedecimento obtém-se a mesma curva BEC, conforme o ciclo anterior. Estas respostas, agora, repetem-se quando se varia a sucção matricial da forma relatada, mostrando que o volume de ar ocluso é constante durante o umedecimento. Consequentemente, não se atinge mais a curva AB. As duas trajetórias CDB e BEC do ciclo de histerese são denominadas, respectivamente de curvas de contorno de secagem e de umedecimento. A região entre estas curvas é denominada de histerese.

Figura 16 – Curvas de retenção experimentais de um corpo poroso rígido



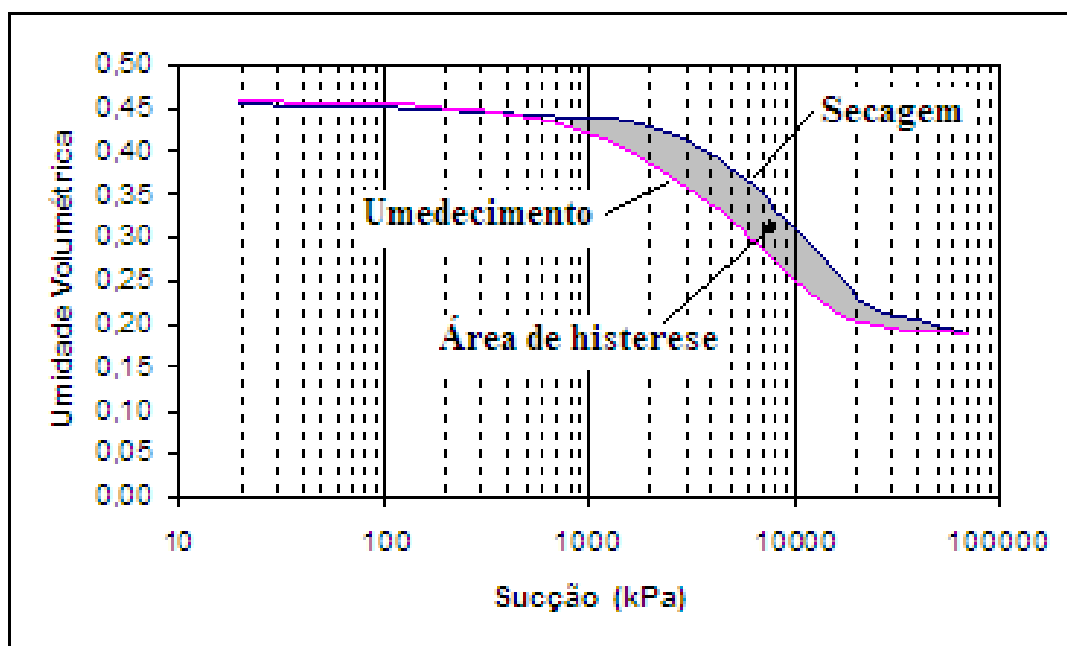
Fonte: POULOVASSILIS, 1962

A variação dinâmica da umidade do solo geralmente não segue o mesmo trajeto das curvas características. Além das curvas principais de secagem e de umedecimento, existem as curvas primárias de secagem (do estado de umedecimento ao estado de secagem) e curvas primárias de umedecimento (do estado de secagem ao estado de umedecimento) e subsequentemente ocorrem variações interativas de estados de secagem e de umedecimento para formar uma série de curvas intermediárias. O conjunto das curvas características de umidade do solo descreve as propriedades correspondentes à histerese desse solo (Huang et al., 2004)

A histerese provocada pelos processos de secagem e umedecimento pode ser atribuída a não uniformidade dos vazios, às bolhas de ar capturadas pelos vazios do solo durante o umedecimento e à alteração na estrutura decorrente da contração ou expansão do solo (CALLE, 2000). Segundo Rojas (2002), o valor real da sucção depende não somente do grau de saturação, mas também do estado inicial do solo e de todo histórico da secagem e umedecimento até aquele momento.

A curva sucção-umidade representa uma relação entre o potencial matricial e a umidade do solo. Esta relação pode ser alcançada de duas maneiras: 1) na secagem, iniciando-se com uma amostra saturada e aplicando-se incrementos de sucção através de secagem gradual, fazendo-se medidas de sucção e umidade por etapas, e 2) no umedecimento, partindo-se da amostra seca, reduzindo-se a sucção por umedecimento gradual, por etapas, medindo-se a sucção e umidade correspondentes. Cada um desses métodos resulta numa curva contínua. No entanto, tem-se observado que as trajetórias correspondentes aos processos de secagem e umedecimento não coincidem pois a quantidade de água retida é maior na secagem, existindo diferentes valores de teor de umidade para um determinado valor de sucção, Figura 17.

Figura 17 – Histerese de uma argila contráctil-expansiva



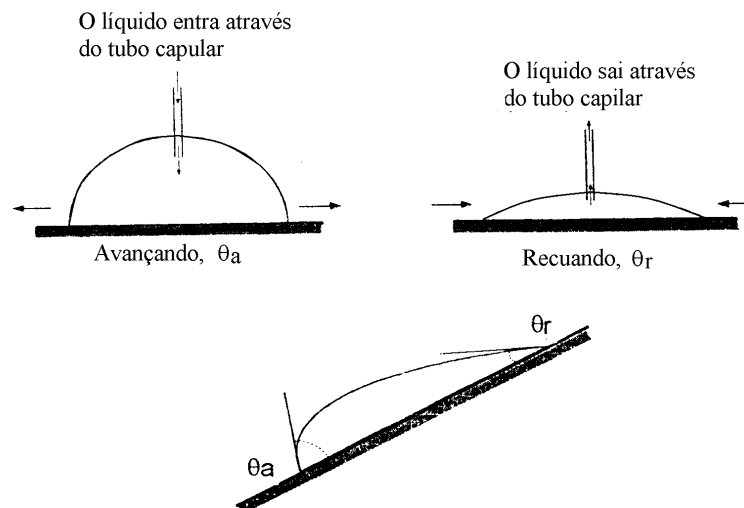
Fonte: SANTOS, 2008

O fenômeno da histerese se deve principalmente aos seguintes fatores:

- a) heterogeneidade nos tamanhos dos poros (que são em geral vazios de formas irregulares interconectados por passagens menores) gera o efeito “ink bottle”;

- b) o ângulo de contato entre a interface ar-água e uma superfície sólida é diferente para o umedecimento e para a secagem (Figura 18), atingindo um valor máximo quando a água avança sobre a superfície seca e um valor mínimo quando esta retrocede;

Figura 18 – Ângulo de avanço e recuo



Fonte: MARINHO, 1994

- c) bolhas de ar oclusas nos vazios do solo durante a fase de umedecimento (Hillel, 1971 e Marshall & Holmes, 1981), fazendo com que a umidade seja reduzida e não permitindo a completa saturação na sucção nula;

Os fatores acima justificam o fenômeno da histerese em areias e siltes. No caso das argilas, deve-se levar em conta a alteração estrutural decorrente da expansão ou contração, associadas aos ciclos de umedecimento e secagem (Hillel, 1971 e Marshall & Holmes, 1981). Desta maneira, parte da histerese se deve a alterações no arranjo das partículas quando da variação de volume. Yong & Warkentin (1975) segundo Jucá (1990), descreveram este fenômeno como um “rearranjo plástico”. Os pontos de contatos entre as partículas e as forças nestes pontos diferem durante o umedecimento e a secagem. Quando ocorre uma variação de volume, há uma alteração da estrutura e da distribuição de poros, bem como da interação entre os argilo-minerais e a água,

gerando forças físico-químicas capazes de reter água. Nos casos onde a histerese está associada à variação da estrutura do solo devido aos ciclos de umedecimento e secagem, as propriedades mecânicas do material ficam também fortemente alteradas (Pousada Presa, 1982).

2.7 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Na medida em que a quantidade de água no solo decresce, maior é a dificuldade para a passagem de água. Em solos não saturados é necessário definir uma função de condutividade hidráulica, que relaciona o conteúdo de umidade do solo com a condutividade. A função condutividade hidráulica pode ser determinada experimentalmente ou a partir de formulações matemáticas

O fluxo de água em meios porosos está relacionado com a quantidade de líquido que se desloca nos vazios do solo e geralmente é avaliado através de grandezas que são atributos físicos de grande importância para a engenharia, em estudos de modelagem de quaisquer fenômenos ligados ao movimento de água no solo, tais como a infiltração, drenagem, absorção de água pelas plantas, lixiviação de nutrientes e poluentes entre outros (ENGLER, 2004; PINTO, 2005).

De acordo com Fredlund e Rahardjo, (1993) a lei de Darcy também se aplica aos solos não saturados, no entanto o coeficiente de permeabilidade não pode ser considerado uma constante, pois varia com a quantidade de água existente nos poros e as vias disponíveis para o fluxo de água nessa condição variam com a sucção existente na matriz do solo.

As fases ar e água estão presentes em solos não saturados e a análise do fluxo de fluido requer leis que relacionem a vazão com potencial de condução com coeficientes apropriados para cada fase. O ar em um solo não saturado pode estar em uma forma oclusa quando o grau de saturação é relativamente elevado enquanto que para baixos graus de saturação, a fase do ar é predominantemente contínua, variando assim, as leis de fluxo para cada

um desses casos. Além disso, pode haver movimento de ar na fase de água, que é referida como difusão de ar através dos poros de água (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Dessa forma a função permeabilidade de solos não saturados está relacionada com a umidade volumétrica do solo (Θ) ou grau de saturação (S), estando relacionado com a sucção do solo através da curva de retenção de água. A função de condutividade hidráulica do solo pode então ser obtida, de forma aproximada, por meio da medição da umidade volumétrica ou da sucção do solo com a profundidade em colunas de solo, no entanto, essa determinação é complexa, pois envolve equipamentos especiais, é dispendiosa e demanda muito tempo de execução (GERSCOVICH e SAYÃO, 2002; GERSCOVICH e GUEDES, 2004; VIEIRA, 2005).

Vários pesquisadores propuseram equações analíticas, experimentais e estatísticas para representar matematicamente as relações existentes entre a função de permeabilidade do solo por meio do uso da curva de retenção de água (GARDNER, 1858; BROOKS e COREY, 1968; CAMPBELL, 1974; MUALEM, 1976; van GENUCHTEN, 1980, FREDLUND et al., 1994) como mostrado na Tabela 5, sendo portanto, uma ferramenta bastante útil nos estudos de determinação de fluxo de água em solos não saturados.

Tabela 5 - Determinação da condutividade hidráulica não saturada com uso de modelos matemáticos

Modelo (Referencias)	Equação	Variáveis
Gardner (1958)	$K = \frac{K_{sat}}{1 + a \times \left(\frac{\psi}{\rho_w \times g} \right)^n}$	Ksat = perm. saturada Ψ = sucção a e n = parâmetros de ajuste ρ _w = densidade da água g = aceleração da gravidade
Brooks and Corey (1968)	$K(\psi) = K_{sat} \times \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^n \text{ para } \psi > \psi_b$ $K(\psi) = K_{sat} \text{ para } \psi \leq \psi_b$	Ksat = perm. saturada Ψ _b = sucção de entrada de ar Ψ = Sucção n = parâmetro de ajuste
Campbell (1974)	$K = K_{sat} \times \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3}$	Ksat = perm. saturada θ = teor de umidade volumétrico θ _s = teor de umidade volumétrico para o solo saturado b = parâmetro de ajuste
Mualem (1976)	$K_{rel} = \frac{[1 - (\alpha \times \psi)^{m \times n} \times (1 + (\alpha \times \psi)^n)^{-m}]^2}{[1 + (\alpha \times \psi)^n]^{\frac{m}{2}}}$	K _{rel} = K/K _{sat} M, n, e α = parâmetros de ajuste Ψ = Sucção
van Genuchten (1980)	$K(Se) = K_{sat} \times Se^{0.5} \times \left[1 - \left(1 - Se^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2$ $Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	Ksat = perm. saturada θ = teor de umidade volumétrico θ _r e θ _s = teor de umidade residual e saturado m = parâmetro de ajuste
Fredlund et al. (1994)	$K(\psi) = \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) d\psi}{\int_{\ln \psi_{eav}}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) d\psi}$	y = variável de integração representando o logaritmo da sucção Ψ _{eav} = sucção de entrada de ar b = ln (10 ⁶ kPa) θ = umidade volumétrica θ' = derivada da curva de umidade x sucção

Fonte: GERSCOVICH e GUEDES (2004) e KHIRE et al.(1995)

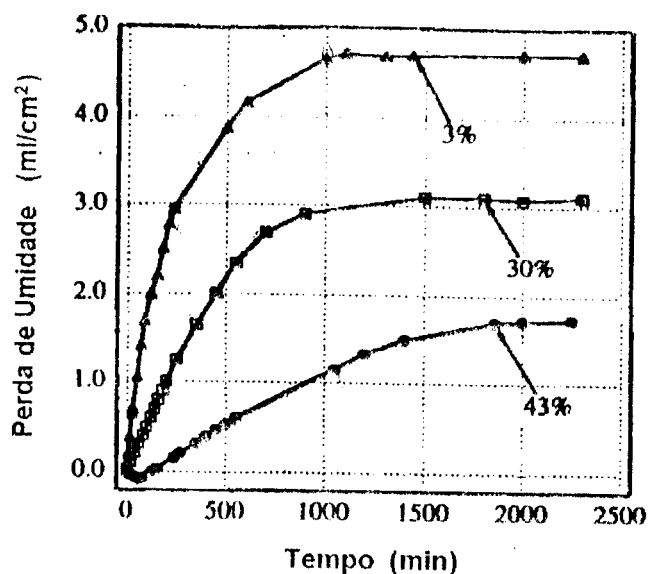
2.8 VELOCIDADE DA PERDA DE UMIDADE

A evaporação da água do solo pode ser explicada em termos da interação do fluxo de calor e de massa entre o solo e a corrente de ar

adjacente. O fluxo de calor é um movimento molecular devido à energia cinética das moléculas. O fluxo de massa é a transferência de umidade devido ao movimento da massa do fluido (Gilliland, 1938).

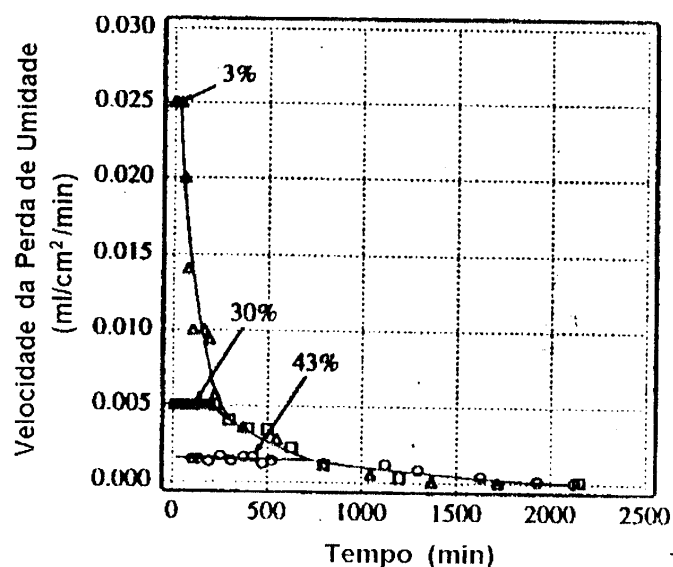
Kayyal (1995) verificou em laboratório que tanto a perda de umidade quanto a velocidade de perda, ambos versus tempo, serão maiores quanto menor for a umidade relativa do ar (Figuras 19 e 20). Identificou ainda duas zonas de evaporação: uma de velocidade constante, onde a perda ocorre a taxa constante e outra de velocidade decrescente. Também observou que, quanto menor for a umidade relativa do ar, maior será a velocidade constante inicial de evaporação e mais curto o período de tempo de sua duração.

Figura 19 - Relação da perda de umidade versus tempo, para diferentes umidades relativas



Fonte: KAYYAL, 1995

Figura 20 - Relação da velocidade de perda de umidade versus tempo, para diferentes umidades relativas



Fonte: KAYYAL, 1995

Fisher (1923) segundo Aguirre (1990) verificou que em perfis de solos inicialmente úmidos, o processo de secagem por evaporação tem ocorrido em três etapas: a primeira de velocidade constante (etapa inicial), a segunda de velocidade decrescente (etapa intermediária) e a terceira de velocidade lenta (etapa residual).

A etapa inicial (velocidade constante) ocorre no início do processo quando o solo tem umidade suficiente para fornecer água para o local de evaporação e a uma velocidade constante e função da demanda criada. A velocidade de evaporação é controlada mais pelas condições meteorológicas externas, que pelas propriedades do perfil do solo. Em climas quentes, essa etapa é breve e pode durar de poucas horas a alguns dias.

Na etapa intermediária (velocidade decrescente) a velocidade da evaporação se reduz quando o solo já não pode fornecer água para a superfície com rapidez suficiente para satisfazer a demanda de vapor. Essa

redução é provocada pela resistência à difusão, aumentada pela camada de solo ressecado que está entre o solo úmido e a atmosfera. A medida que a espessura de solo seco aumenta, a velocidade de evaporação diminui. Essa etapa é controlada pelo perfil do solo, pois a velocidade de evaporação está limitada pela velocidade com que o perfil do solo, secando-se gradualmente, pode fornecer umidade para a zona de evaporação. O período de duração dessa etapa pode ser superior ao da anterior.

A etapa residual (velocidade lenta) começa, aparentemente, depois que a zona superficial está tão seca que o transporte de água líquida através dela cessa efetivamente. A partir daí, a transmissão de água através dessa camada ocorre, principalmente, por um processo lento de difusão de vapor, sendo afetada pela difusividade do vapor e pelos esforços de adsorção que atuam sobre as superfícies das partículas situadas entre espaços moleculares. É chamada de etapa de difusão de vapor e tem importante importância no caso das superfícies que secam rapidamente.

A transição da primeira para a segunda etapa é geralmente brusca. Já da segunda para a terceira é gradual, dificultando separar o fim de uma e o início da outra.

Isto em condições externas constantes e nível d'água suficientemente afastado da superfície do terreno, para não participar do processo de evaporação. Portanto, se a superfície de um solo estiver inicialmente úmida e a perda d'água for medida como uma função do tempo, a velocidade de evaporação se manterá quase constante por algum tempo e em seguida diminuirá repentinamente.

2.9 RESISTÊNCIA DE PONTA DO SOLO

Para Bondarik (1967), as determinações das propriedades do solo, examinado penetronicamente, são baseadas no fato de que a resistência à

penetração apresentada pelo solo é função de suas características geotécnicas (citado por RÖHM, 1984).

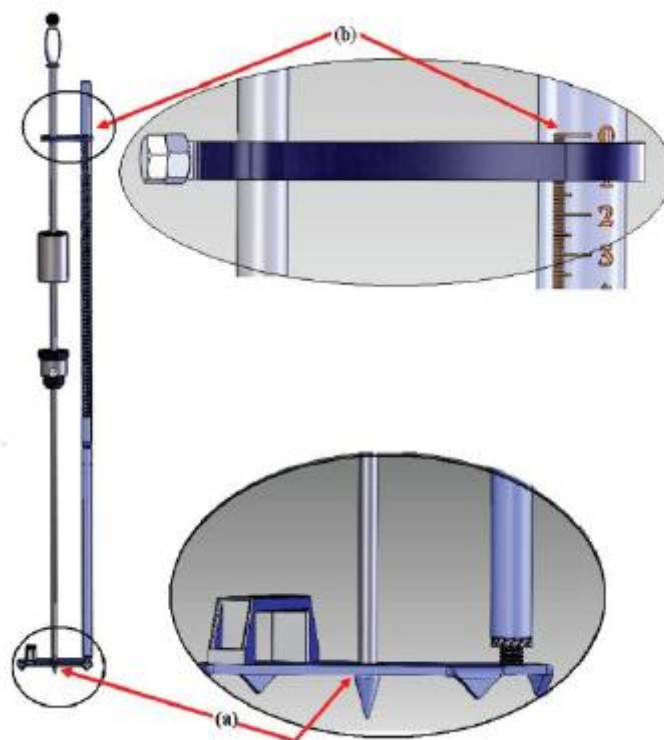
2.9.1 Equipamento utilizado na medição da resistência de ponta do solo

Penetrômetro é um instrumento que tem por finalidade fornecer índices sobre a resistência que o solo oferece à sua penetração, conforme a ABGE (1980). Consiste em um tubo ou uma ponteira maciça, conectada à haste, e introduzido no solo através de pressão de um macaco hidráulico (penetração estática) ou de golpes de peso de cravação (penetração dinâmica).

De acordo com Stolf (1991), penetrômetros são aparelhos destinados a determinar a resistência do meio no qual penetram e podem ser divididos em dois grupos: a) Penetrômetros convencionais para uso agrícola: para efetuar a medida, o conjunto é pressionado contra o solo a uma velocidade constante e a resistência oferecida ao avanço de sua ponta pode ser lida ou registrada através de um dinamômetro (penetrômetros estáticos); b) Penetrômetros de impacto, que eram somente utilizados pela Engenharia Civil, mas que na década de 80, foram adaptados no Brasil para fins agrícolas (STOLF et al., 1983) com dimensões numa escala de 20 vezes menores que os de uso para a Engenharia Civil. A medida é feita através do impacto de um peso que cai de uma altura constante, em queda livre, sobre uma haste, fazendo dessa forma, que ela penetre no solo. Conta-se o número de impactos necessários para que o aparelho penetre a uma determinada espessura (penetrômetros dinâmicos).

Stolf et. al., (1983), apresentaram um novo penetrômetro denominado *Modelo IAA/Planalsucar-Stolf*, desenvolvido a partir de modificações realizadas no penetrômetro convencional, como a substituição do dinamômetro e do registrador por um peso de curso constante para provocar a penetração da haste no solo através de impactos. A Figura 21 apresenta o penetrômetro de impacto desenvolvido.

Figura 21 - Penetrômetro de impacto, Modelo IAA/Planalsucar-Stolf.



Fonte: Stolf et al., (1983)

Mas, segundo Camargo (1997), uma série de cuidados devem ser observados para evitar que as medidas com este equipamento não sejam invalidadas, como por exemplo, a influência na resistência à penetração (RP) da textura do solo, da umidade, e do tipo de equipamento, uma vez que penetrômetros diferentes em solos iguais resultam em medidas diferentes de RP.

Stolf et. al., (2014), desenvolveram um programa em linguagem Visual Basic application (VBA) com interface no aplicativo Excel, com o objetivo de proporcionar um rápido processamento de dados de resistência do solo obtidos através do Penetrômetro de impacto. Com este programa é possível confeccionar automaticamente tabelas e gráficos de resistência na medida em que os dados são inseridos, além de desenvolver uma rotina computacional para a equalização da profundidade em camadas constantes, unificando todos os perfis em uma única tabela.

Stolf (2014) citando diversos autores, observa que a publicação em revista de alto impacto, da teoria para a transformação da resistência em Mpa, possibilitou tornar o penetrômetro de impacto Stolf conhecido no meio científico. A consolidação do aparelho nesse meio pode ser medida pelo emprego na atualidade. Verifica-se sua utilização em diversos estudos, como: mapeamento da resistência do solo, avaliação da compactação e controle de tráfego, variabilidade de propriedades do solo, manejo de lavouras, pastagens e florestas, recuperação de áreas degradadas, indicador da qualidade do solo, etc.

Clauss (2014) observou que penetrômetro de impacto DPL (Dynamic Petermeter Light) acrescenta às metodologias tradicionais de controle de compactação, a possibilidade da avaliação da homogeneidade da camada compactada. Tornando este equipamento uma ferramenta eficiente e com potencial de auxiliar os instrumentos tradicionais na realização de um controle de compactação com maior qualidade, além de apresentar vantagens como: rapidez de execução dos ensaios, pouca perturbação no material analisado e baixo custo de operação.

Santos e Ferreira (2014), utilizaram o penetrômetro dinâmico DPL para verificar a resistência à penetração de três solos utilizados em camada de cobertura de aterro de resíduos sólidos e observaram a eficiência do equipamento através da análise do resultados do ensaio, os quais indicaram diminuição da resistência nas camadas adicionadas com composto orgânico e aumento da resistência na camada de solo natural.

2.10 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO

Na prática da engenharia geotécnica, especificamente na determinação da estabilidade de talude ou de uma escavação, adota-se o modelo de resistência ao cisalhamento dos solos saturados apresentado por Terzaghi (1936) e descrito usando-se o critério de Mohr-Coulomb (Equação 02).

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad \text{Equação (02)}$$

Onde: τ é a tensão cisalhante; c' é o intercepto de coesão efetiva do solo; σ é a tensão total normal; u_w é a pressão neutra nos poros do solo; $(\sigma - u_w)$ é a tensão efetiva normal e ϕ' é o ângulo de atrito efetivo do solo.

Uma abordagem comum na estimativa da resistência de solos não saturados é a utilização da curva de retenção de água e dos parâmetros de resistência de solos saturados. Os valores de sucção apresentados na curva de retenção desempenham importante papel no comportamento geomecânico do material.

O princípio das tensões efetivas, estabelecido por Terzaghi (1936), se aplica bem no entendimento da resistência ao cisalhamento de solos saturados. Entretanto, quando se trata de solos não saturados, tal princípio não funciona corretamente já que além da água, o ar também se encontra presente nos vazios do solo. O princípio das tensões efetivas é definido pela Equação 03.

$$\sigma' = \sigma - u \quad \text{Equação (03)}$$

Onde: σ' é a tensão normal efetiva; σ é a tensão normal total; e u é a pressão neutra.

Bishop (1959), reformulou a equação apresentada por Terzaghi (1936) com o intuito de aplicá-la nos casos onde o solo não se encontra em sua condição saturada. Dessa forma, ele incluiu um parâmetro na equação para representar a influência da sucção (χ) na tensão efetiva dos solos (Equação 04).

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad \text{Equação (04)}$$

Onde: $(\sigma - u_a)$ é a tensão normal líquida; $(u_a - u_w)$ é a sucção matricial; e χ é um parâmetro relacionado com o grau de saturação do solo.

Além de incluir a sucção matricial como um fator importante na determinação da tensão efetiva de solos não saturados, Bishop (1959)

adicionou outro parâmetro relacionado à saturação do solo (χ). No caso do solo estar saturado, $\chi = 1$ e quando o solo se encontra seco, $\chi = 0$.

A partir da equação de Bishop (1959) e utilizando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, a resistência de solos não saturados é dada por:

$$\tau = c' + \{(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)\}tg\phi' \quad \text{Equação (05)}$$

Onde: τ é a resistência ao cisalhamento; c' é o intercepto da coesão efetiva; e ϕ' é o ângulo de atrito efetivo.

Uma proposta alternativa à apresentada anteriormente é aquela formulada por Fredlund et al (1978, apud FREDLUND e RAHARDJO 1993), que se basearam em variáveis de estado de tensões de solos não saturados para a determinação da resistência ao cisalhamento. Isso porque o parâmetro χ definido por Bishop é de difícil obtenção (KHALILI e KABBAZ, 1998).

De acordo com Ferreira (2010), existe um consenso no meio geotécnico de que a abordagem envolvendo as variáveis de estado é a que a melhor representa o comportamento de solos não saturados na prática de engenharia. As variáveis de estado são parâmetros físicos do solo necessários para a determinação de sua resistência. No caso de solos não saturados, há a possibilidade de uso de três combinações diferentes dessas variáveis com o intuito de descrever o estado de tensões. Essas combinações estão relacionadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Possíveis combinações de variáveis de estado de tensões para os solos não saturados

Pressão de referência	Variáveis de estado de tensão
Ar, u_a	$(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$
Água, u_w	$(\sigma - u_w)$ e $(u_a - u_w)$
Total, σ	$(\sigma - u_a)$ e $(\sigma - u_w)$

Fonte: FREDLUND & RAHARDJO, 1993

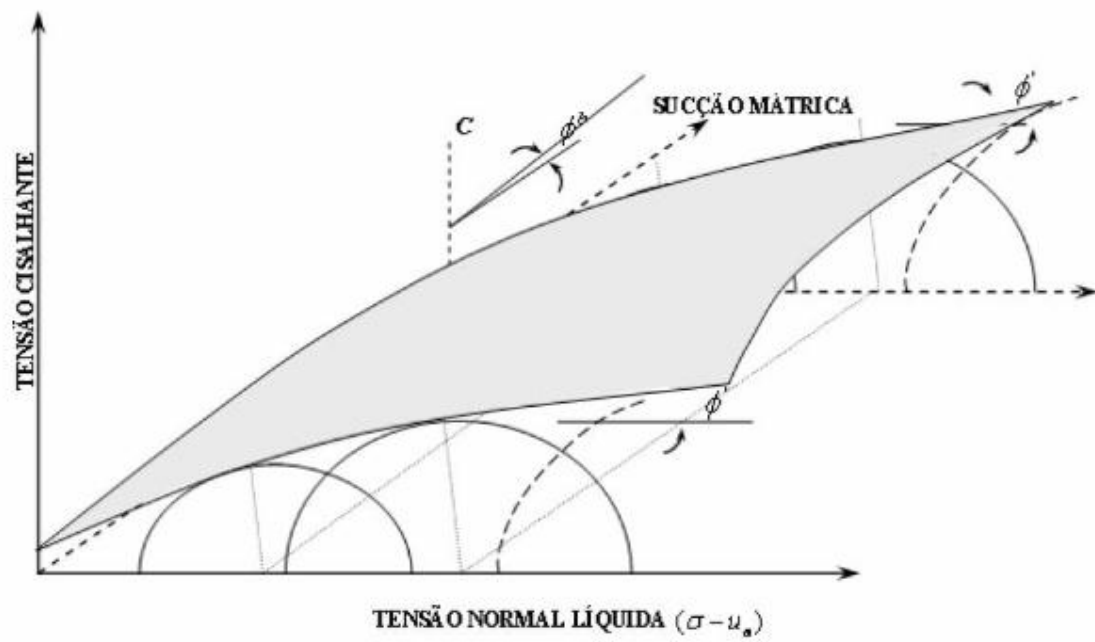
Partindo do critério de ruptura de Mohr-Coulomb e das variáveis de estado, Fredlund et al. (1978, apud FREDLUND e RAHARDJO 1993) definiram a resistência ao cisalhamento de solos não saturados da seguinte forma:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)tg\phi' + (u_a - u_w)tg\phi^b \quad \text{Equação (06)}$$

Onde: σ é a tensão total; c' é o intercepto coesivo efetivo; ϕ' é o ângulo de atrito efetivo; e ϕ^b é o ângulo de atrito relacionado com a sucção matricial.

Essa equação pode ser representada num gráfico tridimensional, sendo a tensão cisalhante representada no eixo das ordenadas e as duas variáveis de estado de tensões plotadas nas abscissas. A superfície tridimensional representada nesse gráfico, denominada envoltória estendida de Mohr-Coulomb, não é plana, ou seja, há uma relação não linear entre a resistência ao cisalhamento e a sucção matricial. Nesse caso, tanto ϕ^b (ângulo de atrito relacionado com a sucção matricial) quanto ϕ' (ângulo de atrito efetivo) não são constantes com a variação de sucção do solo não saturado. Campos (1997, apud SOARES, 2008) sugeriu que a envoltória estendida de Mohr-Coulomb teria o formato apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Envoltória estendida de Mohr-Coulomb de um solo não saturado



Fonte: CAMPOS, 1997; apud Soares (2008)

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

São descritos, neste capítulo, os ensaios de campo, a coleta das amostras de solo e do composto e os ensaios de laboratório realizados. O programa de investigação de campo foi realizado na camada de cobertura da célula experimental do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca constando de ensaios como penetrômetro dinâmico (Dynamic Penetrometer Light – DLP), peso específico do material e umidade natural. Foram coletadas amostras deformadas do solo da jazida de onde é retirado o solo para a camada de cobertura do aterro e da célula experimental, amostra da camada de cobertura do aterro e coletado amostra do composto orgânico proveniente da unidade de compostagem de podas do aterro da Muribeca.

No laboratório da Universidade Federal de Pernambuco foram realizados ensaios de caracterização física do solo, do composto e das misturas solo-composto, avaliação da relação umidade-sucção, histerese, velocidade de evaporação, perda de umidade, permeabilidade, resistência ao cisalhamento e resistência à penetração do solo e das misturas solo-composto com o uso do penetrômetro dinâmico (DPL) em lisímetros simulando camadas de coberturas.

No laboratório da Universidade Católica de Pernambuco foram realizados ensaios de caracterização química do solo, do composto e das misturas solo-composto. Foi avaliada a resistência à penetração do solo e das misturas solo-composto com o uso dos penetrômetros dinâmico (DPL) e estático CPT (Cone Penetration Test) em lisímetros simulando camadas de cobertura do aterro.

3.1 COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO, COMPOSTO E PREPARAÇÃO DAS MISTURAS SOLO-COMPOSTO

Foram coletadas amostras da jazida (Solo Natural); amostras deformadas e indeformadas da camada de cobertura da célula experimental e amostras do composto orgânico

3.1.1 Coleta do solo

A amostra de solo da Formação Barreiras foi coletada da jazida nas vizinhanças do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca (Figura 23), onde foram coletados aproximadamente 200 kg de solo deformado.

