



Campus de São Carlos

**COMPACTAÇÃO E
COMPRESSIBILIDADE DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS**

VOL. II

AUTOR: AFONSO CELSO MORUZZI MARQUES

ORIENTADOR: PROF. DR. ORENCIO MONJE VILAR

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

**COMPACTAÇÃO E
COMPRESSIBILIDADE DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS**

VOLUME 2

AFONSO CELSO MORUZZI MARQUES

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Doutor em Geotecnia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar

São Carlos

2001

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

M357c Marques, Afonso Celso Moruzzi
Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos
urbanos / Afonso Celso Moruzzi Marques. -- São Carlos,
2001.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.

Área : Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar.

1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Aterros sanitários.
3. Compactação. 4. Peso específico. 5. Recalque. 6.
Compressibilidade. 7. Modelos reológicos. I. Título.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	xv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xx
VOLUME 1	
<i>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</i>	1
1.1 Articulação Organizacional para Viabilização do Experimento.....	3
1.2 Estruturação do Trabalho.....	5
<i>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES</i>	7
2.1 Biodegradação dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	8
2.1.1 Geração e Características do Biogás.....	8
2.1.2 Geração e Características dos Líquidos Percolados.....	12
2.2 Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	20
2.2.1 Amostragem e Investigações In Situ.....	21
2.2.2 Propriedades Físicas.....	23
2.2.3 Propriedades Mecânicas.....	38
2.3 Estudos e Modelos propostos para Avaliação de Recalques de Aterros Sanitários.....	62
2.3.1 Modelo de SOWERS (1973).....	64
2.3.2 Modelo de YEN & SCANLON (1975).....	65
2.3.3 Estudo de EDIL et al. (1989, 1990) baseado no Modelo de GIBSON & LO (1961).....	66
2.3.4 Modelo de EDIL et al. baseado em Função de Potência (1990).....	68
2.3.5 Modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990).....	68
2.3.6 Modelo de EDGERS et al. baseado na “Rate Process Theory” (1992).....	69
2.3.7 Estudo de COUMOULOS & KORYALOS (1997, 1999).....	71
2.3.8 Estudo de LING et al. baseada em Função Logarítmica e Hiperbólica (1998).....	72
2.3.9 Outros Modelos e Propostas.....	73
2.4 Melhoria e Recuperação de Aterros Sanitários.....	80
2.4.1 Técnicas de Minimização Prévia.....	80
2.4.2 Técnicas de Melhoria das Propriedades dos Resíduos.....	82
2.4.3 Recuperação e Mineração de Aterros Sanitários.....	103

CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO E EXECUÇÃO DE ATERRO

EXPERIMENTAL	104
3.1 Arranjo Geral do Experimento.....	105
3.1.1 Zoneamento do Aterro.....	106
3.1.2 Definição da Sequência Construtiva	110
3.2 Preparação da Área.....	111
3.2.1 Relocação dos Dispositivos de Drenagem Existentes.....	111
3.2.2 Execução de Aterro de Regularização.....	114
3.2.3 Tratamento e Impermeabilização da Fundação.....	116
3.2.4 Execução do Sistema de Drenagem de Gases e Líquidos Percolados.....	117
3.2.5 Instalação da Instrumentação.....	120
3.2.6 Execução do Recobrimento Final e Sistema de Drenagem Superficial.....	122
3.2.7 Execução de Acessos e Obras Complementares.....	124
3.3 Descrição dos Equipamentos.....	124
3.4 Treinamento de Equipes para Trabalhos de Campo.....	126
3.5 Execução do Aterro.....	127
3.5.1 Lançamento e Espalhamento dos Resíduos.....	129
3.5.2 Compactação dos Resíduos.....	130
3.5.3 Cronograma de Execução.....	132
3.6 Ensaio Laboratoriais e In Situ.....	132
3.6.1 Composição Gravimétrica.....	133
3.6.2 Peso Específico dos Resíduos.....	135
3.6.3 Teor de Umidade.....	140
3.7 Controle Topográfico e Instrumentação de Campo.....	141
3.7.1 Controle das Espessuras das Camadas.....	141
3.7.2 Controle da Instrumentação de Campo.....	142
3.8 Controle Pluviométrico e Caracterização dos Líquidos Percolados.....	143
3.8.1 Controle Pluviométrico e Dados Climatológicos.....	144
3.8.2 Caracterização Físico-Química dos Líquidos Percolados.....	144
3.8.3 Medição de Vazões dos Líquidos Percolados.....	145
3.9 Serviços Complementares.....	147
CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE COMPACTAÇÃO – APRESENTAÇÃO	
E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	148
4.1 Composição Gravimétrica dos Resíduos.....	148
4.2 Teor de Umidade.....	150
4.3 Peso Específico Total e Seco.....	151
4.4 Espessuras Lançadas e Compactadas.....	153
4.5 Avaliação da Influência dos Parâmetros Construtivos sobre o Peso Específico.....	155
4.5.1 Análise e Modelagem Estatística dos Dados.....	155

4.5.2 Relação Teor de Umidade vs. Peso Específico.....	160
4.5.3 Relação Energia de Compactação vs. Peso Específico.....	164
4.6 Avaliação da Evolução do Peso Específico com a Profundidade.....	172
4.6.1 Relação Espessura Controlada x Peso Específico.....	173
4.6.2 Análise e Modelagem Estatística dos Dados.....	176
4.6.3 Relação Peso Específico vs. Profundidade vs. Equipamento de Compactação.....	180
4.7 Avaliação da Compressibilidade dos Resíduos Sólidos Urbanos face ao Efeito da Compactação.....	185
4.7.1 Compressão Mecânica Primária.....	185
4.7.2 Compressão Secundária.....	196
4.8 Avaliação do Efeito da Compactação na Geração dos Líquidos Percolados.....	208
4.8.1 Análise da Qualidade dos Líquidos Percolados.....	208
4.8.2 Geração de Líquidos Percolados.....	216
4.9 Síntese do Estudo de Compactação.....	227

VOLUME 2

CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE COMPRESSIBILIDADE – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	235
5.1 Avaliação de Modelos de Compressibilidade existentes na Literatura.....	235
5.1.1 Hipóteses e Análises Efetuadas.....	235
5.1.2 Resultados da Aplicação das Propostas.....	239
5.1.3 Análise Crítica do Desempenho dos Modelos.....	265
5.2 Concepção de Modelo Reológico Compósito para Compressão de Resíduos Sólidos Urbanos.....	270
5.3 Programa Computacional MSWSET.....	272
5.3.1 Estruturação do Programa.....	273
5.3.2 Geração de Resultados pelo Programa MSWSET.....	287
5.4 Aplicação do Programa MSWSET e Estudo para Avaliação dos Parâmetros Reológicos do Modelo Compósito.....	289
5.4.1 Seleção dos Pontos de Controle e Preparação dos Dados de Entrada.....	289
5.4.2 Avaliação dos Parâmetros Reológicos do Modelo Compósito – Interface RNLIN - MSWSET.....	294
5.4.3 Apresentação e Discussão dos Resultados do Programa MSWSET.....	297
5.5 Estudo Paramétrico a partir do Programa MSWSET.....	310
5.5.1 Influência dos Parâmetros Reológicos do Modelo Compósito.....	310
5.5.2 Efeito da Sobrecarga – Fator de Influência de Tensões I_z	316
5.5.3 Influência da Sequência Construtiva do Aterro Sanitário.....	319
5.5.4 Influência da Idade do Resíduo Aterrado.....	320

5.6 Recomendações para Aplicação do Programa MSWSET a outros Aterros Sanitários.....	321
5.7 Síntese do Estudo de Compressibilidade.....	322
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	325
6.1 Estudo de Compactação.....	325
6.1.1 Influência das Técnicas Construtivas.....	326
6.1.2 Evolução do Peso Específico com a Profundidade.....	327
6.1.3 Efeito da Compactação na Compressibilidade dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	328
6.1.4 Efeito da Compactação na Geração dos Líquidos Percolados.....	329
6.2 Estudo de Compressibilidade.....	329
6.2.1 Modelos de Compressibilidade existentes na Literatura.....	330
6.2.2 Modelo Reológico Compósito e Programa MSWSET.....	331
6.3 Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	332
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	334
APÊNDICES.....	351
Apêndice I - Aterro Experimental: Desenhos de Projeto.....	351
Apêndice II - Aterro Experimental: Fichas de Controle e Ensaio In Situ.....	360
Apêndice III - Aterro Experimental: Dados Hidroclimatológicos – Precipitação, Insolação, Temperatura, Evapotranspiração, Umidade Relativa e Velocidade dos Ventos.....	366
Apêndice IV - Programa MSWSET – Programa Fonte.....	377

LISTA DE FIGURAS

VOLUME 1

Figura 2.1.1 –Fases de geração de gases em aterros sanitários (FARQUHAR & ROVERS, 1973).....	10
Figura 2.1.2 - Esquema típico adotado pelo programa HELP (SCHROEDER et al., 1994).....	17
Figura 2.2.1 - Variação do peso específico de resíduos sólidos urbanos com a profundidade (KNOCHENMUS et al., 1998).....	27
Figura 2.2.2 - Variação do peso específico com a profundidade (OWEIS & KHERA, 1986).....	28
Figura 2.2.3 - Variação do peso específico seco com a profundidade (OWEIS & KHERA, 1986).....	29
Figura 2.2.4 - Perfis de umidade de resíduos sólidos urbanos (KNOCHENMUS et al., 1998).....	31
Figura 2.2.5 - Curvas de compactação para diferentes tipos de resíduos (KONIG & JESSBERGER, 1997).....	33
Figura 2.2.6 - Distribuição das dimensões de partículas para resíduos sólidos urbanos (JESSBERGER, 1994).....	35
Figura 2.2.7 - Relação entre coesão e ângulo de atrito de resíduos sólidos urbanos (WOJNAROWICZ et al., 1998).....	41
Figura 2.2.8 - Relação tensão vs. deformação para diferentes tipos de resíduos sólidos urbanos, obtidos a partir de ensaios triaxiais (KONIG & JESSBERGER, 1997).....	42
Figura 2.2.9 - Parâmetros de resistência mobilizados em função do nível de deformações (KOCKEL & JESSBERGER, 1995).....	43
Figura 2.2.10 - Mobilização dos parâmetros de resistência para distintas configurações de amostras (KOCKEL & JESSEBERGER, 1995).....	43
Figura 2.2.11 - Variação da resistência ao cisalhamento dos resíduos com a profundidade (SINGH & SUN, 1995).....	44
Figura 2.2.12 – inter-relação dos fatores que afetam a compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos (GRISOLIA et al., 1993).....	47
Figura 2.2.13 - Representação do processo de adensamento dos resíduos sólidos urbanos (GRISOLIA et al., 1992).....	48
Figura 2.2.14 - Variação do módulo de rigidez E_s com a tensão vertical (adaptado por WOJNAROWICZ et al., 1998).....	49

Figura 2.2.15 - Curva recalque vs. tempo em células experimentais (RAO et al., 1977).....	54
Figura 2.2.16 - Recalque total ao longo da profundidade observado após 47 dias de aplicação de carga (WATTS & CHARLES, 1990).....	58
Figura 2.3.1 - Definição da idade média do aterro, t_I (YEN & SCANLON, 1975).....	66
Figura 2.3.2 - Variação da taxa de recalque com a altura e a idade média do aterro, t_I (SOHN & LEE, 1994).....	67
Figura 2.3.3 - Modelo de compressão unidimensional proposto por BJARNGARD & EDGERS (1990).....	70
Figura 2.3.4 - Modelo hiperbólico aplicado ao aterro sanitário Meruelo (LING et al., 1998).....	73
Figura 2.3.5 - Aplicação do método observacional (MANASSERO & PASQUALINE, 1993).....	75
Figura 2.4.1 - Efeito da densificação dos resíduos na vida útil de aterros sanitários e no custo unitário de disposição (adaptada de BELFIORE et al., 1990).....	83
Figura 2.4.2 - Efeito da compactação nos recalques de aterros sanitários (DE VITO, apud OWEIS & KHERA, 1986).....	84
Figura 2.4.3 - Relação entre o peso específico dos resíduos e o número de passadas do equipamento e espessura das camadas (adaptada de SCHOMAKER, 1972).....	86
Figura 2.4.4 - Pesos específicos em função dos equipamentos de compactação (adaptado de BRATLEY, 1974).....	88
Figura 2.4.5 - Relação teor de umidade vs. peso específico seco sob efeito de diferentes técnicas de compactação (BENOIT et al, 1999).....	91
Figura 2.4.6 - Relação entre densidades finais de resíduos e espessura de camadas e número de passadas de equipamento de compactação (MATTHEWS et al., 1997).....	93
Figura 2.4.7 - Curvas recalque vs. tempo para a seção submetida a carregamento externo no aterro de Morgantown (RAO et al., 1977).....	98
Figura 2.4.8 - Efeito de sobrecarga nas taxas de recalque secundário e curvas para estimativa de recalques no tempo sob efeito do pré-carregamento.....	100
Figura 3.1 - Vista aérea do Aterro Sanitário Bandeirantes com a localização do aterro experimental.....	106
Figura 3.1.1 - Aterro experimental - Arranjo geral.....	107
Figura 3.1.2 - Aterro experimental - Identificação dos quadrantes na praça de trabalho em plano horizontal.....	108
Figura 3.1.3 - Aterro experimental - Seqüência construtiva na praça de trabalho em planos horizontais.....	111
Figura 3.1.4 - Aterro experimental - Seqüência construtiva na praça de trabalho em planos inclinados.....	113

Figura 3.2.1 - Aterro experimental – Sistema complementar de drenagem de gás.....	114
Figura 3.2.2 - Sistema complementar de drenagem de gás - Dreno horizontal de transferência.....	115
Figura 3.2.3 - Aterro experimental – Tratamento e impermeabilização da fundação....	116
Figura 3.2.4 - Detalhes e vista do tratamento de fundação do aterro experimental.....	117
Figura 3.2.5 - Aterro experimental – Sistema de drenagem de líquidos percolados e gases.....	118
Figura 3.2.6 - Detalhes do sistema de drenagem do aterro experimental.....	119
Figura 3.2.7 - Caixa de captação e amostragem de líquidos percolados.....	120
Figura 3.2.8 – Detalhe do sistema de drenagem de gases e líquidos percolados.....	121
Figura 3.2.9 - Aterro experimental – Marco superficial instalado.....	122
Figura 3.2.10 – Localização da monitoração de 2 ^a fase nas praças de trabalho em planos horizontal e inclinado.....	123
Figura 3.3.1 – Trator de esteiras tipo Bulldozer D6D – Dimensões principais.....	125
Figura 3.3.2 – Rolo compactador 816F – Dimensões principais.....	126
Figura 3.4.1 – Trajetórias e faixas de movimentação dos equipamentos nos quadrantes.....	128
Figura 3.4.2 – Treinamento operacional previamente à execução do aterro.....	128
Figura 3.5.1 – Lançamento dos resíduos nas praças de trabalho em plano horizontal e inclinado.....	129
Figura 3.5.2 – Distribuição dos volumes lançados de resíduos por etapa construtiva...	130
Figura 3.5.3 – Compactação dos resíduos nas praças de trabalho em planos horizontais e inclinados.....	131
Figura 3.5.4 – Aterro experimental: Cronograma simplificado das atividades principais.....	132
Figura 3.6.1 – Seqüência de execução dos ensaios para determinação do peso específico <i>in situ</i> dos resíduos.....	136
Figura 3.6.2 – Detalhes da execução dos ensaios para determinação do peso específico <i>in situ</i> dos resíduos.....	137
Figura 3.6.3 – Procedimento para determinação dos volumes adicionais das cavas de ensaio.....	138
Figura 3.6.4 – Locação das cavas para os ensaios de determinação do peso específico <i>in situ</i>	139
Figura 3.7.1 – Procedimento de controle das placas de recalque após as operações de compactação dos resíduos.....	143
Figura 4.1.1 – Composição média dos resíduos sólidos urbanos empregados no aterro experimental.....	149
Figura 4.5.1 – Relação peso específico total vs. teor de umidade para diferentes equipamentos operando em planos horizontais.....	159

Figura 4.5.2 – Relação peso específico seco vs. teor de umidade para diferentes equipamentos operando em planos horizontais.....	160
Figura 4.5.3 – Curva de compactação para ambos os equipamentos, admitindo 4 passadas do equipamento e espessuras lançadas de 0,30m.....	164
Figura 4.5.4 – Distribuição das espessuras das camadas lançadas na praça de trabalho em planos horizontais do aterro experimental.....	165
Figura 4.5.5 – Relação peso específico seco vs. teor de umidade vs. espessura das camadas para o trator de esteiras tipo D6D (a); para o compactador 816F (b); e para ambos equipamentos de teste operando em 6 passadas.....	168
Figura 4.5.6 – Relação peso específico seco vs. teor de umidade vs. número de passadas para o trator de esteiras tipo D6D (a); para o compactador 816F (b); e para ambos equipamentos de teste (c), assumindo espessura lançada de resíduos igual a 0,5m.....	169
Figura 4.5.7 – Relação peso específico seco vs. teor de umidade vs. número de passadas para o trator de esteiras tipo D6D operando em plano inclinado (a); em plano horizontal (b); e em ambos planos de compactação (c), admitindo espessura lançada de resíduos igual a 0,5m.....	171
Figura 4.5.8 – Curvas peso específico seco vs. teor de umidade obtidas pelo modelo para distintos equipamentos de compactação.....	172
Figura 4.6.1 – Relação entre as tensões verticais calculadas com base nos valores compactados (σ_{vc}) e nos valores lançados (σ_{vsp}).....	174
Figura 4.6.2 – Relação peso específico vs. profundidade vs. espessura das camadas para o trator de esteiras tipo D6D (a); para o compactador 816F (b); e para ambos equipamentos de teste (c) operando em 6 passadas.....	182
Figura 4.6.3 – Relação peso específico vs. profundidade vs. número de passadas do trator de esteiras tipo D6D (a); do compactador 816F (b); e de ambos equipamentos de teste (c) para espessuras lançadas de 0,5m.....	183
Figura 4.6.4 – Relação peso específico vs. profundidade a partir da extrapolação do modelo estatístico desenvolvido.....	185
Figura 4.7.1 – Relação tensão vertical vs. deformação para o trator de esteiras tipo D6D, assumindo distintas espessuras lançadas (a); número de passadas (b); e fatores de energia E^* (c).....	192
Figura 4.7.2 – Relação tensão vertical vs. deformação para o compactador 816F, assumindo distintas espessuras lançadas (a); número de passadas (b); e fatores de energia E^* (c).....	193
Figura 4.7.3 – Distribuição das tensões verticais em profundidade devido aos equipamentos de compactação e às pressões sobrejacentes.....	194
Figura 4.7.4 – Relação fator de energia (E^*) vs. deformação imediata (ϵ_{im}).....	196

Figura 4.7.5 – Relação entre o coeficiente de compressão (CR^*), coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v^*) e tensões verticais (σ_v), para distintos fatores de energia (E^*) aplicados pelo trator de esteiras tipo D6D.....	199
Figura 4.7.6 – Relação entre o coeficiente de compressão (CR^*), coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v^*) e tensões verticais (σ_v), para distintos fatores de energia (E^*) aplicados pelo compactador 816F.....	200
Figura 4.7.7 – Avaliação da compressão secundária do aterro experimental. Recalques totais em escala linear (a); logarítmica (b); e recalques relativos (período entre 03/98 e 09/98). Quadrantes 23 e 30 (trator de esteiras).....	202
Figura 4.7.8 – Avaliação da compressão secundária do aterro experimental. Recalques totais em escala linear (a); logarítmica (b); e recalques relativos (período entre 03/98 e 09/98). Quadrante 16 (compactador).....	203
Figura 4.7.9 – Relação entre o coeficiente de compressão secundária (C_{α}') e o fator de energia (E^*).....	206
Figura 4.7.10 – Análises físico-químicas dos líquidos percolados. DBO, DQO e pH..	207
Figura 4.8.1 – Caracterização dos líquidos percolados – DBO, DQO, DBO/DQO e pH.....	211
Figura 4.8.2 – Caracterização dos líquidos percolados – Condutância específica, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato e cloretos.....	212
Figura 4.8.3 – Caracterização dos líquidos percolados – Zinco, Arsênio, Cádmio e Chumbo.....	213
Figura 4.8.4 – Caracterização dos líquidos percolados – Mercúrio, Cromo, fenóis e sólidos suspensos totais (SST).....	214
Figura 4.8.5 – Distribuição da precipitação (P), líquidos percolados (L) e relação L/P ao longo do tempo.....	221
Figura 4.8.6 – Produção de líquidos percolados no aterro experimental. Valores observados e calculados pelo método do balanço hídrico (período Out/97 a Jul/99)....	224
Figura 4.8.7 - Líquidos percolados no aterro experimental (Simulações 1 e 2). Valores observados e calculados pelo programa HELP (período Out/97 a Jul/99).....	228
Figura 4.8.8 - Líquidos percolados no aterro experimental (Simulações 3 e 4). Valores observados e calculados pelo programa HELP (período Out/97 a Jul/99).....	229
Figura 4.8.9 - Líquidos percolados no aterro experimental (Simulação 5 e global). Valores observados e calculados pelo programa HELP (período Out/97 a Jul/99).....	230
Figura 4.9.1 – Relação entre o tipo e número de passadas do equipamento de compactação e a vida útil do aterro sanitário, para distintas demandas de resíduos.....	233
Figura 4.9.2 – Relação entre o tipo e número de passadas do equipamento de compactação e o custo unitário do resíduo aterrado.....	234

VOLUME 2

Figura 5.1.1 – Seção simplificada e níveis internos de líquidos percolados para efeito do cálculo das tensões verticais atuantes.....	237
Figura 5.1.2 – Distribuição de tensões verticais, devido ao aterro experimental, por uma seção longitudinal central.....	238
Figura 5.1.3 – Relação taxa de recalque vs. tempo para distintas definições do tempo zero (t_0).....	241
Figura 5.1.4 – Relação taxa de recalques vs. tempo para o marco superficial MSE7...	243
Figura 5.1.5 – Relação recalque observado e previsto vs. tempo, com base em funções logarítmicas integradas da solução de YEN & SCANLON. Marco superficial MSE7.....	243
Figura 5.1.6 – Relação recalque observado e previsto vs. tempo, com base em funções logarítmicas simples. Marco superficial MSE7.....	244
Figura 5.1.7 - Relação recalque observado e previsto vs. tempo, com base em funções logarítmicas simples, eliminando o período construtivo do experimento. Marco superficial MSE7.....	244
Figura 5.1.8 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos com o modelo hiperbólico.....	247
Figura 5.1.9 – Relação entre a taxa de deformação inicial (ρ_0), a deformação última esperada (ε_{ult}) e a altura do maciço (H) a partir do modelo hiperbólico.....	248
Figura 5.1.10 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos com o modelo de GIBSON & LO (1961).....	249
Figura 5.1.11 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo de GIBSON & LO (1961) e a altura do maciço (H).....	250
Figura 5.1.12 - - Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir de modelos baseados em funções de potência.....	252
Figura 5.1.13 - - Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo baseado em funções de potência e a altura do maciço (H).....	253
Figura 5.1.14 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir do modelo de EDGERS et al. (1992).....	254
Figura 5.1.15 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo de EDGERS et al. (1992) e a altura do maciço (H).....	255
Figura 5.1.16 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir do modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990).....	257
Figura 5.1.17 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990) e a altura do maciço (H).....	258
Figura 5.1.18 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir do modelo de COUMOULOS & KORYALOS (1997)	259

Figura 5.1.19 – Definição do parâmetro tempo para aplicação do modelo adaptado de SOWERS (1973).....	262
Figura 5.1.20 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir do modelo adaptado de SOWERS (1973) (casos b e d).....	264
Figura 5.1.21 – Aplicação dos modelos existentes. Desvios médios de recalques para os marcos superficiais.....	267
Figura 5.1.22 – Aplicação dos modelos existentes. Desvios médios de recalques para as placas de recalque.....	267
Figura 5.1.23 – Curva recalque vs. tempo assumindo distintos tempos de início (t_0). Marco superficial MSE4.....	268
Figura 5.1.24 – Curvas recalque vs tempo observadas e previstas para distintas séries de tempo, a partir do modelo de GIBSON & LO (1961). Marco superficial MSE4.....	269
Figura 5.1.25 – Curvas recalque vs tempo observadas e previstas para distintas séries de tempo, a partir do modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990). Marco superficial MSE4.....	269
Figura 5.2.1 – Modelo reológico compósito para compressão dos resíduos sólidos urbanos.....	271
Figura 5.3.1 – Esquema conceitual para definição dos eventos, materiais e histórico de construção.....	274
Figura 5.3.2 – Esquema para consideração dos mecanismos de compressão através do conceito de superposição de efeitos.....	276
Figura 5.3.3 – Esquema para consideração dos mecanismos de compressão mecânica secundária.....	278
Figura 5.3.4– Esquema para consideração dos mecanismos de compressão biológica secundária.....	280
Figura 5.3.5 – Matriz de estado definida pelo programa MSWSET baseada no exemplo da Figura 5.3.1.....	282
Figura 5.3.6 – Evolução das alturas e recalques do maciço ao longo do tempo.....	287
Figura 5.3.7 – Esquema conceitual para reprodução de curvas de recalque relativo pelo programa MSWSET.....	288
Figura 5.4.1 – Histórico de construção do Aterro Sanitário Bandeirantes (sub-aterro AS1).....	290
Figura 5.4.2 – Modelado do terreno de fundação do aterro existente sob o aterro experimental.....	292
Figura 5.4.3 – Aterro experimental: arranjo geométrico e sistema de coordenadas utilizado para consideração de sobrecarga (representação em corte relativa ao quadrante 39).....	293

Figura 5.4.4 – Esquema para avaliação dos parâmetros do modelo através do programa MSWSET e da sub-rotina RNLIN.....	295
Figura 5.4.5 – Fluxograma simplificado para a interface RNLIN – MSWSET.....	296
Figura 5.4.6 – Curvas recalque vs. tempo (placas de recalque PR1, PR2 e PR3).....	298
Figura 5.4.7 – Curvas recalque vs. tempo (placas de recalque PR4, PR5 e PR6).....	299
Figura 5.4.8 – Curvas recalque vs. tempo (placa de recalque PR8 e marcos superficiais MSE5 e MSE6).....	300
Figura 5.4.9 – Curvas recalque vs. tempo (marcos superficiais MSE7, MSE24 e MSE25).....	301
Figura 5.4.10 – Curvas recalque vs. tempo (marcos superficiais MSE28, MSE29 e MSE30).....	302
Figura 5.4.11 – Curvas recalque vs. tempo (marcos superficiais MSE31, MSE32 e MSE33).....	303
Figura 5.4.12 – Curvas recalque vs. tempo (marcos superficiais MSE35 e MSE36)....	304
Figura 5.4.13 – Evolução dos recalques e alturas do maciço ao longo do histórico de vida do Aterro Sanitário Bandeirantes. Placa de recalque PR5.....	305
Figura 5.4.14 – Desvios de altura inicial (H_i) para as análises individualizada e global.....	307
Figura 5.4.15 – Desvios de recalque final (S_f) para as análises individualizada e global.....	307
Figura 5.4.16 - Desvios de altura inicial (H_i) obtidos para o modelo original e para a sua variante, a partir de análise global (parâmetros médios).....	309
Figura 5.4.17 - Desvios de recalque final (S_f) obtidos para o modelo original e para a sua variante, a partir de análise global (parâmetros médios).....	310
Figura 5.5.1 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão primária C_c (placa de recalque PR5).....	311
Figura 5.5.2 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão mecânica secundária b (placa de recalque PR5).....	311
Figura 5.5.3 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores da taxa de compressão mecânica secundária c (placa de recalque PR5).....	312
Figura 5.5.4 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão biológica secundária E_{DG} (placa de recalque PR5).....	312

Figura 5.5.5 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores da taxa de compressão biológica secundária d (placa de recalque PR5).....	313
Figura 5.5.6 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão primária C_c (marco superficial MSE31).....	313
Figura 5.5.7 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão mecânica secundária b (marco superficial MSE31).....	314
Figura 5.5.8 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores da taxa de compressão mecânica secundária c (marco superficial MSE31).....	314
Figura 5.5.9 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão biológica secundária E_{DG} (marco superficial MSE31).....	315
Figura 5.5.10 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores da taxa de compressão biológica secundária d (marco superficial MSE31).....	315
Figura 5.5.11 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintas representações de carregamento do aterro experimental (placa de recalque PR5).....	317
Figura 5.5.12 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintas representações de carregamento do aterro experimental (marco superficial MSE6).....	317
Figura 5.5.13 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintas representações de carregamento do aterro experimental (marco superficial MSE31).....	318
Figura 5.5.14 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintas seqüências construtivas do aterro existente (placa de recalque PR5).....	319
Figura 5.5.15 - Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET considerando distintos parâmetros para os resíduos antigos e novos (marco superficial MSE31).....	320

LISTA DE TABELAS

VOLUME 1

Tabela 2.1.1 - Constituição típica do biogás de aterros sanitários (PARKER, 1983)....	12
Tabela 2.1.2 - Precipitação e produção de líquidos percolados em aterros sanitários na Alemanha (EHRIG, 1983).....	13
Tabela 2.1.3. - Composição típica dos líquidos percolados em aterros sanitários novos e antigos (adaptado de TCHOBANOGLOUS et al., 1993).....	18
Tabela 2.1.4 - Caracterização dos Líquidos Percolados – parâmetros com diferenças entre as fases acética e metanogênica (EHRIG, 1983).....	19
Tabela 2.1.5 - Caracterização dos Líquidos Percolados – parâmetros sem diferenças entre as fases acética e metanogênica (EHRIG, 1983).....	20
Tabela 2.2.1 - Ensaio de resistência tipo SPT.....	22
Tabela 2.2.2 - Ensaio de resistência à penetração tipo CPT.....	23
Tabela 2.2.3 - Peso específico de resíduos sólidos urbanos (RSU).....	25
Tabela 2.2.4 - Valores de peso específico em função do grau de compactação (GACHET et al., 1998).....	26
Tabela 2.2.5 - Pesos específicos das partículas sólidas de resíduos sólidos urbanos.....	29
Tabela 2.2.6 - Valores para o teor de umidade de resíduos sólidos urbanos (RSU).....	31
Tabela 2.2.7 - Composição média dos resíduos para diferentes localidades (adaptada de BOUAZZA et al., 1996).....	34
Tabela 2.2.8 - Coeficientes de permeabilidade de resíduos sólidos urbanos (adaptada de WOJNAROWICZ et al., 1998).....	37
Tabela 2.2.9 - Ensaio de resistência - resultados obtidos.....	40
Tabela 2.2.10 - Parâmetros de resistência estimados por retro-análise (KAVAZANJIAN et al., 1995).....	46
Tabela 2.2.11 - Parâmetros de compressibilidade primária e secundária (LANDVA & CLARK, 1984,1986,1990).....	52
Tabela 2.4.1 - Pesos específicos para distintos equipamentos obtidos em aterros experimentais (CATERPILLAR, 1994, 1995, 1998, 1999, 2000).....	92
Tabela 2.4.2 - Compactação dinâmica de aterros sanitários (SAGASETA, 1993; VAN IMPE & BOUAZZA, 1996).....	94
Tabela 2.4.3 - Recalques observados por diferentes técnicas de melhoria (ONITSUKA et al., 1996).....	96
Tabela 3.1 - Aspectos básicos considerados na concepção do aterro experimental.....	105

Tabela 3.1.1 - Descrição dos procedimentos construtivos dos quadrantes na praça de trabalho em plano horizontal.....	109
Tabela 3.1.2 - Etapas construtivas para a praça de trabalho em planos horizontais.....	112
Tabela 3.1.3 - Etapas construtivas para a praça de trabalho em planos inclinados.....	113
Tabela 3.6.1 – Ensaio para determinação do peso específico <i>in situ</i> dos resíduos.....	140
Tabela 3.6.2 – Ensaio para determinação do teor de umidade dos resíduos.....	141
Tabela 3.8.1 – Caracterização físico-química dos líquidos percolados – Campanhas efetuadas.....	146
Tabela 4.1.1 – Ensaio de Composição Gravimétrica.....	150
Tabela 4.2.1 – Teores de umidade médio dos resíduos sólidos urbanos determinados ao longo da execução do experimento.....	151
Tabela 4.3.1 – Peso específico <i>in situ</i> (kN/m ³) dos resíduos sólidos urbanos determinados ao longo da execução do experimento.....	152
Tabela 4.3.2 – Peso específico seco (kN/m ³) dos resíduos sólidos urbanos determinados ao longo da execução do experimento.....	153
Tabela 4.3.3 - Peso específico “solto” (kN/m ³) dos resíduos sólidos urbanos determinados ao longo da execução do experimento.....	153
Tabela 4.4.1 – Espessuras reais (m) das camadas de resíduos sólidos urbanos lançadas no aterro experimental.....	154
Tabela 4.4.2 - Espessuras compactadas (m) das camadas de resíduos sólidos urbanos nos quadrantes 16, 18, 20, 23, 25 e 27 do aterro experimental.....	156
Tabela 4.4.3 - Espessuras compactadas (m) das camadas de resíduos sólidos urbanos nos quadrantes 9, 11, 13, 30, 32 e 34 do aterro experimental.....	157
Tabela 4.4.4 - Espessuras compactadas (m) das camadas de resíduos sólidos urbanos nos quadrantes 2, 4, 6, 37, 39 e 41 do aterro experimental.....	157
Tabela 4.5.1 – Parâmetros para o modelo de compactação.....	159
Tabela 4.5.2 – Resultados da aplicação do modelo de compactação. Compactador 816F operando em plano horizontal de compactação.....	161
Tabela 4.5.3 – Resultados da aplicação do modelo de compactação. Trator de esteiras tipo D6D em plano horizontal de compactação.....	162
Tabela 4.5.4 – Resultados da aplicação do modelo de compactação. Trator de esteiras tipo D6D operando em plano inclinado de compactação.....	163
Tabela 4.6.1 – Espessuras e profundidades das camadas para as etapas construtivas do experimento. Quadrante de ensaio 20.....	176
Tabela 4.6.2 – Pesos específicos, tensões verticais atuantes, espessuras e profundidades. Quadrante de ensaio 20.....	177
Tabela 4.6.3 – Valores X_i (peso específico, profundidade, espessura e número de passadas) utilizados no estudo estatístico. Trator de esteiras D6D em plano horizontal.....	179

Tabela 4.6.4 – Valores X_i (peso específico, profundidade, espessura e número de passadas) utilizados no estudo estatístico. Compactador 816F em plano horizontal.....	180
Tabela 4.6.5 – Parâmetros do modelo peso específico vs. profundidade.....	180
Tabela 4.7.1 – Deformações, tensões verticais atuantes, espessuras e profundidades. Quadrante de ensaio 18.....	187
Tabela 4.7.2 – Valores Y_i (deformação, tensão vertical atuante, espessura e número de passadas) utilizados no estudo estatístico. Trator de esteiras D6D em plano horizontal.....	188
Tabela 4.7.3 – Valores Y_i (deformação, tensão vertical atuante, espessura e número de passadas) utilizados no estudo estatístico. Compactador 816F em plano horizontal.....	189
Tabela 4.7.4 – Parâmetros do modelo tensão deformação das camadas sob efeito combinado da compactação e das pressões subjacentes.....	190
Tabela 4.7.5 – Deformações imediatas (ϵ_{im}) e espessuras do quadrante de ensaio 18...	195
Tabela 4.7.6 - Deformações imediatas (ϵ_{im}), espessuras lançadas (t), número de passadas (P) e fatores de energia (E^*). Síntese dos resultados médios obtidos.....	195
Tabela 4.7.7 – Coeficientes de compressão (CR^*) e de compressibilidade volumétrica (m_v^*) para distintos níveis de tensão e quadrantes de ensaio do Bulldozer D6D.....	197
Tabela 4.7.8 – Coeficientes de compressão (CR^*) e de compressibilidade volumétrica (m_v^*) para distintos níveis de tensão e quadrantes de ensaio do Compactador 816F.....	198
Tabela 4.7.9 – Parâmetros para definição dos contornos de recalque junto à base do aterro experimental.....	201
Tabela 4.7.10 – Recalques secundários do aterro experimental (período Março a Setembro de 1998).....	204
Tabela 4.7.11 – Coeficientes de compressão secundária para distintos quadrantes de ensaio.....	205
Tabela 4.8.1 – Caracterização físico-química dos líquidos percolados no aterro experimental.....	209
Tabela 4.8.2 – Caracterização dos líquidos percolados - Valores médios e faixas observadas e reportadas na literatura.....	215
Tabela 4.8.3 – Precipitações e vazões de líquidos percolados diárias (ano 1997, parcial).....	217
Tabela 4.8.4 – Precipitações e vazões de líquidos percolados diárias (ano 1998).....	218
Tabela 4.8.5 – Precipitações e vazões de líquidos percolados diárias (ano 1999, parcial).....	220
Tabela 4.8.6 – Precipitações e volumes percolados mensais médios no aterro experimental.....	221
Tabela 4.8.7 – Método do balanço hídrico. Síntese dos resultados para o período Out/97 a Jul/99.....	223

Tabela 4.9.1 – Avaliação do efeito da compactação na vida útil do aterro sanitário e no custo unitário do resíduo aterrado.....	233
---	-----

VOLUME 2

Tabela 5.1.1 – Histórico de construção simplificado do Aterro Sanitário Bandeirantes (sub-aterro AS-1).....	236
Tabela 5.1.2 – Taxas de recalque observadas. Marco superficial MSE7.....	240
Tabela 5.1.3 – Coeficientes a' e b' obtidos para o modelo de YEN & SCANLON, admitindo tempo zero (t_0) igual ao de início das leituras de controle.....	241
Tabela 5.1.4 – Marcos superficial MSE4 – Aplicação do modelo hiperbólico.....	246
Tabela 5.1.5 – Resultados de aplicação do modelo hiperbólico.....	247
Tabela 5.1.6 – Resultados de aplicação do modelo de GIBSON & LO (1961).....	249
Tabela 5.1.7 – Resultados de aplicação do modelo baseado em funções de potência...	252
Tabela 5.1.8 – Resultados da aplicação do modelo de EDGERS et al. (1992).....	254
Tabela 5.1.9 - Resultados da aplicação do modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990).....	256
Tabela 5.1.10 - Resultados da aplicação do modelo de COUMOULOS & KORYALOS (1997).....	260
Tabela 5.1.11 – Coeficientes de compressão do modelo adaptado de SOWERS (1973) para distintos casos de análise.....	263
Tabela 5.1.12 – Resultados de aplicação do modelo adaptado de SOWERS (1973)....	263
Tabela 5.1.13 – Parâmetros de compressibilidade baseados no modelo de SOWERS (1973). Valores calculados e reportados na literatura.....	265
Tabela 5.4.1 – Entrada de dados do programa MSWSET tabulada para a placa de recalque PR5.....	294
Tabela 5.4.2 – Avaliação dos parâmetros reológicos do modelo compósito. Resultados da aplicação do programa MSWSET.....	306

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia
ABMS – Associação Brasileira de Mecânica de Solos
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA – American Public Health Association
ASCE – American Society of Civil Engineers
ASTM – American Society for Testing and Materials
CD – Compactação dinâmica
CFR – Código de Regulamentos Federais dos Estados Unidos da América
CPT – Cone Penetration Test
ECA – Estacas compactadas de areia
ETC8 – European Technical Committee n°8
HELP – Hydrologic Evaluation of Landfill Performance
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
ISSMFE – International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering
LIMPURB – Departamento de Limpeza Urbana da Prefeitura do Município de São Paulo
MSE – Marco superficial do experimento
MSW – Municipal solid waste
PC – Pré-carregamento
PEAD – Polietileno de alta densidade
PR – Placa de recalque
PVC – Policloreto de vinila
RSU – Resíduo sólido urbano
SASW - Spectral Analysis of Surface Wave
SPT – Standard Penetration Test
USCS – Unified Soil Classification System
USEPA – United States Environmental Protection Agency

LISTA DE SÍMBOLOS

A	=	área de tratamento ou carregamento, m^2
A	=	parâmetros do modelo (EDGERS, 1992)
AET	=	evapotranspiração real, mm por período de tempo (ano, mês ou dia) (FENN et al., 1975)
a e b	=	constantes empíricas da relação peso específico vs. pressões sobrejacentes (KREITH, 1994)
a e b	=	parâmetros para relação entre o módulo de rigidez secante e a tensão vertical (KOCKEL et al., 1997)
a e b	=	parâmetros para o modelo de YEN & SCANLON (SOHN & LEE, 1994)
a e b	=	parâmetros de compressibilidade primária e secundária do resíduo (EDIL et al., 1990)
a e k	=	constantes do modelo de compressão (GANDOLLA et al., 1992)
b	=	coeficiente de compressão mecânica secundária (modelo compósito)
B	=	largura de placa ou área de carregamento
c	=	coesão, kPa
c	=	taxa de compressão mecânica secundária (modelo compósito)
C	=	coeficiente de escoamento superficial
C_c	=	índice de compressão primária
C_c'	=	coeficiente de compressão primária
C_{crp}	=	coeficiente de compressão secundária devido à fluência do material face ao efeito de sobrecarga.
C_α	=	índice de compressão secundária
C_α'	=	coeficiente de compressão secundária
$C_{\alpha 1}$	=	coeficiente de compressão secundária intermediária (BJARNGARD & EDGERS, 1990)
$C_{\alpha 2}$	=	coeficiente de compressão secundária de longo prazo (BJARNGARD & EDGERS, 1990)
$C_{m(t)}$	=	coeficiente de compressibilidade global dependente do tempo (GABR et al., 2000)
C_v	=	coeficiente de adensamento ou consolidação vertical, cm^2/s
COD	=	quantidade de matéria orgânica biodegradável presente nos resíduos por ano, modelo Meruelo (DIAZ et al., 1995)
CR^*	=	coeficiente de compressão combinado (compactação e compressão primária)
CV	=	coeficiente de variação, definido pela razão entre o desvio padrão e a média da amostra, %
D	=	desvio entre os recalques ou alturas calculadas e observadas, %.

D	=	módulo de compressão volumétrica, kN/m ²
d	=	taxa de compressão biológica secundária (modelo compósito)
d_r	=	distância relativa entre a terra e o sol
$D_m(t)$	=	coeficiente dependente do tempo (GABR et al., 2000)
DBO	=	demanda bioquímica de oxigênio, mg/l
DQO	=	demanda química de oxigênio, mg/l
e e d	=	espaçamentos da malha nas duas direções (compactação dinâmica)
e_0	=	índice de vazios inicial
E	=	energia aplicada na compactação dinâmica, tm/m ²
E^*	=	fator de energia, número de passadas por espessura lançada, passadas/m
E	=	módulo de elasticidade, kPa
E_{dg}	=	compressão total devido à degradação dos resíduos (modelo compósito)
E_m	=	módulo pressiométrico, kPa
E_s	=	módulo de rigidez ou de deformabilidade secante, MPa (KOCKEL et al., 1997)
FS	=	fator de segurança
G	=	módulo de deformabilidade transversal, MPa
GC	=	grau de compactação da camada
G_{LFG}	=	capacidade total de geração de gases, m ³ /t de resíduos sólidos urbanos (LEONARD et al., 2000)
h_t	=	profundidade de influência do tratamento (compactação dinâmica)
H	=	altura do aterro sanitário, metros
H	=	altura de queda do bloco (compactação dinâmica)
H_f	=	altura final do maciço, metros
I	=	infiltração, mm por período de tempo (ano, mês ou dia)
I_Z	=	fator de influência de tensões
J	=	dia juliano
k	=	taxa de decomposição e degradação dos resíduos sólidos urbanos
K_h	=	coeficiente de hidrolisação, 1/dia
K_s	=	coeficiente de reação vertical, MPa/m
L	=	líquidos percolados, m ³ /ha/dia
L	=	espessura da camada de resíduos, metros
m	=	taxa de recalque (YEN & SCANLON, 1975)
m	=	parâmetro do modelo (EDGERS et al., 1992)
m	=	compressibilidade de referência (EDIL et al., 1990)
m	=	número de passagens do equipamento pela área de tratamento (compactação dinâmica)
m_v^*	=	coeficiente de compressibilidade volumétrica combinado (compactação e compressão primária)

n	=	horas de insolação diária
n	=	número de golpes por ponto, em cada passagem do equipamento (compactação dinâmica)
n	=	taxa de compressão (EDIL et al., 1990)
N	=	número máximo possível de horas de insolação
N	=	tempo a partir do encerramento do aterro sanitário, ano (LEONARD et al., 2000)
N_{SPT}	=	número de golpes do ensaio de penetração SPT
O	=	percentagem do material orgânico degradável (em peso) em relação à quantidade total de resíduos inicialmente depositada (LEONARD et al., 2000)
p	=	pressão sobrejacente, kPa
P_0	=	concentração da matéria orgânica degradável no instante $t = 0$, kg por tonelada de resíduo (HOEKS, 1983)
P	=	número de passadas do equipamento durante processo de compactação
P	=	precipitação, mm por período de tempo (ano, mês ou dia)
$PERC$	=	percolação, mm por período de tempo (ano, mês ou dia) (FENN et al., 1975)
PET	=	evapotranspiração potencial, mm por período de tempo (ano, mês ou dia) (FENN et al., 1975)
q	=	sobrecarga atuante à superfície
q_c	=	resistência de ponta no ensaio CPT, kPa
Q_{LFG}	=	taxa de geração de gases no tempo t (m^3/dia) (LEONARD et al., 2000)
R	=	taxa de disposição dos resíduos sólidos urbanos no aterro sanitário, t/dia
r_0	=	declinação do sol
R_0	=	escoamento superficial, mm por período de tempo (ano, mês ou dia) (FENN et al., 1975)
R^2	=	coeficiente de determinação
S	=	recalque medido ou calculado
S	=	radiação solar, MJ/m^2
S_b	=	recalque por compressão biológica secundária
S_c	=	recalque por compressão mecânica secundária
S_p	=	recalque por compressão mecânica primária
S_0	=	radiação extraterrestre diária, MJ/m^2
S_F	=	fator de recalque (LEONARD et al., 2000)
S_r	=	grau de saturação, %
S_t	=	radiação solar global
SST	=	sólidos sedimentáveis totais, mg/l
ST	=	umidade armazenada na camada de cobertura (FENN et al., 1975)
t	=	tempo

t	=	espessura lançada das camadas de resíduos
t'	=	tempo a partir da aplicação do carregamento (modelo compósito)
t''	=	tempo a partir da disposição dos resíduos (modelo compósito)
t_0	=	tempo inicial dos processos de compressão
t_c	=	espessuras compactadas das camadas de resíduos
t_c	=	tempo de construção do aterro
t_k	=	tempo crítico, a partir do qual a taxa de recalques é acelerada pelos processos de decomposição (EDGERS et al., 1992)
t_l	=	idade média do aterro (YEN & SCANLON, 1975)
T	=	temperatura, em ° Celsius
V_i	=	volume inicial
V_1	=	volume unitário de areia utilizada (estacas compactadas de areia)
V_2	=	volume unitário de levantamento (empolamento) da superfície (estacas compactadas de areia)
V_3	=	volume unitário de resíduos (estacas compactadas de areia)
X	=	coordenada Norte
w	=	teor de umidade dos resíduos
w_{ot}	=	teor de umidade ótimo do material
w_w	=	teor de umidade dos resíduos expresso em relação ao peso úmido
w_s	=	teor de umidade dos resíduos expresso em termos do peso seco
w_s	=	ângulo do pôr do sol
W	=	peso do bloco (compactação dinâmica)
W_i	=	peso do constituinte i (LANDVA & CLARK, 1990)
W_c	=	peso total dos constituintes (LANDVA & CLARK, 1990)
z	=	profundidade, metros
Y	=	coordenada Leste
α	=	produção específica de gás, $m^3/ton/ano$ (HOEKS, 1983)
α	=	parâmetro do modelo de compressibilidade (EDGERS et al., 1992)
α	=	coeficiente de perda de massa, modelo Meruelo (DIAZ et al., 1995)
α	=	fator de carga para compactação dinâmica, função do tipo de material
α	=	taxa de compressão para técnicas de melhoria de terrenos
α	=	coeficiente de Albedo
β e B	=	fatores que levam em conta, respectivamente, a atividade biológica dos microorganismos presentes e um fator de escala do processo de deformação em relação ao efeito de decomposição dos resíduos devido à cinética de crescimento das bactérias (WILLIAMS, 1991).
β_0 e β_1	=	constantes do método observacional (MANASSERO e PASQUALINE, 1993)
$\Delta\gamma_i$	=	acréscimo no peso específico do constituinte i (LANDVA & CLARK, 1990)

ΔST	=	variação do teor de umidade armazenado no solo (FENN et al., 1975)
ΔH	=	recalques medidos ou calculados
ΔH_1	=	recalque primário da camada de espessura H (SOWERS, 1973)
ΔH_2	=	recalque secundário da camada de espessura H (SOWERS, 1973)
ΔH_{bio}	=	recalque devido à degradação dos resíduos (EDGERS et al., 1992)
ΔH_{ult}	=	recalque final esperado (tempo infinito)
Δt	=	intervalo de tempo entre leituras
$\Delta V_{s(t)}$	=	variação volumétrica inter partículas com o tempo
$\Delta V_{v(t)}$	=	variação volumétrica intra partículas com o tempo
$\Delta \sigma$	=	acrécimo de tensão vertical
$\Delta \sigma_{oct}$	=	acrécimo das tensões normais octaédricas
$\Delta u_{(t)}$	=	acrécimo das tensões neutras
$\Delta \tau_{oct}$	=	acrécimo das tensões cisalhantes octaédricas
ε	=	deformação
$\varepsilon_{tot-dec}$	=	compressão total passível de ocorrer por conta da biodegradação dos resíduos, sendo dependente da quantidade de matéria degradável presente nos resíduos (PARK & LEE, 1997)
ε_{im}	=	deformação imediata da camada
ε_s	=	deformação secundária
ε_{ult}	=	deformação última
ϕ	=	ângulo de atrito
ϕ	=	latitude
ρ	=	taxa de recalques ($\Delta H/\Delta t$)
ρ_o	=	taxa de recalques inicial ($\Delta H/\Delta t$)
λ/b	=	taxa de compressão secundária (EDIL et al., 1990)
γ	=	peso específico do resíduo, kN/m^3
γ_c	=	peso específico médio do resíduo, kN/m^3 (LANDVA & CLARK, 1990)
γ_c	=	peso específico do resíduo compactado, kN/m^3
γ_d	=	peso específico seco do resíduo, kN/m^3
γ_i	=	peso específico inicial do resíduo, kN/m^3
γ_i	=	peso específico do constituinte i , kN/m^3 (LANDVA & CLARK, 1990)
γ_{eac}	=	peso específico dos líquidos percolados, kN/m^3
γ_p	=	peso específico do resíduo à pressão sobrejacente p , kN/m^3
γ_s	=	peso específico das partículas sólidas, kN/m^3
γ_{sat}	=	peso específico saturado dos resíduos sólidos, kN/m^3
γ_{sp}	=	peso específico do resíduo solto, kN/m^3
γ_w	=	peso específico da água igual a $9,81 \text{ kN/m}^3$
σ	=	desvio padrão
σ_v	=	tensão vertical

σ_v'	=	tensão vertical efetiva
σ_{vm}	=	tensão vertical média da camada
σ_{sur}	=	tensões no meio da camada devido à sobrecarga representada pelo aterro experimental.
θ_{FC}	=	capacidade de campo volumétrica, %
ν	=	coeficiente de Poisson

*Capítulo 5***ESTUDO DE COMPRESSIBILIDADE:
APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

O estudo de compressibilidade foi baseado nos controles e levantamentos topográficos realizados durante e após a construção do aterro experimental. Tais estudos envolveram a análise e verificação de desempenho de modelos de compressibilidade existentes na literatura, a concepção de um modelo reológico compósito para compressão de resíduos sólidos urbanos e o desenvolvimento de um programa computacional para previsão de recalques de aterros sanitários. O estudo completa-se com a avaliação e análise paramétrica das componentes do modelo proposto, assim como de outros aspectos e condicionantes envolvidos na previsão de recalques destes maciços. Descrevem-se na seqüência as diversas análises e resultados destes estudos.

5.1 Avaliação de Modelos de Compressibilidade existentes na Literatura

Diversas propostas para avaliação da compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos têm sido apresentadas na literatura, conforme descrito no item 2.3. Nesta parte do estudo, nove propostas existentes foram utilizadas e comparadas, tendo por base o seu desempenho com os dados da monitoração do Aterro Sanitário Bandeirantes por um período de até três anos. Esta análise crítica teve por objetivo verificar as vantagens e limitações dos referidos métodos, possibilitando assim a obtenção de importantes subsídios para as etapas subseqüentes do estudo.

5.1.1 Hipóteses e Análises Efetuadas

Para a verificação de desempenho dos modelos existentes foram utilizados os dados de 25 monumentos, sendo 8 placas de recalque (localizadas sob o aterro experimental) e 18

marcos superficiais (situados externamente ao experimento). A avaliação dos parâmetros de compressibilidade foi realizada através de análises de regressões múltiplas não lineares, utilizando o programa SIGMAPLOT, versão 6.0. As análises tiveram por base as formulações propostas para os modelos, os recalques observados nos pontos de controle (monumentos) selecionados e algumas características inerentes aos mesmos (altura da coluna de resíduos, tensões verticais atuantes, níveis internos de líquidos percolados, efeito da sobrecarga, etc). A determinação dos parâmetros dos modelos e a conseqüente previsão de recalques foi feita para diferentes séries de leituras, verificando assim, o desvio (D) obtido entre os valores calculados e observados, definido como:

$$D_{i,j} = \frac{(\Delta H_{calc(i,j)} - \Delta H_{obs,j})}{\Delta H_{obs,j}} \times 100$$

onde:

$D_{i,j}$ = desvio de recalques no tempo j , baseado nas leituras do período i , em %.

$\Delta H_{calc(i,j)}$ = recalque calculado no tempo j , baseado nas leituras do período i .

$\Delta H_{obs,j}$ = recalque observado no tempo j .

Algumas características e hipóteses de cálculo tiveram que ser inicialmente estabelecidas para realização das análises, incluindo:

- a) seqüência construtiva: o histórico de construção do sub-aterro AS-1 foi estabelecido, de forma simplificada, tendo por base as datas de início e término de suas 3 (três) principais fases construtivas (alçamento e expansão), conforme sintetizado na Tabela 5.1.1.

Tabela 5.1.1 – Histórico de construção simplificado do Aterro Sanitário Bandeirantes (sub-aterro AS-1).

DATA	FASE	TEMPO (meses)
Abr/78	início da disposição (Fase 1)	0
Jun/82	término da Fase 1	50
Jan/88	início da 1 ^a . expansão (Fase 2)	117
Jul/91	término da 1 ^a . expansão (Fase 2)	159
Mar/93	início da 2 ^a . expansão (Fase 3)	179
Abr/95	término da 2 ^a . expansão (Fase 3)	204
Abr/97	início do aterro experimental	228
Out/97	término do aterro experimental	234
Abr/00	término do registro de recalques ⁽¹⁾	264

(1) – para efeito deste estudo foram consideradas as leituras realizadas até 17/04/2000.

- b) altura da coluna de resíduos (H): obtida a partir das cotas de fundação do aterro sanitário existente (sub-aterro AS-1) e das cotas dos pontos de controle ao início das leituras (27/04/97).
- c) tensões verticais efetivas (σ_v'): as tensões verticais, sob cada monumento e atuantes a meia altura do maciço, foram avaliadas, admitindo a seção simplificada apresentada na Figura 5.1.1 e a presença de distintos níveis internos de líquidos percolados no maciço (L_w). Tais níveis foram avaliados a partir das leituras de controle de piezômetros posicionados nas proximidades da área do experimento. Foram igualmente assumidos valores para o peso específico dos materiais, baseado em trabalhos e experiências anteriores no mesmo aterro (CARVALHO, 1999; BENVENUTO et al., 1994), conforme se indica:

- líquidos percolados: $\gamma_{leac} = 9,94 \text{ kN/m}^3$
- resíduos sólidos: $\gamma = 11,0 \text{ kN/m}^3$
- resíduos sólidos saturados: $\gamma_{sat} = 14,0 \text{ kN/m}^3$

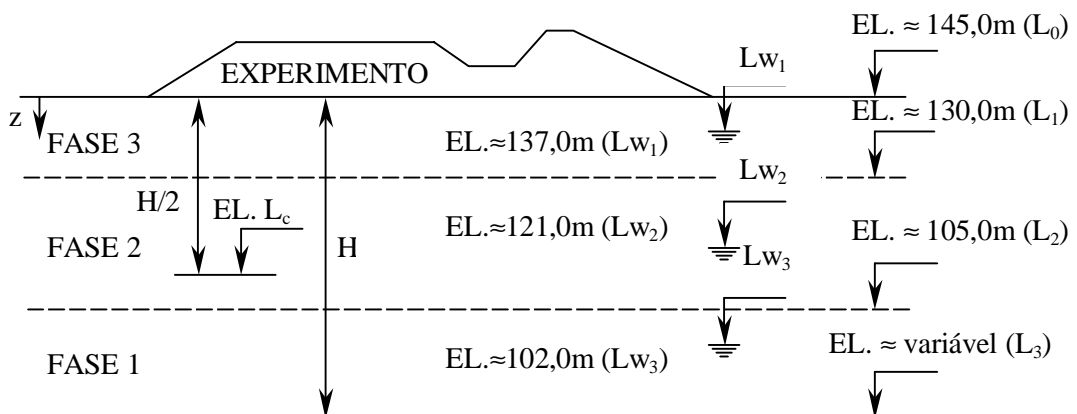


Figura 5.1.1 – Seção simplificada e níveis internos de líquidos percolados para efeito do cálculo das tensões verticais atuantes.

O valor da tensão vertical no meio da camada ($\sigma_{v,z}'$), para os casos onde a elevação L_c é inferior ao nível interno de líquidos percolados L_{w2} (situação mais comum), pode ser calculada como:

$$\sigma_{v,z}' = (L_0 - L_{w1})\gamma + (L_{w1} - L_1)(\gamma_{sat} - \gamma_{leac}) + (L_1 - L_{w2})\gamma + (L_{w2} - L_c)(\gamma_{sat} - \gamma_{leac}) + \sigma_{sur}$$

onde:

z = profundidade, no caso igual a $H/2$

σ_{sur} = tensões no meio da camada devido à sobrecarga representada pelo aterro experimental.

- d) tensões verticais devido à sobrecarga (σ_{sur}): a distribuição de tensões verticais em profundidade, devido ao efeito da sobrecarga, foi avaliada com base nas equações de Westergaard a partir do programa ZSTRESS¹⁰. Para tanto, o aterro experimental foi dividido e representado por áreas distintamente carregadas, sendo a influência deste conjunto de cargas determinada nos pontos (monumentos) e profundidades de interesse. A Figura 5.1.2 apresenta a distribuição de tensões em profundidade obtida para uma seção longitudinal passando pelo centro do aterro experimental.

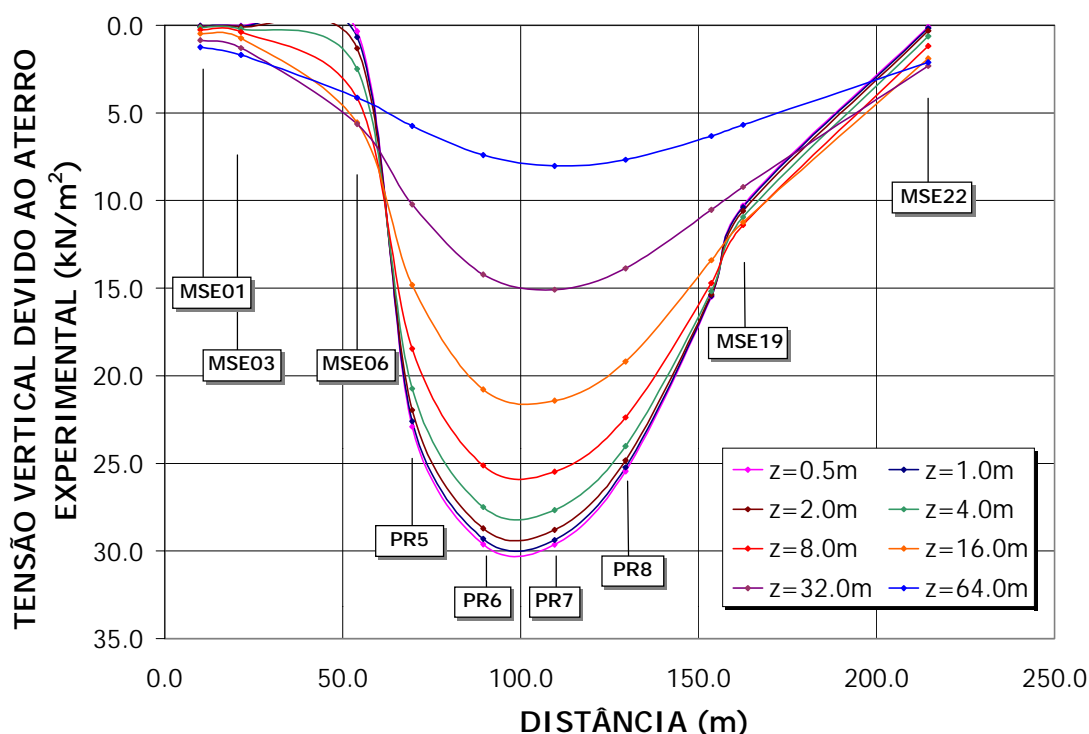


Figura 5.1.2 – Distribuição de tensões verticais, devido ao aterro experimental, por uma seção longitudinal central.

