



Viviana Torralba

**Influência do método de compactação na permeabilidade
de uma mistura colúvio-composto orgânico**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadores: Tácio Mauro Pereira de Campos
Franklin dos Santos Antunes

Rio de Janeiro, janeiro de 2007



Viviana Torralba

Influência do método de compactação na permeabilidade de uma mistura colúvio-composto orgânico

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Tácio Mauro Pereira de Campos

Orientador
PUC - Rio

Franklin dos Santos Antunes

Co-orientador
PUC - Rio

Sérgio Tibana

UENF

Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

PUC - Rio

José Eugênio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de janeiro de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Viviana Torralba

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Latina de Costa Rica em 2003. As principais áreas de interesse e linhas de pesquisa são: mecânica dos solos, geotecnia experimental e geotecnia ambiental.

Ficha Catalográfica

Torralba, Viviana

Influência do método de compactação na permeabilidade de uma mistura colúvio-composto orgânico/Viviana Torralba; orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos; co-orientador: Franklin dos Santos Antunes. - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2007.

168 f.; 30 cm

Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Compactação 3. Permeabilidade 4. Colúvio 5. Composto Orgânico I. Tácio Mauro Pereira de Campos. II. Franklin dos Santos Antunes. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título

CDD: 624

Aos meus pais e irmã.

Agradecimentos

Ao Professor Tácio de Campos pela orientação, conhecimentos transmitidos, atenção, apoio e paciência.

Ao Professor Franklin dos Santos Antunes pela sua disposição incondicional, tempo e amizade. Sua ajuda foi um grande aporte neste trabalho.

A todos os professores que, ao longo do meu mestrado, transmitiram seu conhecimento e apoio, especialmente aos professores Sérgio Fontoura e Alberto Sayão.

A Ana Roxo e Rita, por serem sempre tão amáveis e prestativas.

À PUC-Rio por ter me aceitado no programa de pós-graduação e à CAPES pelo apoio financeiro.

Ao Engenheiro William Braga, pela paciente ajuda na execução dos ensaios de permeabilidade e a Amaury, Josué e “Seu” José por estarem disponíveis sempre que precisei.

A todos os brasileiros que me acolheram e aos amigos que me acompanharam durante esse processo e fizeram com que o Brasil se tornasse meu lar, pois nunca me deixaram sentir saudade nem tristeza. Muito pelo contrário, foi graças a vocês que me senti sempre em casa. Sua cultura, seus costumes, seu jeitinho hospitaleiro e carinhoso fizeram com que me apaixonasse pelo seu país e sua gente. Sempre guardarei esta experiência como uma das mais valiosas na minha vida.

Por seu tempo sacrificado para me explicar e ajudar quando tive alguma dificuldade, pelo esforço para me ensinar português e mostrar as coisas lindas da sua cultura, por estar perto de mim em momentos bons e ruins, por serem amigos e amigas de verdade, que me aceitaram do jeito que sou e me fizeram parte dos seus. Álvaro, Ana Lúcia, Carol, Bê, Fer-velhinho, Gui, Lica, Luciana, Saré, Taíse, Tânia, Thaís, Tricia, Vini e Ygor, sempre estarei agradecida com vocês.

A todos os que estudaram comigo ou se sentiram incomodados com minha voz baixinha na favelinha: Leo, Johan, Julito, Fabio, Tonho, Mariana, Taludes e Jackie. Ao apartamento Paraná (Thais, Pedro, João e Marcelo), porque cada um de vocês me deu ajuda e opinião valiosa. A Amanda pelas maravilhosas receitas e agradável companhia. A todos os amigos das horas de descontração...

Às meninas futura, Bê, Lorraine, Carlinha, Dani e Tricia, pelos ótimos momentos de convivência, por serem minhas irmãzinhas e por me agüentarem! Agradeço especialmente à Lore pelo seu apoio moral e pela “força tecnológica” para concluir o meu trabalho e à Bê, por sua amizade única e incondicional, incapaz de falhar, sempre de primeira para me ajudar com tudo.

A Tri, Ana Lucia, Taíse e Bê por me dar forças e muitas horas de diversão e alegrias.

A Mônica pela sua paciência extrema e sua ajuda incondicional. Sem você, este trabalho não teria sido possível mesmo.