Figura 23 – Vista geral da jazida de coleta da amostra



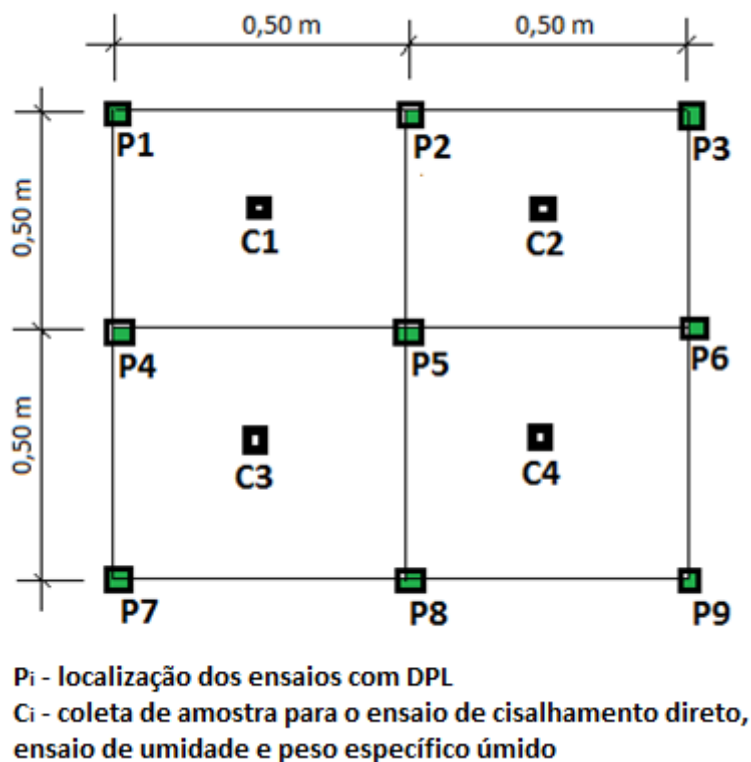
A análise geológica dessa jazida foi realizada por Alcântara (2007), indicando a presença de solos residuais formados a partir da decomposição química de rochas cristalinas do embasamento da área, sob as condições de clima quente e úmido. Os gnaisses migmatíticos do embasamento, constituídos de quartzo, feldspatos e minerais escuros, com forte bandamento estrutural,

promovem várias superfícies de descontinuidade no maciço e mostram-se no solo como estruturas herdadas da rocha de origem.

O conteúdo de argila, presente nesses solos, é resultante da argilização dos feldspatos e o processo pedogenético promove, além da alteração, a lixiviação vertical dos óxidos de ferro e das argilas, produzindo um horizonte B textural ou podzólico. As mudanças de coloração são controladas pela maior ou menor concentração do óxido de ferro e pelas descontinuidades promovidas pelo bandamento original.

Foram também coletadas amostras já compactadas da camada de cobertura do aterro (célula experimental), com o uso de formas metálicas quadrangulares biseladas com 5,08 cm de largura interna, 4,50 cm de altura, área de 25,81 cm² e volume de 116,13 cm³. A cravação das formas no solo foi de forma estática utilizando uma espátula para remover o solo do contorno da caixa. Durante a cravação das formas, eram coletadas amostras de solos deformadas para determinação da umidade gravimétrica. A Figura 24, mostra o layout da disposição dos pontos para a retirada das amostras indeformadas em cada camada de cobertura na profundidade de 0,15m. Os pontos foram numerados de C1 a C4.

Figura 24 – Disposição dos furos nas camadas de cobertura



3.1.2 Coleta do composto

O composto orgânico foi fabricado em composteira localizada nas dependências do aterro, utilizando-se podas de árvores trituradas com a adição de lodo de esgoto fornecido pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

3.1.3 Preparação das amostras para os ensaios de caracterização física e química

A amostra de solo natural foi seca ao ar, destorroada, e o material que passou na peneira nº 10 (2,0 mm) foi separado em três partes, a primeira constituída apenas de solo e as outras duas partes foram misturadas, de forma homogênea, ao composto orgânico nas proporções de 3:1 e 1:1 em volumes

de solo e composto, respectivamente. A amostra de solo é denominada nesta pesquisa de Solo Natural, a mistura de solo com composto na proporção de 3:1 de Solo-Composto 3:1 e a mistura na proporção de 1:1 de Solo-Composto 1:1.

3.1.4 Preparação dos corpos de prova em lisímetros

A camada de cobertura da célula experimental foi executada em fevereiro de 2008, iniciando-se com a geometrização final da massa de resíduos e, posteriormente, a execução do platô superior da célula. Durante a execução da camada de cobertura, o mesmo tipo de solo foi utilizado para compor cada tipo de camada experimental a ser estudada no platô superior, assim como nos taludes e bermas, conforme Maciel (2009).

A compactação da cobertura foi feita com trator de esteira de 150 HP, durante o espalhamento do material, não havendo controle de compactação e umidade no momento da execução.

A variação de espessura de cada perfil executado foi devida à declividade transversal (1,5%) e longitudinal (0,5%) da cobertura, para o escoamento das águas superficiais, que é feito através de canaletas de concreto ($\phi = 30$ cm) localizadas na parte central do platô superior da célula experimental (MACIEL, 2009). A Figura 25 mostra a localização de cada tipo de camada de cobertura, no platô superior da célula experimental.

Figura 25 - Divisões das camadas de cobertura experimentais



Fonte: modificado de Maciel (2009) e Lopes (2011)

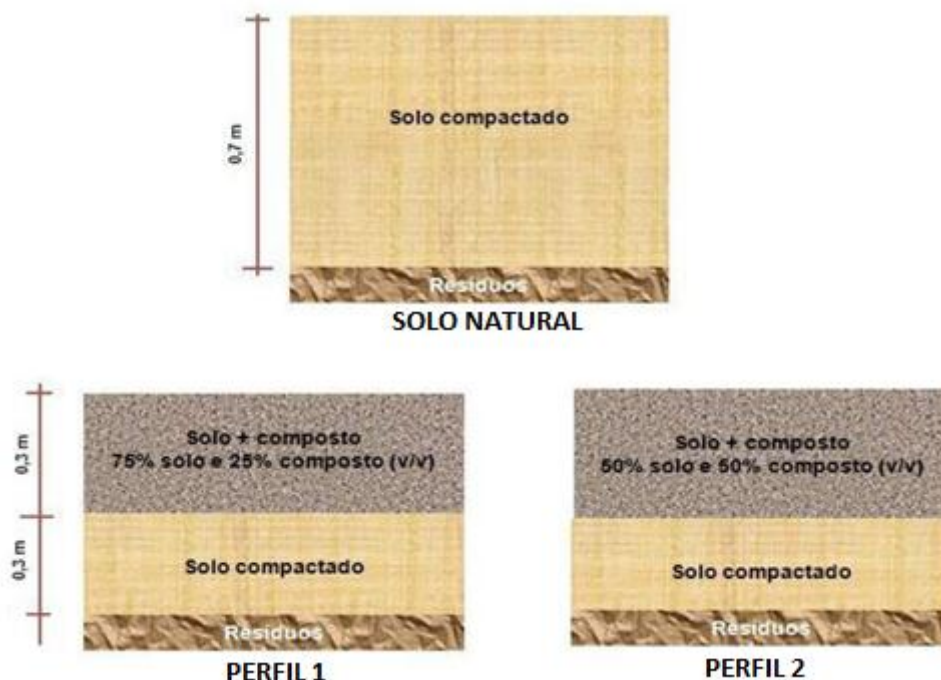
As camadas de cobertura experimentais foram denominadas de acordo com o material utilizado e cobriram todo o platô superior da célula tendo sido executadas com as seguintes características:

- Camada de Solo Natural: camada de 70 cm de solo compactado, ocupando uma área superficial de 534,8 m² e espessura total variando de 50 a 90 cm em função da declividade da superfície do aterro.
- Camada Metanotrófica 02: é constituída de duas camadas de 0,30 m, sendo uma da mistura Solo-Composto na proporção de 3:1 seguida de uma camada de Solo Natural compactado, Maciel (2009) e Lopes (2011), sendo esta camada denominada de Perfil 1.
- Metanotrófica 01: é constituída de duas camadas de 0,30 m, sendo a primeira de uma mistura de Solo-Composto na proporção em volume de 1:1 seguida de uma camada de Solo Natural compactado, Maciel (2009) e Lopes (2011), sendo esta camada denominada de Perfil 2.
- Barreira Capilar: Camada composta por 0,20 m de pedra britada do tipo rachinha (diâmetro médio de 0,10 m), sobreposta por uma camada de

solo compactado com espessura de 0,50 m. Esta camada não foi analisada nesta pesquisa.

Na Figura 26 estão apresentados os perfis dos três tipos de camada de cobertura analisadas nesta pesquisa.

Figura 26 - Perfil típico das camadas de coberturas



Fonte: modificado de Lopes (2011)

Foram simuladas em laboratório a camada de Solo Natural, a camada Metanotrófica 02 (perfil 1) e a camada Metanotrófica 01 (Perfil 2).

Para a realização do ensaio com o uso do penetrômetro dinâmico em laboratório foram construídos três lisímetros para simular a camada de cobertura do aterro. Os lisímetros foram confeccionados em tubos de PVC com diâmetro de 0,15 m e altura de 0,60 m (Figura 27). O primeiro lisímetro foi preenchido totalmente com Solo Natural (camada de Solo Natural), compactado na umidade ótima. O segundo foi preenchido na metade inferior com Solo Natural, e na metade superior com a mistura de Solo-Composto na

proporção de 3:1 em volume, respectivamente (Perfil 1). O terceiro foi preenchido na metade inferior com Solo Natural e na metade superior com a mistura de Solo-Composto na proporção de 1:1 em volume, respectivamente (Perfil 2).

Figura 27 – Confecção dos lisímetros



A preparação das amostras nos lisímetros teve o seguinte procedimento:

- a) os solos foram compactados inicialmente no cilindro do proctor normal e imediatamente após a compactação foram introduzidos no lisímetro com o auxílio de uma prensa hidráulica, para preencher cada lisímetro eram necessários três proctor (Figuras 27a e b);
- b) foi retirado o excesso de solo na parte superior do lisímetro e feito o nivelamento da superfície com o auxílio de uma espátula (Figura 27c);
- c) envolveu-se as partes superior e inferior do lisímetro com filme de PVC para evitar a perda de umidade (Figura 27d);

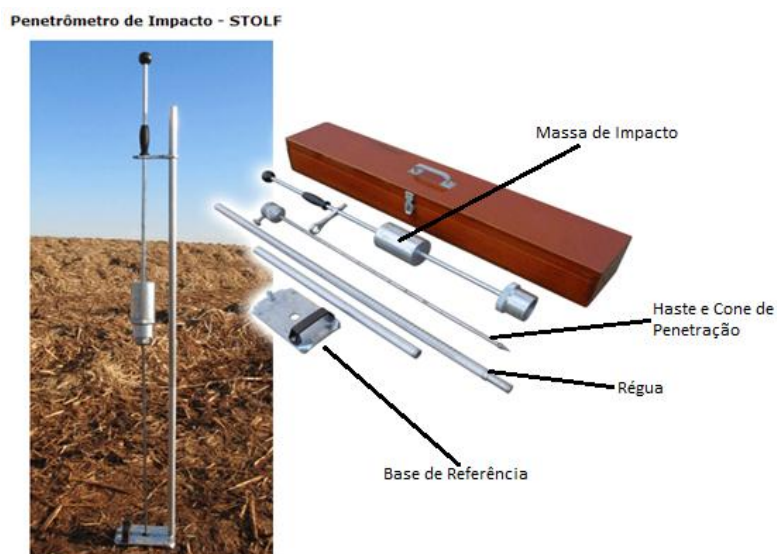
- d) na parte superior do lisímetro e sobre o papel filme de PVC, foram demarcados os quatro pontos para a introdução da haste do penetrômetro dinâmico considerando uma distância mínima de duas vezes e meia o diâmetro do cone entre eles e das paredes dos lisímetros, para evitar que a rigidez das paredes interferisse no resultado.

3.2 ENSAIOS REALIZADOS NA CAMADA DE COBERTURA DO ATERRO

Foram realizados ensaios de peso específico natural com o uso de formas metálicas quadrangulares biseladas com 5,08 cm de largura interna, 4,50 cm de altura, área de 25,81 cm² e volume de 116,13 cm³ que eram cravadas estaticamente no Solo Natural e nas misturas Solo-Composto como descrito no item 3.1.1. Nestas mesmas amostras foram determinadas as umidade pelo método da estufa.

Para avaliar a resistência de ponta das três camadas, foi utilizado o penetrômetro dinâmico DPL (Dynamic Penetrometer Light), modelo IAA/PLANALSUCAR – Stolf, operado com ponta fina de área igual a 1,29 cm², Figura 28.

Figura 28 – Penetrômetro dinâmico DPL



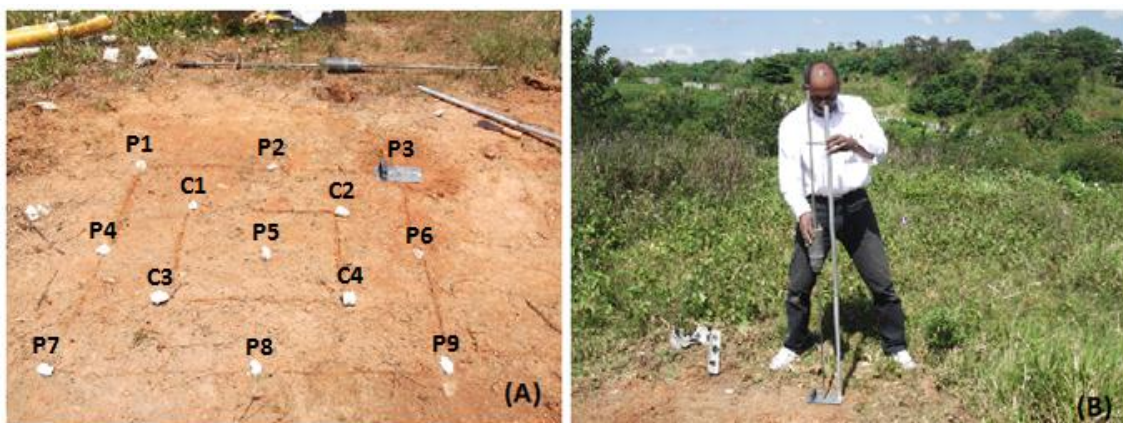
Os nove pontos de penetração foram demarcados em cada camada de cobertura antes do início dos ensaios e numerados de P1 a P9. A localização destes pontos é apresentada na Figura 29a. Pelo fato das camadas se encontrarem cobertas por vegetação, realizou-se uma limpeza na área escolhida para facilitar a identificação dos pontos e a logística do ensaio.

A profundidade de penetração da haste em cada ponto, nas camadas, foi de 0,60m, considerando que a camada de Solo Natural possui uma espessura média de 0,70m, e que os Perfis 1 e 2 possuem espessura média de 0,60m.

A Figura 29b mostra a instalação do equipamento em um dos pontos previstos. A vantagem desse tipo de equipamento está na sua portabilidade e na maneira simples de estimar a capacidade de suporte do solo, em diversos tipos de relevo, através do processo de penetração dinâmica da haste no solo.

A medida da resistência do solo à penetração é feita através do impacto do martelo que cai de uma altura constante (0,40m), em queda livre, sobre a haste de ponta cônica, fazendo com que esta penetre no solo.

Figura 29 – Ensaio de campo. a) localização dos furos; b) realização do ensaio com o penetrômetro de impacto



Antes da realização do ensaio deve-se estabelecer a quantidade de impactos para cada leitura. Nesta pesquisa foi estabelecida a leitura para um impacto. No caso do equipamento não possuir haste de penetração graduada, deve-se utilizar uma fita métrica.

Após a preparação do local, a localização dos pontos e verificação das condições de funcionabilidade do equipamento, iniciou-se o ensaio a partir do seguinte procedimento:

- a) fixação da chapa de base do equipamento, na superfície do terreno para que seja estabelecido o nível de referência da leitura de profundidade no ponto preestabelecido;
- b) colocar o equipamento na vertical e introduzir a ponta do cone através do orifício localizado na chapa, permitindo que todo o conjunto repouse no solo sobre o cone. Este procedimento vai fazer com que o cone penetre no solo apenas com a ação do peso próprio do equipamento. Neste momento, a primeira leitura deve ser anotada;
- c) após a primeira leitura, e ainda com o equipamento totalmente na vertical, ergue-se o peso, que provoca o impacto, até a altura do limitador superior para garantir a altura padrão de queda;
- d) em seguida, libera-se o peso que produz o impacto no limitador inferior fazendo com que o cone avance na penetração no solo. Neste momento uma nova leitura deve ser anotada;
- e) as séries de impactos e medidas devem se repetir até a profundidade desejada. Caso o comprimento da haste seja insuficiente, uma outra deve ser conectada.
- f) imediatamente após a desinstalação do equipamento, foi retirada uma amostra indeformada do solo numa profundidade de aproximadamente 0,10m, utilizando-se anel metálico, para a determinação da curva de retenção. Uma quantidade de solo de aproximadamente 1,0 kg foi, também, retirada do local para a determinação da umidade do solo durante a realização do ensaio.

A transformação dos valores da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto) em resistência à penetração foi obtida pela fórmula dos “holandeses”, segundo Stolf (1991), Equação 07.

$$RP = \frac{Mg + mg + \left(\frac{M}{M+m}\right) \frac{Mgh}{x}}{A} \quad \text{Equação (07)}$$

Onde:

RP = resistência à penetração (kgf.cm⁻²);

M = massa do êmbolo (3,992 kg);

m = massa dos demais componentes do penetrômetro, excluída a massa de impacto (kg);

Mg = corresponde a massa do aparelho sem o êmbolo (2,444 kg para profundidades até 0,70 m, 2,754 kg para profundidades até 1,20 m e 3,295 kg para profundidades até 1,70 m);

h = altura de queda do êmbolo (40 cm);

x = penetração da haste do aparelho (cm.impacto⁻¹);

A = área do cone 1,29 cm² ;

g = aceleração da gravidade.

3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os ensaios de caracterização física foram realizados nas amostras do solo, composto e nas misturas solo-composto, obedecendo às recomendações da ABNT, conforme descrito a seguir:

- NBR 6508/84: Grãos de Solos que Passam na Peneira 4,8mm – Determinação da Massa Específica dos grãos (ABNT, 1984a);
- NBR 7181/84: Análise granulométrica dos solos (ANBT, 1984b), com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material de acordo com a norma NBR 6502/1995 – solos e rochas (ANBT, 1995);

- NBR 6459/84: Solo – determinação do limite de liquidez (ABNT, 1984c);
- NBR 7180/84: Solo – determinação do limite de plasticidade (ABNT, 1984d);
- NBR 6457/86: Amostra de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (ABNT, 1986a);
- NBR 7182/86: Solo – ensaio de compactação utilizando energia de compactação normal (ABNT, 1986b)

Os ensaios de granulometria também foram realizados com uso do defloculante para verificar a dispersividade da argila.

A realização do ensaio de compactação conforme a NBR 7182/86 (ABNT, 1986b) foi fundamental, pois, permitiu a confecção de corpos de prova compactados na umidade ótima e no peso específico aparente seco máximo, para avaliar parâmetros de retenção de água, resistência ao cisalhamento, resistência à penetração, velocidade de perda de umidade e condutividade hidráulica saturada.

3.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

As análises do solo seguiram a metodologia do Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (1979 e 1997b), sendo realizadas nas amostras de solo natural, no composto e nas misturas solo-composto na proporção de 3:1 e 1:1. Cada resultado foi obtido a partir de uma determinação feita em triplicata e a diferença entre uma determinação e a outra não ultrapassou 0,1 % do valor em relação às titulações. Nos casos onde a diferença ultrapassou este valor, a determinação foi repetida até obter um resultado dentro da tolerância estabelecida pela EMBRAPA.

3.4.1 Determinação do potencial hidrogeniônico (pH) em KCl, H₂O e CaCl₂

As medições do pH foram realizadas por meio de um equipamento chamado Potenciômetro com eletrodo combinado, imerso em suspensão solo: líquido (água, KCl ou CaCl₂), na solução 1:2,5, conforme metodologia da EMBRAPA (1979 e 1997b).

3.4.2 Capacidade de troca catiônica (com pH 7,0)

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do solo é definida como a quantidade de cátions necessária para neutralizar as cargas negativas de uma quantidade unitária de solo em determinadas condições, ou seja, a capacidade do solo de reter e trocar cátions para um determinado pH. Sua determinação foi realizada através da remoção, por uma solução salina de amônio, de cálcio, bário ou ácido diluído, sendo determinados por volumetria ou absorção atômica. A CTC representa a atividade de um solo; baixa atividade quando a CTC for menor que 24 cmol/kg, típico de um solo caulinitico. A CTC é baixa nos solos muito intemperizados. A determinação desse parâmetro está relacionada com a quantidade de cálcio, magnésio, potássio e sódio trocável.

3.4.3 Determinação do carbono orgânico e matéria orgânica

A matéria orgânica é de fundamental importância para as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Ela influi na agregação, friabilidade, porosidade e capacidade de retenção de água e nutrientes. Os agregados formados por altos teores de matéria orgânica (> 3,5 g/kg) são instáveis; solos com teores < 3,5 g/kg são estáveis. Como o teor de carbono orgânico varia com o teor de argila na fração mineral, o cálculo de matéria orgânica é sempre 1,724 vezes maior que o carbono orgânico. A determinação do carbono

orgânico e matéria orgânica têm como objetivo determinar o teor, em massa, da quantidade de matéria orgânica existente numa quantidade de solo.

3.4.4 Análise dos resultados da caracterização química

Os resultados da análise química do solo e das misturas foram calculados e analisados, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (1999): a Soma das Bases (S); a Capacidade de Troca Catiônica (CTC); Retenção de Cátions (RC); a Atividade da Fração Argila (Tr); o Grau de Saturação por Bases (V); a Saturação por Alumínio (m); e a Saturação por Sódio.

3.5 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO

A obtenção das curvas de retenção de água para o solo convencional e para as misturas de solo/composto foi necessária para analisar o comportamento de cada material em relação à variação de sucção e umidade, bem como servir de ferramenta para a determinação da função permeabilidade à água e de aspectos relacionados a resistência ao cisalhamento.

As curvas de retenção de água foram elaboradas utilizando-se o método do papel filtro, padronizado pela norma ASTM D5298-92 e descrita por MARINHO (1995). O método baseia-se no princípio de absorção e equilíbrio que existe quando um material poroso com deficiência de umidade é posto em contato com um papel filtro, com umidade menor. O papel filtro passa a absorver uma certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de sucção.

Embora o tipo de sucção não esteja restrito ao método do papel filtro, a sua compreensão é fundamental para uma boa interpretação dos resultados. A sucção obtida depende do tipo de transferência de água do solo para o papel, que pode se dar por capilaridade ou através de vapor.

Utilizou-se o período mínimo de equilíbrio indicado por Marinho (1995) de 7 dias e o papel adotado foi o Whatman nº 42 que apresenta umidade inicial no estado seco de aproximadamente 6%, permitindo intervalo de sucção de zero até 29 MPa. A curva de calibração utilizada para o papel filtro foi a proposta por Chandler et al. (1992) conforme as Equações 08 e 09.

Para Umidades do papel filtro $\leq 47\%$:

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84 - 0,0622w)} \quad \text{Equação (08)}$$

Para Umidades do papel filtro $> 47\%$:

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(2,412 - 0,0135w)} \quad \text{Equação (09)}$$

Com a relação entre sucção e umidade do material poroso em cada ponto de medição, obteve-se a curva de retenção de água do solo e das misturas solo-composto. Para realizar o ensaio de determinação da sucção, cada solo foi compactado na umidade ótima e a partir de cada solo compactado foram moldadas três amostras em anéis metálicos tipo shelby com 75mm de diâmetro e 20mm de altura. De cada amostra foram determinados oito pontos, considerando que cada solo teve três amostras. Isto significa que a curva de retenção de água para o solo e para as misturas solo-composto foram construídas cada uma com vinte e quatro pontos. A Figura 30 mostra os procedimentos de preparação das amostras a partir do solo e das misturas solo-composto compactados na umidade ótima e na densidade máxima.

Figura 30 - Confeção dos corpos de prova



Onde: a) solo compactado (proctor normal); b) e c) moldagem dos corpos de prova; d) umedecimento das amostras por capilaridade

Apesar do solo ser compactado em sua umidade ótima, durante a moldagem dos anéis, foram recolhidos solos para a determinação da umidade de moldagem para o cálculo do peso seco. O procedimento do ensaio ocorreu de acordo com as seguintes etapas:

- a) as amostras foram colocadas, sobre pedras porosas, dentro de uma bandeja com uma lâmina d'água de altura inferior a espessura das pedras porosas;
- b) as amostras permaneceram em repouso durante um período de aproximadamente 24h ou até que fosse observada umidade na face superior;
- c) após o umedecimento, retirou-se o conjunto para pesagem inicial (anel e solo);

- d) em seguida, com muito cuidado, colocou-se o papel filtro Whatman nº 42 em contato direto com o solo em uma das faces, para medição da sucção matricial e na outra face impedindo o contato do papel filtro com o solo, utilizou-se uma tela espessa, para a medição da sucção total;
- e) em seguida, envolveu-se a amostra e papéis filtro com várias camadas de filme plástico (PVC) e logo após envolveu-se com papel alumínio. As amostras, já protegidas, foram colocadas em caixa isolante térmica (do tipo isopor) garantindo que as amostras não entrassem em contato com a umidade e a luz do ambiente externo, deixando-as em repouso por 7 dias;
- f) após o tempo de repouso (7 dias), retirou-se cuidadosamente o papel filtro de cada amostra com uma pinça metálica, e imediatamente colocou-se em balança com precisão de 0,0001g para determinação do peso úmido do papel (esse procedimento durou poucos segundos para evitar a perda de umidade do papel por evaporação);
- g) o conjunto anel e amostra foram pesados, para determinação da umidade do solo no equilíbrio, no momento da retirada do papel filtro, e deixados em repouso para perda de umidade ao ar livre;
- h) o papel filtro foi colocado em cápsula e levado para secagem em estufa a uma temperatura de 105°C por 24 horas;
- i) após as 24 horas, o conjunto cápsula e papel filtro seco foram colocados em um dessecador com sílica e transportados rapidamente para pesagem em balança de precisão;
- j) procedeu-se a determinação da umidade do papel filtro e a respectiva sucção do solo utilizando-se as equações propostas por Chandler et al. (1992), citadas anteriormente;
- k) em cada retirada do papel filtro, o conjunto solo e anel eram constantemente pesados para estimativa da perda de aproximadamente 3% de umidade. Repetiu-se a partir da etapa (d), dando-se prosseguimento ao ensaio por cerca de oito semanas, até que o corpo de prova atingisse uma umidade próxima à residual.

No caso da determinação da sucção matricial através do papel filtro, nesta pesquisa utilizou-se uma esponja de aproximadamente 5 mm de espessura com diâmetro semelhante ao do corpo de prova, após a amostra ter sido envolvida com filme de PVC e antes da utilização do papel alumínio. Este procedimento foi utilizado para garantir o contato do papel filtro ao solo, sem danificá-los, através da pressão exercida pela esponja. Este contato é fundamental principalmente para sucções elevadas.

3.5.1 Velocidade da perda de água

Durante a execução do ensaio para a determinação da curva de retenção de água verificou-se, também, o quanto de água a amostra perdia quando exposta a uma temperatura ambiente de aproximadamente 25°C durante o período de uma hora, com determinada sucção.

A partir do momento em que o papel filtro era retirado da amostra, após os sete dias de isolamento, esta ficava exposta e a cada hora era pesada até atingir um peso referente a uma umidade de aproximadamente 3% menor.

O tempo utilizado para a determinação da velocidade da perda de umidade foi exatamente a primeira hora do período em que a amostra ficava exposta ao ar. E a sucção considerada para esta perda era determinada pelo papel filtro no momento de sua retirada da amostra, ou seja, a sucção do solo no início desta primeira hora. A área utilizada no cálculo da perda de umidade por evaporação foi igual a das duas faces do corpo de prova.

3.5.2 Histerese

Um corpo de prova com amostra indeformada foi retirado, com anel metálico tipo shelby, de cada camada de cobertura da célula experimental estudada nesta pesquisa. Além dessas três amostras, foi confeccionado, em laboratório, um corpo de prova, com anel metálico tipo shelby, para o solo e

para as misturas solo-composto compactados na umidade ótima e na densidade máxima. Para cada corpo de prova, tanto para as amostras de campo como de laboratório foram determinados seis pontos para as trajetórias de secagem e seis pontos para as trajetórias de umedecimento. As trajetórias de secagem foram determinadas de acordo com a metodologia descrita no item 3.5.

Depois da determinação do último ponto da trajetória de secagem da curva de retenção, os mesmos corpos de prova, de campo e de laboratório, foram preparados para a determinação da trajetória de umedecimento, com a finalidade de se determinar a histerese entre as duas trajetórias. O procedimento para se determinar os pontos da trajetória experimental de umedecimento foi o seguinte:

- a) determinou-se a umidade do primeiro ponto para trajetória de umedecimento. Umidade em torno de 3% maior que a umidade em que se encontrava o corpo de prova (umidade residual);
- b) procedeu-se o umedecimento da amostra através da aspersão de água destilada com auxílio de um borrifador;
- c) imediatamente após o corpo de prova atingir o peso referente a umidade estabelecida, colocou-se o papel filtro em cada uma de suas faces e em seguida o envolveu com várias camadas de filme plástico (PVC) e logo após com uma camada de papel alumínio para proteger da luminosidade;
- d) em seguida, colocou-se as amostras em uma caixa com isolamento térmico (do tipo isopor) garantindo que as amostras não entrassem em contato com a umidade e a luz do ambiente externo, deixando-as em repouso por 7 dias;
- e) após o tempo de repouso, retirou-se cuidadosamente o papel filtro de cada amostra com uma pinça metálica, e imediatamente colocou-se em balança com precisão de 0,0001g para determinação do peso úmido do papel (esse procedimento deve levar poucos segundos para evitar a perda de umidade do papel por evaporação);

- f) o papel filtro foi então colocado em cápsula e levado para secagem em estufa a uma temperatura de 105°C por 24 horas;
- l) após as 24 horas, o conjunto cápsula e papel filtro seco foram colocados em um dessecador com sílica e transportados rapidamente para pesagem em balança de precisão;
- m) o conjunto anel e amostra foram pesados, para determinação da umidade do solo no equilíbrio, no momento da retirada do papel filtro, e em seguida a amostra foi novamente submetida a aspersão de água destilada até atingir o peso referente a próxima umidade desejada (aproximadamente 3% a mais que a umidade anterior);
- g) Repetiu-se o procedimento a partir da etapa (c), dando-se prosseguimento ao ensaio por cerca de 6 ou mais semanas, até que o corpo de prova atingisse uma umidade próxima a de saturação.

3.5.3 Ajuste das curvas experimentais

Os dados das curvas experimentais de retenção de água, referentes à trajetória de secagem, dos solos analisados, foram ajustados seguindo o processo de iteração de newton-Gauss. O modelo de ajuste de van Genuchten (1980) foi utilizado, pelo fato de nesta pesquisa também ser aplicada a função permeabilidade não saturada proposta por esse autor. E, considerando ainda que este é um dos melhores modelos mencionados por Gerscovich (2002) para ajuste das curvas experimentais de retenção de água dos solos brasileiros.

No processo de ajuste das curvas de retenção, utilizou-se o programa computacional STATISTICA® adotando-se um número de iterações máximo de 100 com critério de convergência de 10^{-6} .

É interessante citar que, o valor da histerese foi determinado a partir da diferença entre as integrais definidas das funções fornecidas pelo ajuste das trajetórias de secagem e de umedecimento. O intervalo de sucção utilizado foi de 2 kPa até 4000 kPa para todos os solos analisados.

3.6 ENTRADA GENERALIZADA DE AR

Neste item está apresentado, de maneira resumida, o método para a identificação da umidade ótima, dos três solos analisados, a partir da curva que relaciona sucção matricial com umidade gravimétrica. Isto, pelo fato de nesta pesquisa, a umidade gravimétrica do ponto de entrada generalizada de ar (GAE) parecer coincidir com a umidade ótima de compactação.

Para a determinação da sucção matricial e da umidade gravimétrica referentes ao ponto de entrada generalizada de ar, na curva de retenção, utilizou-se o método gráfico que utiliza o traçado de retas tangentes à curva, sugerido por Fredlund e Xing (1994).

3.7 FASES DO SOLO E DAS MISTURAS SOLO-COMPOSTO

Para a determinação das fases do solo natural e das misturas solo-composto nas proporções 3:1 e 1:1, utilizou-se corpos de prova moldados em amostras compactadas na umidade ótima e na densidade máxima, com uso de anéis tipo shelby, semelhantes aos utilizados para a determinação das curvas de retenção de água. A determinação prévia do peso específico dos grãos do solo, das misturas solo-composto e do composto orgânico foi de fundamental importância para os cálculos dos volumes. Além de serem determinados os pesos dos anéis, foram feitas medições de diâmetros e alturas com uso do paquímetro, para se ter uma melhor precisão do volume interno de cada anel.

Foi utilizada relação entre os índices físicos para obter o volume dos sólidos, de gás e de líquido.

3.8 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A determinação da permeabilidade saturada serviu como parâmetro para estimar a permeabilidade não saturada a partir do modelo de van Genuchten

(1980). As amostras de solo e das misturas foram compactadas na umidade ótima e peso específico seco máximo com energia de compactação normal.