- e) parâmetro tempo: o tempo inicial (t_0) para aplicação dos modelos foi estabelecido como sendo o tempo de início das leituras no aterro experimental, exceto para as propostas de SOWERS (1973), YEN & SCANLON (1975) e COUMOULOS & KORYALOS (1997), como a seguir será discutido. Ressalte-se que a análise realizada procurou respeitar as premissas básicas dos modelos propostos, adequando-os às condições específicas do experimento quando necessário.

¹⁰ ZSTRESS: A computer program for calculation of vertical stresses due to surface loads. ALLEN, R.; DUNCAN, J.M., Virginia Tech (1987).

5.1.2 Resultados da Aplicação das Propostas

Apresentam-se a seguir os resultados e considerações de interesse para os modelos analisados.

- a) *Modelo de YEN & SCANLON (1975)*: conforme descrito no item 2.3.2, este modelo utiliza o conceito de idade média do aterro (t_i) como base de definição do parâmetro tempo. Apóia-se o modelo em uma relação linear decrescente entre as taxas de recalque e o logaritmo do tempo. A aplicação de tal conceito ao sub-aterro AS-1, no entanto, conduziu a valores e tendências não consistentes para todos os pontos de controle testados. A Tabela 5.1.2 apresenta, como exemplo, os valores calculados e observados para o marco superficial MSE7. As taxas de recalque foram calculadas em mm/dia e ft/mês, esta última visando comparar os resultados e parâmetros obtidos com os da proposição original do modelo. Duas séries de tempo foram construídas: a primeira admitindo o tempo zero como o de início das leituras (série A) e a segunda considerando as datas-marco da Tabela 5.1.1 e o conceito de idade média do aterro (série B). A Figura 5.1.3 apresenta a evolução das taxas de recalque, em ft/mês, ao longo do tempo para as duas séries descritas. A análise desta figura permite notar, além da dispersão dos dados ($R^2 \approx 0,5$), a importância da correta definição do parâmetro t_0 (tempo zero) e a sua influência na definição dos parâmetros de ajuste da equação de previsão de recalques. Alguns fatores podem explicar as tendências inconsistentes observadas, ou seja, taxas de recalque rapidamente convergindo a valores nulos: (i) elevado tempo de construção do sub-aterro AS-1, com períodos alternados de alteamento e expansão; (ii) taxas de recalque observadas bem superiores às relatadas na literatura, podendo este fato estar associado às características do resíduo aterrado (elevada quantidade de matéria orgânica e umidade) e à sobrecarga representada pelo aterro experimental. Ressalte-se que a proposta original teve por base aterros construídos em intervalos de tempo bem menores e localizados em região de clima seco dos EUA. CARVALHO (1999) utilizou este método com dados do Aterro Sanitário Bandeirantes (sub-aterro AS-2), definindo, porém, o início das leituras como tempo zero (t_0). A Tabela 5.1.3 apresenta os resultados obtidos para análise similar aqui realizada, a qual resultou coeficientes a e b para o modelo dentro da mesma faixa obtida pelo estudo anterior mencionado. Ressalte-se os reduzidos coeficientes de determinação (R^2) obtidos, confirmando o desempenho pouco satisfatório desta solução ao presente caso de estudo.

Baseado nas análises realizadas e nos resultados obtidos pode-se concluir pela não adequabilidade deste método ao presente caso de estudo.

Tabela 5.1.2 – Taxas de recalque observadas. Marco superficial MSE7.

MARCO SUPERFICIAL MSE7											
Altura de resíduos (m)				58,58				Propostas baseadas em funções logarítmicas			
Elevação inicial (m)				145,58				Coeficientes		a	b
Nível da fundação (m)				87,0				integradas de Y & S		16,220	4,654
Tempo de construção (t _c) (meses)				204,0				simples		-3,271	-2,235
Data	Série de tempo A		Série de tempo B		ΔΔH/Δt		Funções logarítmicas		Observadas		
	t (dias)	t (meses)	t (meses)	t ₁ (meses)	(mm/dia)	(ft/mês)	ΔH (m)	ΔH (m)	ΔH (m)	r	
29/04/97	0	0,0	228,0	126,00					0,000	0,000	
05/05/97	6	0,2	228,2	126,20	9,167	0,902	0,104	-1,532	0,055	0,001	
12/05/97	13	0,4	228,4	126,43	9,857	0,970	0,204	-0,781	0,124	0,002	
19/05/97	20	0,7	228,7	126,67	8,571	0,844	0,296	-0,363	0,184	0,003	
26/05/97	27	0,9	228,9	126,90	8,714	0,858	0,384	-0,072	0,245	0,004	
02/06/97	34	1,1	229,1	127,13	11,429	1,125	0,467	0,152	0,325	0,006	
09/06/97	41	1,4	229,4	127,37	7,857	0,773	0,548	0,334	0,380	0,006	
16/06/97	48	1,6	229,6	127,60	7,143	0,703	0,626	0,487	0,430	0,007	
23/06/97	55	1,8	229,8	127,83	9,571	0,942	0,703	0,619	0,497	0,008	
30/06/97	62	2,1	230,1	128,07	9,714	0,956	0,777	0,735	0,565	0,010	
07/07/97	69	2,3	230,3	128,30	5,857	0,576	0,850	0,839	0,606	0,010	
14/07/97	73	2,4	230,4	128,43	16,000	1,575	0,891	0,894	0,670	0,011	
21/07/97	83	2,8	230,8	128,77	4,600	0,453	0,991	1,018	0,716	0,012	
04/08/97	97	3,2	231,2	129,23	6,286	0,619	1,128	1,169	0,804	0,014	
11/08/97	104	3,5	231,5	129,47	7,143	0,703	1,195	1,237	0,854	0,015	
18/08/97	111	3,7	231,7	129,70	10,286	1,012	1,260	1,300	0,926	0,016	
25/08/97	118	3,9	231,9	129,93	5,714	0,562	1,325	1,360	0,966	0,016	
01/09/97	125	4,2	232,2	130,17	8,000	0,787	1,389	1,416	1,022	0,017	
08/09/97	132	4,4	232,4	130,40	2,000	0,197	1,453	1,468	1,036	0,018	
15/09/97	139	4,6	232,6	130,63	5,857	0,576	1,515	1,519	1,077	0,018	
22/09/97	146	4,9	232,9	130,87	7,000	0,689	1,577	1,566	1,126	0,019	
29/09/97	153	5,1	233,1	131,10	5,429	0,534	1,638	1,612	1,164	0,020	
06/10/97	160	5,3	233,3	131,33	7,143	0,703	1,699	1,655	1,214	0,021	
13/10/97	167	5,6	233,6	131,57	14,714	1,448	1,758	1,697	1,317	0,022	
20/10/97	174	5,8	233,8	131,80	3,286	0,323	1,818	1,737	1,340	0,023	
27/10/97	181	6,0	234,0	132,03	3,000	0,295	1,876	1,775	1,361	0,023	
11/11/97	196	6,5	234,5	132,53	5,800	0,571	2,000	1,852	1,448	0,025	
18/11/97	203	7,8	235,8	133,77	5,486	0,540	2,297	2,020	1,651	0,028	
19/01/98	265	8,8	236,8	134,83	5,344	0,526	2,543	2,145	1,822	0,031	
17/02/98	294	9,8	237,8	135,80	4,759	0,468	2,760	2,246	1,960	0,033	
02/03/98	307	10,2	238,2	136,23	7,077	0,697	2,855	2,288	2,052	0,035	
16/03/98	321	10,7	238,7	136,70	6,571	0,647	2,956	2,331	2,144	0,037	
30/03/98	335	11,2	239,2	137,17	3,357	0,330	3,056	2,372	2,191	0,037	
20/04/98	356	11,9	239,9	137,87	3,190	0,314	3,204	2,431	2,258	0,039	
27/04/98	363	12,1	240,1	138,10	5,143	0,506	3,253	2,450	2,294	0,039	
19/05/98	384	12,8	240,8	138,80	0,571	0,056	3,397	2,505	2,306	0,039	
15/06/98	412	13,7	241,7	139,73	5,964	0,587	3,586	2,573	2,473	0,042	
17/07/98	444	14,8	242,8	140,80	2,000	0,197	3,798	2,646	2,537	0,043	
28/07/98	455	15,2	243,2	141,17	10,364	1,020	3,869	2,670	2,651	0,045	
19/08/98	477	15,9	243,9	141,90	3,000	0,295	4,011	2,715	2,717	0,046	
01/09/98	490	16,3	244,3	142,33	4,231	0,416	4,093	2,742	2,772	0,047	
17/09/98	506	16,9	244,9	142,87	1,875	0,185	4,194	2,773	2,802	0,048	
15/10/98	534	17,8	245,8	143,80	2,643	0,260	4,368	2,825	2,876	0,049	
19/11/98	569	19,0	247,0	144,97	2,429	0,239	4,581	2,887	2,961	0,051	
17/12/98	597	19,9	247,9	145,90	3,786	0,373	4,749	2,933	3,067	0,052	
15/01/99	626	20,9	248,9	146,87	3,034	0,299	4,920	2,979	3,155	0,054	
18/02/99	660	22,0	250,0	148,00	1,412	0,139	5,116	3,031	3,203	0,055	
17/03/99	687	22,9	250,9	148,90	1,407	0,139	5,270	3,070	3,241	0,055	
14/04/99	715	23,8	251,8	149,83	2,429	0,239	5,427	3,108	3,309	0,056	
18/05/99	749	25,0	253,0	150,97	3,235	0,318	5,615	3,153	3,419	0,058	
17/06/99	779	26,0	254,0	151,97	2,133	0,210	5,778	3,192	3,483	0,059	
15/07/99	807	26,9	254,9	152,90	1,750	0,172	5,928	3,226	3,532	0,060	
12/08/99	835	27,8	255,8	153,83	3,464	0,341	6,076	3,259	3,629	0,062	
15/09/99	869	29,0	257,0	154,97	2,471	0,243	6,253	3,298	3,713	0,063	
17/11/99	932	31,1	259,1	157,07	1,889	0,186	6,575	3,366	3,832	0,065	
15/12/99	960	32,0	260,0	158,00	0,214	0,021	6,715	3,394	3,838	0,066	
01/1/00	990	33,0	261,0	159,00	1,300	0,128	6,863	3,424	3,877	0,066	
02/1/00	1023	34,1	262,1	160,10	0,818	0,081	7,024	3,456	3,904	0,067	
03/1/00	1052	35,1	263,1	161,07	2,690	0,265	7,164	3,483	3,982	0,068	
04/1/00	1084	36,1	264,1	162,13	3,000	0,295	7,316	3,512	4,078	0,070	

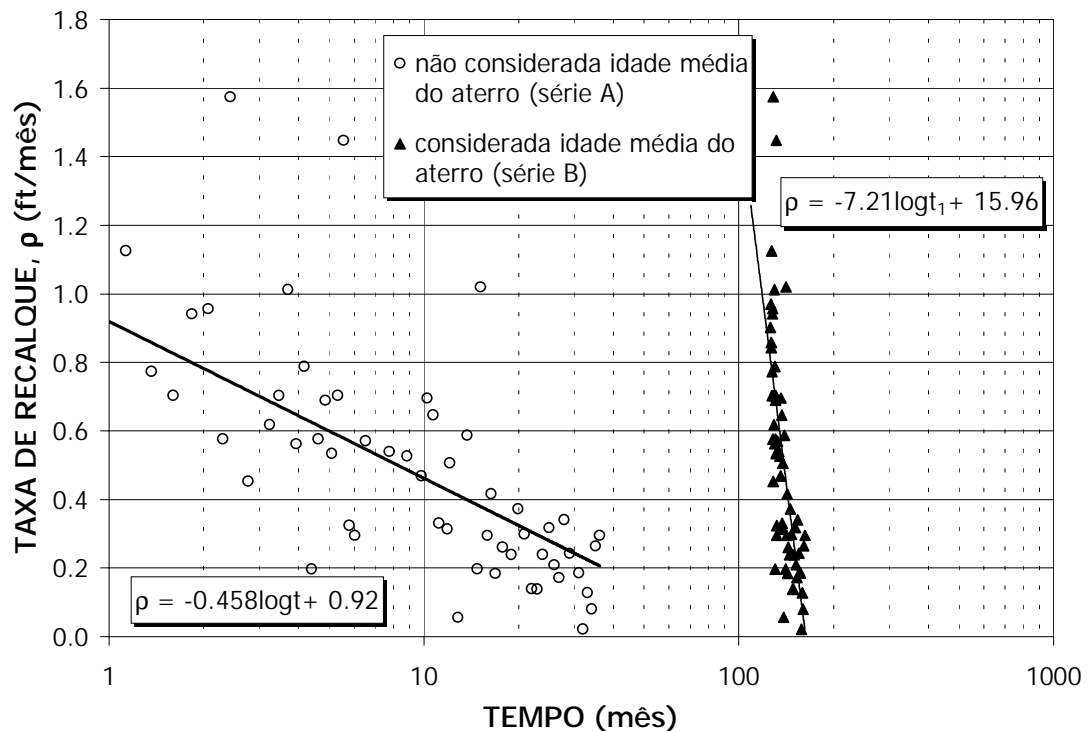


Figura 5.1.3 – Relação taxa de recalque vs. tempo para distintas definições do tempo zero (t_0).

Tabela 5.1.3 – Coeficientes a' e b' obtidos para o modelo de YEN & SCANLON (1975) admitindo tempo zero (t_0) igual ao de início das leituras de controle.

MODELO VERIFICADO: $\Delta H / \Delta t = a' - b' \log (t)$													
ATERRO EXPERIMENTAL					CARVALHO (1999)								
PONTO	a'	b'	a'/b'	R^2	PONTO	a'	b'	a'/b'	R^2	PONTO	a'	b'	a'/b'
MS01	0.446	0.128	3.484	0.10	MS13	0.466	0.157	2.966	0.17	MS11	0.336	0.146	2.301
MS02	0.588	0.215	2.736	0.28	MS18	0.342	0.096	3.559	0.09	MS12	0.467	0.225	2.076
MS03	0.621	0.254	2.446	0.28	MS09	1.022	0.512	1.996	0.45	MS13	0.494	0.246	2.008
MS04	0.753	0.340	2.214	0.35	MS11	0.945	0.449	2.105	0.41	MS21	0.965	0.446	2.164
MS05	0.636	0.286	2.223	0.31	MS12	0.965	0.430	2.245	0.37				
MS06	0.781	0.382	2.045	0.47	MS14	0.986	0.464	2.125	0.43				
MS07	0.920	0.458	2.009	0.47	MS19	0.926	0.474	1.954	0.51				
MS08	0.513	0.173	2.968	0.16	MS20	0.534	0.224	2.385	0.21				
MS10	0.480	0.135	3.556	0.12	MS21	0.838	0.365	2.295	0.38				
					MS22	0.804	0.367	2.191	0.36				
MAX	1.022	0.512								MAX	0.965	0.446	
MIN	0.342	0.096								MIN	0.336	0.146	
MÉDIA	0.714	0.311								MÉDIA	0.566	0.266	

b) *Propostas baseadas em Funções Logarítmicas*: LING et al. (1998) propuseram a utilização de funções logarítmicas simples ou obtidas da integração da equação básica de YEN & SCANLON (1975), conforme discutido no item 2.3.8. Nestas propostas, o tempo zero (t_0) coincide com o tempo de início das leituras e controles de campo.

As Figuras 5.1.4 e 5.1.5 apresentam os resultados obtidos para o marco superficial MSE7, tendo por base funções logarítmicas integradas a partir da solução de YEN & SCANLON (1975). Inicialmente foram determinados, a partir da relação entre as taxas de recalque e o logaritmo do tempo, os coeficientes a e b da solução proposta, conforme apresentado na Figura 5.1.4. A Figura 5.1.5 apresenta, por sua vez, os recalques observados e os previstos através da utilização dos coeficientes obtidos e da formulação resultante da integração do modelo original de YEN & SCANLON (1975). A Tabela 5.1.2 apresenta os resultados obtidos com a aplicação desta solução ao marco superficial mencionado. A comparação entre os dados observados e os previstos com a aplicação deste método mostrou fraca concordância para os pontos verificados, notadamente para os recalques de longo prazo. Os desvios de recalque (D), neste caso, apresentaram um valor médio de cerca de 63,3%, considerando todos os marcos superficiais controlados. Tais resultados confirmam a inadequabilidade, para o caso estudado, de soluções baseadas na simples evolução das taxas de recalque com o tempo, da forma em que foram propostas pelos autores.

Os resultados da análise de regressão a partir de funções logarítmicas simples, com a conseqüente previsão de recalques, são apresentados na Figura 5.1.6, juntamente com os valores de recalque observados para o marco superficial MSE7. A Tabela 5.1.2 apresenta igualmente os resultados obtidos com a aplicação desta solução. Os coeficientes de determinação (R^2), neste caso, apresentaram valores da ordem de 0,8. Os desvios de recalque, após cerca de 3 anos de observação, foram inferiores ao caso anterior, porém igualmente elevados, tendo sido obtido um desvio de recalque (D) médio para os marcos superficiais verificados da ordem de -20,4%. Os recalques previstos ao final do período, nesta solução, apresentaram-se menores do que os valores observados no campo. Como verificação adicional, foram descartados, na análise de regressão, os pontos observados durante o período construtivo do experimento, procurando eliminar a influência dos sucessivos carregamentos do maciço. A Figura 5.1.7 apresenta os resultados obtidos, podendo ser observada uma significativa melhora no desempenho desta solução. Tal tendência, no entanto, está fortemente associada ao comportamento da função matemática utilizada quando da eliminação dos baixos valores do parâmetro tempo, não devendo representar o período construtivo limitação ao uso da solução.

A utilização de funções logarítmicas, em duas diferentes formulações, apresentou elevados desvios de recalque quando comparados os valores observados e previstos, não sendo recomendada a sua utilização para previsão de recalques com base no presente caso de estudo.

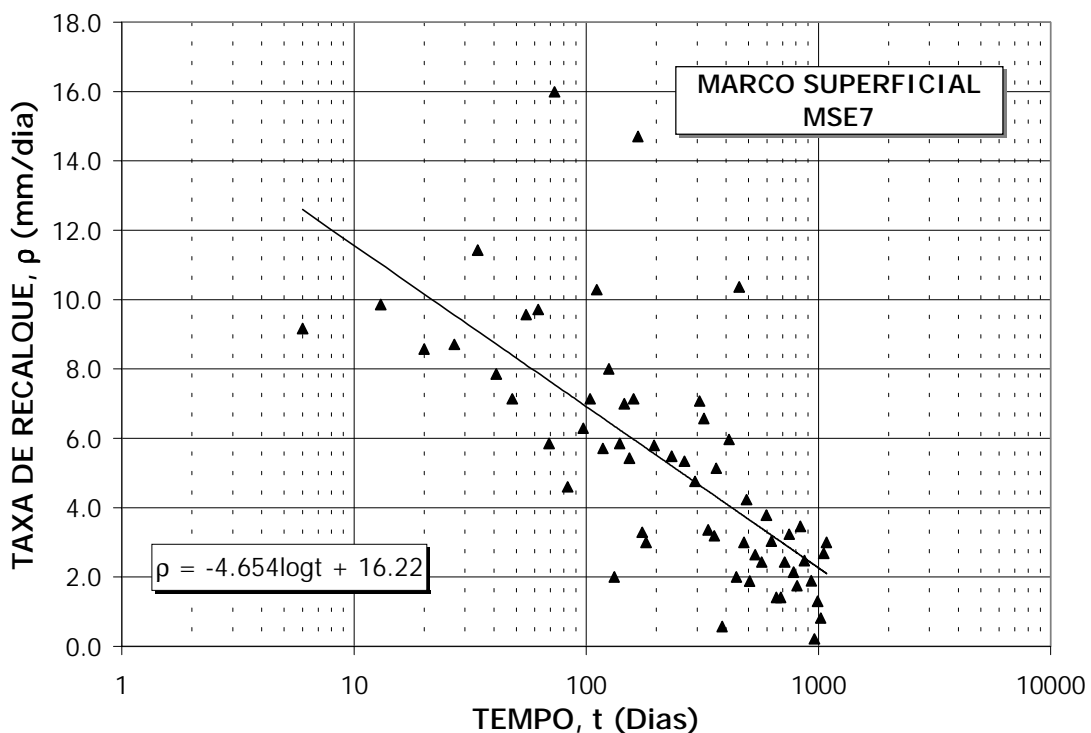


Figura 5.1.4 – Relação taxa de recalques vs. tempo para o marco superficial MSE7.

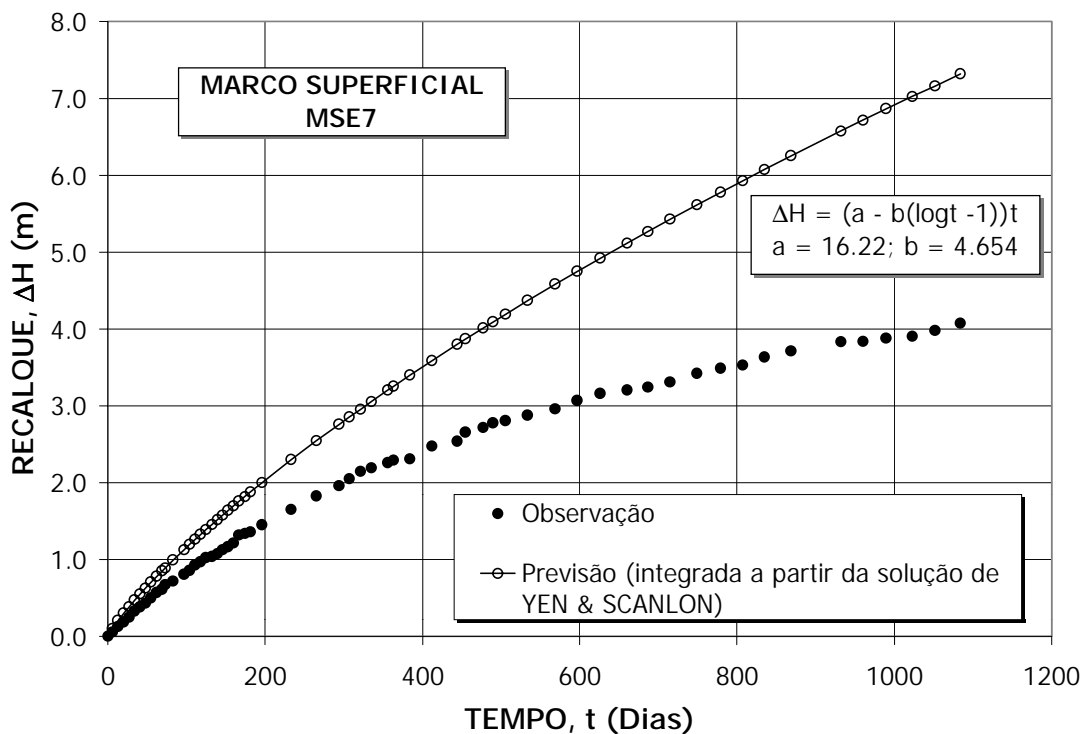


Figura 5.1.5 – Relação recalque observado e previsto vs. tempo, com base em funções logarítmicas integradas da solução de YEN & SCANLON. Marco superficial MSE7.

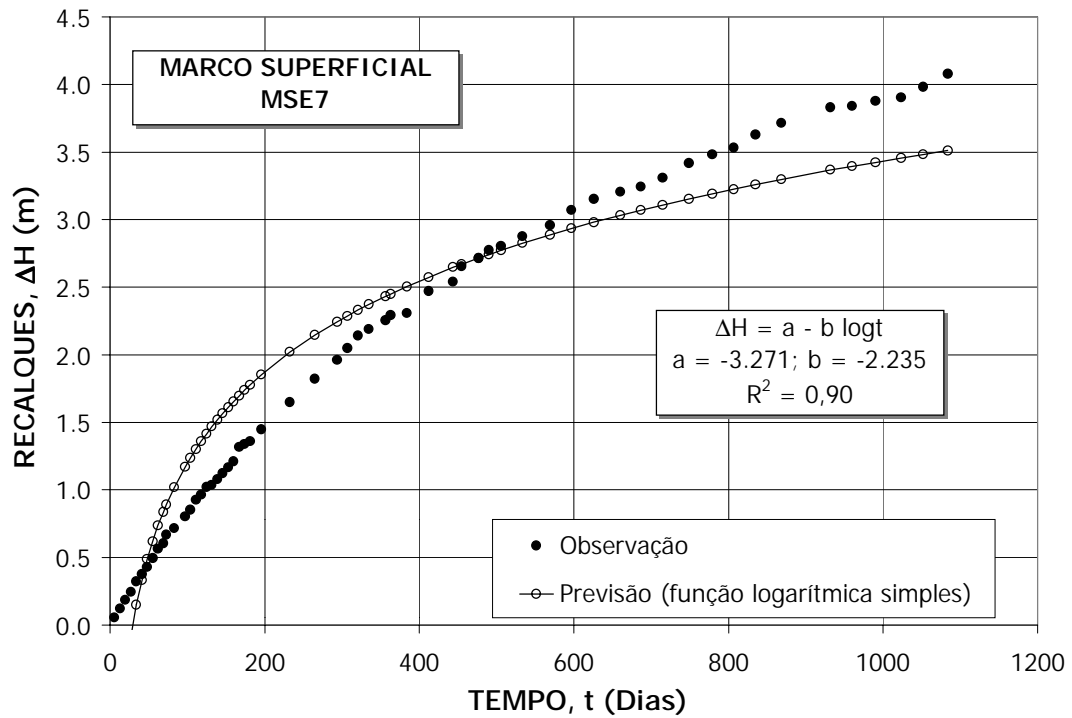


Figura 5.1.6 – Relação recalque observado e previsto vs. tempo, com base em funções logarítmicas simples. Marco superficial MSE7.

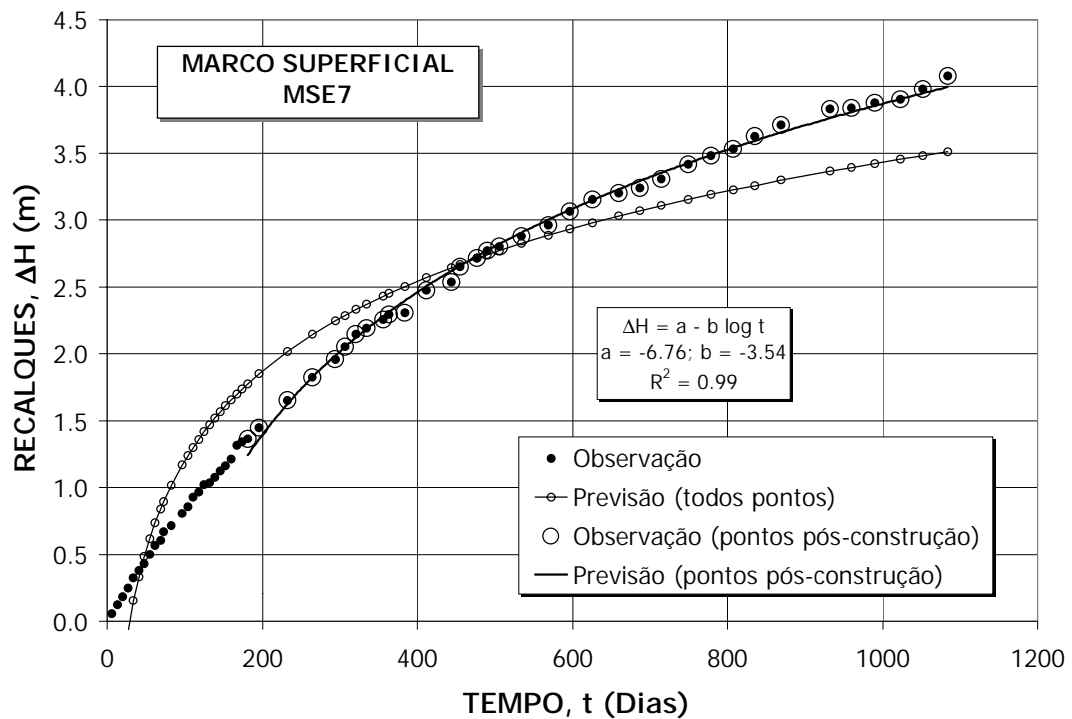


Figura 5.1.7 - Relação recalque observado e previsto vs. tempo, com base em funções logarítmicas simples eliminando o período construtivo do experimento. Marco superficial MSE7.

- c) *Propostas baseadas em Funções Hiperbólicas*: LING et al. (1998) também propuseram a utilização de funções hiperbólicas para previsão de recalques, conforme descrito no item 2.3.8. A formulação em termos de deformações (ϵ), apresentada na seqüência, foi utilizada para verificação de desempenho desta proposta. O tempo zero (t_0) foi definido como sendo o tempo de início das leituras de campo.

$$\epsilon = \sigma_v' \frac{t}{a + bt}$$

onde:

σ_v' = tensão vertical efetiva atuante à meia altura do maciço.

a e b = coeficientes do modelo

$\rho_0 = (\Delta\epsilon/\Delta t)_0 = 1/(a/\sigma_v')$ = taxa de deformações inicial

$\epsilon_{ult} = 1/(b/\sigma_v')$ = deformação última

$t_{95} = 19 \epsilon_{ult} / \rho_0$ = tempo para ocorrência de 95% da deformação prevista

A Tabela 5.1.4 apresenta os resultados obtidos para o marco superficial MSE4. Na tabela são apresentados os parâmetros e recalques previstos considerando as séries aproximadas de 3 anos (leituras até 1084 dias), de 2 anos (leituras até 715 dias) e de 1 ano (leituras até 363 dias). São ainda apresentados os coeficientes de determinação (R^2) obtidos do estudo estatístico e as características do ponto de controle (altura, elevações, tensões atuantes, etc). A Figura 5.1.8 apresenta, em termos gráficos, os valores observados e os previstos para as séries de tempo de 1, 2 e 3 anos. A Tabela 5.1.5 apresenta os desvios de recalque (D_{ij}) e os parâmetros obtidos para os monumentos verificados. Para as placas de recalque foram utilizadas séries de tempo de 2,3 anos (leituras até 838 dias) e de 1 ano. A Figura 5.1.9 procura comparar os resultados obtidos com os de outros aterros sanitários, em termos das deformações últimas (ϵ_{ult}) e das taxas de deformações iniciais (ρ_0).

O uso do modelo hiperbólico apresentou boa concordância entre os valores observados e os previstos, notadamente para os marcos superficiais e quando utilizadas as séries de tempo mais longas (3 anos). A utilização desta proposta, com alguns ajustes, poderia assim, ser recomendada para previsão de recalques do presente estudo, baseada nos resultados obtidos. A comparação com os poucos relatos de aplicação na literatura mostra resultados consistentes, apesar das significativas diferenças de altura dos maciços reportados e aqui estudados.

Tabela 5.1.4 – Marcos superficial MSE4 – Aplicação do modelo hiperbólico.

		MARCO SUPERFICIAL MSE4						
		Altura da coluna de resíduos, H (m)	64.60					
		Elevação inicial (m)	145.60					
		Nível da fundação (m)	81.00					
		Elevação ao topo da camada (m)	113.30					
		γ (kN/m ³)	11.0					
		γ_{sat} (kN/m ³)	14.0					
		$\gamma_{sat} (0.13m^3)$	9.943					
		Tensão vertical (kPa)						
		II. camada	III. Líquidos					
		σ_1 (layer 1)	130.000	137.000	132.99			
		σ_2 (layer 2)	105.000	121.000	130.24			
		σ_3 (layer 3)	81.990	102.000	0.90			
		σ_{sat} (sobrecarga)	1.30					
		σ_{sat} (nível da camada)	254.33					
		PROPOSTA BASEADA EM FUNÇÕES HIPERBÓLICAS						
		3 anos			2 anos		1 ano	
		a	2.21E+06	2.93E+06	2.45E+06			
		b	2.55E+03	2.89E+03	3.02E+03			
		β^2	0.999	0.999	0.999			
		c_1 (%) / dia	0.0115	0.0122	0.0124			
		r_{sat}	0.0886	0.0881	0.0844			
		h_0 (mm)	45.00	37.62	35.85			
		Previsto			Observado			
		r (%) 3 anos	r (%) 2 anos	r (%) 1 ano	ΔH (m)	r (%)	r	
29/4/97	0				0.000	0.000	0.000	
05/5/97	6	0.069	0.073	0.074	0.031	0.048	0.090	
12/5/97	13	0.148	0.156	0.158	0.102	0.158	0.082	
19/5/97	20	0.225	0.237	0.241	0.160	0.248	0.082	
26/5/97	27	0.302	0.317	0.322	0.199	0.308	0.083	
02/6/97	34	0.377	0.396	0.401	0.262	0.406	0.084	
09/6/97	41	0.451	0.473	0.479	0.314	0.486	0.085	
16/6/97	48	0.524	0.549	0.555	0.354	0.548	0.085	
23/6/97	55	0.596	0.623	0.630	0.415	0.642	0.086	
30/6/97	62	0.667	0.696	0.704	0.470	0.728	0.087	
07/7/97	69	0.736	0.768	0.776	0.502	0.777	0.088	
14/7/97	73	0.776	0.809	0.817	0.561	0.808	0.089	
21/7/97	83	0.873	0.908	0.916	0.602	0.932	0.089	
04/8/97	97	1.005	1.043	1.052	0.677	1.048	0.090	
11/8/97	104	1.079	1.109	1.117	0.712	1.102	0.091	
18/8/97	111	1.134	1.174	1.182	0.772	1.195	0.092	
25/8/97	118	1.196	1.237	1.246	0.800	1.238	0.092	
01/9/97	125	1.258	1.300	1.308	0.854	1.322	0.093	
08/9/97	132	1.320	1.361	1.370	0.866	1.343	0.093	
15/9/97	139	1.380	1.422	1.430	0.918	1.421	0.094	
22/9/97	146	1.439	1.481	1.489	0.948	1.468	0.095	
29/9/97	153	1.498	1.540	1.547	0.995	1.540	0.095	
06/10/97	160	1.556	1.598	1.605	1.016	1.573	0.096	
13/10/97	167	1.613	1.655	1.661	1.105	1.707	0.097	
20/10/97	174	1.669	1.710	1.717	1.126	1.743	0.097	
27/10/97	181	1.725	1.765	1.771	1.147	1.778	0.098	
11/11/97	196	1.891	1.881	1.885	1.222	1.882	0.099	
18/12/97	233	2.115	2.149	2.150	1.362	2.108	0.091	
19/11/98	265	2.337	2.365	2.363	1.498	2.319	0.093	
17/12/98	294	2.528	2.549	2.543	1.613	2.497	0.095	
02/11/98	307	2.618	2.628	2.621	1.698	2.629	0.096	
16/11/98	321	2.697	2.711	2.702	1.757	2.728	0.097	
30/11/98	335	2.782	2.792	2.781	1.824	2.824	0.098	
20/11/98	356	2.966	2.969	2.896	1.870	2.895	0.099	
27/11/98	363	2.946	2.947	2.933	1.903	2.946	0.099	
18/11/98	384	3.064	3.058	3.041	1.911	2.958	0.099	
15/11/98	412	3.215	3.200	3.180	2.063	3.194	0.092	
17/11/98	444	3.389	3.354	3.329	2.109	3.265	0.093	
28/11/98	455	3.435	3.405	3.378	2.221	3.438	0.094	
19/11/98	477	3.542	3.505	3.475	2.279	3.528	0.095	
01/11/98	490	3.604	3.562	3.530	2.327	3.602	0.096	
17/11/98	506	3.678	3.630	3.596	2.354	3.644	0.096	
15/11/98	534	3.804	3.745	3.707	2.421	3.748	0.097	
19/11/98	569	3.954	3.883	3.840	2.497	3.865	0.099	
17/12/98	597	4.069	3.987	3.940	2.600	4.025	0.040	
15/11/99	626	4.184	4.091	4.040	2.676	4.142	0.041	
18/12/99	660	4.313	4.207	4.151	2.719	4.289	0.042	
17/11/99	687	4.411	4.296	4.236	2.754	4.263	0.043	
14/11/99	715	4.509	4.384	4.320	2.837	4.392	0.044	
18/11/99	749	4.624	4.486	4.418	2.947	4.562	0.046	
17/11/99	779	4.722	4.572	4.501	3.010	4.668	0.047	
15/11/99	807	4.809	4.650	4.575	3.069	4.751	0.048	
12/11/99	835	4.894	4.725	4.646	3.168	4.864	0.049	
15/11/99	869	4.994	4.812	4.729	3.259	5.045	0.050	
17/11/99	932	5.168	4.965	4.874	3.417	5.298	0.053	
15/12/99	960	5.241	5.029	4.935	3.439	5.324	0.053	
01/11/00	990	5.318	5.095	4.997	3.485	5.395	0.054	
02/11/00	1027	5.399	5.165	5.064	3.519	5.447	0.054	
03/11/00	1052	5.468	5.225	5.120	3.597	5.568	0.056	
04/11/00	1084	5.542	5.289	5.181	3.629	5.618	0.056	
		Desvio (%) 3 anos	-1.35	-5.88	-7.78			
		Desvio (%) 2 anos		-8.18	-1.67			

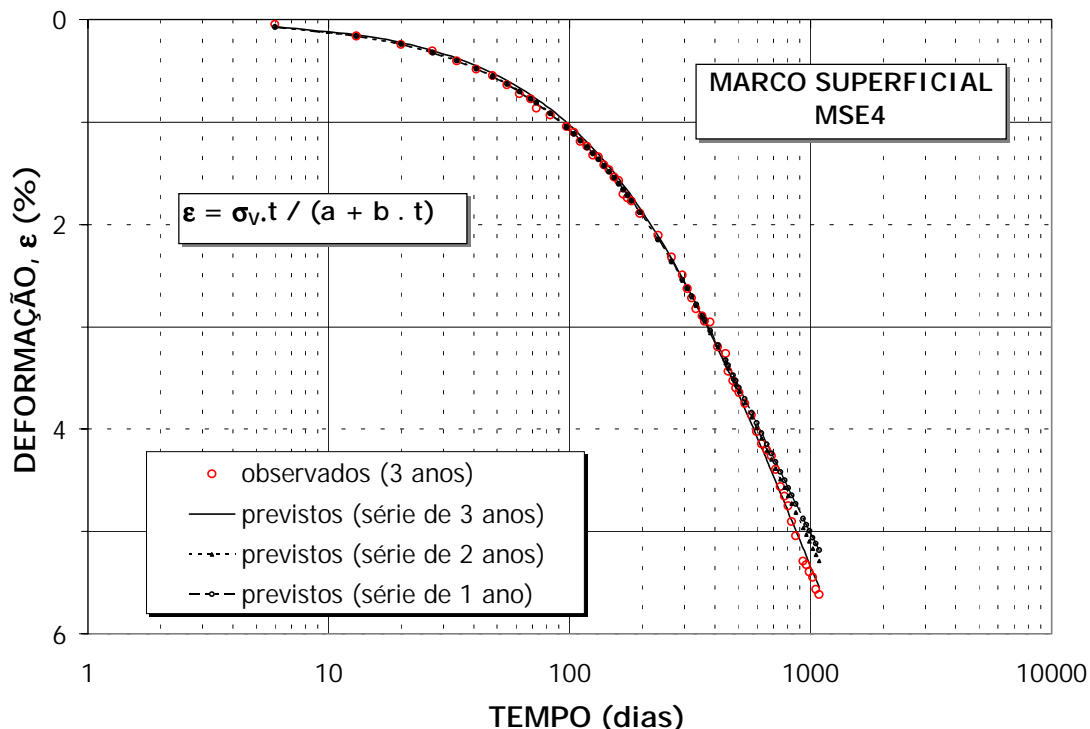


Figura 5.1.8 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos com o modelo hiperbólico.

Tabela 5.1.5 – Resultados de aplicação do modelo hiperbólico.

PROPOSTA BASEADA EM FUNÇÕES HIPERBÓLICAS									
PONTO	H (m)	σ'_v (kPa)	DESVIO DE RECALQUES, D (%)			PARÂMETROS			
			D ₁₋₃	D ₂₋₃	D ₃₋₃	a	ρ_0 (%/dia)	b	ϵ_{ult}
<i>MARCOS SUPERFICIAIS</i>									
MS01	63.199	239.900	-4.12	-6.49	-2.38	3.56E+06	6.74E-03	2.25E+03	1.07E-01
MS02	63.385	253.934	-7.77	-4.90	-1.98	2.87E+06	8.84E-03	2.21E+03	1.15E-01
MS03	64.232	254.630	-12.42	-9.85	-3.71	2.82E+06	9.03E-03	2.51E+03	1.01E-01
MS04	64.599	254.327	-7.78	-5.86	-1.35	2.21E+06	1.15E-02	2.55E+03	9.97E-02
MS05	60.930	252.959	0.80	-4.01	-1.11	2.39E+06	1.06E-02	2.79E+03	9.07E-02
MS06	59.663	249.603	3.73	-1.01	-1.11	1.83E+06	1.36E-02	2.65E+03	9.42E-02
MS07	58.583	245.611	1.29	-1.71	-1.15	1.51E+06	1.63E-02	2.18E+03	1.13E-01
MS08	58.943	243.163	9.61	-1.17	-0.90	2.76E+06	8.81E-03	2.08E+03	1.17E-01
MS09	66.021	261.001	0.97	-0.74	-0.65	1.61E+06	1.62E-02	2.43E+03	1.07E-01
MS10	54.777	243.464	5.39	-2.66	-0.43	2.80E+06	8.70E-03	1.59E+03	1.53E-01
MS11	67.082	263.735	3.67	1.4	0.06	1.78E+06	1.48E-02	2.47E+03	1.07E-01
MS12	68.302	266.092	-4.42	1.21	0.22	1.81E+06	1.47E-02	2.17E+03	1.23E-01
MS13	50.985	236.873	39.38	11.05	1.9	2.44E+06	9.71E-03	1.88E+03	1.26E-01
MS14	64.195	259.394	2.94	-0.21	-0.4	1.62E+06	1.60E-02	2.15E+03	1.21E-01
MS18	47.057	218.293	7.69	0.48	-1.05	2.96E+06	7.37E-03	1.94E+03	1.13E-01
MS20	51.483	229.564	-3.28	-3.56	-1.71	2.21E+06	1.04E-02	2.04E+03	1.13E-01
MS21	70.121	264.318	-0.05	-3.99	-1.71	2.22E+06	1.19E-02	2.22E+03	1.19E-01
MS22	69.154	261.635	-14.01	-5.83	-2.13	2.32E+06	1.13E-02	2.46E+03	1.06E-01
Média	-	249.916	1.20	-2.10	-1.09	2.32E+06	1.15E-02	2.25E+03	1.12E-01
Desvio padrão	-	12.988	11.54	4.44	1.20	5.65E+05	3.11E-03	2.97E+02	1.39E-02
<i>PLACAS DE RECALQUE</i>									
			D _{1-2,3}	D _{2,3-2,3}					
PR1	58.420	247.062	-23.50	-8.42	-	1.75E+06	1.41E-02	2.47E+03	1.00E-01
PR2	54.975	245.456	-16.45	-5.91	-	1.70E+06	1.44E-02	2.14E+03	1.15E-01
PR3	53.933	244.130	-21.72	-8.12	-	1.79E+06	1.36E-02	2.22E+03	1.10E-01
PR4	53.963	242.830	-11.25	-4.25	-	1.57E+06	1.55E-02	1.99E+03	1.22E-01
PR5	56.708	242.117	-19.04	-6.20	-	1.51E+06	1.60E-02	2.13E+03	1.14E-01
PR6	56.825	247.480	-23.43	-8.72	-	1.67E+06	1.48E-02	2.28E+03	1.09E-01
PR7	57.110	248.825	-	0.07	-	1.57E+06	1.58E-02	1.65E+03	1.51E-01
PR8	56.735	246.183	-25.14	-7.23	-	1.59E+06	1.55E-02	1.92E+03	1.28E-01
Média	-	245.510	-20.08	-6.10	-	1.64E+06	1.50E-02	2.10E+03	1.18E-01
Desvio padrão	-	2.340	4.89	2.91	-	9.87E+04	8.63E-04	2.49E+02	1.56E-02

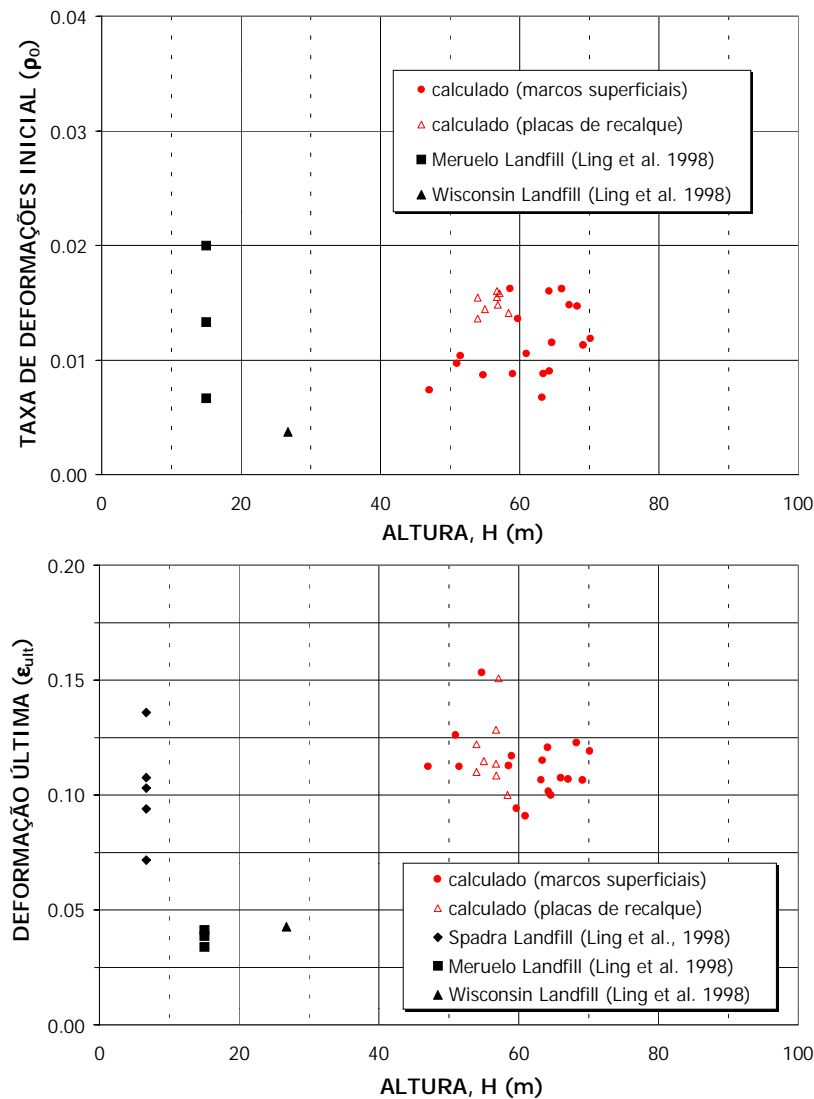


Figura 5.1.9 – Relação entre a taxa de deformação inicial (ρ_0), a deformação última esperada (ϵ_{ult}) e a altura do maciço (H) a partir do modelo hiperbólico.

- d) *Modelo de GIBSON & LO*: EDIL et al. (1990) propuseram o uso do modelo reológico apresentado por GIBSON & LO (1961) para previsão da compressão secundária de argilas, conforme descrito no item 2.3.3. Novamente, a escolha do tempo inicial (t_0) tem grande influência nos resultados, conforme discutido no item 5.1.3. No presente estudo, o tempo t_0 foi definido como o tempo correspondente ao início das leituras de campo. A Figura 5.1.10 apresenta as curvas recalque vs. tempo observadas e previstas (séries de 1, 2 e 3 anos) para o marco superficial MSE4, cujas características básicas já foram apresentadas na Tabela 5.1.4. A Tabela 5.1.6, por sua vez, apresenta os desvios de recalque e os parâmetros do modelo obtidos para o conjunto de monumentos testados. A Figura 5.1.11 compara os parâmetros obtidos (coeficientes de compressibilidade primária e secundária e taxa de compressão secundária) com os reportados na literatura para outros aterros sanitários.

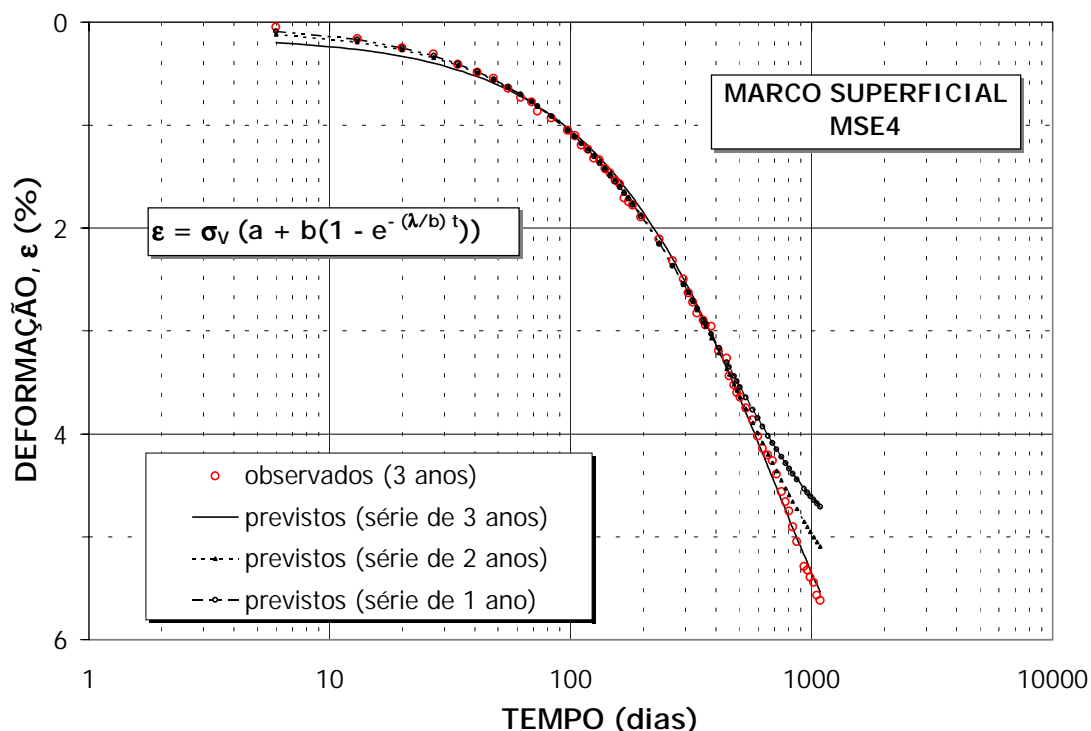


Figura 5.1.10 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos com o modelo de GIBSON & LO (1961).

Tabela 5.1.6 – Resultados de aplicação do modelo de GIBSON & LO (1961).

MODELO DE GIBSON & LO								
PONTO	H (m)	σ_v' (kPa)	DESVIO DE RECALQUES, D (%)			PARÂMETROS		
			D ₁₋₃	D ₂₋₃	D ₃₋₃	a(1/kPa)	b(1/kPa)	λ/b (1/dia)
<i>MARCOS SUPERFICIAIS</i>								
MS01	63.199	239.900	-8.34	-9.12	-2.50	1.63E-06	2.80E-04	9.38E-04
MS02	63.385	253.934	-14.39	-7.90	-2.06	2.87E-06	2.95E-04	1.07E-03
MS03	64.232	254.630	-20.57	-13.70	-3.23	5.10E-06	2.37E-04	1.12E-03
MS04	64.599	254.327	-16.23	-9.34	-1.47	5.37E-06	2.69E-04	1.43E-03
MS05	60.930	252.959	-3.99	-8.17	-1.69	3.40E-06	2.42E-04	1.52E-03
MS06	59.663	249.603	-1.27	-5.82	-2.45	2.78E-06	2.59E-04	1.87E-03
MS07	58.583	245.611	-5.54	-6.34	-2.33	4.14E-06	3.16E-04	1.84E-03
MS08	58.943	243.163	5.96	-4.06	-1.65	1.19E-07	2.99E-04	1.17E-03
MS09	66.021	261.001	-7.03	-5.34	-1.94	3.73E-06	2.84E-04	1.90E-03
MS10	54.777	243.464	2.34	-4.87	-0.82	5.40E-07	3.80E-04	9.08E-04
MS11	67.082	263.735	-2.81	-2.96	-1.39	1.96E-06	2.75E-04	1.83E-03
MS12	68.302	266.092	2.73	-3.31	-1.10	1.10E-06	3.06E-04	1.67E-03
MS13	50.985	236.873	39.10	8.92	0.80	-	3.26E-04	1.22E-03
MS14	64.195	259.394	-4.75	-4.73	-1.66	2.64E-06	3.15E-04	1.76E-03
MS18	47.057	218.293	4.69	-1.69	-1.72	-	3.13E-04	1.05E-03
MS20	51.483	229.564	-10.59	-6.79	-2.25	2.40E-06	3.20E-04	1.30E-03
MS21	70.121	264.318	-2.13	-7.24	-2.14	3.44E-06	2.99E-04	1.35E-03
MS22	69.154	261.635	-21.45	-7.98	-2.15	5.29E-06	2.77E-04	1.33E-03
Média	-	249.916	-3.57	-5.58	-1.76	2.91E-06	2.94E-04	1.40E-03
Desvio padrão	-	12.988	13.37	4.58	0.85	1.61E-06	3.37E-05	3.37E-04
<i>PLACAS DE RECALQUE</i>								
			D _{1-2,3}	D _{2,3-2,3}				
PR1	58.420	247.062	-31.96	-5.62	-	6.86E-06	3.05E-04	1.51E-03
PR2	54.975	245.456	-23.05	-4.84	-	4.56E-06	3.25E-04	1.57E-03
PR3	53.933	244.130	-29.49	-5.72	-	6.31E-06	3.32E-04	1.40E-03
PR4	53.963	242.830	-18.72	-4.03	-	3.48E-06	3.38E-04	1.69E-03
PR5	56.708	242.117	-27.18	-4.05	-	7.14E-06	3.46E-04	1.57E-03
PR6	56.825	247.480	-31.47	-5.67	-	7.98E-06	3.35E-04	1.43E-03
PR7	57.110	248.825	-	0.03	-	2.11E-07	3.80E-04	1.63E-03
PR8	56.735	246.183	-33.17	-4.20	-	7.81E-06	3.98E-04	1.29E-03
Média	-	245.510	-27.86	-4.26	-	5.54E-06	3.45E-04	1.51E-03
Desvio padrão	-	2.340	5.29	1.88	-	2.66E-06	3.01E-05	1.31E-04

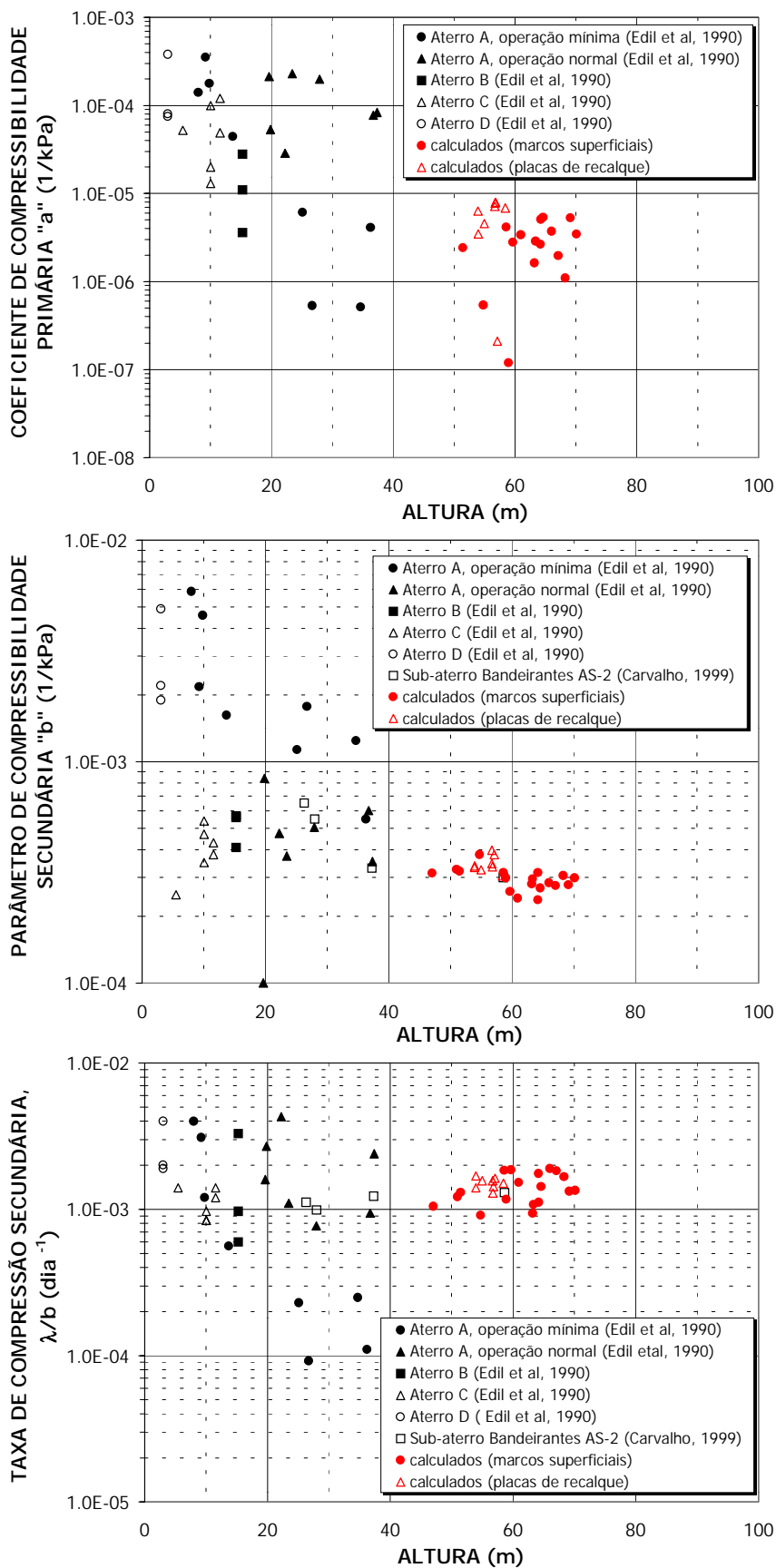


Figura 5.1.11 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo de GIBSON & LO (1961) e a altura do maciço (H).

A análise dos resultados permitiu observar uma boa aderência entre os valores observados e os calculados, notadamente para os marcos superficiais e quando considerada a série completa de leituras. Desvios maiores foram observados quando utilizadas as séries de 1 e 2 anos de leitura. A utilização desta proposta, acrescida de alguns ajustes, poderia, portanto, ser recomendada para previsão de recalques no presente caso de estudo. Os resultados obtidos não permitem confirmar a tendência de redução dos coeficientes de compressibilidade primária (a) e secundária (b) com o aumento da altura dos maciços e tensões verticais, conforme sugerido por EDIL et al. (1990). A taxa de compressão secundária (λ/b), por sua vez, não parece ser influenciada pela altura dos maciços, apresentando valor próximo a 10^{-3} dia^{-1} para a grande maioria dos pontos testados e reportados na literatura. Tal parâmetro deve ter sua lei de variação provavelmente associada e governada pelos processos de biodegradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos aterrados.

- e) *Propostas baseadas em Funções de Potência*: EDIL et al. (1990) também propuseram a utilização de funções de potência para previsão de recalques em aterros sanitários, conforme descrito no item 3.3.4. O tempo t_0 , utilizado para verificação do desempenho desta proposta, foi igualmente definido como o tempo correspondente ao início das leituras de campo. O tempo de referência (t_r), por sua vez, foi assumido igual a 1 dia, à semelhança da formulação original apresentada pelos autores.

A Figura 5.1.12 apresenta as curvas recalque vs. tempo observadas e previstas (séries de 1, 2 e 3 anos) para o marco superficial MSE4, cujas características básicas estão apresentadas na Tabela 5.1.4. A Tabela 5.1.7 sumariza os desvios de recalque e os parâmetros do modelo obtidos para o conjunto de pontos de controle testados. A Figura 5.1.13, por sua vez, compara os parâmetros obtidos para o modelo com os reportados na literatura para outros aterros sanitários.

A aplicação desta proposta, para os marcos superficiais e para todas as séries de tempo, mostrou uma menor concordância entre os dados observados e os calculados, quando comparada com o desempenho dos modelos hiperbólicos e o de GIBSON & LO (1961). Para as placas de recalque, por outro lado, o emprego deste modelo apresentou resultados bem razoáveis, podendo este comportamento ser um importante indicativo da adequabilidade desta proposta para condições de carregamento direto. Os parâmetros de compressibilidade do modelo não se mostraram sensíveis à altura do maciço, tendo sido observadas taxas de compressão (n) similares às reportadas na literatura e parâmetros de compressibilidade (m) situados no limite inferior da faixa indicada por outros autores.