A Denise pela sua excelente disposição e ajuda.

A Julito Macias e Wagner, por todas as conversas, conselhos e valiosa amizade.

Ao velhinho e a Ygor por serem grandes e queridíssimos amigos.

A Renán Espinoza, Sergio Saenz e Fernando Alvarado pelo apoio e ajuda.

Ao Gui, por acreditar em mim mais do que eu mesma, por facilitar as coisas e me fazer sentir sempre tão leve. Por me fazer rir nos momentos difíceis e me levantar nos momentos de fraqueza. Graças ao teu carinho e apoio esta dissertação foi concluída.

A minha família, por todo o amor, apoio e por abrir mão de mim para que pudesse realizar meu sonho. Obrigada por todos os sacrifícios que minha educação significou para vocês.

Resumo

Torralba, Viviana; de Campos, Tácio Mauro Pereira; Antunes, Franklin dos Santos. **Influência do método de compactação na permeabilidade de uma mistura colúvio-composto orgânico**. Rio de Janeiro, 2007. 168 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O *liner* é um elemento de extrema importância no processo construtivo de um aterro sanitário, pois funciona como uma barreira capaz de impedir a percolação de agentes contaminantes através do subsolo. Os *liners* ou camadas impermeabilizantes são geralmente construídos a partir de materiais que possuem baixa permeabilidade. A escolha de um material adequado, assim como o controle dos processos construtivos são indispensáveis para garantir um bom desempenho da camada impermeabilizante. O processo de compactação é de extrema importância neste tipo de obra geotécnica. Os ensaios de compactação realizados em laboratório têm como objetivo reproduzir as condições de campo, no entanto, em numerosos casos há diferenças importantes entre os mecanismos de compactação utilizados, na preparação do material antes do processo de densificação e nas características das amostras, o que gera como consequência discrepâncias nos valores de permeabilidade de campo com os de laboratório. O objetivo principal do presente estudo é avaliar experimentalmente a influência de dois mecanismos diferentes de compactação (dinâmico, com o Proctor Normal e estático, com o método de compactação por pisoteamento) nos valores de permeabilidade de um solo coluvionar e de um composto orgânico para seu eventual uso em um *liner*. Os ensaios foram realizados em corpos de prova com diferentes teores de umidade, preparados com solo coletado no campo Experimental II da PUC-Rio, com composto orgânico produzido a partir do processo de compostagem da grama do Aeroporto Internacional Galeão (RJ), e com misturas em diferentes proporções de ambos os materiais.

Palavras-chave

Compactação; Permeabilidade; Colúvio; Composto Orgânico; Pisoteamento; Compactador Pneumático; Liner.

Abstract

Torralba, Viviana; de Campos, Tácio Mauro Pereira (Advisor); Antunes, Franklin dos Santos (Co-advisor). **Effect of the compaction method on the permeability of an organic compound-colluvionar soil mixture.** Rio de Janeiro, 2006. 168 p. Msc. Thesis - Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The liner is one of the most important elements in a sanitary landfill project, since it works as a barrier capable to impede seepage of pollutant substances through the subsurface. This element is usually built with materials that have low permeability. The choice of the right material as well as the control and supervision of the constructive processes are fundamental to achieve a good liner performance. The compaction process is extremely important in this type of geotechnical impoundment. Laboratory compaction intends to reproduce the field conditions; however, in some cases, there happen to be important differences between the compaction mechanisms used, the preparation of the material before the densification process and the specimens characteristics, which cause discrepancies between the permeability values obtained in the field and the ones obtained in the laboratory. The main objective of this study is to evaluate experimentally the effect of two different compaction mechanisms (dynamic, with standard Proctor and static, with the kneading compaction method) in the hydraulic conductivity of a colluvionar soil and an organic compound for their eventual use in a *liner*. The tests were executed using specimens with different water contents, prepared with colluvionar soil extracted from the Experimental Field II at the PUC-Rio, with the organic compound, and with mixtures of both materials in different proportions.

Key Words

Compaction, permeability; colluvionar soil; organic compound; kneading; kneading compactor; liner.