O ensaio foi realizado utilizando a norma ASTM D 5084 (ASTM, 2010), em permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 – Soil Test – ELE, e de acordo com a seguinte metodologia:

- coloca-se tanto na base quanto no topo do corpo de prova um conjunto de pedras porosas e papel filtro em contato com o solo, e posiciona-se a parte superior uma tampa de acrílico denominado “top cap” onde serão conectadas as mangueiras de drenagem;
- encamisa-se o corpo de prova, com uma membrana e ligas de borracha, para melhorar a fixação e oferecer segurança lateral do corpo de prova, evitando seu contato lateral com a água;
- insere-se o corpo de prova na célula de acrílico;
- conecta-se a célula de acrílico ao aparelho através das tubulações, abre-se a válvula lateral, permitindo a entrada de água até encher a célula, verificando-se ao final se não existem bolhas de ar na superfície;
- aplica-se uma pressão confinante de 560 kPa e em seguida faz-se a remoção de ar das pedras porosas e das linhas das tubulações, drenando o sistema com água destilada até que todas as bolhas de ar desapareçam das tubulações;
- enche-se de água o canal da bureta até que as três buretas estejam com o nível desejado;
- faz-se a desaeração da bureta removendo a entrada de ar, estando o canal desaerado quando não houver bolhas de ar perceptíveis;
- aumenta-se a pressão confinante para 108 kPa na amostra até a saturação;
- fecham-se as válvulas de entrada de pressão no topo e na base do corpo de prova, e em seguida posicionam-se as válvulas de comando em “pressure” (no equipamento) para então serem aplicadas as pressões de base e de topo;
- finalmente, abrem-se todas as válvulas de entrada de pressão;

- a cada 24 horas é verificado se o corpo de prova está saturado, considerando o critério de que o volume de d'água que entra pela base da amostra seja o mesmo que saia pelo topo, na aplicação de um gradiente de pressão constante de 30 kPa (geralmente a saturação se dá em média de 1 a 2 dias);
- após ser constatado que o corpo de prova encontra-se saturado realiza-se o ensaio de permeabilidade propriamente dito;
- inicialmente fecham-se as válvulas de pressão de topo e de base;
- coloca-se um gradiente de fluxo ascendente de 30 kPa;
- abrem-se as válvulas de topo e de base da célula e mede-se o tempo necessário para percolar 5 cm³ pela amostra;
- repete-se o procedimento até que se tenha pelo menos três leituras de tempo com variação de até $\pm 5\%$;
- realiza-se a secagem da amostra em estufa a 65°C até peso constante, para se determinar a permeabilidade máxima ao ar;
- repete-se a metodologia de montagem do corpo de prova utilizada para determinação da permeabilidade saturada, trocando-se o fluido confinante e percolante por ar atmosférico. As pressões aplicadas pelo permeâmetro provêm de um compressor de ar e são reguladas no quadro de comando do equipamento. Para cada amostra foram feitas 3 leituras de vazão de ar. A leitura da vazão de ar percolada através da amostra, para cada gradiente de pressão aplicado, foi feita diretamente em um ROTÂMETRO modelo série 1900 da APLLITECH, Tubo 2300, com faixa de leitura de 0 a 10 NI/h e erro de 5%.

A partir dos resultados do ensaio determina-se o coeficiente de permeabilidade saturada (K_{sat}) utilizando-se a Equação 10.

$$K_{sat} = \frac{V.L}{\Delta P.t.A_{cp}} \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

K_{sat} = coeficiente de permeabilidade à água (m/s)

V = volume do líquido percolado (m^3)

L = altura do corpo de prova (m)

ΔP = variação da carga de pressão (m)

t = tempo necessário para percolar o volume de 5 ml (s)

A_{cp} = área do corpo de prova (m^2)

Esta metodologia é similar as utilizadas por Maciel (2003), Mariano (2008) e Lopes (2011).

3.9 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PONTA EM LABORATÓRIO

A resistência de ponta foi, também, analisada para os solos compactados em laboratório com o uso dos penetrômetros dinâmico e estático.

3.9.1 Penetrômetro dinâmico

Tendo sido confeccionados os lisímetros, o procedimento para a realização do ensaio de resistência de ponta com o penetrômetro dinâmico foi o seguinte:

- a) após a demarcação dos furos, na parte superior dos lisímetro, o equipamento foi montado e colocado na vertical, com o auxílio de um nível de bolha e, em seguida iniciou-se o processo de penetração do cone, no local pré-determinado, através da queda do martelo de uma altura padrão até a base inferior. Neste momento foi anotada a leitura da régua da haste;
- b) é importante observar que após a penetração total e retirada da haste de um furo, este foi preenchido e compactado, com o mesmo tipo de solo, para que não influenciasse na leitura dos outros furos.

3.9.2 Penetrômetro estático

O ensaio de resistência de ponta dos solos, em laboratório também foi realizado com o uso do penetrômetro estático SOLOTEST, referência 2458 constituído de extensômetro, cone de penetração e anel dinamométrico confeccionado em aço endurecido especial, com capacidade de 500 kgf. O cone de penetração utilizado possui altura de 4,08 cm e diâmetro de 2,2 cm. A Equação 11, recomendada pelo fabricante, foi utilizada como equação característica de resposta em kgf.

$$y = 2,203550428x + 1,53939148 \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

y = Resistência de ponta (RP)

x = Leitura do extensômetro

Para este ensaio, procedeu-se o preenchimento dos lisímetros através do mesmo processo do ensaio anterior. Após este processo o ensaio foi realizado através dos seguinte procedimento:

- a) fixação do anel dinamométrico, da haste de penetração e do macaco mecânico na base de uma viga metálica localizada a aproximadamente 2 m de altura, que funcionou como base de reação no momento da penetração da haste no solo (Figura 31);
- b) foram feitas marcações a cada 4 cm (altura do cone) na haste de penetração, cuja finalidade era servir de referencial para a leitura do extensômetro;
- c) após a localização dos furos na face do lisímetro, este foi colocado numa posição onde a ponta do cone coincidissem com a marcação do furo;

- d) neste momento, foi de fundamental importância colocar a haste perfeitamente na posição vertical com o uso do nível de bolha, observando as quatro direções;
- e) logo após, o macaco mecânico foi acionado e a cada penetração de 4 cm, a leitura no extensômetro era anotada, até a profundidade de 60 cm;
- f) os valores anotados foram transformados em kgf através da equação característica de resposta e dividido pela área do cone, obtendo os resultados em kgf/cm^2 ;
- g) os valores em kgf/cm^2 foram transformados em Mpa através do fator de multiplicação 0,098.

Figura 31 – Ensaio com penetrômetro estático em laboratório



3.10 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM LABORATÓRIO

O ensaio de cisalhamento direto, não inundado, foi realizado a partir de corpos de provas de solos compactados em laboratório utilizando-se energia normal e, em corpos de provas de solos indeformados coletados diretamente nas camadas de cobertura. A referência utilizada para o ensaio de cisalhamento direto foi a ASTM D3080-04 (Standard Test Method for Direct Shear Test Soils Under Consolidated Drained Conditions).

Os corpos de prova, referentes ao Solo Natural e as misturas Solo-Composto 3:1 e Solo-Composto 1:1, foram cuidadosamente moldados com o uso de formas metálicas quadrangulares biseladas com 5,08 cm de largura interna, 4,50 cm de altura, área de 25,81 cm² e volume de 116,13 cm³, as respectivas umidades dos corpos de prova foram 19,76%, 23,06% e 30,59%. Após a moldagem, o Solo Natural foi colocado na prensa de cisalhamento direto com anel dinamométrico de constante igual a 0,16 kg/div e os solos das misturas solo composto foram colocados na prensa de anel dinamométrico de constante igual a 0,12 kg/div. Em todos os casos, utilizou-se uma velocidade de ensaio igual a 0,483 mm/min.

No equipamento de cisalhamento direto, a tensão vertical é obtida com um sistema de pesos, que são posicionados na parte inferior de um conjunto de hastes. A prensa possui um motor elétrico que desloca a base de cisalhamento, de modo que sua metade superior reage contra um anel dinamométrico, medindo-se a força tangencial, o sistema é provido de um potenciômetro, que mantém constante a velocidade de deslocamento da célula durante o cisalhamento.

O deslocamento horizontal é medido por um extensômetro, na base da célula e os deslocamentos verticais são monitorados também com um extensômetro, posicionado no topo do sistema de carregamento vertical. Cada solo foi ensaiado na condição natural e não inundado. As envoltórias de resistência foram determinadas a partir das tensões de 50, 100, 150 e 200 kPa.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de laboratório e campo realizados na camada de cobertura da Célula Experimental do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca-PE.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os resultados dos ensaios de granulometria realizados com e sem uso de defloculante, limites de consistência e peso específico real dos grãos do solo, do composto e das misturas solo-composto encontram-se na Tabela 7. As curvas granulométricas são apresentadas na Figura 32, a Carta de Plasticidade na Figura 33.

A fração areia no Solo Natural (38%) é menor do que no composto (63%). A fração fina ($\% < 0,074 \text{ mm}$) no Solo Natural (65%) é maior do que no composto (49%). As frações argila e silte no Solo Natural são respectivamente 32% e 30% e no composto 11% e 26%.

O peso específico real dos grãos no Solo Natural ($26,30 \text{ kN/m}^3$) é muito similar aos valores obtidos por Marciel (2003), Lopes 2011) e Oliveira (2013) indicados na Tabela 8. Esse valor é superior ao do composto ($20,30 \text{ kN/m}^3$). Embora a fração granular ($\% > 0,074 \text{ mm}$) seja maior no composto as suas partículas pesam menos. O peso específico real das partículas do composto é 77,19% do peso das partículas do Solo Natural.

As frações argila, silte, areia no Solo Natural e nas misturas Solo-Composto não apresentam grandes variações e as curvas granulométricas são semelhantes também na forma. A adição de composto ao Solo Natural (Solo-Composto 3:1 e Solo-Composto 1:1) não causou alterações significativas na distribuição dos tamanhos das partículas em relação ao Solo Natural. Mesmo não havendo alterações significativas, a influência do composto é maior na fração areia e bem menor do que na fração argila. Isto se deve ao fato de o

composto ser mais granular do que o Solo Natural. Resultados semelhantes foram obtidos por Lopes (2011) e Oliveira (2013) em amostras coletadas diretamente das camadas de cobertura. Os resultados foram mais próximos nas frações argila e silte do que nas frações areia média e fina.

O composto utilizado por Lopes (2011), em sua pesquisa, tinha uma porcentagem de grãos da dimensão de areia (75%) e de pedregulho (24%) enquanto o utilizado na presente pesquisa tem uma porcentagem de areia e pedregulhos respectivamente 78% e 2%, e as partículas da dimensão de silte é de 22%.

Quando não se utiliza defloculante ao solo, composto e misturas solo-composto na análise granulométrica, as frações areia fina e silte crescem e as de argila diminuem, indicando que as partículas encontram-se agrupadas em grumos e quando se utiliza defloculante as partículas dispersam. A adição do composto ao solo faz com que as partículas de areia, silte e argila do solo se juntem com a do composto em grumos que ajuda a retenção e drenagem da água, além de melhorar a aeração, Pereira (2010), contribui ainda para reduzir os efeitos da erosão e ampliar a capacidade de reter a água e a condutividade hidráulica da mistura solo-composto, Pereira et al (2007).

Tabela 7 – Características do solo, composto e misturas utilizados nesta pesquisa

PARÂMETROS	Solo Natural		Composto		Solo-Composto 3:1		Solo-Composto 1:1	
	Com Defloc.	Sem Defloc.	Com Defloc.	Sem Defloc.	Com Defloc.	Sem Defloc.	Com Defloc.	Sem Defloc.
Argila (%)	32	0	11	0	29	7	30	0
Silte (%)	30	56	26	22	23	30	30	55
Areia Fina (%)	24	29	38	55	29	43	23	25
Areia Média (%)	14	15	23	21	17	20	16	19
Areia Grossa (%)	0	0	2	2	2	0	1	1
Partículas < 2 μ (%)	23	0	9	0	21	0	21	0
Limite de Liquidez (%)	48		-		45		50	
Limite de Plasticidade (%)	31		-		33		37	
Índice de Plasticidade (%)	17		-		12		13	
Umidade Ótima (%)	18		-		22		28	
Umidade de saturação (%)	22		-		27		34	
Peso específico aparente seco máximo (kN /m ³)	17,00		-		15,30		13,60	
Peso específico dos grãos (kN/m ³)	26,30		20,30		25,80		25,70	
Porosidade média “n” (%)	35,36		-		40,70		47,08	
Condutividade saturada (m/s)	2,57 x 10 ⁻⁸		-		2,63 x 10 ⁻⁸		2,76 x 10 ⁻⁸	

Figura 32 - Curvas granulométricas dos solos pesquisados

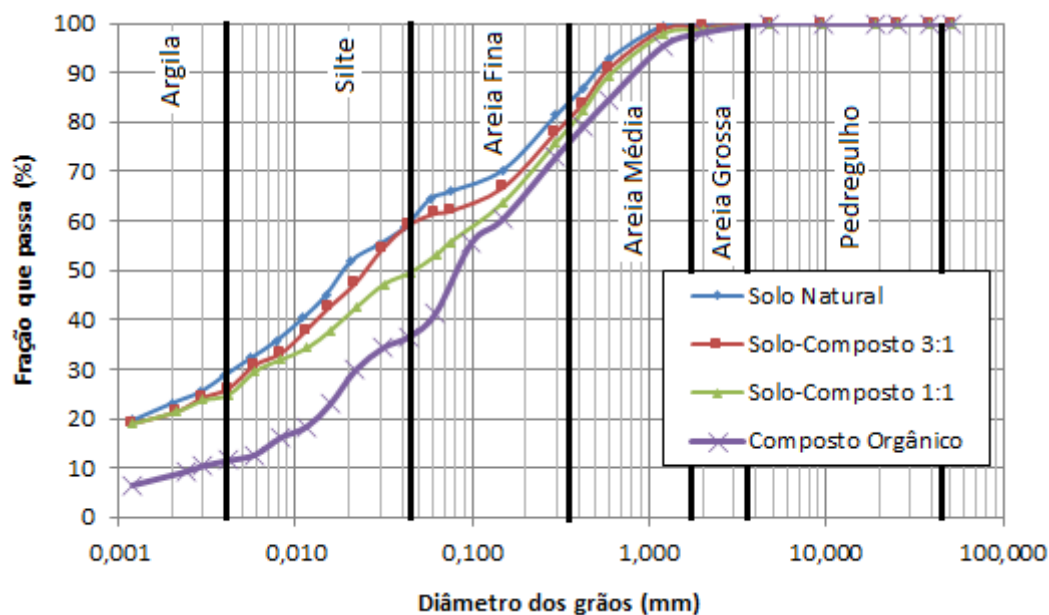
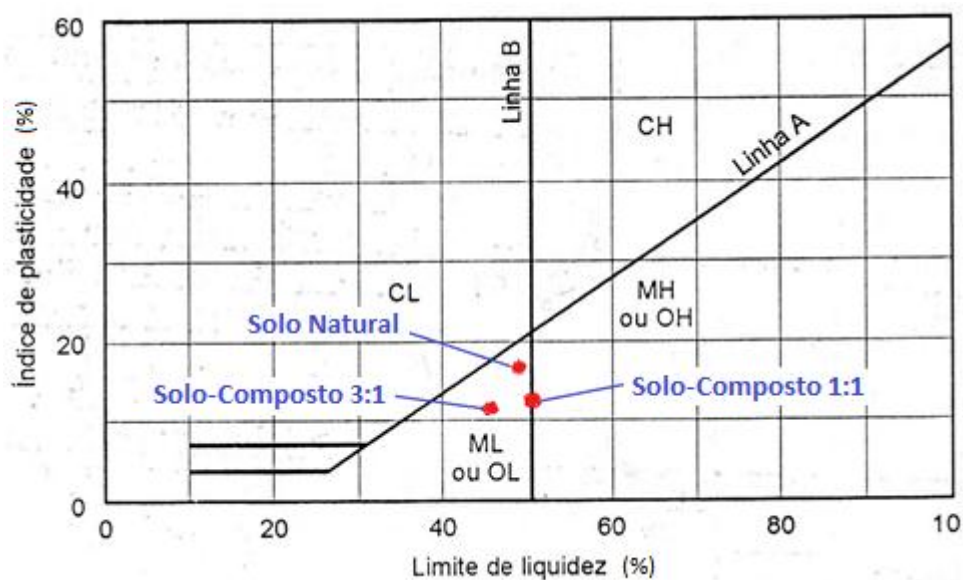


Figura 33 - Localização dos três solos na carta de plasticidade



A medida que a porcentagem do composto cresce na mistura, os Limites de Liquidez e Plasticidade tendem a crescer, porém o Limite de Plasticidade cresce mais que o Limite de Liquidez diminuindo o Índice de Plasticidade, estas

tendências também foram obtidas por Lopes (2011) e Oliveira (2013). O solo que é de alta plasticidade ($IP > 15\%$), a mistura solo-composto é de média plasticidade ($7\% < IP < 15\%$), porém próximo ao limite superior.

O peso específico real dos grãos decresce com o acréscimo do percentual do composto orgânico na mistura, isto acontece porque o composto orgânico tem peso específico menor do que o solo.

De acordo com as características físicas do Solo Natural e das misturas Solo-Composto, analisadas na Carta de Plasticidade e pelo Sistema de Classificação Unificado, o solo e as misturas solo-composto são Silte de Baixa Compressibilidade (ML). É importante observar que o Solo-Composto 1:1, também pode ser considerado Silte de Alta Compressibilidade (MH), devido ao seu Limite de Liquidez igual a 50%, conforme apresentado na Figura 33.

Nesta pesquisa, o solo e o composto foram coletados conforme descrito nos itens 3.1.1 e 3.1.2, e as misturas foram realizadas em laboratório como descrita no item 3.1.3. Nas pesquisas realizadas por Maciel (2003), Lopes (2011) e Oliveira (2013), na camada de cobertura, o solo e as misturas solo-composto foram coletados diretamente desta mesma camada de cobertura. Na Tabela 7, estão resumidos os resultados das caracterizações realizadas por estes autores e a caracterização realizada nesta pesquisa.

O solo analisado por Maciel (2003) é classificado no Sistema Unificado como CH, e o analisado por Lopes (2011) e Oliveira (2013) é ML, estes últimos são similares aos encontrados na presente pesquisa. As misturas solos-compostos foram classificadas em ML ou MH por Lopes (2011) e Oliveira (2013), similares as encontradas na presente pesquisa.

Tabela 8 – Resumo das características dos solos utilizados nesta pesquisa e dos solos analisados por Maciel (2003), Lopes (2011) e Oliveira (2013)

PARÂMETROS	Solo Natural				Solo-Composto 3:1			Solo-Composto 1:1		
	Maciel (2003)	Lopes (2011)*	Oliveira (2013)*	Autor	Lopes (2011)*	Oliveira (2013)*	Autor	Lopes (2011)*	Oliveira (2013)*	Autor
Argila (%)	27	29	28	32	27	23	29	23	25	30
Silte (%)	24	23	27	30	25	28	33	29	33	30
Areia Fina (%)	23	8	10	24	15	16	29	10	6	23
Areia Média (%)	24	20	18	14	12	16	17	15	17	16
Areia Grossa (%)	1	19	15	0	16	13	2	16	15	1
Pedregulho (%)	1	1	2	0	5	3	0	7	3	0
Partículas < 2 μ (%)	10	25	-	23	26	-	21	23	-	21
Limite de Liquidez (%)	57	42	47	48	50	49	45	52	46	50
Limite de Plasticidade (%)	27	29	33	31	33	36	33	39	35	37
Índice de Plasticidade (%)	30	13	14	17	17	13	12	12	11	13
Classificação Unificada	CH	ML	ML	ML	ML ou MH	ML	ML	ML	ML	ML ou MH
Umidade Ótima (%)	23	19,90	19,13	18	18,40	20,82	22	22,90	21,51	28
Peso específico aparente seco máximo (kN/m ³)	16,10	16,10	16,50	17,00	14,60	15,40	15,30	13	15,10	13,60
Peso específico dos grãos (kN/m ³)	26,30	26,20	26,60	26,30	25,30	25,90	25,80	24,50	26,20	25,70
Porosidade média (n)	0,39	0,43	0,38	0,35	0,49	0,40	0,40	0,52	0,42	0,47
Condutividade saturada (m/s)	-	1,5x10 ⁻⁹	1,3x10 ⁻⁷	2,57x10 ⁻⁸	9,2x10 ⁻⁸	-	2,63x10 ⁻⁸	2,8x10 ⁻⁶	-	2,76x10 ⁻⁸

* Solo coletado na camada de cobertura

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Os resultados dos ensaios de caracterização química do solo natural, do composto e das misturas solo-composto nas proporções em volume de 3:1 e 1:1 obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização química do solo, composto e das misturas solo-composto

Determinações	Unidades	Solo	Composto	Solo – composto 3:1	Solo – composto 1:1
pH em água	-	5,09	6,90	5,86	6,37
pH em KCl	-	3,71	6,17	4,76	5,73
pH em CaCl ₂	-	3,78	6,10	4,86	5,61
Carbono Orgânico	g/kg	0,53	2,11	1,42	1,91
Matéria Orgânica	g/kg	0,91	3,64	2,45	3,29
Na ⁺ trocável	cmolc/kg	0,03	0,25	0,21	0,21
K ⁺ trocável	cmolc/kg	0,01	0,40	0,13	0,42
Ca ⁺⁺ trocável	cmolc/kg	0,60	48,60	4,80	17,20
Mg ⁺⁺ trocável	cmolc/kg	0,20	7,80	1,40	2,80
Hidrogênio extraível (H ⁺)	cmolc/kg	5,55	5,40	4,90	4,90
Alumínio trocável (Al ⁺⁺⁺)	cmolc/kg	1,20	0,10	0,10	0,10
Valor de S (soma de cátions)	cmolc/kg	0,84	57,05	6,54	20,63
Valor de T (Cap. Troca Cátions)	cmolc/kg	7,59	62,55	11,54	25,63
% água no extrato saturação	%	47,20	104,00	51,20	95,60
Cond. Elétrica no ext. sat.	μS/cm/25°C	38,40	743,00	189,50	674,00
Saturação de base (V)	%	11,07	91,21	56,67	80,49
Saturação de sódio	%	0,40	0,40	1,82	0,82
Saturação de alumínio (m)	%	58,82	0,17	1,51	0,48
Retenção de Cátions (RC) -	%	6,38	519,55	22,90	69,10
Atividade da Fração Argila (Tr)	%	23,72	568,64	39,79	85,43

Legenda (fórmulas utilizadas): $S = Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}$; $CTC(T) = Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Al^{3+} + H^+$;

$$RC = 100 \frac{S + Al^{3+}}{argila(\%)}; \quad Tr = 100 \frac{CTC}{argila(\%)}; \quad V = 100 \frac{S}{T}; \quad m = \frac{100Al^{3+}}{S + Al^{3+}}$$

Na – sódio; K – potássio; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Al – alumínio; H – hidrogênio; S – soma de bases; CTC – capacidade de troca de cátions; RC – Retenção de Cátions; Tr – Atividade da Fração Argila; V – saturação por bases; m – Saturação por Alumínio.

a) Solo Natural

O pH de um solo não constitui um valor tão constante e característico como em soluções aquosas. Além de oscilações apreciáveis que o pH pode sofrer no solo, devido à atividade biológica, a variação do teor da água, as diferentes técnicas utilizadas na sua determinação, fornecem resultados diferentes. As principais causas da variação são as seguintes: efeito da diluição, efeito da suspensão, efeito de sais, CO_2 , oxidação e redução. Considerando o pH em água, o solo estudado é ácido ($4,5 < \text{pH} < 5,4$), segundo Guimarães (2002), com valor de 5,09. O valor do pH em Cloreto de Potássio (pH_{KCl}), 3,71 é inferior ao valor do pH em água ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) e a variação do pH ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) é negativa, ou seja -1,38, indicando a presença de argilas silicatadas, conforme Carvalho (2004). A quantidade da matéria orgânica obtida a partir do carbono orgânico é baixa, 0,91 % (menor que 1,0 %). A capacidade de troca catiônica é baixa, 7,59 (valor $T = \text{CTC} < 27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), indicando também a predominância do mineral argílico caulinita. A Saturação por base expressa em porcentagem (valor V), igual a 11,07 %, é inferior a 50 % tratando-se de um solo Distrófico (solo pouco fértil). A porcentagem de sódio no complexo de trocável é baixa, 0,03 ($100\text{Na}^+T^{-1} < 6\%$). A condutividade elétrica do extrato de saturação é alta, ou seja 38,40, este valor é maior que $4 \mu\text{S}/\text{cm}/25^\circ\text{C}$. A atividade da fração argila (Tr) de valor igual a 23,72, caracterizando um solo de atividade baixa. Quando a atividade da fração argila é igual ou maior que $27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de argila, indica que o solo possui “argila de atividade alta” designada de Ta, e quando o valor é inferior a $27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, o solo possui “argila de atividade baixa” designada de Tb.

b) Composto

Considerando as classificações para solo e aplicando-se para o composto verifica-se que o pH do composto é Levemente Ácido ($6,0 < \text{pH} < 6,5$) a Neutro ($6,6 < \text{pH} < 7,3$), segundo Guimarães (2002). A quantidade da matéria orgânica obtida a partir do carbono orgânico é de 3,64%. A Capacidade de Troca

Catiônica, com valor de $62,55 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$, é alta (valor $T = \text{CTC} > 27 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$). A Saturação por Base expressa em porcentagem (valor V) é superior a 50 % tratando-se de um material Eutrófico. A porcentagem de sódio no complexo de trocável, com valor de 0,25, é baixa ($100\text{Na}^+\text{T}^{-1} < 6\%$). A condutividade elétrica do extrato de saturação, igual a 743,00, é alta, $> 4 \mu\text{S}/\text{cm}/25^\circ\text{C}$. A atividade da fração argila do composto (Tr) é igual a 568,64, este valor é maior que 27 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$, isto significa que o composto possui partículas do tamanho de argila de atividade alta, (Ta)

c) Mistura Solo-Composto

A Tabela 10 apresenta uma síntese dos efeitos da adição do composto ao solo. A adição do composto ao solo reduz a acidez na mistura solo-composto, passando a ser Moderadamente Ácido, isto é 5,86 ($5,5 < \text{pH} < 5,9$) na mistura 3:1 e Levemente Ácido, isto é 6,37 ($6,0 < \text{pH} < 6,5$) na mistura 1:1, segundo a classificação Guimarães (2002), considerando o pH em água. A quantidade da matéria orgânica obtida a partir do carbono orgânico cresce com o acréscimo da adição do composto e do aumento da proporção do composto. A capacidade de troca catiônica, na mistura 3:1 igual a 11,54 e na mistura 1:1 igual a 25,63, continua sendo baixa (valor $T = \text{CTC} < 27 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$), porém maior do que no solo natural. A Saturação por base expressa em porcentagem (valor V) é superior a 50 % quando se adiciona o composto ao solo tornando a mistura Eutrófica. A porcentagem de sódio no complexo de trocável continua sendo baixa ($100\text{Na}^+\text{T}^{-1} < 6\%$), a condutividade elétrica do extrato de saturação continua sendo alta ($> 4 \mu\text{S}/\text{cm}/25^\circ\text{C}$), porém valores bem maiores do que no solo natural, e a porcentagem de água no extrato de saturação cresce e a saturação por alumínio diminui quando é adicionado composto ao solo natural. A atividade da fração argila (Tr) na mistura 3:1 é de 39,79 e na mistura 1:1 é de 85,43, isto significa que ambas as misturas possuem argila de atividade alta. O Solo Natural que é Distrófico passa a ser Eutrófico (fértil) propicia um meio favorável ao desenvolvimento da vegetação nativa, com potencialidade para

utilização como camada oxidantes em camadas de cobertura de aterro sanitário. O aumento de composto orgânico ao solo favorece nutrientes para as bactérias gerando aumento da atividade oxidante.

A medida que a acidez do solo diminui com a adição do composto ao solo, ficando próxima a neutralidade ($6,5 < \text{pH} < 7,5$), ocorre um crescimento bacteriano favorecendo a oxidação do metano nas camadas de cobertura do aterro, Tortaro et al., (2012).

O aumento da porosidade do solo devido a adição do composto Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10, transforma o solo distrófico em eutrófico, elevando a oxidação do metano (CH_4).

Tabela 10 – Síntese dos efeitos da adição do composto ao solo

Determinações	Solo	Solo – composto 3:1	Solo – composto 1:1
'pH em água	5,09 Ácido ($4,5 < \text{pH} < 5,4$)	5,86 Moderadamente ácido ($5,5 < \text{pH} < 5,9$)	6,37 Levemente ácido ($6,0 < \text{pH} < 6,5$)
Matéria Orgânica	0,91	2,45	3,29
Valor de S (soma de cátions)	0,84	6,54	20,63
Valor de T (Cap. Troca Cátions)	7,59 - baixa	11,54 - baixa	25,63 - baixa
% água no extrato saturação	47,20	51,20	95,60
Cond. Elétrica no ext. sat.	38,40	189,50	674,00
Saturação de base (V)	11,07 Distrófico	56,67 Eutrófico	80,49 Eutrófico
Saturação de sódio	0,40 - baixa	1,82 - baixa	0,82 - baixa
Saturação de alumínio (m)	58,82	1,51	0,48
Retenção de Cátions (RC) - Atividade da Fração Argila (Tr)	6,38	22,90	69,10
	23,72	39,79	85,43

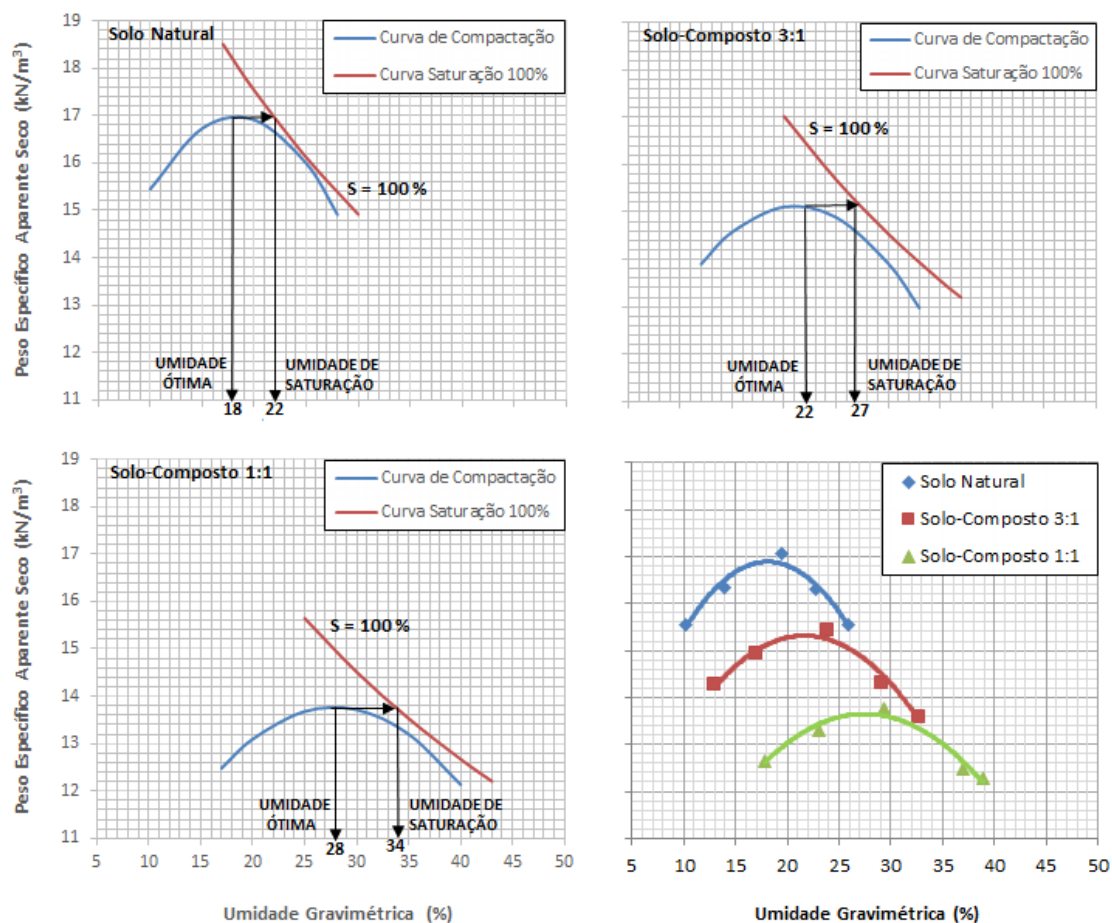
4.3 COMPACTAÇÃO E HOMOGENEIZAÇÃO

Os resultados dos ensaios de compactação, em laboratório, estão apresentados na Figura 34. A medida que se aumenta a adição de composto orgânico ao Solo Natural, ocorre uma redução no peso específico aparente seco máximo, com aumento na umidade ótima. O aumento na adição de composto orgânico tornam as curvas cada vez mais achatadas, semelhante às características dos solos argilosos. É importante observar que, quando se toma como referencial a curva de compactação do solo convencional, as umidades ótimas dos solos com composto estão localizadas no lado do ramo úmido, sugerindo que, para manter a mesma capacidade de suporte com a mesma energia de compactação, adicionando-se composto ao Solo Natural, um aumento da umidade ótima é verificado para compensar a diminuição do peso específico aparente seco máximo.

A forma das curvas de compactação do Solo Natural e das misturas solo-composto é do tipo A pela classificação Lee e Suedkamp (1972), e do tipo III pela classificação Maccarini et al., (1988), indicando que o acréscimo de composto não modifica a classificação da forma das curvas segundo estes autores.

Na curva de compactação, também está apresentada uma forma de se determinar graficamente a umidade gravimétrica em que cada solo compactado atinge a saturação, tomando como referência o peso específico aparente seco máximo e a curva de saturação 100%. É importante observar que a diferença entre a umidade ótima e a umidade de saturação no Solo Natural, Solo-Composto 3:1 e no Solo-Composto 1:1 são, respectivamente, de 4%, 5% e 6%, indicando que o aumento na proporção de composto orgânico ao solo natural, provoca um aumento gradual nesta diferença.

Figura 34 – Curvas de compactação e determinação da umidade de saturação



Os valores em percentual do volume das fases do Solo Natural, do Solo-Composto 3:1 e do Solo-Composto 1:1, estão organizados na Tabela 11 e Figura 35. É importante observar que as amostras foram moldadas em laboratório e compactados na umidade ótima e peso específico seco máximo, de cada material. Verifica-se que, a medida em que ocorre acréscimo do teor de composto há redução do volume de sólidos, aumento do volume de água e acréscimo de volume de ar.