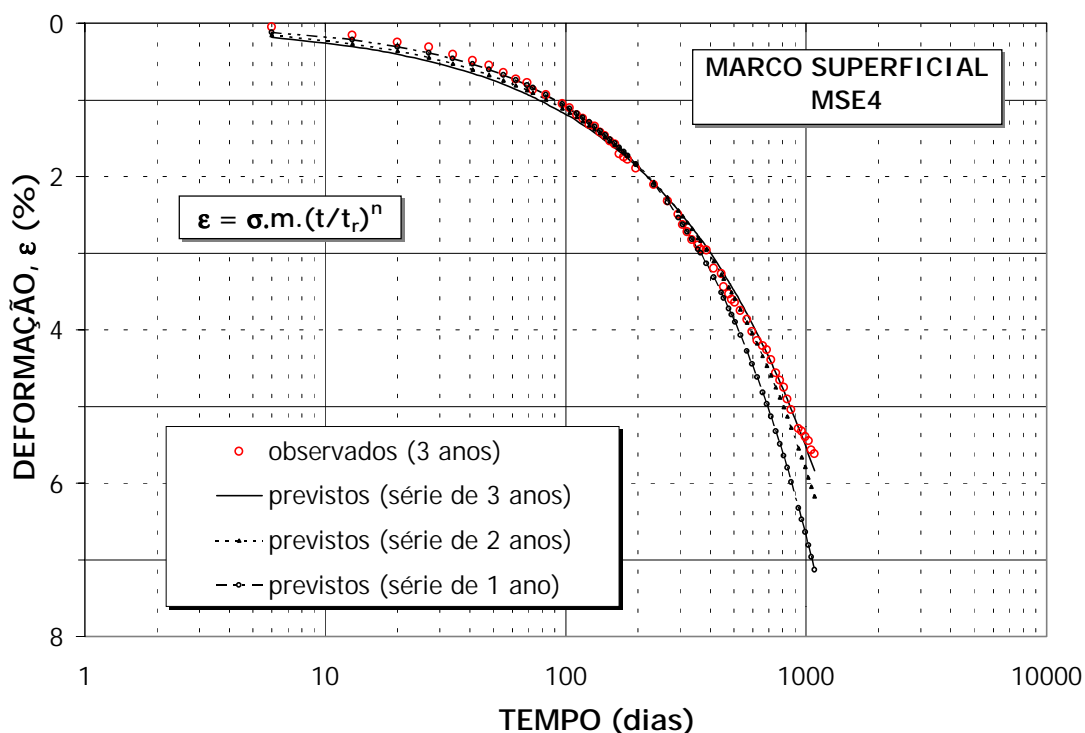


Figura 5.1.12 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir de modelos baseados em funções de potência.

Tabela 5.1.7 – Resultados de aplicação do modelo baseado em funções de potência.

PROPOSTA BASEADA EM FUNÇÕES DE POTÊNCIA							
PONTO	H (m)	σ_v' (kPa)	DESVIO DE RECALQUES, D (%)			PARÂMETROS	
			D ₁₋₃	D ₂₋₃	D ₃₋₃	m (1/kPa)	n ($t_r = 1$ dia)
<i>MARCOS SUPERFICIAIS</i>							
MS01	63.199	239.900	20.64	5.41	1.16	8.60E-07	0.7703
MS02	63.385	253.934	20.18	7.82	2.07	1.22E-06	0.7391
MS03	64.232	254.630	18.30	4.07	0.53	1.43E-06	0.7102
MS04	64.599	254.327	26.94	9.89	3.96	2.14E-06	0.6689
MS05	60.930	252.959	33.97	11.75	4.29	1.99E-06	0.6675
MS06	59.663	249.603	39.59	15.99	5.10	2.96E-06	0.6320
MS07	58.583	245.611	37.78	15.29	5.03	3.59E-06	0.6320
MS08	58.943	243.163	31.71	11.50	3.34	1.22E-06	0.7467
MS09	66.021	261.001	38.55	16.56	5.70	3.46E-06	0.6244
MS10	54.777	243.464	25.41	8.52	3.02	9.99E-07	0.7890
MS11	67.082	263.735	39.33	18.13	6.20	2.92E-06	0.6413
MS12	68.302	266.092	40.56	17.14	5.96	2.59E-06	0.6679
MS13	50.985	236.873	45.78	22.62	6.71	1.32E-06	0.7521
MS14	64.195	259.394	38.31	16.35	5.59	3.13E-06	0.6483
MS18	47.057	218.293	28.26	11.76	2.88	1.02E-06	0.7709
MS20	51.483	229.564	27.09	10.48	3.00	1.78E-06	0.7111
MS21	70.121	264.318	29.95	10.62	3.21	1.90E-06	0.6961
MS22	69.154	261.635	19.21	8.96	2.82	1.92E-06	0.6833
Média	-	249.916	31.20	12.38	3.92	2.03E-06	0.6973
Desvio padrão	-	12.988	8.45	4.82	1.77	8.87E-07	0.0536
<i>PLACAS DE RECALQUE</i>							
			D _{1-2,3}	D _{2,3-2,3}			
PR1	58.420	247.062	2.76	0.02	-	1.94E-06	0.7157
PR2	54.975	245.456	9.29	2.25	-	1.83E-06	0.7368
PR3	53.933	244.130	3.50	-0.38	-	1.76E-06	0.7357
PR4	53.963	242.830	14.76	4.30	-	1.97E-06	0.7378
PR5	56.708	242.117	6.74	2.43	-	2.19E-06	0.7191
PR6	56.825	247.480	1.96	-0.62	-	2.00E-06	0.7200
PR7	57.110	248.825	-	1.48	-	1.78E-06	0.7553
PR8	56.735	246.183	-0.22	-0.75	-	1.98E-06	0.7357
Média	-	245.510	5.54	1.09	-	1.93E-06	0.7320
Desvio padrão	-	2.340	5.14	1.82	-	1.40E-07	0.0131

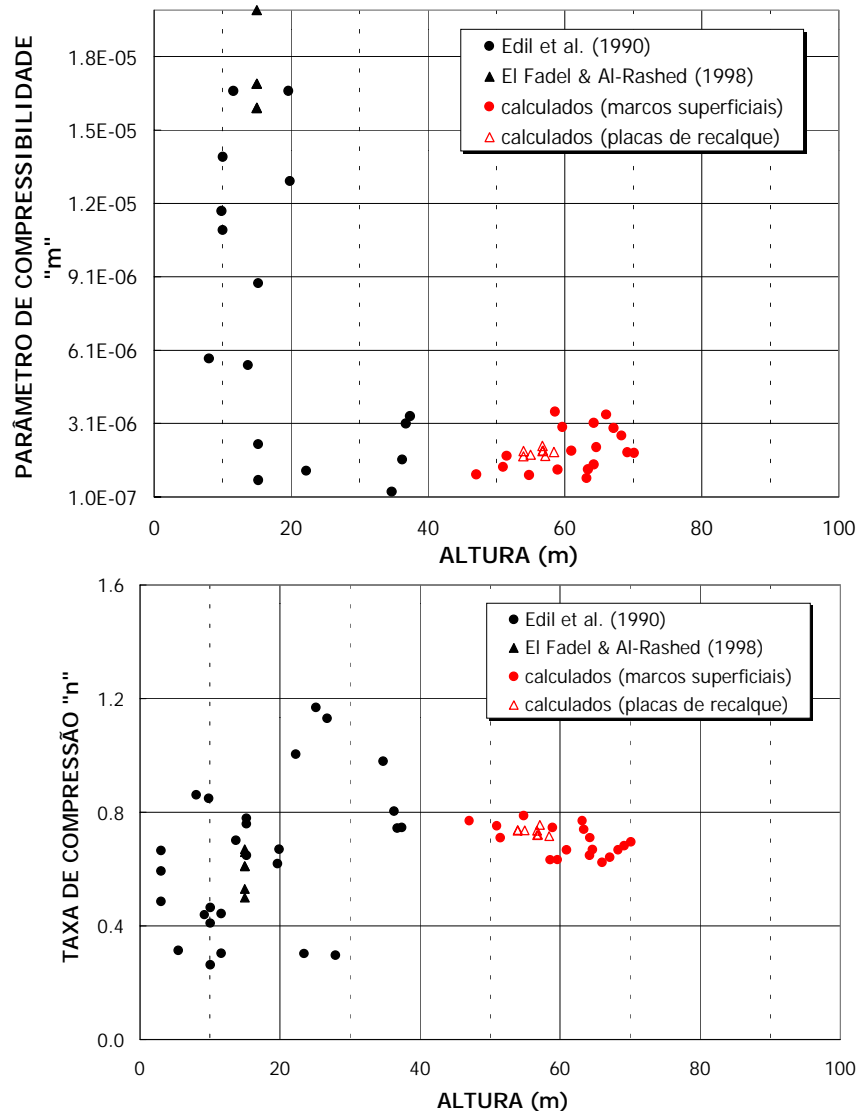


Figura 5.1.13 - – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo baseado em funções de potência e a altura do maciço (H).

f) *Modelo de EDGERS et al. (1992)*: Neste modelo, a previsão de recalques é realizada baseada na “rate process theory”, complementada por uma nova componente que tem em conta os mecanismos de biodegradação dos resíduos, conforme descrito no item 2.3.6. Neste caso, o tempo inicial (t_0) foi definido como sendo o de início das leituras de campo. A Figura 5.1.14 apresenta as curvas recalque vs. tempo observadas e previstas (séries de 1, 2 e 3 anos) para o marco superficial MSE4, cujas características básicas estão apresentadas na Tabela 5.1.4. A Tabela 5.1.8 sumariza os desvios de recalque e os parâmetros da proposta obtidos para os instrumentos testados. A Figura 5.1.15, por sua vez, compara o parâmetro m e a componente Ae^{at} obtidos para o modelo com os reportados na literatura para outros aterros sanitários.

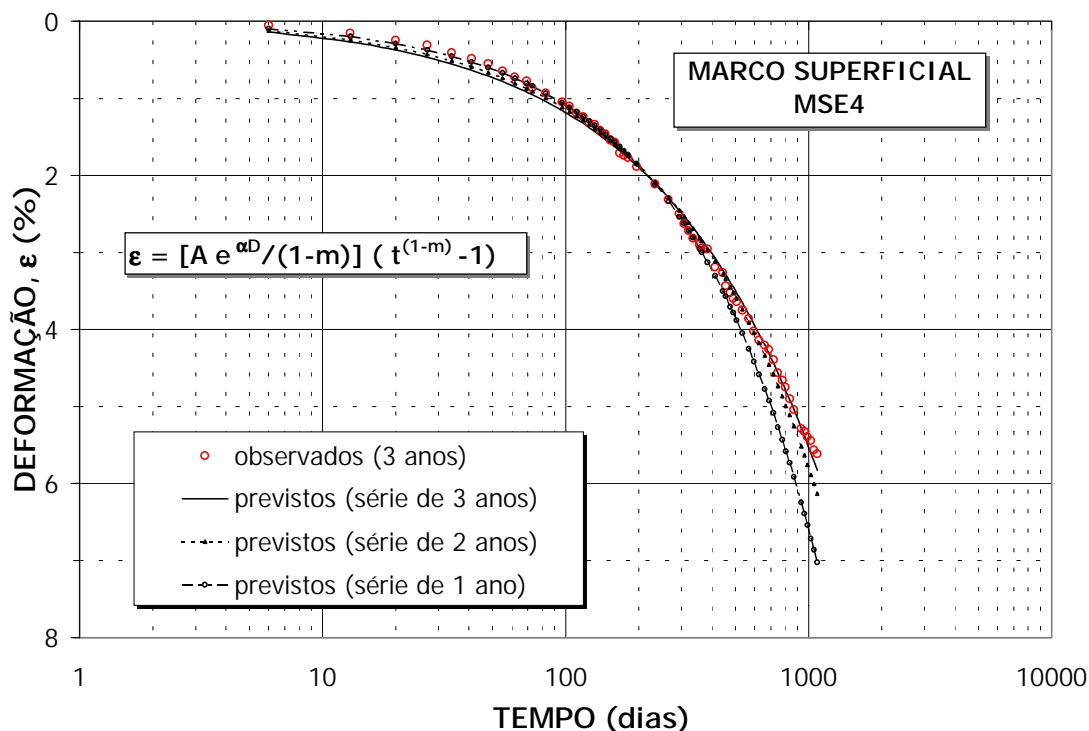


Figura 5.1.14 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir do modelo de EDGERS et al. (1992).

Tabela 5.1.8 – Resultados da aplicação do modelo de EDGERS et al (1992).

MODELO DE EDGERS et al.									
PONTO	H (m)	σ _v ' (kPa)	DESVIO DE RECALQUES, D (%)				PARÂMETROS		
			D ₁₋₃	D ₂₋₃	D ₃₋₃	A	α	m	Ae ^{αD} (%/ano)
MARCOS SUPERFICIAIS									
MS01	63.199	239.900	19.29	4.85	0.96	1.91E-11	6.67E-02	0.2398	6.20
MS02	63.385	253.934	18.63	7.21	1.84	1.05E-11	6.68E-02	0.2729	9.01
MS03	64.232	254.630	16.40	3.30	0.27	1.08E-11	6.70E-02	0.3036	10.11
MS04	64.599	254.327	25.03	9.16	3.78	1.36E-11	6.77E-02	0.3486	14.91
MS05	60.930	252.959	32.07	10.86	3.92	1.40E-11	6.76E-02	0.3502	13.64
MS06	59.663	249.603	37.50	14.98	4.64	2.08E-11	6.83E-02	0.3897	19.24
MS07	58.583	245.611	35.63	14.27	4.57	2.90E-11	6.88E-02	0.3896	23.09
MS08	58.943	243.163	30.50	10.94	3.12	1.93E-11	6.72E-02	0.2649	8.80
MS09	66.021	261.001	36.28	15.51	5.22	1.19E-11	6.82E-02	0.3981	23.36
MS10	54.777	243.464	24.25	8.03	2.84	1.73E-11	6.69E-02	0.2202	7.48
MS11	67.082	263.735	37.28	17.19	5.76	9.41E-12	6.79E-02	0.3793	20.56
MS12	68.302	266.092	38.79	16.29	5.57	7.84E-12	6.76E-02	0.3501	18.56
MS13	50.985	236.873	44.84	22.15	6.46	2.88E-11	6.75E-02	0.2599	9.24
MS14	64.195	259.394	36.29	15.42	5.16	1.26E-11	6.81E-02	0.3716	21.60
MS18	47.057	218.293	27.06	11.26	2.67	7.02E-11	6.77E-02	0.2395	6.71
MS20	51.483	229.564	25.41	9.77	2.71	5.00E-11	6.82E-02	0.3031	11.50
MS21	70.121	264.318	28.29	9.86	2.91	7.37E-12	6.72E-02	0.3190	13.92
MS22	69.154	261.635	17.15	8.15	2.50	8.34E-12	6.73E-02	0.3327	13.51
Média	-	249.916	29.48	11.62	3.61	2.00E-11	6.76E-02	0.3185	13.969
Desvio padrão	-	12.988	8.41	4.76	1.70	1.63E-11	5.77E-04	0.0579	5.804
PLACAS DE RECALQUE									
			D _{1-2,3}	D _{2-3,3}					
PR1	58.420	247.062	0.45	-0.67	-	1.96E-11	6.79E-02	0.3043	13.81
PR2	54.975	245.456	7.32	1.63	-	2.10E-11	6.79E-02	0.2809	13.26
PR3	53.933	244.130	1.47	-0.97	-	2.21E-11	6.79E-02	0.2817	12.76
PR4	53.963	242.830	12.91	3.65	-	2.55E-11	6.81E-02	0.2802	14.15
PR5	56.708	242.117	4.63	1.75	-	2.79E-11	6.83E-02	0.3007	15.48
PR6	56.825	247.480	-1.25	-0.21	-	1.95E-11	6.80E-02	0.2988	14.48
PR7	57.110	248.825	-	1.19	-	1.71E-11	6.78E-02	0.2603	13.24
PR8	56.735	246.183	-2.32	-1.33	-	2.10E-11	6.80E-02	0.2822	14.28
Média	-	245.510	3.32	0.63	-	2.17E-11	6.80E-02	0.286	13.932
Desvio padrão	-	2.340	5.39	1.71	-	3.47E-12	1.55E-04	0.014	0.860

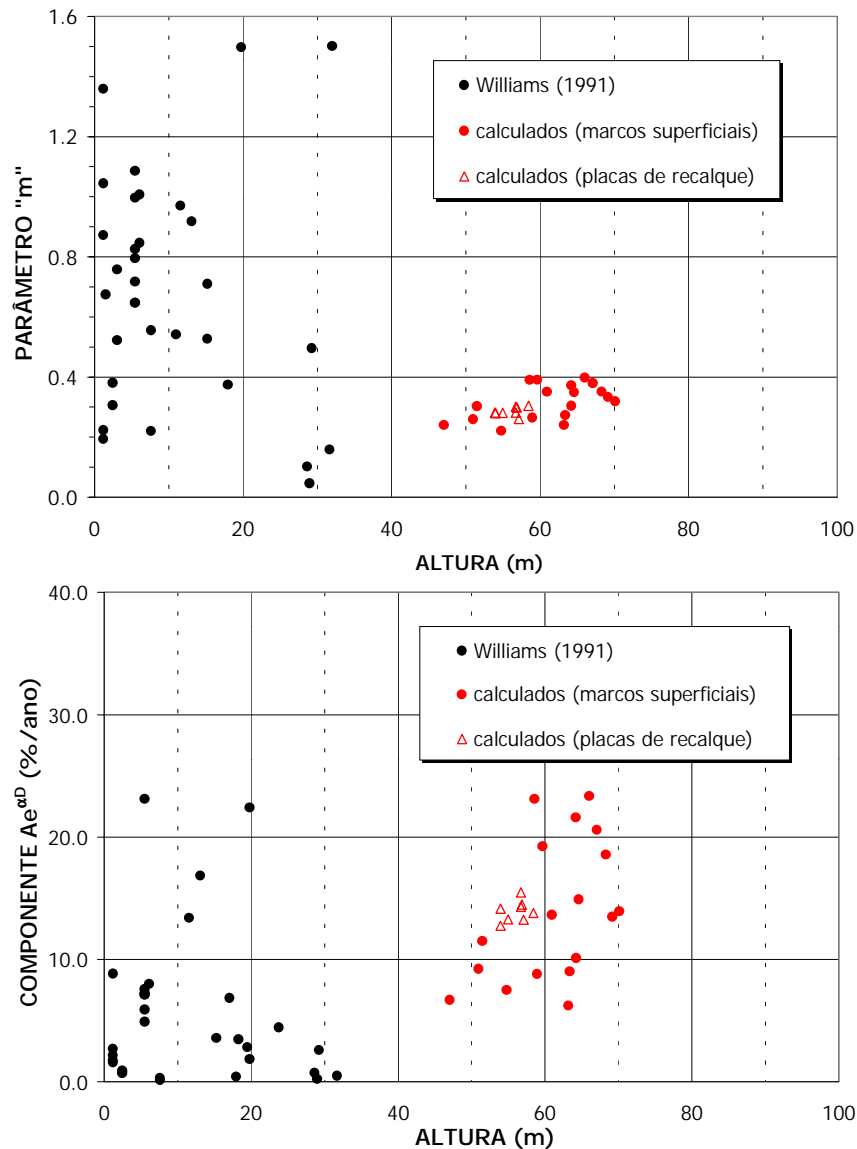


Figura 5.1.15 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo de EDGERS et al. (1992) e a altura do maciço (H).

O desempenho deste modelo com os dados do Aterro Sanitário Bandeirantes foi similar ao obtido com a aplicação de funções de potência, ou seja, boa concordância entre os valores observados e os previstos quando analisadas as placas de recalque e maiores desvios de recalques no caso dos marcos superficiais. A componente $Ae^{\alpha D}$ do modelo acaba representando a taxa de deformação no tempo t_1 , aqui assumido igual a 1, enquanto o parâmetro m corresponde à razão de incremento da taxa de deformação com o tempo. Os valores reportados na literatura para tais parâmetros são bem dispersos e relativos a aterros de menor altura, não tendo sido observado nenhuma tendência de comportamento dos mesmos quando correlacionados com a altura dos maciços.

g) *Modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990)*: Nesta proposta, dois coeficientes são utilizados para reproduzir as fases de compressão secundária dos resíduos sólidos. A definição do tempo inicial (t_0) influencia sobremaneira os resultados, tendo aqui sido assumida a data inicial das leituras de campo como base de partida para este modelo. Os coeficientes de compressão secundária $C_{\alpha 1}$ e $C_{\alpha 2}$, assim como o tempo t_k (tempo de transição entre as fases de compressão secundária) foram definidos por ajustes matemáticos utilizando o método dos mínimos quadrados. A Tabela 5.1.9 sumariza os desvios de recalque e os coeficientes obtidos para os pontos de controle testados, estes últimos admitindo as séries completas de tempo. A Figura 5.1.16 apresenta as curvas recalque vs. tempo observadas e previstas (séries de 1, 2 e 3 anos) para o marco superficial MSE4, assim como os parâmetros obtidos. A Figura 5.1.17 compara os coeficientes $C_{\alpha 1}$ e $C_{\alpha 2}$ obtidos no presente estudo com os reportados na literatura para outros aterros sanitários.

Tabela 5.1.9 - Resultados da aplicação do modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990).

<i>MODELO DE BJARNGARD & EDGERS</i>								
PONTO	H (m)	σ_v' (kPa)	DESVIO DE RECALQUES, D (%)			PARÂMETROS		
			D ₁₋₃	D ₂₋₃	D ₃₋₃	C _{$\alpha 1$}	C _{$\alpha 2$}	t _k (dias)
<i>MARCOS SUPERFICIAIS</i>								
MS01	63.199	239.900	-10.70	-6.54	0.17	0.0067	0.0465	198.2
MS02	63.385	253.934	-13.83	-4.66	0.83	0.0086	0.0542	191.1
MS03	64.232	254.630	-12.65	-6.66	0.13	0.0091	0.0506	191.1
MS04	64.599	254.327	-4.30	-1.55	4.01	0.0114	0.0538	176.4
MS05	60.930	252.959	-2.41	-1.17	3.23	0.0093	0.0481	163.2
MS06	59.663	249.603	3.55	3.09	4.38	0.0117	0.0514	147.8
MS07	58.583	245.611	2.50	3.10	4.86	0.0143	0.0619	151.2
MS08	58.943	243.163	-7.32	-2.84	1.93	0.0083	0.0539	181.8
MS09	66.021	261.001	5.58	4.92	5.77	0.0141	0.0595	149.3
MS10	54.777	243.464	-14.19	-6.34	0.92	0.0083	0.0624	194.3
MS11	67.082	263.735	5.99	5.52	5.83	0.0128	0.0584	152.0
MS12	68.302	266.092	-2.90	2.96	5.09	0.0130	0.0645	156.3
MS13	50.985	236.873	-1.16	3.34	4.29	0.0078	0.0579	164.4
MS14	64.195	259.394	2.74	3.71	5.17	0.0139	0.0655	153.9
MS18	47.057	218.293	-12.59	-3.64	0.78	0.0067	0.0491	185.9
MS20	51.483	229.564	-9.95	-2.27	2.10	0.0097	0.0564	178.8
MS21	70.121	264.318	-3.60	-2.28	2.10	0.0110	0.0609	175.0
MS22	69.154	261.635	-10.27	-1.70	2.47	0.0106	0.0565	182.3
Média	-	249.916	-4.75	-0.72	3.00	0.0104	0.0562	171.8
Desvio padrão	-	12.988	6.94	4.10	1.97	0.0025	0.0057	17.2
<i>PLACAS DE RECALQUE</i>								
			D _{1-2,3}	D _{2,3-2,3}				
PR1	58.420	247.062	-23.69	-1.68	-	0.0116	0.0703	209.9
PR2	54.975	245.456	-21.09	-1.38	-	0.0117	0.0729	196.0
PR3	53.933	244.130	-24.69	-2.47	-	0.0111	0.0735	208.4
PR4	53.963	242.830	-16.71	-1.20	-	0.0120	0.0740	180.8
PR5	56.708	242.117	-18.52	-1.08	-	0.0130	0.0754	196.6
PR6	56.825	247.480	-21.85	-2.31	-	0.0121	0.0759	212.0
PR7	57.110	248.825	-	-	-	0.0126	-	-
PR8	56.735	246.183	-21.83	-0.80	-	0.0128	0.0867	214.0
Média	-	245.510	-21.20	-1.56	-	0.0121	0.0755	202.5
Desvio padrão	-	2.340	2.79	0.63	-	0.0007	0.0053	12.0

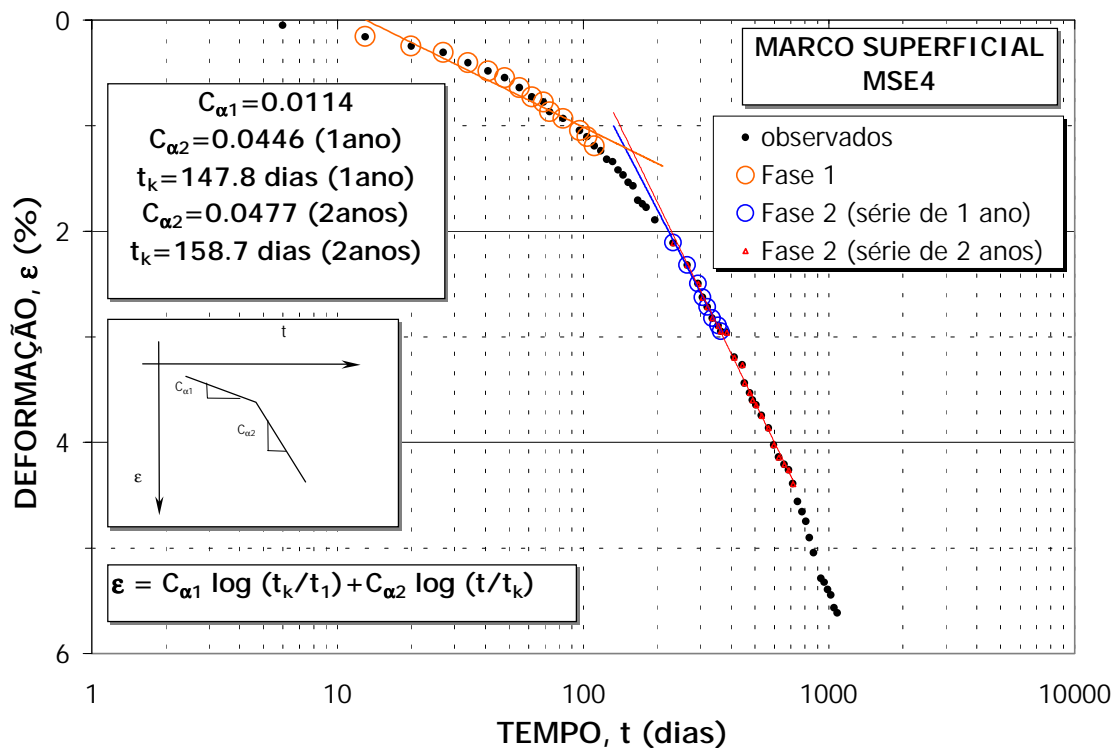
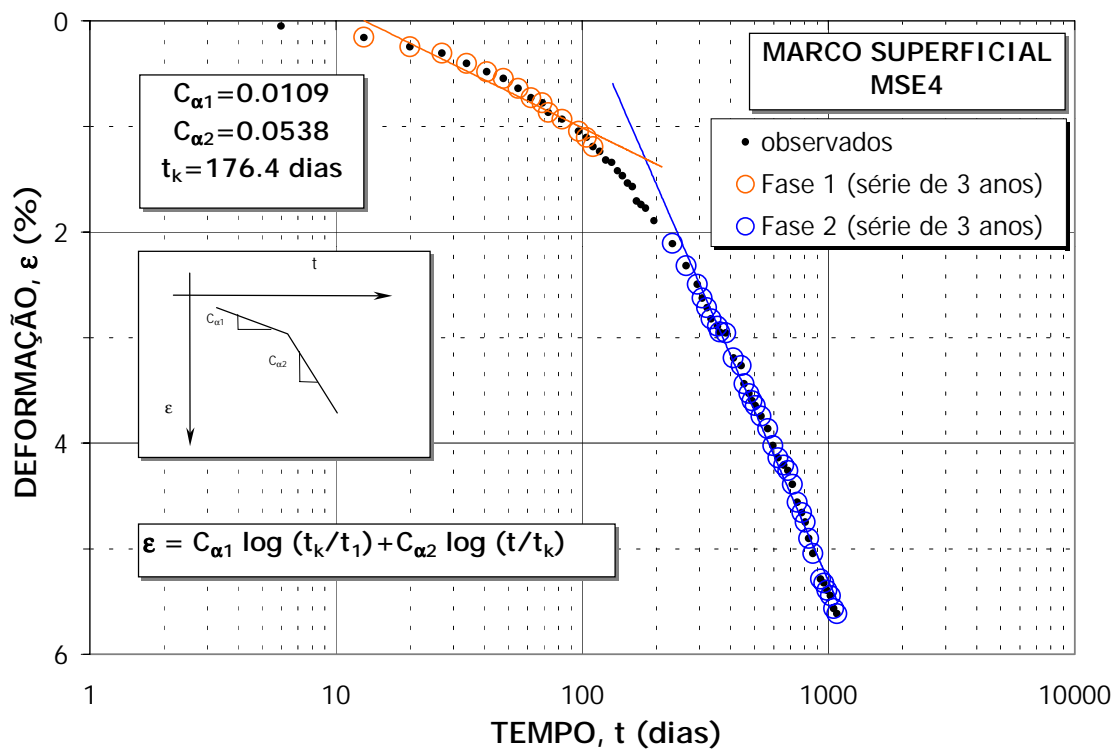


Figura 5.1.16 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir do modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990).

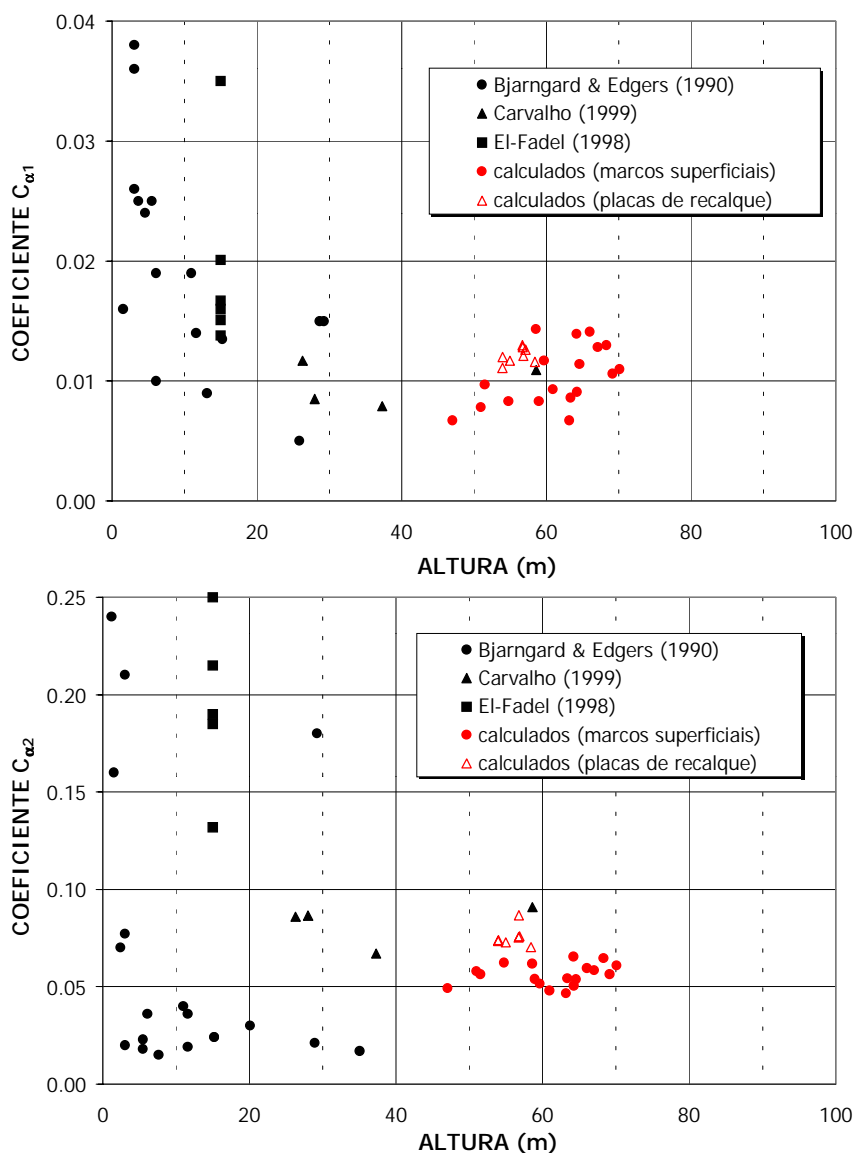


Figura 5.1.17 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990) e a altura do maciço (H).

A aplicação deste modelo resultou em boa concordância para os marcos superficiais, independente da série de tempo analisada, não tendo sido observado o mesmo desempenho para as placas de recalque. Os coeficientes de compressão secundária situaram-se dentro da faixa reportada na literatura para outros aterros sanitários, tendo sido encontrado valores médios (marcos superficiais) de 0,0104 e 0,0562, respectivamente, para os coeficientes $C_{\alpha 1}$ e $C_{\alpha 2}$. Quanto ao tempo de transição entre fases de compressão (t_k), foram encontrados valores entre 147,8 e 212,0 dias, os quais estão em acordo com as observações realizadas pelos autores da proposta. As alturas do maciço, baseado nos resultados obtidos e sistematizados, não parecem influenciar os coeficientes de compressão definidos pelo modelo, notadamente o coeficiente $C_{\alpha 2}$, o qual

deve ser preponderantemente governado pelos processos de biodegradação da matéria orgânica presente nos resíduos. O emprego deste modelo e do conceito de estágio avançado de compressão tem sido questionado, podendo as maiores inclinações e coeficientes de compressão secundária, associadas a este estágio, serem decorrentes da simples representação do fator tempo em escala logarítmica (FASSETT et al., 1994).

- h) *Estudo de COUMOULOS & KORYALOS (1997)*: esta proposta utiliza a variação da taxa de deformação vertical com o tempo para previsão de recalques secundários em aterros sanitários, conforme descrito no item 2.3.7. Os autores utilizam como tempo de início do processo de compressão (t_0) o tempo correspondente ao encerramento do aterro. Tal definição foi aqui utilizada, tendo por base as datas-marco apresentadas na Tabela 5.1.1. A escala de tempo utilizada na avaliação deste modelo foi mensal, correspondendo à leitura inicial dos recalques ao tempo 24 meses (período decorrido entre o encerramento do aterro e o início do experimento). A tabela 5.1.10 apresenta os desvios de recalque e o coeficiente de compressão secundária (C_α) obtidos para os pontos de controle testados, este último assumindo a série completa de tempo. A Figura 5.1.18 apresenta as curvas recalque vs. tempo observadas e previstas (séries de 1, 2 e 3 anos) para o marco superficial MSE4, assim como o coeficiente de compressão secundária obtido. A figura apresenta ainda curvas de referência para valores de C_α iguais a 0,07 e 0,25.

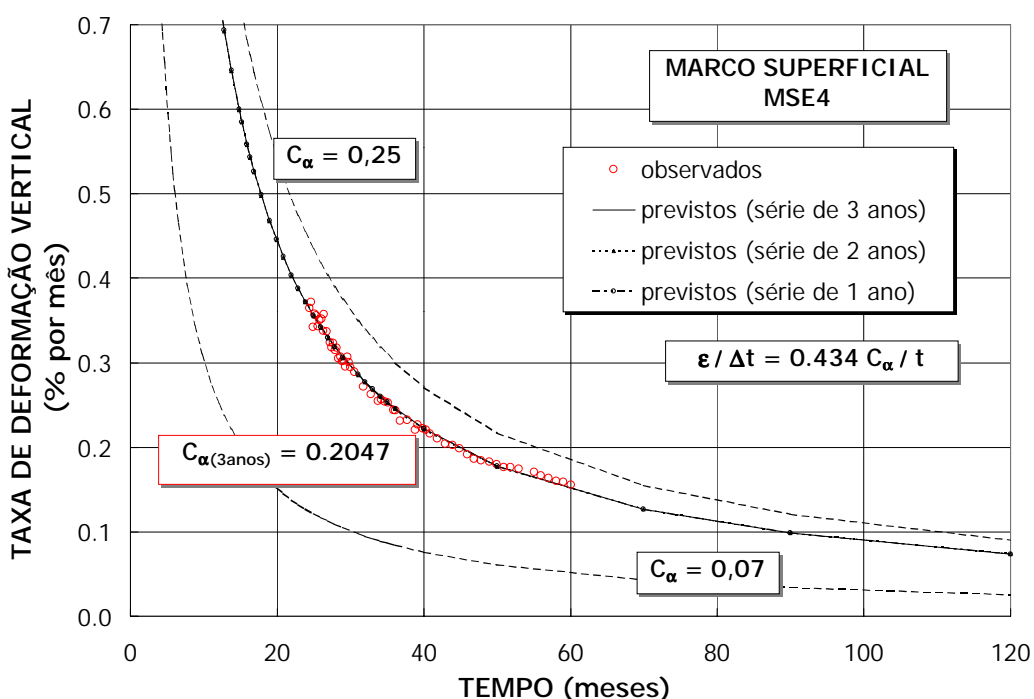


Figura 5.1.18 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir do modelo de COUMOULOS & KORYALOS (1997).

Tabela 5.1.10 - Resultados da aplicação do modelo de COUMOULOS & KORYALOS (1997).

<i>MODELO DE COUMOULOS & KORYALOS</i>						
PONTO	H (m)	σ_v' (kPa)	DESVIO DE RECALQUES, D (%)			PARÂMETROS
			D ₁₋₃	D ₂₋₃	D ₃₋₃	C _a
<i>MARCOS SUPERFICIAIS</i>						
MS01	63.199	239.900	-26.98	-25.06	-23.60	0.1301
MS02	63.385	253.934	-20.55	-19.26	-18.21	0.1673
MS03	64.232	254.630	-14.86	-14.51	-13.84	0.1710
MS04	64.599	254.327	-5.05	-5.22	-4.97	0.2047
MS05	60.930	252.959	-6.00	-5.86	-5.54	0.1856
MS06	59.663	249.603	1.29	1.05	0.91	0.2252
MS07	58.583	245.611	1.26	0.96	0.84	0.2692
MS08	58.943	243.163	-25.11	-22.79	-21.43	0.1599
MS09	66.021	261.001	3.72	3.23	2.99	0.2647
MS10	54.777	243.464	-30.33	-27.83	-26.13	0.1659
MS11	67.082	263.735	-0.80	-0.60	-0.57	0.2442
MS12	68.302	266.092	-7.44	-6.58	-6.14	0.2488
MS13	50.985	236.873	-26.30	-22.95	-21.43	0.1694
MS14	64.195	259.394	-2.63	-2.39	-2.26	0.2677
MS18	47.057	218.293	-29.18	-26.50	-24.92	0.1359
MS20	51.483	229.564	-16.94	-15.69	-14.81	0.1870
MS21	70.121	264.318	-12.28	-11.57	-10.98	0.2151
MS22	69.154	261.635	-7.97	-7.91	-7.56	0.2057
Média		249.916	-12.56	-11.64	-10.98	0.2010
Desvio padrão		12.988	11.55	10.46	9.82	0.0446
<i>PLACAS DE RECALQUE</i>						
			D _{1-2,3}	D _{2,3-2,3}		
PR1	58.420	247.062	-4.25	-4.76	-	0.2412
PR2	54.975	245.456	-8.71	-8.74	-	0.2444
PR3	53.933	244.130	-8.98	-9.21	-	0.2375
PR4	53.963	242.830	-6.41	-6.46	-	0.2633
PR5	56.708	242.117	-0.57	-1.15	-	0.2778
PR6	56.825	247.480	-3.80	-4.36	-	0.2596
PR7	57.110	248.825	-	-10.60	-	0.2702
PR8	56.735	246.183	-8.15	-8.35	-	0.2731
Média		245.510	-5.84	-6.70	-	0.2584
Desvio padrão		2.340	3.12	3.13	-	0.0155

A utilização desta solução apresentou boa concordância entre os valores observados e previstos, com desvios médios de recalques da ordem de 11% para os marcos superficiais e 6% para as placas de recalque. Os coeficientes de compressão obtidos encontram-se na faixa superior observada pelos autores da proposta, ou seja, próximos a 0,25. Tal constatação indica uma maior parcela de compressão secundária, provavelmente associada às características dos resíduos aterrados (umidade, composição, etc) e às condições ambientais aqui prevalentes (temperatura, precipitação, etc), as quais em conjunto conferem à parcela de compressão devido a biodegradação dos resíduos um papel significativo nos aterros sanitários brasileiros. Vale destacar novamente a importância da adequada definição do tempo t_0 para a correta determinação dos parâmetros do modelo.

i) *Modelo de SOWERS (1973)*: Este modelo, baseado nas formulações clássicas da mecânica dos solos, foi aqui adaptado para consideração da sobrecarga (aterro experimental) e de diferentes definições para o parâmetro tempo. A formulação utilizada procurou, basicamente, contemplar o período construtivo do aterro existente, assim como avaliar, de forma individualizada, os coeficientes de compressão secundária devido a biodegradação, daquele devido à fluência do material face ao carregamento aplicado. A formulação empregada é apresentada na seqüência, sendo as definições para os valores do parâmetro tempo, ilustrados, de forma esquemática, na Figura 5.1.19. A consideração de tensões verticais na parcela de compressão secundária devido à fluência do material faz-se necessária, tendo sido inicialmente utilizada por BURLINGAME (1985), para avaliação da estabilização de aterros sanitários com o uso de sobrecargas.

$$\varepsilon_{i,t_3} = C_c' \left[\frac{1}{H_i} \sum_1^n h_j \log \frac{\sigma_{f,j}}{\sigma_{0,j}} \right] + C_\alpha' \log \frac{t_3 - t_1}{t_2 - t_1} + C_{crp} \log \frac{t_3 - t_5}{t_4 - t_5} \left[\frac{1}{H_i} \sum_1^n h_j \log \frac{\sigma_{f,j}}{\sigma_{0,j}} \right]$$

onde:

ε_{i,t_3} = deformação sob o ponto de controle (monumento) i no tempo t_3 .

C_c' = coeficiente de compressão mecânica primária

H_i = altura da coluna de resíduos sob o ponto de controle i

h_j = altura da j -ésima camada em que a coluna de resíduos H foi dividida.

n = número de camadas em que a coluna de resíduos H foi dividida.

$\sigma_{f,j}$ = tensão vertical final (peso próprio e sobrecarga) atuante no centro da camada j .

$\sigma_{0,j}$ = tensão vertical inicial atuante no centro da camada j .

C_α' = coeficiente de compressão secundária devido à biodegradação e à fluência do material sob peso próprio

C_{crp} = coeficiente de compressão secundária devido à fluência do material face ao efeito da sobrecarga.

t_1 = idade média do aterro (3060 dias) ou tempo correspondente ao encerramento do aterro existente (6120 dias), em função dos casos de análise, a seguir discutidos.

t_2 = início de construção do aterro experimental (6840 dias).

t_3 = tempo para previsão do recalque (utilizados 7146, 7203, 7329 e 7674 dias, relativos, respectivamente, a 307, 363, 490 e 835 dias após o início das leituras).

t_4 = término da construção do aterro experimental (7020 dias).

t_5 = início da aplicação da sobrecarga (6840 dias) ou tempo médio de aplicação da sobrecarga (6930 dias).

Para cada ponto de controle (marcos superficiais e placas de recalque) foram determinadas as diversas componentes da formulação mencionada (alturas, tensões verticais e tempos). Tais componentes juntamente com as deformações observadas em tempos pré-estabelecidos (t_3) permitiram a definição de um conjunto de valores, os quais foram analisados estatisticamente, através de regressões múltiplas não lineares, resultando na determinação dos coeficientes de compressão primária e secundária da referida formulação. Para a obtenção de um elevado universo de análise foram utilizados 4 distintos tempos t_3 , quais sejam: 307, 363, 490 e 835 dias após o início do experimento. Foram analisados ainda 4 distintos casos, em função da definição dos parâmetros t_1 e t_5 , conforme se segue:

- Caso a: t_1 = idade média do aterro; t_5 = início do experimento.
- Caso b: t_1 = idade média do aterro; t_5 = tempo médio da sobrecarga.
- Caso c: t_1 = encerramento do aterro existente; t_5 = início do experimento.
- Caso d: t_1 = encerramento do aterro existente; t_5 = tempo médio da sobrecarga.

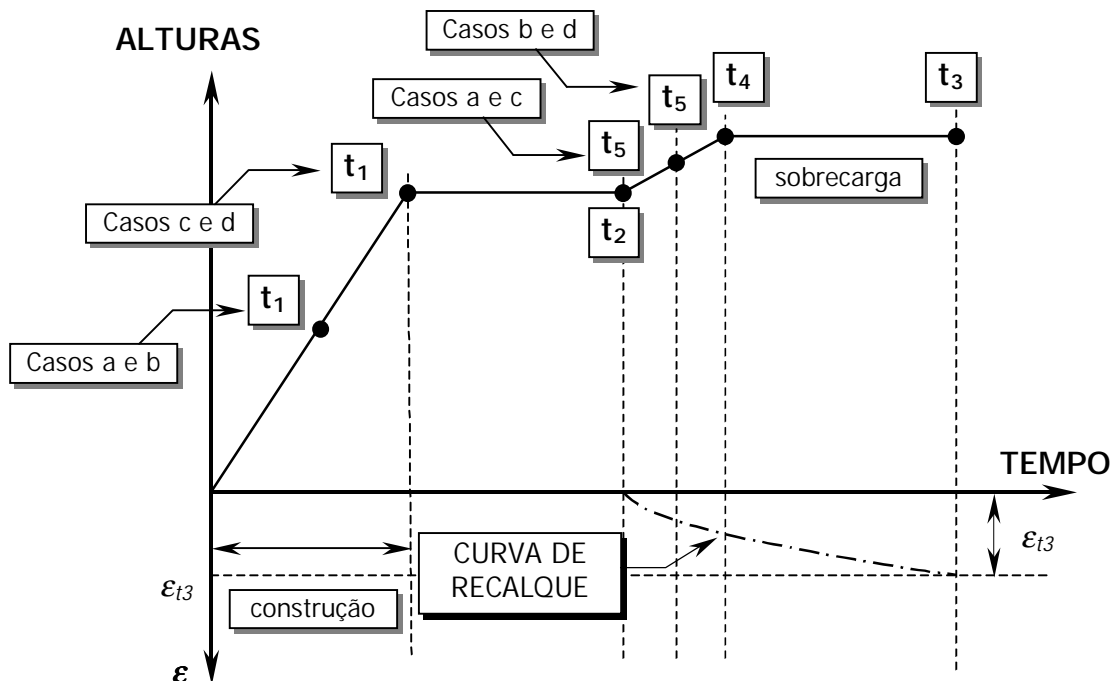


Figura 5.1.19 – Definição do parâmetro tempo para aplicação do modelo adaptado de SOWERS (1973).

O valor n (número de divisões da coluna de resíduos) foi adotado igual a 15 para todos os pontos, após estudo simplificado para verificação da influência deste fator na determinação dos coeficientes do modelo. As tensões verticais devido à sobrecarga

foram determinadas em cada sub-camada com o auxílio do programa ZSTRESS já referenciado. A Tabela 5.1.11 apresenta os parâmetros do modelo e os coeficientes de determinação (R^2) obtidos para os 4 casos analisados. A análise dos resultados confirma a influência do parâmetro tempo na determinação dos coeficientes de compressão. O caso b, sob o ponto de vista dos conceitos da mecânica dos solos, parece ser a aproximação mais adequada para consideração deste modelo. A Tabela 5.1.12 sumariza, neste sentido, os desvios de recalque calculados para os pontos de controle, tendo por base os coeficientes definidos para o caso b. A Figura 5.1.20, por sua vez, apresenta as curvas recalque vs. tempo observados e previstos para o marco superficial MSE4 para os casos b e d. Note-se que as curvas de previsão foram geradas a partir do término da construção do experimento (tempo t_d), ou seja, após aplicação de toda a sobrecarga.

Tabela 5.1.11 – Coeficientes de compressão do modelo adaptado de SOWERS (1973) para distintos casos de análise.

CASOS	PARÂMETROS			
	C_c'	C_α'	C_{crp}	R^2
Caso a	0,164	0,617	$8,59 \times 10^{-10}$	0,73
Caso b	0,164	0,617	$6,90 \times 10^{-10}$	0,73
Caso c	0,070	0,153	0,169	0,78
Caso d	0,057	0,153	0,137	0,78

Tabela 5.1.12 – Resultados de aplicação do modelo adaptado de SOWERS (1973).

MODELO ADAPTADO DE SOWERS							
PONTO	H (m)	σ_v' (kPa)	DESVIO, D (%)	PONTO	H (m)	σ_v' (kPa)	DESVIO, D (%)
			$D_{2,3-2,3}$				$D_{2,3-2,3}$
MARCOS SUPERFICIAIS				PLACAS DE RECALQUE			
MS01	63.199	239.900	44.04	PR1	58.420	247.062	4.44
MS02	63.385	253.934	19.18	PR2	54.975	245.456	3.50
MS03	64.232	254.630	24.28	PR3	53.933	244.130	6.70
MS04	64.599	254.327	9.68	PR4	53.963	242.830	-2.56
MS05	60.930	252.959	23.63	PR5	56.708	242.117	-5.56
MS06	59.663	249.603	7.43	PR6	56.825	247.480	1.47
MS07	58.583	245.611	-10.75	PR7	57.110	248.825	-8.61
MS08	58.943	243.163	23.07	PR8	56.735	246.183	-8.71
MS09	66.021	261.001	-7.55	Média	-	245.510	-1.17
MS10	54.777	243.464	15.40	Desvio padrão	-	2.340	6.04
MS11	67.082	263.735	-2.83				
MS12	68.302	266.092	-9.30				
MS13	50.985	236.873	15.17				
MS14	64.195	259.394	-11.04				
MS18	47.057	218.293	48.30				
MS20	51.483	229.564	10.65				
MS21	70.121	264.318	0.46				
MS22	69.154	261.635	7.72				
Média	-	249.916	11.53				
Desvio padrão	-	12.988	17.33				

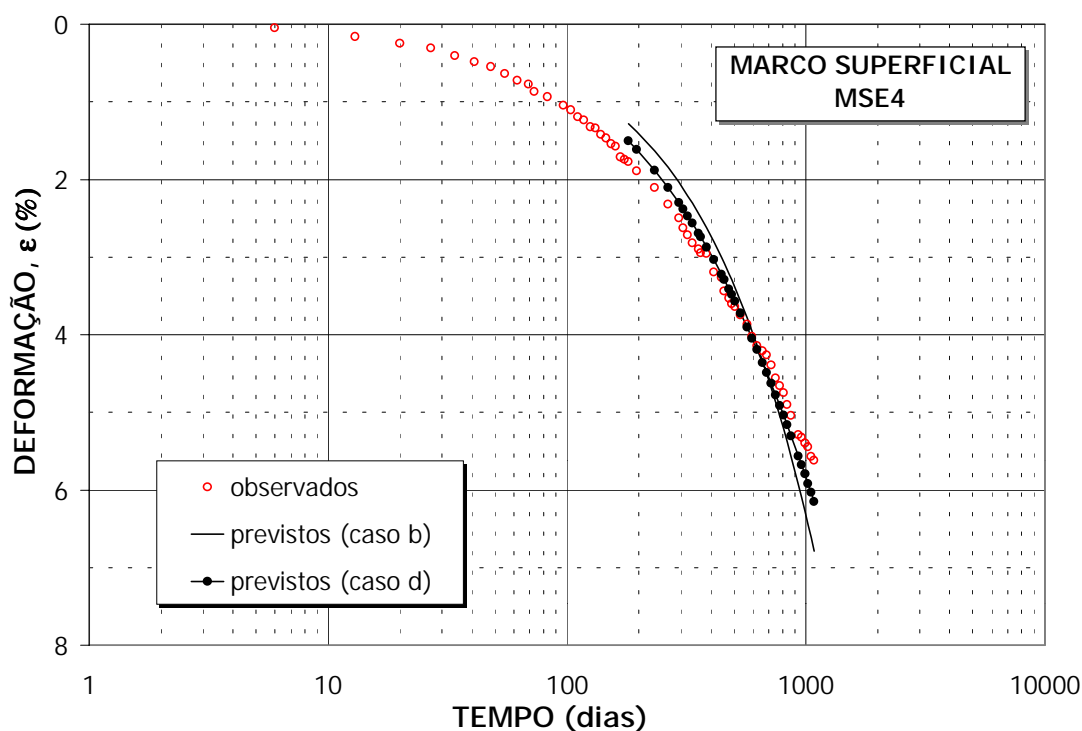


Figura 5.1.20 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir do modelo adaptado de SOWERS (1973) (casos b e d).

O uso deste modelo e de seus parâmetros mostrou-se fortemente dependente da escala de tempo adotada. O coeficiente de compressão primária (C_c') apresentou resultados consistentes e em acordo com valores reportados na literatura, assim como com os resultantes de ensaios laboratoriais realizados com material do mesmo aterro (CARVALHO, 1999), notadamente se considerados os casos a e b. O coeficiente de compressão secundária devido à biodegradação e à fluência sob peso próprio (C_{α}') apresentou valores elevados, principalmente quando considerado como tempo inicial a idade média do aterro (casos a e b). O coeficiente de compressão secundária devido à fluência do material face ao efeito da sobrecarga (C_{crp}) apresentou valores da mesma ordem de grandeza do coeficiente C_{α}' quando admitido como tempo inicial o encerramento do aterro existente (casos c e d). Tal valor, por outro lado, foi praticamente nulo para os casos a e b, onde uma ampla escala de tempo foi utilizada. Neste caso, a contribuição devido à fluência do material sob efeito da sobrecarga (experimento) foi desprezível perante os recalques observados. A Tabela 5.1.13 apresenta uma síntese dos coeficientes de compressão reportados na literatura, tendo por base os conceitos aplicados por SOWERS (1973). Os coeficientes de compressão secundária apresentados tiveram por base o encerramento dos aterros como tempo de origem, devendo ser tomados como base de comparação, neste sentido, os casos c e d do presente estudo.

Tabela 5.1.13 – Parâmetros de compressibilidade baseados no modelo de SOWERS (1973). Valores calculados e reportados na literatura.

REFERÊNCIA	SOBRECARGA	MÉTODO DE ENSAIO	COEFICIENTES DE COMPRESSÃO		
			C_e'	C_{α}'	C_{crp}
BURLINGAME (1985)	3,9m de aterro	laboratório	0.35	-	-
		controle de campo	0.05 - 0.25	0.04	-
LANDVA (1990)	20-200 kPa	laboratório	0.17	-	-
		laboratório	0.35	-	-
		laboratório	0.22	-	-
		laboratório	0.21	-	-
		laboratório	0.36	-	-
				0.002 - 0.03	-
LUKAS (1992)	0,9 a 4,5m de aterro	controle de campo	-	0.017 - 0.023	-
	3,3 a 6,1m de aterro	controle de campo	-	0.00125	-
	0,6 a 0,9m de aterro	controle de campo	-	0.05	-
ZOINO (1971) (<i>Yellow Freight Terminal</i>) (<i>Columbia Point Housing</i>)	1,8m de aterro	controle de campo	0.257 ± 0.077	0.024 ± 0.020	-
				0.021 ± 0.003	-
MERZ & STONE (1962) <i>apud: FASSETT et al (1994)</i>	0,6m de aterro	controle de campo	-	0.036	-
		controle de campo	-	0.027	-
		controle de campo	-	0.029	-
		controle de campo	-	0.023	-
		controle de campo	-	0.093	-
OWEIS & KHERA (1990)			0.26	0.24	-
			0.08	0.02	-
RAO et al. (1977) <i>apud: WALL & ZEISS, 1995</i>	107 - 1070 kPa	laboratório	0.16 - 0.235	0.012 - 0.046	-
SHEURS & KHERA (1980)	1,8m de aterro	controle de campo	0.18	-	-
SOWERS (1973) (<i>assuming $e_0 = 5$</i>)		valores recomendados	0.29	0.05	-
WATTS & CHARLES (1990)		ensaios de carga	-	0.1 - 0.23	0.02
YORK et al. (1977)			0.08 - 0.21	0.02 - 0.04	-
US NAVY (1983)		valores recomendados	0.1 - 0.4	0.02 - 0.07	-
GABR & VALERO (1995)	48 - 1440 kPa	laboratório	0.22	-	-
		laboratório	0.18	-	-
		laboratório	0.18	-	-
		laboratório	0.15	-	-
		laboratório	0.17	-	-
		laboratório	0.17	-	-
				0.008 - 0.009	-
ZAMISKIE et al (1994)	2,4 a 3m de aterro	controle de campo	0.01 - 0.04	0.001 - 0.006	-
DEUTSCH et al. (1994)	9,1m de aterro	controle de campo	0.15 - 0.39	-	-
TANG et al. (1994)	6.7 - 37.1 kPa	controle de campo	0.138 - 0.325	-	-
BJARNGARD & EDGERS (1990)	28,7 - 130 kPa	revisão da literatura	0.05 - 0.26	-	-
BEAVEN (1996)	40 - 600 kPa	célula de carga de grande dimensão	0.20 - 0.25	-	-
BOUTWELL & FIORE (1995)	0.9 a 3.0m de aterro	controle de campo	0.09 - 0.19	0.0066 - 0.0120	-
STULGIS et al (1995)	6,0m de aterro	controle de campo	0.16	0.02	-
ESPINACE et al (1991)	0,2 a 0,4m de aterro	controle de campo	0.09 - 0.13	0.08 - 0.26	-
WALL & ZEISS (1995)	10 kPa	células de teste (bioativa)	0.25	0.033 - 0.056	-
		células de teste (inerte)	0.21	0.037 - 0.049	-
CARVALHO (1999)	20 - 640 kPa	laboratório	0.175 - 0.229	-	-
PESQUISA ATUAL					
Caso a	26.4 kPa	controle de campo	0.1644	0.6172	8.59E-10
Caso b	26.4 kPa	controle de campo	0.1644	0.6172	6.90E-10
Caso c	26.4 kPa	controle de campo	0.0702	0.1533	0.1693
Caso d	26.4 kPa	controle de campo	0.0566	0.1534	0.1365

5.1.3 Análise Crítica do Desempenho dos Modelos

O estudo dos modelos de compressibilidade existentes mostrou que algumas propostas reproduziram muito bem os dados observados, enquanto outras não foram capazes de preverem satisfatoriamente os recalques registrados. Neste último grupo podem ser incluídos o modelo de YEN & SCANLON (1975) e as propostas baseadas em funções logarítmicas, as quais geraram elevados desvios de recalque e tendências de comportamento inconsistentes,

não sendo sua aplicação recomendada para o caso de estudo. A Figura 5.1.21 apresenta, para o conjunto de marcos superficiais, os desvios médios de recalque (D) obtidos para os outros modelos e para as séries de tempo analisadas. A Figura 5.1.22 apresenta similar resultados para as placas de recalque presentes no experimento. Nestas figuras apresentam-se os modelos que tiveram um comportamento satisfatório, em termos dos desvios e/ou de reprodução das curvas recalque vs. tempo.

Os resultados da aplicação dos modelos apresentaram tendências distintas para os marcos superficiais e placas de recalque, devendo tal fato estar associado à presença e ao efeito do aterro experimental (sobrecarga). Os modelos de GIBSON & LO (1961) e hiperbólico, por exemplo, reproduziram muito bem as curvas recalque vs. tempo para os marcos superficiais, independentemente da série de tempo utilizada, não repetindo tal desempenho para as placas de recalque. Tais modelos, em ambos os casos, geraram desvios negativos, ou seja, subestimaram os valores de recalque em suas previsões. Os modelos de EDGERS et al. (1992) e os baseados em funções de potência, por outro lado, apresentaram melhor desempenho quando aplicados às placas de recalque, gerando sempre desvios positivos, ou seja, superestimando os recalques. Os modelos de COUMOULOS & KORYALOS (1997), BJARNGARD & EDGERS (1990) e o adaptado da proposta de SOWERS (1973) geraram igualmente pequenos desvios e comportamentos praticamente similares para as placas de recalque e marcos superficiais, ou seja, recalques previstos menores que os observados, exceção feita ao modelo de SOWERS (1973) aplicado aos marcos superficiais.

Apesar do satisfatório desempenho de alguns modelos, preocupações relativas à adequada definição do parâmetro tempo (tempo de início, t_0) e à utilização de leis consistentes para reprodução dos diferentes mecanismos de compressão atuantes, emergiram do estudo realizado. A utilização de modelos baseados em simples formulações matemáticas, com parâmetros e coeficientes sem significado físico, e que visam simplesmente ajustar pontos de uma curva, devem ser evitados ou utilizados com ressalvas.