Lista de símbolos e abreviações

= diâmetro da abertura da malha da peneira;

a= massa da amostra seca em estufa, à temperatura de 110 °C;

A = área transversal do corpo de prova;

AH= ácido húmicos;

AH= ácido fúlvicos;

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas;

b = massa da amostra queimada em mufla à temperaturas de 500 °C ou 400 °C;

B = parâmetro de Skempton;

CH = Argila inorgânica de alta plasticidade, de acordo com a classificação de solos do SUCS;

Ct = caulinita;

CO=composto orgânico;

CP= corpo de prova;

CTC = capacidade de troca catiônica;

DCMM = Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio;

DRX = difração por raios-X;

e = índice de vazios;

EHT = extrato húmico total;

EPA = U.S. Environmental Protection Agency;

G_s = densidade relativa dos grãos;

H_{CP} = altura do corpo de prova;

i = gradiente hidráulico;

I_a = índice de atividade das argilas;

EMBRAPA= Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;

IP = índice de plasticidade;

k = coeficiente de permeabilidade; condutividade hidráulica;

LL = limite de liquidez;

LP = limite de plasticidade;

MO= matéria orgânica;

MO1= ensaio de queima de matéria orgânica a 500°C durante 4 horas;

MO2= ensaio de queima de matéria orgânica a 400 °C durante 6 horas;

M1= mistura 1, conformada por 75% de solo coluvionar e 25% de composto orgânico;

M2= mistura 2, conformada por 50% de solo coluvionar e 50% de composto orgânico;

M3= mistura 3, conformada por 25% de solo coluvionar e 75% de composto orgânico;

n = porosidade;

PUC-Rio = Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro;

PN= Proctor Normal;

Qt = quartzo;

Q = vazão;

R^2 = coeficiente de correlação;

S_o = grau de saturação inicial;

S = grau de saturação;

SUCS = Sistema Unificado de Classificação de Solo;

t = tempo;

UFRJ = Universidade Federal do Rio de Janeiro;

UNAM = Universidade Nacional Autônoma de México;

w_o = teor de umidade de compactação;

w_f = teor de umidade final;

w_{ot} = umidade ótima;

$w_{ot+3\%}$ = três pontos percentuais acima da umidade ótima; umidade ótima mais três por cento;

$w_{ot-3\%}$ = três pontos percentuais abaixo da umidade ótima; umidade ótima menos três por cento;

x, y = parâmetros de ajuste das linhas de tendência;

ρ_d = massa específica seca;

σ' = tensão efetiva utilizada no ensaio de permeabilidade;

$\Delta\sigma_c$ =acrécimo de tensão confinante aplicado;

Δt = variação de tempo;

Δu = excesso de poropressão gerado;

ΔV = variação de volume.

Sumário

1	Introdução	22
2	Revisão Bibliográfica	25
2.1	Camadas impermeabilizantes ou <i>liners</i>	25
2.1.1	Liners de Argila Compactada	27
2.2	Compactação	29
2.2.1	Tipo de Solo	31
2.2.2	Umidade de Compactação	32
2.2.3	Métodos e Energia de Compactação	32
2.2.4	Estrutura do Solo	34
2.2.5	Importância do processo de compactação na construção de um <i>liner</i>	37
2.2.6	Ensaio de laboratório <i>versus</i> compactação de campo	39
2.3	Permeabilidade	41
2.3.1	Geometria de Estrutura Porosa	43
2.3.1.1	Textura do Solo	43
2.3.1.2	Deposição Natural e Processos de Compactação	44
2.3.2	Propriedades do Fluido Percolante	49
2.3.3	A interação superficial entre o fluido e o meio poroso.	50
2.3.4	Ensaio em laboratório	52
2.3.5	Ensaio de campo <i>versus</i> ensaio de laboratório: determinação da permeabilidade dos <i>liners</i>	53
3	Descrição dos Materiais Utilizados	56
3.1	Introdução	56
3.2	Solo	56
3.2.1	Localização	57
3.2.2	Geologia e Geomorfologia	58
3.2.3	Aspectos climáticos	60
3.2.4	Amostragem do Solo	60
3.3	Composto Orgânico	62
3.3.1	Processo de Obtenção do Composto Orgânico	63
3.3.2	Características da Matéria Orgânica	65

