

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MACIÇOS
SANITÁRIOS E PROPOSTA DE UM NOVO MODELO
DE PREVISÃO DE RECALQUES CONSIDERANDO A
PARCELA DE BIODEGRADAÇÃO**

WILBER FELICIANO CHAMBI TAPAHUASCO

ORIENTADOR: Prof. PEDRO MURRIETA SANTOS NETO, DSc.

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.T.D. – 061/09

BRASÍLIA / DF: SETEMBRO/2009

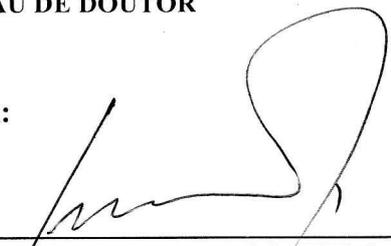
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MACIÇOS
SANITÁRIOS E PROPOSTA DE UM NOVO MODELO DE
PREVISÃO DE RECALQUES CONSIDERANDO A PARCELA
DE BIODEGRADAÇÃO**

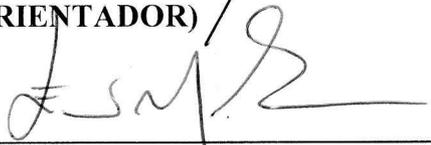
WILBER FELICIANO CHAMBI TAPAHUASCO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR

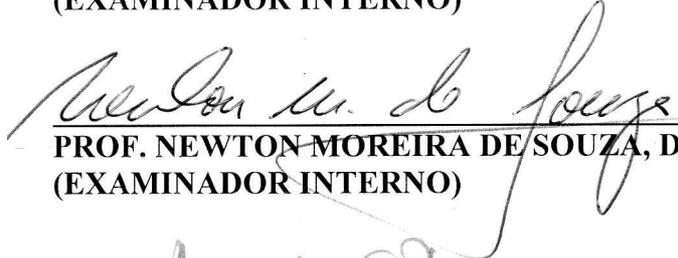
APROVADA POR:



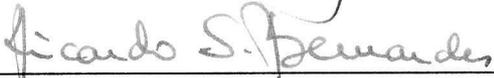
PROF. PEDRO MURRIETA SANTOS NETO, DSc. (UnB)
(ORIENTADOR)



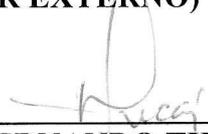
PROF. ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)



PROF. NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)



PROF. RICARDO SILVEIRA BERNARDES, PhD (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)



PROF. JOSÉ FERNANDO THOMÉ JUCÁ, DSc (UFPE)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 29 DE SETEMBRO DE 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA

TAPAHUASCO, WILBER FELICIANO CHAMBI

Análise do Comportamento de Maciços Sanitários e Proposta de um Modelo de Previsão de Recalques Considerando a Parcela da Biodegradação [Distrito Federal] 2009

xxiii, 161 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2009)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil

1. Maciços Sanitários

2. Recalques

3. Resíduos Sólidos Urbanos

4. Compressibilidade

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TAPAHUASCO, W.C. (2009). Análise do Comportamento de Maciços Sanitários e Proposta de um Modelo de Previsão de Recalques Considerando a Parcela da Biodegradação. Tese de Doutorado, Publicação G.T.D-061/09, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Análise do Comportamento de Maciços Sanitários e Proposta de um Modelo de Previsão de Recalques Considerando a Parcela da Biodegradação

GRAU / ANO: Doutor / 2009

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco
Rua 8 de Setiembre Nº 1884, La Natividad
Tacna - Tacna/Tacna - Peru

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho
a Deus e a minha
família.*

AGRADECIMENTOS

Especialmente, agradecer ao prof. Pedro Murrieta Santos Neto, pelos ensinamentos, apoio, e confiança irrestrita que me foi dada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de doutorado.

À Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos – FINATEC, pelo apoio financeiro que permitiu o desenvolvimento de parte da pesquisa experimental deste trabalho.

Ao Programa de Pós Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília pela infraestrutura acadêmica disponibilizada.

Aos professores da Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília pelos ensinamentos ministrados no curso.

A meus Colegas de turma e demais colegas do Programa de Pós-Graduação.