O aumento da umidade ótima e diminuição do peso específico aparente seco máximo da mistura em relação ao Solo Natural se deve a vários fatores: i) diminuição do volume sólido-mineral, Tabela 11; ii) aumento do volume sólido-composto, Tabela 11; iii) maior capacidade de reter água no extrato de

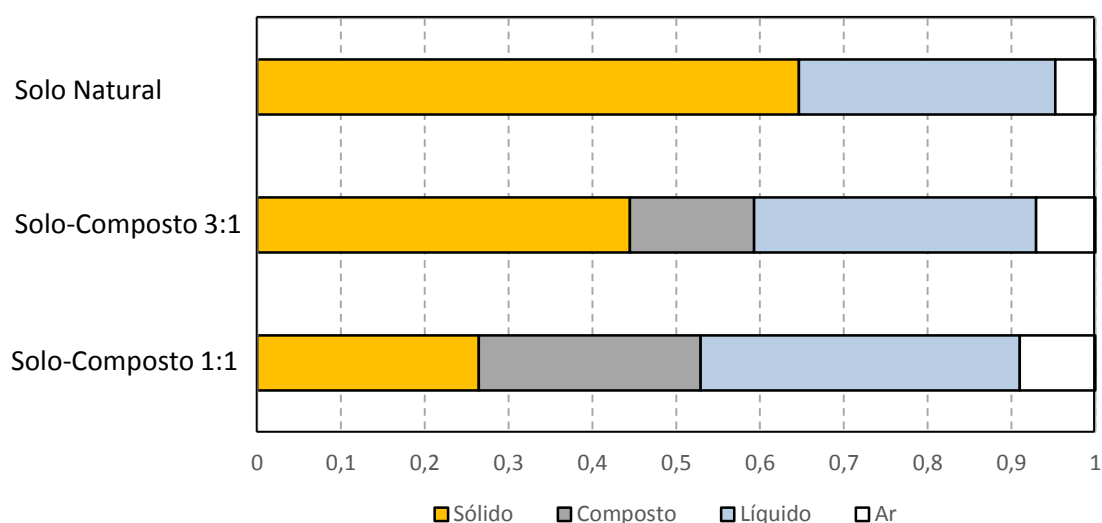
saturação, Tabela 9; iv) menor peso específico real dos grãos, Tabela 8 e v) o acréscimo da fase líquida (água), incompressível ser maior que a fase gasosa.

É importante observar que, embora haja nas misturas uma redução significativa do volume sólido-mineral 31,19% e 59,06% respectivamente para as proporções 3:1 e 1:1, o mesmo não se verifica em acréscimo de volume de vazios (líquido + ar) de 15,19% e 33,14% respectivamente para as misturas 3:1 e 1:1 (obtidos a partir da Tabela 11).

Tabela 11 – Fases do solo e das misturas solo-composto, em percentual

Fases	Solo Natural %	Solo-Composto 3:1 %	Solo-Composto 1:1 %
Sólido-mineral	64,64	44,48	26,46
Sólido-composto	0	14,83	26,46
Sólido (total)	64,64	59,31	52,92
Líquido (água)	30,60	33,69	38,08
Gasoso (ar)	4,76	7,04	9,00
Volume de vazios	35,36	40,73	47,08

Figura 35 – Fases do solo e das misturas solo-composto



Os valores do peso específico aparente seco e da umidade obtidos em campo, do grau de compactação e do desvio de umidade em relação a umidade ótima são apresentados na Tabela 12. Observa-se que as camadas em campo foram compactadas abaixo do peso específico aparente seco máximo, tendo grau de compactação variando entre 82,22% e 90,44%. Lopes (2011) encontrou uma variação de 90,6% a 95,4% e Oliveira (2013) obteve uma variação muito maior, de 75,80% a 154,25%.

Tabela 12 – Grau de compactação e desvio de umidade em relação a umidade ótima

Amostras	Condições de campo		Condições de laboratório		Grau de Compactação	Desvio de Umidade
	Peso Específico Aparente Seco kN/m ³	Umidade (%)	Peso Específico Ap. Seco Máx. kN/m ³	Umidade ótima (%)	GC (%)	Δw (%)
Solo Natural	14,80	22,92	17,00	18,00	82,22	+4,92
Solo-Composto 3:1	13,70	24,42	15,30	22,00	89,54	+2,42
Solo-Composto 1:1	12,30	22,08	13,60	28,00	90,44	-5,92

4.4 RESISTÊNCIA DE PONTA EM CAMPO

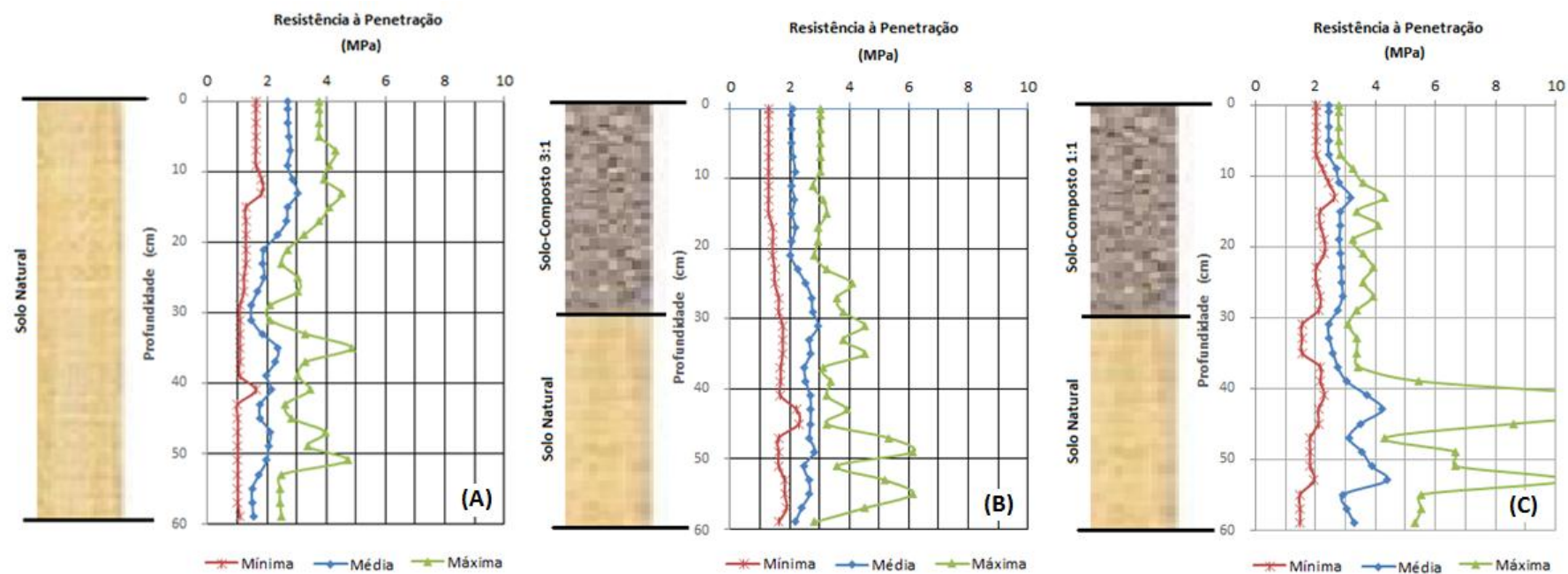
A homogeneidade do processo de compactação em campo foi avaliado através da determinação da resistência de ponta utilizando o DPL como descrito no item 3.2. Foram realizadas por camada ou perfil, 9 determinações. Valores mínimos, médios e máximos de resistência de ponta em função da profundidade são apresentados na Figura 36. Na análise não foram considerados os 0,05 m iniciais de cada determinação por considerar os efeitos das raízes. Os valores médios da resistência de ponta, por faixa de profundidade, são apresentados na Tabela 13.

No Solo Natural, a resistência de ponta obtida em campo na camada de cobertura da célula experimental, é variável com a profundidade. Nos primeiros 0,20 m o valor médio é 2,80 MPa, de 0,20 a 0,60 o valor médio é 2,00 MPa evidenciando uma heterogeneidade na compactação da camada (Figura 36). O terço superior da camada ficou mais compactado do que os dois terços finais. Além do mais a compactação do terço superior da camada é mais homogêneo do que os dois terços finais.

No Perfil 1 constituído de 0,30 m da mistura Solo-Composto 3:1 e de 0,30 m de Solo Natural, a resistência de ponta média, obtida com o DPL, na metade superior da camada (Solo-Composto 3:1) é 2,10 MPa e na metade inferior 2,80 MPa. A adição de composto ao solo diminui a resistência de ponta.

No Perfil 2, constituído de 0,30 m da mistura Solo-Composto 1:1 e de 0,30 m de Solo Natural, a resistência de ponta média na metade superior (Solo-Composto 1:1) é 2,60 MPa e na metade inferior (Solo Natural) a resistência de ponta é muito variável indicando uma compactação muito heterogênea. A adição de composto, neste perfil, causa uma redução na resistência de ponta de 25% tornando o solo menos resistente para o desenvolvimento das raízes dos vegetais, com maior teor de água e maior índice de vazios. A compactação nos dois terços finais da camada é mais heterogêneo do que no terço inicial.

Figura 36 – Resistência de ponta, com o DPL, das camadas de cobertura da célula experimental



Onde: a) Solo Natural; b) Perfil 1 e c) Perfil 2

Tabela 13 – Valores médios da resistência de ponta obtidos em campo com o DPL

Solo/Perfil	Profundidade (m)	Resistência de ponta (MPa)
Solo Natural	0,05 – 0,20	2,80
	0,10 – 0,30	1,80
	0,30 – 0,60	2,00
Perfil 1		
Solo-Composto 3:1 e	0,05 – 0,30	2,10
Solo Natural	0,30 – 0,60	2,80
Perfil 2		
Solo-Composto 1:1 e	0,05 – 0,30	2,60
Solo Natural	0,30 – 0,60	3,20

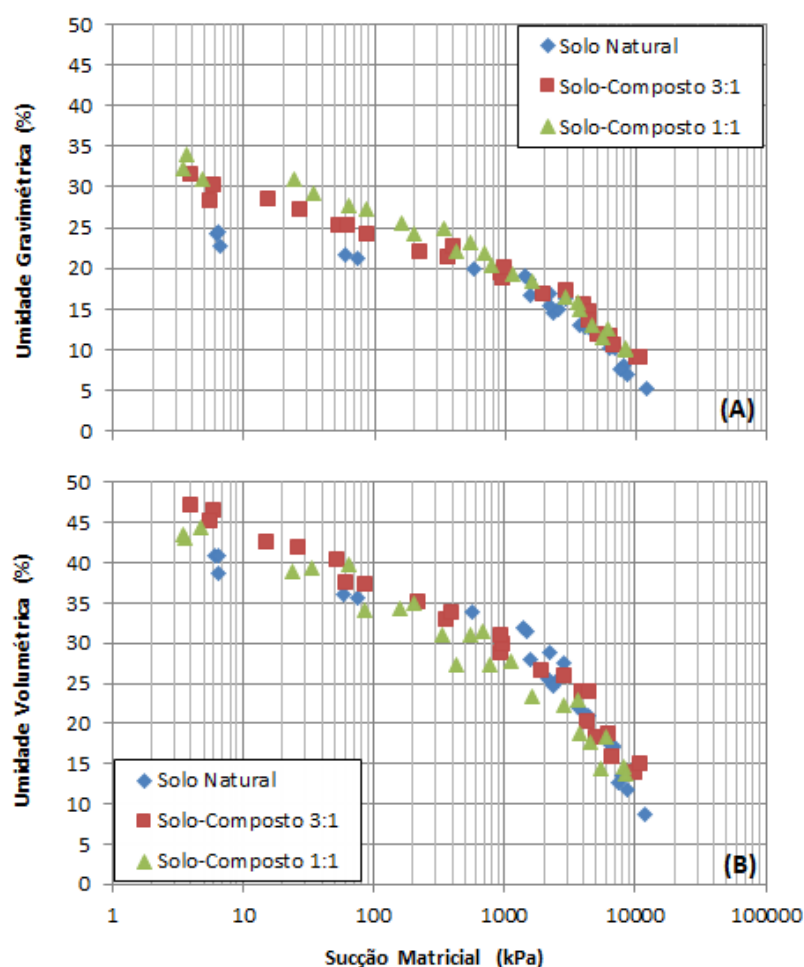
O processo de compactação em campo é mais heterogêneo na segunda metade da camada do que na primeira parte.

4.5 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

As curvas de retenção de água do Solo Natural e das misturas Solo-Composto 3:1 e 1:1, compactados em laboratório, são apresentadas na Figura 37. As curvas referem-se às trajetórias de secagem, e os pontos iniciais de cada curva foram obtidos após a saturação das amostras. As curvas relacionam a umidade gravimétrica com sucção (Figura 37a) e umidade volumétrica com sucção (Figura 37b). Observa-se uma variação na umidade máxima de aproximadamente 8% entre o Solo Natural e o Solo-Composto 3:1, e em relação ao Solo-Composto 3:1 e Solo-Composto 1:1 esta variação é de aproximadamente 3%. Todas as curvas convergem para uma mesma umidade gravimétrica em torno de 20% e sucção 1000 kPa.

Com relação às curvas de retenção representadas pela umidade gravimétrica e volumétrica, observa-se que as curvas experimentais das misturas Solo-Composto 3:1 e 1:1 apresentam valores de sucção de entrada de ar bastante reduzidos indicando uma zona de efeito capilar também reduzida, no entanto apresentam umidades de saturação maiores que a do Solo Natural, em torno de 5%. Conforme modelo proposto por Kelvin (1753), citado por Fredlund e Rahardjo (1993), o efeito de capilaridade é inversamente proporcional ao diâmetro do poro e à pressão de ar no solo e diretamente proporcional ao ângulo de contato entre o líquido intersticial e o sólido. Entretanto, o Solo Natural apresenta uma sucção de entrada de ar maior e, conseqüentemente, uma maior zona de efeitos capilares, características dos solos de granulometria mais fina, como as argilas.

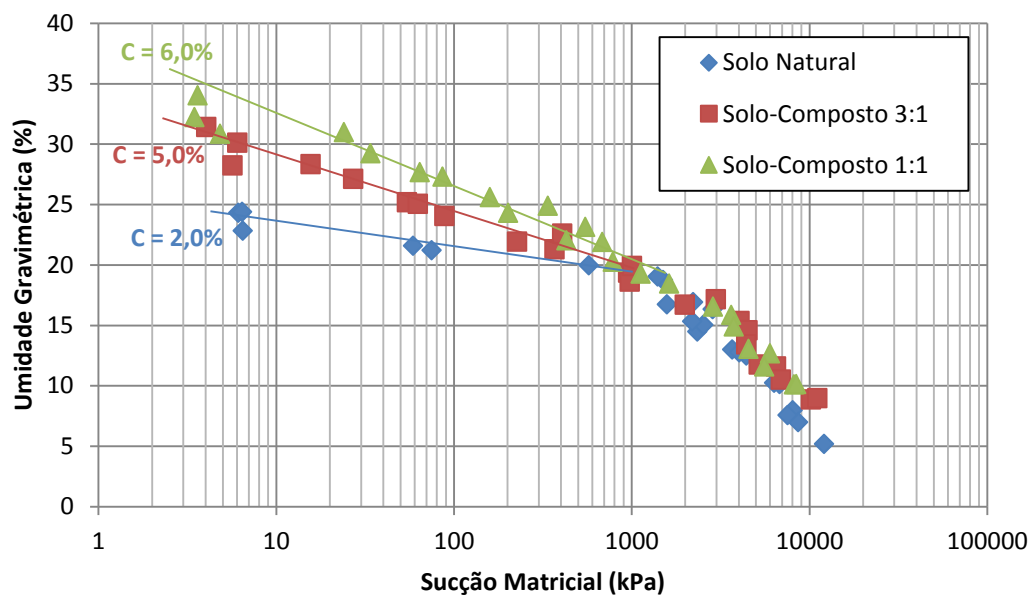
Figura 37 – Curvas de retenção de água



As curvas de retenção de água apresentam formato semelhante ao da curva de retenção de solos finos. De acordo com a relação entre variação de umidade gravimétrica e sucção ($C=\Delta w/\log\Delta\psi$), apresentada na Figura 38, o Solo Natural e as misturas Solo-Composto 3:1 e 1:1 apresentaram capacidade diferencial de umidade respectivamente iguais a 2,0%, 5,0% e 6,0%. Observa-se que o Solo-Composto 1:1 apresenta maior capacidade diferencial de umidade do que o Solo-Composto 3:1 e o Solo Natural, respectivamente, para valores de sucção até 1000 kPa, indicando que quanto maior o percentual de composto, adicionado ao solo, maior a retenção. Esta faixa de sucção compreende a zona de efeito de fronteira e a zona de transição primária onde predominam as forças de capilaridade. Considerando sucções acima de 1000 kPa, observou-se que o aumento no percentual de composto diminuiu a capacidade de retenção, ou seja, para o Solo Natural, Solo-Composto 3:1 e Solo-Composto 1:1 as respectivas capacidade de retenção foram 14,0 %, 13,0 % e 11,2 % (Tabela 14).

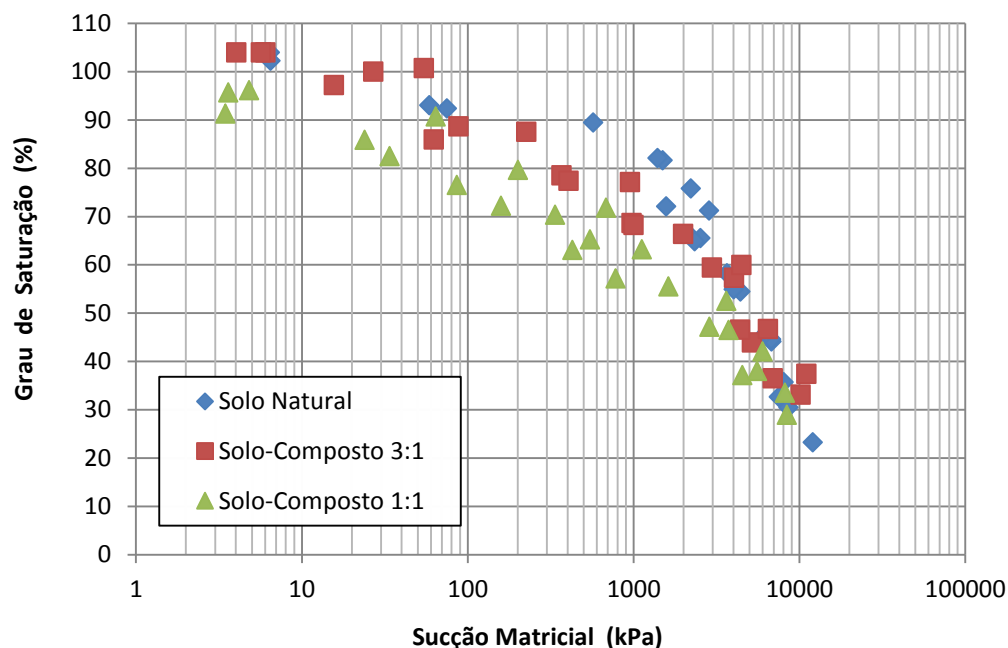
É importante observar que na faixa de sucção que vai de 1000 kPa até 10000 kPa (zona de transição secundária) ocorre o predomínio de forças de adsorção sobre as forças capilares.

Lopes (2011), ao estudar os solos das camadas de cobertura da célula experimental do aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE, encontrou valores de capacidade de retenção até a sucção de 1000 kPa iguais a 1,7% (camada convencional), 3,0% (camada metanotrófica 02) e de 4% (camada metanotrófica 01). Para Jucá (1993), o valor da capacidade diferencial de umidade depende das propriedades do solo (textura e limites de consistência), variações de umidade e efeitos da histerese nas amostras, sendo equivalente à capacidade de retenção de umidade.

Figura 38 – Relação entre a umidade gravimétrica e a sucção matricial**Tabela 14** – Resumo da capacidade de retenção

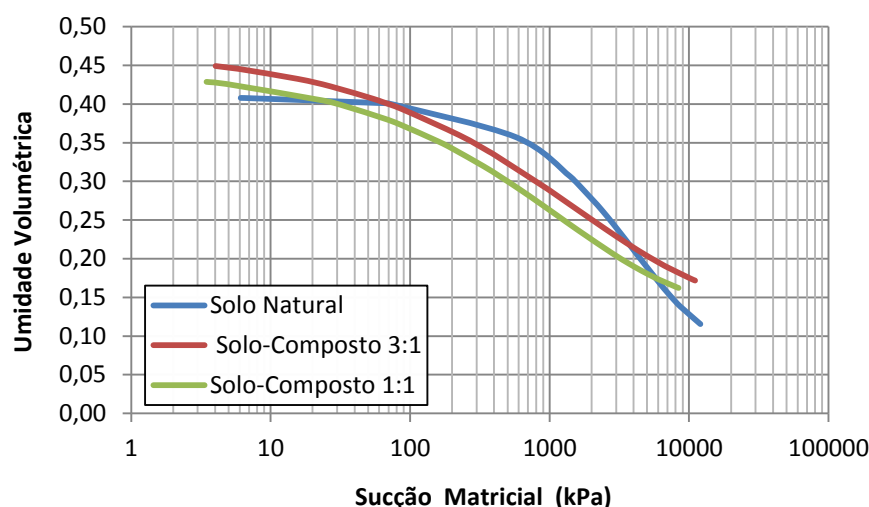
Solo	Capacidade de Retenção (%)	
	Sucção < 1000 kPa	Sucção > 1000 kPa
Solo Natural	2,0	14,0
Solo-Composto 3:1	5,0	13,0
Solo-Composto 1:1	6,0	11,2

Para uma mesma sucção, o grau de saturação no Solo Natural e no Solo-Composto 3:1 é maior do que no Solo-Composto 1:1 até a sucção de 6000 kPa, para valores de sucção superiores a 6000 kPa esta tendência não se verifica, Figura 39.

Figura 39 – Relação entre grau de saturação e sucção matricial

As curvas de retenção de água, ajustadas pelo modelo de van Genuchten (1980), que relacionam umidade volumétrica com sucção matricial, são apresentadas na Figura 40. Na zona de fronteira (faixa de sucção onde o solo se encontra saturado) o Solo Natural apresentou valor de umidade volumétrica inferior ao Solo-Composto 1:1 e este, inferior ao Solo-Composto 3:1. Nas zonas de transição primária e secundária onde atuam as forças capilares e de adsorção, respectivamente, observa-se que estas forças são menos atuantes nas misturas Solo-Composto do que no Solo Natural. Na zona de umidade residual o Solo Natural tende a valores de umidade volumétrica inferiores aos do Solo-Composto 1:1 e as do Solo-Composto 3:1, respectivamente.

Figura 40 – Curvas de retenção ajustadas através do modelo de van Genuchten (1980)



Na Tabela 15, estão organizados os parâmetros fornecidos pelo programa computacional STATISTICA®, após processamento de ajuste das curvas experimentais do Solo Natural, Solo-Composto 3:1 e Solo-Composto 1:1. O valor de R^2 indica intensidade da correlação entre os valores das sucções matriciais e dos teores de umidade. O parâmetro de ajuste α está geralmente relacionado com o valor de entrada de ar e, os parâmetros de ajuste m e n estão relacionados com as umidades residuais e com a inclinação da curva.

Tabela 15 – Parâmetros das curvas de retenção ajustadas através do modelo de van Genuchten (1980)

Parâmetros	Solo		
	Natural	Solo-composto 3:1	Solo-composto 1:1
R^2	0,95745676	0,9654029	0,96034254
α	$0,480 \times 10^{-5}$	$0,23 \times 10^{-5}$	$0,17 \times 10^{-5}$
m	31,3611	13,5321	22,3195
n	0,878701	0,463132	0,501362

Onde: R^2 é o coeficiente de determinação; α , m e n são parâmetros de ajuste.

4.6 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica saturada, obtida nas amostras compactadas em laboratório, inicialmente na umidade ótima e no peso específico aparente seco máximo, são apresentadas na Tabela 8. Os valores para o Solo Natural, Solo-Composto 3:1 e Solo-Composto 1:1 são respectivamente $2,57 \times 10^{-8}$ m/s, $2,63 \times 10^{-8}$ m/s e $2,76 \times 10^{-8}$ m/s. Estes valores são muito próximos, não indicando uma influência significativa da adição do composto. Entretanto, há um pequeno acréscimo na condutividade saturada com o acréscimo do composto.

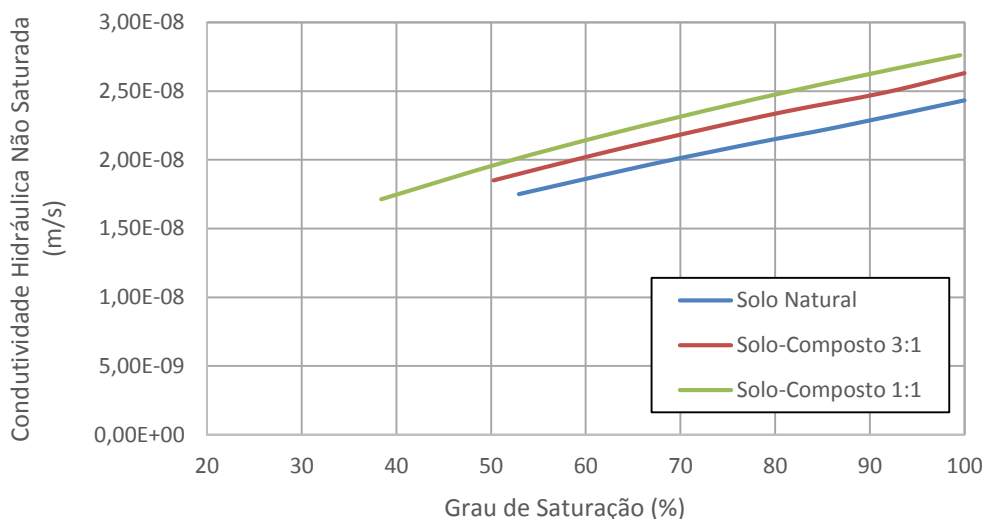
As camadas de cobertura devem ter condutividade hidráulica inferior a 10^{-7} m/s, espessura mínima de 0,45 m, além de ter uma camada de preservação de erosão no mínimo de 0,15 m, Qian et al, (2002). Estas condições são atendidas pelas amostras aqui estudadas.

A condutividade hidráulica saturada obtida em laboratório, a partir de amostras compactadas em campo e coletadas nas três camadas de cobertura, em moldes de PVC por Lopes (2011) foram: $1,5 \times 10^{-9}$ m/s, $9,2 \times 10^{-8}$ m/s e $2,8 \times 10^{-6}$ m/s respectivamente para Solo Natural, Solo-Composto 3:1 e Solo-Composto 1:1. Os valores da condutividade hidráulica encontrados nas amostras compactadas em campo, por Lopes (2011), são superiores aos encontrados na presente pesquisa para os Solos-Compostos máximo de 3,5 vezes, e no Solo Natural é inferior (17 vezes). Oliveira (2013) obteve condutividade hidráulica saturada em amostras coletadas em moldes de PVC, em campo, no Solo Natural de $1,3 \times 10^{-7}$ m/s, superior ao valor encontrado na presente pesquisa (5 vezes). Estas diferenças estão relacionadas a forma de compactação, estrutura do solo e umidades iniciais.

A condutividade hidráulica não saturada foi obtida a partir da permeabilidade saturada e da formulação de van Genuchten (1980), Tabela 5. Estes resultados são apresentados na Figura 41 em função do grau de saturação. Embora a variação da permeabilidade não saturada seja pequena

com o acréscimo do composto, há uma tendência de aumento. A adição de composto ao solo aumenta o volume de vazios (água + ar).

Figura 41 – Condutividade hidráulica não saturada em função do grau de saturação



4.7 RELAÇÃO ENTRE UMIDADE DE ENTRADA DE AR E UMIDADE ÓTIMA

Analisando a curva de retenção do Solo Natural, compactado em laboratório, desta pesquisa e as curvas de retenção elaboradas por outras pesquisas já realizadas que também objetivaram o estudo de solos compactados para utilização em camadas de cobertura de RSU (Capítulo 2, item 2.4.2), observou-se que as umidades gravimétricas de entrada de ar, na maioria dos casos, apresentaram semelhança com as respectivas umidades ótimas. A Figura 42, referente ao Solo Natural, de umidade ótima de compactação determinada em 18%, apresenta umidade gravimétrica de entrada generalizada de ar igual a 17,5% e sucção matricial de 1500 kPa. Para o Solo-Composto 3:1 (Figura 43), com umidade ótima de compactação determinada em 22%, apresenta umidade gravimétrica de entrada generalizada de ar igual a 22,5% e sucção matricial de 620 kPa. O Solo-Composto 1:1

(Figura 44), com umidade ótima de compactação determinada em 28%, apresenta umidade gravimétrica de entrada generalizada de ar igual a 37% e sucção de 60 kPa. A adição de composto ao Solo Natural aumenta a umidade gravimétrica de entrada generalizada de ar e consequentemente a diminuição da sucção relacionada.

A Figura 45 apresenta a relação entre a umidade ótima e a umidade gravimétrica de entrada generalizada de ar do Solo Natural desta pesquisa e dos solos pesquisados por Maciel (2003), Vieira (2005), Guzelini (2011) e Lopes (2011) relatados no Capítulo 2, Item 2.4.4. Esta correlação apresentou um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,8784, o que representa uma boa dependência entre estes dois parâmetros. É importante observar que na Figura 45 só estão plotados os valores referentes aos trabalhos que apresentaram curva de compactação, relação entre umidade gravimétrica e sucção matricial e os solos sem a adição de composto orgânico.

Figura 42 – Ponto de entrada generalizada de ar no Solo Natural compactado na umidade ótima

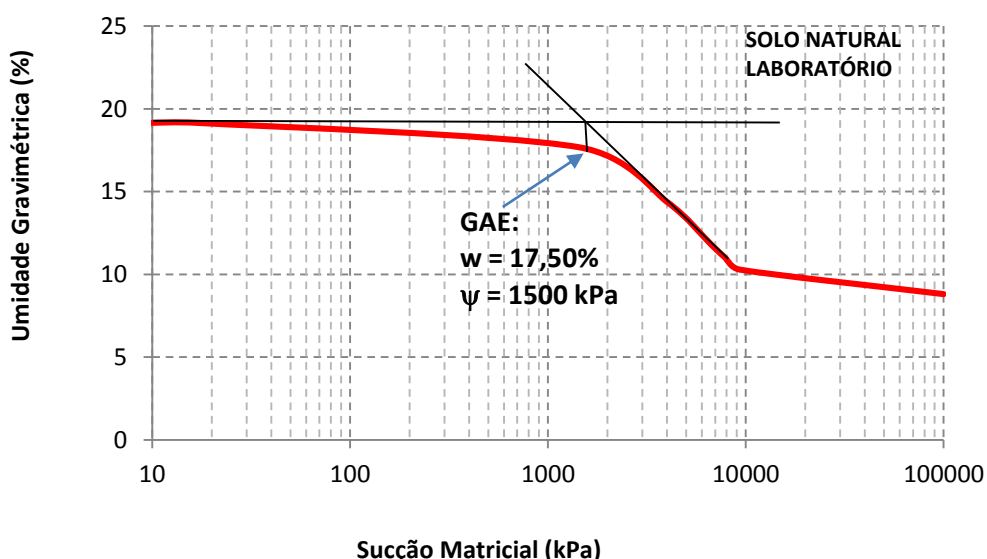


Figura 43 – Ponto de entrada generalizada de ar no Solo-Composto 3:1 compactado na umidade ótima

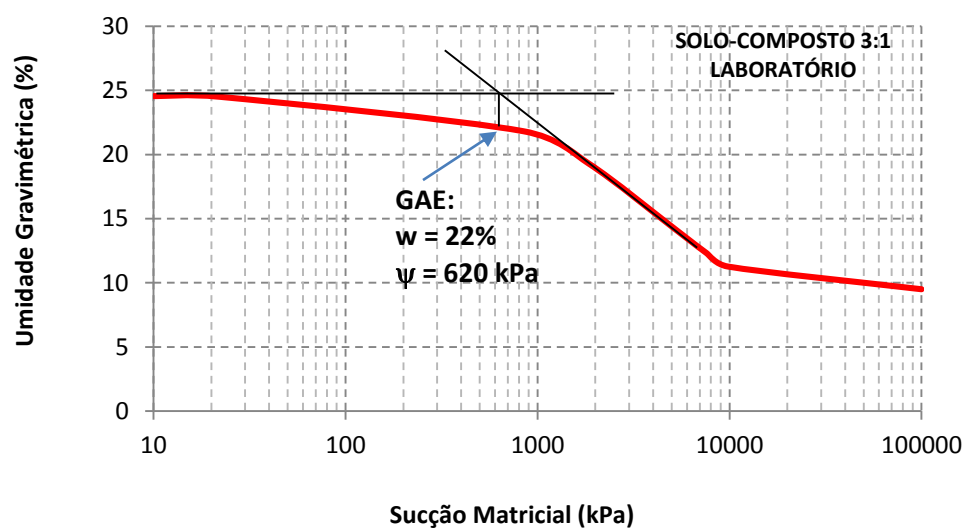


Figura 44 – Ponto de entrada generalizada de ar no Solo-Composto 1:1 compactado na umidade ótima

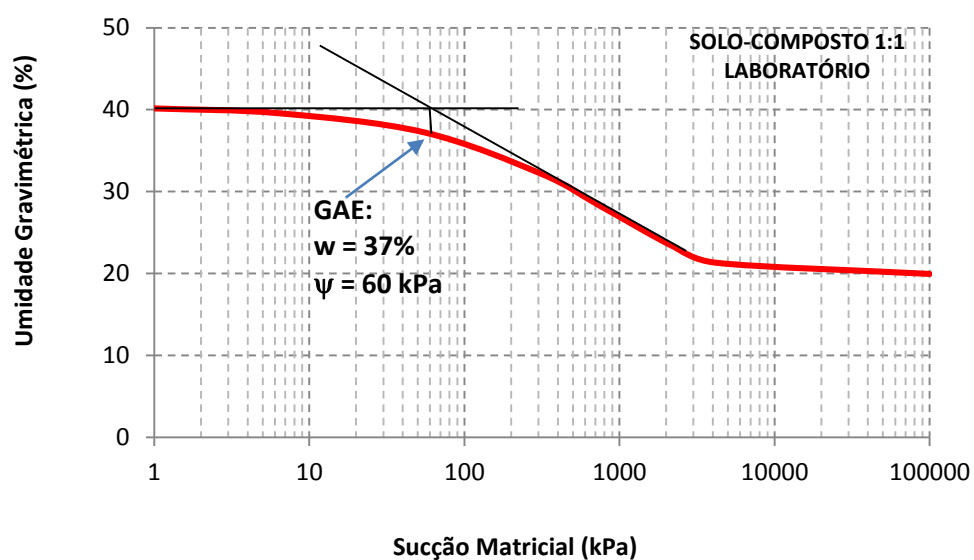
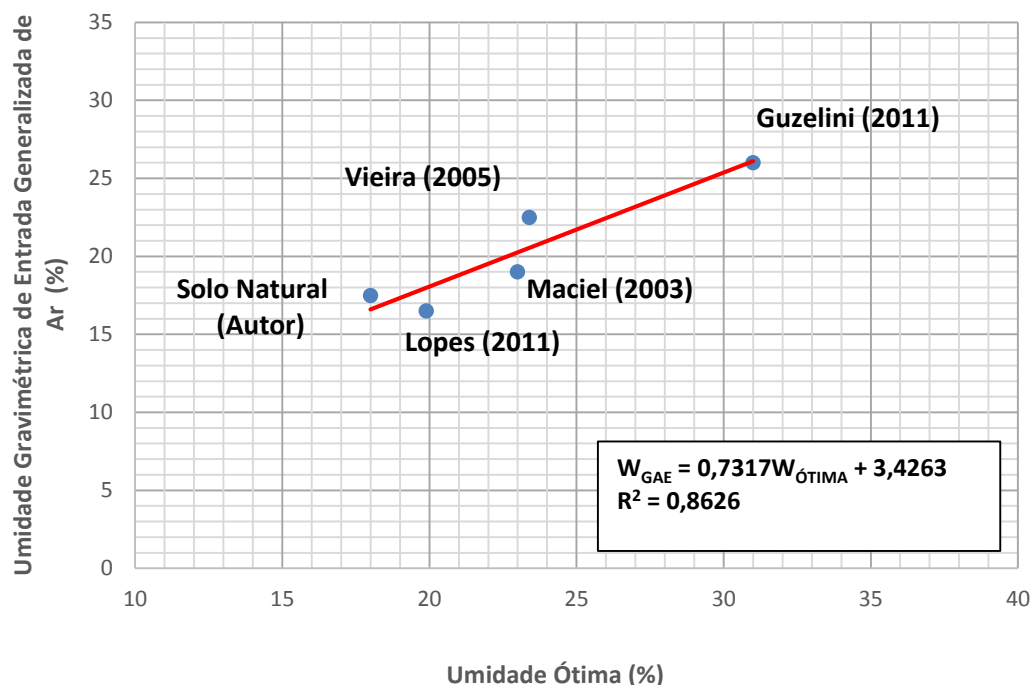


Figura 45 – Correlação entre umidade ótima e umidade gravimétrica de entrada generalizada de ar



A relação entre a umidade ótima e a umidade gravimétrica de entrada generalizada de ar gerou a seguinte equação:

$$W_{GAE} = 0,7317W_{ÓTIMA} + 3,4263 \quad \text{Equação (12)}$$

Nas informações resumidas na Tabela 16, observa-se que a sucção correspondente a umidade generalizada de entrada de ar diminui com o aumento da proporção de composto orgânico adicionada ao solo. Estes valores foram de 1500 kPa para o Solo Natural, 620 kPa para a mistura Solo-Composto 3:1 e de 60 kPa para a mistura Solo-Composto 1:1.