3.3.3	Preparação do material antes da execução de ensaios	66
3.4	Misturas	66
4	Equipamento e Metodologia de Ensaio	68
4.1	Introdução	68
4.2	Ensaio de Caracterização	69
4.2.1	Caracterização Física	70
4.2.2	Caracterização Mineralógica	70
4.2.3	Caracterização Química	71
4.3	Ensaio de Compactação	72
4.3.1	Proctor Normal	73
4.3.1.1	Descrição do Equipamento	73
4.3.1.2	Metodologia do Ensaio	74
4.3.2	Pisoteamento	76
4.3.2.1	Descrição do Equipamento	76
4.3.2.2	Metodologia do Ensaio	77
4.3.3	Relação Entre o Ensaio Proctor Normal e Pisoteamento	81
4.4	Ensaio de Permeabilidade	83
4.4.1	Descrição do Equipamento	84
4.4.2	Metodologia do Ensaio	87
4.4.2.1	Moldagem dos Corpos de Prova	87
4.4.2.2	Montagem	88
4.4.2.3	Saturação	91
4.4.2.4	Percolação	92
5	Apresentação e Discussão dos Resultados	95
5.1	Introdução	95
5.2	Caracterização Física	95
5.2.1	Granulometria	95
5.2.2	Densidade dos Grãos	96
5.2.3	Limites de Consistência	97
5.2.4	Classificação	99
5.3	Caracterização Mineralógica	99
5.4	Caracterização Química	103
5.4.1	Solo	103
5.4.2	Composto Orgânico	103
5.5	Ensaio de Compactação	106

5.5.1	Proctor Normal	106
5.5.2	Pisoteamento	112
5.6	Ensaio de Permeabilidade	119
5.6.1	Solo	119
5.6.2	Mistura 1	125
5.6.3	Mistura 2	130
5.6.4	Mistura 3	135
5.6.5	Comparação conjunta dos resultados dos ensaios de permeabilidade dos materiais em estudo	142
6	Conclusões e Sugestões	146
6.1	Conclusões	146
6.1.1	Materiais	146
6.1.2	Permeabilidade	147
6.1.3	Escolha do material para utilizar no <i>liner</i>	150
6.2	Sugestões	150
	Referências Bibliográficas	152
	Anexo I Micromorfologia de Amostras Compactadas com Proctor Normal e Pisoteamento	160
	Apêndice A Detalhes da Composição Química do Composto Orgânico	164
	Apêndice B Detalhes dos permeômetros flexíveis ligados a frascos de Mariotte para a execução de ensaios de permeabilidade	166

Lista de figuras

Figura 2.1-Curva de compactação.	30
Figura 2.2-Influência da energia de compactação no comportamento do solo (Adaptado de Holtz e Kovacs, 1981).	34
Figura 2.3-Efeitos da compactação na estrutura do solo (Adaptado de Lambe, 1958).	35
Figura 2.4-Influência do método de compactação no comportamento do solo (Adaptado de Mitchell <i>et al.</i> , 1965).	36
Figura 2.5-Conductividade hidráulica versus grau de saturação (Adaptado de Olson e Daniel, 1981).	42
Figura 2.6-Coefficiente de permeabilidade de três argilas com diferentes tamanhos de grãos (Adaptado de Mesri e Olson, 1971).	44
Figura 2.7-Estruturas dispersa e floclada respectivamente (Lambe, 1958).	45
Figura 2.8-Fluxo de água através de poros relativamente grandes entre os grumos (Olsen, 1962).	46
Figura 2.9-Influência dos grumos na condutividade hidráulica para ensaios realizados em permeômetros com parede rígida e flexível em amostras compactadas com Proctor Normal e Modificado.	48
Figura 2.10-Variação da condutividade hidráulica da esmectita com fluidos percolantes de diferente composição química (Adaptado de Mesri e Olson, 1971).	51
Figura 2.11-Permeômetro de parede flexível usado em laboratório (Adaptado de Daniel <i>et al.</i> , 1984).	52
Figura 3.1-Localização do Campo Experimental II, PUC-Rio (Soares, 2005).	58
Figura 3.2-Perfil morfológico do local de estudo (Daylac, 1994).	59
Figura 3.3-Retirada da amostra deformada no Campo Experimental II da PUC-Rio.	61
Figura 3.4-Profundidade da escavação para extrair a amostra deformada.	62
Figura 3.5-Visão geral do ensaio de compostagem no primeiro dia (esquerda) e trinta dias depois (direita) (Benites <i>et al.</i> 2004).	65