As pessoas queridas que me apoiaram e estiveram comigo durante esta etapa da minha vida

RESUMO

Atualmente o entendimento do comportamento mecânico dos maciços sanitários segue sendo um tema complexo que ainda depende de muito estudo. Por isto, com a finalidade de contribuir para a compreensão do comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos foi desenvolvida esta pesquisa de doutorado.

Este trabalho foi realizado com o objetivo principal de desenvolver um novo modelo de previsão de recalques para maciços sanitários levando em consideração a parcela da biodegradação dos resíduos sólidos urbanos. Para isso, foram executados ensaios de compressão confinada de resíduos sólidos numa célula de grandes dimensões. Também, foram construídos e monitorados 4 células e 2 lisímetros experimentais.

Os resultados dos ensaios de compressão confinada permitiram conhecer e entender melhor o comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos, sob a influência de um carregamento. Além disso, foi possível quantificar a influencia do teor orgânico nos parâmetros de compressibilidade.

O monitoramento e análise dos resultados das células e lisímetros experimentais, permitiram conhecer os fatores e mecanismos que controlam o desenvolvimento dos recalques em maciços sanitários ao longo do tempo.

A partir das análises dos resultados, tanto dos ensaios de compressão confinada como das células e lisímetros experimentais, foi possível desenvolver um novo modelo de previsão de deformações para maciços sanitários. Finalmente, verificou-se que a aplicação deste novo modelo é satisfatória na simulação de deformações em maciços sanitários.

ABSTRACT

Currently, the understanding of the mechanical behavior in landfills, keeps on being a complex subject, which still depends on more studies. Therefore, this research was developed to contribute to the understanding on the mechanical behavior of the urban solid waste.

This work was carried out with the objective at developing a new model of settlement prediction for landfills, but considering the biological degradation of the waste. For this, confined compression tests on domestic solid waste in a great dimension edometric cell were executed. Also, four landfills experimental cells and two lisimeters were constructed and monitored.

The results of the confined compression tests allowed to know and to understand better the mechanical behavior of domestic solid waste. Moreover, it was measured the influence of organic material in the compressibility parameters.

The monitoring and analysis of the landfills experimental cells and lisimeters results allowed to know the factors and mechanisms that control the settlement development in landfill with time.

From the results of the confined compression tests and field experiments it, was possible to develop a new model for settlement estimate for landfills. Finally, it was verified that the application of this new model is satisfactory for settlement prediction.

ÍNDICE

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO	01
1.1. CONTEXTO GERAL	01
1.2. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	02
1.3. OBJETIVOS	02
1.3.1. OBJETIVO GERAL	02
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	02
1.4. SINOPSE DO TRABALHO	03
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1. CONCEITO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E ATERROS SANITÁRIO	04
2.1.1. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	04
2.1.2. ATERROS SANITÁRIOS	05
2.1.2.1. COMPONENTES BÁSICOS DE PROJETO PARA INSTALAÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO	06
a) Sistema de tratamento do fundo da base do aterro	06
b) Sistema de drenagem dos líquidos percolados	07
c) Sistema de drenagem de gases	07
d) Sistemas de camadas de coberturas	08
2.2. IMPORTÂNCIA E MONITORAMENTO DAS PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DISPOSTOS EM ATERROS SANITÁRIOS	09
2.2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS	09
2.2.1.1. COMPOSIÇÃO FÍSICA	10
2.2.1.2. TAMANHO E FORMA DAS PARTÍCULAS DE RSU	13
2.2.1.3. PESO ESPECÍFICO DOS RSU (MASSA ESPECÍFICA)	16
2.2.1.4. TEOR DE UMIDADE DOS RSU	19
2.2.1.5. CAPACIDADE DE CAMPO E PRODUÇÃO DE LÍQUIDOS PERCOLADOS	22