Quanto à questão do parâmetro tempo, parecem falhar as propostas que não consideram o histórico de vida do aterro sanitário, preocupando-se no entendimento e reprodução de comportamento a partir de um certo instante de interesse. Conforme já mencionado, a definição do tempo inicial t_0 tem influência significativa nos resultados e parâmetros dos modelos analisados. As Figuras 5.1.23, 5.1.24 e 5.1.25 procuram ilustrar tal impacto, em termos das curvas recalque vs. tempo e parâmetros obtidos, quando utilizados distintos modelos de análise. Na Figura 5.1.23, por exemplo, são representadas as curvas recalque vs. tempo, observadas para o marco superficial MSE4, tomadas a partir de distintos tempos de

início (t_0). Apesar de representarem os mesmos recalques, pode-se facilmente verificar que as mesmas gerarão diferentes respostas e parâmetros quando ajustadas aos modelos anteriormente analisados.

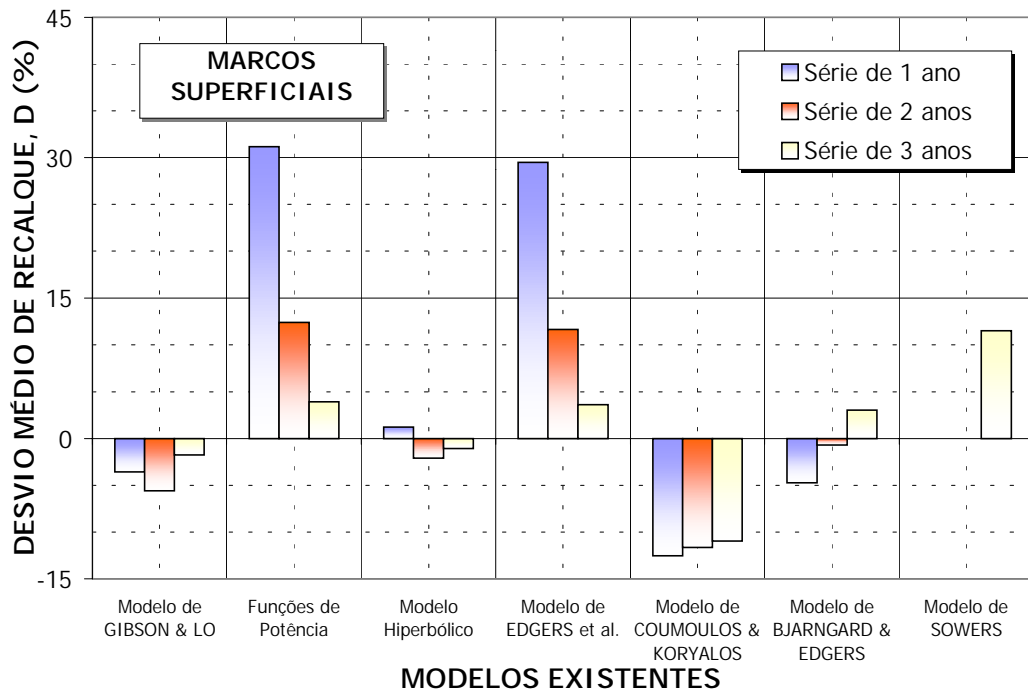


Figura 5.1.21 – Aplicação dos modelos existentes. Desvios médios de recalques para os marcos superficiais.

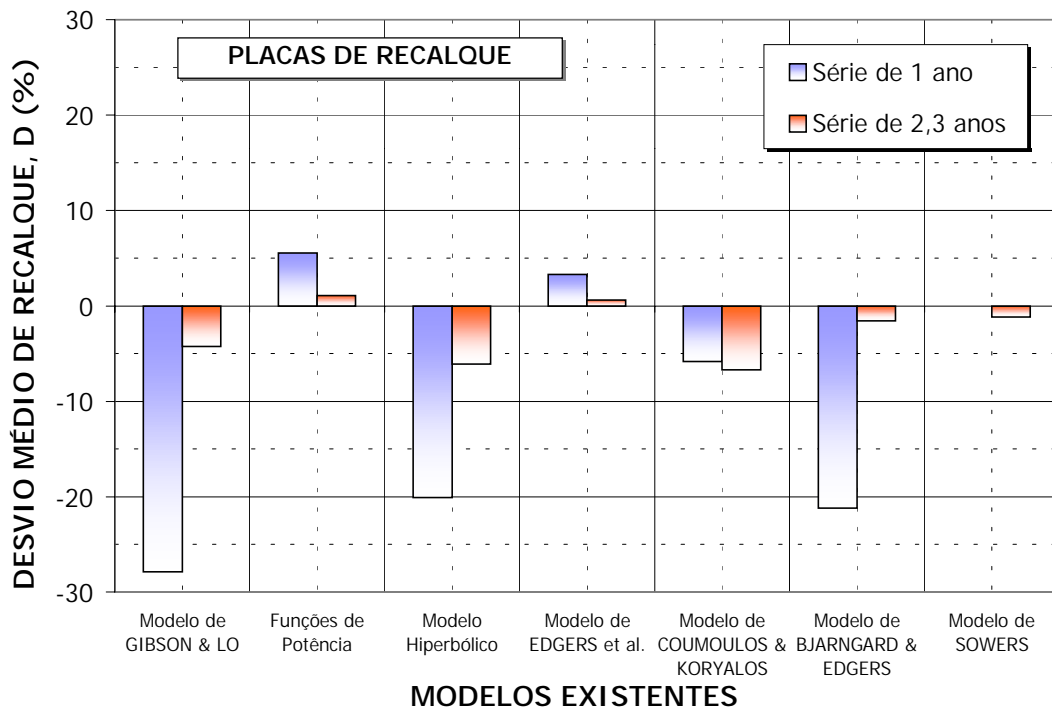


Figura 5.1.22 – Aplicação dos modelos existentes. Desvios médios de recalques para as placas de recalque.

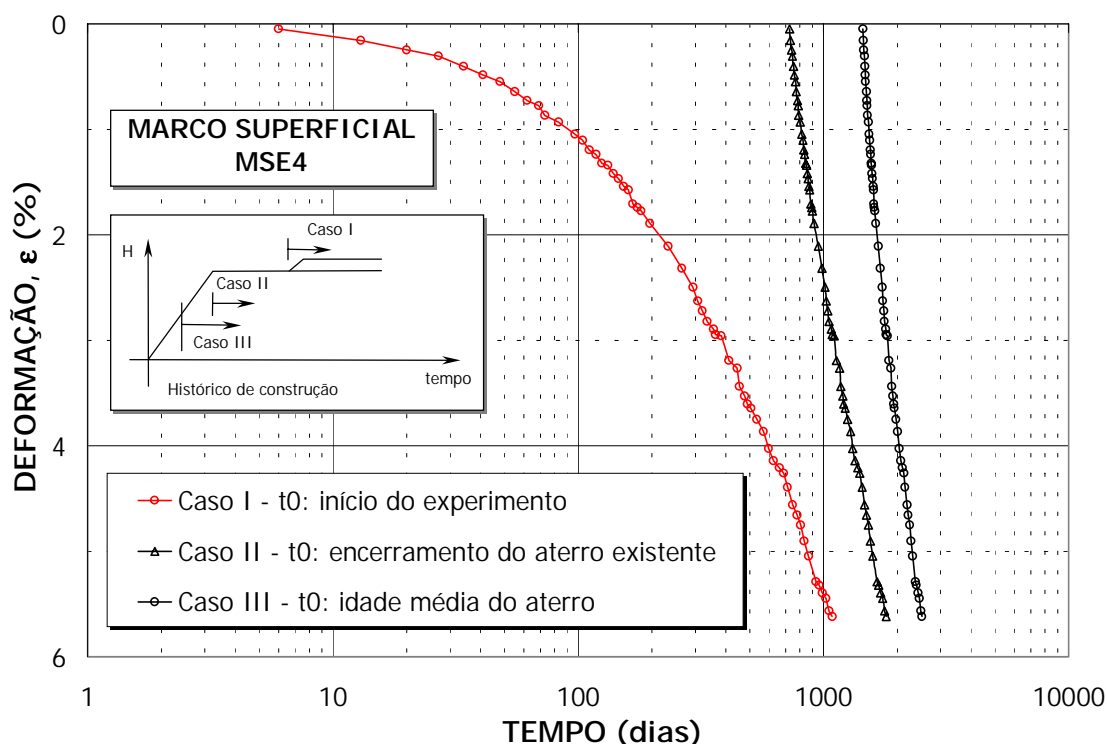


Figura 5.1.23 – Curva recalque vs. tempo assumindo distintos tempos de início (t_0). Marco superficial MSE4.

Ainda no sentido de demonstrar a influência do parâmetro tempo nos modelos existentes foi realizado estudo adicional, tendo por base os recalques observados por cerca de 3 anos no marco superficial MSE4. Nesta análise, foram utilizadas 3 distintas séries de tempo, sendo o tempo t_0 definido ao início das leituras (série A), 1 ano (série B) e 2 anos (série C) após este evento. Com isto foram geradas séries de recalques com 1, 2 e 3 anos de leitura, correspondentes, respectivamente, às séries C, B e A. Tendo em conta os recalques observados no período foram igualmente ajustadas as alturas da coluna de resíduos ao início de cada série de tempo, ou seja, tudo passou como se um novo instrumento de controle tivesse sido instalado em períodos distintos, sendo desejado reproduzir as curvas recalque vs. tempo a partir de propostas existentes. As Figuras 5.1.24 e 5.1.25 apresentam os resultados obtidos com a aplicação dos modelos de GIBSON & LO (1961) e BJARNGARD & EDGERS (1990), respectivamente. Observa-se que coeficientes de compressibilidade distintos foram obtidos para as três séries de tempo, não podendo, portanto, estes valores serem utilizados e transferidos a outros aterros ou pontos de controle para previsão dos recalques futuros de forma direta.

Outro aspecto digno de nota, diz respeito a consideração, por todas as propostas, do aterro como um maciço único, desprezando toda a seqüência de aterramento e os processos de compressão que atuam de forma distinta em cada camada aterrada.

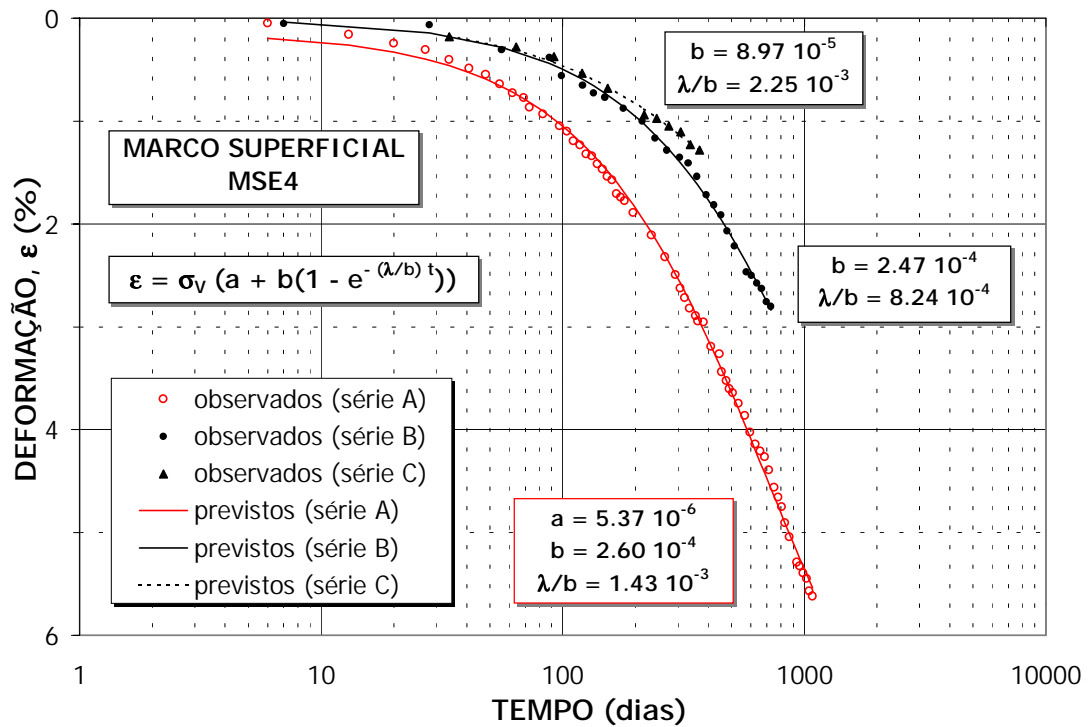


Figura 5.1.24 – Curvas recalque vs tempo observadas e previstas para distintas séries de tempo, a partir do modelo de GIBSON & LO (1961). Marco superficial MSE4.

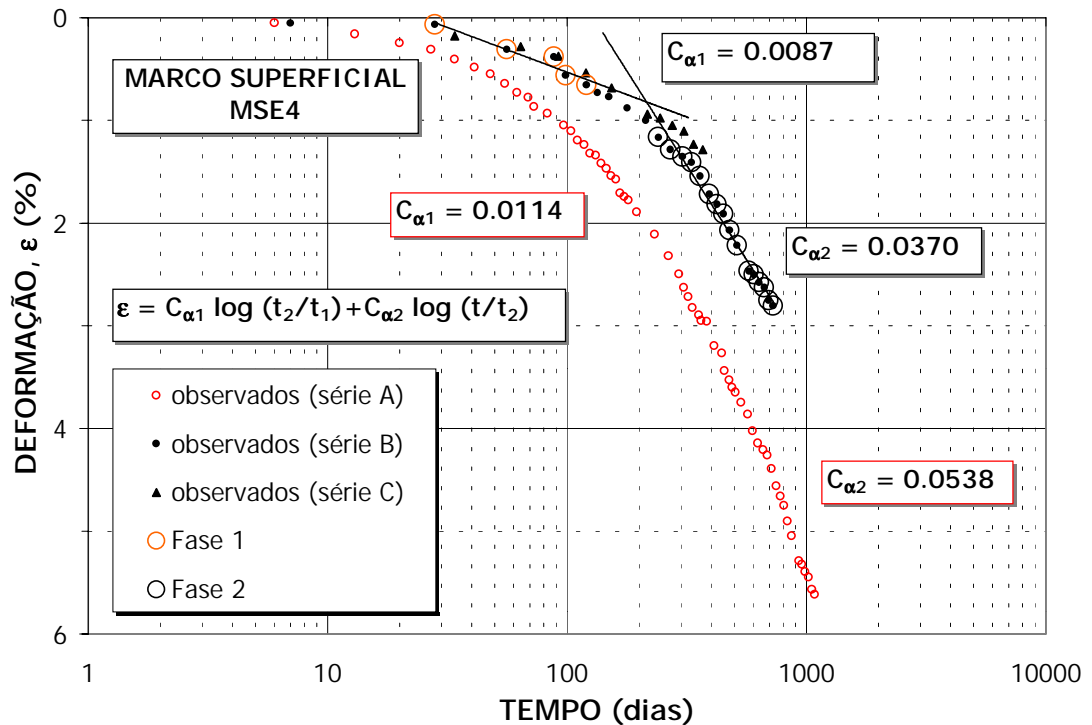


Figura 5.1.25 – Curvas recalque vs tempo observadas e previstas para distintas séries de tempo, a partir do modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990). Marco superficial MSE4.

Diante desses fatos, julga-se importante a proposição de um modelo e de um algoritmo de cálculo para previsão dos recalques de aterros sanitários, que leve em conta os mecanismos de compressão envolvidos, o parâmetro tempo e o histórico de construção do maciço, considerados de forma teoricamente consistente e que possam ser utilizados em outros estudos, como a seguir se descreve.

5.2 Concepção de Modelo Reológico Compósito para Compressão dos Resíduos Sólidos Urbanos

Tendo por base a análise de desempenho dos modelos existentes e os mecanismos de compressão atuantes foi concebido um modelo reológico compósito para representar o comportamento dos resíduos sólidos urbanos sob o ponto de vista de sua compressibilidade. O modelo considera os mecanismos de compressão primária e secundária, governados por leis próprias e parâmetros reológicos com significado físico, explicitando de forma clara e consistente o parâmetro tempo. O modelo é denominado compósito uma vez que incorpora e combina em sua formulação e estrutura leis próprias para cada mecanismo de compressão envolvido, provenientes e adaptadas de soluções existentes.

- *compressão mecânica primária*: este mecanismo incorpora a parcela de deformações devidas ao incremento das tensões verticais (pressões subjacentes). O modelo define esta componente baseada na teoria da consolidação primária de solos, conforme utilizada e discutida por SOWERS (1973). Apesar da aplicação desta teoria ser discutida, visto suas hipóteses básicas não serem totalmente válidas para os resíduos sólidos (material saturado, adensamento unidirecional e relação linear entre a variação do índice de vazios e as tensões aplicadas, entre outras), a mesma tem sido utilizada, fornecendo resultados satisfatórios para a compressão primária em aterros sanitários. Os estudos de CARVALHO (1999), que demonstraram serem lineares as curvas (e) vs. $\log(\sigma_v)$ para os resíduos sólidos do Aterro Sanitário Bandeirantes, e o desempenho do modelo de SOWERS (1973), descrito no item 5.1.2, foram subsídios adicionais para inclusão desta componente no modelo concebido.
- *compressão mecânica secundária*: este mecanismo incorpora a parcela de deformações devidas ao processo de fluência do material sob influência do peso próprio e carregamentos externos. Neste caso, o modelo utiliza a proposta de GIBSON & LO (1961), adaptada para associar os acréscimos de tensão vertical aos tempos de aplicação do carregamento. Apesar da formulação ter sido originalmente desenvolvida para

descrever o processo de consolidação de solos saturados, a mesma foi aqui adequada e utilizada para reproduzir o processo de compressão de resíduos não saturados.

- *compressão biológica secundária*: este mecanismo incorpora a parcela de deformações devidas ao processo de degradação dos resíduos. O modelo baseia-se aqui na solução de PARK & LEE (1997), a qual associa o processo de perda e transformação de massa e conseqüentes recalques secundários à taxa de solubilização da matéria degradável presente nos resíduos. Tal solução foi adequada para que o parâmetro tempo fosse inicializado no instante de disposição do resíduo no maciço sanitário.

A representação do modelo reológico compósito encontra-se indicada na Figura 5.2.1. Trata-se da associação em série de 3 (três) corpos reológicos, os dois primeiros dependentes das tensões aplicadas, como a seguir se descreve: (i) um elemento generalizado de Hooke (relativo à compressão mecânica primária), representado por uma mola de constante elástica C_c ; (ii) um corpo de Kelvin (relativo à compressão mecânica secundária), representado pela associação de um elemento de Hooke (mola de constante elástica b) e um elemento de Newton (amortecedor de viscosidade c); e (iii) um terceiro corpo (relativo à compressão biológica secundária), não dependente das tensões aplicadas e representado pela associação em paralelo de um elemento de compressão finita (deformação biológica máxima E_{dg}) e um amortecedor de viscosidade d . A resposta do modelo se dá em termos de deformações (ϵ), tendo por variáveis as tensões e sobrecargas verticais (σ , $\Delta\sigma$) e o parâmetro tempo (t), este último com distintas definições para as componentes de compressão secundária mecânica e biológica. O modelo possui 5 (cinco) parâmetros reológicos e a seguinte forma analítica:

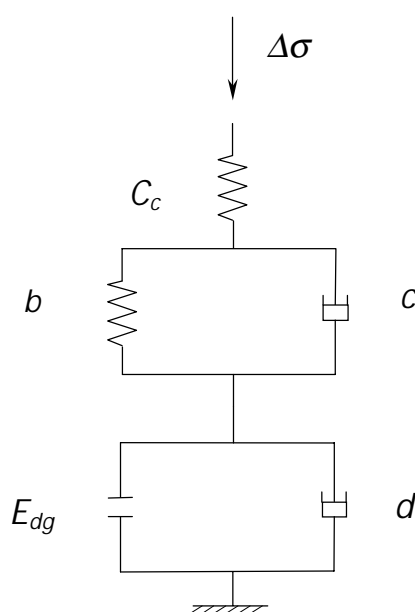


Figura 5.2.1 – Modelo reológico compósito para compressão dos resíduos sólidos urbanos.

$$\varepsilon = \Delta H / H = C_c' \log [(\sigma_o + \Delta\sigma) / \sigma_o] + \Delta\sigma b (1 - e^{-ct'}) + E_{dg} (1 - e^{-dt''})$$

onde:

ε = deformação

ΔH = recalque

H = altura da coluna de resíduo

C_c' = coeficiente de compressão mecânica primária

σ_o = tensão vertical inicial

$\Delta\sigma$ = incremento de tensão vertical

b = coeficiente de compressão mecânica secundária

c = taxa de compressão mecânica secundária

E_{dg} = compressão total devido à degradação dos resíduos

d = taxa de compressão biológica secundária

t' = tempo a partir da aplicação do carregamento

t'' = tempo a partir da disposição dos resíduos.

A aplicação do modelo para previsão dos recalques de aterros sanitários está diretamente associada à consideração da seqüência construtiva dos mesmos e das apropriadas hipóteses de tempo nas componentes de compressão dependentes deste parâmetro. Os recalques de cada camada, devido aos distintos mecanismos de compressão atuantes, são individualmente calculados, sendo o recalque total do maciço determinado de forma cumulativa através do conceito de superposição de efeitos, o qual será melhor detalhado nos itens que se seguem. Para a adequada utilização do modelo reológico compósito e dos conceitos a ele associados foi desenvolvido um programa computacional, programa MSWSET, para previsão de recalques em aterros sanitários, conforme se discute na seqüência.

5.3 Programa Computacional MSWSET

O passo seguinte à concepção do modelo compósito foi o desenvolvimento de um programa de cálculo computacional para previsão de recalques em aterros sanitários. Como características principais do programa podem ser listadas:

- consideração de distintos materiais, propriedades e condições de contorno;
- compressão dos resíduos calculada com base no modelo reológico compósito concebido;
- consideração do histórico de construção do aterro e seu efeito sobre cada camada disposta;

- utilização do conceito de superposição de efeitos (distintos mecanismos de compressão) em cada camada;
- consideração da influência de eventuais carregamentos externos com base em aproximações elásticas;
- cálculo e geração de curvas de recalque e altura total vs. tempo e de recalques parciais (relativos) a partir de tempos pré-estabelecidos;
- cálculo de recalques em pontos (camadas) internos do maciço para tempos distintos e pré-estabelecidos.

5.3.1 Estruturação do Programa

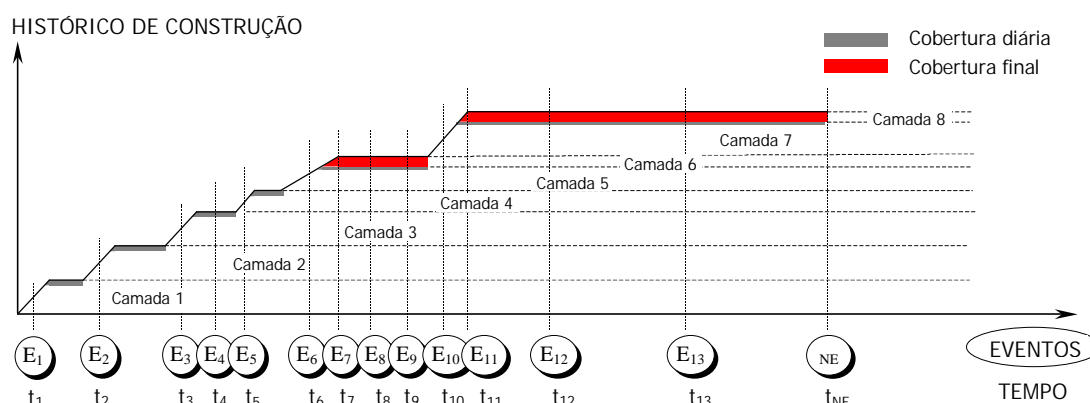
O programa foi escrito em linguagem FORTRAN 90¹¹, sendo constituído pelo programa principal e por 5 (cinco) sub-rotinas de cálculo (MARQUES, 2001). O programa principal inclui os blocos de entrada de dados, de cálculo da matriz de estado, de iteração de alturas e profundidades; de geração das curvas de recalque total e parcial, e de cálculo de recalques e alturas em pontos (camadas) internas do maciço. As sub-rotinas de cálculo incluem: sub-rotina “PRIMARY” (cálculo da compressão primária da camada); sub-rotina “CREEP” (cálculo da compressão mecânica secundária); sub-rotina “BIOLOGICAL” (cálculo da compressão biológica secundária); sub-rotina “RECTANGULAR” (cálculo do fator de influência de tensões devido a carregamentos retangulares); e sub-rotina “STRIP” (cálculo do fator de influência de tensões devido a carregamentos de faixas). O programa fonte, juntamente com o fluxograma e as listagens de entrada e saída de dados para um caso de estudo real, encontram-se apresentados no Apêndice IV.

5.3.1.1 Entrada de Dados: Propriedades dos Materiais, Características das Camadas e Seqüência de Aterramento.

A entrada de dados do programa MSWSET tem por base a reprodução do histórico de construção do aterro, em termos das camadas e materiais que o constituíram. Neste sentido, foi introduzido o conceito de evento (E), através do qual são incorporadas as informações requeridas pelo programa nas datas-marco de interesse. Os eventos correspondem, portanto, aos instantes de disposição de camadas de resíduos e de cobertura final, aos instantes onde leituras e controles de recalques foram efetuados, ou ainda aos instantes onde simplesmente deseja-se determinar os recalques ocorridos ou esperados para o maciço sanitário. A cada evento encontra-se associado o instante (t) de sua ocorrência, a camada (LAY) ultimamente

¹¹ Microsoft Developer Studio. FORTRAN Power Station 4.0, 1994-1995. Microsoft Corporation.

disposta, o material desta camada (MAT) e dois parâmetros de controle: um primeiro (H_c) para indicação de disposição ou não da referida camada naquele evento; e outro ($SLOAD$) para indicação de camada de sobrecarga ou não naquele evento. As características de cada material (MAT) definido são igualmente informadas, incluindo peso específico inicial (γ_0), altura inicial da camada (H_0) e parâmetros de compressibilidade do modelo compósito (C_c , b , c , E_{dg} e d). A Figura 5.3.1 apresenta o esquema conceitual para definição dos eventos, materiais e histórico de construção em um caso hipotético de aterro sanitário com 8 camadas e 4 materiais distintos.



EVENTOS						MATERIAIS							
E	t	LAY	MAT	H_c	$SLOAD$	MAT	H_0	γ_0	C_c	b	c	E_{dg}	d
1	t_1	1	1	1	0	1	H_{01}	γ_{01}	C_{c1}	b_1	c_1	E_{dg1}	d_1
2	t_2	2	1	1	0	2	H_{02}	γ_{02}	C_{c2}	b_2	c_2	E_{dg2}	d_2
3	t_3	3	2	1	0	3	H_{03}	γ_{03}	C_{c3}	b_3	c_3	E_{dg3}	d_3
4	t_4	3	2	0	0	4	H_{04}	γ_{04}	C_{c4}	b_4	c_4	E_{dg4}	d_4
5	t_5	4	2	1	0								
6	t_6	5	2	1	0								
7	t_7	6	3	1	0								
8	t_8	6	3	0	0								
9	t_9	6	3	0	0								
10	t_{10}	7	4	1	0								
11	t_{11}	8	3	1	1								
12	t_{12}	8	3	0	1								
13	t_{13}	8	3	0	1								
NE	t_{NE}	8	3	0	1								

Figura 5.3.1 – Esquema conceitual para definição dos eventos, materiais e histórico de construção.

Apesar da disposição das camadas (resíduos ou material de cobertura) ser realizada ao longo de um certo período de tempo, tal evento é considerado no programa de forma instantânea, ao meio tempo da execução das mesmas. O valor de H_c será igual a 1 quando a camada associada ao evento em questão tiver sido disposta naquele instante. Caso contrário, seu valor será nulo, como é o caso da camada 6 associada ao evento 8, ilustrado no esquema da Figura 5.3.1. O valor de $SLOAD$, por sua vez, será igual a 1 quando a camada associada ao evento em questão deva ser considerada como uma sobrecarga externa. No caso da

simples sobreposição de novas camadas de resíduos este valor será nulo, como é o caso da camada 4, evento 5, apresentado no esquema da Figura 5.3.1.

Os demais parâmetros requeridos pelo programa, em sua entrada de dados, são:

- dados gerais: incluem a denominação do aterro sanitário analisado (*FILL*); datas de início (*DI*) e término (*CD*) de construção e de previsão desejada dos recalques (*FD*); identificação do ponto de análise no aterro (*BM*); e nível da fundação do aterro no ponto de análise (*FL*).
- dados adicionais relativos aos eventos, camadas e materiais: incluem o número total de eventos a serem considerados (*NE*); número total de camadas do aterro sanitário (*NLAY*); e número total de materiais presentes no aterro (*NMAT*).
- dados relativos a sobrecargas: incluem o parâmetro identificador para cálculo do fator de influência de tensões (*SGE*); distância do ponto de análise ao centro da sobrecarga (*X*); coordenadas (*x,y*) do ponto de análise (*XI, YI*); largura da sobrecarga (*W*); coordenada *x* do vértice inferior esquerdo de sobrecarga retangular (*XQ*); coordenada *y* do vértice inferior esquerdo de sobrecarga retangular (*YQ*); comprimento da sobrecarga na direção *x* (*DX*); comprimento da sobrecarga na direção *y* (*DY*).
- dados para geração de curvas de recalques parciais (relativos): incluem o evento a partir do qual deva ser gerada uma curva de recalques parcial (*NSTART*).
- dados para cálculo de recalques em pontos internos do maciço: incluem o número de pontos a serem calculados (*NP*); evento em que se deseja determinar os recalques internos do maciço (*EVENT*); camada do maciço em que se deseja determinar os recalques internos do maciço (*LLAY*).

5.3.1.2 Consideração dos Mecanismos de Compressão através do Conceito da Superposição de Efeitos

O cálculo de recalques de aterros sanitários pelo programa MSWSET tem por base o conceito de superposição de efeitos das diversas camadas que constituem o aterro. Tal conceito implica o cálculo cumulativo dos recalques de cada camada, devido aos distintos mecanismos de compressão, tendo em conta os tempos e carregamentos associados à disposição das camadas subjacentes. A Figura 5.3.2 ilustra, de forma conceitual e para um aterro hipoteticamente construído em 5 camadas, o esquema para consideração dos mecanismos de compressão. A seqüência construtiva do aterro e a relação recalque vs. tempo para a camada 1 são apresentadas na figura, sendo esta última resultado da superposição dos mecanismos de compressão primária (considerada de forma imediata no instante de

aplicação das cargas, isto é, da disposição de camadas sobrejacentes) e de compressão secundária (mecânica e biológica). O conceito é aplicado de forma análoga para o cálculo dos recalques das demais camadas, sendo o recalque total do aterro, após um determinado tempo t , a somatória dos recalques individuais de cada camada no referido tempo.

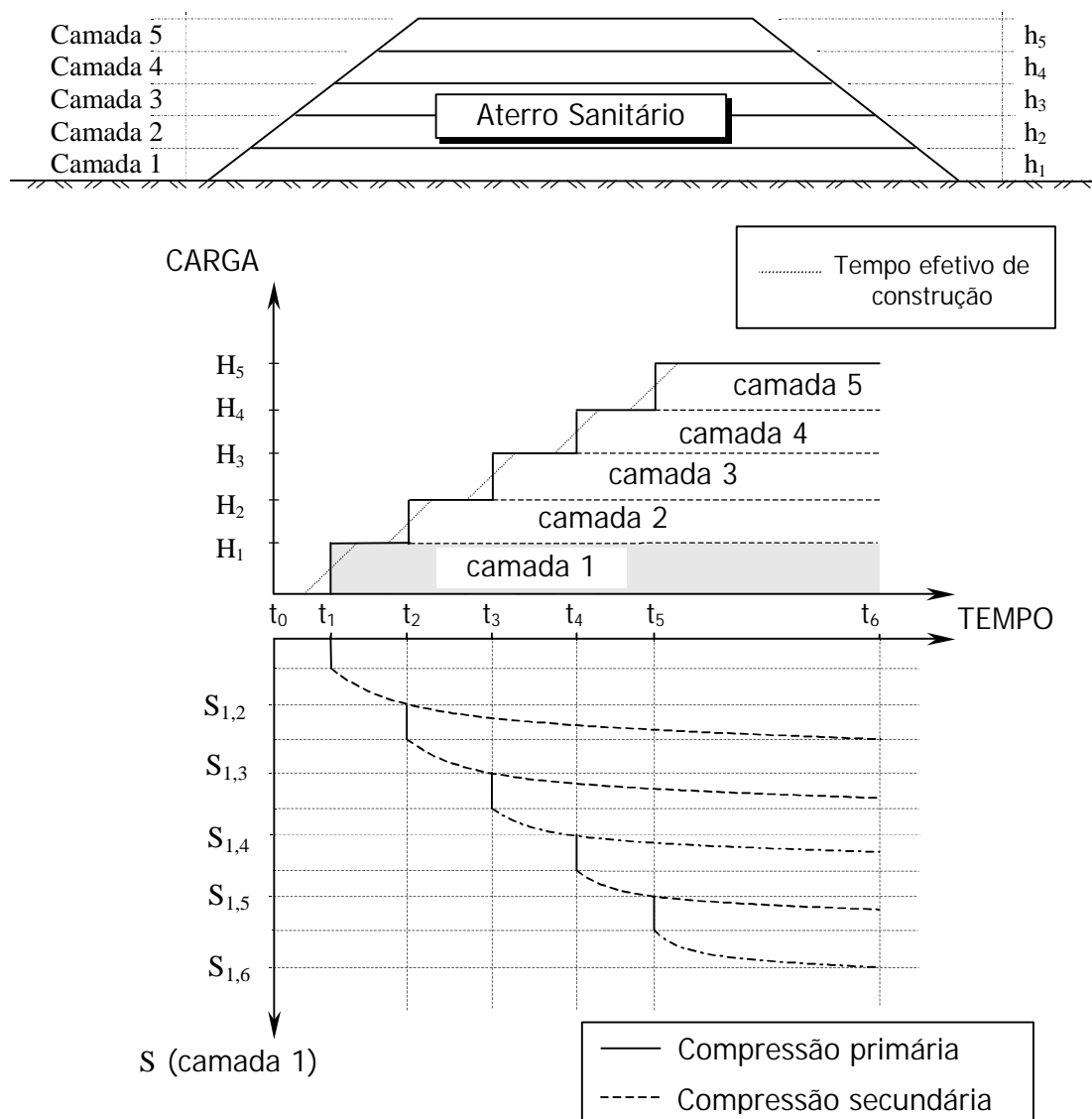


Figura 5.3.2 – Esquema para consideração dos mecanismos de compressão através do conceito de superposição de efeitos.

A compressão primária de cada camada é calculada, portanto, pelo programa MSWSET para cada instante em que a mesma é submetida a carregamento (disposição de novas camadas ou sobrecarga). A compressão mecânica secundária devido ao processo de fluência dos materiais apresenta um esquema de cálculo um pouco mais complexo, visto depender, para cada camada em análise, do tempo de aplicação e da magnitude do carregamento. A Figura 5.3.3 apresenta, de forma esquemática e para o aterro exemplificado na Figura 5.3.2,

o conceito utilizado pelo programa MSWSET para consideração da parcela relativa à compressão mecânica secundária dos resíduos sólidos. Nesta figura, são apresentadas as relações recalque vs. tempo para cada camada disposta, cujos comportamentos estão diretamente relacionados à seqüência construtiva do aterro. A camada 1, por exemplo, inicia um processo de fluência, devido ao peso próprio, a partir de sua disposição no aterro (tempo t_1). No tempo t_2 , correspondente à disposição da camada 2, esta camada dá início a um novo processo de deformação por fluência devido a este último carregamento. De forma análoga, novas curvas de recalque por fluência da camada 1 terão origem nos tempos t_3 , t_4 e t_5 , como resposta à disposição das camadas 3, 4 e 5, respectivamente. A compressão da camada 1, por exemplo, no tempo t , será a somatória das respostas desta camada à cada carregamento neste tempo. A parcela total de recalque por compressão secundária do aterro sanitário, no tempo t , por sua vez, será a somatória das contribuições individuais de cada camada, no referido tempo, devido a este mecanismo de compressão.

O recalque total do aterro devido à compressão mecânica secundária no tempo t ($S_{c,t}$), no exemplo ilustrado na Figura 5.3.3, será portanto:

$$\text{tempo } t_2: S_{c,2} = S_{c(1,2)}$$

$$\text{tempo } t_3: S_{c,3} = S_{c(1,3)} + S_{c(2,3)}$$

$$\text{tempo } t_4: S_{c,4} = S_{c(1,4)} + S_{c(2,4)} + S_{c(3,4)}$$

$$\text{tempo } t_5: S_{c,5} = S_{c(1,5)} + S_{c(2,5)} + S_{c(3,5)} + S_{c(4,5)}$$

$$\text{tempo } t_6: S_{c,6} = S_{c(1,6)} + S_{c(2,6)} + S_{c(3,6)} + S_{c(4,6)} + S_{c(5,6)}$$

onde:

$S_{c(i,t)}$ = recalque por compressão mecânica secundária da camada i no tempo t .

A compressão biológica secundária é considerada no programa MSWSET também admitindo o conceito de superposição de efeitos, porém de forma mais simples, visto tal mecanismo ser função apenas do tempo de disposição da camada sob análise. A Figura 5.3.4, neste sentido, apresenta o esquema conceitual para consideração deste mecanismo para o aterro exemplificado nas figuras anteriores. Neste caso, o recalque total devido ao processo de biodegradação dos resíduos sólidos no tempo t ($S_{bio,t}$) é calculado como sendo a simples somatória das contribuições individuais de cada camada no referido tempo t . A resposta da camada 1, por exemplo, é inicializada no tempo t_1 , correspondente à disposição desta camada no aterro, e assim sucessivamente para as camadas 2, 3, 4 e 5, respectivamente, nos tempos t_2 , t_3 , t_4 e t_5 , resultando, portanto, como recalques totais devido à compressão biológica secundária no tempo t ($S_{bio,t}$):

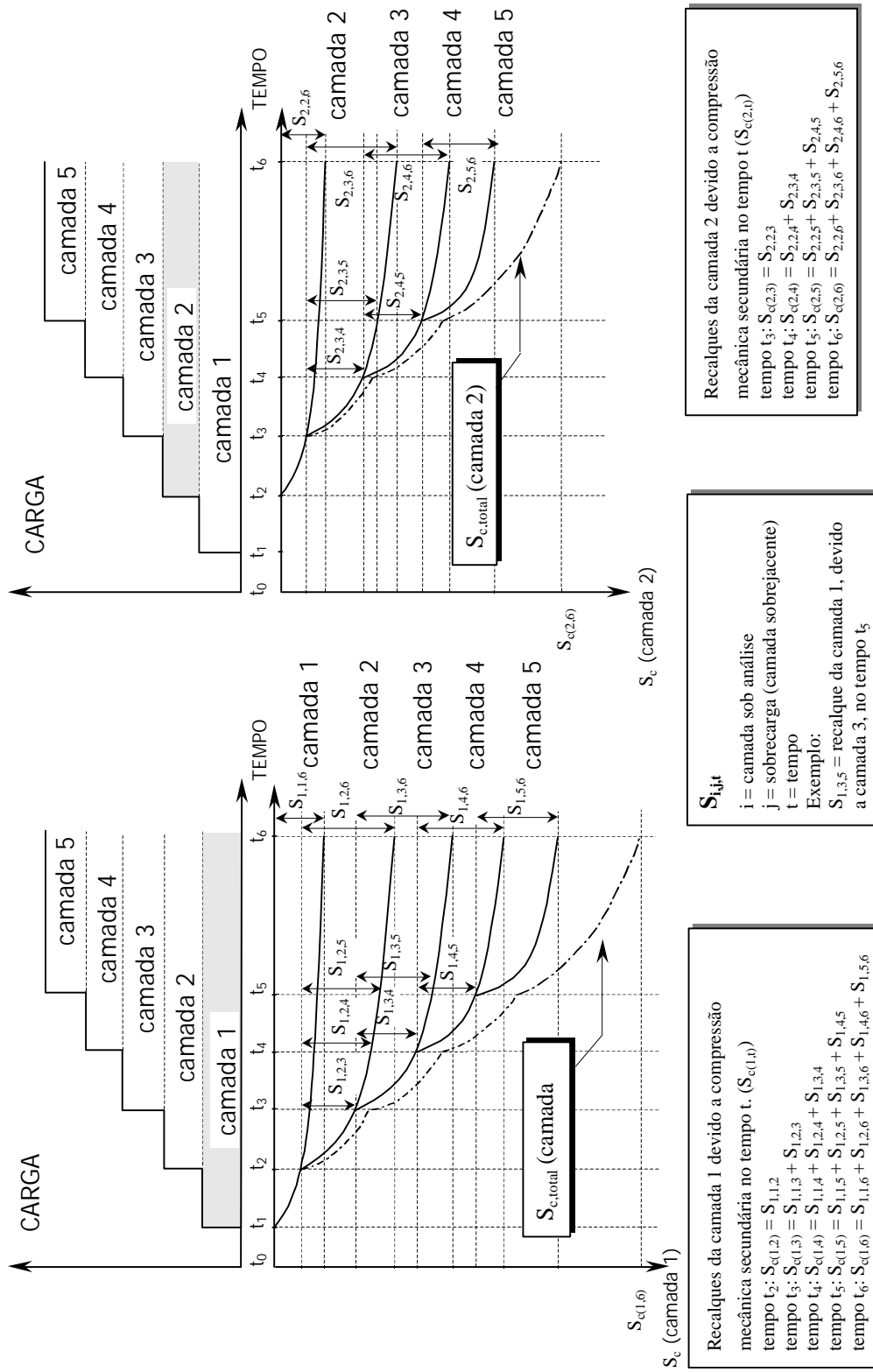


Figura 5.3.3 – Esquema para consideração dos mecanismos de compressão mecânica secundária.

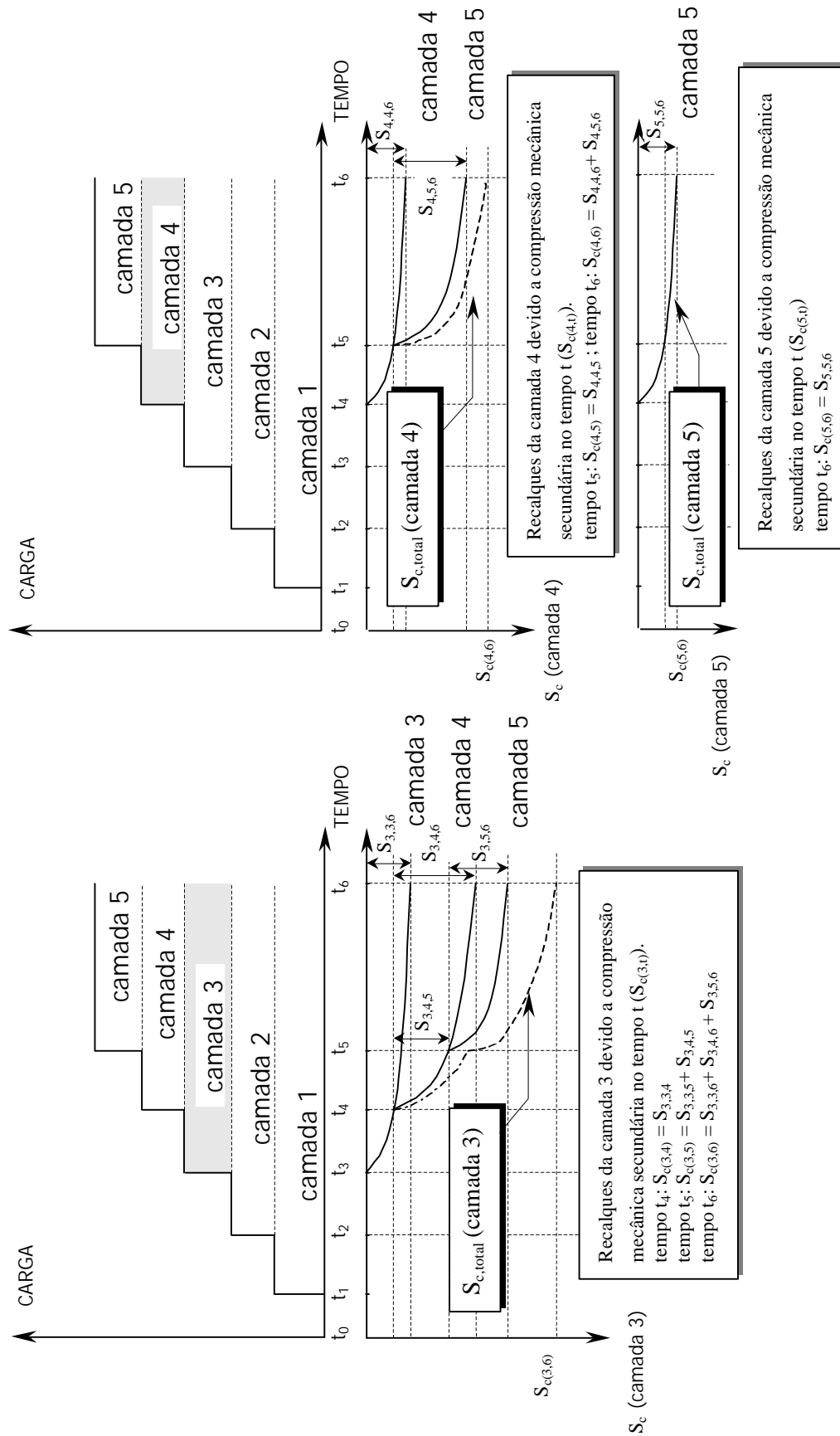


Figura 5.3.3 – Esquema para consideração dos mecanismos de compressão mecânica secundária (continuação).

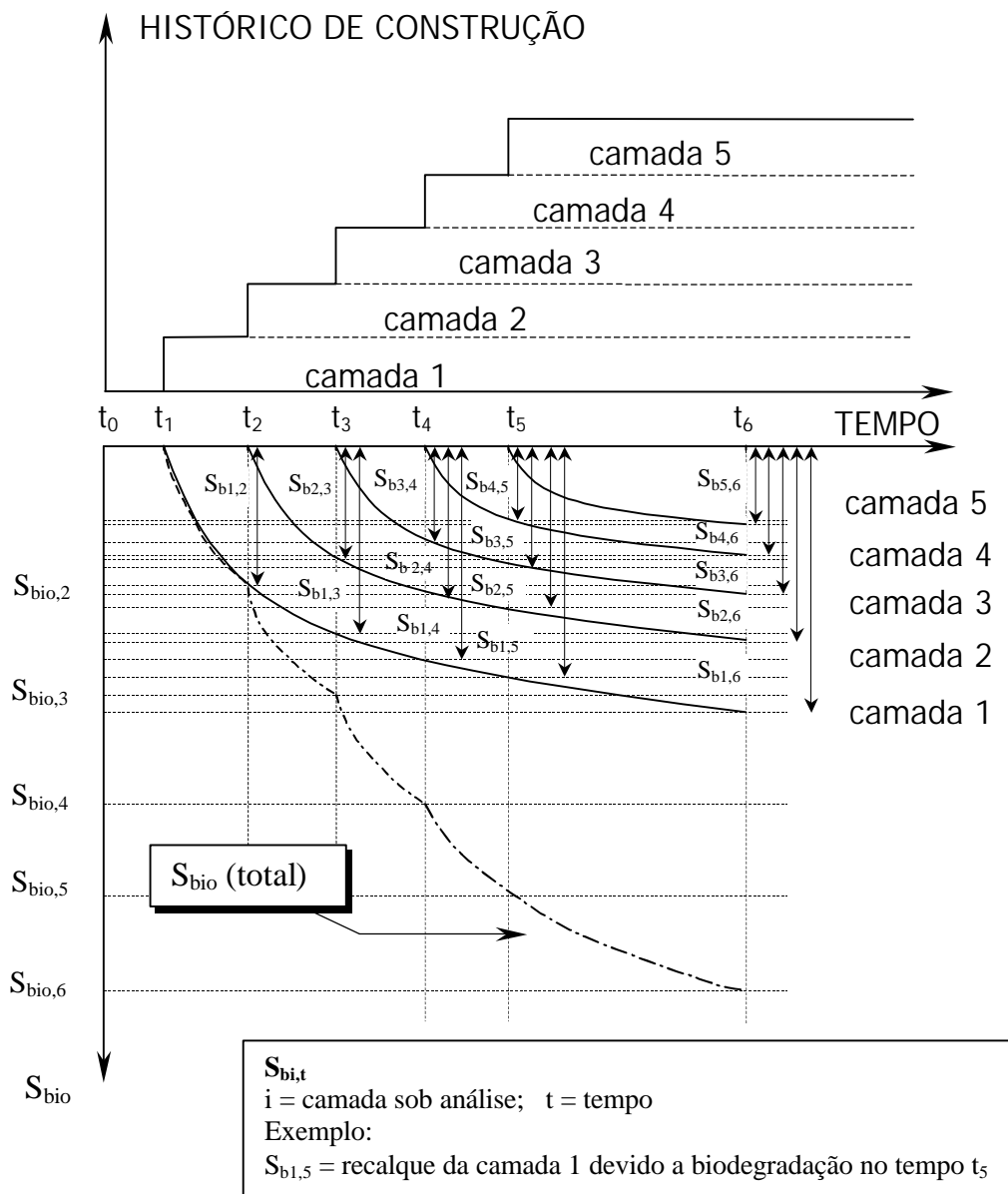


Figura 5.3.4– Esquema para consideração dos mecanismos de compressão biológica secundária.

$$\text{tempo } t_2: S_{bio,2} = S_{b(1,2)}$$

$$\text{tempo } t_3: S_{bio,3} = S_{b(1,3)} + S_{b(2,3)}$$

$$\text{tempo } t_4: S_{bio,4} = S_{b(1,4)} + S_{b(2,4)} + S_{b(3,4)}$$

$$\text{tempo } t_5: S_{bio,5} = S_{b(1,5)} + S_{b(2,5)} + S_{b(3,5)} + S_{b(4,5)}$$

$$\text{tempo } t_6: S_{bio,6} = S_{b(1,6)} + S_{b(2,6)} + S_{b(3,6)} + S_{b(4,6)} + S_{b(5,6)}$$

onde:

$S_{b(i,t)}$ = recalque por compressão biológica secundária da camada i no tempo t .

5.3.1.3 Montagem da Matriz de Estado e Cálculo dos Recalques

As variáveis necessárias à determinação dos recalques de cada camada incluem as tensões verticais iniciais (σ_0), as sobrecargas para efeito do cálculo da compressão primária ($\Delta\sigma_{sob}$), os acréscimos de tensão vertical ($\Delta\sigma_c$) e os intervalos de tempo desde sua aplicação (Δt_c), para efeito do cálculo da compressão mecânica secundária, e os intervalos de tempo desde a disposição das camadas (Δt_{bio}), para efeito do cálculo da compressão biológica secundária.

A sistematização destas variáveis foi realizada através da montagem e cálculo de uma matriz de estado (“arrays” bi e tridimensionais), cujos elementos representam o estado de tensões e os períodos de tempo de interesse para cada camada. Tal matriz é calculada na estrutura principal do programa, sendo a base de alimentação das sub-rotinas de cálculo de recalques, a seguir descritas. A Figura 5.3.5 apresenta a estrutura conceitual da matriz de estado do programa MSWSET, tendo por base o problema ilustrado na Figura 5.3.1. Neste caso, são simplesmente apontadas as variáveis calculadas pelo programa para cada camada, sobrecarga e estágio de tempo.

Cada mecanismo de compressão contemplado pelo modelo reológico compósito concebido foi introduzido no programa MSWSET através de sub-rotinas próprias. A sub-rotina “PRIMARY” é responsável pelo cálculo do recalque primário das camadas i nos tempos t ($S_{p(i,t)}$), assim como da totalização desta parcela do recalque para o aterro sanitário como um todo a cada instante t ($S_{p,t}$). A determinação dos recalques é realizada tendo por base a primeira componente da formulação analítica do modelo compósito, assim como os elementos de interesse da matriz de estado. O cálculo dos recalques mecânicos secundários é realizado pela sub-rotina “CREEP”, tendo por base o conceito de superposição de efeitos, mencionado no item anterior, os elementos da matriz de estado e a correspondente formulação analítica definida para esta parcela. Neste caso, a sub-rotina calcula os recalques em três distintos níveis, ou seja, (i) recalques de cada camada i , a cada instante t , devido a cada carregamento j ($S_{c(i,j,t)}$); (ii) recalques de cada camada i , a cada instante t , totalizadas as respostas de cada carregamento j ($S_{c(i,t)}$); (iii) recalques totais deste mecanismo de compressão para o aterro sanitário a cada instante t ($S_{c,t}$). A sub-rotina “BIOLOGICAL”, por fim, calcula os recalques devido a biodegradação dos resíduos, tendo por base, igualmente, o conceito de superposição de efeitos, os elementos pertinentes da matriz de estado e a correspondente formulação analítica do modelo compósito. Os recalques são aqui definidos para cada camada i , a cada instante t ($S_{b(i,t)}$), assim como para o maciço como um todo, a partir da totalização das contribuições individuais das camadas nos tempos t ($S_{bio,t}$).

TEMPO

Carnação	8			9			10			11			12			13			NE			
	Δt	$\Delta t_{0,1}$	$\Delta t_{0,2}$	Carnação Δt_c	$\Delta t_{0,1}$	$\Delta t_{0,2}$	Carnação Δt_c	$\Delta t_{0,1}$	$\Delta t_{0,2}$	Carnação Δt_c	$\Delta t_{0,1}$	$\Delta t_{0,2}$	Carnação Δt_c	$\Delta t_{0,1}$	$\Delta t_{0,2}$	Carnação Δt_c	$\Delta t_{0,1}$	$\Delta t_{0,2}$	Carnação Δt_c	$\Delta t_{0,1}$	$\Delta t_{0,2}$	Carnação Δt_c
1	X	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c
2	X	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c
3	X	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c
4	X	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c
5	X	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c
6	X	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c
7	X	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c
8	X	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c	X	X	12345678 Δt_c

Figura 5.3.5 – Matriz de estado definida pelo programa MSWSET baseada no exemplo da Figura 5.3.1 (continuação).

O procedimento descrito permite calcular não só a curva recalque vs. tempo do aterro sanitário, mas também a evolução de recalques de qualquer ponto (camada) interna do maciço ao longo do tempo, conforme será descrito no item 5.3.2.3.

5.3.1.4 Consideração da Influência das Sobrecargas

O programa MSWSET considera a presença de sobrecargas de três formas distintas a partir da definição do parâmetro SGE , como:

- carregamento de largura e comprimento infinito ($SGE = -1$): este caso representa a situação, comum nos aterros de certo porte, de disposição de camadas em grandes áreas de trabalho, configurando amplas regiões carregadas. A sobrecarga, definida como o peso próprio da referida camada, apresenta, nesta situação, fator de influência de tensões I_z igual a 1.
- carregamento de largura finita e comprimento infinito ($SGE = 1$): as áreas carregadas, representadas por camadas de resíduos ou sobrecargas externas, que apresentam dimensões e arranjo, em relação ao maciço subjacente, compatível com a configuração geométrica deste grupo, tem o fator de influência I_z calculado pela sub-rotina “*STRIP*”. Tal sub-rotina tem por base a solução de Boussinesq para a propagação de tensões no interior de maciços de solo, estendida para o presente caso por FADUM (1948). Apesar da aplicação de soluções baseadas na teoria da elasticidade ser questionável para o estudo de comportamento de resíduos sólidos, a mesma foi aqui utilizada pela sua simplicidade quando comparada a outras soluções. A formulação empregada foi obtida da integração da solução original, a partir da equação apresentada por DAS (1993), conforme se segue:

$$\Delta\sigma_z = \int_{-W/2}^{W/2} \left(\frac{2q}{\pi} \right) \left[\frac{z^3}{((X-r)^2 + z^2)^2} \right] dr$$

onde:

$\Delta\sigma_z$ = tensão vertical atuante na profundidade z sob o ponto em análise.

q = sobrecarga atuante à superfície.

z = profundidade sob o ponto em análise.

X = distância na direção x do ponto sob análise ao centro da sobrecarga.

W = largura da sobrecarga.

r = distância do centro da sobrecarga ao elemento de carga infinitesimal de espessura dr ,

Esta variável é utilizada para integrar os elementos de carga infinitesimais de $-W/2$ a $+W/2$.

Como dado de entrada, deve ser informada a distância entre o ponto de interesse e o centro da sobrecarga (X) e a largura da sobrecarga (W). O programa calcula o fator de influência de tensões (razão entre $\Delta\sigma_z$ e q) devido a cada sobrecarga q , para cada camada i , a cada tempo t ($I_{Z(q,i,t)}$).

- carregamento de área retangular ($SGE = 0$): as áreas retangulares, uniformemente carregadas, representadas por camadas de resíduos ou sobrecargas externas, tem o fator de influência I_z calculado pela sub-rotina “RECTANGULAR”. Tal sub-rotina tem igualmente por base a solução de Boussinesq para a propagação de tensões no interior de maciços de solo, estendida para o presente caso por FADUM¹¹ apud BADILLO & RODRIGUEZ (1967). A formulação utilizada é apresentada a seguir:

$$I_z = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1} \left(\frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} \right) + \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 - m^2n^2 + 1} \right) \right]$$

$$m = B/z \quad n = L/z$$

onde:

B = largura da área carregada

L = comprimento da área carregada

z = profundidade sob o ponto de análise considerado (vértice da área retangular).

Para elevados valores de m e n , o denominador do segundo termo da formulação pode se tornar negativo (PINTO, 2000). Para solucionar este problema foi incluída uma terceira componente na equação igual a:

$$+ \pi \left(\frac{(m^2 + n^2 + 1 + m^2n^2) - \operatorname{ABS}(m^2 + n^2 + 1 + m^2n^2)}{2(m^2 + n^2 + 1 + m^2n^2)} \right)$$

Uma vez que a referida formulação diz respeito às tensões propagadas sob o vértice da área carregada, um algoritmo próprio foi desenvolvido para consideração de diferentes combinações de áreas retangulares em função da posição relativa do ponto de interesse. Neste sentido, faz-se necessária a definição das coordenadas (x,y) do ponto de interesse, as coordenadas (XQ , YQ) do vértice inferior esquerdo da área retangular carregada e a

¹¹ FADUM, R.E. (1941). Influence values for vertical stresses in a semi-infinite, elastic solid due to surface loads, Harvard University.

extensão da área carregada nas direções x e y (DX , DY). À semelhança da sub-rotina “STRIP”, o fator de influência é aqui calculado para cada sobrecarga q , cada camada i , e a cada tempo t ($I_{Z(q,i,t)}$).

A profundidade da sobrecarga q em relação à camada i ($z_{i,q}$), utilizada em ambas sub-rotinas de cálculo, é definida como a distância entre a base da sobrecarga e o meio da camada em análise, sendo calculada no programa como a somatória das alturas (espessuras) das camadas subjacentes ao carregamento. Esta profundidade e as alturas das camadas a ela associadas são, no entanto, alteradas na medida em que os recalques vão ocorrendo no aterro sanitário. De forma a considerar as corretas profundidades no cálculo do fator de influência I_z , o programa MSWSET incorpora um algoritmo que define as profundidades a partir da verificação de um critério de convergência para as alturas das camadas dispostas no maciço. O algoritmo basicamente verifica se a diferença entre a prévia e a última altura de camada calculada respeita o critério de convergência. Caso negativo, o processo é reiniciado, sendo a determinação do fator de influência e dos recalques realizado com o valor da última profundidade calculada. O critério de convergência utilizado obedece à formulação proposta por REDDY (1984) para problemas não lineares, conforme formulação a seguir apresentada. Tal critério é verificado para todos os eventos definidos para o problema.

$$\frac{\sqrt{\sum_1^{LAY(m)} |H_{act(i,m)} - H_{calc(i,m)}|^2}}{\sqrt{\sum_1^{LAY(m)} |H_{calc(i,m)}|^2}} \leq \epsilon$$

onde:

$LAY(m)$ = número de camadas do aterro dispostas no aterro no evento m .

$H_{act(i,m)}$ = altura prévia (iteração r) da camada i no evento (instante) m .

$H_{calc(i,m)}$ = altura última (iteração $r+1$) da camada i no evento (instante) m .

ϵ = tolerância para as alturas da camada prévia e posteriormente calculadas.

O valor da tolerância ϵ foi definido através de estudo de sensibilidade durante a fase de testes do programa. A faixa entre 10^{-1} e 10^{-4} foi testada, tendo sido verificado que valores inferiores a 10^{-2} resultavam elevados tempos de processamento com pequeno ganho de precisão. O valor 10^{-2} foi, portanto, fixado para este parâmetro.