É interessante observar que houve um aumento no limite de plasticidade (LP) com o aumento na adição de composto. Entretanto, o índice de plasticidade, faixa em que o solo se apresenta plástico, diminuiu.

Tabela 16 – Parâmetros utilizados na correlação entre umidade ótima versus Umidade Gravimétrica de Entrada Generalizada de Ar

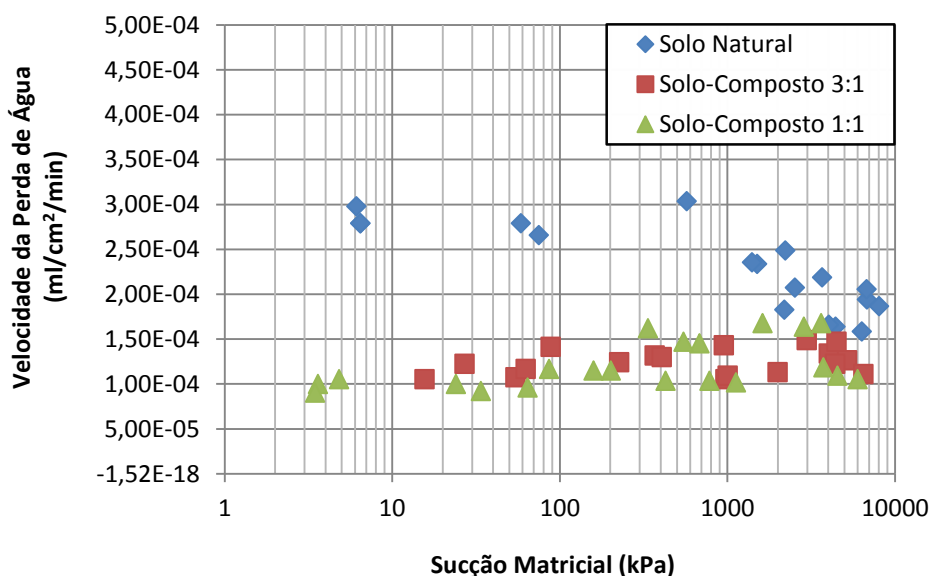
Solo	Umidade ótima (%)	Umidade gravimétrica de entrada de ar (%)	Sucção matricial de entrada de ar (kPa)	Peso específico aparente seco máximo (kN/m ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Natural	18	17,5	1500	1700	48	31	17
Solo-Composto 3:1	22	22,5	620	1530	45	33	12
Solo-Composto 1:1	28	37	60	1360	50	37	13
Maciel (2003)	23	19	2000	1610	57	27	30
Vieira (2005)	23,4	22,5	200	1590	47	34	13
Guzelini (2011)	31	26	2000	1460	56	12	44
Lopes (2011)	19,9	15	500	1660	42	29	13

4.8 VELOCIDADE DA PERDA DE ÁGUA

O Solo Natural apresentou uma velocidade de perda de água constante e superior às das misturas até uma sucção de aproximadamente 600 kPa, esta velocidade foi de aproximadamente $2,8 \times 10^{-4}$ ml/cm²/min. Para sucções superiores a 600 kPa, a velocidade da perda de água começou a decrescer, Figura 46.

Com relação às misturas observa-se que, tanto o Solo-Composto 3:1 como o Solo-Composto 1:1 apresentaram comportamento praticamente semelhantes com velocidade de perda de água média de $1,2 \times 10^{-4}$ ml/cm²/min. As duas misturas apresentaram comportamentos praticamente constante, indicando que a adição de composto concedeu ao solo a capacidade de manter a água retida com relação ao aumento da sucção.

Figura 46 – Curvas de velocidade da perda de umidade



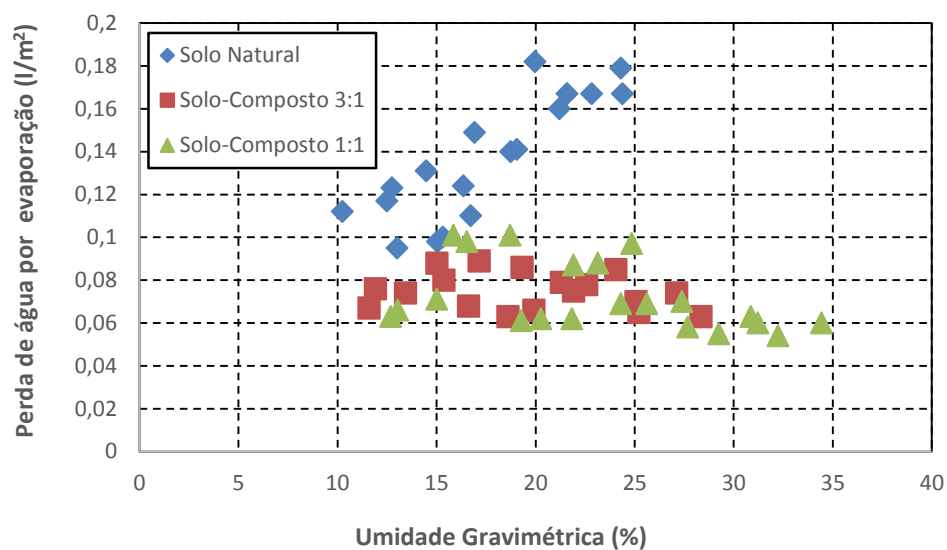
Fisher (1923) citado por Aguirre (1990) verificou que em perfis de solos inicialmente úmidos, o processo de secagem por evaporação tem ocorrido em três etapas: a primeira de velocidade constante (etapa inicial), a segunda de

velocidade decrescente (etapa intermediária) e a terceira de velocidade lenta (etapa residual). Isto em condições externas constantes e nível d'água suficientemente afastado da superfície do terreno, para não participar do processo de evaporação. Observa-se que, tanto no Solo-Composto 3:1 como no solo-Composto 1:1, a velocidade de perda de água é inicialmente baixa e tende a permanecer constante.

Na Figura 47, observa-se que o volume de água evaporado pelo Solo Natural aumenta ou diminui à medida em que ocorre um aumento ou diminuição da umidade. A quantidade mínima perdida foi de aproximadamente 0,090 l/m² para uma umidade na faixa de 10% a 15%. E uma quantidade máxima de perda de água de 0,180 l/m² para a faixa de umidade de 20% a 25%. O Solo-Composto 3:1 perde água por evaporação, de forma constante, de 0,050 l/m² a 0,100 l/m² na faixa de umidade que vai de 10% a 25%. Para umidades acima de 25% este solo chega a uma tendência de perda de água de aproximadamente 0,06 l/m². O Solo-Composto 1:1 apresenta uma perda alternada de água por evaporação, variando de 0,060 l/m² a 0,100 l/m² numa faixa de umidade que vai de 10% a 25%. Para umidades acima de 25%, a perda de água torna-se constante e igual a 0,060 l/m².

Para sucções acima de 10000 kPa, os três solo analisados nesta pesquisa, tendem a apresentar a mesma velocidade de perda de água independentemente da adição de composto orgânico. Neste caso, a água é higroscópica, encontrando-se fortemente aderida às partículas dos solos.

É importante lembrar que durante a realização deste ensaio as amostras ficaram expostas a uma temperatura ambiente de 25°. Entretanto, as informações obtidas na análise de perda de água por evaporação dos três tipos de solos, indicam que o aumento na adição de composto ao Solo Natural aumenta a capacidade do solo reter umidade fazendo com que ocorra uma redução do volume de água evaporado, além de manter uma variação de perda reduzida ao longo de todo o ciclo de umidade.

Figura 47 – Curvas de perda de água por evaporação

A Tabela 17 apresenta de maneira mais detalhada, o resumo da quantidade de água perdida por evaporação, através da superfície dos três solos analisados, de acordo com as faixas de umidade.

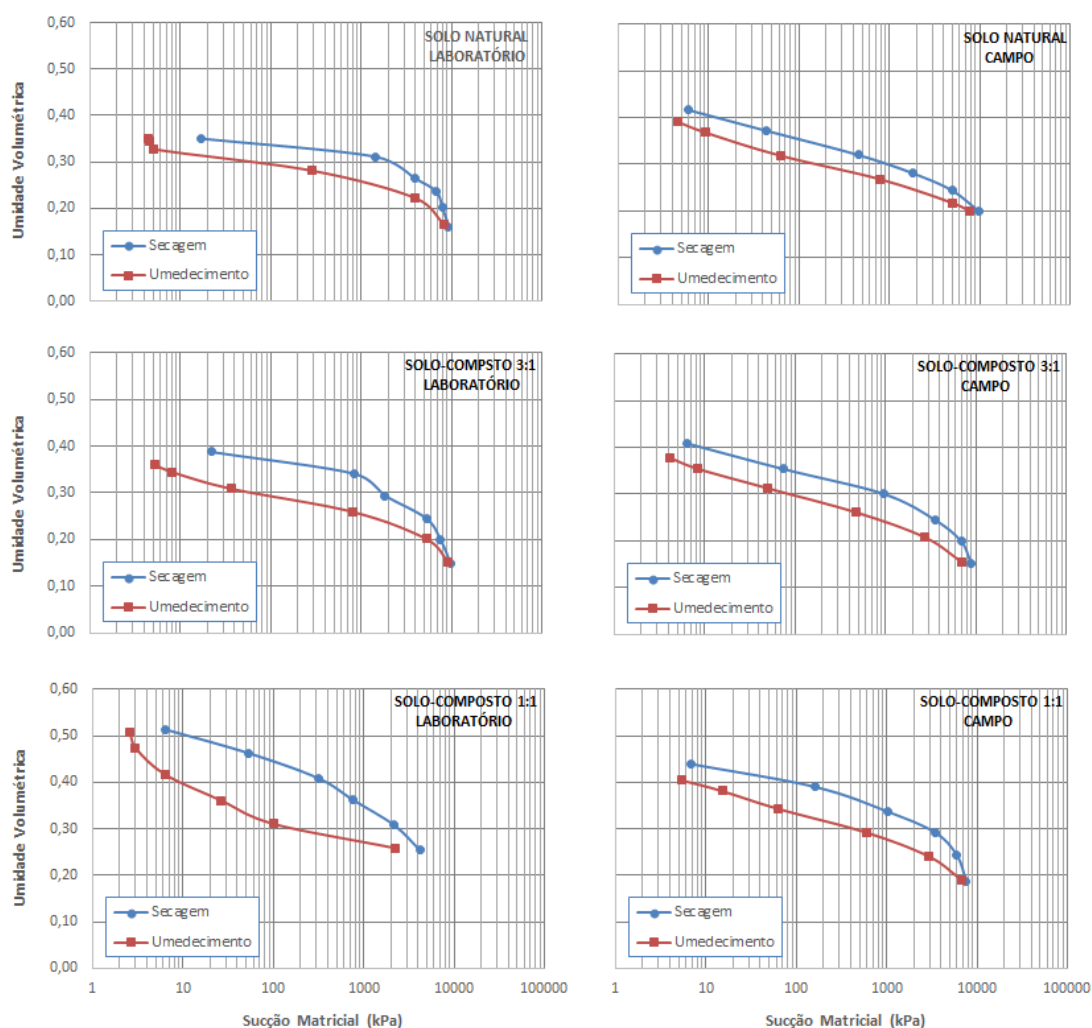
Tabela 17 – Quantidade de água evaporada com relação a umidade gravimétrica através da superfície dos três solos estudados.

Solo	Faixa de umidade (%)	Perda por evaporação (litros/m²)
Solo Natural	10 - 15	0,090
	20 - 25	0,180
Solo-composto 3:1	10 - 25	0,050 - 0,100
	>25	0,060
Solo-composto 1:1	10 - 25	0,060 - 0,100
	>25	0,060

4.9 HISTERESE

A camada de cobertura de um aterro de resíduos sólidos urbanos passa por processos alternados de secagem e umedecimento provocados pelas estações secas e chuvosas do ano. Portanto, as curvas de retenção de umidade do solo, nas trajetórias de secagem e umedecimento podem não coincidir pelo fato da existência de diferentes umidades para uma mesma sucção, devido ao fenômeno da histerese. O fenômeno da histerese no Solo Natural e nas misturas Solo-Composto, compactados em laboratório e, das amostras indeformadas retiradas da camada de cobertura da célula experimental, é apresentado na Figura 48.

Figura 48 – Histerese das curvas experimentais de retenção de água no laboratório e no campo



As trajetórias experimentais de secagem e de umedecimento dos solos confeccionados em laboratório e dos solos das camadas de cobertura da célula experimental também foram ajustadas seguindo o processo de iteração de newton-Gauss e utilizando o modelo de ajuste de van Genuchten (1980). O ajuste nas trajetórias experimentais permitiu uma melhor visualização do comportamento histerético e as Figuras 49 e 50 apresentam as trajetórias ajustadas, respectivamente para amostras compactadas em laboratório e para as coletadas em campo.

Na Tabela 18, são apresentados os valores dos coeficientes de determinação (R^2) e os parâmetros de ajustes (α , n e m) gerados pelo programa computacional para as equações que ajustaram as trajetórias experimentais de secagem e de umedecimento. Também estão apresentados na Tabela 18 os resultados das áreas entre as trajetórias de secagem e de umedecimento, calculadas pelo programa computacional Mathcad®.

Nas amostras compactadas em laboratório do Solo Natural, Solo-Composto 3:1 e do Solo-Composto 1:1, observa-se um aumento da área existente entre as trajetórias de secagem e de umedecimento a medida que houve um acréscimo na proporção de composto orgânico.

As amostras coletadas em campo na camada de cobertura da célula experimental apresentaram menor efeito de histerese do que nos solos compactados em laboratório.

Esta pequena variação da área de histerese entre as camadas de cobertura da célula experimental pode ter ocorrido, provavelmente, devido à diferença do processo de compactação, estrutura, umidade, etc., dos materiais constituintes dessas camadas.

Observa-se que as trajetórias de secagem e de umedecimento dos solos compactados em laboratório e das amostras retiradas da camada de cobertura da célula experimental, tendem ao equilíbrio para sucções próximas e acima de 10000 kPa, sugerindo que nesses solos não ocorre os fenômenos histeréticos para sucções acima desse valor.

Com relação a curva de secagem, observa-se que em todos os solos analisados, não ocorreu o fenômeno de histerese na região de umidade residual, onde a fase líquida é descontínua, aparecendo como água adsorvida.

Figura 49 – Trajetórias de secagem e de umedecimento dos solos compactados em laboratório ajustadas através do modelo de van Genuchten (1980)

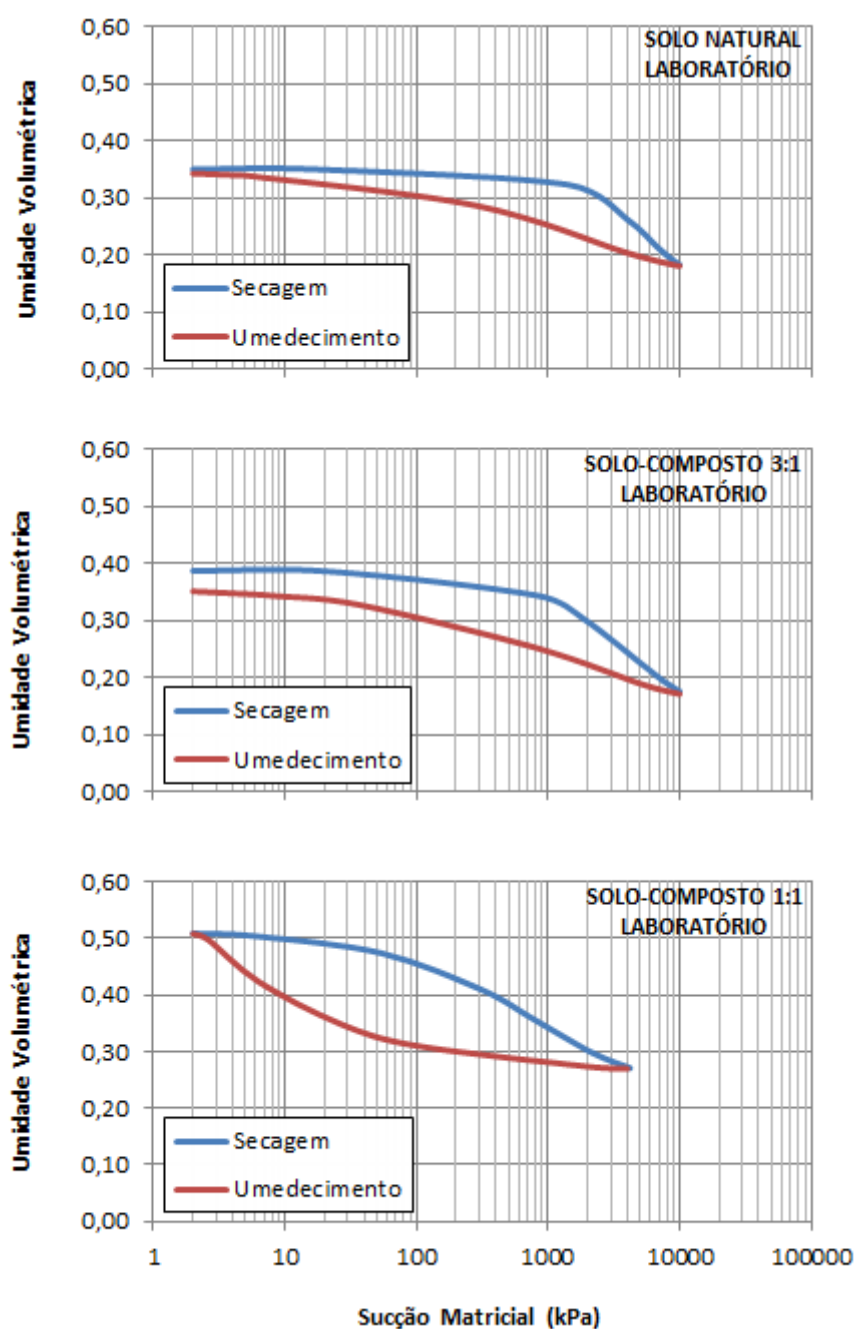


Figura 50 – Trajetórias de secagem e de umedecimento, dos solos coletados na camada de cobertura da célula experimental, ajustadas através do modelo de van Genuchten (1980)

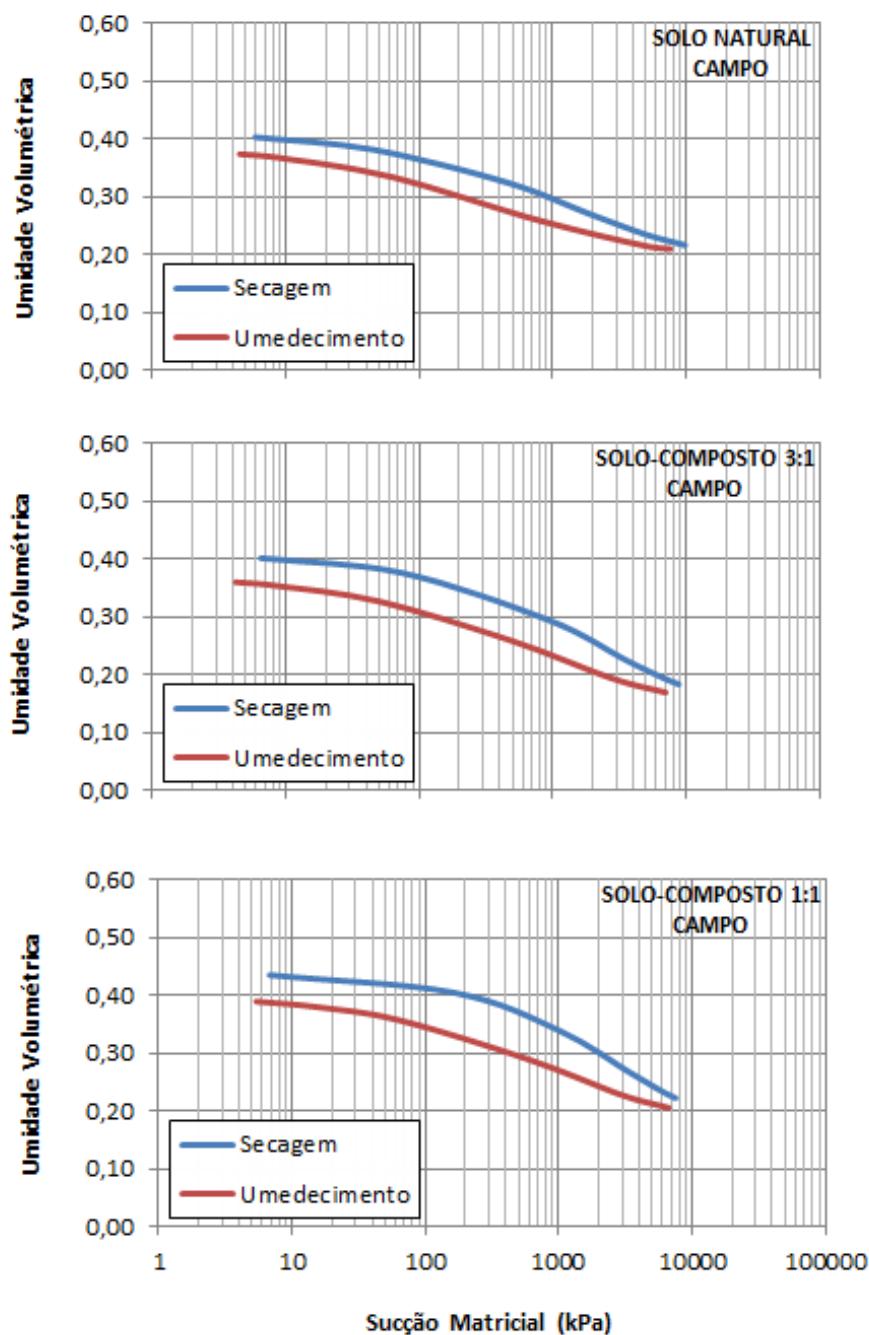


Tabela 18 – Classificação dos coeficientes de determinação, parâmetros de ajustes das curvas de secagem e de umedecimento e, valores de histerese

Parâmetros		Campo			Laboratório		
		Solo Natural	Solo-Composto 3:1	Solo-Composto 1:1	Solo Natural	Solo-Composto 3:1	Solo-Composto 1:1
Secagem	R²	0,976	0,957	0,950	0,943	0,963	0,985
	α	$0,803 \times 10^{-9}$	$0,653 \times 10^{-9}$	$0,424 \times 10^{-8}$	$0,329 \times 10^{-5}$	$0,580 \times 10^{-6}$	$0,306 \times 10^{-6}$
	n	0,497001	0,560333	0,677143	1,35375	0,961073	0,640125
	m	866,182	1816,2	2192,3	219,702	309,829	192,856
Umedecimento	R²	0,976430	0,976136	0,976114	0,964086	0,964383	0,987158
	α	$0,114 \times 10^{-3}$	$0,158 \times 10^{-8}$	$0,204 \times 10^{-8}$	$0,212 \times 10^{-6}$	$0,172 \times 10^{-7}$	0,425031
	n	0,510347	0,475939	0,505966	0,504323	0,473983	75,9484
	m	4,59672	610,881	756,614	55,8608	147,369	0,005537
Histerese		232,28	347,97	366,52	446,25	430,35	615,45

4.10 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PONTA EM LABORATÓRIO

Neste item, estão apresentados os resultados dos ensaios, em laboratório, de resistência à penetração dos solos com o uso dos penetrômetros dinâmico e estático. É importante citar que os ensaios de resistência de ponta, em laboratório, com o uso dos dois tipos de penetrômetros, foram realizados em lisímetros que simularam os três perfis da camada de cobertura experimental conforme exposto no Capítulo 3.

Os valores de resistência de ponta, mínimos, médios e máximos, obtidos com os penetrômetros estáticos e dinâmico em laboratório são apresentados nas Figuras 51 a 53 e os valores médios nas Tabelas 19 e 20. Para as análises que são aqui realizadas, os resultados da resistência de ponta dos 0,05 m iniciais e finais dos lisímetros não foram considerados para evitar o efeito de bordo tanto na superfície (livre) quanto no final devido a rigidez da base dos lisímetros, nas análises com valores numéricos foram considerados os valores médios.

Na camada de Solo Natural, a resistência de ponta obtida com o penetrômetro estático em laboratório (Figura 51a) tem pequena taxa de crescimento com a profundidade. A resistência de ponta média, varia de 3,00 MPa a 5,00 MPa e a resistência de ponta obtida com o DPL é praticamente constante com a profundidade com valor médio de 5,40 MPa (Figura 51b). O fato da resistência de ponta obtida com o DPL ser superior à obtida com o penetrômetro estático é típica de solos argilosos, Stolf et al. (1983).

Isto mostra que a camada em campo teve menor compactação do que em laboratório, indicando que a compactação em campo não foi homogênea, sendo mais compactada no terço superior da camada do que nos dois terços abaixo.

No Perfil 1 constituído de 0,30 m da mistura Solo-Composto na proporção 3:1 e de 0,30 m de Solo Natural, a resistência de ponta obtida com o penetrômetro estático, em laboratório (Figura 52a) tem valor médio de 2,50 MPa na mistura de Solo-Composto 3:1 e de 4,80 MPa no Solo Natural

indicando que a adição do composto ao solo na proporção de 3:1 reduziu a resistência de ponta em 1,88 vezes. A resistência de ponta média obtida com o DPL na mistura Solo-Composto 3:1 é de 4,40 MPa e no Solo Natural abaixo 5,10MPa indicando uma redução de 1,16 vezes com a adição do composto (Figura 52b).

No Perfil 2 constituído de 0,30 m da mistura do Solo-Composto na proporção 1:1 e 0,30 m de Solo Natural, a resistência de ponta obtida com o penetrômetro estático em laboratório (Figura 53a) tem valor médio de 2,30 MPa na mistura de Solo-Composto 1:1 e de 5,00 MPa no Solo Natural, havendo uma redução com a adição do composto de 2,17 vezes. A resistência de ponta média obtida com o DPL na mistura Solo-Composto 1:1 é 3,60 MPa e no Solo Natural abaixo 5,10 MPa indicando uma redução de 1,42 vezes (Figura 53b).

Resultados de cisalhamento direto obtidos em amostras compactadas em laboratório nas mesmas condições em que foram realizados os ensaios de resistência de ponta em laboratório, apresentados na Tabela 19 e 20 e nas Figuras 51 a 53 para critério de ruptura de pico, apresentados no Apêndice A, mostram que a adição de composto causa redução na parcela de coesão e de atrito ao Solo Natural. Estes resultados explicam a redução da resistência de ponta com o acréscimo de composto.

A Figura 54 apresenta a sobreposição das curvas de resistência de ponta dos três perfis simulados em laboratório, em lisímetros, com o uso do penetrômetro estático e dinâmico para melhor visualização do processo de compactação.

A análise da resistência de ponta média obtida em laboratório com penetrômetro estáticos e dinâmicos no Solo Natural e nas misturas Solo-Composto nas proporções de 3:1 e 1:1, apresentada nas Tabelas 19 e 20, e na Figura 54 permite as seguintes conclusões:

- a resistência de ponta média diminui a medida que aumenta a adição de composto ao Solo Natural;

- a resistência de ponta média obtida com o DPL é maior do que a obtida com o penetrômetro estático, isto é frequente para solos argilosos, conforme Stolf (1983);
- há uma maior dispersão dos resultados da resistência de ponta média obtida com o DPL do que com o penetrômetro estático;
- os penetrômetros dinâmico e estático utilizados para avaliar a resistência dinâmica são eficazes para avaliar a homogeneidade da compactação da camada e para avaliar a resistência de ponta;

Embora os resultados da resistência de ponta obtidos em campo tenham sido realizados em amostras de Solo Natural e das misturas de solo-composto em umidades diferentes da umidade ótima e com grau de compactação inferiores a 100% (Figura 36), diferentes daquelas de laboratório Figuras 54, a tendência do comportamento é o mesmo, ou seja, a adição de composto ao Solo Natural diminui a resistência de ponta.

As Tabelas 19 e 20 apresentam os valores médios de resistência de ponta obtidos com penetrômetros estático e dinâmico, em campo e em laboratório, para melhor comparação da resistência de ponta dos solos analisados nesta apesquisa.