2.2.1.6. PERMEABILIDADE	25
2.2.1.7. TEMPERATURA	27
2.2.2. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	29
2.2.2.1. POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH)	29
2.2.2.2. POTENCIAL OXIRREDUÇÃO (EH)	30
2.2.2.3. SÓLIDOS TOTAIS E SÓLIDOS TOTAIS VOLÁTEIS (ST, STV)	31
2.2.2.4. DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO)	32
2.2.3. PROPRIEDADES DE BIODEGRADABILIDADE DOS RSU	33
2.2.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS RSU	33
2.2.4.1. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	33
2.2.4.2. COMPRESSIBILIDADE	34
2.3. BIODEGRADABILIDADE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DISPOSTOS EM ATERROS SANITÁRIOS	34
2.3.1. PROCESSOS DE DECOMPOSIÇÃO DOS RSU	35
2.3.2. FATORES QUE INFLUEM NOS PROCESSOS DE DECOMPOSIÇÃO DOS RSU	37
2.4. COMPRESSIBILIDADE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E RECALQUES EM ATERROS SANITÁRIOS	39
2.4.1. GENERALIDADES	39
2.4.2. MECANISMOS QUE GOVERNAM OS RECALQUES	40
2.4.3. FATORES QUE AFETAM A MAGNITUDE E TAXAS DE RECALQUES	41
2.4.4. ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA EM RSU	42
2.4.5. MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES	49
2.4.5.1. MODELOS TRADICIONAIS	49
a) Modelo de Sowers (1979)	49
b) Modelo de Bjarngard & Edgers (1990)	50
c) Modelo hiperbólico de Ling et al. (1998)	51
2.4.5.2. MODELOS CONVENCIONAIS	52
a) Modelo Meruelo (1995)	52
b) Modelo de Park & Lee (modificado 2002)	53
c) Modelo Biológico de Edgers et al. (1992)	54
2.5. EXPERIÊNCIA NO MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DOS RECALQUES AO LONGO DO TEMPO EM ATERROS SIMULADOS	56

3. METODOLOGIA EMPREGADA	59
3.1. CONCEPÇÃO DO MODELO BASE A SER REFORMULADO	60
3.2. EXECUÇÃO DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA	61
3.2.1. ACOMPANHAMENTO FÍSICO-QUÍMICO E PRODUÇÃO DE LIXIVIADOS	64
3.3. CONSTRUÇÃO DE CÉLULAS EXPERIMENTAIS EM CAMPO	64
3.3.1. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS UTILIZADOS	69
3.3.2. CARACTERÍSTICAS DO TERRENO NATURAL E MATERIAIS DE COBERTURA	69
3.4. CONSTRUÇÃO DE LISÍMETROS EXPERIMENTAIS	70
3.4.1. ETAPA DE DESENHO E CONSTRUÇÃO DOS LISÍMETROS	71
3.4.2. ETAPA DE PREENCHIMENTO E INSTRUMENTAÇÃO DOS LISÍMETROS	74
3.4.3. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS UTILIZADOS NOS LISÍMETROS EXPERIMENTAIS	75
3.4.4. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DE SOLOS UTILIZADOS NAS CAMADAS DE BASE E COBERTURA	76
3.5. METODOLOGIA UTILIZADA NO MONITORAMENTO DAS CÉLULAS E LISÍMETROS EXPERIMENTAIS	78
3.5.1. MONITORAMENTO DOS RECALQUES	78
3.5.2. MONITORAMENTO DAS PRECIPITAÇÕES E VOLUME DE LIXIVIADOS PRODUZIDOS	79
3.5.3. MONITORAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS ATERRADOS	79
3.5.3.1. MONITORAMENTO DA TEMPERATURA	79
3.5.3.2. METODOLOGIA DE AMOSTRAGEM E ANÁLISE DOS RSU	80
3.5.4. MONITORAMENTO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS LÍQUIDOS LIXIVIADOS	81
4. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS	84
4.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA	84
4.2. RESULTADOS DO MONITORAMENTO DAS CÉLULAS E LISÍMETROS EXPERIMENTAIS	92
4.2.1. RECALQUES	92
4.2.2. PRECIPITAÇÕES E VOLUME DE LIXIVIADOS PRODUZIDOS	92