5.3.2 Geração de Resultados pelo Programa MSWSET

O programa apresenta as seguintes possibilidades de saída de resultados: (i) recalques totais e alturas reais do maciço ao longo do tempo; (ii) recalques parciais (relativos) ao longo do tempo a partir de um instante pré-definido; e (iii) recalques de pontos (camadas) internos do maciço, para tempos pré-determinados, como a seguir se descreve:

5.3.2.1 Construção da Série Total de Eventos – Recalques Totais e Alturas Reais

A consideração da série total de eventos, ou seja, do histórico completo de construção do aterro, apresenta-se como aspecto de fundamental importância para a adequada previsão dos recalques dos maciços sanitários. Durante o processo construtivo, os resíduos sólidos experimentam deformações, por vezes significativas, com forte impacto nas alturas (elevações) do aterro projetado. O conhecimento prévio da evolução no tempo dos recalques e por consequência das alturas reais dos maciços possibilita a otimização das operações e a utilização futura do volume disponibilizado pela compressão dos materiais. A Figura 5.3.6 apresenta, de forma esquemática e conceitual, o histórico de construção de aterro sanitário, destacando a evolução dos recalques e alturas com o tempo. O programa MSWSET, a partir da definição da série total de eventos do aterro sanitário, fornece como um de seus resultados, as curvas recalque vs. tempo e altura real vs. tempo, baseado no conceito exemplificado na figura citada.

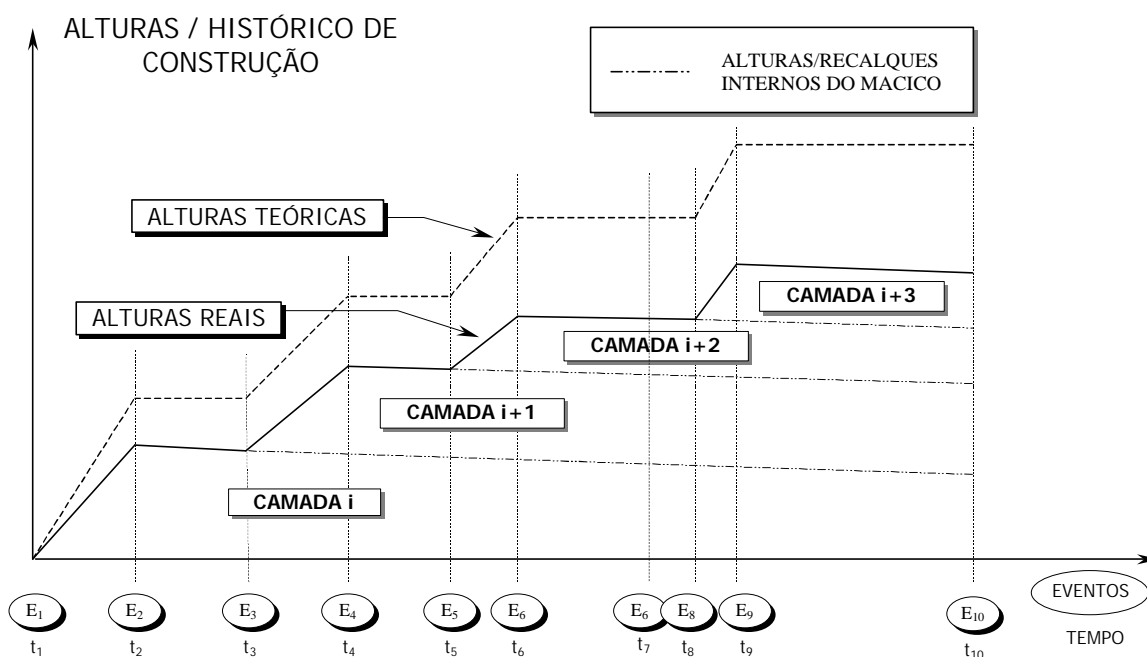
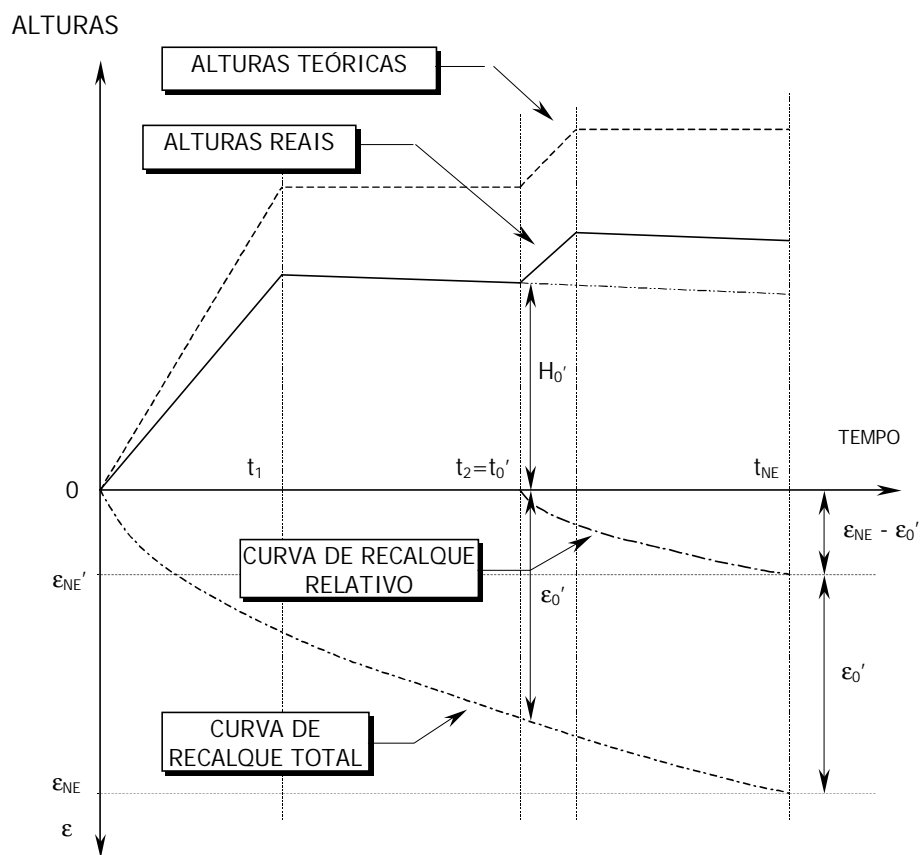


Figura 5.3.6 – Evolução das alturas e recalques do maciço ao longo do tempo.

5.3.2.2 Construção da Série Parcial de Eventos – Recalques Relativos

Do ponto de vista prático, muitas vezes interessa conhecer a evolução dos recalques a partir de um evento específico, por exemplo, no instante que se implanta um determinado instrumento de controle no aterro, ou ainda, a partir do encerramento do mesmo. O programa MSWSET, através da definição do evento de referência (*NSTART*), e tendo por base a série total de eventos e as curvas de recalque total vs. tempo e altura real vs. tempo, gera a curva de recalque relativo vs. tempo a partir do instante de interesse. O conceito envolvido na geração das curvas de recalque ou deformação relativa está ilustrado na Figura 5.3.7.



t_0' = tempo a partir do qual se deseja obter a curva de recalque relativo do aterro (evento *NSTART*)
 t_{NE} = tempo correspondente ao evento final de interesse
 t_1 = tempo correspondente a evento intermediário do aterro
 H_0' = altura real do aterro no instante t_0'
 ϵ_0 = deformação total do aterro no instante $t_2 = t_0'$
 ϵ_{NE} = deformação total do aterro no instante t_{NE}
 ϵ_{NE}' = deformação relativa do aterro no instante t_{NE} , correspondente ao período $t_2 - t_{NE}$

Figura 5.3.7 – Esquema conceitual para reprodução de curvas de recalque relativo pelo programa MSWSET.

Ressalte-se que a escala de tempo, neste tipo de análise, é igualmente inicializada no evento de referência NSTART, possibilitando assim que séries de leituras de campo sejam facilmente comparadas com os resultados do programa. No caso da utilização das curvas deformação vs. tempo, vale também frisar que as mesmas são calculadas tendo por base a altura da coluna de resíduos no instante de referência, conforme ilustrado no exemplo da Figura 5.3.7.

5.3.2.3 Verificação de Recalques e Alturas em Pontos Internos do Aterro

Outra informação de interesse prático diz respeito à determinação dos recalques e também das alturas reais dos maciços em pontos (camadas) internas do maciço. Com este objetivo, foi introduzido no programa principal um algoritmo que permite a determinação destas incógnitas para eventos e pontos (camadas) internas pré-determinadas. O programa requer a definição do número de pontos onde se deseja tal determinação (*NP*), cada um destes associados ao evento (*EVENT*) e camada interna (*LLAY*) de interesse. Com este procedimento, torna-se possível, por exemplo, a obtenção de curvas recalque vs. tempo para camadas internas do maciço, o que pode ser importante subsídio para (i) conhecimento da densificação das camadas face ao processo de compressão dos materiais; e (ii) definição de tratamentos, instalações de instrumentos e dispositivos de drenagem interna, entre outros.

5.4 Aplicação do Programa MSWSET e Estudo para Avaliação dos Parâmetros Reológicos do Modelo Compósito

O programa MSWSET foi aplicado e testado em pontos de controle do aterro experimental e do Aterro Sanitário Bandeirantes, sendo os recalques observados por um período de até 3 anos utilizados para avaliação dos parâmetros reológicos do modelo compósito concebido, como a seguir se descreve.

5.4.1 Seleção dos Pontos de Controle e Preparação dos Dados de Entrada

Foram selecionados 20 pontos de controle na área do experimento, procurando contemplar instrumentos que representassem distintas condições de contorno. Neste sentido, foram utilizados três conjuntos de monumentos: (i) 7 placas de recalque (PR1 a PR6 e PR8), localizadas sob o aterro experimental; (ii) 3 marcos superficiais (MSE5 a MSE7), localizados externamente ao experimento e diretamente sobre o aterro existente; e (iii) 10 marcos superficiais (MSE24, MSE25, MSE28 a MSE33, MSE35 e MSE36), localizados sobre o aterro

experimental. A seleção destes instrumentos procurou ainda ter em conta seções preferenciais de controle que pudessem auxiliar a compreensão dos resultados. A localização dos pontos selecionados pode ser visualizada nas Figuras 3.2.3 e 3.2.10.

O passo seguinte envolveu a definição dos dados e características básicas do aterro sanitário, associadas a cada ponto de controle, para utilização do programa MSWSET, incluindo:

- histórico de construção e seqüência de aterramento: apesar da reprodução exata da seqüência construtiva do aterro mostrar-se tarefa de difícil consecução, foi possível, a partir de hipóteses balizadas, do resgate de dados de controle de operação e de informações dos técnicos responsáveis pelo aterro, ser reproduzida, de forma consistente, a seqüência de aterramento dos resíduos na área de interesse. O Aterro Sanitário Bandeirantes, em seu sub-aterro AS1, envolveu 3 (três) fases de alteamento principais, conforme apresentado na Tabela 5.1.1. Tais fases, com suas respectivas datas-marco, encontram-se apresentadas na Figura 5.4.1, tendo sido a base para reprodução da seqüência de aterramento dos resíduos no maciço. Outras informações utilizadas incluíram as cotas de fundação e elevações intermediárias do aterro existente e a espessura inicial das camadas

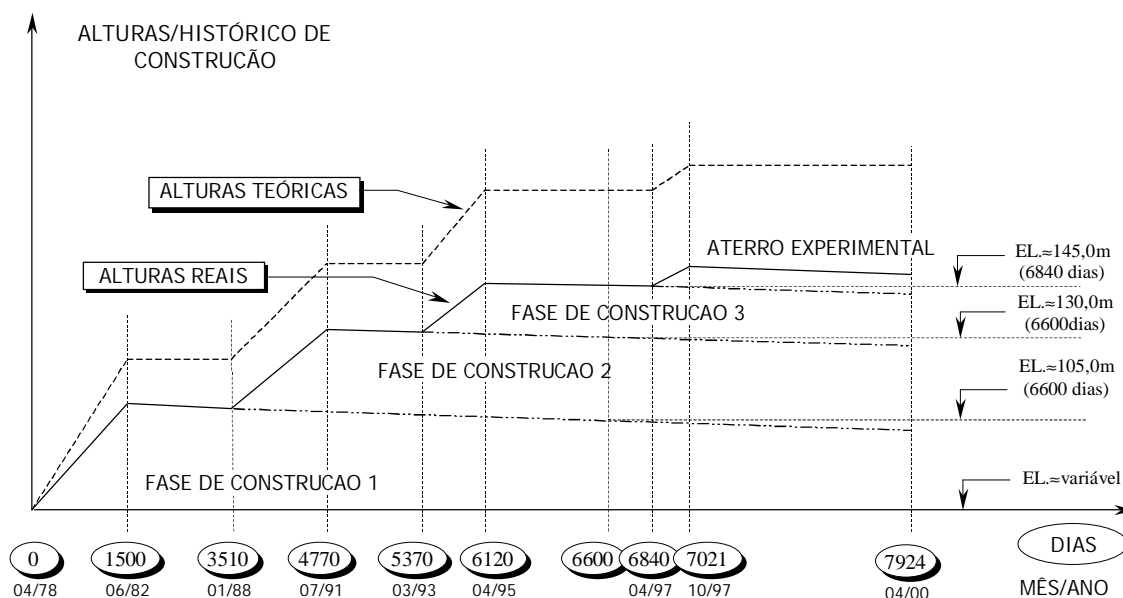


Figura 5.4.1 – Histórico de construção do Aterro Sanitário Bandeirantes (sub-aterro AS1).

As camadas de resíduos, incluindo o material de cobertura diária, foram assumidas como equivalentes às células de resíduos, tendo sido assumido, portanto, uma espessura (altura) inicial de 4,0m, baseado na especificação construtiva do aterro. Tal valor foi

utilizado para caracterizar as camadas do aterro sanitário, exceto para o aterro experimental, cuja espessura das camadas foi objeto de levantamento específico, e para a primeira fase construtiva, cujas espessuras das camadas assumiram valores distintos para acomodar diferenças de altura advindas do modelado irregular do terreno de fundação, como a seguir se descreve. Para as camadas referentes à cobertura final foi assumida uma espessura de 1,0m.

O terreno de fundação do aterro existente sob a área destinada ao experimento apresenta grande irregularidade, com diferenças máximas entre elevações atingindo cerca de 7,0m, conforme pode ser visualizado na Figura 5.4.2, na qual se representa o modelado do terreno de fundação obtido a partir da interpolação de cotas conhecidas. As espessuras das camadas da primeira fase construtiva do aterro, nos 20 pontos analisados, foram ajustadas para ter em conta esta irregularidade. Adotou-se como critério um número de camadas constante para esta fase (9 camadas), fazendo variar as espessuras das mesmas em função da cota de fundação de cada ponto analisado. A lei de variação utilizada obedece a uma relação linear entre a espessura das camadas e a cota de fundação, conforme a seguir apresentada, tendo sido determinada a partir de processo iterativo, com base nos resultados da aplicação do programa MSWSET aos 20 pontos analisados.

$$e_i = -0,325 FL_i + 33,195$$

onde:

e_i = espessura das camadas da fase construtiva 1 para o ponto de controle i .

FL_i = cota de fundação do ponto de controle i .

A seqüência de aterramento, definida com base no anteriormente descrito, apresenta as seguintes características:

- fase construtiva 1: 9 (nove) camadas de resíduo (espessura variável em função da cota de fundação) e 1 (uma) camada de cobertura final (espessura de 1,0m);
- fase construtiva 2: 10 (dez) camadas de resíduo (espessura inicial de 4,0m) e 1 (uma) camada de cobertura final (espessura de 1,0m);
- fase construtiva 3: 5 (cinco) camadas de resíduo (espessura inicial de 4,0m) e 1 (uma) camada de cobertura final (espessura de 1,0m);
- aterro experimental: 5 (cinco), 7 (sete) ou 10 (dez) camadas de resíduo, em função do quadrante de análise (espessura variável) e 1 (uma) camada de cobertura final (espessura de 0,8m).

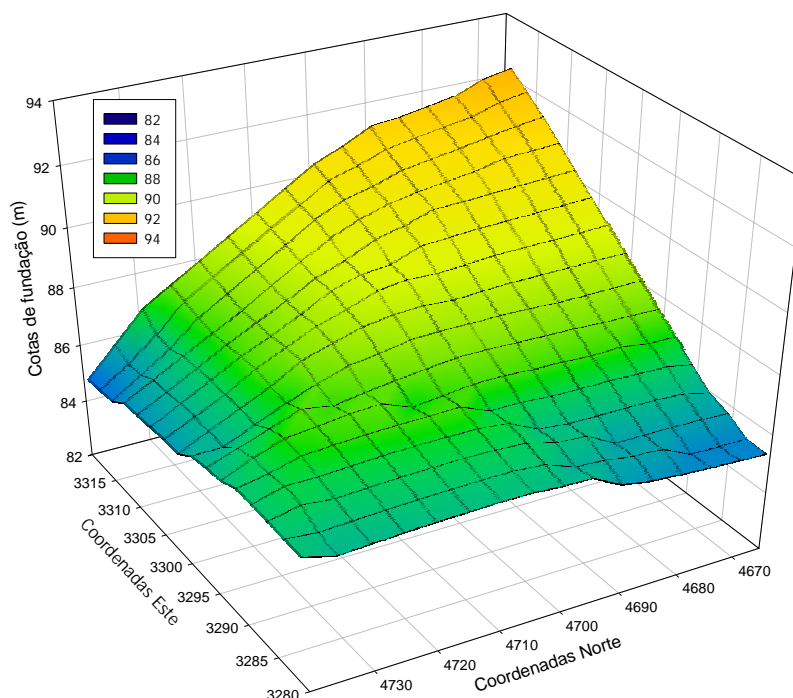


Figura 5.4.2 – Modelado do terreno de fundação do aterro existente sob o aterro experimental.

Os eventos foram estabelecidos tendo por base os instantes de disposição das camadas, de encerramento e início de fases construtivas e de leitura de controle dos recalques a partir da execução do aterro experimental.

- sobrecargas: o aterro experimental, face ao seu arranjo e dimensões, foi considerado como um carregamento retangular, tendo sido estabelecido um sistema de eixos (x,y) para definição das coordenadas dos pontos de controle e dos parâmetros relativos à sobrecarga, conforme apresentado na Figura 5.4.3. Nesta figura, apresenta-se o arranjo e sistema de coordenadas considerado para o aterro, assim como os elementos correspondentes ao quadrante 39 do experimento, onde se encontra localizado a placa de recalque PR5. As camadas de resíduo do aterro existente, por sua vez, foram consideradas como infinitas, tendo um fator de propagação de tensões I_z igual a 1.
- propriedades dos materiais: incluem-se aqui o peso específico inicial dos materiais e os parâmetros de compressibilidade do material, de acordo com o modelo compósito concebido. Estes últimos foram avaliados a partir de procedimento específico, o qual será

descrito no item seguinte. O peso específico inicial das camadas que constituem o aterro existente não é conhecido, sendo o seu valor função da composição e teor de umidade dos resíduos e das técnicas construtivas empregadas para sua disposição, entre outros. Neste sentido e tendo por base os resultados e a experiência adquirida com o estudo de compactação realizado no aterro experimental, foi assumido um peso específico inicial para os resíduos de $7,0 \text{ kN/m}^3$. Tal valor encontra-se na faixa de resultados obtidos para os materiais compactados com trator de esteiras tipo D6, pequeno número de passadas (2 a 4), maiores espessuras (0,6 a 0,8m), e praças de trabalho praticamente planas, as quais refletem as técnicas construtivas empregadas na construção do sub-aterro AS1. Para as camadas do aterro experimental foram utilizados os pesos específicos obtidos no estudo de compactação. Quanto aos materiais de cobertura (solos silto-argilosos) foi utilizado o valor de $17,6 \text{ kN/m}^3$, correspondente ao valor médio obtido em ensaios de densidade *in situ* realizados durante o experimento.

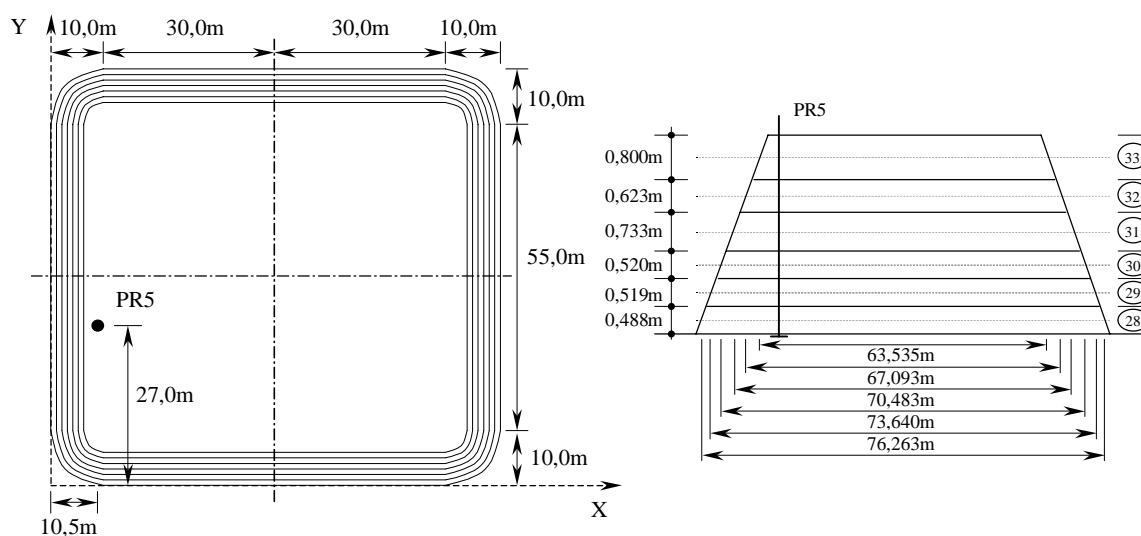


Figura 5.4.3 – Aterro experimental: arranjo geométrico e sistema de coordenadas utilizados para consideração de sobrecarga (representação em corte relativa ao quadrante 39).

A Tabela 5.4.1 apresenta, a título ilustrativo, a entrada de dados tabulada para a placa de recalques PR5, ressaltando que os parâmetros de compressibilidade utilizados para os resíduos sólidos foram determinados através de análises de regressão múltipla não linear, tendo por base os dados observados de até 3 anos de monitoração, conforme descrito a seguir.

Tabela 5.4.1 – Entrada de dados do programa MSWSET tabulada para a placa de recalque PR5.

PLACA DE RECALQUE PR5 (Quadrante 39)													
Cota de fundação (m)			33.000				Altura da coluna de resíduos (m)				56.700		
Fase	Evento	Tempo (dias)	Canasda	Material	Hc	Slead	Fase	Evento	Tempo (dias)	Canasda	Material	Hc	Slead
1	1	160.0	1	1	1	0	4 ⁰³	38	6963.0	28	4	0	1
	2	320.0	2	1	1	0		39	6966.0	28	4	0	1
	3	480.0	3	1	1	0		40	6987.0	28	4	0	1
	4	640.0	4	1	1	0		41	6990.0	28	4	0	1
	5	800.0	5	1	1	0		42	6991.0	28	4	0	1
	6	960.0	6	1	1	0		43	6901.0	28	4	0	1
	7	1120.0	7	1	1	0		44	6904.0	28	4	0	1
	8	1280.0	8	1	1	0		45	6905.0	28	4	0	1
	9	1440.0	9	1	1	0		46	6916.0	28	4	0	1
	10	1590.0	10	2	1	0		47	6919.0	29	5	1	1
2	11	2590.0	10	2	0	0	48	6922.0	29	5	0	1	
	12	3630.0	11	3	1	0	49	6925.0	29	5	0	1	
	13	3790.0	12	3	1	0	50	6931.0	29	5	0	1	
	14	3870.0	13	3	1	0	51	6939.0	29	5	0	1	
	15	3990.0	14	3	1	0	52	6944.0	29	5	0	1	
	16	4130.0	15	3	1	0	53	6945.0	29	5	0	1	
	17	4230.0	16	3	1	0	54	6954.0	30	6	1	1	
	18	4350.0	17	3	1	0	55	6957.0	30	6	0	1	
	19	4470.0	18	3	1	0	56	6965.0	30	6	0	1	
	20	4590.0	19	3	1	0	57	6966.0	31	7	1	1	
	21	4730.0	20	3	1	0	58	6968.0	31	7	0	1	
	22	4770.0	21	2	1	0	59	6971.0	31	7	0	1	
3	23	5370.0	21	2	0	0	60	6986.0	31	7	0	1	
	24	5590.0	22	3	1	0	61	6996.0	31	7	0	1	
	25	5690.0	22	3	1	0	62	7000.0	31	7	0	1	
	26	5790.0	24	3	1	0	63	7022.0	32	8	1	1	
	27	5930.0	25	3	1	0	64	7036.0	33	9	1	1	
	28	6070.0	26	3	1	0	65	7146.0	33	9	0	1	
	29	6120.0	27	2	1	0	66	7153.0	33	9	0	1	
	30	6690.0	27	2	0	0	67	7174.0	33	9	0	1	
4 ⁰³	31	6840.0	27	2	0	0	68	7202.0	33	9	0	1	
	32	6845.0	27	2	0	0	69	7230.0	33	9	0	1	
	33	6849.0	27	2	0	0	70	7257.0	33	9	0	1	
	34	6852.0	27	2	0	0	71	7272.0	33	9	0	1	
	35	6856.0	28	4	1	1	72	7294.0	33	9	0	1	
	36	6859.0	28	4	0	1	73	7306.0	33	9	0	1	
	37	6860.0	28	4	0	1	74	7328.0	33	9	0	1	
Sobrecarga						Material	H ₀ (m)	$\gamma\gamma(kN/m^3)$	Cc	b	c	E ₅₀	d
Canasda	Altura	XQ	YQ	DX	DY	1	4.600	7.800	0.11390	5.42E-04	1.18E-03	0.15434	1.40E-03
						2	1.000	17.600	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
						3	4.000	7.800	0.11390	5.42E-04	1.18E-03	0.15434	1.40E-03
28	0.40E	0.610	0.610	70.780	73.780	4	0.40E	6.961	0.11390	5.42E-04	1.18E-03	0.15434	1.40E-03
29	0.519	1.969	1.969	76.263	71.263	5	0.519	6.503	0.11390	5.42E-04	1.18E-03	0.15434	1.40E-03
30	0.570	3.190	3.190	73.640	68.640	6	0.570	6.826	0.11390	5.42E-04	1.18E-03	0.15434	1.40E-03
31	0.753	4.759	4.759	70.483	65.483	7	0.733	4.804	0.11390	5.42E-04	1.18E-03	0.15434	1.40E-03
32	0.623	6.454	6.454	67.893	62.093	8	0.623	4.804	0.11390	5.42E-04	1.18E-03	0.15434	1.40E-03
33	0.800	8.233	8.233	63.535	58.535	9	0.800	17.600	0.0	0.0	0.0	0.0	

(*) Fase 4 corresponde ao aterro esportivo

5.4.2 Avaliação dos Parâmetros Reológicos do Modelo Compósito. Interface RNLIN - MSWSET

O programa MSWSET foi, nesta fase, modificado para inclusão de uma interface com a sub-rotina RNLIN¹², de forma que análises de regressão múltipla não linear, tendo por base os dados observados, fossem realizadas para determinação do conjunto de parâmetros reológicos do modelo compósito. A sub-rotina RNLIN ajusta um modelo de regressão não linear através do método dos mínimos quadrados, baseado na seguinte formulação:

$$y_i = f(x_i, \theta) + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

¹² IMSL – Visual Numerics – FORTRAN Subroutines for Statistical Applications, STAT Library, Volume 1, versão 3.0, 1994.

onde:

y_i = vetor dos valores observados.

x_i = vetor dos valores calculados para a variável independente do modelo/problema.

θ = vetor dos p parâmetros da regressão.

ε_i = vetor dos valores de resíduos.

n = número de dados do problema (universo amostral).

Na interface desenvolvida a função $f(x_i, \theta)$ foi substituída pelo programa MSWSET, sendo x_i o vetor de resultados do programa (recalques ou alturas calculadas) e θ o vetor com os 5 (cinco) parâmetros reológicos do modelo compósito. O valor y_i , por sua vez, era representado pelo vetor de dados observados (recalques ou alturas) em cada ponto de controle. A construção do vetor y_i (valores observados), para cada monumento selecionado, teve por base duas informações: a altura inicial da coluna de resíduos ao início das leituras de campo (H_i) e a curva altura vs. tempo registrada, conforme esquematizada na figura 5.4.4. Desta forma, a função objetivo seria determinar o conjunto de parâmetros do modelo que não só reproduzisse as curvas recalque relativo vs. tempo, mas também satisfizesse a análise global do problema, aqui representada pela observância da altura da coluna de resíduos ao início do experimento. Os vetores y_i foram, portanto, constituídos por $n+1$ elementos, ou seja, a altura inicial da coluna de resíduos (H_i) e as n leituras de campo. As leituras de recalque, no caso, foram transformadas em alturas observadas pela simples diferença com a altura inicial.

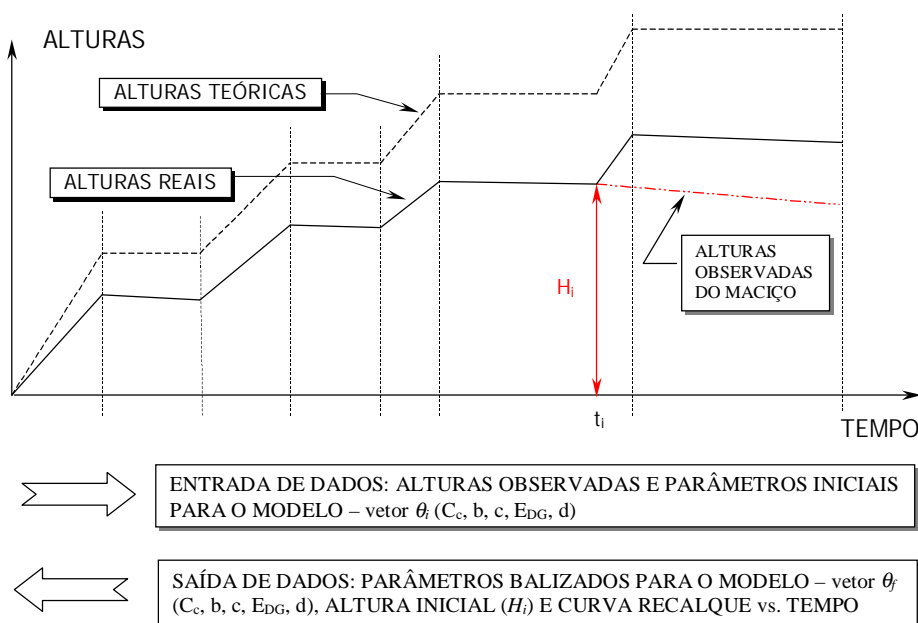


Figura 5.4.4 – Esquema para avaliação dos parâmetros do modelo através do programa MSWSET e da sub-rotina RNLIN.

A Figura 5.4.5 ilustra o fluxograma básico do procedimento descrito. Na interface utilizada são fornecidos como elementos de entrada o conjunto inicial de p parâmetros do modelo compósito (“*first guess*”) e o número de dados observados do instrumento analisado (N_{obs}). Os vetores de alturas observadas ($H_{obs(j)}$) e calculadas ($H_{res(j)}$) são comparados para cada leitura j , buscando a minimização da somatória dos quadrados dos valores residuais ϵ_j . O valor da tolerância T é definido através de distintos critérios de paralisação definidos pela sub-rotina RNLIN.

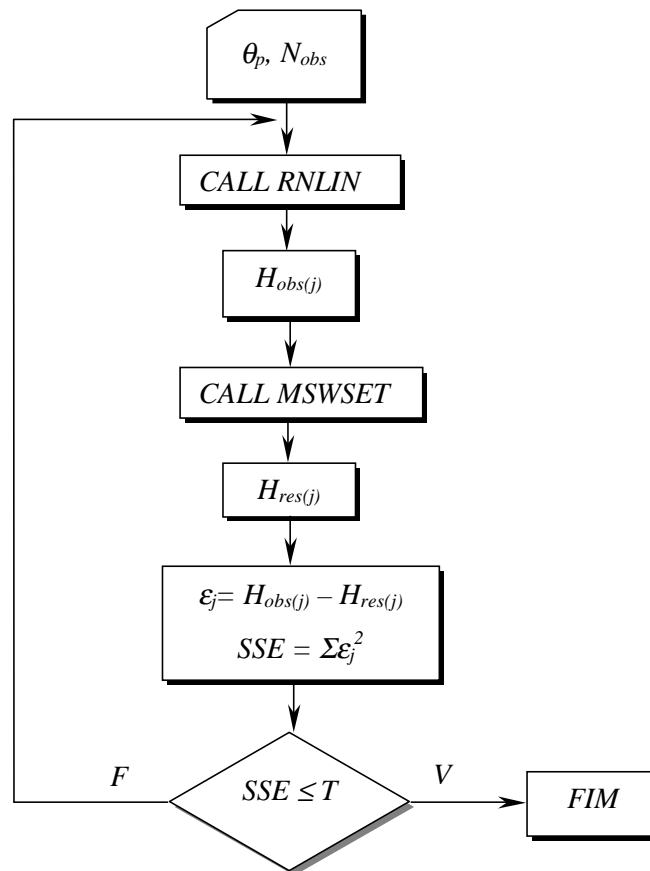


Figura 5.4.5 – Fluxograma simplificado para a interface RNLIN – MSWSET.

Também nesta fase, foi verificada uma variante do modelo compósito original desenvolvido, caracterizado pela introdução de um novo fator de tensões na componente relativa à fluência do material (compressão mecânica secundária), a qual passa, neste caso, a ser representada pela seguinte formulação analítica:

$$\epsilon_c = b^* \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} [1 - e^{-ct}]$$

onde:

ε_c = deformação por compressão mecânica secundária.

b^* = parâmetro de compressão mecânica secundária da variante do modelo.

σ_0 = tensão vertical da camada sob análise quando da aplicação do acréscimo de tensão $\Delta\sigma$.

$\Delta\sigma$ = acréscimo de tensão sobre a camada em análise.

Admitindo acréscimos de carga constantes, o fator de tensões definido apresentará valores decrescentes para as camadas conforme se processa o histórico de carregamento do maciço. O objetivo desta análise adicional foi também verificar o desempenho de uma variante do modelo compósito concebido no estudo de compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos do Aterro Sanitário Bandeirantes, cujos resultados a seguir se apresenta.

5.4.3 Apresentação e Discussão dos Resultados do Programa MSWSET

Baseado nos critérios e procedimentos descritos, o programa MSWSET foi aplicado aos 20 pontos de controle selecionados, tendo sido realizada duas análises distintas: individualizada e global.

A análise individualizada envolveu a obtenção do conjunto de parâmetros do modelo que melhor reproduzissem a altura do maciço, ao início do experimento, e a curva recalque vs. tempo para cada monumento selecionado. Os desvios de recalque ao final do período de registros e os desvios da altura inicial do maciço foram determinados, como forma de verificar o desempenho do modelo para cada ponto analisado. Tais desvios foram calculados tendo por base o conceito e formulação descritos no item 5.1.1. Os coeficientes de determinação R^2 para as análises de regressão efetuadas foram igualmente avaliados neste estudo. A análise global foi realizada posteriormente a partir dos valores médios para os parâmetros do modelo compósito obtidos da análise anterior. Os parâmetros médios utilizados foram: $C_c = 0,10609$; $b = 5,27 \times 10^{-4}$; $c = 1,79 \times 10^{-3}$; $E_{DG} = 0,15853$; $d = 1,14 \times 10^{-3}$. À semelhança da análise individualizada, foram determinados os desvios de recalque, neste caso ao final e ao meio do período de registros, e os desvios da altura inicial do maciço. As Figuras 5.4.6 a 5.4.12 apresentam o conjunto de curvas recalque (observados e calculados) vs. tempo resultantes da análise individualizada e global para os 20 pontos selecionados. A Figura 5.4.13 apresenta, por sua vez, a evolução dos recalques e das alturas do maciço ao longo do histórico de vida do Aterro Sanitário Bandeirantes, calculada pelo programa MSWSET para a posição correspondente a placa de recalque PR5. Ao final do tempo pode-se observar o período referente à execução do experimento, sendo a esta escala, impossível serem feitas distinções entre os valores observados e os calculados pelo programa.

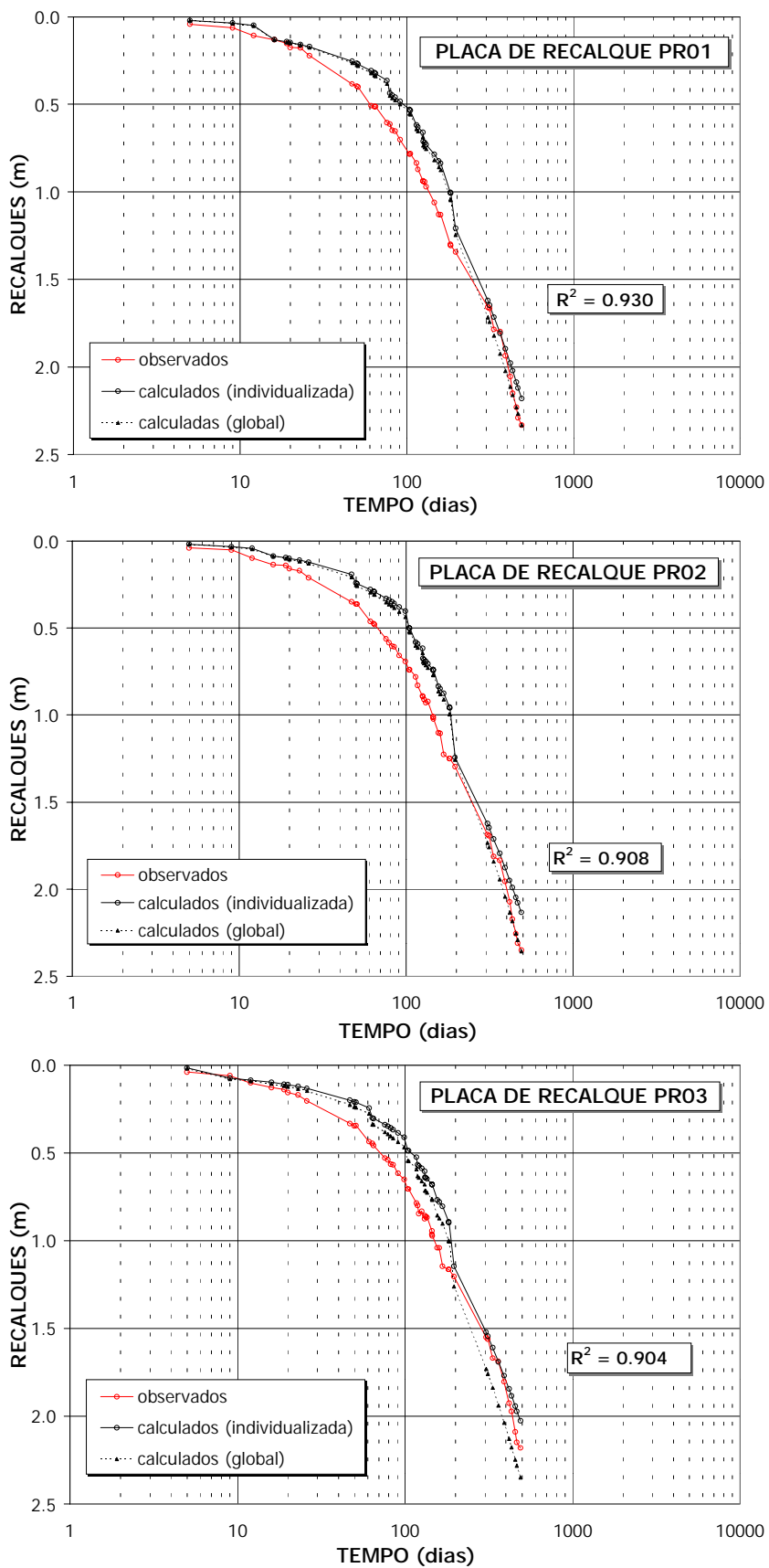


Figura 5.4.6 – Curvas recalque vs. tempo (placas de recalque PR1, PR2 e PR3).

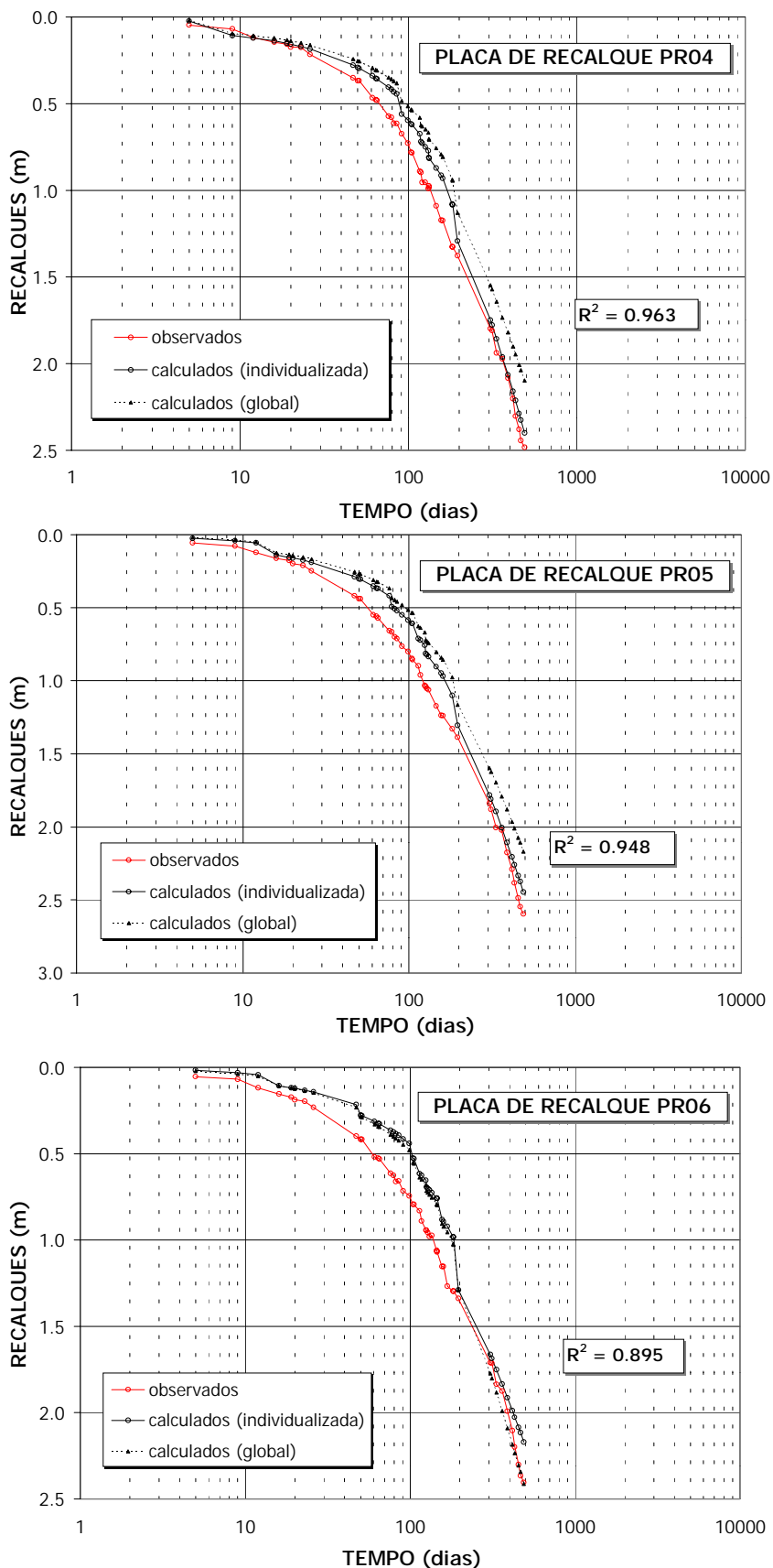


Figura 5.4.7 – Curvas recalque vs. tempo (placas de recalque PR4, PR5 e PR6).

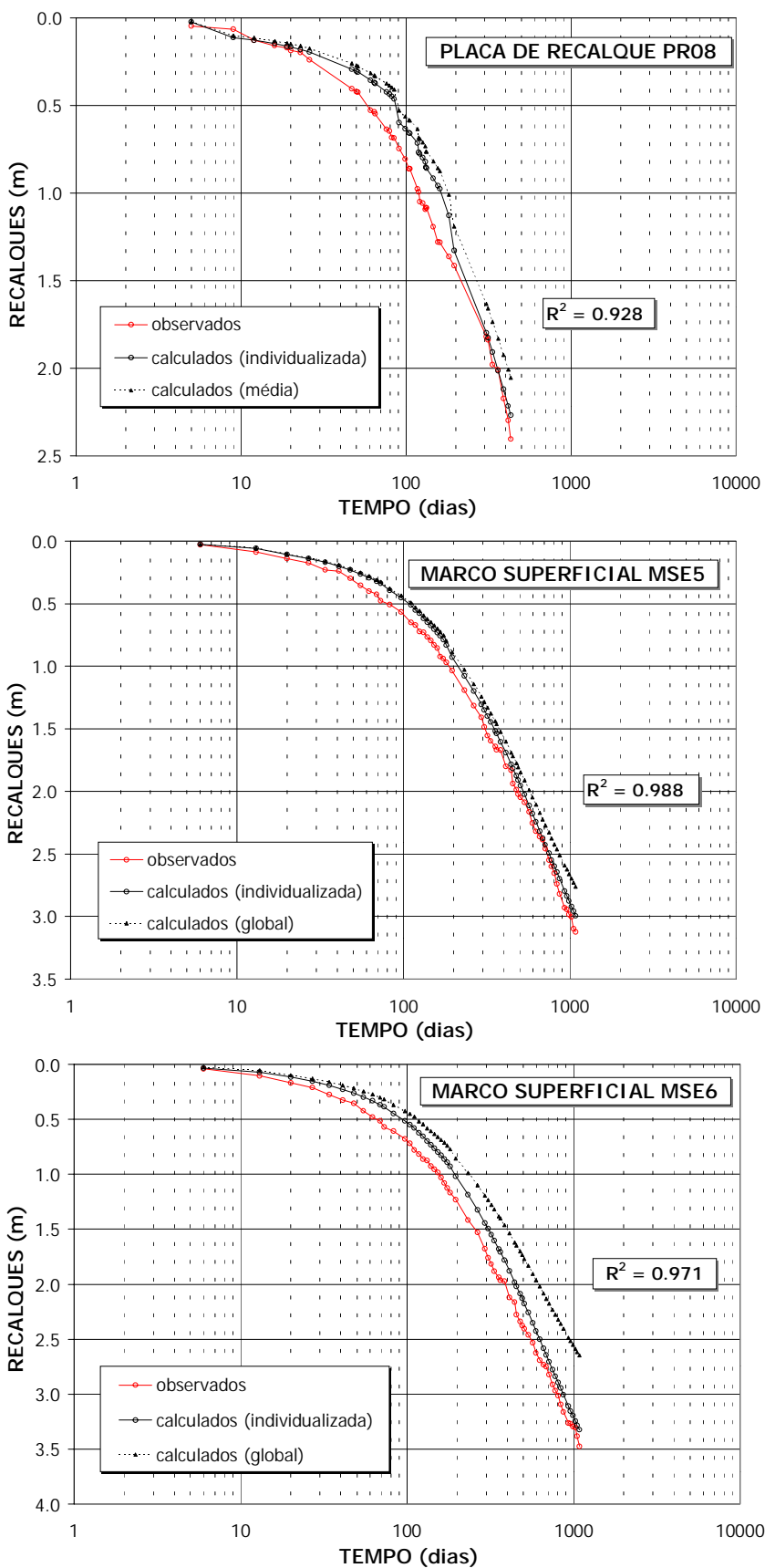


Figura 5.4.8 – Curvas recalque vs. tempo (placa de recalque PR8 e marcos superficiais MSE5 e MSE6).

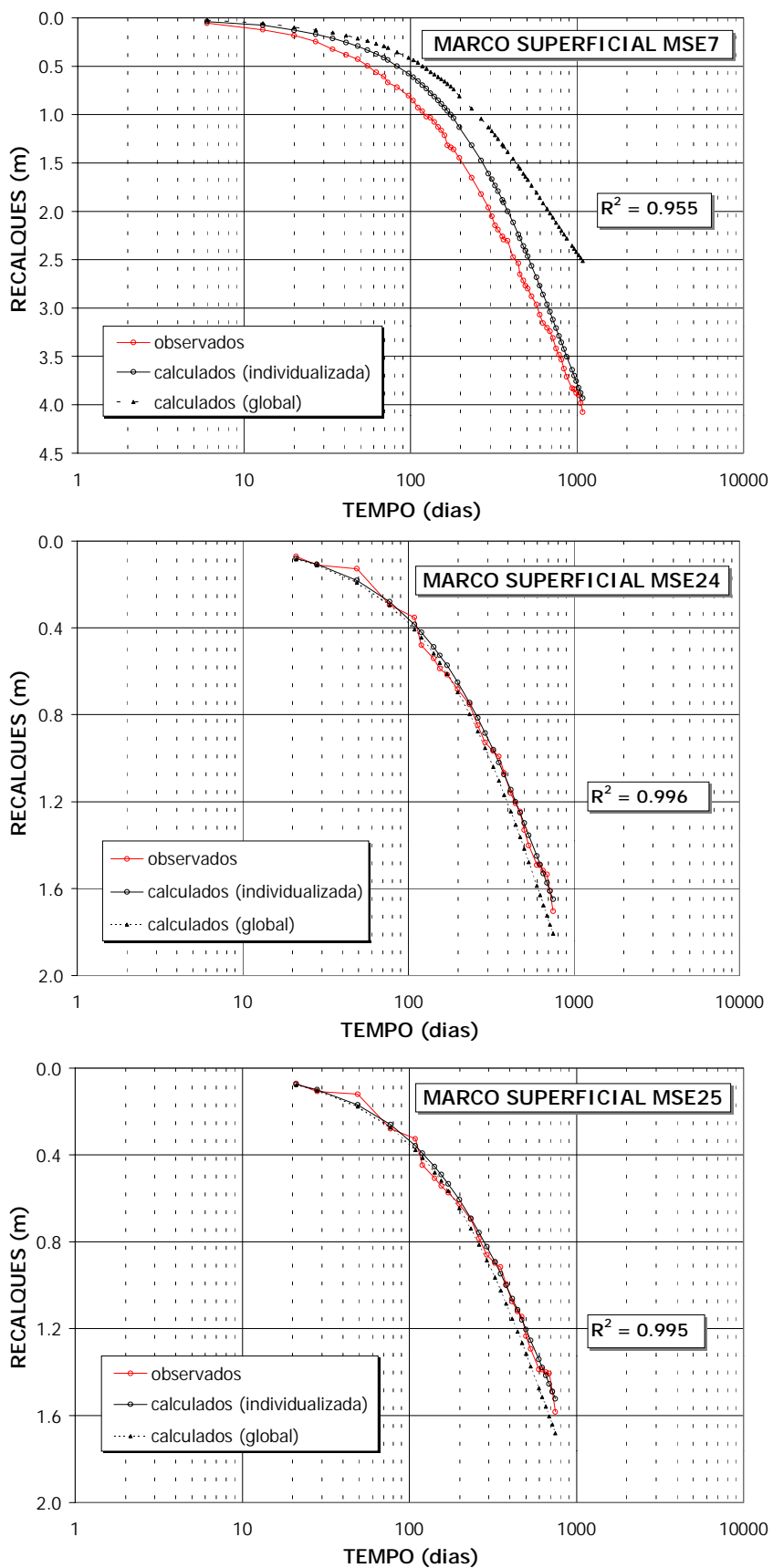


Figura 5.4.9 – Curvas recalque vs. tempo (marcos superficiais MSE7, MSE24 e MSE25).

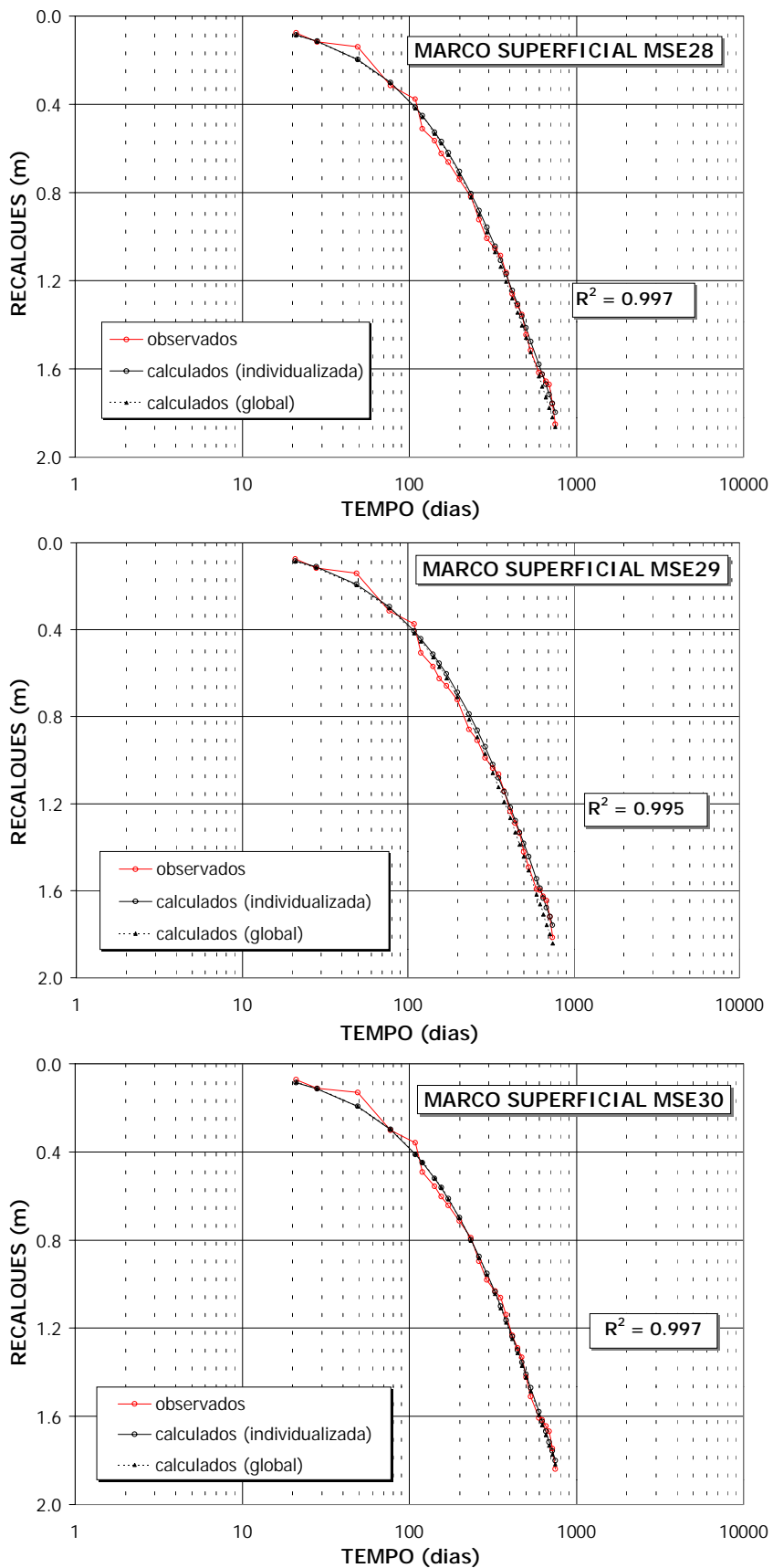


Figura 5.4.10 – Curvas recalque vs. tempo (marcos superficiais MSE28, MSE29 e MSE30).

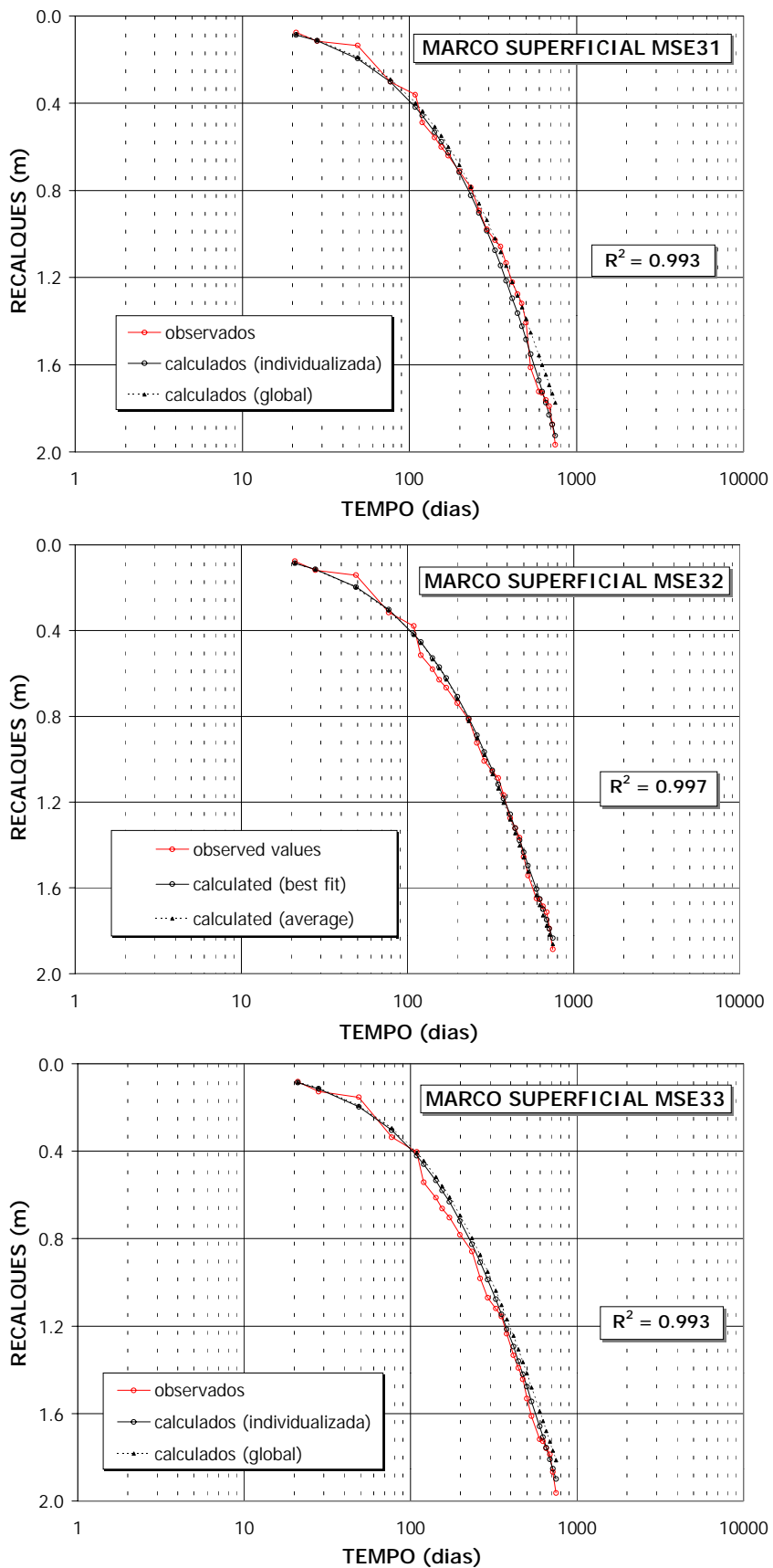


Figura 5.4.11 – Curvas recalque vs. tempo (marcos superficiais MSE31, MSE32 e MSE33).

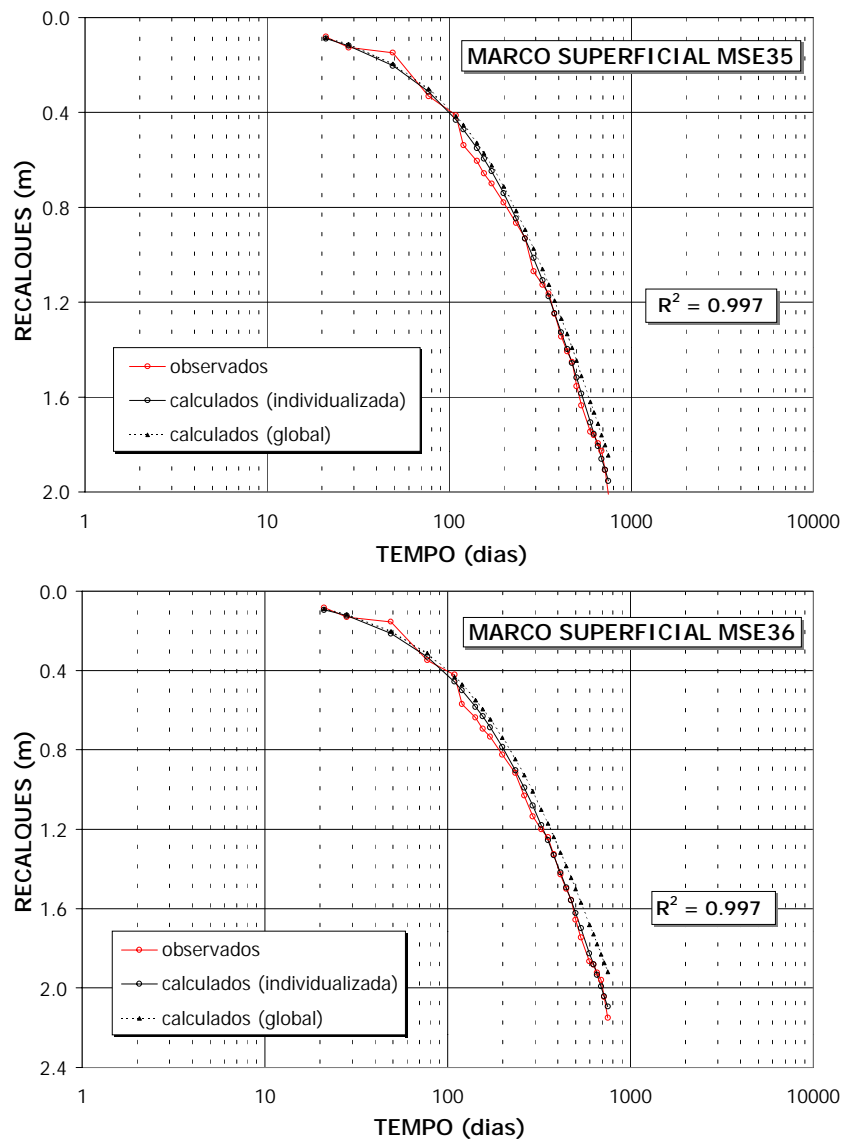


Figura 5.4.12 – Curvas recalque vs. tempo (marcos superficiais MSE35 e MSE36).