Figura 4.1-Instrumentos do ensaio Proctor Normal.	74
Figura 4.2-Molde tripartido, base de alumínio e anéis médio e superior de confinamento; amostra de solo obtida a partir do pisoteamento; outros acessórios.	76
Figura 4.3-Compactador Pneumático.	77
Figura 4.4-Molde cilíndrico tripartido e anéis de confinamento.	78
Figura 4.5-Rotina do ensaio de pisoteamento.	79
Figura 4.6-Seqüência de pressão aplicada no solo por meio do equipamento de pisoteamento.	80
Figura 4.7-Relação entre a curva de compactação do Proctor Normal e a curva de massa específica seca vs pressão aplicada (curva de pisoteamento, regressão exponencial) para a determinação da pressão equivalente.	82
Figura 4.8-Sistema de aquisição de dados.	84
Figura 4.9-Esquema dos permeômetros (Adaptada de Carvalho, 2006).	85
Figura 4.10-Detalhe permeômetro de 4 ½ “.	86
Figura 4.11-Montagem do corpo de prova para ensaio de permeabilidade.	89
Figura 4.12-Colocação da membrana de látex no corpo de prova com ajuda do encamisador.	89
Figura 4.13-Montagem completa do corpo de prova no pedestal.	90
Figura 4.14-Preenchimento da câmara com água.	90
Figura 5.1-Curvas granulométricas dos materiais em estudo.	96
Figura 5.2-Densidade dos grãos vs teor de composto orgânico no material.	97
Figura 5.3-Limites de consistência versus teor de composto orgânico.	98
Figura 5.4-Presença da matriz argilosa com grãos de quartzo e granada muito alterada (Soares, 2005).	100
Figura 5.5-Grãos de quartzo arestados e cristais grandes de quartzo (Soares, 2005).	100
Figura 5.6-Grande área da matriz argilosa englobando alguns grãos de agregados ferruginosos e quartzo (Soares, 2005).	101
Figura 5.7-Difratograma da amostra de solo passante na peneira #200 (Legenda: Ct=Caulinita, Qt=Quartzo).	102
Figura 5.8-Recipientes com composto orgânico seco em estufa a 110°C antes de ser colocado na mufla.	105
Figura 5.9-Recipientes com composto orgânico após ser submetido à queima na mufla.	105

Figura 5.10-Curva de compactação Proctor Normal, Solo.	107
Figura 5.11-Curva de compactação Proctor Normal, M1.	108
Figura 5.12-Curva de compactação Proctor Normal, M2.	109
Figura 5.13-Curva de compactação Proctor Normal, M3.	110
Figura 5.14-Curva de compactação Proctor Normal, Composto Orgânico.	111
Figura 5.15-Definição de pressão equivalente com pisoteamento para o solo.	112
Figura 5.16-Definição de pressão equivalente com pisoteamento para M1.	113
Figura 5.17-Definição de pressão equivalente com pisoteamento para M2.	113
Figura 5.18-Definição de pressão equivalente com pisoteamento para M3.	114
Figura 5.19-Corpo de prova deformado devido às elevadas pressões de pisoteamento.	115
Figura 5.20-Deformação do corpo de prova conseqüente da penetração do equipamento do compactador pneumático.	115
Figura 5.21-Vista superior do molde de pisoteamento com solo deformado devido às elevadas pressões de compactação.	116
Figura 5.22-Variação de volume <i>versus</i> tempo, ensaio de permeabilidade do solo com corpos de prova moldados por pisoteamento.	121
Figura 5.23-Coefficiente de permeabilidade <i>versus</i> tempo para corpos de prova de solo moldados com pisoteamento.	121
Figura 5.24-Variação de volume <i>versus</i> tempo, ensaio de permeabilidade do solo com corpos de prova moldados por Proctor Normal.	122
Figura 5.25-Coefficiente de permeabilidade <i>versus</i> tempo para corpos de prova de solo moldados com Proctor Normal.	122
Figura 5.26-Massa específica seca <i>versus</i> umidade de compactação, solo.	123
Figura 5.27-Índice de vazios <i>versus</i> umidade de compactação, solo.	123
Figura 5.28-Coefficiente de permeabilidade <i>versus</i> umidade de compactação, solo.	124
Figura 5.29-Variação de volume <i>versus</i> tempo, ensaio de permeabilidade da M1 com corpos de prova moldados por pisoteamento.	126
Figura 5.30-Coefficiente de permeabilidade <i>versus</i> tempo para corpos de prova da M1 moldados com pisoteamento.	127
Figura 5.31-Variação de volume <i>versus</i> tempo, ensaio de permeabilidade da M1 com corpos de prova moldados com Proctor Normal.	127
Figura 5.32-Coefficiente de permeabilidade <i>versus</i> tempo para corpos de prova da M1 moldados com Proctor Normal.	128