4.2.3. TEMPERATURAS REGISTRADAS NO INTERIOR DOS RSU	94
4.2.4. TEORES DE UMIDADE REGISTRADOS NOS RSU	95
4.2.5. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS RSU COLETADOS	96
4.2.6. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS LIXIVIADOS PRODUZIDOS	97
5. ANÁLISE E CORRELAÇÕES DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	102
5.1. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE COMPRESSIBILIDADE MECÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	102
5.1.2. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA CURVA DEFORMAÇÃO <i>VERSUS</i> O LOGARITMO DO TEMPO EM RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	103
5.1.2.1. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE COMPRESSÃO DA 2ª FASE DE DEFORMAÇÃO (C'_s)	106
5.1.2.2. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE COMPRESSÃO DA 1ª FASE DE DEFORMAÇÃO (C'_c)	109
5.2. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS RECALQUES SOB INFLUENCIA DA VARIABILIDADE DO TEOR DE UMIDADE NOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	111
5.3. CORRELAÇÃO ENTRE AS DEFORMAÇÕES VERTICAIS E A BIOESTABILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	114
a) Lisímetro LS-01	114
b) Lisímetro LS-02	118
c) Células experimentais CEL-02 e CEL-03	121
d) Células experimentais CEL-01 e CEL-04	123
e) Caso aplicativo ao lisímetro de Alcântara (2007)	126
6. PROPOSTA DE MODELO DE PREVISÃO DE RECALQUES	128
6.1. REFORMULAÇÃO DO MODELO BASE DE BJARNGARD & EDGERS E PROPOSTA DE UM NOVO MODELO DE PREVISÃO DE RECALQUES	128
6.1.1. VALIDAÇÃO DAS PARCELAS MECÂNICAS DO MODELO BASE DE BJARNGARD & EDGERS	128

6.1.2. PROPOSTA DA NOVA EQUAÇÃO PARA RECALQUES SOB INFLUENCIA ABSOLUTA DA BIODEGRADAÇÃO	130
6.1.3. NOVO MODELO ACOPLADO PARA PREVISÃO DE RECALQUES	132
6.2. APLICAÇÃO PRÁTICA DA NOVA FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DESENVOLVIDA	134
6.2.1. CASO APLICATIVO LISÍMETRO LS-01	134
6.2.2. CASO APLICATIVO NO LISÍMETRO EXPERIMENTAL (L1) DE ALCÂNTARA	137
6.2.3. CASO APLICATIVO LISÍMETRO LS-02	139
6.2.4. CASO APLICATIVO NAS CÉLULAS EXPERIMENTAIS CEL-01 E CEL-04	141
6.2.5. CASO APLICATIVO NAS CÉLULAS EXPERIMENTAIS CEL-02 E CEL-03	143
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	146
7.1. CONCLUSÕES	146
7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	151
BIBLIOGRAFIA	152

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Página
2.1 – Composição gravimétrica de resíduos sólidos urbanos em cidades do Brasil, em % peso úmido	11
2.2 – Composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Recife, realizado em condições naturais e expresso em % (Fonte Mariano et al., 2007)	12
2.3 – Distribuição granulométrica para os RSU da cidade de Brasília	15
2.4 – Classificação morfológica dos RSU (DGGT, 1994 apud Boscov, 2008)	15
2.5 – Determinação do peso específico de alguns constituintes de RSU (McDouglall et al., 2004)	18
2.6 – Valores típicos de capacidade de campo de RSU em aterros sanitários (Vaidya, 2002)	22
2.7 – Valores de coeficiente de permeabilidade dos RSU	27
2.8 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU (fonte Boscov, 2008)	34
2.9 – Hipóteses básicas da teoria clássica de Terzaghi e sua aplicabilidade em maciços de resíduos sólidos (modificado de El-fadel & Khoury, 2000)	45
2.10a – Dados coletados de ensaios de compressão confinada em resíduos sólidos Urbanos	46
2.10b – Dados coletados de ensaios de compressão confinada em resíduos sólidos Urbanos	47
2.10c – Dados coletados de ensaios de compressão confinada em resíduos sólidos Urbanos	48
3.1 – Propriedades físicas das amostras antes e depois de cada ensaio de compressão confinada	64
3.2- propriedades físicas dos resíduos sólidos dispostos nas células experimentais	69
3.3- Caracterização geotécnica do solo in-situ da área de pesquisa	69
3.4- Carregamentos aplicados devido às camadas de coberturas (Células experimentais)	70
3.5- Principais propriedades dos resíduos sólidos utilizados nos lisímetros	76
3.6- Propriedades dos solos utilizados nas camadas base e cobertura dos lisímetros	76