Figura 51 – Perfis referentes ao Solo Natural em laboratório

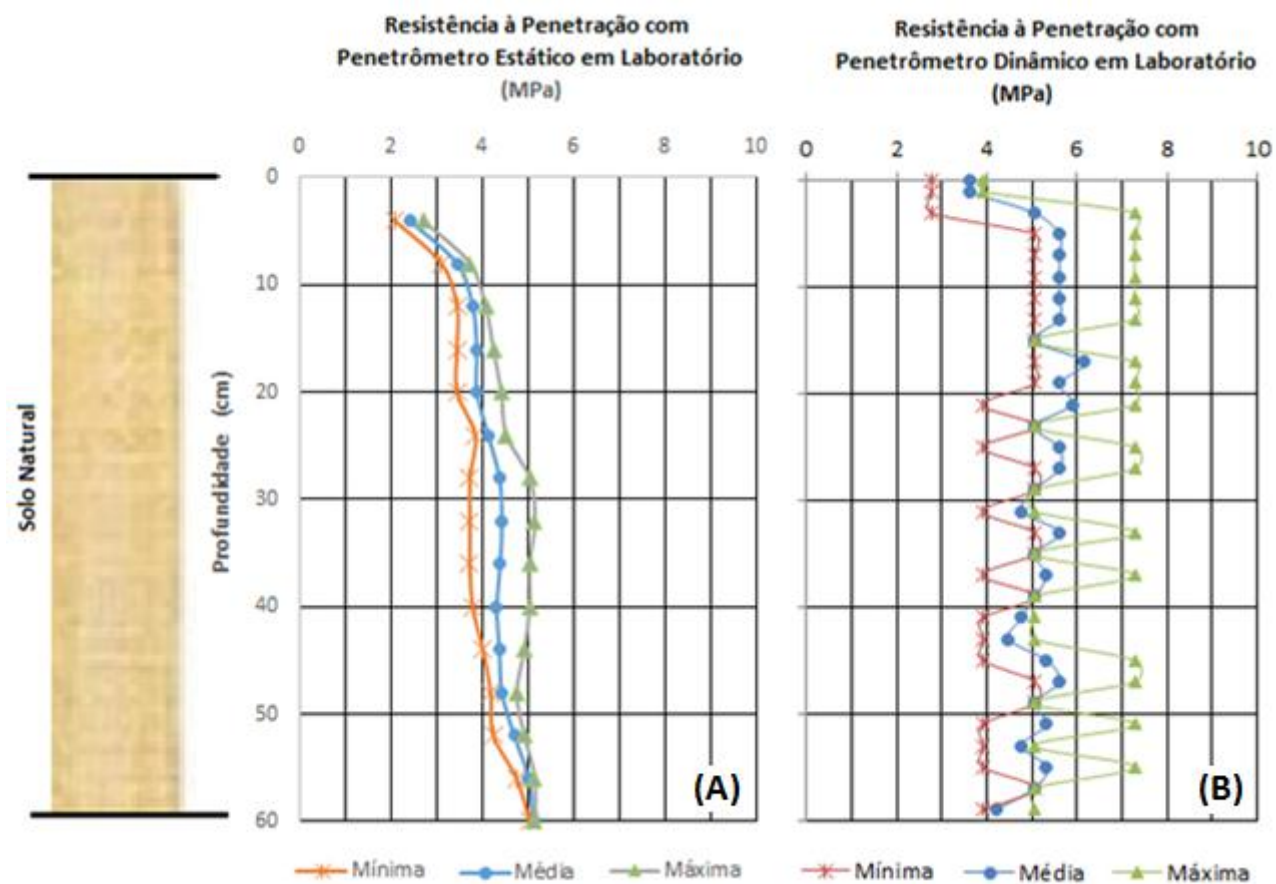


Figura 52 – Perfis referentes ao Solo-Composto 3:1 em laboratório

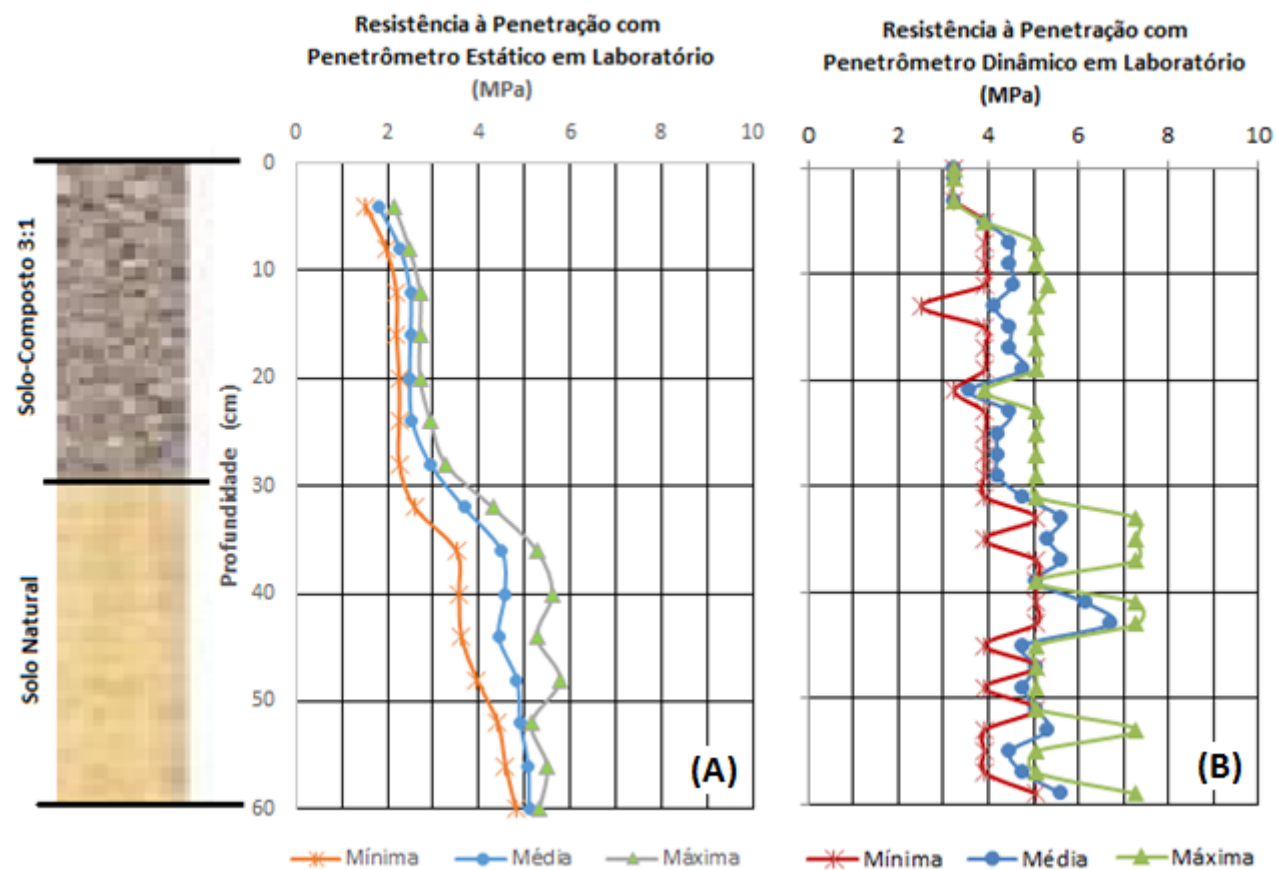


Figura 53 – Perfis referentes ao Solo-composto 1:1 em laboratório

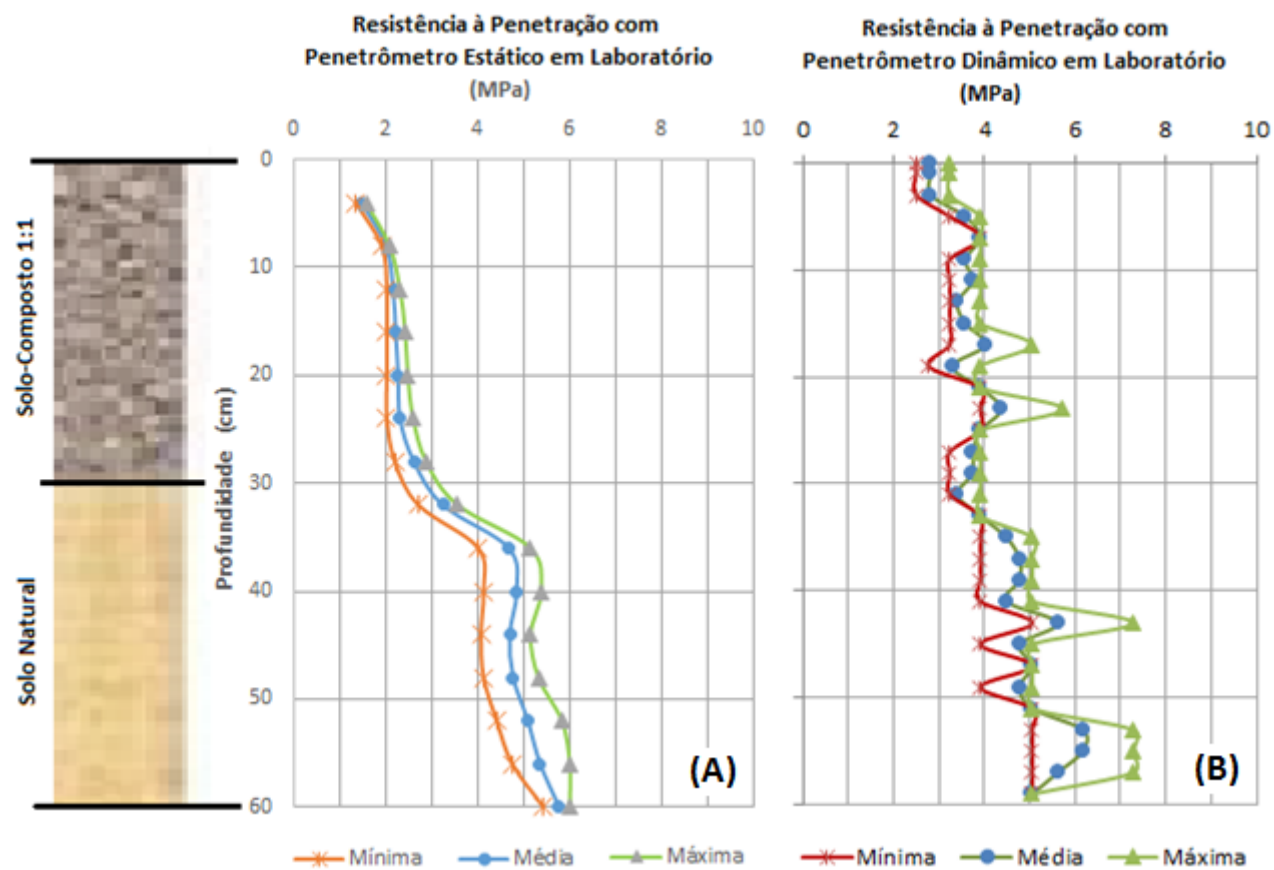


Figura 54 – Perfis dos três solos compactados em laboratório referentes ao ensaio com o penetrômetro estático e com o DPL

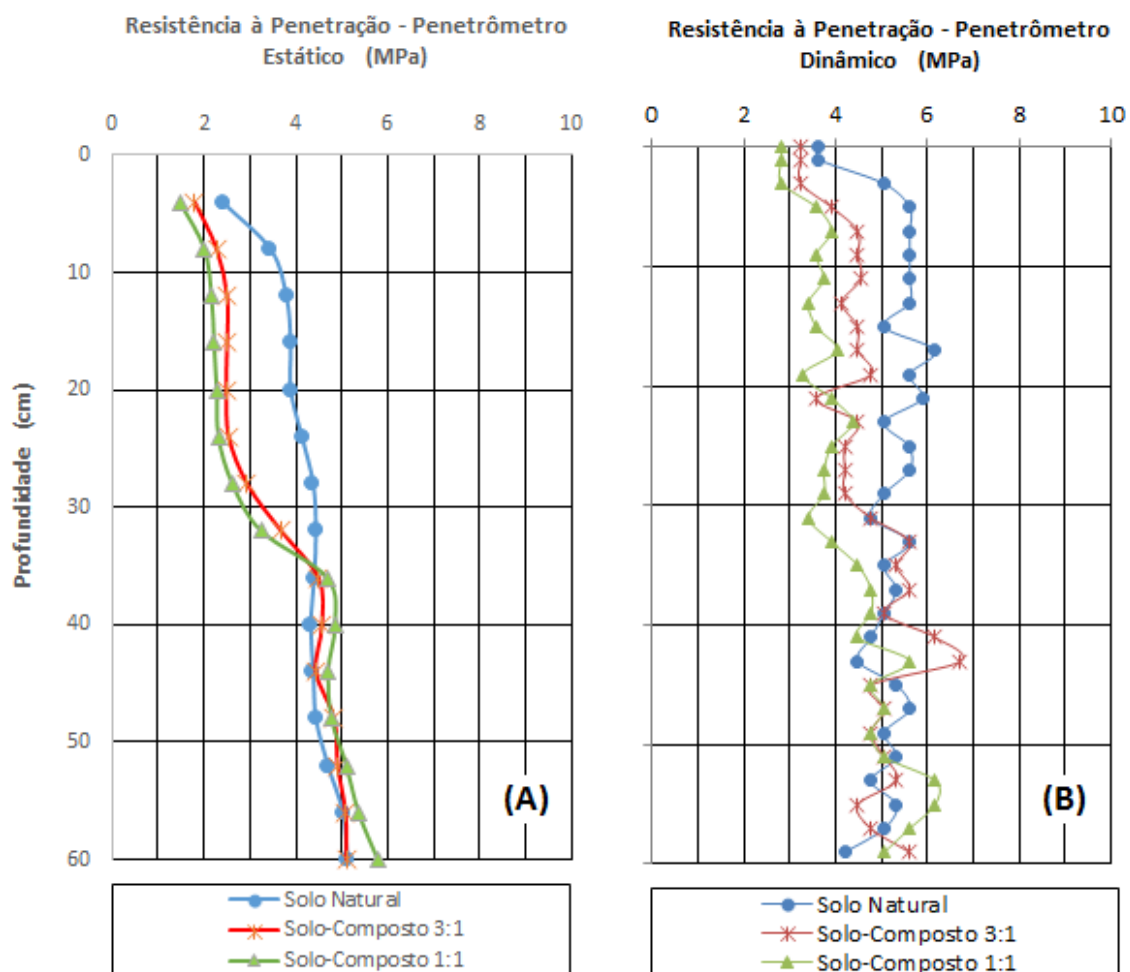


Tabela 19 – Valores médios de resistência de ponta obtidos com penetrômetro estático e dinâmico em campo e em laboratório

Solo / Perfil	Profundidade (m)	Resistência de Ponta média (MPa)			Razão Resistência (MPa)
		P. Estático laboratório	DPL laboratório	DPL campo	Laboratório RP_{DPL} / RP_{EST}
Solo Natural	0,05 – 0,20	4,00		2,80	1,40
	0,20 – 0,30	-	5,60	2,80	-
	0,30 – 0,55	4,40	5,20	2,00	1,18
Perfil 1:					
Solo-Composto 3:1	0,05 – 0,30	2,60	4,40	2,10	1,69
Solo Natural	0,30 – 0,55	4,80	5,10	2,80	2,83
Perfil 2:					
Solo-Composto 1:1	0,05 – 0,30	2,30	3,60	2,60	1,57
Solo Natural	0,30 – 0,55	5,00	5,10	3,20	1,02

Tabela 20 – Valores médios de resistência de ponta obtidos com penetrômetros estático e dinâmico em campo e em laboratório para o Solo Natural e mistura Solo-Composto na proporção de 3:1 e 1:1

Solo / Perfil	Profundidade (m)	Resistência de Ponta média			Razão Resistência
		P. Estático laboratório	DPL laboratório	DPL campo	Laboratório RP_{DPL} / RP_{EST}
Solo Natural	0,05 – 0,55	4,55	5,25	2,70	1,15
Perfil 1 Solo-Composto 3:1 e Solo	0,05 – 0,30	2,60	4,40	2,10	1,69
Perfil 2 Solo-Composto 1:1 e Solo	0,05 – 0,30	2,30	3,60	2,80	1,57

4.11 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM LABORATÓRIO

As curvas de tensão cisalhante versus deslocamento e das envoltórias de Mohr-Coulomb obtidas a partir do ensaio de cisalhamento direto para as amostras compactadas no laboratório do Solo Natural e das misturas Solo-Composto na umidade ótima e peso específico seco máximo são apresentadas nas Figuras 55 e 56, respectivamente. Essas curvas também são apresentadas nas Figuras 57 e 58, respectivamente, para as mesmas amostras e condições de moldagem inicial porém inundada previamente antes do início da consolidação e cisalhamento. É importante citar que não foi realizado ensaio com tensão normal de 150 kPa para as amostras inundadas.

As curvas tensão cisalhante versus deslocamento e as envoltórias de Mohr-Coulomb obtidas a partir do ensaio de cisalhamento direto nas amostras coletadas diretamente das camadas de coberturas do aterro experimental sem inundação prévia são apresentadas nas Figuras 59 e 60, respectivamente.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e atrito), obtidos para a condição de tensão cisalhante máxima (critério de pico) e para grandes deslocamentos de 8,0 mm (16% de deformação específica) são apresentados na Tabela 21.

Nas amostras do Solo Natural e nas misturas Solo-Composto compactadas em laboratório nas condições ótimas, com ou sem inundações prévia, as curvas tensão cisalhante versus deslocamento apresentaram comportamento de pico para tensões normais de 50 kPa, 100kPa, 150kPa, indicando que o material se comporta como frível. O mesmo não se verifica para tensão de 200kPa onde o material se comporta como plástico (Figuras 55 e 56).

Nas amostras coletadas das camadas de cobertura do aterro experimental, na condição sem inundação (natural), as curvas tensão cisalhante versus deslocamento são típicas de material plástico para todas as

tensões normais aplicadas exceto para a tensão de 50 kPa na mistura Solo-Composto de 1:1, Figura 59.

Verifica-se que a resistência ao cisalhamento obtida para a condição de pico sem inundação prévia há uma redução na parcela de coesão (de 18,75% a 26,15%) e no ângulo de atrito um acréscimo (de 8,57% a 11,2%) quando se compara as amostras compactadas em laboratório e as compactadas em campo, Tabela 21.

A adição de composto ao Solo Natural reduziu a coesão e o ângulo de atrito. Considerando o critério de ruptura para deslocamentos de 8 mm, a coesão tende a crescer em relação ao Solo Natural (19,85% a 52,22%) e o ângulo de atrito decresce (10,25% a 12,82%). A coesão do Solo Natural e das misturas Solo-Composto decresce a medida que o deslocamento (deformação) cresce e o ângulo de atrito tem um pequeno decréscimo ficando praticamente constante.

A inundação prévia causa uma perda significativa na resistência ao cisalhamento do Solo Natural e das misturas Solo-Composto, maior na parcela da coesão, e pequena influência no atrito.

A adição de composto ao solo natural causa uma redução na resistência ao cisalhamento na condição sem inundação tanto na parcela da coesão quanto no atrito. Na condição inundada previamente há uma redução na parcela da coesão, mas a parcela do atrito praticamente não se altera.

Na Figura 59, observa-se que, tanto na envoltória de deslocamento de pico coma na envoltória de deslocamento de 8 mm, o valor da coesão foi muito maior que o valor da coesão do Solo Natural e do Solo-Composto 3:1. Esta discrepância ocorreu, provavelmente, pela existência de pedregulhos na amostra indeformada coletada na camada de cobertura da célula experimental. A Tabela 21 também apresenta estes valores.

Figura 55 – Curvas tensão versus deslocamento para o Solo Natural e misturas Solo-Composto compactados em laboratório (sem inundação)

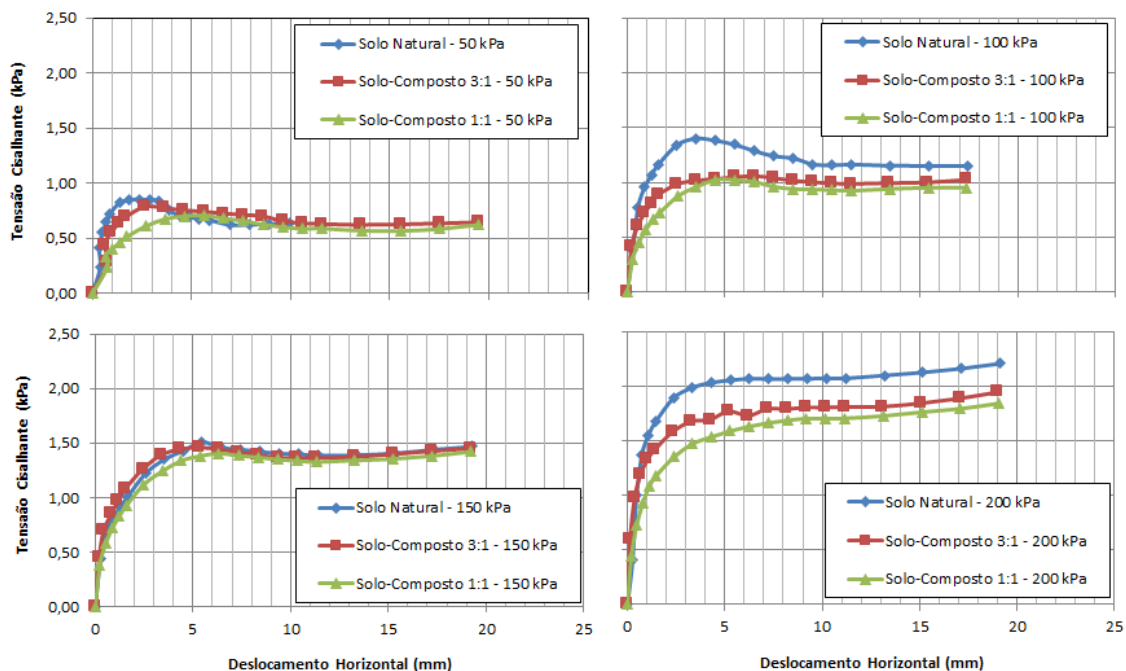


Figura 56 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento em laboratório (sem inundação); a) para critério de ruptura da tensão máxima, b) para grandes deslocamentos 8,0 mm (16% de deformação)

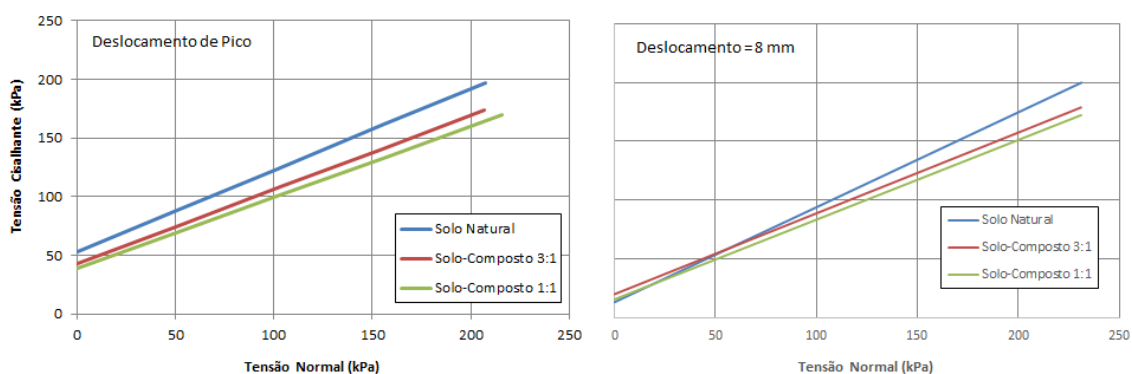


Figura 57 – Curvas de tensão versus deslocamento para o Solo Natural e misturas Solo-Composto compactados em laboratório (inundado)

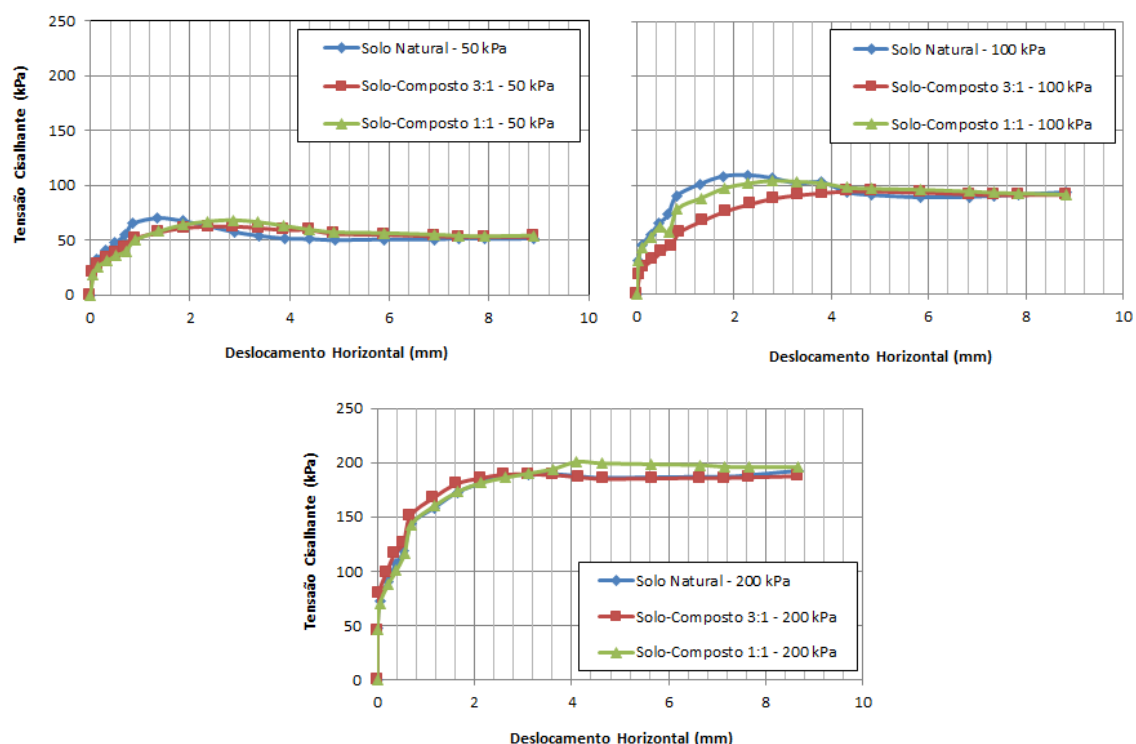


Figura 58 – envoltória de resistência ao cisalhamento em laboratório (ensaio inundado); a) para critério de ruptura de pico, b) para grandes deslocamentos 8 mm (16% de deformação)

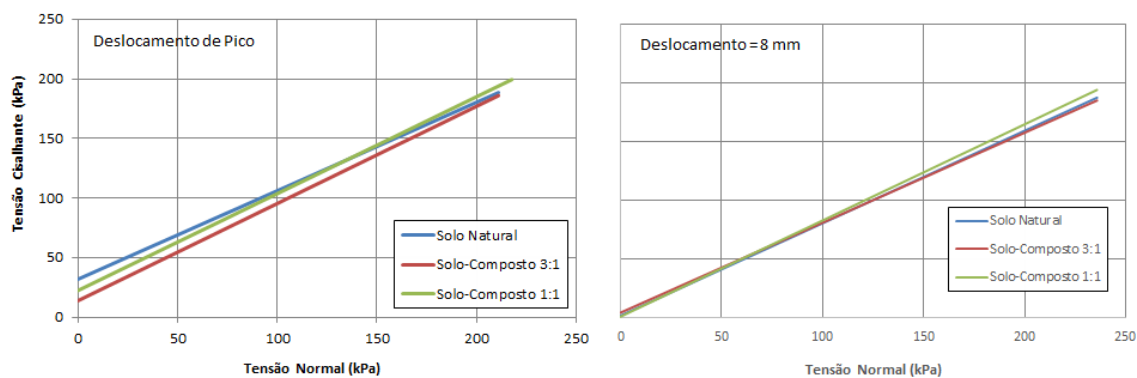


Figura 59 – Curvas tensão versus deslocamento para o Solo Natural e misturas Solo-Composto indeformados retirados da camada de cobertura da célula experimental (sem inundação)

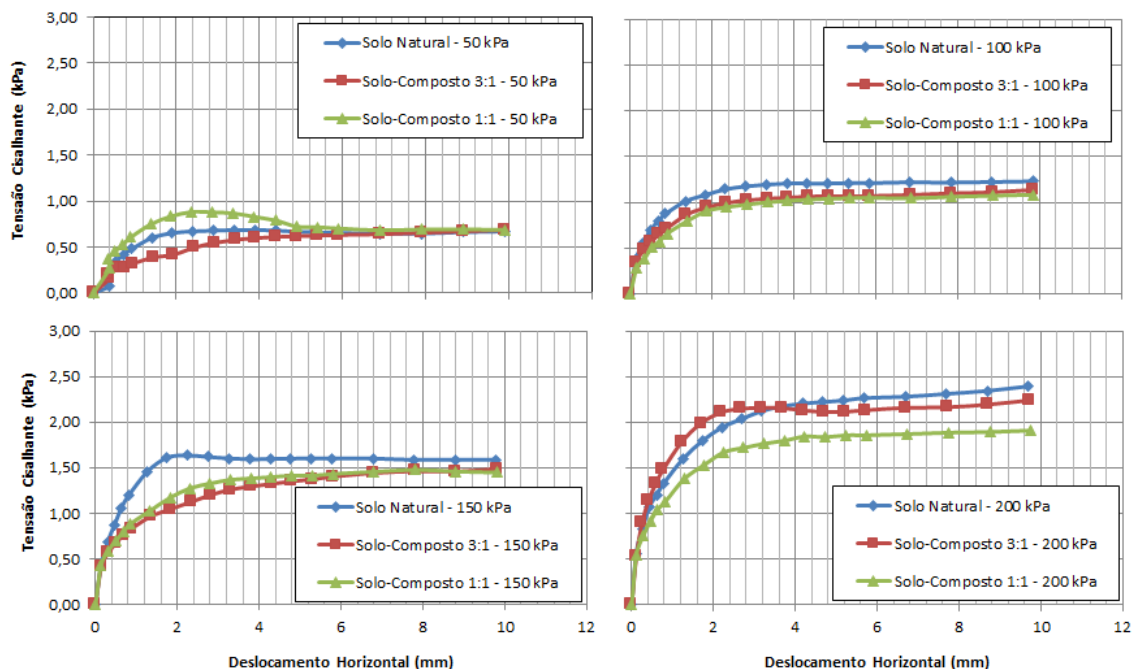


Figura 60 - Envoltórias de resistência das amostras indeformadas retiradas da camada de cobertura da célula experimental (sem inundação); a) para critério de ruptura de pico, b) para grandes deslocamentos 8 mm (16% de deformação)

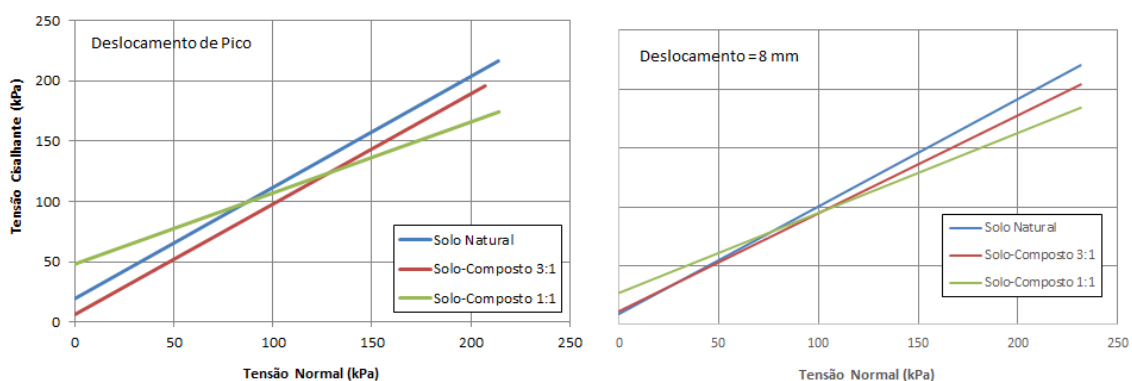


Tabela 21 – Classificação dos parâmetros de resistência obtidos no ensaio de cisalhamento direto

Tipo de ensaio	Origem da amostra	Solo	Deslocamento de pico			Deslocamento = 8 mm		
			Coesão	Ângulo de atrito	R ²	Coesão	Ângulo de atrito	R ²
Sem inundação	Solo compactado em laboratório	Solo Natural	52,84	35°	0,94	13,00	39°	0,96
		Solo-Composto 3:1	42,93	32°	0,99	19,79	35°	0,99
		Solo-Composto 1:1	39,03	31°	0,99	15,41	34°	0,99
Inundado	Solo compactado em laboratório	Solo Natural	31,80	37°	1,00	2,25	38°	0,99
		Solo-Composto 3:1	13,72	39°	0,98	4,77	37°	0,99
		Solo-Composto 1:1	22,29	39°	0,99	1,42	39°	0,99
Sem inundação	Solo indeformado retirado da camada de cobertura	Solo Natural	19,32	43°	0,99	9,14	42°	0,98
		Solo-Composto 3:1	6,14	42°	0,94	11,40	40°	0,97
		Solo-Composto 1:1	48,03	31°	0,95	27,00	34°	0,99

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

5.1 INTRODUÇÃO

Nas considerações finais deste trabalho, é importante citar as primeiras ideias para o desenvolvimento da pesquisa que era a de estudar três tipos de solos compactados em laboratório semelhantes aos utilizados na camada de cobertura da célula experimental do aterro da Muribeca, com o objetivo de contribuir com novas técnicas e novos parâmetros de forma racional na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e, simultaneamente, na redução do volume de lixiviado. A motivação era a de contribuir com a prática da engenharia geotécnica e na remediação dos problemas ambientais e socioeconômicos causados pela grande quantidade de vazadouros a céu aberto que ainda atormentam as administrações municipais em nosso país. Diversos fatos analisados neste trabalho concretizaram os objetivos iniciais, entre eles observa-se a determinação gráfica da umidade de saturação através das curvas de compactação e de saturação 100%; e, a relação entre umidade ótima e umidade gravimétrica de entrada generalizada de ar.

5.1.1 Considerações finais

A adição de composto não causa alterações significativas na granulometria do Solo Natural havendo uma tendência de acréscimo na fração grossa nas misturas solo-composto.

A adição de composto ao solo causa um acréscimo no Limite de Liquidez e Plasticidade e uma redução do Índice de Plasticidade.

A adição de composto ao solo causa uma redução no peso específico aparente seco máximo e acréscimo na umidade ótima, redução do volume das

partes sólidas (mineral) em maior proporção do que o acréscimo do volume líquido e ar (volume de vazios).

O pH do solo em água é ácido, a capacidade de troca catiônica é baixa e saturação de base menor que 50% tratando-se de um solo distrófico. A porcentagem de sódio no complexo trocável é baixa e a condutividade elétrica é alta. A adição do composto ao solo torna a mistura moderadamente a levemente ácida, a quantidade de matéria orgânica cresce com o acréscimo do composto, a saturação de base é maior que 50%, a condutividade elétrica é alta, superior ao Natural. A quantidade de água no extrato de saturação cresce e a saturação por alumínio diminui.

A adição de composto ao Solo Natural torna as misturas solo-composto eutróficas, com mais nutrientes e o solo mais fértil proporcionando condições e meios para o desenvolvimento da vegetação nativa, com potencialidade para ser utilizada como camada oxidante.

As camadas compactadas em campo não atenderam as condições ótimas de laboratório e apresentaram heterogeneidade e há redução da resistência de ponta com o aumento do composto orgânico.

O uso dos equipamentos penetrômetros no controle da compactação é uma ferramenta promissora para avaliar a homogeneidade do processo de compactação.

A adição de composto ao Solo Natural aumenta a capacidade de retenção de água (2,5 a 3 vezes) até a sucção de 1000 kPa e diminui para sucções maiores.

A adição de composto ao Solo Natural causa um acréscimo na umidade gravimétrica correspondente ao ponto de Entrada Generalizada de Ar (GAE) e uma redução no correspondente valor de sucção, indicando uma maior capacidade de retenção de água.