Figura 5.33-Massa específica seca <i>versus</i> umidade de compactação, M1.	128
Figura 5.34-Índice de vazios <i>versus</i> umidade de compactação, M1.	129
Figura 5.35-Coefficiente de permeabilidade <i>versus</i> umidade de compactação, M1.1	
Figura 5.36-Variação de volume <i>versus</i> tempo, ensaio de permeabilidade da M2 com corpos de prova moldados por pisoteamento.	131
Figura 5.37-Coefficiente de permeabilidade <i>versus</i> tempo para corpos de prova da M2 moldados com pisoteamento.	132
Figura 5.38-Variação de volume <i>versus</i> tempo, ensaio de permeabilidade da M2 com corpos de prova moldados por Proctor Normal.	132
Figura 5.39-Coefficiente de permeabilidade <i>versus</i> tempo para corpos de prova da M2 moldados com Proctor Normal.	133
Figura 5.40-Massa específica seca <i>versus</i> umidade de compactação, M2.	133
Figura 5.41-Índice de vazios <i>versus</i> umidade de compactação, M2.	134
Figura 5.42-Coefficiente de permeabilidade <i>versus</i> umidade de compactação, M2.1	
Figura 5.43-Variação de volume <i>versus</i> tempo, ensaio de permeabilidade da M3 com corpos de prova moldados por pisoteamento.	136
Figura 5.44-Coefficiente de permeabilidade <i>versus</i> tempo para corpos de prova da M3 moldados com pisoteamento.	137
Figura 5.45-Gráfico de variação de volume <i>versus</i> tempo mostrado a maior escala, ensaio de permeabilidade da M3 com corpos de prova moldados por pisoteamento.	137
Figura 5.46-Gráfico de coeficiente de permeabilidade <i>versus</i> tempo mostrado a maior escala para corpos de prova da M3 moldados com pisoteamento.	138
Figura 5.47-Variação de volume <i>versus</i> tempo, ensaio de permeabilidade da M3 com corpos de prova moldados por Proctor Normal.	138
Figura 5.48-Coefficiente de permeabilidade <i>versus</i> tempo para corpos de prova da M3 moldados com Proctor Normal.	139
Figura 5.49-Massa específica seca <i>versus</i> umidade de compactação, M3.	139
Figura 5.50-Índice de vazios <i>versus</i> umidade de compactação, M3.	140
Figura 5.51-Coefficiente de permeabilidade <i>versus</i> umidade de compactação, M3.1	
Figura 5.52-Massa específica seca <i>versus</i> umidade de compactação para o solo e as misturas M1, M2 e M3, compactadas nas umidades $w_{ot-3\%}$, w_{ot} e $w_{ot+3\%}$ com Proctor Normal e pisoteamento.	142
Figura 5.53-Índice de vazios <i>versus</i> umidade de compactação para o solo e as misturas M1, M2 e M3, compactadas nas umidades $w_{ot-3\%}$, w_{ot} e $w_{ot+3\%}$ com Proctor Normal e pisoteamento.	143

Figura 5.54-Coeficiente de permeabilidade *versus* umidade de compactação para o solo e as misturas M1, M2 e M3, compactadas nas umidades $w_{ot-3\%}$, w_{ot} e $w_{ot+3\%}$ com Proctor Normal e pisoteamento. 144