4.1 – Coeficientes de compressão (C'_c) e expansão (C'_e) de RSU	86
4.2 – Coeficientes de compressão (C'_s) do segundo trecho de deformação, ensaios edométricos	91
5.1- Valores registrados de coeficientes de compressão da 2ª fase de deformação (C'_s)	106
5.2- Valores de coeficientes de compressão primária (C'_c) determinados a partir de ensaios edométricos de grandes dimensões	110
6.1- Parâmetros de para estimativa das deformações da 2ª fase de deformação vertical (lisímetro LS-01, camada fina)	135
6.2- Parâmetros para estimativa das deformações da 3ª fase de deformação vertical (lisímetro LS-01, camada fina)	136
6.3- Parâmetros para estimativa das deformações da 2ª e 3ª fase de deformação vertical (lisímetro L1, fonte Alcântara 2007)	138
6.4- Parâmetros de para estimativa das deformações da 3ª fase de deformação vertical (lisímetro LS-02, camada granular)	140
6.5- Parâmetros de para estimativa das deformações verticais usando a Equação 6,17 (CEL-01 e CEL-04, camada granular)	141
6.6- Parâmetros de para estimativa das deformações verticais usando a Equação 6,20 (CEL-01 e CEL-04, camada granular)	142
6.7- Parâmetros de para estimativa das deformações verticais usando a Equação 6,17 (CEL-02 e CEL-03)	143
6.8- Parâmetros de para estimativa das deformações verticais usando a Equação 6,20 (CEL-02 e CEL-03)	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 – Exemplo de tratamento e impermeabilização do fundo da base de um Aterro (Modificado de Palma, 1995)	06
2.2 – Disposição de um sistema de drenagem para líquidos percolados numa célula de aterro sanitário (IPT, 1998)	07
2.3 – Dreno de gás executado em tubo de concreto perfurado, envolto em brita (Bidone e Povinelli, 1999)	08
2.4 – Sistemas de coberturas em aterros sanitários: a) cobertura diária utilizando lonas impermeabilizantes; b) cobertura definitiva	09
2.5 – Curvas granulométricas obtidas para um resíduo novo e com 4 anos (Fonte: Nascimento, 2007)	14
2.6 – Amostragem via tradagem no aterro municipal, cidade de Wolfsburg –Alemanha, (Naranjo, 2004)	16
2.7 – Teor de umidade em função da massa amostra e da temperatura de secagem (Lange et al., 2002)	20
2.8 – Teor de umidades medidos com a profundidade para resíduos sólidos em Lyndhurst (Yuen, 1999 apud McDougall et al., 2004)	21
2.9 – Variação da capacidade de campo com o tempo (fonte: Carvalho 2002)	23
2.10 – Percâmetro desenvolvido por Carvalho (2002)	24
2.11 – Permeabilidade relativa esquemática no que diz respeito à saturação fluida (Warrick, 2002 apud Stoltz & Gourc, 2007)	26
2.12 – Classificação dos microorganismos em função da temperatura de crescimento (Madigam et al, 2002 apud Alcântara 2007)	28
2.13 – Variação do teor de sólidos totais voláteis com a idade dos resíduos aterrados (Silva et al., 1998)	32
2.14 –Variação na composição do lixiviado de aterros sanitários (Cotrim, 1997)	37
2.15 – a) Determinação do índice de compressão primária (C_c) b) Determinação do índice de compressão secundária (C_a)	43
2.16 – a) Determinação do coeficiente de compressão primária (C'_c) b) Determinação do coeficiente de compressão secundária (C'_a)	43