Na curva de retenção de água, quando se relaciona umidade gravimétrica com sucção matricial, a umidade saturada tende a aumentar a

medida que se aumenta a proporção de composto orgânico ao Solo Natural. A velocidade de perda d'água para o ambiente diminui a medida que se adiciona composto ao Solo Natural, aumentando a capacidade de reter água em ciclo de variação de umidade.

Na relação grau de saturação e sucção matricial, no trecho da curva compreendido até a sucção de 12 kPa (região de fronteira) o Solo Natural e o Solo-Composto 3:1 apresentam grau de saturação máximo superior ao Solo-Composto 1:1, indicando que o aumento na proporção de composto orgânico diminui o grau de saturação máximo. Na região de transição compreendida entre 12 kPa e 10000 kPa, onde predominam os efeitos capilares de retenção e as forças de adsorção, o aumento na proporção de composto orgânico diminui o grau de saturação. Com relação a curva umidade volumétrica versus sucção matricial também se observa que na região de transição, o aumento na proporção de composto orgânico diminui o conteúdo volumétrico de água.

O valor da histerese da curva de retenção aumenta à medida em que é aumentada a proporção de composto orgânico adicionada ao Solo Natural.

A condutividade hidráulica não saturada, com relação às amostras compactadas na umidade ótima, é maior no Solo-Composto 3:1 do que no Solo-Composto 1:1 e do que no Solo Natural, respectivamente. Tanto no Solo Natural, quanto nas misturas solo-composto, o valor da condutividade hidráulica atende ao requisito para uma camada de cobertura de um aterro sanitário para as condições de compactação em laboratório.

A adição de composto ao solo torna-o menos resistente para o desenvolvimento das raízes dos vegetais, com maior teor de água, maior índice de vazios e menor velocidade de perda de água para o ambiente.

Com relação aos perfis formados por camadas de solo natural sobreposta por misturas de solo-composto observa-se, em todos os casos, uma diminuição da resistência de ponta com a adição de composto orgânico.

A adição de composto ao Solo Natural influencia a resistência ao cisalhamento. A parcela de coesão é mais influenciada do que a parcela de atrito. Há tendência de decréscimo da coesão quando se adiciona composto ao Solo Natural, com relação ao atrito esta influência é pequena, ficando o ângulo de atrito praticamente constante.

A influência do critério de ruptura para a obtenção dos parâmetros de resistência é maior na parcela da coesão do que na parcela do atrito. A medida que o deslocamento cresce a coesão do solo diminui e no ângulo de atrito a variação é pequena (no máximo de 4°). Indicando que o composto orgânico não tem um papel equivalente às fibras quando adicionada ao solo (Motta, 2010) e, causa uma maior plastificação sem endurecimento ao solo.

O perfil formado pela camada de 0,30 m de Solo Natural sobreposta por uma camada de 0,30 m de Solo-Composto na proporção 3:1 foi o que apresentou melhor capacidade de retenção de água, maior resistência de ponta e ao cisalhamento.

5.1.2 Sugestões para novas pesquisas

Estudar o efeito das fissuras na capacidade de retenção e permeabilidade da camada de cobertura.

Analisar a influência da deformação sofrida pelo depósito de resíduos sólidos urbanos em relação ao comportamento mecânico e hidráulico da camada de cobertura.

Utilizar modelos matemáticos para identificar o ponto de inflexão da curva de retenção para que seja determinado com maior precisão o ponto de entrada generalizada de ar.

Utilizar outros métodos de determinação da curva de retenção de água, como a câmara de pressão de Richards e o funil de placa porosa, para que se tenha uma melhor definição dos pontos de sucção residual.

Ajuste de curvas que relacionam grau de saturação e sucção matricial para que se possa analisar de maneira mais acurada as regiões de atuação das forças capilares e de adsorção ao longo da faixa de variação da sucção matricial.

Aumentar a quantidade de pontos na relação entre umidade ótima e umidade gravimétrica de entrada generalizada de ar, com a adição de informações de outras pesquisas que utilizaram solos compactados em camada de cobertura de aterro de resíduos sólidos para incrementar a equação que identifica esta relação. E, verificar se esta técnica pode ser utilizada em outros solos compactados.

Utilizar os penetrômetros estático e dinâmico durante os ensaios de compactação avaliando a resistência de ponta em laboratório e utilizar os resultados obtidos no controle de compactação em campo.

REFERÊNCIAS

ABICHOU, T.; LANGONI, G. TAWFIC, K. **Assessment of Alternative Earthen Final Covers for Florida Landfills**. Report #03-05, 2003. 107 p.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**, 2013. Disponível em: www.abrelpe.org.br/panorama/panorama2013.pdf

AGUIRRE, M. **Agrietamiento de suelos debido a la disminución de humedad causada por la evaporación**. Tesis Doctoral, E.T.S. Caminos, Canales y Puertos, universidad Politécnica de Madrid, 1990.

AIT-BENICHO, S.; CABRAL, A. R.; PANAROTTO, C. T. **Evolution of biodegradation of deinking by-products used as alternative cover material**. Waste Management. 2008. v. 28, p 85-96.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. Tese de Doutorado. Departamento de engenharia Civil – Grupo de Resíduos Sólidos. Universidade Federal de Pernambuco Recife-PE, 2007.

ALONSO, E. E. e LLORET, A. **Comportamiento de suelos parcialmente saturados**. Revista de obras Publicas, Mayo-Junio. 1985. pp. 435 – 461,

AOKI, N. **Ensaio holandês de penetração. Curso de Atualização em Fundações**. Centro de Produção da UEG (CEPUEG). 1973.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, **NBR 6459:** (1984a). Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, **NBR 7180:** (1984b). Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, **NBR 6508:** (1984c). Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, **NBR 07181:** (1984d). Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, **NBR 6457:** (1986). Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

AZEVEDO, J. A. **Relações físico-hídricas em solo de terraço e de meia encosta de Viçosa, MG**. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1976.

BARDEN, L. **Consolidation of compacted and unsaturated clay.** Geotechnique 15 (3). 1965. pp. 267 – 286.

BARDEN, L.; MADEDOR, A. O. and SIDES, G. R. **Volume change characteristics of unsaturated clay** – ASCE J. Soil Mechanics and Foundation Division. 1969. Vol. 95 SM1 – pp 33-52.

BENSON, C. H.; BARLAZ, M. A.; LANE, D. T.; RAWE, J. M. **Practice review of five bioreactor/recirculation landfills.** Waste Management. 2007. V. 27, n. 1, p. 13-29.

BISHOP, A. W. **The principle of effective stress** – lecture delivered in Oslo, Norway, in 1955; published in Teknisk Ukeblad. 1959. vol. 106, nº 39, 859-863.

BOHN, S.; JAGER, J. **Microbial methane oxidation in landfill top covers – process study on an MBT landfill.** In: Proceedings Sardinia 2009, Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy. 2009.

BORJESSON, G. **Methane oxidation in landfill cover soils.** Doctoral Thesis, Dept. Of Microbiology, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden. 1996.

BORJESSON, G.; SVENSSON B. H. **Seasonal and diurnal methane emissions from a landfill and their regulation by methane oxidation.** Waste Management and research. 1997. 15(1), pp. 33-54.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental.** São Paulo: Oficina de Texto. 2008. 248p.

BROOKS, R. H. & COREY, A. T. **Properties of porous media affecting fluid flow.** Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE. 1966. vol. 92. pp; 61-88.

BROOKS, R. H. & COREY, A. T. **Properties of porous media affecting fluid flow.** Journal of the Irrigation and Drainage. Div. Am. Soc. Civ. 1968. vol. 92, nº IR2, p. 61-66.

CAPELO NETO, J. **Modelagem do escoamento vertical de percolado em resíduos sólidos não saturados.** Tese. Doutorado em Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2005.

CARVALHO, J. R. P.; DECHEN, S. C. F.; DUFRANC, G. **Variabilidade espacial da agregação do solo avaliada pela geometria fractal e geoestatística.** Revista Brasileira de Ciências do Solo, Viçosa. 2004. v. 28, p. 1-9,

CARVALHO, L. G.; SAMPAIO, S. C.; SILVA, A. M. **Determinação da umidade na capacidade de campo “in situ” de um latossolo roxo distrófico.** In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 25., Viçosa. Anais... Viçosa: UFV/SBCS. 1995. v. 1, p. 32-34.

CATAPRETA, C.A.A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 2008.

CHANDLER, R. J. & GUTIERREZ, C. I. **The filter-paper method of suction measurement.** Geotechnique. 1986. vol. 36, nº 2 – pp 265-268.

CHANG, C. S. e DUNCAN, J. M. **Consolidation analysis for partly saturated clay by using an elatic-plastic effective stress-strain model.** Int. Jnl. Num. Anal. Meth. Geomech. 1983. 7: pp 39 – 55.

CLAUSS, R. P. **Uma proposta para avaliar o grau de compactação e a homogeneidade da camada compactada utilizando o DPL.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco – CTG. Programa de pós-graduação em engenharia civil. 2014. 77 fls.

CONDER – Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia. Manual de operação de aterros sanitários. Acessado em 11/2013. Disponível em: www.unipacvaledoacao.com.br/ArquivosDiversos/Cartilha_Operacao_Aterro_sanitario_CONDER.pdf

CORTÁZAR, A. L. G. **Desrrollo de Moduelo 2: herramienta para la evaluación de la contaminación producida en vertederos de residuos sólidos urbanos.** 346p. Tesis (Doctoral) Dpto. De Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente – Universidad de Cantabria E. T. S. De Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Santander. 2003.

DANIEL, D. E. **Summary Review of construction Quality Control for Compacted Soil Liners, In: Waste Containment systems; Construction, regulation, and Performance.** Geotechnical Special Publicaation, nº 26. ASCE, R. Bonaparte, ed., New York, NY, 1990. pp. 175-189.

D'ALMEIDA, M. L. O. & VILHENA, A. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado 2 ed.** São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000. 370 p.

ENGLER, M. P. C.; HONG van LIER, Q. **Método simples para a determinação da condutividade hidráulica em amostras de solo não-saturadas.** 5º. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. São Carlos. SP, 2004. 39-41.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão em solos naturais não saturados devidos à inundação.** Rio de Janeiro VI, 379 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.S., Engenharia Civil). Tese de Doutorado, Universidade federal do Rio de Janeiro. 1995.

FOURIE , A.B. e MOOSAMMY, M. **Store and release covers for landfills in semi-arid climates.** Unsaturated Soils, Recife, Brasil, 2002. Anais, p 823-826.

FREDLUND, D. G. **Density and compressibility characteristics of air-water mistures.** Can. Geotech. Jnl. 1976. Vol. 13 nº 4 pp. 386 – 396.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. and WIDGER, R. A. **The shear strength of unsaturated soils**. Canadian Geotechnical Journal, 1978. Vol 15 nº 3 – pp. 313-321.

FREDLUND, D. G. **Appropriate concepts and technology for unsaturated soil**. Canadian Geotechnical Journal, 1979. Vol. 16, nº 1 – pp. 121-139.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. Ed. John Wiley & Sons, Inc, New York, 1993. 486p.

FREDLUND, D. G. & XING, A. **Equations for the soil water characteristic curve**. Canadian Geotechnical Journal, 1994. Vol. 31(4): 521-532.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; FREDLUND, M. D. & BARBOUR, S. S. **The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water charactedristic curve**. Canadian Geotechnical Journal, 1994. Vol. 33, pp. 440-448.

FREDLUND, M. D. **Design of a knowledge-based system for unsaturated soil properties**. M. Sc. Thesis. University of Saskatchewan, Sask. 1996.

FREIRE, J. C. **Condutividade hidráulica e capacidade de campo de Latossolo Roxo distrófico não saturado**. R. Ras. Ci. Do Solo, Campinas, v. 3, n. 2 p. 73-77, abr./jun. 1979.

GARDNER, W. **Mathematics of isothermal water conduction in unsarurated soils**. Highway Research Board Special Report 40 International Symposium on Pgysico-Chemical Phenomenon in Soils, Washington D. C. 1956, pp. 78-87.

GERSCOVICH, D. M. S. & SAYÃO A. S. F. J. **Evaluation of the soil-water characteristic curve equations for soils from Brazil**. 3rd International Conference on Unsaturated Soils, Recife, Brasil, 10-12 March 2002, p 293-300.

GERSCOVICH, D. M. S. & GUEDES, M. N. **Avaliação das relações de condutividade hidráulica em solos brasileiros não saturados**. 5^o Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. São Carlos – SP. 2004, p. 249-253.

GUIZELINI, A. P. **Estudo de comportamento hidromecânico de solos visando a construção de sistemas de cobertura alternativos para aterro sanitários**. Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 2011. 166 páginas.

HAINES, W. B. **The volume-changes associated with variations of water content in soil**. Journal of agricultural Science, 1923. Vol. XIII, part 3 – pp. 296-310.

HILGER, H. H. & BARLAZ, M. A. **Anaerobic decomposition of refuse in landfills and methane oxidation in landfill cover soils**. In: HURST, C. J. (ed). Manual of enviornmental microbiology. Washington: ASTM Press, 2002, p. 696-718.

HILLEL, D. **Soil and water principles and processes**. Academic press. 1971.

HRAD, M., HUMER, M., WIMMER, B. REICHENAUER, T.G. **Design of top covers supporting aerobic in situ stabilization of old landfill – An experimental simulation in lysimeters**. Waste Management, 2012, v. 32. 2324-2335.

HUBER-HUMER, M.; RÖDER, S.; LECHNER, S. **Approaches to assess biocover performance on landfills**. Waste Management 29, 2009, pp. 2092-2104.

HUSE, K. **Estudo da influência da adição de betonita em solo arenoso-siltoso para uso como camada de aterros**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007, 138p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000, 2002, 2008, 2010a. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD). 2010b.

IPCC. Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4-wg3-ts.pdf>

IPEA. Comunicado nº 145 – **Plano Nacional de Resíduos Urbanos, agrosilvopastoris e a Questão dos Catadores** – 25 de abril de 2012.

JENNINGS, J. E. & BURLAND, J. B. **Limitation to the use of effective stresses in partly saturated soils**. Géotechnique, 1962. Vol 12, nº 2, 125-144.

JORNAL CÂMARA. Edição especial do jornal da Câmara dos Deputados – Publicação: Novembro de 2011. Página nº 07. Disponível em <http://www.camara.gov.br/internet/agencia/pdf/especialconferencia.pdf>

JUCÁ, J. F. T. **Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada**. Tese de Doutorado, Engenharia Civil, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, España. 1990.

JUCÁ, J. F. T. **Flow properties of unsaturated soils under controlled suction**. ASCE Special Geotechnical Publication, Virginia, USA, 1993. Vol. 39, nº 1, p. 151-162. ISBN 978-0-87262-988-2.

JUGNIA, L. B.; CABRAL, A. R.; GREER, C. W. **Biotic methane oxidation within an instrumented experimental landfill cover**. Ecological Engineering. 2008. Vol. 33 pp. 102-109.

KAYYAL, M. K. **Effect of the moisture evaporative stages on the development of shrinkage cracks in soils**. 1st Int. Conf. Unsaturated Soils, Paris, 1995. Vol. 1, p. 373-386.

LAMBE, T. W. **The structure of compacted clay**. J. Soils Mech. Found. Div, ASCE, 1958. V. 84, n. SM2.

LEE, P. W.; SUEDEKAMP, R. J. **Characteristics of irregularly shaped compactation curves of soils**. Highway Research Record, n. 381, National Academy of Sciences. Washington D. C., 1972.

LINS, E. A. M. A. **Utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro da Muribeca**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2003.

LLORET, A. e ALONSO, E. E. **Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour**. Geotechnique, 30 (4). 1980, pp. 449 – 477.

LOPES, R. L. **Infiltração de água e fluxo de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil. Recife-PE. 2011.

LUKIANTHCUKI & ESQUIVEL. **Disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários com camadas impermeabilizantes de solo-bentonita**. SIMPGEU (Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Urbana. Maringá-PR, 2009 – ISSN 2175-3695.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração , percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2003. 173 p.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. Tese de Doutorado. Univeridade Federal de Pernambuco. 2009. 354 p.

Magé online. Disponível em: <http://www.mageonline.com/2013/lixao-zero-avanca-mas-problemas-persistem/> . acessado em 2013.

MARIANO, M. O. H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil . Recife-PE. 2008. 243 p.

MARINHO, F. A. M. **Shrinkage behaviour of some plastic soils**, PhD Dissertation, Imperial College, London, 1994. UK.

MARINHO, F. A. M. **A técnica do papel filtro para medição de sucção**. Encontro Sobre Solos Não Saturados. Rio Grande do Sul, 18 a 20 de outubro de 1995.

MAURICE, C.; LAGERKVIST, A. **LFG emission measurements in cold climatic conditions: seasonal variations and methane emissions mitigation**. Cold Regions Science and Technology, 36, 37-46. 2003.

MITCHELL, J. K.; HOOPER, D. R.; CAMPANELLA, R. G. **Permeability of compacted clay**. J. Soil Mech. Found. Div. ASCE, 1965. V.91, n. SM4, p. 41-65.

MUALEM, Y. **A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media**. Water Resources Research, 12: 593-622. 1976.

OLIVEIRA, O.M. e MARINHO, F.A.M. **Estudo de barreiras capilares por meio de simulação de chuva em coluna de solo**. VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Salvador. Anais. 2007.

OLIVEIRA, A. F. F. e FERREIRA, S. R. M. **Formas da curva de compactação em solos expansivos**. In: XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Porto de Galinhas, Pernambuco, 2012.

OLIVEIRA, L. R. G. **Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2013. xi, 93 folhas.

PARK, S.; LEE, C. RYU; SUNG, K. **Biofiltration for Reducing Methane Emissions from Modern Sanitary landfills at the low methane generation stage**. Water Air Soil Pollute. 2009. 196p: 19-27.

PEREIRA NETO, J. T.; MESQUITA, M. M. F. **Compostagem de resíduos sólidos urbanos: aspectos teóricos, operacionais e epidemiológicos**. Lisboa, 1992. 25 p. (Informação Técnica-Hidráulica Sanitária, 37).

PEREIRA NETO, J.T. **Manual de Compostagem**, Ed. UFV, Viçosa, 2007.

PINTO, J. S. **Estudo da condutividade hidráulica de solos para disposição de resíduos sólidos na região de Santa Maria – RS**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2005. 154 p.

POWELSON, D. K. J.; CHANTON, T.; ABICHOU, J.; MORALES. **Methane oxidation in water-spreading and compost biofilters**. Waste Management and Research, 2006. Vol. 24, Nº. 6, pp 528-536.

QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. **Geotechnical aspects of landfill design and construction**. Prentice Hall. Neu Jersey. 2002. 717 p.

REINHART, D.; McCREANOR, P.; TOWNSEND, T. **The bioreactor landfill: Its status and future**. Waste Management and Research. 2002. V. 20, n. 2, p. 162-171.

RÖHM, S. A. **Considerações sobre penetrômetros dinâmicos leves aplicados na construção e avaliação de pavimentos de baixo custo**. Dissertação – ELSC/USP, São Paulo. 1984. 109 p.

ROSE, J. L.; GOUVEIA, P. P. F.; MAHLER, C. F. **Study of methane oxidation on a covering layer**. In: Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy. 2007.

SANTOS, G. M. **Estudo do comportamento histerético de uma argila expansiva não-saturada**. Dissertação de Mestrado, CTG, Departamento de

Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. 2008. 116 p.

SANTOS, G. M.; FERREIRA, S. R. M. **Estudo do comportamento mecânico de solos utilizados em três camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos urbanos**. XVII COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia geotécnica. 2014.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. **Penetrômetro de impacto IAA/PLANALSUCAR-STOLF; recomendações para seu uso**. STAB, Piracicaba; 1 (3): 18-23, jan-fev. 1983.

STOLF, R.; FAGANELLO, B. F. **Utilização do penetrômetro de impacto IAA/PLANALSUCAR-STOLF, na recomendação do preparo de solo da Usina Nossa Senhora Aparecida (Pontal-SP)**. STAB, Piracicaba, 1 (6): 11-22, ago. 1983.

STOLF, R. **Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo**. 1991.

STOLF, R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; MARGARIDO, L. A. C. **Penetrômetro de impacto Stolf – Programa computacional de dados em EXCEL-VBA**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 38, nº 3, Viçosa, MAI/JUN 2014.

SWAIN, D. J. & SCOTTER, D. R. **Hydraulic properties and field capacity of Himtangî sand**. New Zeal J Exp Agr. 1988. V. 16, p. 367-374.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A . **Integrated Solid Waste Management Engineering principles and management issues**. McGraw-Hill International Editions, 1993. 978 p.

TEIXEIRA, P. F. **Oxidação biológica do metano em coberturas de aterros de resíduos sólidos urbanos: dinâmica do processo e aspectos geotécnicos**. Tese de doutorado. Escola Politécnica de São Paulo. USP. 2008. 168 p.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia**. Ed Artmed, 10ª Edição. Porto Alegre, 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Inventory of U.S. **Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2005**. USEPA 430-R-07-002, 2007. Artigo disponibilizado em <<http://www.epa.gov/climatechange/emissions/usinventoryreport.html>> Acesso em 14 de outubro de 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet**. Solid. Waste and Emergency Response EPA 542-F-03-015 Agency (5103G) September, 2003. Disponível em <<http://www.epa.gov/tio/download/remed/epa542f03015.pdf>>. Acesso em 14 de outubro de 2014.

Van GENUCHTEN, M. T. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898. 1980.

VIEIRA, A. M. **Estudo de barreiras capilares como cobertura final de aterro de resíduos.** Tese de Doutorado. Univerdidade Federal de São Paulo. 2005. 287p.

WARITH, M.; LI, X.; JIN, H. **Bioreactor landfills:** state-of-the-art review Emirates Journal for Engineering Research, 2005. v. 1, n. 1, p. 1-14.

WOOD, D. M. **The behaviour of partly saturated soils:** a review. Department of engineering, University of Cambridge. 1979.

ZORNBERG, J. G.; LAFOUNTAIN, L.; CALDWEL, J. A. **Analysis and design of evapotanspirative cover for hazardous wast landfill.** Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 2003. V. 129, n 6, pp 427 – 438.

APÊNDICE - A

HISTERESE

A.1 INTEGRAIS DEFINIDAS

Integrais definidas para o cálculo da histerese entre as trajetórias de secagem e de umedecimento:

Integral – 01 (LABORATÓRIO - SOLO CONVENCIONAL - SECAGEM):

$$\int_2^{4000} 0,1612 + \frac{0,1893}{[1 + (0,00000329x)^{1,35375}]^{219,702}} dx$$

Integral – 02 (LABORATÓRIO - SOLO CONVENCIONAL - UMEDECIMENTO):

$$\int_2^{4000} 0,1652 + \frac{0,1840}{[1 + (0,000000212x)^{0,504323}]^{55,8608}} dx$$

Integral – 03 (LABORATÓRIO – SOLO-COMPOSTO 3:1 - SECAGEM):

$$\int_2^{4000} 0,1495 + \frac{0,2382}{[1 + (0,000000580x)^{0,961073}]^{309,829}} dx$$

Integral – 04 (LABORATÓRIO – SOLO-COMPOSTO 3:1 - UMEDECIMENTO):

$$\int_2^{4000} 0,1530 + \frac{0,2071}{[1 + (0,0000000172x)^{0,473983}]^{147,369}} dx$$

Integral – 05 (LABORATÓRIO – SOLO-COMPOSTO 1:1 - SECAGEM):

$$\int_2^{4000} 0,2539 + \frac{0,2605}{[1 + (0,000000306x)^{0,640125}]^{192,856}} dx$$

Integral – 06 (LABORATÓRIO – SOLO-COMPOSTO 1:1 - UMEDECIMENTO):

$$\int_2^{4000} 0,2589 + \frac{0,2495}{[1 + (0,425031x)^{75,9484}]^{0,005537}} dx$$

Integral – 07 (CAMPO – SOLO CONVENCIONAL - SECAGEM):

$$\int_2^{4000} 0,1991 + \frac{0,2174}{[1 + (0,00000000803x)^{0,497001}]^{866,182}} dx$$

Integral – 08 (CAMPO – SOLO CONVENCIONAL - UMEDECIMENTO):

$$\int_2^{4000} 0,2007 + \frac{0,1908}{[1 + (0,000114x)^{0,510347}]^{4,59672}} dx$$

Integral – 09 (CAMPO – SOLO-COMPOSTO 3:1 - SECAGEM):

$$\int_2^{4000} 0,1525 + \frac{0,2588}{[1 + (0,00000000653x)^{0,560333}]^{1816,2}} dx$$

Integral – 10 (CAMPO – SOLO-COMPOSTO 3:1 - UMEDECIMENTO):

$$\int_2^{4000} 0,1544 + \frac{0,2228}{[1 + (0,0000000158x)^{0,475939}]^{610,881}} dx$$

Integral – 11 (CAMPO – SOLO-COMPOSTO 1:1 - SECAGEM):

$$\int_2^{4000} 0,1880 + \frac{0,2518}{[1 + (0,0000000424x)^{0,677143}]^{2192,3}} dx$$

Integral – 12 (CAMPO – SOLO-COMPOSTO 1:1 - UMEDECIMENTO):

$$\int_2^{4000} 0,1903 + \frac{0,2143}{[1 + (0,0000000204x)^{0,505966}]^{756,614}} dx$$

APÊNDICE - B

DADOS DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

A seguir são apresentados os gráficos gerados pelo programa “STATISTICA” com as respectivas equações de ajuste das curvas experimentais. A equação utilizada para modelar a curva experimental foi a de van Genuchten (1980), apresentada a seguir:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m}$$

Onde:

θ é o teor de umidade volumétrico,

θ_s é o teor de umidade volumétrico saturado,

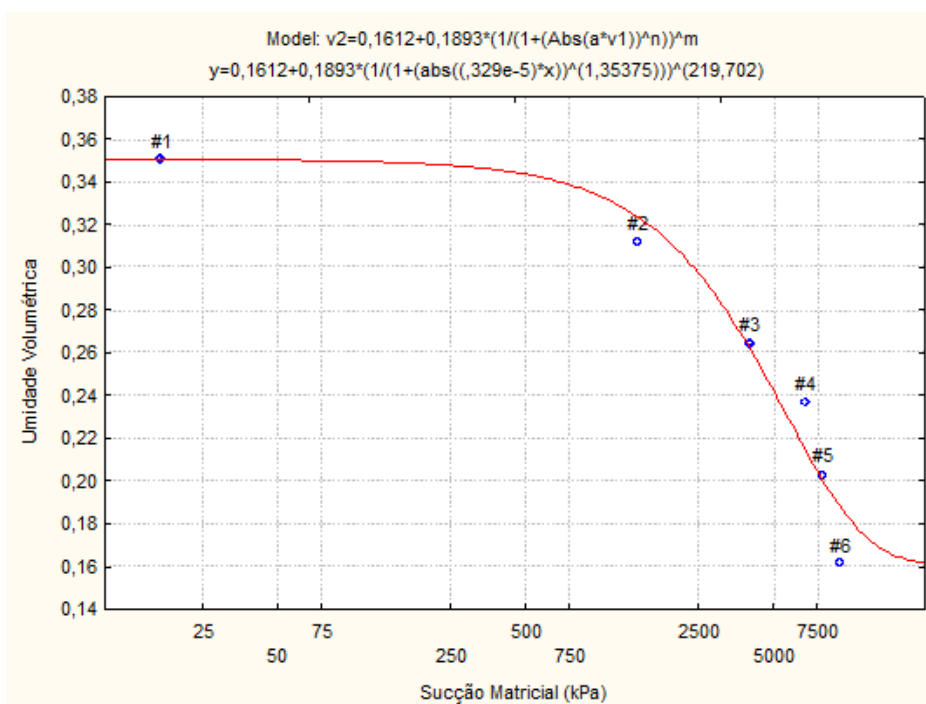
θ_r é o teor de umidade volumétrico residual,

ψ é a sucção do solo,

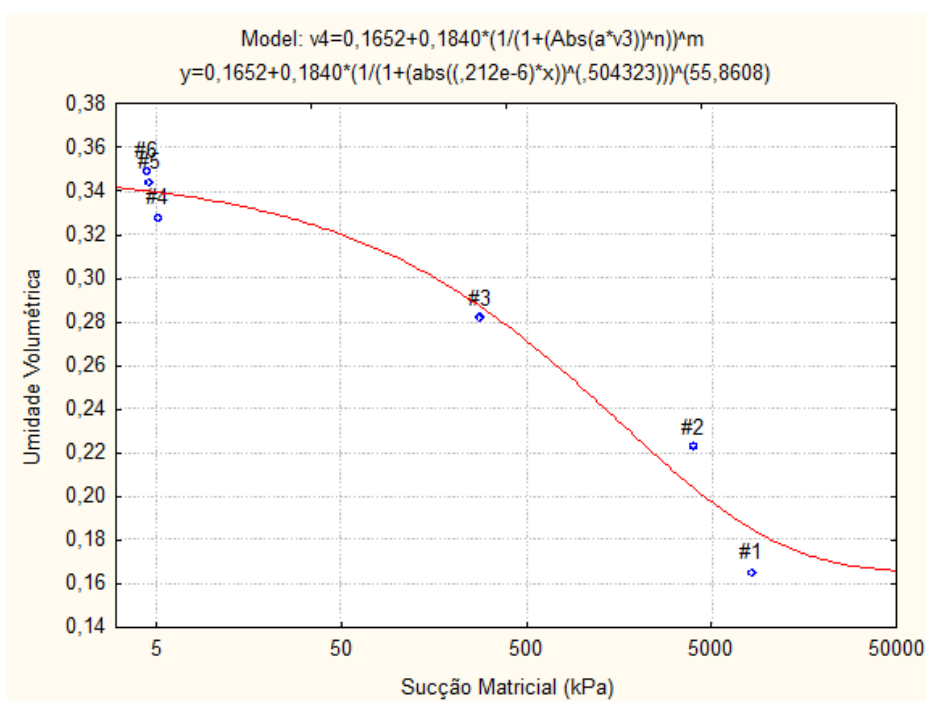
a é o primeiro parâmetro de ajuste (aproximadamente igual ao inverso da sucção de entrada de ar),

n é o segundo parâmetro de ajuste (geralmente maior que 1), está relacionado com a inclinação da curva característica no ponto de inflexão e

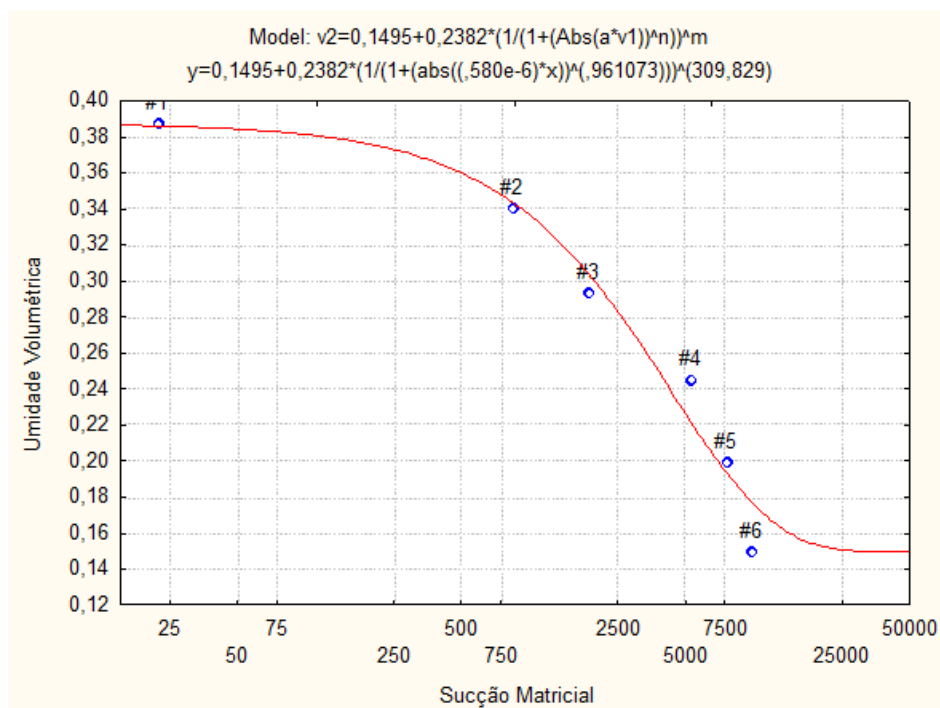
m é o terceiro parâmetro de ajuste, está relacionado com o teor de umidade residual.