Figura I. 1 - Visão geral da estrutura da amostra de solo compactado por Proctor Normal na W_{ot} (Aumento:2,5x). 160

Figura I. 2 - Visão geral da estrutura da amostra da M3 compactada por Proctor Normal na W_{ot} (Aumento:2,0x). 161

Figura I. 3 - Visão geral da estrutura da amostra de solo compactada por pisoteamento na W_{ot} (Aumento:2,0x). 161

Figura I. 4 - Visão geral da estrutura da amostra da M3 compactada por pisoteamento na W_{ot} (Aumento: 2,0x). 162

Figura B.1-Permeômetros de parede flexível com carga constante aplicada por Mariottes. 167

Lista de tabelas

Tabela 2.1-Propriedades do solo para atingir uma condutividade hidráulica média menor ou igual que 1×10^{-7} cm/s.	28
Tabela 2.2-Influência do tamanho dos grumos na permeabilidade de argila compactada (Daniel, 1984).	47
Tabela 3.1-Proporção das misturas solo-composto orgânico.	67
Tabela 4.1-Resumo de ensaios de caracterização dos materiais em estudo.	69
Tabela 4.2 – Resumo do programa de ensaios, caracterização física.	70
Tabela 4.3-Altura dos corpos de prova (em centímetros) compactados por pisoteamento, utilizados nos ensaios de permeabilidade.	88
Tabela 4.4-Altura dos corpos de prova compactados por Proctor Normal, utilizados nos ensaios de permeabilidade.	88
Tabela 4.5-Ensaio de permeabilidade executados.	93
Tabela 4.6-Denominação dada aos diferentes ensaios de permeabilidade.	94
Tabela 5.1-Resumo das características granulométricas dos materiais.	96
Tabela 5.2-Valores de Gs obtidos experimentalmente	97
Tabela 5.3-Limites de consistência, índice de plasticidade e atividade.	98
Tabela 5.4-Análise mineralógica do solo (Sertã, 1986).	102
Tabela 5.5-Análises químicas de capacidade de troca catiônica (CTC) e de ataque sulfúrico (Duarte, 2004).	103
Tabela 5.6-Análise química total em porcentagem em peso (Sertã, 1986).	103
Tabela 5.7-Teor de matéria orgânica do composto utilizado nas misturas.	104
Tabela 5.8-Propriedades do solo quando compactado com Proctor Normal.	107
Tabela 5.9-Propriedades da M1 quando compactada com Proctor Normal.	108
Tabela 5.10-Propriedades da M2 quando compactada com Proctor Normal.	109
Tabela 5.11-Propriedades da M3 quando compactada com Proctor Normal.	110
Tabela 5.12-Propriedades do Composto Orgânico quando compactado com Proctor Normal.	111
Tabela 5.13-Pressão equivalente para as umidades $W_{ot-3\%}$, W_{ot} e $W_{ot+3\%}$ com as respectivas massas específicas secas.	114

Tabela 5.14-Características iniciais dos corpos de prova do solo para ensaios de permeabilidade.	120
Tabela 5.15-Condições e resultados dos ensaios de permeabilidade no solo.	126
Tabela 5.16-Características iniciais dos corpos de prova de M1 para ensaios de permeabilidade.	126
Tabela 5.17-Condições e resultados dos ensaios de permeabilidade, M1.	126
Tabela 5.18-Características iniciais dos corpos de prova de M2 para ensaios de permeabilidade.	130
Tabela 5.19-Condições e resultados dos ensaios de permeabilidade, M2.	131
Tabela 5.20-Características iniciais dos corpos de prova de M3 para ensaios de permeabilidade.	136
Tabela 5.21-Condições e resultados dos ensaios de permeabilidade, M3.	136
Tabela A. 1-Classificação e características dos insumos orgânicos analisados conforme metodologia adotada pelo Ministério da Agricultura (LANARV, 1988).	164
Tabela A. 2-Características químicas do composto orgânico obtido a partir de resíduos da manutenção de gramados em áreas urbanas.	165
Tabela A. 3-Teores de ácidos húmicos (AH), fúlvicos(AF) e extrato húmico total (EHT) do extrato de ácidos húmicos dos insumos orgânicos analisados.	165