A Tabela 5.4.2 apresenta a síntese dos resultados obtidos (recalques, alturas e desvios) para os casos analisados pelo programa, incluindo os parâmetros individuais e médios obtidos para o modelo compósito. Nesta tabela são apresentados ainda os dados básicos de entrada (número de camadas e materiais, cota de fundação, total de eventos e observações, etc) de cada ponto estudado e os resultados das regressões não lineares (total de processamentos, somatória do quadrado dos resíduos, SSE , e coeficientes de determinação, R^2 , em termos de alturas e recalques, para as análises individualizadas e globais). As Figuras 5.4.14 e 5.4.15, por fim, apresentam, em termos gráficos, os desvios de altura inicial e recalque final obtidos, respectivamente, para os casos testados, tendo por base a análise individualizada e global.

A análise do quadro síntese e das curvas de recalque resultantes permite serem feitas as seguintes observações:

- parâmetros do modelo: o procedimento utilizado resultou em consistentes valores para os parâmetros reológicos do modelo. Os desvios padrão e os coeficientes de variação (definidos pela razão entre o desvio padrão e o valor médio) encontrados mostram pequena variabilidade dos parâmetros, exceto para as taxas de compressão secundária mecânica (parâmetro c) e biológica (parâmetro d), as quais apresentam intervalos de variação pouco mais elevados. Tal tendência indica a adequabilidade, em uma primeira análise, do emprego de parâmetros médios para reprodução da compressibilidade dos resíduos sólidos do Aterro Bandeirantes.
- análises estatísticas: os modelos de regressão utilizados resultaram coeficientes de determinação R^2 bem elevados. Valores superiores a 0,90 foram registrados para a maioria dos casos, tanto em termos de alturas como de recalques, considerando as análises individualizadas e globais. Somente os marcos superficiais localizados externamente ao experimento apresentaram coeficientes baixos, quando analisados de forma global, como a seguir se discutirá. Ressalte-se o elevado número de processamentos realizados em alguns casos para atendimento dos critérios de convergência e busca da solução ótima do problema, implicando tempos de execução superiores a 20 horas em equipamento de última geração.

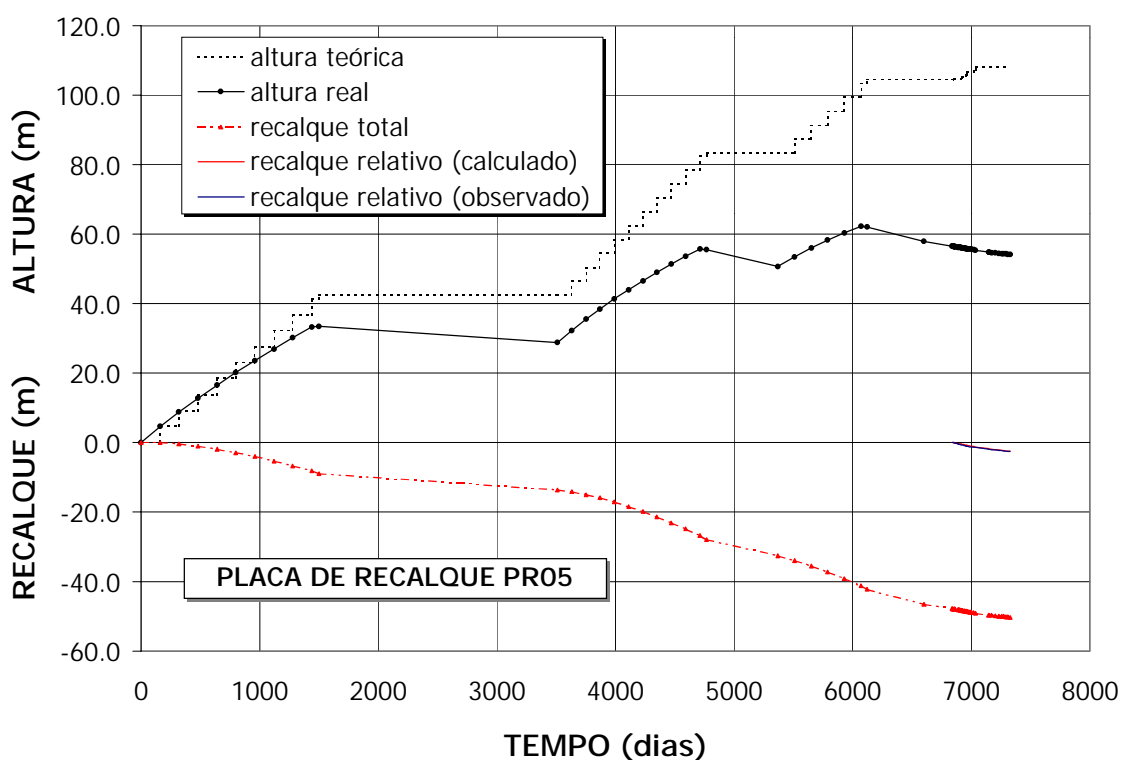


Figura 5.4.13 – Evolução dos recalques e alturas do maciço ao longo do histórico de vida do Aterro Sanitário Bandeirantes. Placa de recalque PR5.

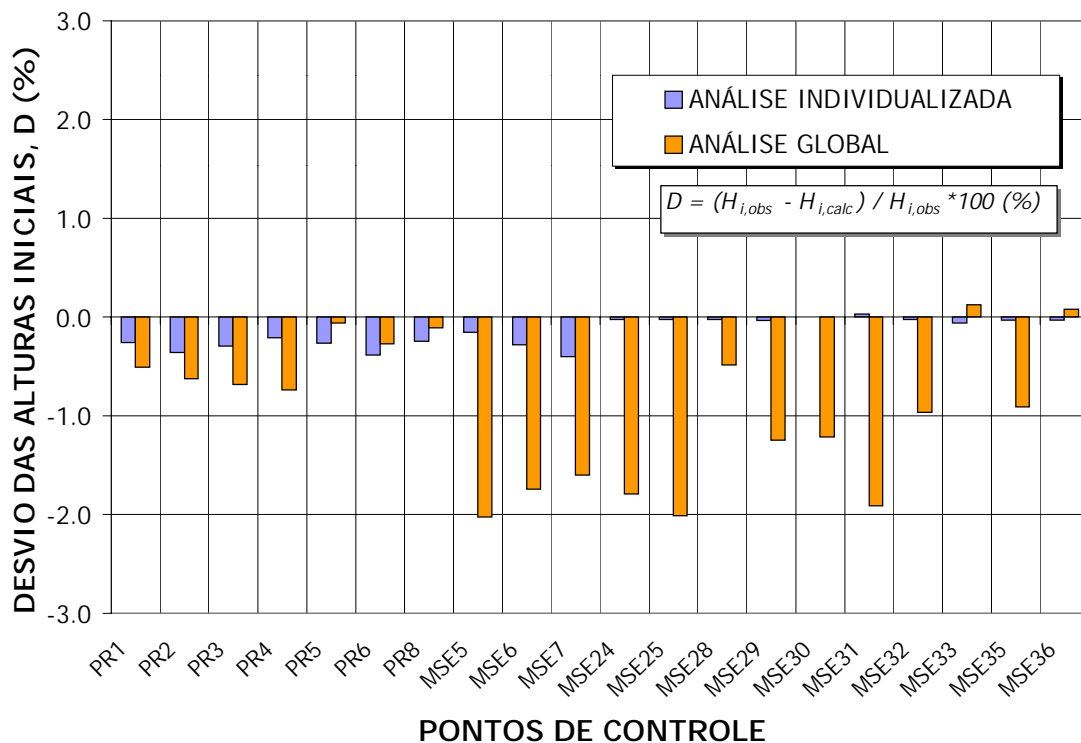


Figura 5.4.14 – Desvios de altura inicial (H_i) para as análises individualizada e global.

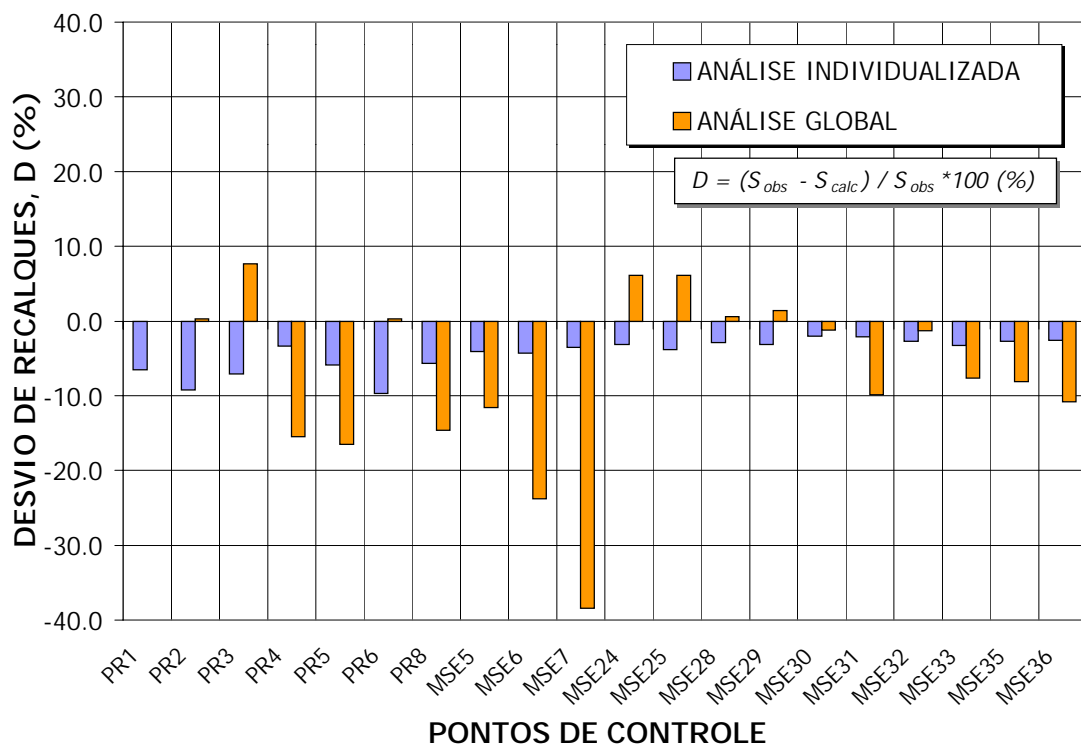


Figura 5.4.15 – Desvios de recalque final (S_f) para as análises individualizada e global.

- desvios de alturas e recalques: inicialmente, vale frisar, que possuindo as alturas, ordem de grandeza de valores superior a dos recalques, é de se esperar, com base na formulação para cálculo do parâmetro D , menores desvios (valores absolutos) para as alturas do que para os recalques. Os desvios de altura calculados foram bem reduzidos, atingindo valores máximos da ordem de (-0,4%) e (-2,0%), respectivamente, para as análises individualizada e global. Tais valores, registrados em casos isolados, representam diferenças máximas de altura de cerca de -0,24m para a análise individualizada, e de -1,13m para a análise global. Quanto aos recalques finais, os desvios calculados apresentaram, na análise individualizada, valores na faixa de (-2,0%) a (-9,7%), o que corresponde a diferenças de recalque entre -0,04 e -0,23m. Na análise global, dois pontos de controle (MSE6 e MSE7) apresentaram resultados insatisfatórios, com desvios superiores a (-20%), cujo comportamento será discutido na seqüência. Excetuando estes casos, os desvios obtidos com parâmetros médios mostraram-se bem razoáveis, com valores na faixa de (-16,5%) e (+7,6%), o que representa diferenças de recalque entre -0,43m e +0,17m.
- marcos superficiais externos ao experimento: a utilização de parâmetros médios para o modelo conduziu a resultados bem razoáveis para todos os casos, exceto para os marcos superficiais localizados externamente ao experimento, notadamente os monumentos MSE6 e MSE7. A explicação para este comportamento pode estar relacionada a uma imprecisa representação do estado de tensões nestes pontos, já que o aterro existente, de maneira simplificada, foi simulado com camadas infinitas, não sendo considerado, portanto, qualquer alteração no estado de tensões, por conta da geometria do maciço. A falta de confinamento lateral nas camadas inferiores (não considerada nos cálculos) acabaria conduzindo a diferente conjunto de parâmetros para o modelo e distintas respostas para as alturas iniciais e curvas recalque vs. tempo. Alia-se a este aspecto a utilização de formulações baseadas na teoria da elasticidade para a determinação do fator de influência de tensões, as quais certamente apresentam limitações quando empregadas em maciços sanitários.
- curvas recalque vs. tempo: as curvas de evolução do recalque relativo com o tempo calculadas pelo programa MSWSET reproduziram de forma satisfatória os comportamentos registrados para os monumentos e períodos testados, com exceção dos casos isolados já mencionados. Nota-se, entretanto, para as placas de recalque controladas, alguma diferença entre os recalques calculados e observados no trecho inicial das curvas. Tal trecho refere-se exatamente ao período construtivo do aterro experimental, o qual apresenta-se sob influência direta dos mecanismos de compressão

primária devido à presença da sobrecarga. A explicação para tais diferenças pode estar associada ao efeito da compactação intensiva junto às camadas superiores (não considerada nos cálculos), a qual teria sido traduzida em termos da antecipação (aumento) de recalques destas camadas. Acrescente-se a este aspecto, as limitações já mencionadas sobre a utilização de formulações baseadas na teoria da elasticidade para reprodução do fenômeno de propagação de tensões no interior de maciços sanitários.

As análises descritas foram igualmente utilizadas tendo por base a variante do modelo compósito, discutida no item anterior. Para tanto, pequenas modificações na sub-rotina “*CREEP*” e no algoritmo de cálculo da matriz de estado do programa MSWSET foram realizadas. A Figura 5.4.16 compara o desempenho do modelo original e desta variante em termos dos desvios de alturas iniciais do maciço (H_i), para os pontos analisados, admitindo a utilização de parâmetros médios (análise global). A Figura 5.4.17 apresenta análise similar, porém em termos do desvio de recalques ao final do período.

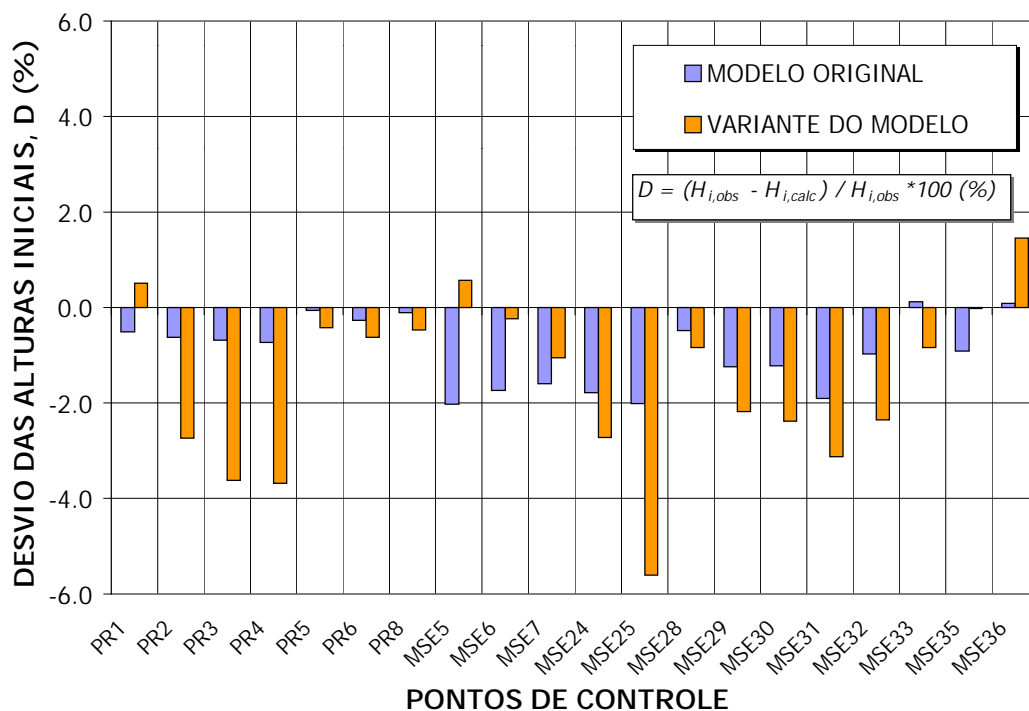


Figura 5.4.16 - Desvios de altura inicial (H_i) obtidos para o modelo original e para a sua variante, a partir de análise global (parâmetros médios).

O emprego da variante do modelo compósito apresentou pior desempenho em termos dos desvios de altura e recalques obtidos. A modificação do fator de tensões na componente de compressão mecânica secundária não mostrou-se por si só suficiente para melhor reproduzir os dados observados no campo, apresentando problemas similares aos detectados na análise anterior para os marcos superficiais localizados externamente ao experimento.

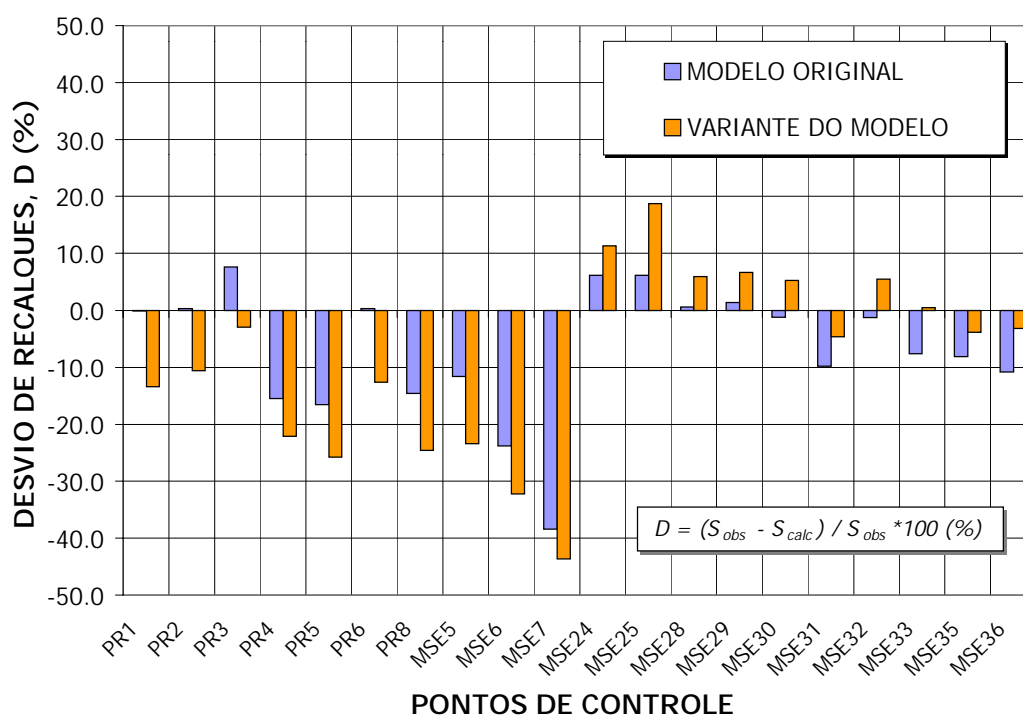


Figura 5.4.17 - Desvios de recalque final (S_f) obtidos para o modelo original e para a sua variante, a partir de análise global (parâmetros médios).

5.5 Estudo Paramétrico a partir do Programa MSWSET

A influência dos parâmetros reológicos do modelo compósito e de outras condicionantes de cálculo foi avaliada através de estudo paramétrico, tendo por base o programa MSWSET. Além dos parâmetros do modelo foram avaliados o efeito da seqüência construtiva, das sobrecargas e da idade do resíduo, como a seguir se descreve.

5.5.1 Influência dos Parâmetros Reológicos do Modelo Compósito

Foram selecionados dois distintos pontos de controle para realização deste estudo: a placa de recalque PR5 e o marco superficial MSE31. As análises foram realizadas fixando todas as variáveis do problema e 4 (quatro) dos 5 (cinco) parâmetros do modelo. Os valores de referência utilizados para os parâmetros do modelo foram os obtidos da análise individualizada, conforme apresentados na Tabela 5.4.2. Cada parâmetro foi analisado com o valor de referência e com valores majorados e minorados de 25%, verificando o impacto desta alteração nas alturas iniciais do maciço e nas curvas recalque vs. tempo resultantes.

As Figuras 5.5.1 a 5.5.5 apresentam os resultados obtidos para a placa de recalque PR5, tendo por base a análise dos parâmetros C_c , b , c , E_{DG} , e d , enquanto as Figuras 5.5.6 a 5.5.10 apresentam os resultados de análise similar para o marco superficial MSE31.

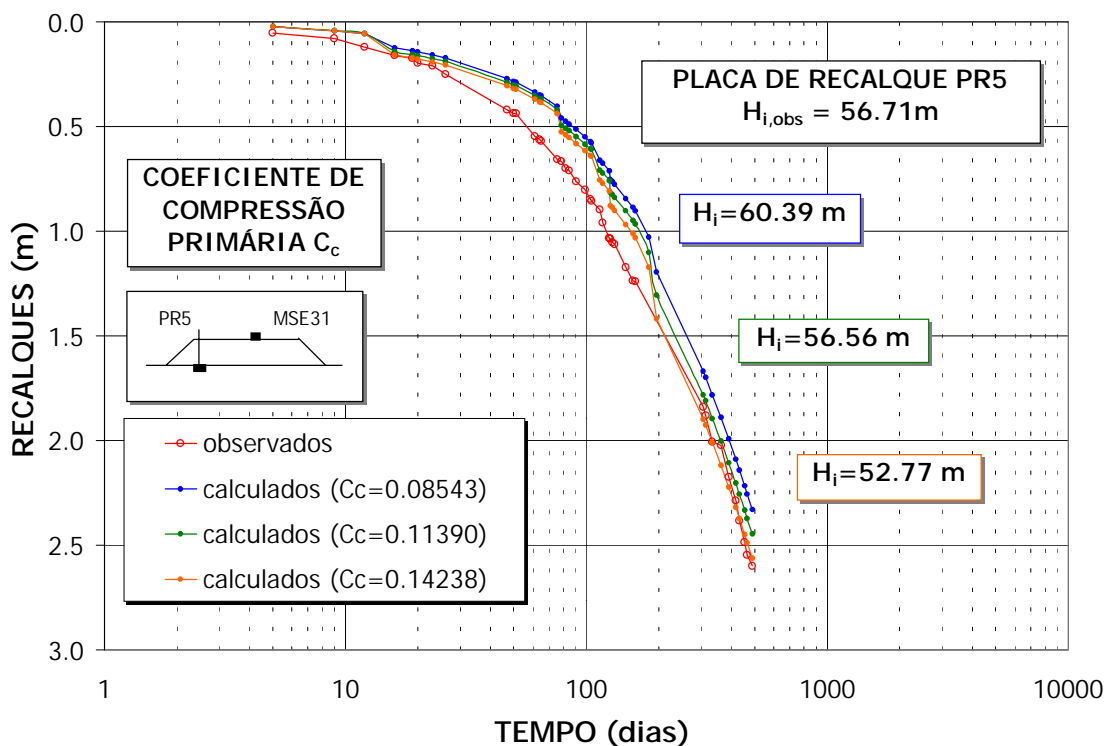


Figura 5.5.1 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão primária C_c (placa de recalque PR5).

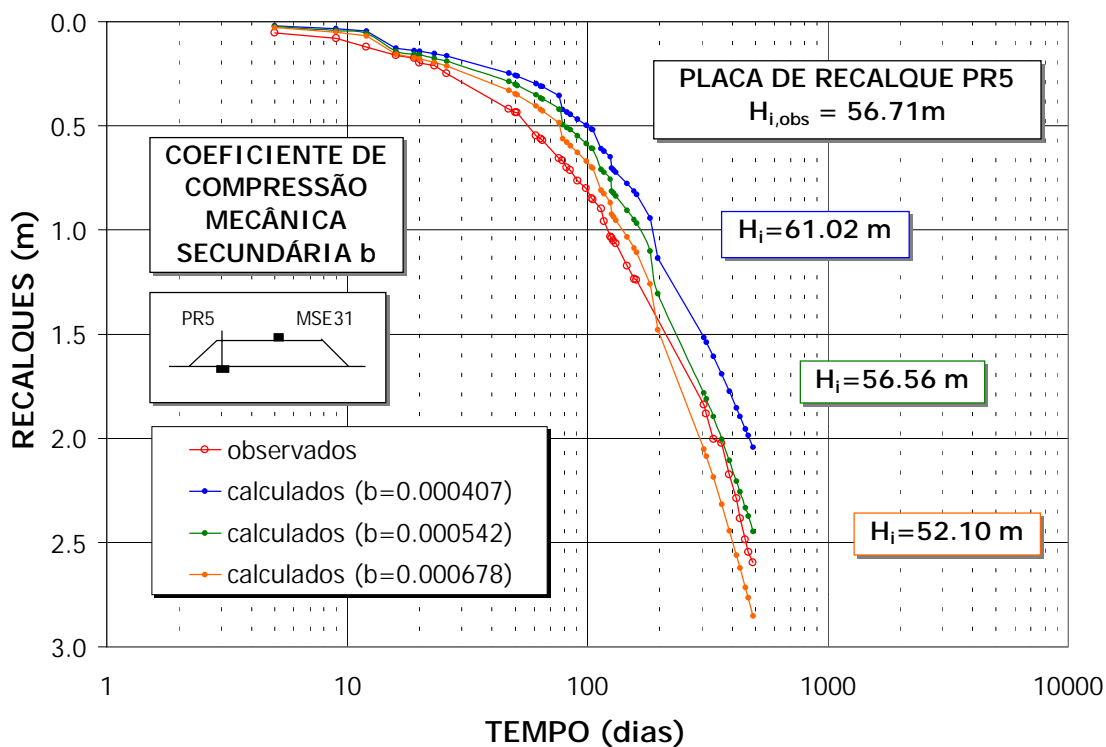


Figura 5.5.2 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão mecânica secundária b (placa de recalque PR5).

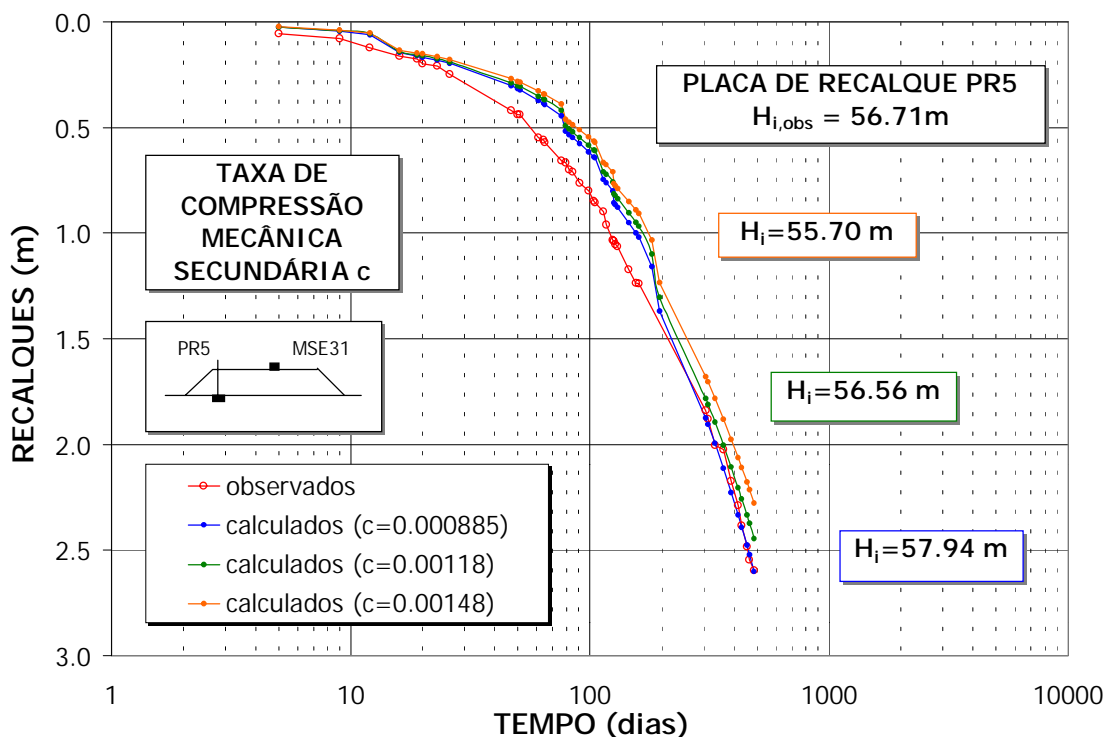


Figura 5.5.3 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores da taxa de compressão mecânica secundária c (placa de recalque PR5).

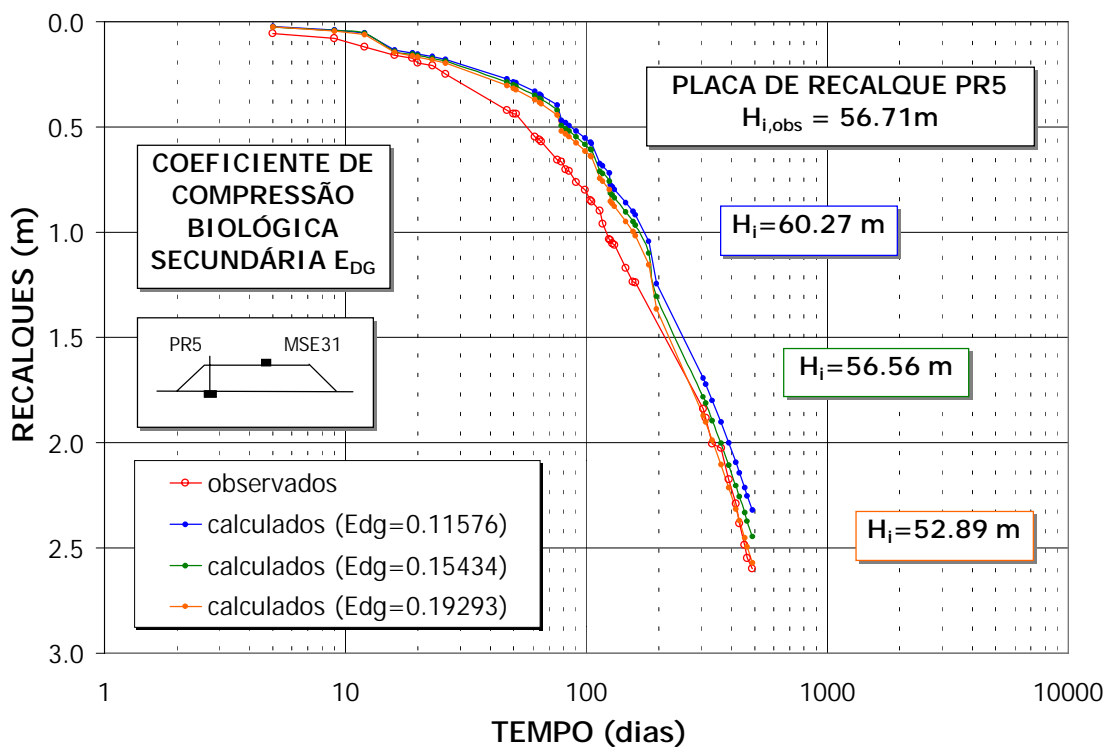


Figura 5.5.4 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão biológica secundária E_{DG} (placa de recalque PR5).

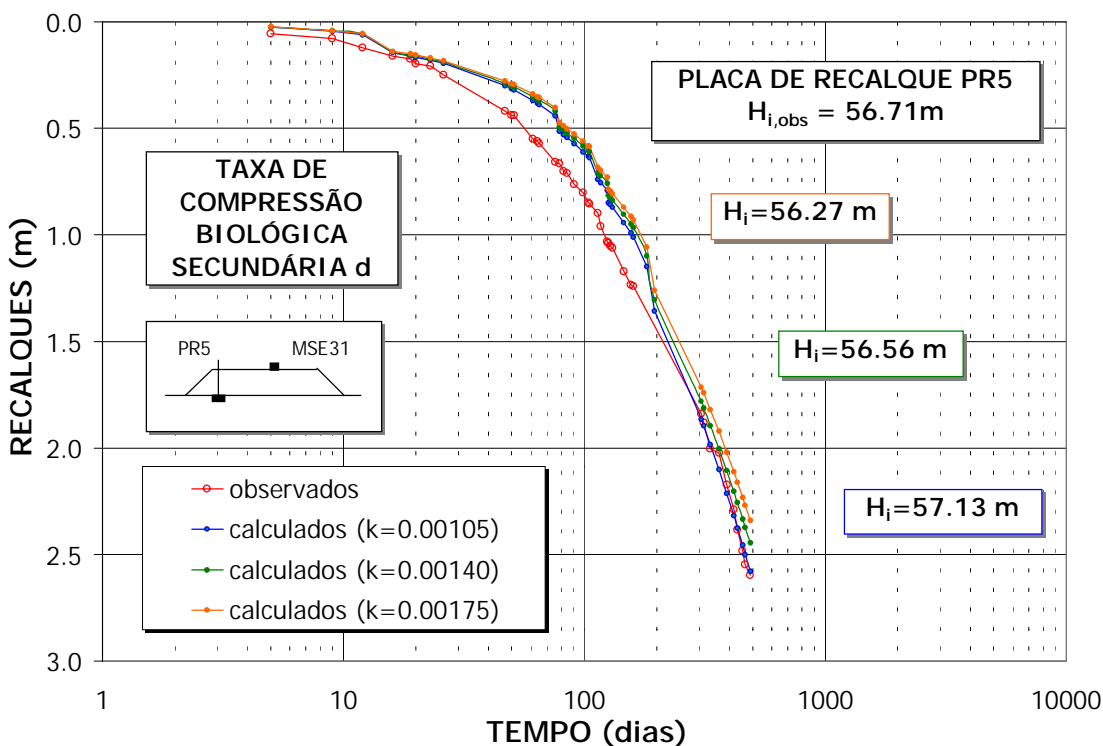


Figura 5.5.5 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores da taxa de compressão biológica secundária d (placa de recalque PR5).

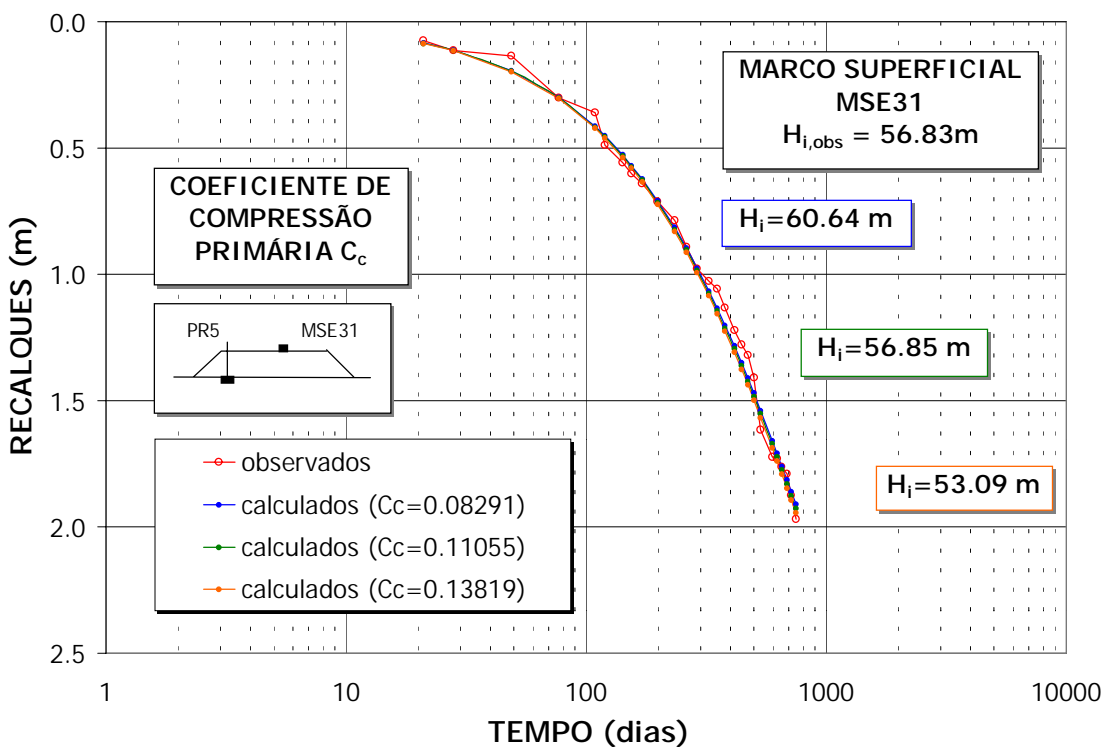


Figura 5.5.6 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão primária C_c (marco superficial MSE31).

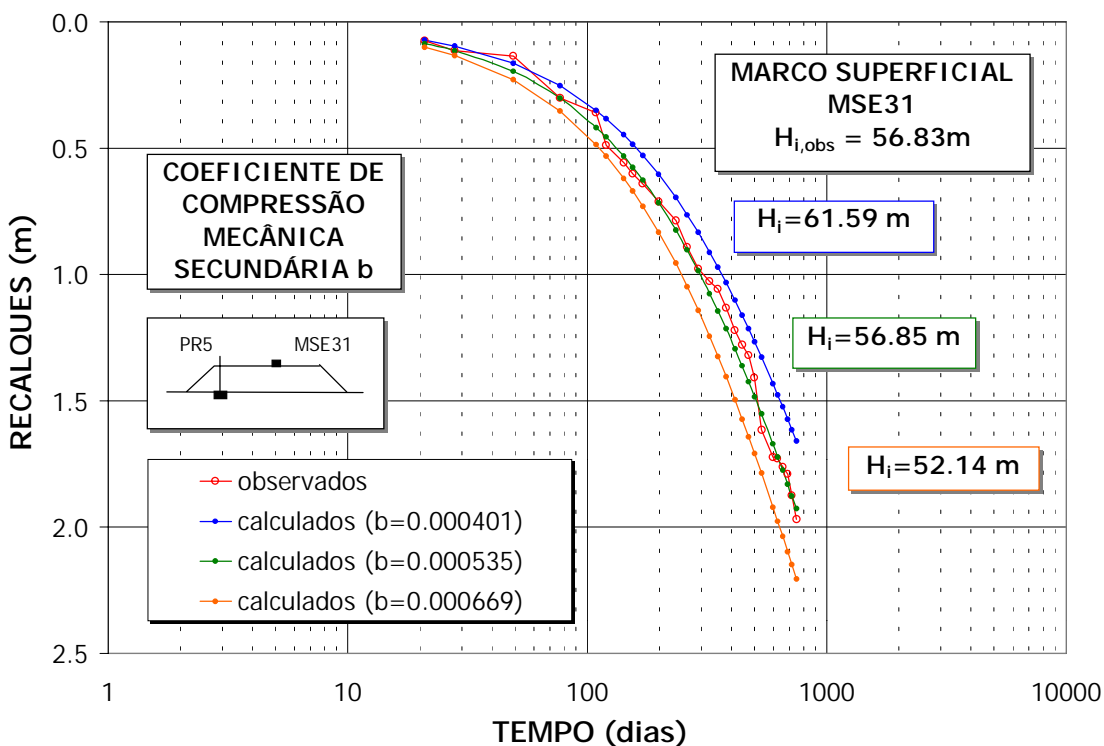


Figura 5.5.7 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão mecânica secundária b (marco superficial MSE31).

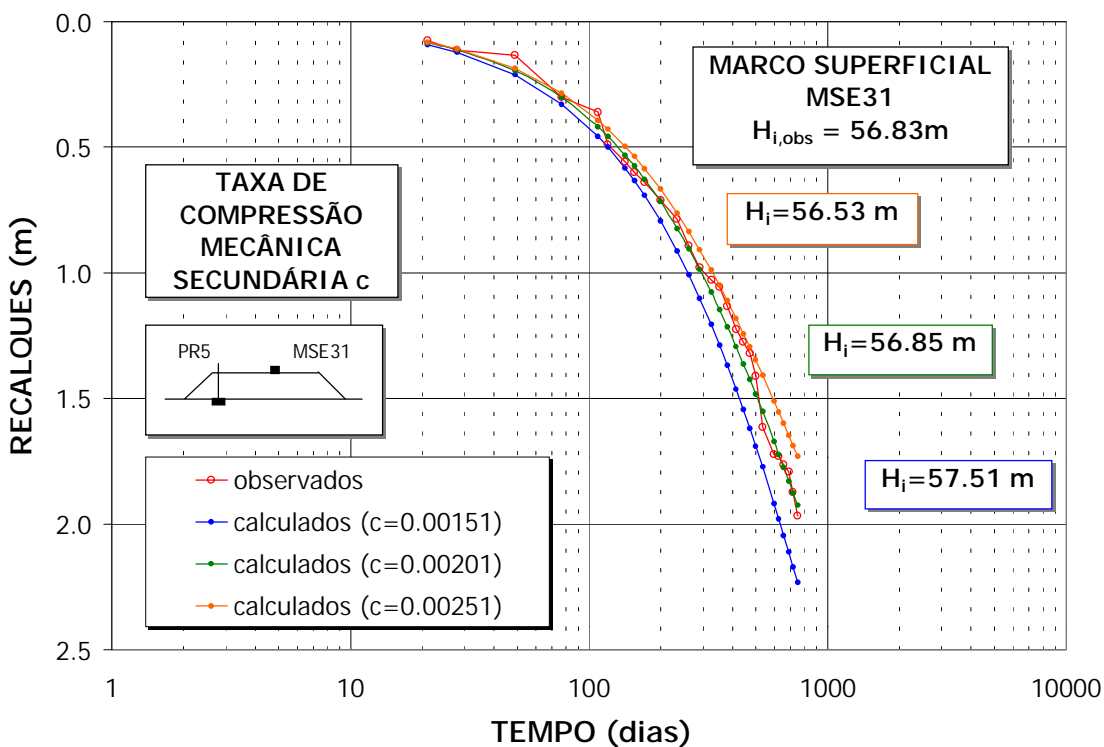


Figura 5.5.8 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores da taxa de compressão mecânica secundária c (marco superficial MSE31).

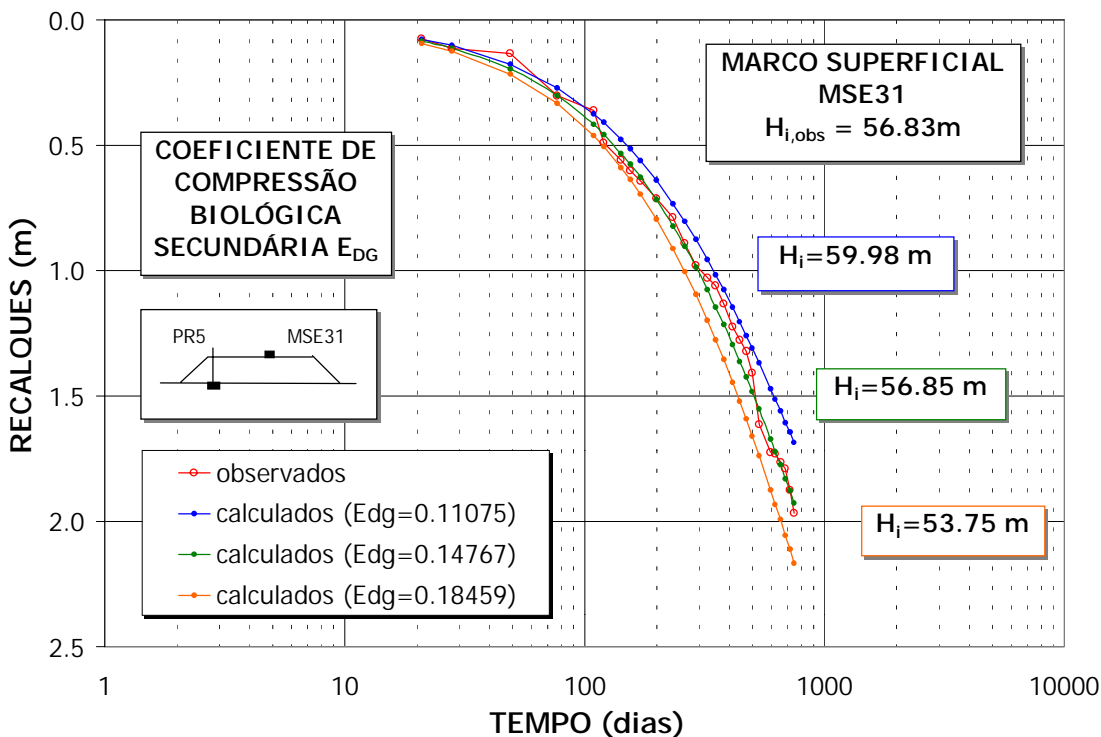


Figura 5.5.9 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão biológica secundária E_{DG} (marco superficial MSE31).

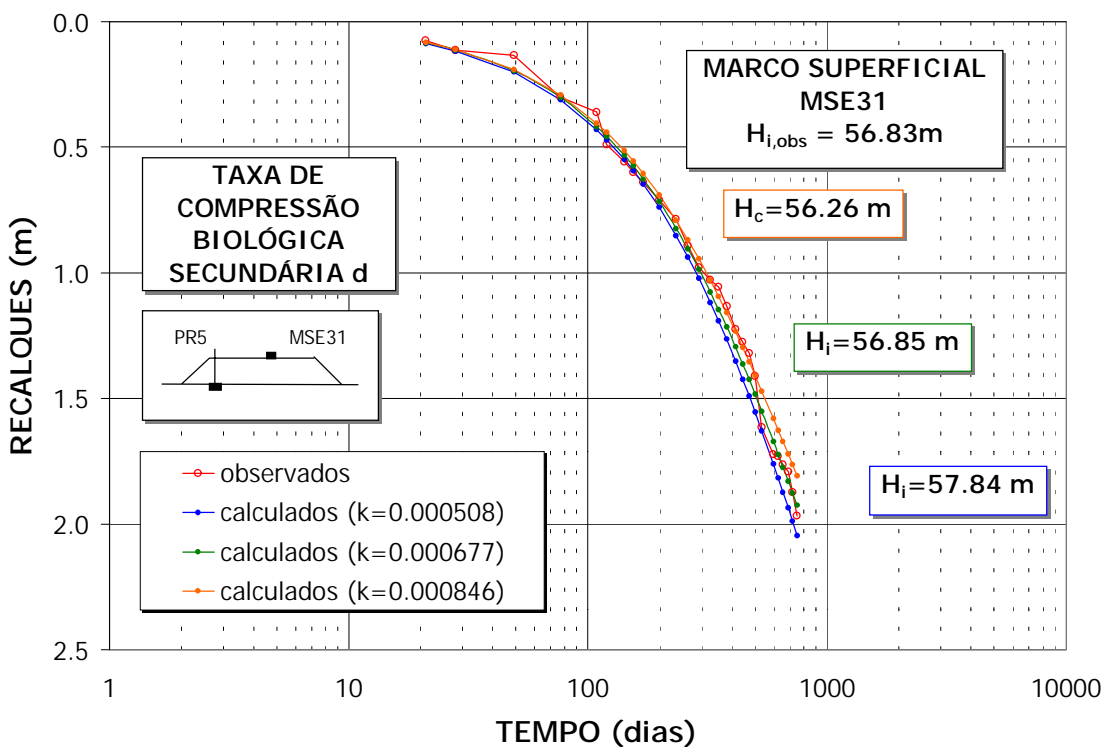


Figura 5.5.10 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores da taxa de compressão biológica secundária d (marco superficial MSE31).

A partir da análise das figuras pode-se observar que a variação dos parâmetros do modelo tem um efeito significativo nos resultados, confirmando a importância dos mesmos para a adequada definição do processo de compressão dos resíduos. O aumento dos coeficientes de compressão primária e secundária do modelo implicam, como esperado, a redução das alturas iniciais (H_i), face a maior compressão dos resíduos, e maiores recalques do maciço no período de controle. A variação do coeficiente de compressão primária (C_c), para o marco superficial MSE31, impacta, no entanto, somente as alturas iniciais do maciço. As curvas recalque vs. tempo são idênticas, visto o período de controle do mesmo ter sido iniciado após o encerramento do aterro experimental, não havendo, portanto qualquer sobrecarga externa que resultasse em compressão mecânica primária do maciço.

O aumento das taxas de compressão secundária mecânica e biológica (parâmetros c e d) apresenta, para os casos analisados, efeito diferenciado do comportamento anterior, ou seja, redução de alturas iniciais e também de recalques. Maiores taxas implicam a aceleração (antecipação) dos recalques das camadas de resíduos, conduzindo a menores alturas do maciço. No longo prazo, no entanto, os recalques serão menores face à proximidade de sua estabilização. Lembre-se que no caso estudado os tempos totais encontram-se na faixa dos 7.000 dias. O efeito da variação destes parâmetros do modelo (taxas de compressão) deve, portanto, sempre ser analisado em conjunto com a variável tempo e a seqüência de aterramento do maciço sanitário.

Sendo o cálculo dos recalques pelo programa MSWSET baseado em conceitos de superposição de efeitos, seqüência de aterramento, tempos diferenciados para início dos processos de compressão, etc fica patente que variações dos parâmetros do modelo não implicam em respostas equivalentes ou mesmo proporcionais à magnitude das alterações, representando, porém influência significativa nas respostas do maciço, em termos dos recalques e alturas resultantes.

5.5.2 Efeito da Sobrecarga – Fator de Influência de Tensões I_z

O efeito da sobrecarga no processo de compressão dos resíduos foi avaliado pelo programa MSWSET a partir da consideração ou não do fator de influência de tensões I_z . Para esta análise foram utilizados 3 (três) monumentos com distintas condições de contorno (placa de recalque PR5 e marcos superficiais MSE6 e MSE31), verificando o comportamento dos mesmos para duas situações: (i) consideração do aterro experimental como um carregamento uniformemente distribuído em área retangular, conforme descrito no item 5.4.1; e (ii) consideração do aterro experimental como uma sucessão de camadas

infinitas, similarmente ao considerado para as camadas do aterro existente, ou seja, com o fator de influência de tensões igual à unidade.

As Figuras 5.5.11 a 5.5.13 apresentam as alturas iniciais resultantes e as curvas recalque vs. tempo, observadas e calculadas, para os pontos de controle mencionados.

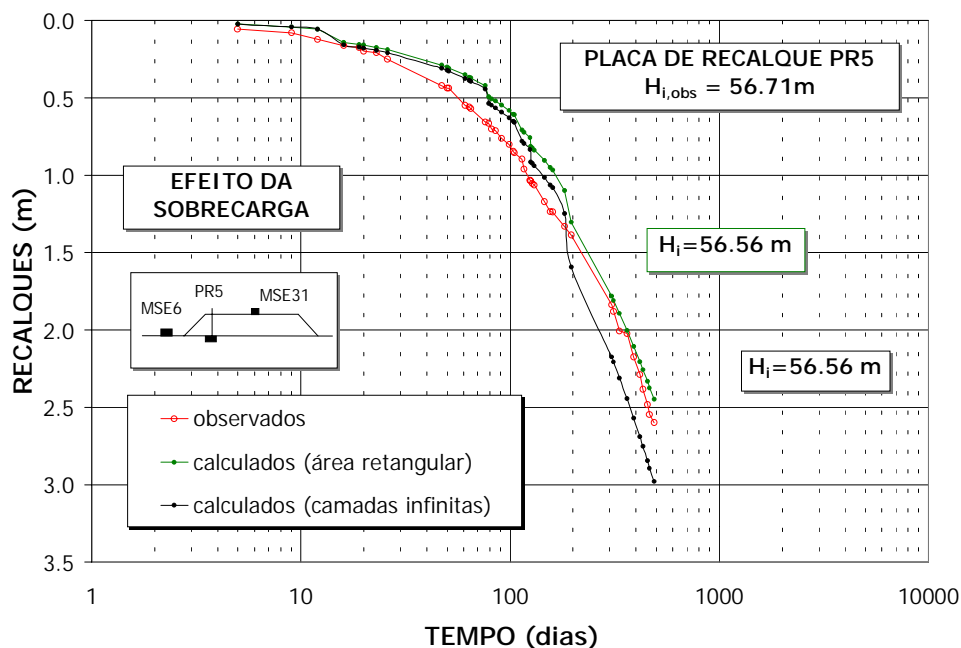


Figura 5.5.11 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintas representações de carregamento do aterro experimental (placa de recalque PR5).

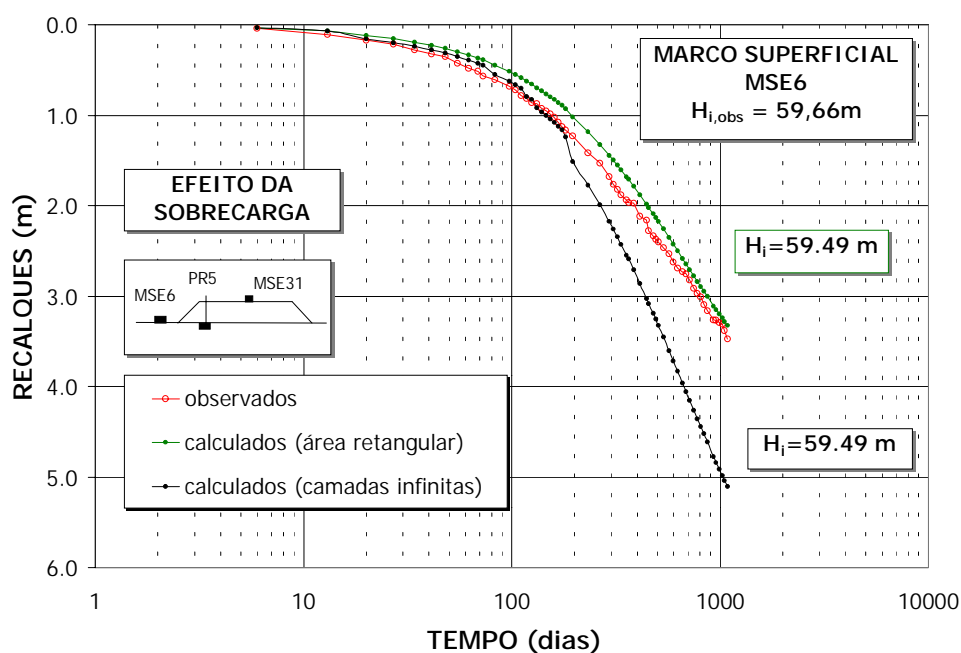


Figura 5.5.12 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintas representações de carregamento do aterro experimental (marco superficial MSE6).

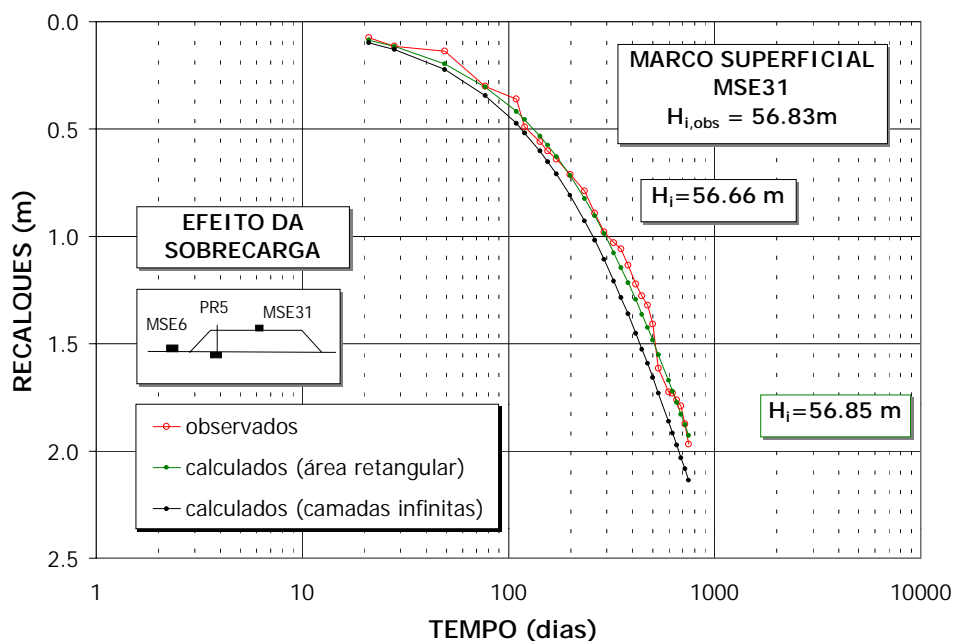


Figura 5.5.13 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintas representações de carregamento do aterro experimental (marco superficial MSE31).

As alturas iniciais obtidas para as distintas simulações de carregamento foram idênticas quando analisadas a placa de recalque PR5 e o marco superficial MSE6. Tal resultado justifica-se, uma vez que tais alturas refletem o processo de compressão experimentado pelo aterro existente, o qual foi simulado da mesma forma (camadas infinitas) em ambos os casos. Para o marco superficial MSE31, no entanto, foram obtidos valores distintos para as alturas iniciais do maciço, com os menores valores correspondendo à condição de camadas infinitas (maior compressão das camadas devido ao fator I_z igual a 1).

O efeito mais significativo se faz presente nas curvas recalque vs. tempo, sendo observado, como esperado, o aumento dos recalques quando não considerado qualquer lei de minoração das tensões propagadas no interior do maciço por conta da geometria e posição da sobrecarga. No marco superficial MSE6, localizado em área externa ao experimento, tal efeito é mais pronunciado, sendo a situação de carregamento pleno (camadas infinitas) responsável pela majoração dos recalques finais em cerca de 53%, quando comparada aos valores obtidos para a situação de carregamento em área retangular. Tais resultados reforçam e fornecem maiores subsídios às justificativas acerca do desempenho não satisfatório dos instrumentos localizados externamente ao experimento, conforme discutido no item anterior. Nota-se, portanto, a importância da correta consideração do efeito da sobrecarga para a previsão dos recalques e caracterização do comportamento de aterros sanitários através do modelo e programa de cálculo concebido.

5.5.3 Influência da Sequência Construtiva do Aterro Sanitário

A sequência de aterramento dos resíduos no aterro sanitário apresenta-se como fator de relevada importância na estrutura conceitual do programa MSWSET. Para verificação da influência desta condicionante do problema, foram verificadas as respostas do maciço para duas sequências construtivas distintas, tendo por base a placa de recalque PR5. A sequência construtiva 1 corresponde a sequência básica utilizada em todas análises anteriores e descrita no item 5.4.1, podendo ser caracterizada pela presença de 33 camadas (resíduos e material de cobertura), incluindo às referentes ao aterro experimental. A sequência construtiva 2 foi idealizada, respeitando as datas-marco apresentadas na Figura 5.4.1, porém assumindo que um maior número de camadas, com iguais características, tenha sido disposto no aterro. Tal sequência é caracterizada pela presença de 36 camadas (resíduos e material de cobertura), estando o aterro experimental incluído em condições semelhantes à considerada para a sequência 1. A Figura 5.5.14 apresenta as alturas iniciais e as curvas recalque vs. tempo obtidas para as duas sequências de aterramento mencionadas.