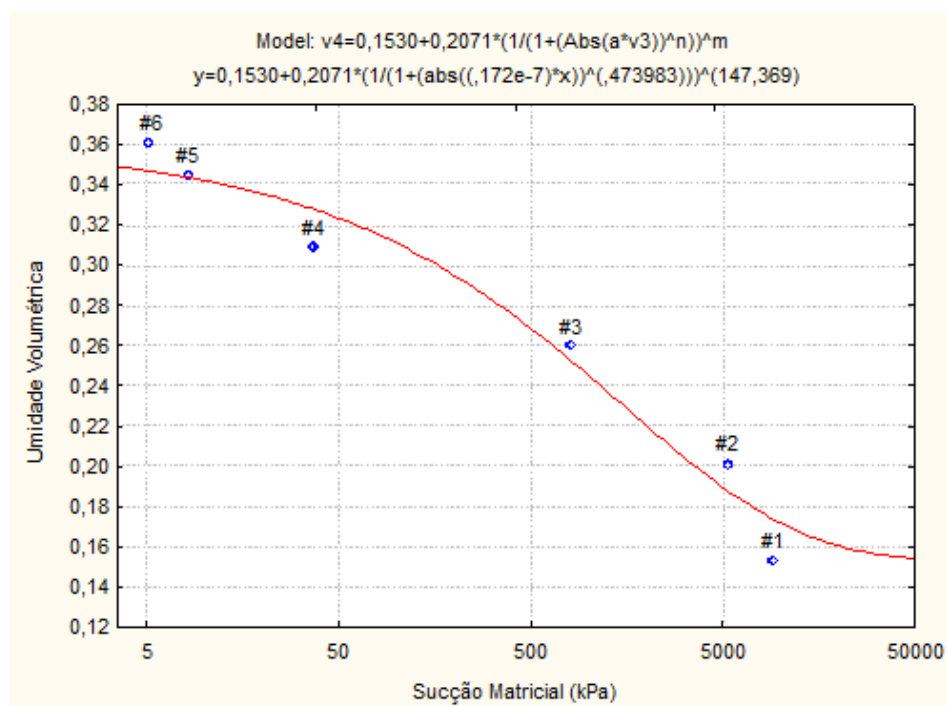
B1 - Trajetória de secagem do Solo Convencional em laboratório



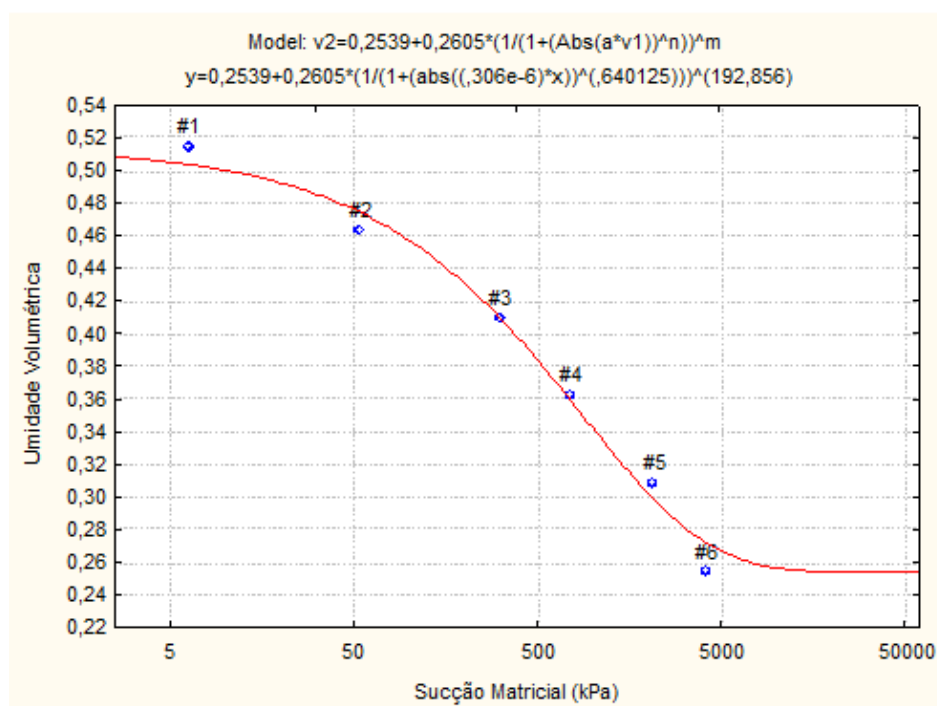
B2 – Trajetória de umedecimento do Solo Convencional em laboratório



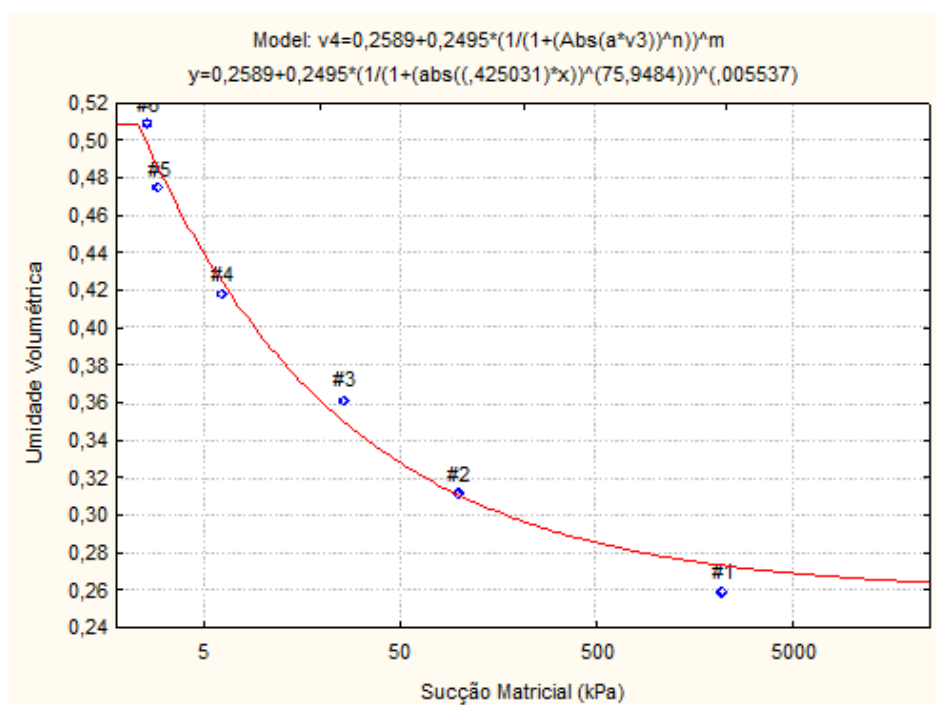
B3 – Trajetória de secagem do Solo-Composto 3:1 em laboratório



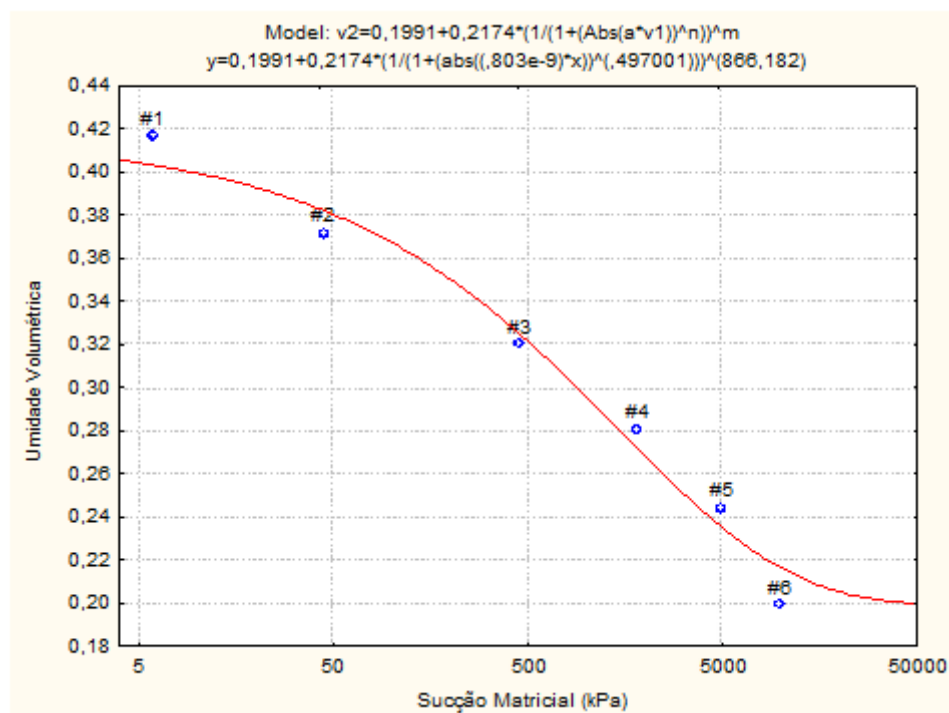
B4 – Trajetória de umedecimento do Solo-Composto 3:1 em laboratório



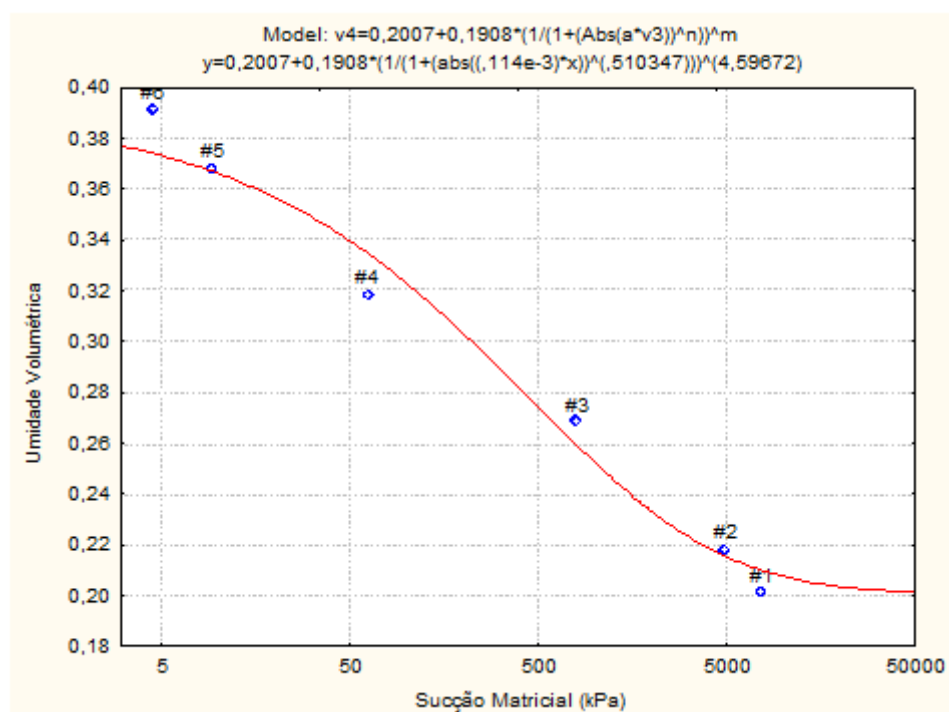
B5 – Trajetória de secagem do Solo-Composto 1:1 em laboratório



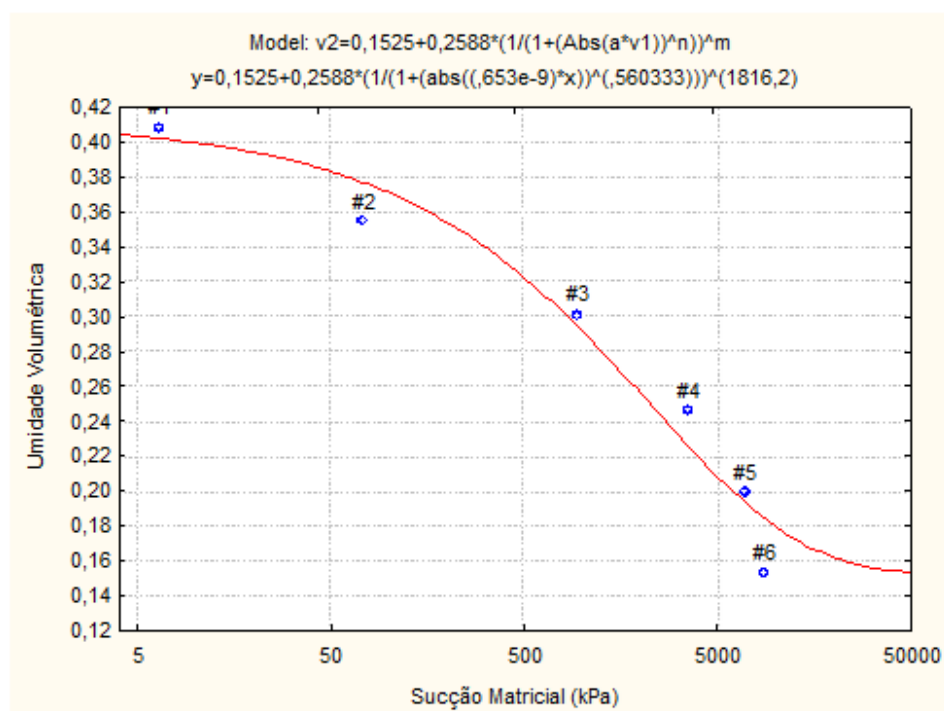
B6 – Trajetória de umedecimento do Solo-Composto 1:1 em laboratório



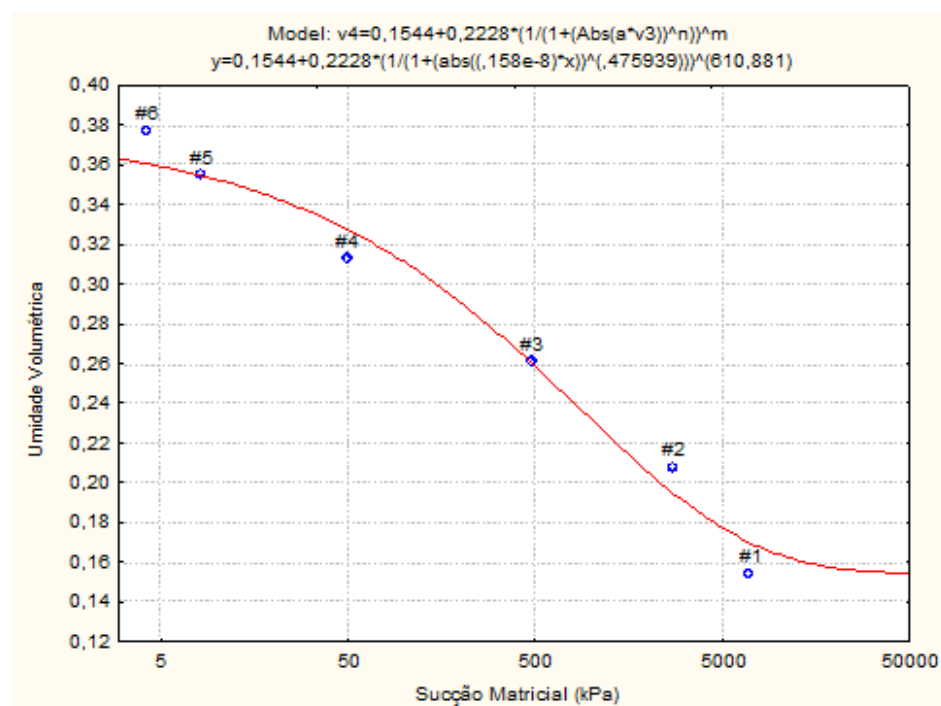
B7 – Trajetória de secagem do Solo Convencional em campo



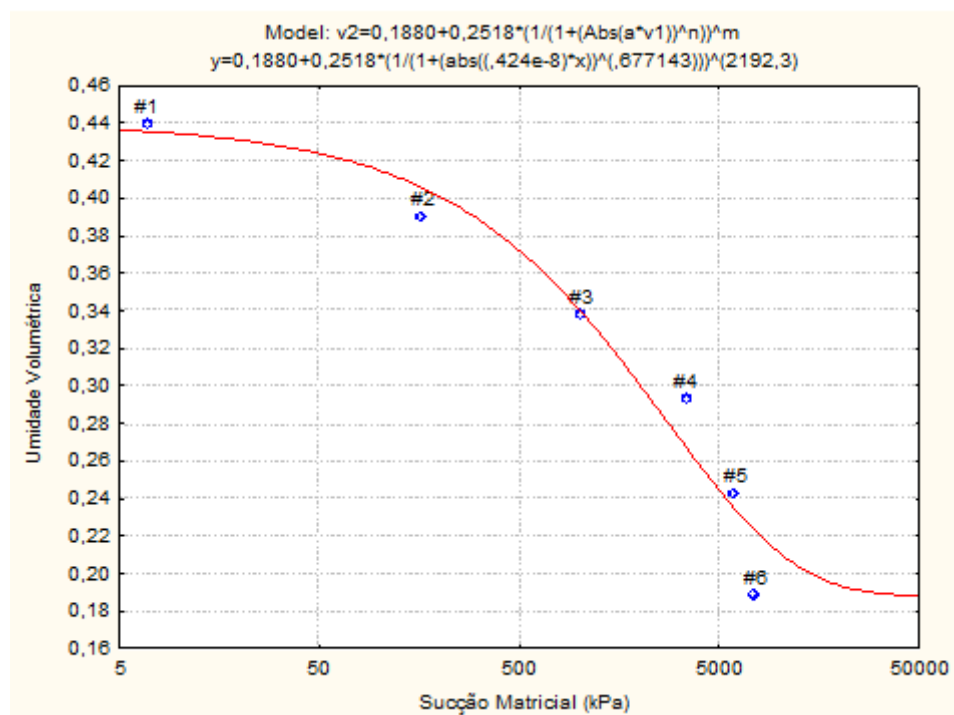
B8 – Trajetória de umedecimento do Solo Convencional em campo



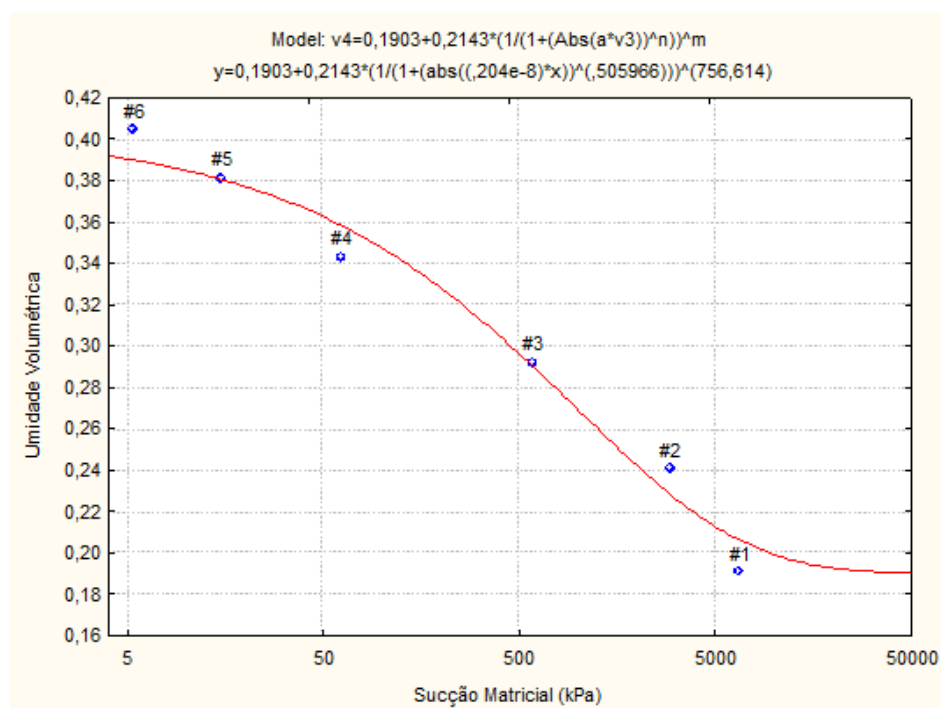
B9 – Trajetória de secagem do Solo-Composto 3:1 em campo



B10 – Trajetória de umedecimento do Solo-Composto 3:1 em campo



B11 – Trajetória de secagem do Solo-Composto 1:1 em campo



B12 – Trajetória de umedecimento do Solo-Composto 1:1 em campo

APÊNDICE – C

Solo Convencional

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE SOLOS E INSTRUMENTAÇÃO

CURVA DE RETENÇÃO - DADOS EXPERIMENTAIS

Projeto:	Tese de Doutorado	Registro:	Folha 1/3
Localização:			
Amostra Nº			
Descrição:	SOLO NATURAL compactado em laboratório		
Responsável		Data:	

1º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O2	202,05	24,31	matricial	0,4789	0,1988	140,90	6,10
			total	0,3386	0,2149	57,56	54,66
O3	204,45	24,39	matricial	0,4979	0,2093	137,89	6,43
			total	0,3219	0,2012	59,99	49,40
O6	202,26	22,83	matricial	0,4651	0,1959	137,42	6,48
			total	0,3152	0,2	57,60	54,57

2º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O2	198,22	21,21	matricial	0,3014	0,2001	50,62	74,87
			total	0,2967	0,1965	50,99	73,56
O3	200,9	21,59	matricial	0,3034	0,1946	55,91	58,70
			total	0,293	0,1937	51,26	72,60
O6	198,68	19,98	matricial	0,2695	0,2019	33,48	572,04
			total	0,2734	0,2016	35,62	421,45

3º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O2	195,15	18,74	matricial	0,2763	0,218	26,74	1501,68
			total	0,2774	0,2189	26,72	1505,69
O3	197,68	19,05	matricial	0,2621	0,206	27,23	1399,93
			total	0,2787	0,2187	27,43	1360,04
O6	194,84	16,92	matricial	0,2534	0,2043	24,03	2213,76
			total	0,2569	0,2064	24,47	2080,41

Solo Convencional

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE SOLOS E INSTRUMENTAÇÃO

CURVA DE RETENÇÃO - DADOS EXPERIMENTAIS

Projeto:	Tese de Doutorado	Registro:	Folha 2/3
Localização:			
Amostra N°			
Descrição:	SOLO NATURAL compactado em laboratório		
Responsável		Data:	

4º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O2	192,19	16,35	matricial	0,2433	0,199	22,26	2853,30
			total	0,2485	0,1984	25,25	1859,19
O3	194,73	16,73	matricial	0,2273	0,1798	26,42	1573,20
			total	0,248	0,2015	23,08	2538,72
O6	191,77	14,48	matricial	0,264	0,2135	23,65	2337,54
			total	0,4546	0,3672	23,80	2288,40

5º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O2	190,59	15,05	matricial	0,2734	0,2221	23,10	2531,18
			total	0,271	0,2189	23,80	2288,70
O3	192,96	15,33	matricial	0,2414	0,1945	24,11	2188,59
			total	0,2439	0,1966	24,06	2205,62
O6	189,93	13,01	matricial	0,2416	0,2005	20,50	3672,63
			total	0,2461	0,204	20,64	3600,50

6º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O2	187,43	12,5	matricial	0,2575	0,216	19,21	4415,23
			total	0,2442	0,2003	21,92	2997,47
O3	189,68	12,75	matricial	0,2505	0,209	19,86	4026,50
			total	0,2571	0,2119	21,33	3260,04
O6	186,46	10,25	matricial	0,2369	0,203	16,70	6328,35
			total	0,2219	0,1881	17,97	5276,16

Solo Convencional

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE SOLOS E INSTRUMENTAÇÃO

CURVA DE RETENÇÃO - DADOS EXPERIMENTAIS

Projeto:	Tese de Doutorado	Registro:	Folha 3/3
Localização:			
Amostra Nº			
Descrição:	SOLO NATURAL compactado em laboratório		
Responsável		Data:	

7º Ponto							
Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O2	184,5	10,13	matricial	0,2295	0,1975	16,20	6795,20
			total	0,2333	0,1997	16,83	6215,42
O3	186,64	10,35	matricial	0,2243	0,193	16,22	6780,54
			total	0,2207	0,1889	16,83	6207,35
O6	183,6	7,97	matricial	0,2159	0,1877	15,02	8044,68
			total	0,2145	0,1881	14,04	9268,67

8º Ponto							
Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O2	180,61	6,99	matricial	0,2127	0,1857	14,54	8622,60
			total	0,2156	0,1885	14,38	8826,16
O3	183,13	7,58	matricial	0,2236	0,1936	15,50	7518,95
			total	0,2268	0,1955	16,01	6984,96
O6	180,11	5,19	matricial	0,2005	0,1787	12,20	12056,15
			total	0,2028	0,1796	12,92	10877,41

Solo-Composto 3:1

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE SOLOS E INSTRUMENTAÇÃO

CURVA DE RETENÇÃO - DADOS EXPERIMENTAIS

Projeto:	Tese de Doutorado	Registro:	Folha 1/3
Localização:			
Amostra Nº			
Descrição:	SOLO-COMPOSTO 3:1 compactado em laboratório		
Responsável		Data:	

1º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade w	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
OO1	194,08	30,13	matricial	0,4887	0,2024	141,45	6,04
			total	0,2862	0,2137	33,93	536,78
O4	197,55	31,41	matricial	0,5437	0,2038	166,78	4,03
			total	0,2598	0,1872	38,78	267,77
10	199,85	28,24	matricial	0,4938	0,2014	145,18	5,67
			total	0,247	0,1813	36,24	385,46

2º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade w	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
OO1	190,71	27,12	matricial	0,3234	0,1830	76,72	27,04
			total	0,2750	0,2070	32,85	626,20
O4	194,04	28,35	matricial	0,3003	0,1532	96,02	15,60
			total	0,2793	0,2011	38,89	263,80
10	196,18	25,18	matricial	0,2802	0,1777	57,68	54,38
			total	0,2566	0,1966	30,52	874,44

3º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade w	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
OO1	187,26	24,05	matricial	0,2608	0,1770	47,34	88,22
			total	0,2660	0,1994	33,40	578,77
O4	190,26	25,07	matricial	0,2842	0,1840	54,46	62,61
			total	0,2724	0,1991	36,82	354,87
10	192,28	21,92	matricial	0,2571	0,1837	39,96	226,31
			total	0,2641	0,2000	32,05	702,25

Solo-Composto 3:1

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE SOLOS E INSTRUMENTAÇÃO

CURVA DE RETENÇÃO - DADOS EXPERIMENTAIS

Projeto:	Tese de Doutorado	Registro:	Folha 2/3
Localização:			
Amostra Nº			
Descrição:	SOLO-COMPOSTO 3:1 compactado em laboratório		
Responsável		Data:	

4º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade w	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
OO1	184,18	21,30	matricial	0,2215	0,1622	36,56	368,11
			total	0,2766	0,2163	27,88	1276,41
O4	187,40	22,58	matricial	0,2371	0,1745	35,87	406,11
			total	0,2500	0,1917	30,41	887,91
10	189,22	19,36	matricial	0,2510	0,1932	29,92	953,13
			total	0,2524	0,1980	27,47	1352,29

5º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade w	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
OO1	181,16	18,61	matricial	0,2769	0,2134	29,76	975,34
			total	0,2427	0,1932	25,62	1763,46
O4	184,33	19,91	matricial	0,2752	0,2124	29,57	1002,17
			total	0,2588	0,2034	27,24	1399,14
10	186,05	16,71	matricial	0,2342	0,1877	24,77	1991,06
			total	0,2481	0,1991	24,61	2038,03

6º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade w	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
OO1	130,11	15,37	matricial	0,2386	0,1991	19,84	4036,43
			total	0,233	0,1922	21,23	3308,46
O4	135,4	17,15	matricial	0,237	0,1943	21,98	2972,16
			total	0,2412	0,1972	22,31	2832,50
10	137,78	14,6	matricial	0,2487	0,2088	19,11	4481,34
			total	0,2493	0,2087	19,45	4265,56

Solo-Composto 3:1

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE SOLOS E INSTRUMENTAÇÃO

CURVA DE RETENÇÃO - DADOS EXPERIMENTAIS

Projeto:	Tese de Doutorado	Registro:	Folha 3/3
Localização:			
Amostra Nº			
Descrição:	SOLO-COMPOSTO 3:1 compactado em laboratório		
Responsável		Data:	

7º Ponto							
Anel	Peso Solo e Anel	Umidade w	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
OO1	126,06	11,76	matricial	0,2344	0,1985	18,09	5188,87
			total	0,2384	0,2029	17,50	5645,86
O4	131,12	13,43	matricial	0,2214	0,1857	19,22	4407,91
			total	0,2456	0,2057	19,40	4300,27
10	134,18	11,59	matricial	0,2226	0,191	16,54	6470,41
			total	0,2232	0,1916	16,49	6518,60

8º Ponto							
Anel	Peso Solo e Anel	Umidade w	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
OO1	122,86	8,86	matricial	0,2026	0,1787	13,37	10188,59
			total	0,2045	0,1762	16,06	6934,06
O4	127,83	10,52	matricial	0,2194	0,189	16,08	6910,90
			total	0,2134	0,1822	17,12	5955,04
10	131,12	8,98	matricial	0,2175	0,1928	12,81	11044,43
			total	0,2246	0,1994	12,64	11321,96

Solo-Composto 1:1

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE SOLOS E INSTRUMENTAÇÃO

CURVA DE RETENÇÃO - DADOS EXPERIMENTAIS

Projeto:	Tese de Doutorado	Registro:	Folha 1/3
Localização:			
Amostra Nº			
Descrição:	SOLO-COMPOSTO 1:1 compactado em laboratório		
Responsável		Data:	

1º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O5	185,74	34,44	matricial	0,4435	0,1615	174,61	3,61
			total	0,3192	0,2064	54,65	62,07
O41	183,51	30,87	matricial	0,4085	0,1601	155,15	4,82
			total	0,3045	0,1843	65,22	40,25
168	182,04	32,24	matricial	0,4996	0,1801	177,40	3,47
			total	0,3127	0,1954	60,03	49,32

2º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O5	182,52	31,22	matricial	0,3207	0,1776	80,57	23,98
			total	0,2653	0,2003	32,45	663,02
O41	180,05	27,69	matricial	0,2587	0,1681	53,90	64,22
			total	0,2729	0,205	33,12	602,30
168	178,66	29,25	matricial	0,2645	0,1556	69,99	33,86
			total	0,28	0,2036	37,52	320,61

3º Ponto

Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O5	178,69	27,39	matricial	0,2882	0,195	47,79	86,20
			total	0,519	0,385	34,81	473,28
O41	176,38	24,31	matricial	0,2876	0,2043	40,77	201,32
			total	0,2835	0,2119	33,79	547,38
168	174,88	25,61	matricial	0,2837	0,1992	42,42	159,04
			total	0,2863	0,2001	43,08	144,72

Solo-Composto 1:1

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE SOLOS E INSTRUMENTAÇÃO

CURVA DE RETENÇÃO - DADOS EXPERIMENTAIS

Projeto:	Tese de Doutorado	Registro:	Folha2/3
Localização:			
Amostra Nº			
Descrição:	SOLO-COMPOSTO 1:1 compactado em laboratório		
Responsável		Data:	

4º Ponto							
Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O5	176,15	24,85	matricial	0,2645	0,1928	37,19	336,40
			total	0,2761	0,214	29,02	1084,02
O41	173,78	21,91	matricial	0,2604	0,1969	32,25	682,43
			tital	0,2724	0,2141	27,23	1400,48
168	172,31	23,14	matricial	0,2767	0,2068	33,80	546,50
			total	0,2731	0,2113	29,25	1049,07

5º Ponto							
Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O5	173,14	21,83	matricial	0,2492	0,1839	35,51	427,93
			total	0,2633	0,2056	28,06	1242,82
O41	170,92	19,28	matricial	0,2462	0,1912	28,77	1124,02
			total	0,2596	0,2079	24,87	1964,39
168	169,32	20,27	matricial	0,2269	0,1728	31,31	781,00
			total	0,2372	0,1866	27,12	1423,42

6º Ponto							
Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O5	124,71	18,72	matricial	0,2115	0,1676	26,19	1624,71
			total	0,2472	0,2016	22,62	2710,79
O41	126,45	15,85	matricial	0,2467	0,2046	20,58	3631,84
			total	0,2161	0,1795	20,39	3730,30
168	121,89	16,54	matricial	0,2408	0,197	22,23	2864,68
			total	0,2319	0,1907	21,60	3134,68

Solo-Composto 1:1

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE SOLOS E INSTRUMENTAÇÃO

CURVA DE RETENÇÃO - DADOS EXPERIMENTAIS

Projeto:	Tese de Doutorado	Registro:	Folha 3/3
Localização:			
Amostra Nº			
Descrição:	SOLO-COMPOSTO 1:1 compactado em laboratório		
Responsável		Data:	

7º Ponto							
Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O5	121,01	15,02	matricial	0,24	0,1994	20,36	3745,77
			total	0,2471	0,2066	19,60	4175,30
O41	123,02	12,69	matricial	0,2345	0,2003	17,07	5997,54
			total	0,2343	0,1997	17,33	5785,27
168	118,25	13,04	matricial	0,2208	0,1855	19,03	4532,69
			total	0,2252	0,1885	19,47	4255,96

8º Ponto							
Anel	Peso Solo e Anel	Umidade do solo	Sucção (papel filtro)				
			Tipo	P. umido	P. seco	w Papel	Sucção
O5	117,52	11,53	matricial	0,2398	0,2039	17,61	5557,32
			total	0,2272	0,1945	16,81	6226,91
O41	120,20	10,10	matricial	0,2352	0,2047	14,90	8188,97
			total	0,2443	0,2108	15,89	7104,40
168	115,22	10,14	matricial	0,2159	0,1882	14,72	8404,59
			total	0,2224	0,1828	21,66	3108,57

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
LABORATÓRIO DE SOLOS E INSTRUMENTAÇÃO

LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Projeto:	TESE DOUTORADO GERSON			Registro:	
Localização:					
Amostra Nº:		Furo Nº:		Prof. (m):	
Descrição do solo:	Solo Convencional				
Responsável:				Data:	

LIMITE DE PLASTICIDADE

Cápsula	Nº	83	39	10X	17	95	55
Peso Bruto Úmido (g)		7,88	8,30	8,50	8,42	9,00	9,55
Peso Bruto Seco (g)		7,35	7,79	7,99	8,10	8,43	9,07
Peso da Cápsula (g)		5,55	6,23	6,44	7,14	6,67	7,39
Peso da Água (g)		0,53	0,51	0,51	0,32	0,57	0,48
Peso do Solo Seco (g)		1,80	1,56	1,55	0,96	1,76	1,68
Umidade (%)		29,44	32,69	32,90	33,33	32,39	28,57

LIMITE DE LIQUIDEZ

Cápsula	Nº	79A	14B	38	93	84	184
Número de Golpes		47	40	30	23	17	9
Peso Bruto Úmido (g)		20,52	21,27	21,58	21,86	19,90	20,64
Peso Bruto Seco (g)		16,26	16,95	16,93	16,67	15,22	15,80
Peso da Cápsula (g)		6,51	7,11	6,87	6,10	6,03	7,12
Peso da Água (g)		4,26	4,32	4,65	5,19	4,68	4,84
Peso do Solo Seco (g)		9,75	9,84	10,06	10,57	9,19	8,68
Umidade (%)		43,69	43,90	46,22	49,10	50,92	55,76

Número de Golpes	Umidade
47	43,69
40	43,90
30	46,22
23	49,10
17	50,92
9	55,76

Limite de Liquidez =	48	%
Limite de Plasticidade =	31	%
Índice de Plasticidade =	17	%