2.17 – Consolidômetro de grandes dimensões utilizado nos ensaios de compressão confinada (Nascimento, 2007)	44
2.18 – Modelo de recalque proposto por Bjarngard & Edgers (Marques, 2001)	51
2.19a – Estimativa da curva de <i>creep</i> para a equação 10 (Edgers et al 1992)	55
2.19b – Curva típica de crescimento de bactérias (Edgers et al 1992)	55
2.20 – Detalhe construtivo das células experimentais (Santos, 2004)	57
2.21 – Célula de cobertura granular especificando as 3 fases de recalques (Santos, 2004)	57
2.22 – Deformação vs. Logaritmo do tempo, célula experimental (Tapahuasco, 2005)	58
3.1- Representação esquemática do modelo base a ser reformulado	59
3.2 – Esquema da célula edométrica (modificado de Tapahuasco, 2005)	61
3.3 – Proporção gravimétrica dos RSU (5º ensaio de compressão confinada)	62
3.4 - Sistema de compressão confinada uniaxial para resíduos sólidos urbanos	63
3.5 – Imagem 2007 Digital Globe “Google”, Remarcando a área do aterro do Jockey Clube/DF	65
3.6 - Esquema gráfico, mostrando os detalhes construtivos das células experimentais	66
3.7- Vista panorâmica de duas células experimentais (etapa escavação)	66
3.8 – Sistema de impermeabilização e drenagem de lixiviados da célula experimental	67
3.9 – Vista interior da célula experimental no início do enchimento do RSU	67
3.10 - Croqui das placas de recalques utilizada nas células experimentais	68
3.11 – Células experimentais de aterro sanitário	68
3.12 – Curva granulométrica do solo característico da área de pesquisa (aterro Jockey Clube)	70
3.13- Esquema gráfico, mostrando os detalhes construtivos dos lisímetros experimentais	71
3.14 – Etapa construção dos lisímetros experimentais	73
3.15 – Disposição do lixo no lisímetro experimental	74
3.16 - Esquema gráfico, mostrando os detalhes construtivos dos lisímetros experimentais	75
3.17 - Vista do lisímetro LS-01 mostrando a camada de cobertura fina	77
3.18 - Vista do lisímetro LS-02 mostrando a camada de cobertura granular	77
3.19 - Medida e leitura do recalque na Célula CEL-01	78
3.20 - Pluviógrafo RG3-M	79
3.21 – Instrumentação para o controle da temperatura nos lisímetros	80

3.22 – Processo de amostragem de RSU via tradagem (lisímetro experimental)	81
3.23 – Mufla utilizada para calcinação das amostras de RSU e lixiviados	82
3.24 – Aparelho DR/2010 spectrophotometer handbook (leitura de DQO)	83
3.25 – Aparelho medidor digital MpH-1200, leituras de pH e Eh	83
4.1 – Curva deformação vs. Logaritmo da tensão, obtida para primeira amostra de RSU, com teor de material orgânico de 16,23%	84
4.2 – Curva deformação vs. Logaritmo da tensão, obtida para segunda amostra de RSU, com teor de material orgânico de 52,60%	85
4.3 – Curva deformação vs. Logaritmo da tensão, obtida para terceira amostra de RSU, com teor de material orgânico de 100,00%	85
4.4 – Curva deformação vs. Logaritmo da tensão, obtida para quarta amostra de RSU, com teor de material orgânico de 37,62%	85
4.5 – Curva deformação vs. Logaritmo da tensão, obtida para quinta amostra de RSU, com teor de material orgânico de 20,76%	86
4.6 – Curvas deformação vs. Log. do tempo (primeiro ensaio, 16,23% orgânico)	87
4.7 – Curvas deformação vs. Log. do tempo (segundo ensaio, 52,60% orgânico)	87
4.8 – Curvas deformação vs. Log. do tempo (terceiro ensaio, 100% orgânico)	88
4.9 – Curvas deformação e produção de lixiviado em função do Log. do tempo (quarto ensaio, 37,62% orgânico)	89
4.10 – Curvas deformação e produção de lixiviado em função do Log. do tempo (quinto ensaio, 20,76% orgânico)	89
4.11 – Gráfico comparativo entre as deformações registradas no extensômetro e os parâmetros físico-químicos (quarto ensaio, 37,62% orgânico)	90
4.12 – Gráfico comparativo entre as deformações registradas no extensômetro e os parâmetros físico-químicos (quinto ensaio, 20,76% orgânico)	90
4.13 – Valores de pH monitorados nos ensaios edométricos (quarto e quinto ensaio)	91
4.14 – Recalques relativos registrados nas células experimentais	92
4.15 – Recalques relativos registrados nos lisímetros experimentais	92
4.16 – Monitoramento de precipitações e produção de lixiviados (CEL-01 e CEL-02)	93
4.17 – Monitoramento de precipitações e produção de lixiviados (CEL-03 e CEL-04)	93
4.18 – Monitoramento de precipitações e produção de lixiviados (LS-01)	93
4.19 – Monitoramento de precipitações e produção de lixiviados (LS-02)	94
4.20 – Valores de temperatura no RSU registrados no LS-01	94