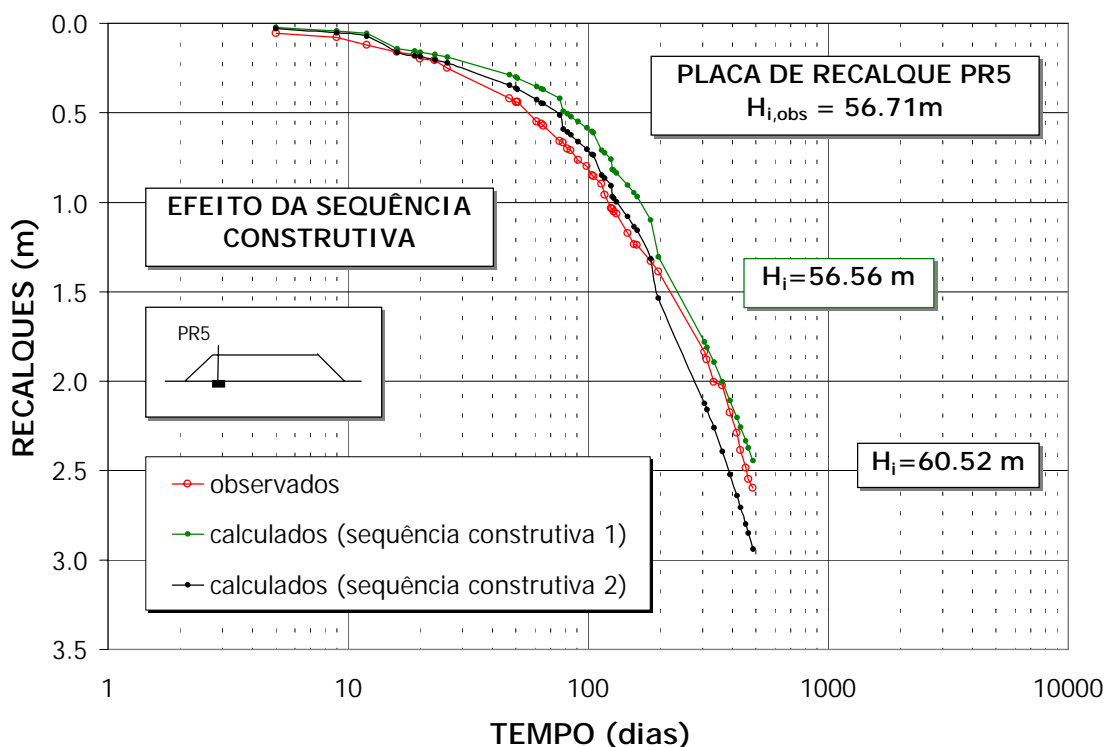


Figura 5.5.14 -- Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintas sequências construtivas do aterro existente (placa de recalque PR5).

A adição de 3 (três) novas camadas à sequência construtiva original, representou um acréscimo de cerca de 11,5% à altura teórica total disposta no aterro, resultando em

acréscimos de cerca de 7% e 20% nos valores das alturas iniciais do maciço e dos recalques finais, respectivamente. Tais resultados igualmente confirmam a importância da correta definição da seqüência de aterramento das camadas para previsão de recalques.

5.5.4 Influência da Idade do Resíduo Aterrado

Neste caso, foram utilizados diferentes parâmetros do modelo composto para os resíduos do aterro existente (resíduos antigos) e para os resíduos do aterro experimental (resíduos novos), tendo por base o marco superficial MSE31. A análise utilizou para os resíduos antigos os parâmetros encontrados da análise individualizada dos pontos de controle, conforme indicado na Tabela 5.4.2. Para os resíduos novos, estes parâmetros foram minorados em 25%, como forma de ter em conta a melhoria das propriedades do material, face à compactação intensiva a que foram submetidos estes resíduos. A Figura 5.5.15 apresenta as alturas iniciais e as curvas recalque vs. tempo obtidas a partir do programa MSWSET. Apesar das hipóteses simplificadoras envolvidas neste exercício de análise, pode-se verificar o pequeno efeito desta alteração no presente caso, já que o aterro experimental representa diminuta parcela na altura total do maciço. De qualquer forma, fica claro que a utilização de parâmetros distintos para os resíduos aterrados acaba influenciando os resultados do programa. A utilização de parâmetros médios, conforme apresentado e discutido, acaba simplificando e eliminando esta componente do problema, sendo uma linha consistente e apropriada para previsão dos recalques a partir do programa MSWSET.

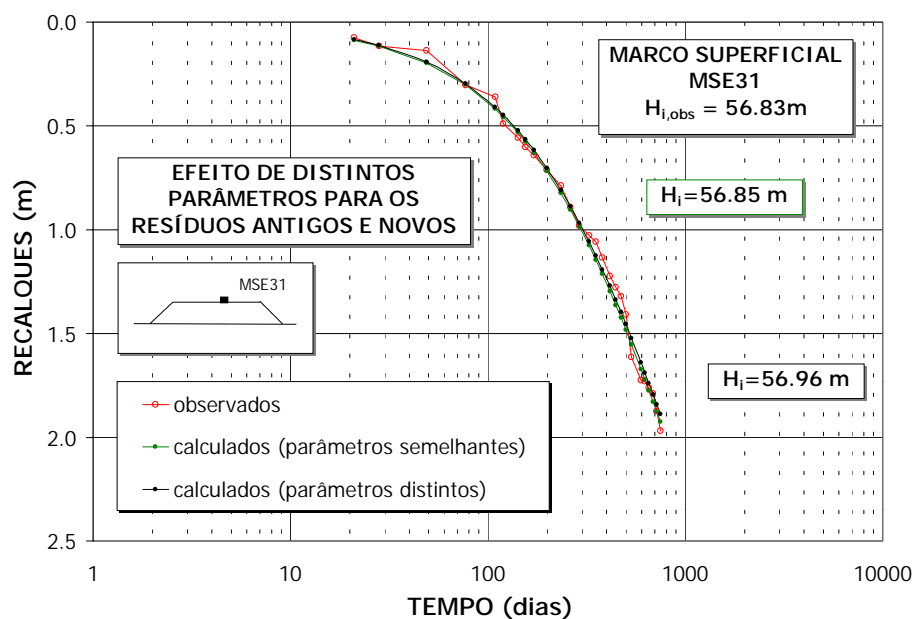


Figura 5.5.15 - Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET considerando distintos parâmetros para os resíduos antigos e novos (marco superficial MSE31).

5.6 Recomendações para Aplicação do Programa MSWSET a outros Aterros Sanitários

O estudo de compressibilidade e a previsão de recalques em aterros sanitários, objeto desta parte do trabalho, teve por base um modelo reológico compósito e o programa MSWSET, os quais permitem considerar os mecanismos e o processo de compressão dos resíduos sólidos urbanos de forma global, ou seja, ao longo de todo o histórico de vida do maciço sanitário. A obtenção de parâmetros para o referido modelo foi realizada, neste caso, através de análise estatística, tendo por base os dados de observação e controle do Aterro Sanitário Bandeirantes. Apesar dos resultados satisfatórios obtidos, o modelo necessita de um maior número de casos históricos para obtenção e confirmação de conjuntos de parâmetros válidos para outras situações e condições de contorno.

A aplicação do programa MSWSET a outros aterros sanitários acaba sendo função do nível de conhecimento e de informações disponíveis em cada caso, podendo as recomendações, a seguir descritas, serem tomadas como linhas básicas e iniciais de atuação.

- a) nível 1 - conhecimento apenas da altura do aterro sanitário (H) no tempo t : neste caso, recomenda-se a adoção do conjunto de parâmetros médios obtidos para o Aterro Sanitário Bandeirantes e a realização de retro-análise para obtenção de seqüência construtiva que resulte na altura H conhecida para o instante t . O resgate de toda informação de controle e registros de operação do maciço acaba sendo muito importante para o balizamento da seqüência construtiva mais provável, a qual constituir-se-á na condicionante inicial de partida (“first guess”) do problema. Com a seqüência construtiva assim definida, pode-se utilizar o programa para uma previsão preliminar de recalques do maciço. Adicionalmente a este procedimento, devem ser instalados instrumentos de controle de recalques no aterro para que o processo seja realimentado e os parâmetros e previsões aferidas e balizadas.
- b) nível 2 – conhecimento da altura do aterro sanitário (H) no tempo t e de alguns dados de observação de recalques: neste caso, recomenda-se a adoção do conjunto de parâmetros médios obtidos para o Aterro Sanitário Bandeirantes e a realização de retro-análise para obtenção de seqüência construtiva que resulte na altura H conhecida para o instante t e na reprodução da curva recalques vs. tempo conhecida. Novamente aqui, torna-se relevante o resgate de todo registro de controle operacional do maciço para subsidiar o balizamento da seqüência construtiva mais provável, como elemento de partida (“first guess”) do problema. Com a seqüência construtiva definida, pode-se utilizar o programa para previsão preliminar de recalques do maciço. A continuidade dos serviços de

monitoração de recalques do maciço possibilitará, à semelhança do caso anterior, o ajuste e aferição dos parâmetros que melhor se apliquem ao aterro sob análise.

- c) nível 3 – conhecimento da seqüência construtiva, da altura do aterro sanitário (H) no tempo t e de alguns dados de observação de recalques: neste caso, todos os elementos requeridos pelo programa são conhecidos, devendo o conjunto de parâmetros médios determinados para o Aterro Sanitário Bandeirantes ser utilizado como elemento de partida (“first guess”) para a análise e determinação dos parâmetros do modelo para o novo caso de estudo. Com os parâmetros assim definidos, utiliza-se o programa para previsão de recalques do aterro em questão.

A utilização de ensaios laboratoriais e *in situ* também podem ser válidas para a obtenção dos parâmetros do modelo. Ensaios de compressão unidimensional em células de grande dimensão, conforme realizado por CARVALHO (1999), e ensaios de carregamento de placa de maciços sanitários, acompanhados da monitoração das regiões carregadas e não carregadas, apresentam-se como ferramentas a serem utilizadas e exploradas nesta linha, na determinação dos coeficientes de compressão primária e secundária mecânica, respectivamente. No tocante aos processos de degradação biológica e recalques associados, a utilização de ensaios de compressão em laboratório ou em lisímetros, onde as condições ambientais do maciço sanitário possam ser reproduzidas e controladas, apresenta-se como alternativa para determinação dos coeficientes de compressão secundária biológica.

5.7 Síntese do Estudo de Compressibilidade

As principais análises do estudo de compressibilidade são sintetizadas a seguir, destacando os aspectos julgados mais relevantes e importantes do mesmo:

- a) análise dos modelos de compressibilidade existentes na literatura: o estudo de compressibilidade foi iniciado com a análise das propostas e modelos de compressibilidade existentes na literatura, ponderando as vantagens e limitações dos mesmos. A aplicação das propostas teve por base os dados observados no Aterro Sanitário Bandeirantes e respeitou, na íntegra, as orientações e procedimentos sugeridos pelos autores das mesmas, adaptando-as, quando necessário, às condições de contorno do aterro de estudo.

Os resultados apontaram para a falta de consistência de algumas propostas, nomeadamente as de YEN & SCANLON (1975) e às baseadas em funções logarítmicas, e pela adequabilidade de algumas propostas, com destaque para os modelos hiperbólico

e de GIBSON & LO (1961). A análise também possibilitou serem antevistas sérias limitações à aplicação de praticamente todas as propostas, mesmas as de melhor desempenho, as quais incluem:

- fixação do parâmetro tempo: a definição do tempo inicial t_0 , a partir do qual são contabilizados os processos de compressão dos resíduos, acaba implicando grandes diferenças nos valores dos parâmetros obtidos para os modelos, com conseqüente impacto na previsão de recalques dos aterros sanitários. As propostas normalmente estabelecem o início da monitoração ou ainda o encerramento do aterro sanitário como datas-marco para fixação do tempo t_0 , desconsiderando por completo o histórico passado do maciço.
 - histórico de construção do maciço sanitário: com exceção da proposta de YEN & SCANLON (1975), todas as propostas deixam de considerar o período construtivo do aterro sanitário e sua participação no processo de compressão do maciço. Tal aspecto resulta em perda de referência para entendimento e abrangência dos mecanismos de compressão atuantes, assim como da estabilização dos mesmos ao longo do tempo. inclui-se também neste tópico, a consideração, pelos modelos existentes, do aterro como um maciço único e homogêneo, não tendo em conta, por exemplo, a influência do processo construtivo em camadas, normalmente empregado nos aterros. Tal aspecto acaba conferindo à análise discretizada (análise individualizada por camadas) maior consistência e proximidade com a realidade, em termos da consideração dos tempos e carregamentos envolvidos no processo de compressão.
 - leis de comportamento: a ausência de leis de comportamento que governam os mecanismos de compressão é observada em algumas propostas. Nestas, simples formulações matemáticas são utilizadas com o intuito de melhor reproduzir e ajustar pontos da curva recalque vs. tempo, não possuindo seus parâmetros qualquer significado físico ou condição de reprodutibilidade.
- b) desenvolvimento de modelo reológico compósito e programa MSWSET para previsão de recalques de aterros sanitários: baseado na análise anterior e nos méritos e restrições de estudos existentes foi proposto um novo modelo para representar o comportamento dos resíduos sólidos urbanos submetidos à compressão. Tal modelo, juntamente com o programa MSWSET, incorporam conceitos e considerações que eliminam os aspectos desvantajosos e problemáticos sintetizados anteriormente. Dentre estes, inclui-se a utilização do conceito de superposição de efeitos, pelo qual são considerados, para cada

camada aterrada, as corretas condições de carregamento e de contagem do tempo, e a influência dos distintos mecanismos de compressão. A aplicação do programa ao caso de estudo representado pelo Aterro Sanitário Bandeirantes conduziu a resultados plenamente satisfatórios, tendo o mesmo sido complementado por análise estatística visando à aferição e obtenção dos parâmetros para o modelo proposto.

O programa MSWSET possibilita ainda a consideração de diferentes geometrias para o maciço e de sobrecargas externas, gerando curvas recalque e altura vs. tempo para períodos e posições (internas ou externas ao maciço) de interesse. Estudo paramétrico mostrou a importância relativa das componentes do modelo, assim como de outros aspectos intervenientes, incluindo a presença de sobrecargas e a seqüência construtiva, do aterro, entre outros.

Como principais vantagens do modelo e do programa concebido podem ser destacadas: (i) consideração do histórico de construção e da seqüência de aterramento das camadas de resíduos; (ii) utilização de leis de comportamento associadas a cada mecanismo de compressão envolvido, tendo por base parâmetros de compressibilidade com significado físico; e (iii) determinação de curvas recalque vs. tempo para períodos de tempo pré-determinados, assim como de recalques em pontos (camadas) internos do maciço. No tocante as dificuldades e limitações de aplicação do programa para previsão de recalques, podem ser listadas: (i) a necessidade de conhecimento prévio da seqüência construtiva do aterro, incluindo as espessuras e pesos específicos iniciais das camadas; e (ii) necessidade de conhecimento da geometria exata do aterro para minimizar os efeitos da representação imprecisa do estado de tensão de pontos internos do maciço.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Apresentam-se, neste capítulo, as conclusões dos estudos realizados, assim como algumas recomendações e sugestões para pesquisas e trabalhos futuros.

6.1 Estudo de Compactação

A execução e monitoramento de aterro experimental de resíduos sólidos urbanos possibilitaram a obtenção de importantes subsídios para o estudo e o entendimento do comportamento destes materiais quando submetidos ao processo de compactação. Face às características dos resíduos, a execução de experimento em escala real mostrou-se decisiva para o alcance dos objetivos do trabalho.

Os resíduos ensaiados apresentaram composição gravimétrica próxima à distribuição típica observada no município de São Paulo (ORTH & MOTTA, 1998; BEZERRIL et al., 2000). A parcela correspondente à matéria orgânica mostrou-se preponderante, com 56,3%, seguida das parcelas relativas aos plásticos (12,6%), papéis e papelões (12,4%), couro, borracha e madeira (5,3%), material de composição mista (4,4%), ferro e alumínio (4,2%), tecidos (3,5%) e vidros (1,3%).

O teor de umidade dos resíduos, calculados em termos do peso seco do material, apresentou elevada faixa de variação, com valor médio igual a 146,1%. Valores mínimo e máximo iguais a 7,4% e 510,7%, respectivamente, foram obtidos nos ensaios realizados.

Tais características físicas, elevado teor de umidade e predominância de matéria orgânica em sua composição, conferem aos resíduos ensaiados condições peculiares, as quais devem ser necessariamente associadas aos resultados obtidos e aos comportamentos observados no estudo em questão.

6.1.1 Influência das Técnicas Construtivas

Apesar das dificuldades encontradas para a realização dos ensaios de densidade *in situ*, um conjunto significativo e consistente de resultados foi obtido ao longo da execução do experimento. Os pesos específicos dos resíduos compactados apresentaram grande variação, com valores situados na faixa entre 3,4 e 14,0 kN/m³, e valor médio próximo a 8,2kN/m³, valores estes considerando todos os casos e situações analisadas. Baseado neste último valor e considerando o peso específico médio de 4,9kN/m³, obtido para o resíduo solto, é possível determinar, de forma simplificada e em uma primeira análise, um ganho de densificação de cerca de 67% com a adoção do processo de compactação.

A relação entre o peso específico (γ) e o teor de umidade (w) não obedeceu qualquer tendência de comportamento, sendo elevada a dispersão de dados. A relação entre o peso específico seco (γ_d) e o teor de umidade (w), no entanto, apresentou forte correlação, com curvas de comportamento respeitando um comportamento similar à curva peso específico vs. teor de umidade para grau de saturação, S_r , igual a 100%. Assim, a curva de compactação não apresenta, à semelhança dos solos, um valor de pico (peso específico máximo) associado a um teor de umidade ótimo. Os pesos específicos secos diminuem com o aumento do teor de umidade do material, indicando ser o processo de compactação mais eficaz quanto mais seco estiver o material. As análises estatísticas realizadas, correlacionando o peso específico seco, o teor de umidade e as técnicas construtivas empregadas, mostraram ser menor a influência da energia aplicada às camadas de resíduos, aqui representadas pela espessura das camadas, tipo e número de passadas do equipamento e inclinação do plano de compactação. Do ponto de vista quantitativo, os resultados obtidos no aterro experimental indicaram, portanto, que o teor de umidade constitui o principal parâmetro controlador do peso específico seco e do processo de compactação dos resíduos sólidos urbanos, representando os demais procedimentos construtivos papel de menor importância no processo. Os modelos de comportamento formulados para representação da relação peso específico seco vs. teor de umidade vs. técnicas construtivas basearam-se em funções logarítmicas e apresentaram coeficientes de determinação R^2 entre 0,70 e 0,84, constituindo um importante instrumento para reprodução das curvas de compactação dos resíduos.

Para as condições de contorno do experimento, os pesos específicos obtidos para os resíduos foram pouco sensíveis ao tipo de equipamento e à inclinação do plano de compactação, com ligeira vantagem para o compactador 816F e ao plano inclinado (1,0V:5,0H), respectivamente. O compactador, apesar do maior peso operacional, mostrou-se bastante sensível à compactidade inicial da camada a ser compactada, implicando pressões

transmitidas aos resíduos equivalentes às do trator de esteiras, justificando assim a proximidade dos resultados. Tal efeito esteve normalmente associado às situações onde o material disposto encontrava-se pouco densificado (passadas iniciais e/ou maiores espessuras). A pequena vantagem da operação em plano inclinado, por sua vez, explica-se pela maior transferência de pressões aos resíduos nesta situação.

6.1.2 Evolução do Peso Específico com a Profundidade

A partir dos dados de controle de execução do aterro experimental foram estabelecidas relações peso específico vs. profundidade para os resíduos aterrados, tendo em conta as diferentes técnicas construtivas empregadas. Apesar da elevada dispersão dos dados, correlações fisicamente consistentes foram obtidas a partir de modelos estatísticos baseados em funções hiperbólicas. A densificação dos resíduos em profundidade, observada no campo através de inspeções visuais, não pôde, no entanto, ser reproduzida de forma patente, tendo por base os valores medidos ao longo da execução do experimento. Neste sentido, o modelo apresentado deve ser analisado e utilizado com ressalvas face à elevada dispersão dos valores observados no aterro experimental. Tendo por base a aplicação do modelo, a evolução do peso específico (γ) em profundidade mostrou-se diretamente proporcional à energia aplicada às camadas, no caso representada pela espessura das mesmas e pelo número de passadas do equipamento. Os valores de peso específico e as curvas de evolução em profundidade obtidos com o modelo mostraram-se compatíveis com os valores e tendências de comportamento existentes na literatura. Ainda com base no modelo, pesos específicos iniciais entre 7,0 e 8,0 kN/m³ atingiram, a profundidades da ordem de 2,5m (base do aterro experimental), valores entre 11,0 e 14,0 kN/m³, dependendo da técnica construtiva aplicada, estando estes ganhos de densidade associados ao processo de compactação intensiva empregado no experimento. Apesar de recomendada apenas em análises preliminares, a extrapolação do modelo para maiores profundidades pôde ser realizada, tendo sido verificado pesos específicos praticamente constantes a partir dos 15,0m de profundidade.

Os resultados do modelo indicaram, também nesta análise, uma ligeira vantagem de desempenho para o compactador 816F, para o qual pesos específicos mais elevados foram obtidos, tanto a menores quanto a maiores profundidades. Comparados com pesos específicos estimados para o mesmo Aterro Sanitário Bandeirantes (CARVALHO, 1999), os resultados obtidos mostraram-se sistematicamente inferiores. Tal constatação pode ser explicada pelo fato dos modelos desenvolvidos terem por base camadas de resíduos isentas de material de cobertura, ao contrário dos demais valores de referência mencionados.

6.1.3 Efeito da Compactação na Compressibilidade dos Resíduos Sólidos Urbanos

As curvas tensão vs. deformação, obtidas a partir de modelagem estatística com base nos dados de controle do aterro experimental, mostraram uma forte e direta dependência com o fator de energia aplicado (passadas/espessura). Os modelos desenvolvidos, baseados em funções hiperbólicas, conduziram, para tensões verticais (peso das camadas subjacentes), σ_v , da ordem de 20 kN/m², a deformações, ε , entre 30% e 45%, em função do fator de energia aplicado. Tais deformações incorporam o efeito combinado da compressão primária do material e da compactação intensiva das camadas, sendo este último processo o responsável principal para os elevados valores obtidos. Quanto as deformações imediatas (ε_m), valores entre 20% e 40% foram obtidos, apresentando o compactador 816F melhores respostas ao longo do experimento.

Coefficientes de compressão (CR^*) e de compressibilidade volumétrica (m_v^*), face ao efeito combinado da compressão primária e compactação, foram calculados com base nos modelos desenvolvidos, tendo sido verificado pouca sensibilidade destes parâmetros ao fator de energia aplicado. Os coeficientes de compressão (CR^*) apresentaram um valor de pico da ordem de 0,40, em função do equipamento de compactação, decrescendo a partir daí para valores entre 0,05 e 0,10, com o aumento das tensões verticais atuantes. Os coeficientes de compressibilidade volumétrica (m_v^*) apresentaram um comportamento monotônico, com valores máximos, para pequenas tensões verticais, entre 0,15 a 0,30 m²/kN, em função do equipamento de compactação, decrescendo com o aumento das tensões verticais até valores praticamente nulos.

O efeito da compactação na compressão de longo prazo dos resíduos pôde ser avaliado com base no coeficiente de compressão secundária (C_{α}'), conforme definição proposta por SOWERS (1973). Coeficientes C_{α}' entre 0,04 e 0,18 foram obtidos para os diversos quadrantes de ensaio analisados, valores estes situados dentro da faixa proposta na literatura como correspondente ao estágio avançado da compressão secundária (BJARNGARD & EDGERS, 1990). Resultados de análises físico-químicas realizadas com os líquidos percolados também apontaram para um estágio mais avançado de degradação dos materiais (fase metanogênica), não sendo possível, no entanto, associar a antecipação e presença desta fase no aterro experimental ao processo de compactação. Apesar dos poucos pontos de análise, pôde ser observado, para os quadrantes operados pelo compactador 816F, uma tendência de redução do coeficiente de compressão secundária (C_{α}') com o aumento do fator de energia aplicado, podendo ser esta um importante indicativo do efeito benéfico da compactação também no processo de compressão secundária dos resíduos.

6.1.4 Efeito da Compactação na Geração dos Líquidos Percolados

A qualidade dos líquidos percolados, avaliada através de ensaios físico-químicos do material realizados ao longo do tempo apresentou-se dentro de comportamentos e valores típicos apresentados na literatura, não tendo sido registrada nenhuma alteração que pudesse ser associada ao processo de compactação.

As vazões percoladas pelo aterro experimental, ao longo de um período monitorado de 22 meses, apresentaram relações com os valores da precipitação observada variando entre 1,5% e 22,0%, sendo os valores mais elevados obtidos para períodos onde o aterro não estava coberto. Valores médios da ordem de 8,5% para esta relação foram obtidos não considerando os períodos mencionados, valores estes bastante reduzidos se comparados com a experiência reportada na literatura (EHRIG, 1983).

As vazões percoladas pelo aterro experimental, estimadas pelos métodos do balanço hídrico e pelo programa HELP (USEPA) indicaram, para distintas simulações, valores sistematicamente inferiores aos valores registrados no experimento. Apesar das condições de contorno do experimento serem complexas e de difícil reprodução pelos programas de cálculo utilizados, os resultados obtidos, incluindo os baixos valores da relação líquidos percolados vs. precipitação constituem um importante indicativo do efeito benéfico da compactação na geração dos líquidos percolados de aterros sanitários. O processo de compactação acaba atuando e contribuindo para os resultados obtidos de duas formas distintas, quais sejam: (i) na expulsão dos líquidos presentes nos resíduos (“squeezing”) durante a operação de compactação; e (ii) na redução dos vazios e conseqüente diminuição da permeabilidade do maciço. As simulações realizadas com o programa HELP permitiram também verificar que alterações na camada de cobertura, seja pelo aumento da sua espessura, seja pela utilização de materiais menos permeáveis, são responsáveis pelas maiores reduções dos volumes percolados no aterro.

6.2 Estudo de Compressibilidade

A utilização dos dados de monitoração de recalques de aterro existente e do aterro experimental, por um período de até 3 anos, possibilitou que uma análise crítica de modelos de compressibilidade existentes na literatura fosse realizada, assim como a concepção de modelo reológico compósito para reprodução do comportamento dos resíduos sólidos urbanos submetidos à compressão e o desenvolvimento de programa de cálculo para previsão de recalques de aterros sanitários.

A utilização de dados de campo mostrou-se o caminho mais adequado para o entendimento e estudo dos mecanismos de compressibilidade dos resíduos, face às características peculiares dos mesmos e à dificuldade de reprodução em laboratório de todas as condições de contorno, incluindo o fator tempo, presentes nos maciços sanitários.

6.2.1 Modelos de Compressibilidade existentes na Literatura

A análise crítica de 9 (nove) modelos de compressibilidade existentes na literatura, tendo por base os dados de monitoração do Aterro Sanitário Bandeirantes, constituíram a base de estudo para a proposição de modelo e programa de cálculo para previsão de comportamento dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários. Algumas limitações e preocupações foram antevistas nesta análise, das quais devem ser destacadas: (i) definição do parâmetro tempo, especificamente do tempo de início do processo de compressão dos resíduos, o qual na maioria das propostas é fixado ao início do período de monitoração ou ao encerramento do aterro; (ii) consideração do maciço como um corpo único, não sendo considerado que diversas fases (camadas), com características distintas, foram dispostas no aterro em tempos igualmente distintos; (iii) não consideração do histórico de construção do aterro sanitário, desprezando o estudo de compressibilidade, as parcelas de recalque ocorridas no período construtivo; e (iv) utilização, por algumas propostas, de formulações matemáticas, tendo por objetivo o simples ajuste das curvas de recalque, sem a preocupação de associar às mesmas leis de comportamento que governem os mecanismos de compressão envolvidos.

As análises mostraram ainda que algumas propostas foram capazes de reproduzir, de forma satisfatória, os comportamentos observados. Incluem-se neste grupo, os modelos de GIBSON & LO (1961) e os baseados em funções hiperbólicas, os quais apresentaram desvios entre os valores observados e os calculados inferiores a 5%, considerando períodos de 1, 2 e 3 anos de observação. As propostas de YEN & SCANLON (1975) e as baseadas em funções logarítmicas, por outro lado, apresentaram desempenho não consistente e resultados inadequados.

Os parâmetros obtidos para os diversos modelos analisados apresentaram valores dentro das faixas reportadas na literatura, as quais, porém são muito amplas e sempre relativas a aterros de menor porte, sendo difícil serem extraídas correlações ou tendências de comportamento, por exemplo, entre os parâmetros e a altura dos maciços. Os parâmetros de compressibilidade primária (a) e secundária (b) obtidos para o modelo de GIBSON & LO (1961) não permitiram confirmar a tendência de redução dos mesmos com o aumento das tensões verticais atuantes (alturas dos maciços). Valores médios iguais a $5,54 \times 10^{-6} \text{ kPa}^{-1}$ e $3,45 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$ foram obtidos, respectivamente, para os coeficientes a e b , considerando as

placas de recalque instaladas no experimento. Para a proposta de BJARNGARD & EDGERS (1990), por exemplo, foram obtidos, para as referidas placas de recalque, valores médios para os coeficientes de compressão $C_{\alpha 1}$ e $C_{\alpha 2}$ iguais a 0,0121 e 0,0755, respectivamente. Tais valores são bem próximos aos determinados por CARVALHO (1999), em análise similar realizada no sub-aterro AS2 do Aterro Sanitário Bandeirantes, quais sejam 0,010 ($C_{\alpha 1}$) e 0,083 ($C_{\alpha 2}$).

6.2.2 Modelo Reológico Compósito e Programa MSWSET

O modelo reológico compósito e o programa MSWSET desenvolvidos apresentaram-se como importantes ferramentas para a previsão de recalques de aterros sanitários, assim como para o entendimento do comportamento dos resíduos sólidos urbanos submetidos à compressão.

O modelo incorpora os principais mecanismos de compressão dos resíduos, governados por leis consistentes de comportamento e associadas a parâmetros com significado físico. Define e utiliza o parâmetro tempo de forma distinta para as parcelas de compressão secundária mecânica e biológica, possibilitando assim a consideração, de forma individualizada, das diferentes fases (camadas) de que é normalmente composto um maciço sanitário.

O programa MSWSET calcula os recalques baseado no conceito de superposição de efeitos, isto é, no processo acumulativo de recalques para cada camada aterrada, com a apropriada definição do parâmetro tempo. Tal conceito apresenta-se teoricamente consistente e responsável direto pelos resultados satisfatórios obtidos. A consideração do histórico de construção e geometria do aterro e eventuais sobrecargas externas, além da possibilidade de geração de curvas recalque total, altura total e recalque relativo vs. tempo conferem ao programa elevada versatilidade e aplicabilidade a aterros sanitários.

A incorporação de sub-rotina para análise estatística ao programa MSWSET permitiu a obtenção de um conjunto de parâmetros reológicos para o modelo, aferidos e válidos para os pontos monitorados do Aterro Sanitário Bandeirantes. Apesar da conhecida heterogeneidade dos materiais, o emprego de parâmetros médios para os resíduos do aterro existente gerou resultados bem satisfatórios, seja em termos das curvas recalque vs. tempo, seja em termos dos desvios entre os recalques e alturas reais observadas e calculadas, exceto para os marcos superficiais afastados da sobrecarga (aterro experimental). Como parâmetros médios do modelo foram obtidos valores de 0,1061 para o coeficiente de compressão primária (C_c); $5,72 \times 10^{-4}$ para o coeficiente de compressão mecânica secundária (b); $1,79 \times 10^{-3}$ para a taxa de

compressão mecânica secundária (c); 0,1585 para o coeficiente de compressão biológica secundária (E_{DG}); e $1,14 \times 10^{-3}$ para a taxa de compressão biológica secundária (d).

Os desvios obtidos com os parâmetros reológicos médios, excetuando os casos correspondentes aos marcos superficiais posicionados externamente ao experimento, situaram-se na faixa entre +7,6% e -16,5%, para os recalques, e entre +0,1% e -2,0%, para as alturas do maciço. Tais resultados, obtidos tendo em conta todo o histórico de construção do aterro e uma série de leituras de até 3 anos, confirmaram o bom desempenho e a potencialidade do modelo e programa concebidos para previsão dos recalques de aterros sanitários. A definição da seqüência construtiva do aterro e dos parâmetros reológicos do modelo, no entanto, apresentam-se como elementos de entrada de fundamental importância para previsão do comportamento dos maciços, conforme constatado em estudo paramétrico realizado.

A aplicação do programa MSWSET a outros aterros sanitários, visando à determinação de parâmetros reológicos para o modelo e a verificação de desempenho do mesmo, apresenta-se de fundamental importância para consolidação da presente proposta. A realização de ensaios de compressão confinada em laboratório e ensaios de carregamento de placa *in situ* para obtenção dos parâmetros do modelo também deve ser igualmente explorada e verificada.

O desempenho, comparativamente pior, observado para os marcos superficiais localizados em regiões externas ao experimento, pode estar associado à imprecisa representação do estado de tensão nestes pontos, devido ao não conhecimento e consideração da geometria exata do aterro existente.

6.3 Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base nas observações, resultados e experiência adquirida ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, podem ser registradas algumas recomendações e sugestões para continuidade dos trabalhos, como a seguir se descrevem.

a) estudo de compactação

- realização de ensaios de compactação em laboratório, envolvendo equipamento e amostras de grande dimensão, para verificação e confirmação do comportamento e resultados obtidos para os resíduos sólidos urbanos dispostos no aterro experimental.
- realização de estudos complementares para avaliação do efeito da compactação na geração de líquidos percolados em aterros sanitários. A utilização de células

experimentais (lisímetros) executadas com distintas técnicas construtivas poderia ser uma alternativa para este estudo.

b) estudos de compressibilidade

- implementação de melhorias e novos módulos no programa desenvolvido, envolvendo, por exemplo, a realização de estudos para avaliação e definição de relações entre os parâmetros de compressibilidade e outros fatores (teor de umidade, idade e composição do resíduo, etc) e soluções mais complexas e adequadas para representação do estado de tensão em pontos internos do maciço.
- aplicação do programa MSWSET a outros aterros sanitários, de forma que novos parâmetros sejam obtidos e o desempenho do modelo e da proposta de cálculo para previsão dos recalques seja verificada sob diferentes condições de contorno.
- execução de ensaios de compressão confinada em laboratório e de carregamento de placas *in situ* para obtenção de coeficientes de compressibilidade primária e secundária que possam ser associados aos parâmetros do modelo reológico concebido. Os estudos incluíram ainda ensaios de compressão, sob condições ambientais controladas, para tentar avaliar a relação entre os processos de degradação e os recalques e conseqüentemente os coeficientes de compressão biológica secundária associados ao modelo desenvolvido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA (1989). Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th Edition. New York. APHA/AWWA/WPCF.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1978). ASTM-D 698-78 - Moisture-Density Relations of Soils and Soil-Aggregate Mixtures using 5.5lb (2.49kg) Rammer and 12 in. (305-mm) Drop. In: *Annual Book of ASTM Standards*, v.04.08, p.200-206.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1959). Refuse volume reduction in a sanitary landfill. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 26th Progress Report of the Committee on Sanitary Engineering Research of the Sanitary Engineering Division, v.85, n.SA6, p.37-50.
- ASAOKA, A. (1978). Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. v.18, n.4, p.87-101.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR 10.004 – *Resíduos sólidos – classificação*. NBR 10.005 – *Lixiviação de Resíduos - Procedimento*. NBR 10.006 – *Solubilização de Resíduos – Procedimento*. NBR 10.007 – *Amostragem de Resíduos - Procedimento*. São Paulo.
- BADILLO, E.J.; RODRIGUEZ, A.R. (1967). *Mecánica de suelos*. 2º ed., Editorial Limusa, México.
- BARLAZ, M.A.; HAM, R.K.; SCHAEFER, D.M. (1990). Methane production from municipal refuse: a review of enhancement techniques and microbial dynamics. *Critical reviews in environmental control*, v.19, n.6, 557-584.
- BARLAZ, M.A.; HAM, R.K. (1993). Leachate and gas generation. In: DANIEL, D.E., ed. *Geotechnical practice for waste disposal*. London, Chapman & Hall. Cap. 6, p.113-136.

- BEAVEN, R.P. (1996). Evaluation of geotechnical and hydrogeological properties of wastes. In: BENTLEY, S.P., ed., *Engineering Geology of Waste Disposal*. Geological Society Engineering. Special Publication 11, p.57-65.
- BELFIORE, F.; MANASSERO, M.; VIOLA, C. (1990). Geotechnical analysis of some industrial sludges. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D., eds., *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.317-330.
- BENOIT, J; EIGHMY, T.T; CRANNELL, B.S. (1999). Landfilling ash/sludge materials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v.125, n.10, p.877-888.
- BENVENUTO, C.; CUNHA, M.A. (1991). Escorregamento em massa de lixo no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS – REGEO’91, v.2, p.55-66.
- BENVENUTO, C.; CRUZ, P.T.; MIRANDA, I.C.S.B. (1994). A metodologia geotécnica aplicada à disposição dos resíduos sólidos. In: SEMINÁRIO SOBRE GEOTECNIA DE ATERROS PARA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS - GEOAMBIENTAL’94, Rio de Janeiro, 1994, p.1.33-1.48.
- BEZERRIL, P.; MORAES, A.C.T.; OLIVEIRA, A.C.; FRAGA, A.L.; CAVALCANTI, J.E.W.A (2000). Caracterização quantitativa e qualitativa dos resíduos sólidos domiciliares no município de São Paulo. Maio, 2000. Secretaria de Serviços e Obras – Departamento de Limpeza Urbana.
- BJARNGARD, A.B. (1989). *The compression characteristics of landfills*. Medford, 290 p. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) - Tufts University, Massachusetts.
- BJARNGARD, A.; EDGERS, L. (1990). Settlement of municipal solid waste landfills. *Proc., 13th Annual Madison Waste Conference*, University of Wisconsin, Madison, p.192-205.
- BLEIKER, D.E.; FARQUHAR, G.; McBEAN, E. (1995). Landfill settlement and the impact on site capacity and refuse hydraulic conductivity. *Waste Management & Research*, 13, p.533-554.
- BLENGINO, A.M.; VEGGI, S.; MANASSERO, M.; ROSSELLO, A.; SPANNA, C. (1996). Investigation, monitoring system and stability analysis of an old canyon landfill. *Proc., 2nd International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, 1996. v.2, p.629-634.
- BLIGHT, G.E.; BALL, J.M.; BLIGHT J.J. (1992a). Moisture and suction in sanitary landfills in semiarid areas. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, v.18, n.6, p.865-877.

- BLIGHT, G.E.; HOJEM, D.J.; BALL, J.M. (1992b). Production of landfill leachate in water-deficient areas. In: CHRISTENSEN, T.H. & COSSU, R., eds., *Landfilling of Waste – Leachate*, Elsevier Applied Science, p.35-51.
- BOLTON, N. (1995). *The handbook of landfill operations*. Bozeman, MT, Blue Ridge Solid Waste Consulting.
- BOUAZZA, A.; AMOKRANE, K. (1995). Granular soil reinforced with randomly distributed fibers. *Proc., 11th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cairo, Egypt.
- BOUAZZA, A.; VAN IMPE, W.F.; HAEGEMAN, W. (1996). Quality control of dynamic compaction in waste fills. *Proc., 2nd International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, 1996. v.2, p.635-640.
- BOUTWELL, G.P.; FIORE, N.A. (1995). Settlement of clay cover on saturated garbage. *Proc., International Conference Geoenvironment 2000*, Geotechnical Special Publication 46, ASCE, New Orleans, Louisiana, 1995, v 2, p.964-979.
- BRANDL, H. (1995). Stability of waste deposits. *Proc., 10th Danube-European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mamaia, Romania, v.4, p.1043-1056.
- BRATLEY, K.J. (1977). A description of comparative performance tests of mobile plant on a major landfill site. *Solid Wastes*, Institute of Solid Waste Management, London, v.67, p.57-76.
- BROMWELL, L.G. (1978). Properties, behavior and treatment of waste fills. In: SEMINAR SERIES ON METHODS OF SOIL IMPROVEMENT, Metropolitan Section, ASCE, November, p.1-103.
- BRUTSAERT, W. (1982). *Evaporation into the atmosphere - theory, history and applications*. D. Reidel Publishing Company.
- BURLINGAME, M.J. (1985). Construction of a highway on a sanitary landfill and its long-term performance. *Transportation Research Record*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., n.1031, p.34-40.
- CAMPBELL, D.J.V.; PARKER, A. (1980). Density of refuse after deposition using various landfill techniques. *Solid Wastes*, Institute of Solid Waste Management, London, August, p.435-440.
- CANZIANI, R.; COSSU, R. (1989). Landfill hydrology and leachate production. In: CHRISTENSEN, T.H.; COSSU, R.; STEGMAN, R., eds. *Sanitary landfilling: process, technology, and environmental impact*. Academic Press, p.185-212.
- CARTIER, G.; BALDIT, R. (1983). Comportement géotechnique des décharges de résidus urbains. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, LCPC, 128, p.55-64.

- CARVALHO, M.F.; VILAR, O.M. (1998). In situ tests in urban waste sanitary landfill. *Proc., 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbon, Portugal, 1998. v.1, p.121-126.
- CARVALHO, M.F. (1999). *Comportamento geotécnico de resíduos sólidos urbanos*. São Carlos. 300p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CASTRO, M.C.A.A. (1996). *Caracterização física e granulométrica dos resíduos sólidos domiciliares gerados na cidade de São Paulo*. São Paulo, ENGECORPS. /Digitado/.
- CATERPILLAR (1994a). *Procedure for landfill compaction testing*. Aurora, IL (Bulletin TEJB 1054).
- CATERPILLAR (1994b). *Caterpillar® 836 landfill compactor vs. Rex 3-90C & Cat® 826C*. Aurora, IL (Report TEXR0195).
- CATERPILLAR (1995). *Cat® 816B & 826C compaction study vs. Hanomag CD280, Bomag 601RB*. Aurora, IL (Report TEXR0211).
- CATERPILLAR (1998). *Cat® 826G landfill compactor vs. Bomag BC670RB landfill compactor*. Aurora, IL (Report TEXR0291).
- CATERPILLAR (1999). *Cat® 836 landfill compactor vs. Vandel 450E landfill compactor*. Aurora, IL (Report TEXR0323).
- CATERPILLAR (2000). *Cat® 826G landfill compactor vs. Bomag BC771RB landfill compactor*. Aurora, IL (Report TEXR0327).
- CHANG, J.C.; HANNON, J.B. (1976). Settlement performance of two test highway embankments on sanitary landfill. *Proc., New Horizons in Construction Materials*, Envo Publishing Co., Inc. Lehigh Valley, PA, v.1, p.139-157.
- CHEN, W.W.H.; ZIMMERMAN, R.E.; FRANKLIN, A.G. (1977). Time settlement characteristics of milled urban refuse. *Proc., Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials*, Ann Arbor, Michigan, p.136-152.
- CHEN, T.; CHYNOWETH, D.P. (1995). Hydraulic conductivity of compacted municipal solid waste. *Bioresource Technology*, v.51, p.205-212.
- CHRISTENSEN, T.H.; KJELDEN, P.; STEGMANN (1992). Effects of landfill management procedures on landfill stabilization and leachate and gas quality. In: CHRISTENSEN, T.H. & COSSU, R., eds., *Landfilling of waste – leachate*, Elsevier Applied Science, p.119-137.
- CODE OF FEDERAL REGULATIONS (1992). 40 CFR 257.2 – *Protection of environment*. The Office of the Federal Register National Archives and Records Administration, Washington DC, USA.

- COUMOULOS, D.G.; KORYALOS, T.P.; METAXAS, I.L.; GIOKA, D.A. (1995). The main landfill of Athens – geotechnical investigation. *Proc., 5th International Landfill Symposium - Sardinia 95*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1995. CISA, p.885-895.
- COUMOLOUS, D.G.; KORYALOS, T.P. (1997). Prediction of attenuation of landfill settlement rates with time. *Proc., 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Germany, v.3, p.1807-1811.
- COUMOLOUS, D.G.; KORYALOS, T.P. (1999). Prediction of long-term settlements behavior of landfill covers after closure. *Proc., 7th International Landfill Symposium - Sardinia 99*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1999. CISA, p.505-512.
- DAS, B.M. (1993). *Principles of geotechnical engineering*. PWS Publishers.
- DEL GRECO, O.; OGGERI, C. (1993). Geotechnical parameters of sanitary wastes. *Proc., 4th International Landfill Symposium - Sardinia 93*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1993. CISA, p.1421-1431.
- DEUTSCH, W.L.; ESTERLY, O.R.; VITALE, J. (1994). Modeling settlements of an existing municipal solid waste landfill sideslope using an earthen surcharge pile. *Proc., Settlement '94 Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*. Geotechnical Special Publication 40 – ASCE, College Station, Texas, v.2, p.1135-1148.
- DIAZ, L.F.; SAVAGE, G.M.; TREZEK, G.J. (1979). Elements of refuse size reduction. *Compost Science and Land Utilization*, v.19, n.1, p.16-21.
- DIAZ, J.G.L.; NAREA, M.S.; SANCHEZ-ALCITURRI, J.M.; IBARRA, A.A., MONZON, I.T.; GONZALEZ, J.P.; LAMIA, M.F. (1995). Estimating material losses in sanitary landfills through biological degradation. *Proc., 5th International Landfill Symposium - Sardinia 95*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, p.203-208.
- DI STEFANO, A.B. (1996). Settlement of Beddingham landfill. In: BENTLEY, S. P., ed., *Engineering Geology of Waste Disposal*, Geological Society Engineering. Special Publication 11, p.111-119.
- DODT, M.E.; BERGSTROM, W.R. (1987). Field measurements of landfill surface settlements. *Proc., Conference on Geotechnical Practice for Waste Disposal '87*, Geotechnical Special Publication 13, ASCE, Ann Arbor, Michigan, p.406-417.
- DRUSCHEL, S.J.; WARDWELL, R.E. (1991). Impact of long-term landfill deformation. *Proc., Geotechnical Engineering Congress*, Geotechnical Special Publication 27, ASCE, Boulder, Colorado, v.2, p.1268–1279.
- DUCHÊNE, Ph.; VERBRUGGE, J.C.; HUERGO, P.J. (1998). Stability analysis of a high waste slope. *Proc., 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbon, Portugal, 1998, v.1, p.207-210.

- DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. (1980). *Solar Engineering of thermal process*. John Wiley & Sons.
- EDGERS, L.; NOBLE, J.J.; WILLIAMS, E. (1992). A biologic model for long-term settlement in landfills. In: USMEN & ACAR, eds., *Environmental Geotechnology*. A.A.Balkema, Rotterdam, p.177-184.
- EDIL, T.B.; RANGUETTE, V.J.; OTZELBERGER, D.G. (1989). Comparison of refuse settlement prediction models. *Proc., 12th Annual Madison Waste Conference on Municipal & Industrial Waste*, Madison, WI, p.520-531.
- EDIL, T.B.; RANGUETTE, V.J.; WUELLNER, W.W. (1990). Settlement of municipal refuse. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D., eds., *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.225-239.
- EHRIG, H.J. (1983). Quality and quantity of sanitary landfill leachate. *Waste Management & Research, Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association*, ISWA, v.1, p.53-68.
- EHRIG, H.J. (1988). Water and element balances of landfills. *Lecture notes in earth sciences, 20. The landfill: reactor and final storage, Swiss Workshop on Land Disposal of Solid Wastes*, Gerzensee, p.83-115.
- EHRIG, H.J. (1989). Leachate quality. In: CHRISTENSEN, T.H.; COSSU, R.; STEGMAN, R., eds. *Sanitary landfilling: process, technology, and environmental impact*. Academic Press, p.213-229.
- EID, H.T.; STARK, T.D.; EVANS, W.D.; SHERRY, P.E. (2000). Municipal solid waste failure I: waste and foundation soil properties; II: stability analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, v.126, n.5, p.397-419.
- EL-FADEL, M.; AL-RASHED, H. (1998). Settlement in municipal solid waste landfills. I- field scale experiments; II- mathematical modeling *Journal of Solid Waste Technology and Management*, v.25, n.2, p.89-104.
- ESPINACE, R.; DIAZ, I.; PALMA, J. (1991). Propriedades mecanicas del relleno sanitario de limache. *Proc., IX Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vina del Mar, Chile, v.3, p.1091-1104.
- ESPINACE, R.; PALMA, G.; SANCHEZ-ALCITURRI, J.M. (1999). Experiencias de aplicacion de modelos para la determinacion de los assentamientos de rellenos sanitarios. *Proc., XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Foz do Iguacu, Brasil, v.1, p.473-479.

- ETC8 - EUROPEAN TECHNICAL COMMITTEE n° 8 (1993). *Geotechnics of landfill design and remedial works. Technical Recommendations – GLR*. 2nd ed. Ernst & Sohn, Berlin.
- FADUM, R.E. (1948). Influence values for estimating stresses in elastic foundations. *Proc., 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Rotterdam, 1948, v.3, p.77-84.
- FARQUHAR, G.J.; ROVERS, F.A. (1973). Gas production during refuse decomposition. *Water, air and soil pollution*, v.2, n.4, p.483-495.
- FASSETT, J.B.; LEONARDS, G.A.; REPETTO, P.C. (1994). Geotechnical properties of municipal solid wastes and their use in landfill design. *Proc., Waste Technical Conference – WasteTech '94*, Charleston, SC, 32 p.
- FENN, D.G.; HANLEY, K.J.; DeGEARE, T.V. (1975). *Use of the water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites*. Washington, D.C, U.S. Environmental Protection Agency. (Report EPA/530/SW-168).
- FRANTZIS, I. (1991). Settlement in the landfill site of Schisto. *Proc., 3rd International Landfill Symposium - Sardinia 91*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1991, CISA, p.1189-1195.
- FUNGAROLI, A.A.; STEINER, R.L. (1979). *Investigation of sanitary landfill behavior*. Cincinnati, OH, U.S. Environmental Protection Agency. (Report EPA/600/2-79-053a).
- GABR, M.A.; VALERO, S.N. (1995). Geotechnical properties of municipal solid waste. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, v.18, n.2, p.241-251.
- GABR, M.A.; HOSSAIN, M.S.; BARLAZ, M.A. (2000). Solid waste settlement with leachate recirculation. *Geotechnical News*, Newsletter of the North American Geotechnical Community, v.18, n.2, p.50-55.
- GACHET, C.; LEMARÉCHAL, D.; GOTTELAND, P.; PRUDHOMME, B. (1998). In situ household refuse density measurement protocol. *Proc., 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbon, Portugal, 1998. v.2, p.849-854.
- GALANTE, V.N.; LEONARD, M.S.M. (1991). An assessment of deep dynamic compaction as a means to increase refuse density for an operating municipal waste landfill. *Proc., Conference on The Planning and Engineering of Landfills*, Midland Geotechnical Society, p.165-169.
- GANDOLLA, M.; DUGNANI, L.; BRESSI, G.; ACAIA, C. (1992). The determination of subsidence effects at municipal solid waste disposal sites. *Proc., 6th International Solid Wastes Congress – ISWA 92*, Madrid, p.1-17.

- GIBSON, R.E.; LO, K.Y. (1961). A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression. *Acta Polytechnica Scandinavica*, C.10, n.296, p.1-16.
- GIFFORD, G.P.; LANDVA, A.O.; HOFFMAN, V.C. (1990). Geotechnical considerations when planning construction on a landfill. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D., eds., *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.41-56.
- GODOI, M.O.; NAHAS, C.M.; FRANÇOSO, N.C.T., MARQUES, A.C.M. (1996). *Estado da arte dos aterros sanitários – parte II*. São Paulo, LIMPURB - Departamento de Limpeza Urbana (Relatório ENGECORPS 064-SSO-NOD-RT-B173).
- GOTTELAND, P.; LEMARÉCHAL, D.; RICHARD, P. (1995). Analysis and monitoring of the stability of a domestic waste landfill. *Proc., 5th International Landfill Symposium - Sardinia 95*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1995. CISA, p.777-787.
- GOURC, J.P.; THOMAS, S.; VUILLEMIN, M. (1998). Proposal of waste settlement survey methodology. *Proc., 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbon, Portugal, 1998. v.1, p.195-200.
- GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; SIRINI, P.; TANCREDI, G. (1991). Geotechnical behaviour of sanitary landfill based on laboratory and in situ tests. *Proc., XV Conferenze di Geotecnica di Torino*, Turin, Italy, 1991, Società Ingegneri e Architetti in Torino.
- GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; SIRINI, P.; TANCREDI, G. (1992a). Geotechnical behavior of sanitary landfill based on laboratory and in situ tests. *Journal of Resource Management and Technology*, v.20, n.4, p.197-203.
- GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; PAGNONI, A.; TANCREDI, G. (1992b). Considerazioni sulla compressibilità dei rifiuti solidi urbani. In: 1ST ITALIAN BRAZILIAN SYMPOSIUM ON SANITARY AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, Rio de Janeiro, Brasil.
- GRISOLIA, M.; GASPARINI, A.; SAETTI, G.F. (1993). Survey on waste compressibility. *Proc., 4th International Landfill Symposium - Sardinia 93*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, p.1447-1456.
- GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; TANCREDI, G. (1995). The use of triaxial tests for the mechanical characterization of MSW. *Proc., 5th International Landfill Symposium - Sardinia 95*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1995. CISA, p.761-768.
- HAM, R.K.; REINHARDT, J.J.; SEVICK, G.W. (1978). Density of milled and unprocessed refuse. *Journal of the Environmental Engineering Division*, v.104, n.EE1, p.109-125.
- HAM, R.K.; BOOKTER, T.J. (1982). Decomposition of solid waste in test lysimeters. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, v.108, n.EE6, p.1147-1172.

- HOEKS, J. (1983). Significance of biogas production in waste tips. *Waste management & research, Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, v.1, p.323-335.
- HOLAND, T. (1995). The fundamentals of waste compaction on a landfill site. *Wastes Management*, v.9, Sept. p.25-37.
- HOWLAND, J.D.; LANDVA, A.O. (1992). Stability analysis of a municipal solid waste landfill *Proc., Conference on Stability and Performance of Slopes and Embankments – II, Geotechnical Special Publication 31, ASCE, Berkeley, California*, v.2, p.1216-1231.
- JENEVEIN, D.R.; DESCHAMPS, R.J.; LEONARDS, G.A.; BYRNE, R.J. (1996). The stability of landfills with strain softening liner interfaces. *Proc., 2nd International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, v.1, p.229-232.
- JESSBERGER, H.L.; KOCKEL, R. (1991). Mechanical properties of waste materials. *Proc., XV Conferenze di Geotecnica di Torino*, Turin, Italy, 1991, Società Ingegneri e Architetti in Torino. 41p.
- JESSBERGER, H.L. (1994). Geotechnical aspects of landfill design and construction. Part 1: principles and requirements; Part 2: material parameters and test methods; Part 3: selected calculation methods for geotechnical landfill design. *Proc., Institution of Civil Engineering – Geotechnical Engineering*, London, England, v.107, n.4, p.99-113.
- KAVAZANJIAN, E.Jr.; MATASOVIC, N., BONAPARTE, R.; SCHMERTMANN, G.R. (1995). Evaluation of MSW properties for seismic analysis. *Proc., International Conference Geoenvironment 2000*, New Orleans, Louisiana, 1995. ASCE Special Publication 46, v.2, p.1126-1141.
- KAVAZANJIAN, E.Jr.; MATASOVIC, N.; STOKOE, K.H.; BRAY, J.D. (1996). In situ shear wave velocity of solid waste from surface wave measurements. *Proc., 2nd International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, 1996, v.1, p.97-102.
- KEENE, P. (1977). Sanitary landfill treatment, Interstate Highway 84. *Proc., Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials*, Ann Arbor, Michigan, p.632-644.
- KIM, Y.M. (1996). Ground improvement of municipal waste landfill by dynamic compaction. *Proc., 2nd International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, 1996, v.2, p.653-656.
- KLEE, A. J.; CARRUTH, D. (1970). Sample weights in solid waste composition studies. *Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE*, v.96, n.SA4, p.945-954.

- KNOCHENMUS, G.; WOJNAROWICZ, M.; VAN IMPE, W.F. (1998). Stability of municipal solid wastes. *Proc., 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbon, Portugal, 1998. v.3, p.977-1000.
- KOCKEL, R.; JESSBERGER, H.L. (1995). Stability evaluation of municipal solid waste slopes. *Proc., 11th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Copenhagen, Denmark, Danish Geotechnical Society, v.2, p.267-272.
- KOCKEL, R.; KONIG, D.; SYLLWASSCHY, O. (1997). Three basic topics on waste mechanics. *Proc., 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburgo, Alemanha, v.3, p.1831-1837.
- KODA, E. (1998a). Stability conditions improvement of the old sanitary landfills. *Proc., 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbon, Portugal, 1998. v.1, p.223-228.
- KODA, E. (1998b). In situ tests of MSW Geotechnical properties. *Proc., 2nd Symposium on Geotechnics related to the Environment Green'97*, Cracóvia, Polônia, 1997, p.247-254.
- KOLSCH, F. (1993). The bearing behaviour of domestic waste and related consequences for stability. *Proc., 4th International Landfill Symposium - Sardinia 93*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1993. CISA, p.1393-1410.
- KOLSCH, F. (1995). Material values for some mechanical properties of domestic waste. *Proc., 5th International Landfill Symposium - Sardinia 95*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1995. CISA, p.711-729.
- KONIG, D.; JESSBERGER, H.L. (1997). Waste Mechanics. *Proc., 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Special Report of the TC5 Technical Committee on Waste Mechanics, Hamburg, Germany, p.35-76.
- KREITH, F. (1994). *Handbook of solid waste management*. New York, McGraw Hill, Inc.
- KRUEMPELBECK, I.; EHRIG, H.J. (1999). Long-term behavior of municipal solid waste landfills in Germany. *Proc., 7th International Waste Management and Landfill Symposium – Sardinia 99*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, v.1, p.27-36.
- LANDVA, A.O.; CLARK, J.I.; WEISNER, W.R.; BURWASH, W.J. (1984). Geotechnical engineering and refuse landfills. *Proc., 6th National Conference on Waste Management*, Vancouver, Canada, p.1-57.
- LANDVA, A.O.; CLARK, J.I. (1986). Geotechnical testing of wastefill. *Proc., 39th Canadian Geotechnical Conference*, Ottawa, Ontario, p.371-385.
- LANDVA, A.O.; CLARK, J.I. (1990). Geotechnics of waste fill. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D., eds., *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.86-105.

- LANDVA, A.O.; PELKEY, S.G.; VALSANGKAR, A.J. (1998). Coefficient of permeability of municipal refuse. *Proc., 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbon, Portugal, 1998. v.1, p.63-68.
- LEE, P.Y.; SUEDKAMP, R.J. (1972). Characteristics of irregularly shaped compaction curves of soils. *Highway Research Record*, National Academy of Sciences, Washington D.C., n.381, p.1-9.
- LEONARD, M.L.; FLOOM, K. J.; BROWN, S. (2000). Estimating method and use of landfill settlement. *Proc., GeoDenver 2000 on Environmental Geotechnics*, Denver, Co, Geotechnical Special Publication 105, ASCE, p.1-15.
- LING, H.I.; LESHCHINSKY, D.; MOHRI, Y.; KAWABATA, T. (1998). Estimation of municipal solid waste landfill settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, v.124, n.1, p.21-28.
- LUKAS, R.G. (1985). Densification of a decomposed landfill deposit. *Proc., 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, California, v.3, p.1725-1728.
- LUKAS, R.G. (1992). Dynamic compaction of sanitary landfills. *Geotechnical News*, September, p.51-54.
- MAIA, S.I. (2001). Avaliação da degradação de geomembranas instaladas em aterros sanitários. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. /no prelo/
- MALONE, P.G.; COMES, G.D.; CHRESTMAN, A.M.; COOPER & FRANKLIN, A.G. (1992). Cone penetrometer surveys of soil contamination. In: USMEN & ACAR, eds., *Environmental Geotechnology*, Balkema, Rotterdam, p.251-257.
- MANASSERO, M.; PASQUALINI, E. (1993). Surveying and construction in urban, suburban and polluted areas-construction. *Proc., International Conference The Environment and Geotechnics*, Paris, Ecole Nationale des Ponts et Chaussees.
- MANASSERO, M; VAN IMPE, W.F.; BOUAZZA, A. (1996). Waste disposal and containment. *Proc., 2nd International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, 1996, v.3, p.1425-1474.
- MARQUES, A.C.M. (2001). *Programa MSWSET – Descrição e manual de utilização*. São Carlos. /Relatório técnico EESC-USP/ /no prelo/.
- MATTHEWS, J.; LECOCQ, J.; MAGALHÃES, C. (1997). Seleção de equipamentos para aterros sanitários. /Apresentado ao Seminário Internacional de Tecnologia em Aterros Sanitários, PECE/POLI/USP, São Paulo.