4.21 – Valores de temperatura no RSU registrados no LS-02	95
4.22 – Valores de umidade no RSU registrados no LS-01 e LS-02	95
4.23 – Valores de sólidos totais voláteis (STV) e potencial hidrogenionico (pH), Lisímetro LS-01	96
4.24 – Valores de sólidos totais voláteis (STV) e potencial hidrogenionico (pH), Lisímetro LS-02	96
4.25 – Propriedades físico-químicas do lixiviado – Lisímetro LS-01	97
4.26 – Valores monitorados de pH e Eh no lixiviado – Lisímetro LS-01	98
4.27 – Propriedades físico-químicas do lixiviado – Lisímetro LS-02	98
4.28 – Valores monitorados de pH e Eh no lixiviado – Lisímetro LS-02	98
4.29 – Propriedades físico-químicas do lixiviado – Célula CE-01	99
4.30 – Propriedades físico-químicas do lixiviado – Célula CE-02	99
4.31 – Propriedades físico-químicas do lixiviado – Célula CE-03	99
4.32 – Propriedades físico-químicas do lixiviado – Célula CE-04	100
5.1 - Comportamento das deformações nas amostras ensaiadas de resíduos sólidos (Carga aplicada 100 kPa)	102
5.2 - Comportamento típico das deformações em função do logaritmo do tempo, para ensaios de compressão confinada em resíduos sólidos urbanos (carga 100 kPa)	104
5.3 – Correlação gráfica entre a curva de deformação, curva de produção de chorume drenado, curva de ST, curva de STV e curva de pH (quarto ensaio edométrico, 37,62% de teor orgânico)	105
5.4 - Relação C'_s vs. % <i>material orgânico</i> (resíduos sólidos urbanos, condição peso úmido)	108
5.5 - Relação C'_s vs. % <i>material orgânico</i> (resíduos sólidos urbanos, condição peso seco)	108
5.6 - Curva típica de deformação (índice de vazios) vs. tensão em RSU: a) primeiro ensaio; b) Resultado apresentado por Carvalho (1999)	110
5.7 - Comportamento em função do tempo das curvas de precipitação, produção chorume, umidade e taxas de deformação (lisímetro LS-02, camada granular)	112
5.8 - Comportamento Físico-químicos e mecânico dos resíduos em função do tempo (lisímetro LS-01, camada fina)	115
5.9 - Curva de ε vs $\log t$ (lisímetro LS-01, camada fina)	117

5.10 - Medidas físico-químicas e mecânicas no LS-02 (camada granular)	119
5.11 - Curva de ε vs $\log t$ (lisímetro LS-02, camada granular)	121
5.12- Medidas Físico-químicas na CEL-02 (camada tradicional de solo fino)	121
5.13 - Medidas Físico-químicas na CEL-03 (camada tradicional de solo fino)	122
5.14 - Curva de ε_v vs $\log t$ (CEL-02 e CEL-03)	122
5.15- Medidas Físico-químicas na CEL-01 (camada granular)	124
5.16 - Medidas Físico-químicas na CEL-04 (camada granular)	124
5.17 - Curva de ε_v vs $\log t$ (CEL-01 e CEL-04)	124
5.18 - Medidas Físico-químicas no L1 (modificado de Alcântara 2007)	126
5.19 - Curva de ε_v vs $\log t$ (L1, modificado de Alcântara 2007)	126
6.1 - Curva de ε vs $\log t$ (lisímetro LS-01, camada fina)	135
6.2 - Correlação entre as deformações registradas e estimadas, 2ª fase de deformação (modelo acoplado, LS-01)	136
6.3 - Correlação entre as deformações registradas e estimadas, 3ª fase de deformação (modelo acoplado, LS-01)	137
6.4 - Correlação entre as deformações registradas e estimadas globais (modelo acoplado, LS-01)	137
6.5 - Correlação entre as deformações registradas e estimadas, 2ª fase de deformação (modelo acoplado, lisímetro L1 de Alcântara 2007)	138
6.6 - Correlação entre as deformações registradas e estimadas, 3ª fase de deformação (modelo acoplado, lisímetro L1 de Alcântara 2007)	139
6.7 - Correlação entre as deformações registradas e estimadas globais (modelo acoplado, lisímetro L1 de Alcântara 2007)	139
6.8 - Correlação entre as deformações registradas e estimadas, 3ª fase de deformação (modelo acoplado, LS-02)	140
6.9 - Correlação entre as deformações registradas e as deformações estimadas usando a Equação 6,17 (CEL-01 e CEL-04, camada granular)	141
6.10 - Correlação entre as deformações registradas e as deformações estimadas usando a Equação 6,20 (CEL-01 e CEL-04, camada granular)	142
6.11 - Correlação entre as deformações registradas e as deformações estimadas usando a Equação 6,17 (CEL-02 e CEL-03, camada granular)	143
6.12 - Correlação entre as deformações registradas e as deformações estimadas	

usando a Equação 6,20 (CEL-02)	144
6.13 - Correlação entre as deformações registradas e as deformações estimadas usando a Equação 6,20 (CEL-03)	145
6.14 - Correlação entre as deformações registradas e as deformações estimadas usando as Equações 6.17 e 6,20 (CEL-03)	145

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

AGVs	Ácidos graxos voláteis;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ASTM	American Society of testing of materials;
CEL-01	Célula experimental N° 01;
CEL-02	Célula experimental N° 02;
CEL-03	Célula experimental N° 03;
CEL-04	Célula experimental N° 04;
COD	Conteúdo de matéria orgânica biodegradável;
C_c	Índice de compressão primária;
C'_c	Coeficiente de compressão primária;
C''_c	Coeficiente de compressão da primeira fase de deformação;
C_a	Índice de compressão secundária;
C'_a	Coeficiente de compressão secundária;
C'_s	Coeficiente de compressão da segunda fase de deformação;
C'_{s1}	Coeficiente de compressão secundária intermediária;
C'_{s2}	Coeficiente de compressão secundária ao longo do tempo;
CH₄	Metano;
CO₂	Dióxido de carbono;
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio;
DQO	Demanda química de oxigênio;
E_h	Potencial oxirredução;
E_s	Modulo de elasticidade;
e_o	Relação de índice de vazios;
H₀ ou H	Espessura inicial da camada do lixo;
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatístico;
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas;
k_h	Coeficiente de hidrólise;
k'	Constante de degradação cinética da primeira ordem (t^{-1})
LS-01	Lisímetro experimental N° 1;
LS-02	Lisímetro experimental N° 2;
m	Taxa de recalque;

M_w	Massa da água;
M_s	Massa seca dos resíduos sólidos;
$M_{org.-nat}$	Massa orgânica natural biodegradável ainda não decomposta;
$M_{org.-nat.[t]}$	Massa orgânica natural biodegradável ainda não decomposta no tempo “ t ”
NBR	Norma Brasileira;
P ou σ	Pressão (tensão);
\bar{P}_o	Tensão efetiva vertical média inicial;
pH	Potencial Hidrogeniônico;
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos;
r	Coefficiente de correlação;
S_i	Recalque devido à compressão inicial;
S_P	Recalque ao final da compressão primária;
S_s	Recalque;
ST	Sólidos totais;
STV	Sólidos totais voláteis;
t	Tempo;
t_0	Idade do aterro ao início das medições;
t_1	Tempo inicial da consolidação secundária;
t_2	Tempo de estimação dos recalques;
$t(1)$	Tempo (dias) para completar a compressão inicial;
$t(2)$	Tempo (dias) para completar a compressão intermediária;
$t(3)$	Período do tempo (dias) para previsão de recalque;
T_c ou t_c	Tempo de construção do aterro;
t_k	Tempo de início da bioconversão das massas;
w_d	Umidade gravimétrica base seca;
w_w	Umidade gravimétrica base úmida;
Δq	Incremento de carga vertical sobre o maciço;
\emptyset	Diâmetro;
θ	Umidade volumétrica;
σ_{vo}	Pressão vertical inicial (tensão);
$\Delta\sigma_v$	Acréscimo de pressão vertical (tensão);

ε	Deformação específica;
ΔH ou ΔS_s	Recalque medido entre dois intervalos de tempo;
ΔH_{ult}	Recalque último esperado (tempo infinito);
ρ_o	Taxa de recalque inicial;
α	Coeficiente de perda de massa transformada em recalques;