- MCBEAN, E.A.; ROVERS, F.A.; FARQUHAR, G.J. (1995). *Solid waste landfill – engineering and design*. New Jersey, Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs.
- MERZ, R.C.; STONE, R. (1962). Landfill settlement rates. *Public Works*, v.93, n.9, p.103-106; 210-212.
- MOORE, P.J.; PEDLER, I.V. (1977). Some measurements of compressibility of sanitary landfill material. *Proc., 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Specialty Session on Geotechnical Engineering and Environmental Control*, Tokyo, Japan, p.319-330.
- MORRIS, D.V.; WOODS, C.E. (1990). Settlement and engineering considerations in landfill and final cover design. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D., eds. *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia. p. 9-21.
- NAHAS, C.M.; FRANÇOSO, N.C.T.; FOLLONI, R. (1996). Novas tecnologias para otimização de disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários e de inertes. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, Porto Alegre, Brasil, 1996. *Anais*. p.222-226.
- OAKLEY, R.E. (1990). Case history: use of the cone penetrometer to calculate the settlement of a chemically stabilized landfill. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D., eds. *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia. p.345-357.
- OKOYE, C.N.; COTTON, T.R.; O'MEARA, D. (1995). Application of resistivity cone penetration testing for qualitative delineation of creosote contamination in saturated soils. *Proc., International Conference Geoenvironment 2000*, New Orleans, Louisiana, 1995. ASCE Special Publication 46, v.1, p.151-166.
- OLSON, R.E. (1963). Effective stress theory of soil compaction. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, v.89, n.SM2, p.27-45.
- ONITSUKA, K.; KATSUMI, T.; KAMON, M.; OKADA, J.; NAMBU, M.; ONO, S. (1996). Industrial waste and disposal of waste landfill in Japan. *Proc., 2nd International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, 1996, v.2, p.663-668.
- ORTH, M.H.A.; MOTTA, F.S. (1998). Caracterização gravimétrica e físico-química dos resíduos sólidos domiciliares no município de São Paulo realizada em Maio de 1998. *Revista Limpeza Pública*, n.48, p.9-16.
- OWEIS, I.S.; KHERA, R. (1986). Criteria for geotechnical construction of sanitary landfills. *Proc., International Symposium on Environmental Geotechnology*, FANG, H.Y., ed., v.1, p.205-222.

- OWEIS, I.S.; KHERA, R.P. (1990). *Geotechnology of waste management*. Butterworths, London, England.
- OWEIS, I.S.; SMITH, D.A.; ELLWOOD, R.B.; GREENE, D.S. (1990). Hydraulic characteristics of municipal refuse. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, v.116, n.4, p.539-553.
- OWEIS, I.S.; KHERA, R.P. (1998). *Geotechnology of waste management*. PWS Publishing Company, 2nd Edition.
- PARKER, A. (1983). Behavior of wastes in landfill methane generation. In: HOLMES, J.R., ed. *Practical waste management*. Chichester, England, John Wiley & Sons. Cap. 8, p.223-234.
- PARK, H.I.; LEE, S.R. (1997). Long-term settlement behavior of landfills with refuse decomposition. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, v.24, n.4, p.159-165.
- PEYTON, R.L.; SCHROEDER, P.R (1993). Water balance for landfills. In: DANIEL, D.E., ed. *Geotechnical practice for waste disposal*. London, Chapman & Hall. Cap.10, p.214-243.
- PINTO, C.S. (2000). *Curso básico de mecânica dos solos*. São Paulo, Oficina de Textos.
- POHLAND, F.G.; DERTIEN, J.T.; GHOSH, S.B. (1983). Leachate and gas quality changes during landfill stabilization of municipal refuse. *Proc., 3rd International Symposium on Anaerobic Digestion*, Boston, MA, USA, August 1983, p.185-201.
- POWRIE, W.; BEAVEN, R.P. (1999). Hydraulic properties of household waste and implications for landfills. *Proc. Institution of Civil Engineering, Geotechnical Engineering*, London, v.137, October, p.235-247.
- RAO, S.K.; MOULTON, L.K.; SEALS, R.K. (1977). Settlement of refuse landfills. *Proc., Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials*, Ann Arbor, Michigan, p.574-598.
- REDDY, J.N. (1984). *An introduction to the finite element method*. New York. McGraw Hill.
- REES, J.F. (1980). The fate of carbon compounds in the landfill disposal of organic matter. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, n.30, p.161-175.
- RICHARDSON, G.; REYNOLDS, D. (1991). Geosynthetic consideration in a landfill on compressible clays. *Proc., Conference on Geosynthetics - Geosynthetics 91*, Atlanta, Georgia, v.2, p.507-516.
- ROBINSON, W.D. (1986). *The solid waste handbook – A practical guide*. New York, John Wiley & Sons.

- SAGASETA, C. (1993). Old landfill sites treatment: general report. *Proc., 1st Symposium on Geotechnics related to the Environment - Green'93*, Bolton, England, 1993, p.591-599.
- SANCHEZ-ALCITURRI, J.M.; PALMA, J.; SAGASETA, C.; CANIZAL, J. (1993). Three years of deformation monitoring at Meruelo landfill. *Proc., 1st Symposium on Geotechnics related to the Environment - Green'93*, Bolton, England, 1993, p.365-372.
- SANTOS, S.M.; JUCÁ, J.F.T.; ARAGÃO, J.M.S (1998). Geotechnical properties of a solid waste landfill: Muribeca's case. *Proc., 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbon, Portugal, 1998, v.1, p.181-184.
- SARGUNAN, A.; MALLIKARJUN, N.; RANAPRATAP, K. (1986). Geotechnical properties of refuse fills of Madras, India. *Proc., International Symposium on Environmental Geotechnology*, FANG, H.Y., ed., v.1, p.197-204.
- SCHALCH, V. (1992). *Análise comparativa do comportamento de dois aterros sanitários semelhantes e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbia*. São Carlos. 220p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SCHROEDER, P.R.; LLOYD, C.M.; ZAPPI, P.A.; AZIZ, N.M. (1994a). *The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) Model: user's guide for version 3*. Washington DC, U.S. Environmental Protection Agency (Report EPA/600/R-94/168a).
- SCHROEDER, P.R.; DOZIER, T.S.; ZAPPI, P.A.; McENROE, B.M.; SJOSTROM, J.W.; PEYTON, R.L. (1994b). *The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) Model: engineering documentation for version 3*. Washington DC, U.S. Environmental Protection Agency (Report EPA/600/R-94/168b).
- SCHOMAKER, N.B. (1972). Construction techniques for sanitary landfills. *Waste Age Magazine*, March/April, p.24-25; 42-44.
- SHARMA, H.D.; DUKES, M.T.; OLSEN, D.M. (1990). Field measurements of dynamic moduli and Poisson's ratio of refuse and underlying soils at a landfill site, In: LANDVA, A.; KNOWLES, D., eds., *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.57-70.
- SHARMA, H.D. (2000). Solid waste landfills – settlements and post-closure perspectives. *Proc., ASCE National Conference on Environmental and Pipeline Engineering*, Kansas City, Missouri, p.447-455.
- SHEURS, R.E.; KHERA, R.P. (1980). Stabilization of a sanitary landfill to support a highway. *Transportation Research Record*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., n.754, p.46-53.

- SHIMIZU, K. (1996). Geotechnics of waste landfill. *Proc., 2nd International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, 1996, v.3, p.1475-1491.
- SIEGEL, R.A.; ROBERTSON, R.J.; ANDERSON, D.G. (1990). Slope stability investigations at a landfill in southern California. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D., eds. *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.259-284.
- SINGH, A.; MITCHELL, J. K. (1968). General stress-strain-time function for soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, v.94, n.SM1, p.21-46.
- SINGH, S.; MURPHY, B. (1990). Evaluation of the stability of sanitary landfills. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D., eds. *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.240-258.
- SINGH, S.; SUN, J. (1995). Geotechnical considerations in the seismic response evaluation on municipal solid waste landfills. *Proc., Special Session on Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills*, ASCE, Geotechnical Special Publication 54, San Diego, California, p.181-195.
- SOHN, K.C.; LEE, S. (1994). A method for prediction of long- term settlement of sanitary landfill. *Proc., 1st International Congress on Environmental Geotechnics*, Edmonton, Canada, p.807-811.
- SOLER, N.D.; MAHER, A.; CHAE, Y.S.; HAMIDI, A. (1995). A conceptual model for transient settlements in waste fills. *Proc., 1st International Conference on Unsaturated Soils - UNSAT'95*, Paris, France, v.1, p.411-416.
- SOWERS, G.F. (1968). Foundation problems in sanitary landfills. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, ASCE, v.94, n.SA1, p.103-116.
- SOWERS, G.F. (1973). Settlement of waste disposal fills. *Proc., 8TH International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscou, Rússia, v.22, p.207-210.
- STONE, R.; KAHLE, R. (1977). Evaluation of solid waste baling and landfilling. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, v.103, n.EE4, p.557-573.
- STULGIS, R.P.; SOYDEMIR, C.; TELGENER, R.J. (1995). Predicting landfill settlement. *Proc., Conference Geoenvironment 2000*. Geotechnical Special Publication 46. ASCE, New Orleans, Louisiana, v.2, p.980-994.
- SURPRENANT, G.; LEMKE, J. (1994). Landfill compaction: setting a density standard. *Waste Age*, August, p.43-52.
- TANG, W.H.; GILBERT, R.B.; ANGULO, M.; WILLIAMS, R.S (1994). Probabilistic observation method for settlement-based design of a landfill cover. *Proc., Settlement '94*

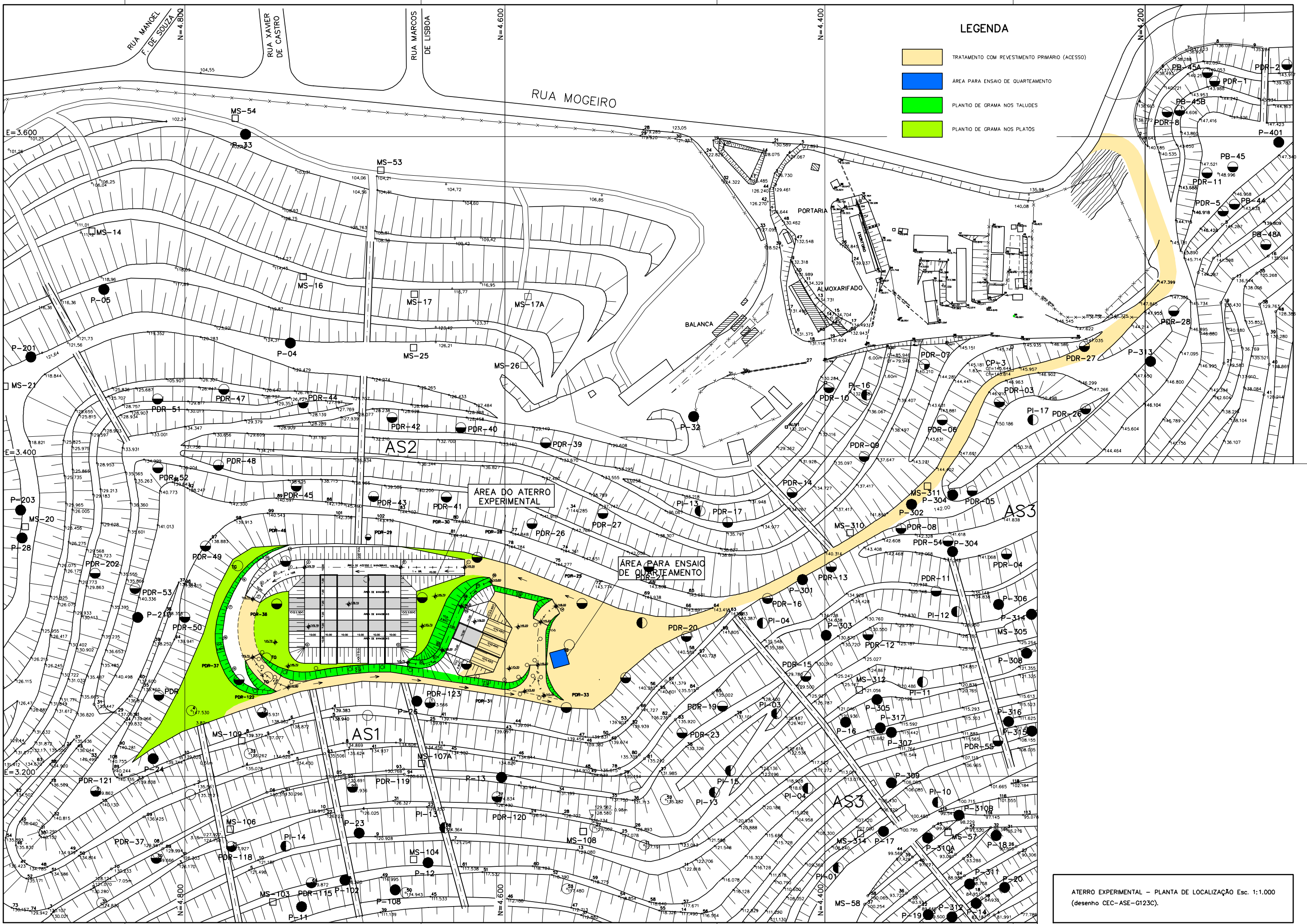
- Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*. Geotechnical Special Publication 40 – ASCE, College Station, Texas, v.2, p.1573-1589.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S.A. (1993). *Integrated solid waste management – engineering principles and management issues*. McGraw-Hill, New York.
- U.S. NAVY (1983). *Soil dynamics, deep stabilization, and special geotechnical construction – design manual 7.3*. NAVFAC DM-7.3, Department of the Navy, Alexandria, VA.
- VAN IMPE, W.F. (1995). Policy and challenges of environmental geotechnics. /Apresentado ao Seminário Luso-Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Lisboa, Portugal.
- VAN IMPE, W.F; BOUAZZA, A. (1996). Densification of domestic waste fills by dynamic compaction. *Canadian Geotechnical Journal*, v.33, p.879-887.
- VAN MEERTEN, J.J.; SELLMEJER, J.B.; PEREBOOM, D. (1995). Prediction of landfill settlements. *Proc., 5th International Landfill Symposium - Sardinia 95*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, p.823-831.
- VAN MEERTEN, J.J.; SELLMEJER, J.B.; PEREBOOM, D. (1997). Prediction of landfill settlement. *Proc., 6th International Landfill Symposium - Sardinia 97*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, p.535-544.
- VELLOSO, D.A.; FONSECA, H.M.B.; MONROI, J.C. (1994). Fundações da usina de reciclagem e compostagem de lixo do Caju, Rio de Janeiro. In: SEMINÁRIO SOBRE GEOTECNIA DE ATERROS PARA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS - GEOAMBIENTAL'94, Rio de Janeiro, 1994, p.1.7-1.16.
- WALKER, L.K.; KURZEME, M. (1984). Settlement characteristics of waste fill sites. *Proc., 4th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, Perth, Australia, p.346-350.
- WALKER, L.K.; KURZEME, M. (1985). Building on waste fill sites. *Proc., 3rd National Local Government Engineering Conference*, Melbourne, Australia, p.64-69.
- WALL, D.K.; ZEISS, C. (1995). Municipal landfill biodegradation and settlement. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, v.121, n.3, p.214-224.
- WALLIS, S. (1991). Factors affecting settlement at landfills sites. *Proc., The Planning and Engineering of Landfills*, Midland Geotechnical Society, p.183-186.
- WARDWELL, R.E.; NELSON, J.D. (1981). Settlement of sludge landfills with fiber decomposition. *Proc., 10th International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, v.2, p.397-401.
- WATTS, K.S.; CHARLES, J.A. (1990). Settlement of recently placed domestic refuse landfills. *Proc. Institution of Civil Engineering*, London, part 1, v.88, Dec., p. 971-993.
- WILLIAMS, E.A. (1991). Model for long- term settlement in landfills. Medford. 266p. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) - Tufts University, Massachusetts.

- WITHIAN, J.L.; TARVIN, P.A.; BUSHHELL, T.D.; SNOW, R.E.; GERMANN, H.W. (1995). Prediction and Performance of Municipal Landfill Slope. *Proc., International Conference Geoenvironment 2000*, Geotechnical Special Publication 46, ASCE, New Orleans, Louisiana, 1995, v.2, p.1005-1019.
- WOJNAROWICZ, M.; KNOCHENMUS, G.; VAN IMPE, W. (1998). Géotechnique de l'environnement – activités de l'ICSMFE (TC5). *Revue Française de Géotechnique*, n.83, p.3-16.
- YEN, B.C., SCANLON, B.S. (1975). Sanitary landfill settlement rates. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, v.101, n.GT5, p.475-487.
- YORK, D.; LESSER, N.; BELLATTY, T.; IRSAL, E.; PATEL, A. (1977). Terminal development on a refuse fill site. *Proc., Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials*, Ann Arbor, Michigan, p.810-830.
- YOSHIDA, H.; HOZUMI, H.; TANAKA, N. (1996). Theoretical study on temperature distribution in a sanitary landfill. *Proc., 2nd International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, 1996, v.1, p.323-328.
- ZAMISKIE, E.M.; KABIR, M.G.; HADDAD, A. (1994). Settlement evaluation for cap closure performance. *Proc., Settlement '94 Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*. Geotechnical Special Publication 40 – ASCE, College Station, Texas, v.1, p.462-475.
- ZEISS, C. (1997). A comparison of approaches to the prediction of landfill leachate generation. *Proc., 6th International Landfill Symposium – Sardinia 97*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, v.2, p.13-22.
- ZIMMERMAN, R.E.; CHEN, W.W.H.; FRANKLIN, A.G. (1977). Mathematical model for solid waste settlement. *Proc., Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials*, Ann Arbor, Michigan, p.210-226.
- ZOINO, W.S. (1971). Settlement of rubbish fill yellow freight system facility. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, October, p.230-242.
- ZORNBERG, J.G.; JERNIGAN, B.L.; SANGLERAT, T.R.; COOLEY, B.H. (1999). Retention of free liquids in landfills undergoing vertical expansion. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, v.125, n.7, p.583-594.

*APÊNDICE I***ATERRO EXPERIMENTAL: DESENHOS DE PROJETO**

Neste apêndice são apresentados os desenhos principais elaborados para o projeto do aterro experimental, os quais serviram de base para execução e controle do experimento. Os desenhos foram elaborados pelas empresas ENGECORPS – Corpo de Engenheiros Consultores S/C Ltda e CEPOLLINA Engenheiros Consultores, norteados pelos conceitos e objetivos advindos da presente pesquisa. Os desenhos apresentados incluem:

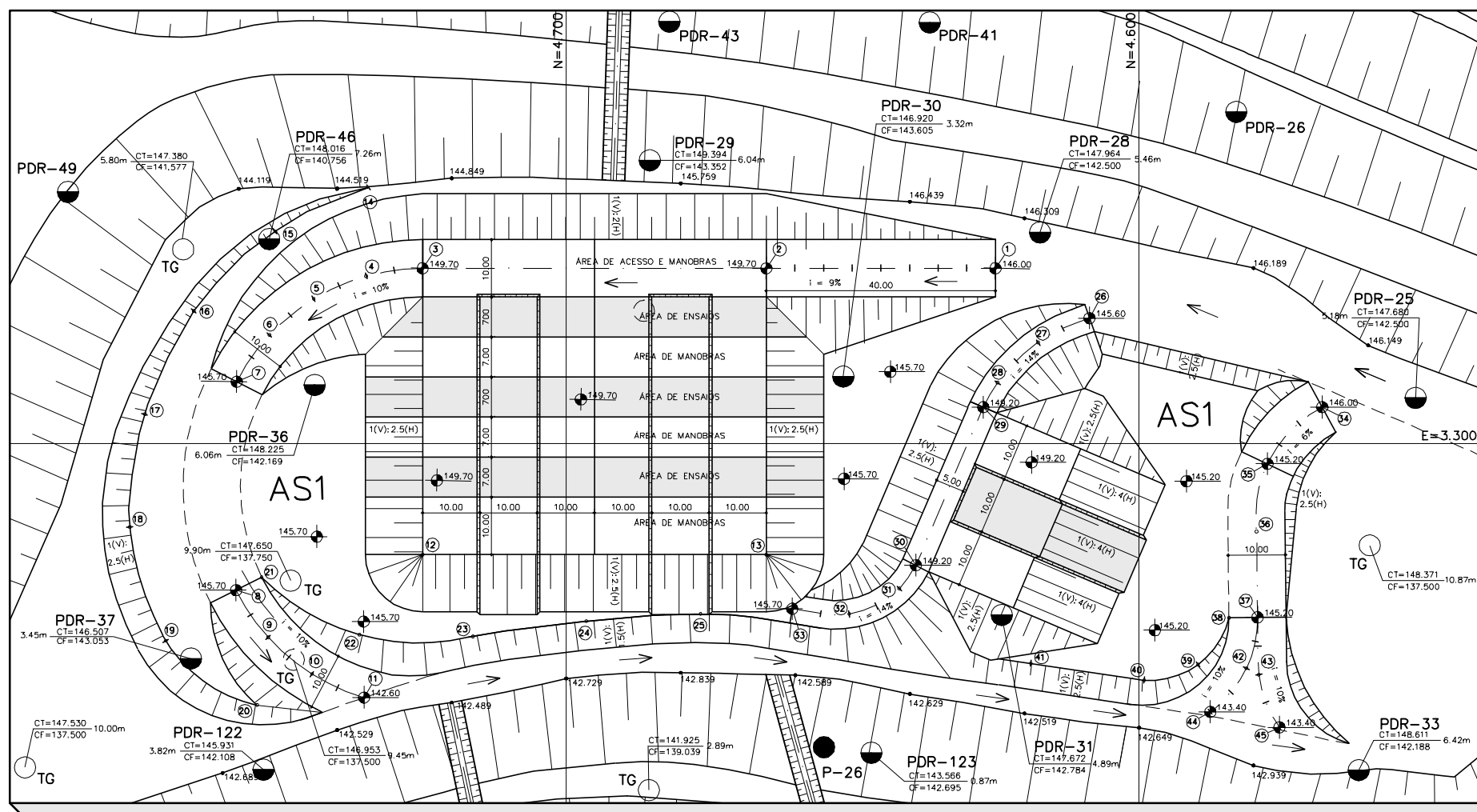
- Aterro experimental – Planta de localização (desenho CEC-ASE-G123C).
- Aterro experimental – Planta preliminar de locação (desenho CEC-ASE-G119E).
- Aterro experimental – Planta de drenagem de gás (desenho CEC-ASE-G118D).
- Aterro experimental – Aterro de regularização e locação de novos marcos superficiais (MSE) (desenho CEC-ASE-G116F).
- Aterro experimental – Planta de drenagem de chorume (desenho CEC-ASE-G120I).
- Aterro experimental – Planta de drenagem superficial (desenho CEC-ASE-G121D).
- Aterro experimental – Seqüência executiva – indicações (desenho CEC-ASE-G122F).
- Aterro experimental – Ensaio de densidade – locação das cavas (desenho 064-SSO-MOE-A1-E063).



LEGENDA

- TREATAMENTO COM REVESTIMENTO PRIMARIO (ACESSO)
- AREA PARA ENSAIO DE QUARTEAMENTO
- PLANTIO DE GRAMA NOS TALUDES
- PLANTIO DE GRAMA NOS PLATOS

ATERRO EXPERIMENTAL - PLANTA DE LOCALIZACAO Esc. 1:1.000 (desenho CEC-ASE-G123C).



PONTO	COORDENADAS		COTA FINAL DE PROJ.
	N	E	
1	4625.073	3330.667	146.00
2	4665.073	3330.667	149.70
3	4725.073	3330.667	149.70
4	4734.948	3329.306	148.70
5	4744.087	3325.323	147.70
6	4751.808	3319.017	146.70
7	4758.085	3311.488	145.70
8	4757.639	3274.433	145.70
9	4752.023	3266.198	144.67
10	4744.387	3259.788	143.63
11	4735.302	3255.684	142.60
12	4725.073	3280.667	149.70
13	4665.073	3280.667	149.70
14	4734.487	3344.783	144.60
15	4750.803	3337.106	145.70
16	4765.024	3323.200	145.70
17	4773.589	3305.183	145.70
18	4776.194	3285.466	145.70
19	4769.894	3285.596	145.70
20	4753.994	3254.367	145.70
21	4753.162	3276.660	145.70
22	4736.107	3266.647	145.70
23	4716.325	3266.360	145.70
24	4696.508	3269.019	145.70
25	4676.559	3270.300	145.70
26	4608.628	3321.966	145.60
27	4617.634	3317.711	147.04
28	4624.689	3310.696	148.48
29	4627.195	3306.379	149.20
30	4638.930	3278.840	149.20
31	4641.849	3274.727	148.50
32	4650.619	3270.287	147.10
33	4660.529	3271.174	145.70
34	4568.035	3306.418	146.00
35	4577.576	3296.495	145.20
36	4579.482	3284.680	145.20
37	4579.311	3269.695	145.20
38	4584.311	3269.625	145.20
39	4589.691	3261.442	145.20
40	4599.097	3258.717	145.20
41	4618.880	3261.638	145.20
42	4581.241	3260.782	144.38
43	4579.079	3259.687	144.33
44	4587.565	3253.169	143.40
45	4575.496	3250.462	143.40

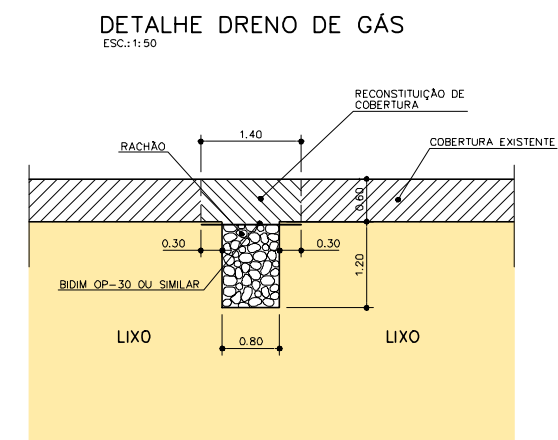
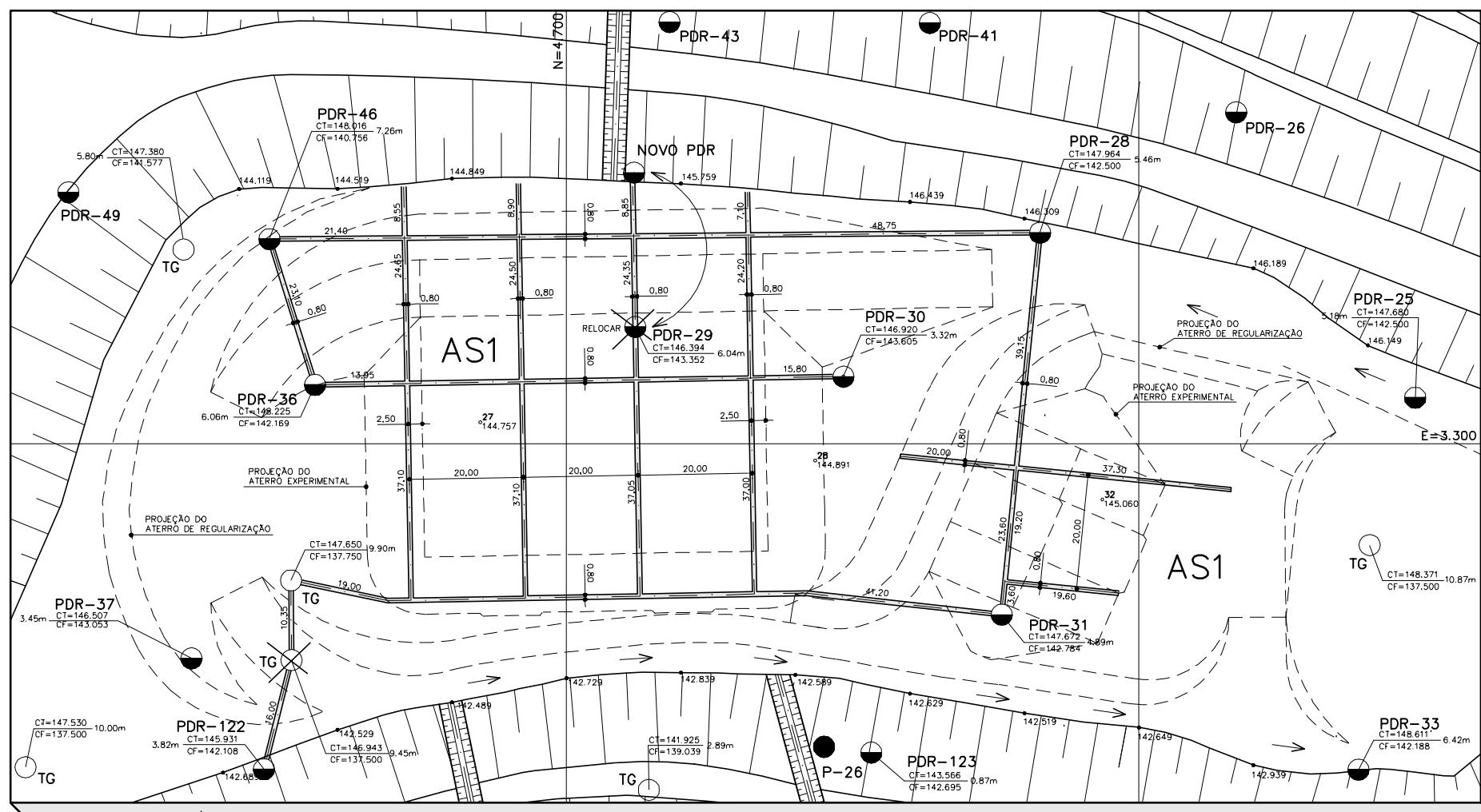
ATERRO EXPERIMENTAL – PLANTA DE LOCAÇÃO

ESC.: 1:500

NOTAS:

- COTAS E MEDIDAS EM METRO.
- A PRESENTE LOCAÇÃO PODERA SER AJUSTADA DESDE QUE APROVADO PELA FISCALIZAÇÃO E PELO GRUPO DE TRABALHO DE ATERROS SANITÁRIOS DA PMSP/LIMPURE, INCLUSIVE LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO AS PLANTAS FINAIS DE SEQUÊNCIA EXECUTIVA.
- ESTE DESENHO COMPLEMENTA O DESENHO 064-SS0-MOE-A1-E050 DA ENGECCORP - CORPO DE ENGENHEIROS CONSULTORES

ATERRO EXPERIMENTAL – PLANTA PRELIMINAR DE LOCAÇÃO
(desenho CEC-ASE-G119E)



ATERRO EXPERIMENTAL – PLANTA DE DRENAGEM DE GÁS

ESC.: 1:500

NOTAS:

- 1 - NÍVEIS E MEDIDAS EM METRO
- 2 - A PRESENTE LOCAÇÃO PODERÁ SER AJUSTADA DESDE QUE APROVADO PELA FISCALIZAÇÃO E PELO GRUPO DE TRABALHO DE ATERROS SANITÁRIOS DA PMSF/LIMPURB
- 3 - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO ELABORADO PELA HELENO & FONSECA CONSTRUTÉCNICA S.A.
- 4 - A LOCAÇÃO DO ATERRO DEVERÁ SER EFETUADA ATRAVÉS DOS DADOS DO DESENHO CEC-ASE-G119E.

ATERRO EXPERIMENTAL – PLANTA DE DRENAGEM DE GÁS
(desenho CEC-ASE-G118D)

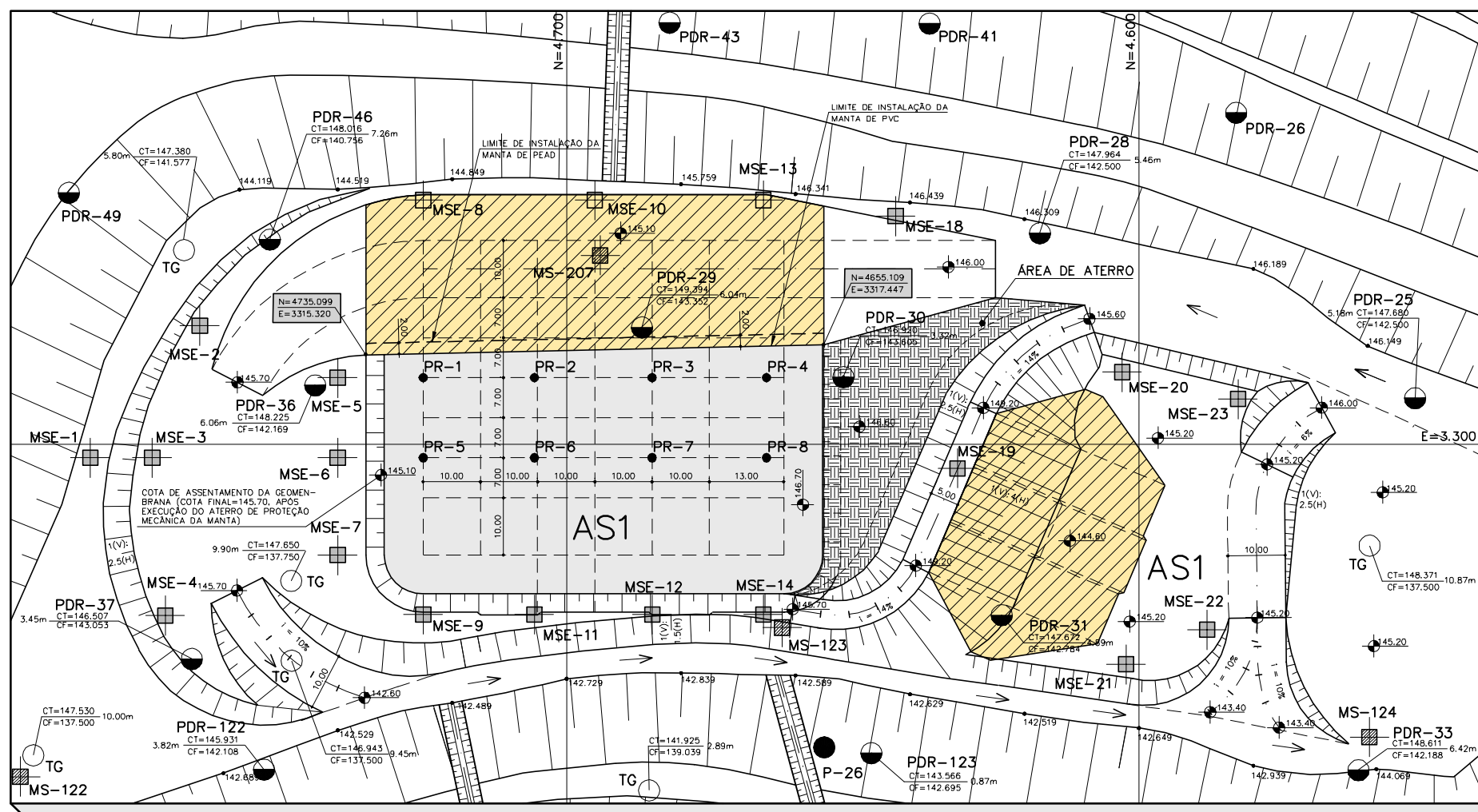


TABELA DE LOCAÇÃO DOS NOVOS MARCOS SUPERFICIAIS

MSE	COORDENADAS		COTA INICIAL DO TERRENO
	N	E	
1	4783.27	3297.67	144.50
2	4764.11	3320.77	145.70
3	4772.42	3297.67	145.70
4	4770.14	3270.11	145.70
5	4740.02	3311.67	145.70
6	4740.02	3297.67	145.70
7	4740.02	3280.67	145.70
8	4725.07	3342.71	145.70
9	4725.07	3270.27	145.70
10	4695.07	3342.71	145.70
11	4705.65	3270.27	145.70
12	4685.07	3270.27	145.70
13	4665.65	3342.71	145.70
14	4665.65	3270.27	145.70
15	4649.01	3311.67	ELIMINADO
16	4650.90	3297.67	ELIMINADO
17	4650.90	3280.67	ELIMINADO
18	4642.50	3339.95	145.70
19	4631.69	3295.84	149.20
20	4602.92	3312.64	145.20
21	4602.20	3261.57	145.20
22	4588.10	3267.67	145.20
23	4582.64	3307.95	145.20

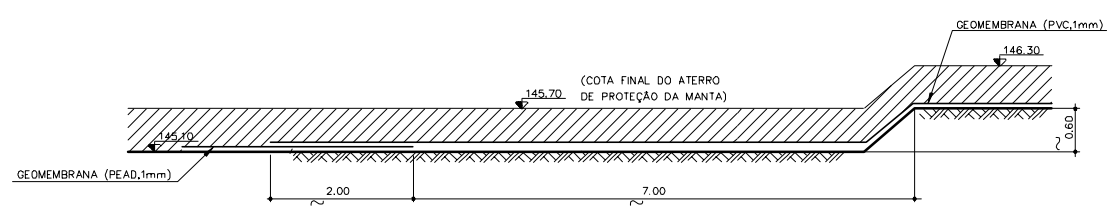
TABELA DE LOCAÇÃO DAS PLACAS DE RECALQUE

PR	COORDENADAS		COTA DO TERRENO
	N	E	
1	4725.07	3311.67	145.70
2	4705.65	3311.67	145.70
3	4685.07	3311.67	145.70
4	4665.07	3311.67	145.70
5	4725.07	3297.67	145.70
6	4705.65	3297.67	145.70
7	4685.07	3297.67	145.70
8	4665.07	3297.67	145.70

- NOTAS:**
- 1 - NÍVEIS E MEDIDAS EM METRO.
 - 2 - A PRESENTE LOCAÇÃO PODERÁ SER AJUSTADA DESDE QUE APROVADO PELA FISCALIZAÇÃO E PELO GRUPO DE TRABALHO DE ATERROS SANITÁRIOS DA PMSF/LIMPURB.
 - 3 - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO ELABORADO PELA HELENO & FONSECA CONSTRUTÉCNICA S.A.
 - 4 - O ATERRO DE REGULARIZAÇÃO DEVERÁ SER CONSTITUÍDO PREFERENCIALMENTE POR SOLO ARGILOSO E COMPACTADO CONFORME ESPECIFICADO NO RELATÓRIO HFAP-291196:
 - GC > 95% (PN)
 - 0.95hot < R < 1.10hot (PN)
 - COMPACTAÇÃO COM ROLO TIPO TAMPING COM NO MÍNIMO 5 PASSADAS OU A CRITÉRIO DA FISCALIZAÇÃO
 - ESPESURA LANÇADA DAS CAMADAS DE NO MÁXIMO 25cm
 - DECLIVIDADE MÍNIMA DA PRAÇA DE 0.5%
 - 5 - NA REGIÃO DE IMPLANTAÇÃO DA GEOMEMBRANA NO PLANO HORIZONTAL, O ATERRO DEVERÁ SER ELEVADO ATÉ O NÍVEL 145.10m. APÓS A INSTALAÇÃO DA MANTA, EFETUAR-SE-Á O RECUBRIMENTO COM SOLO ARGILOSO COMPACTADO COM ESPESURA MÍNIMA DE 60cm. (NÍVEL FINAL 145.70m).

ATERRO EXPERIMENTAL – ATERRO DE REGULARIZAÇÃO
 ESC.: 1:500

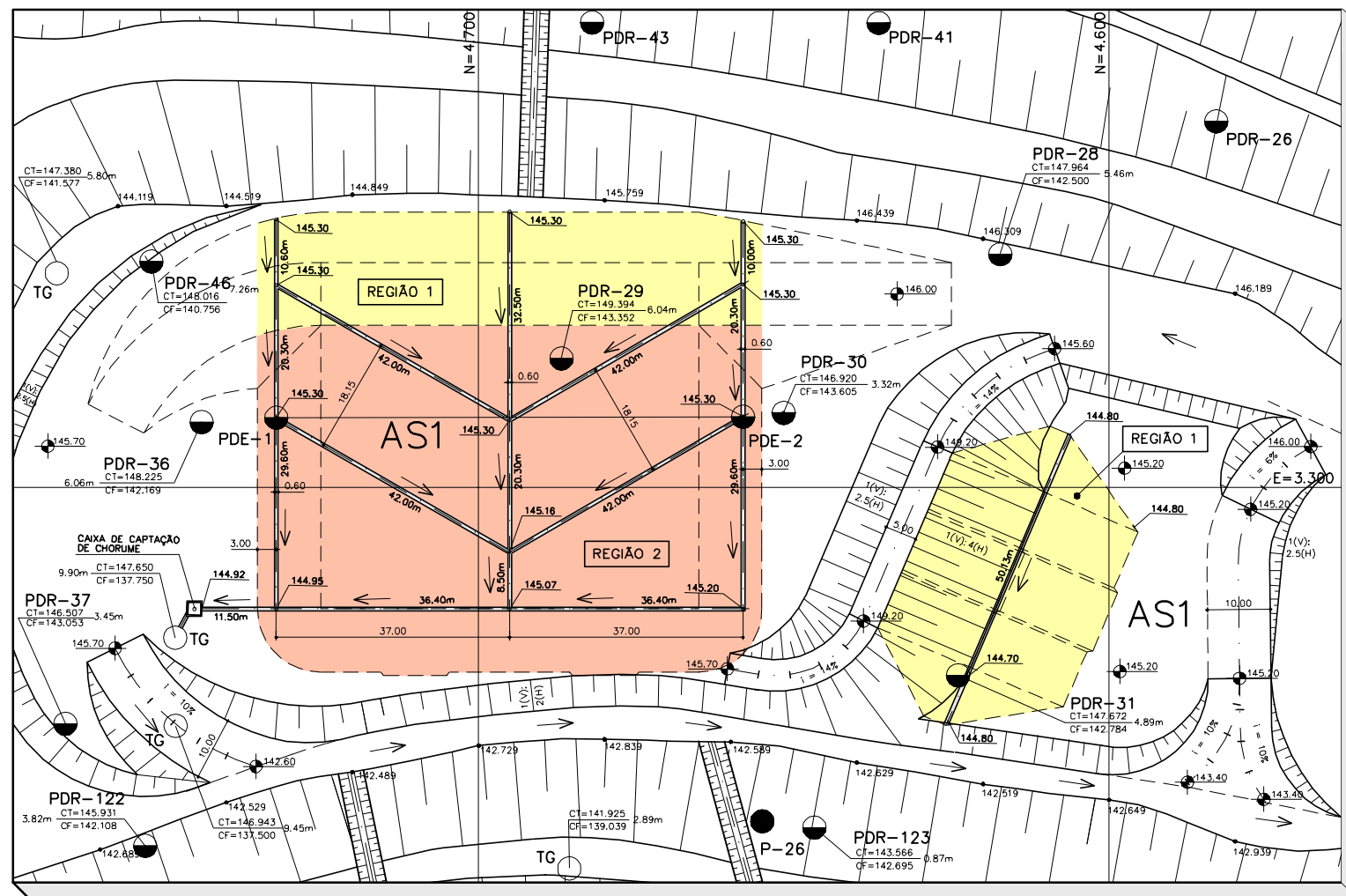
- ÁREA DE INSTALAÇÃO DE GEOMEMBRANA (PEAD e PVC,1mm)
- LOCAÇÃO DE NOVOS MARCOS SUPERFICIAIS (MSE)
- LOCAÇÃO DAS PLACAS DE RECALQUE



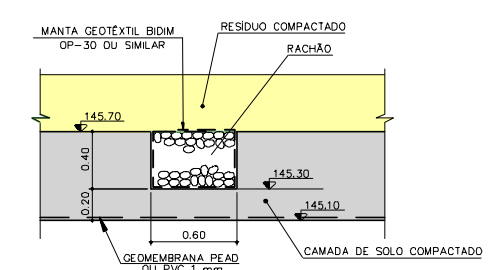
DET. SOBREPOSIÇÃO DAS GEOMEMBRANAS
 ESC.: 1:50

- LEGENDA:**
- MS - MARCOS SUPERFICIAIS EXISTENTES
 - MSE - MARCOS SUPERFICIAIS A SEREM INSTALADOS (N=23)
 - PLACAS DE RECALQUE (N=8)
 - ÁREA DE INSTALAÇÃO DE GEOMEMBRANA (PEAD,1mm)
 - ÁREA DE INSTALAÇÃO DE GEOMEMBRANA (PVC,1mm)

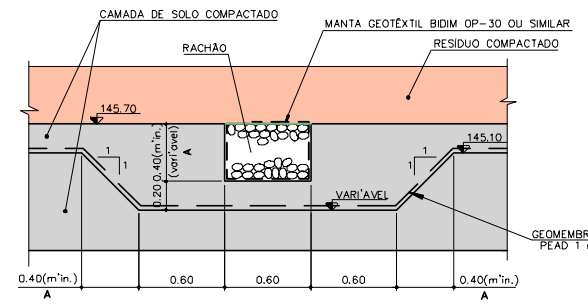
ATERRO EXPERIMENTAL – ATERRO DE REGULARIZAÇÃO E LOCAÇÃO DE NOVOS MARCOS SUPERFICIAIS (MSE)
 (desenho CEC-ASE-G116F)



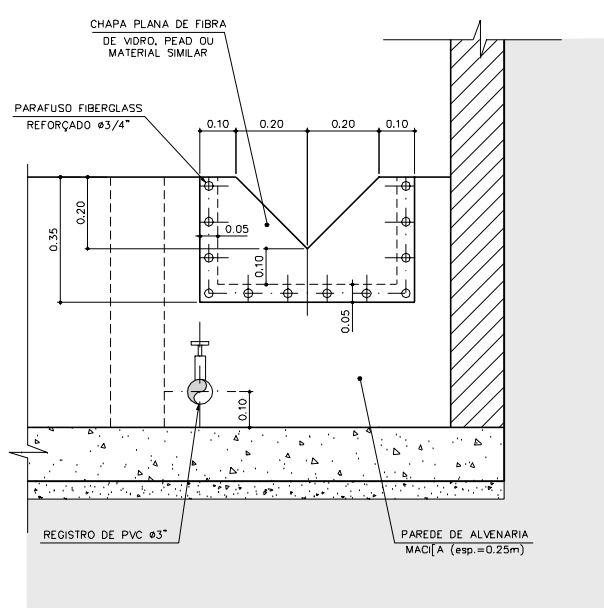
ATERRO EXPERIMENTAL – PLANTA DE DRENAGEM DE CHORUME
ESC.: 1:500



DETALHE DRENO DE CHORUME – REGIÃO 1
ESC.: 1:25



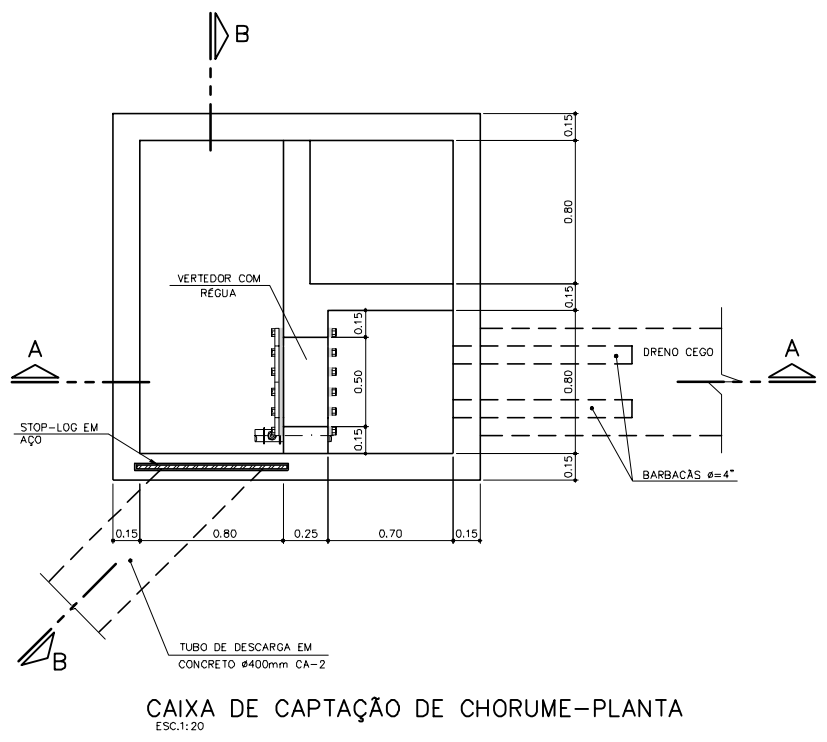
DETALHE DRENO DE CHORUME – REGIÃO 2
ESC.: 1:25



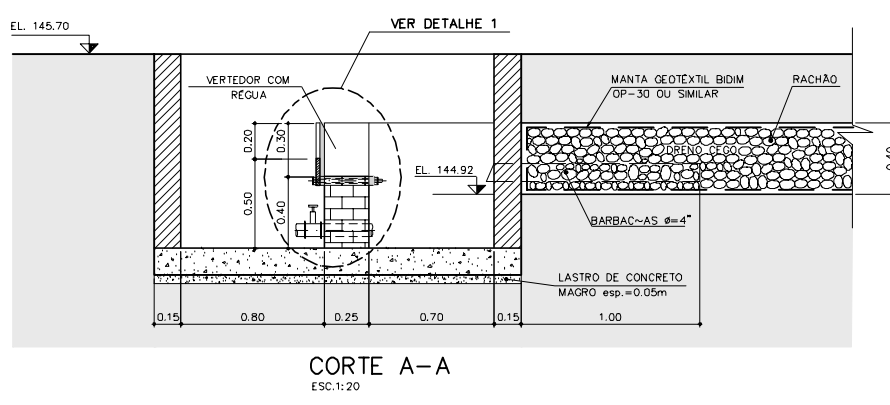
DETALHE 2
ESC.: 1:10

NOTAS:

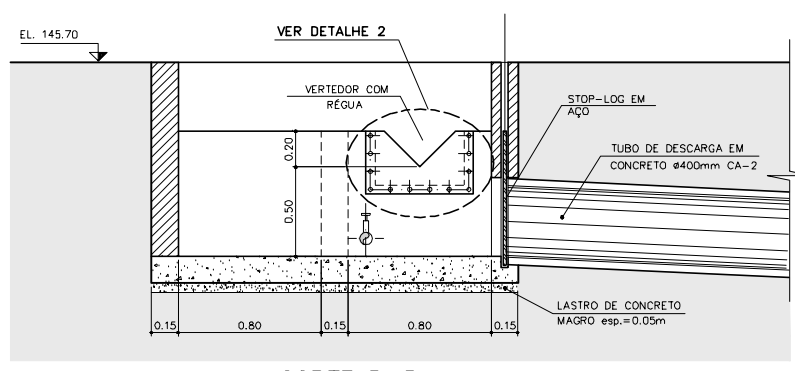
- 1 - NÍVEIS E MEDIDAS EM METRO.
- 2 - A PRESENTE LOCAÇÃO PODERÁ SER AJUSTADA DESDE QUE APROVADA PELA FISCALIZAÇÃO E PELO GRUPO DE TRABALHO DE ATERROS SANITÁRIOS DA PMSP/LIMPURB.
- 3 - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO ELABORADO PELA HELENO & FONSECA CONSTRUTECNICA S.A.
- 4 - NA REGIÃO DE IMPLANTAÇÃO DA GEOMEMBRANA NO PLANO HORIZONTAL, O ATERRO DEVERÁ SER ELEVADO ATÉ O NÍVEL 145.10m. APÓS A INSTALAÇÃO DA MANTA EFETUAR-SE-A RECOBRIMENTO COM SOLO ARGILOSO COMPACTADO COM ESPESURA MÍNIMA DE 60cm.
- 5 - PARA POSICIONAMENTO DA INSTALAÇÃO DA GEOMEMBRANA E LOCAÇÃO DO ATERRO VER DESENHO (CEC - ASE - G119E).
- 6 - O NÍVEL DA MANTA SOB OS DRENOS PODERÁ SER ESTABELECIDO EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE FUNDO DOS DRENOS.
- 7 - DETALHE DA CAIXA DE CAPTAÇÃO E DRENAGEM DE CHORUME CONFORME DES. N° 064-SSO-MOE-A1-E062 DA ENGECORPS.



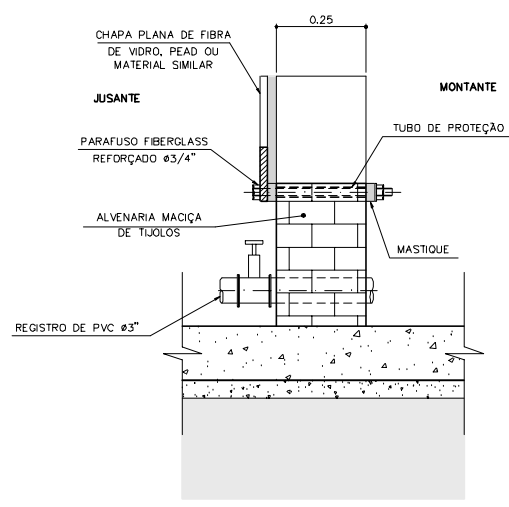
CAIXA DE CAPTAÇÃO DE CHORUME-PLANTA
ESC.: 1:20



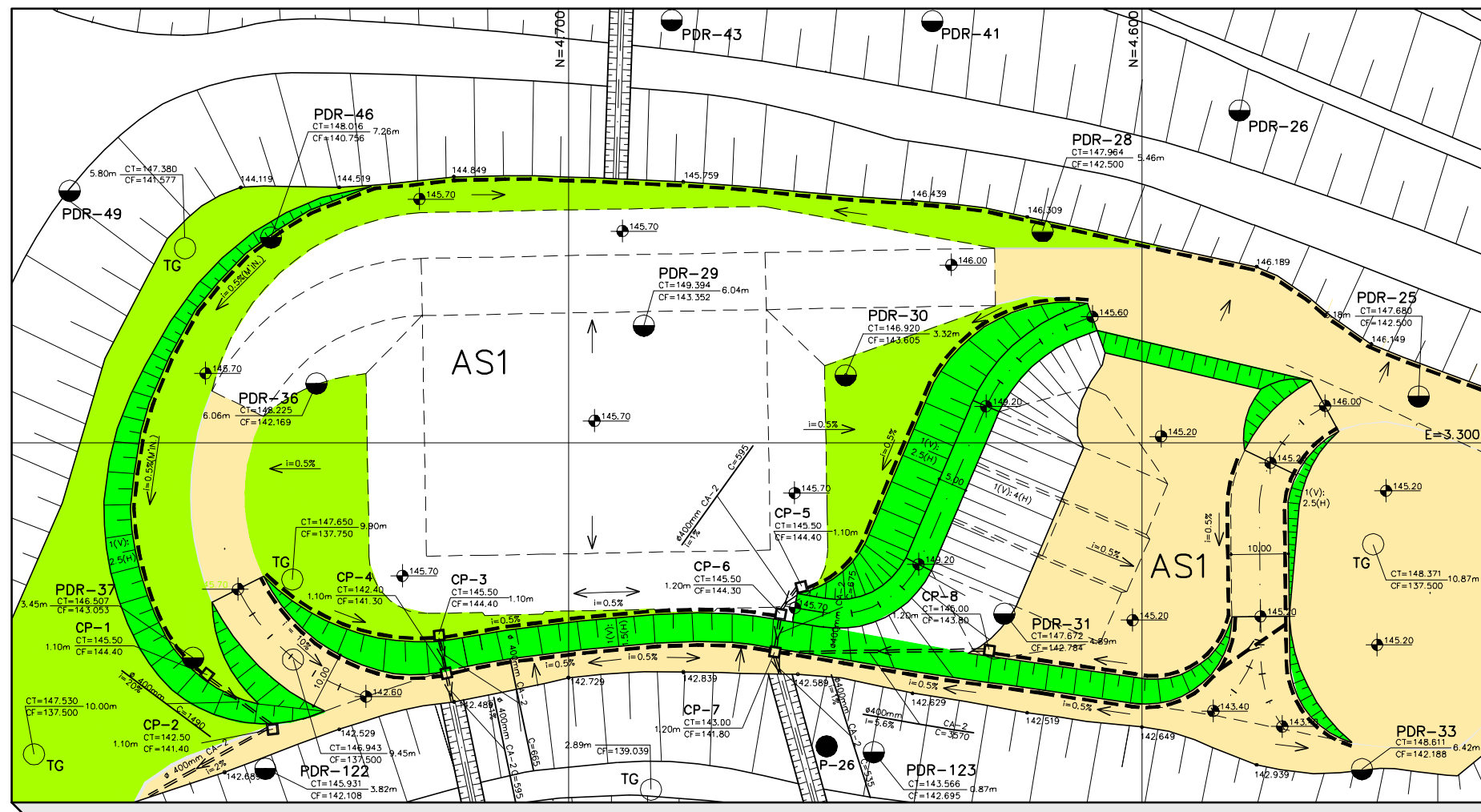
CORTE A-A
ESC.: 1:20



CORTE B-B
ESC.: 1:20



DETALHE 1
ESC.: 1:10

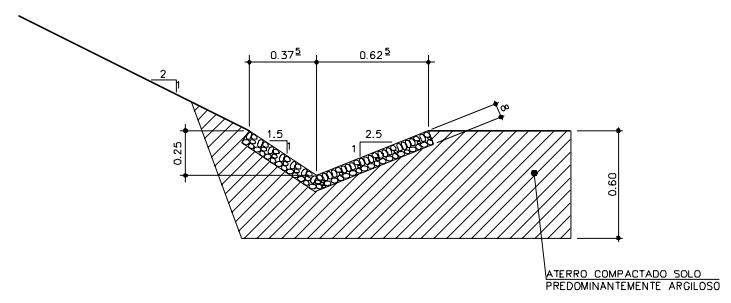


- LEGENDAS:**
- TRATAMENTO COM REVESTIMENTO PRIMÁRIO (ACESSOS)
 - PLANTIO DE GRAMA NOS TALUDES
 - PLANTIO DE GRAMA NOS PLATOS
 - CANALETAS (VER DETALHE ABAIXO)
 - GALERIA COM TUBOS #400mm CA-2

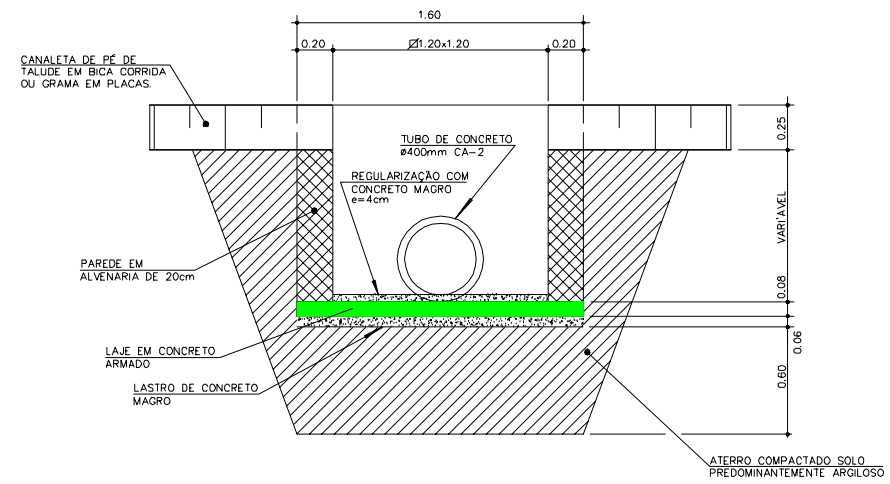
- NOTAS:**
- 1 - NÍVEIS E MEDIDAS EM METRO.
 - 2 - A PRESENTE LOCAÇÃO PODERÁ SER AJUSTADA DESDE QUE APROVADA PELA FISCALIZAÇÃO E PELO GRUPO DE TRABALHO DE ATERRIS SANITÁRIOS DA PMSP/LIMPURB.
 - 3 - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO ELABORADO PELA HELENO & FONSECA CONSTRUTECNICA S.A.
 - 4 - AS CANALETAS COM GRAMA EM PLACAS SOMENTE PODERÃO SER EXECUTADAS ONDE INDICADAS, DEVIDO AO SEU CARÁTER "PROVISÓRIO" E MEDIANTE AS LIMITADAS DECLIVIDADES, SENDO FUNDAMENTAL OPERAÇÕES ROTINEIRAS DE PODA E MANUTENÇÃO.
 - 5 - TODOS OS TALUDES E ÁREAS INDICADAS DEVERÃO RECEBER PROTEÇÃO ATRAVÉS DO PLANTIO DE GRAMA.
 - 6 - A LOCAÇÃO DO ATERRO DEVERÁ SER EFETUADA ATRAVÉS DOS DADOS DO DESENHO CEC-ASE-G119E.
 - 7 - AS DECLIVIDADES FINAIS DO SISTEMA DE DRENAGEM DEVERÃO SER REVISTAS APOS O TÉRMINO DA EXECUÇÃO DO ATERRO DE BASE, DEVIDO AOS RECALQUES.

ATERRO EXPERIMENTAL – PLANTA DE DRENAGEM SUPERFICIAL

ESC.: 1:500

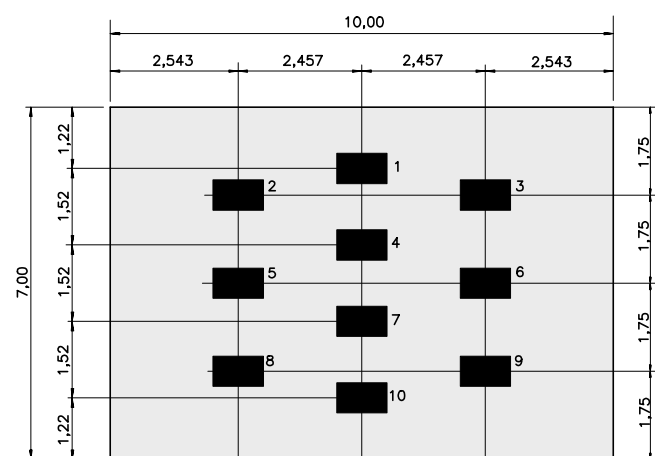


DETALHE DA CANALETA EM BICA CORRIDA OU "PROVISÓRIA" COM GRAMA EM PLACAS
ESC.: 1:20

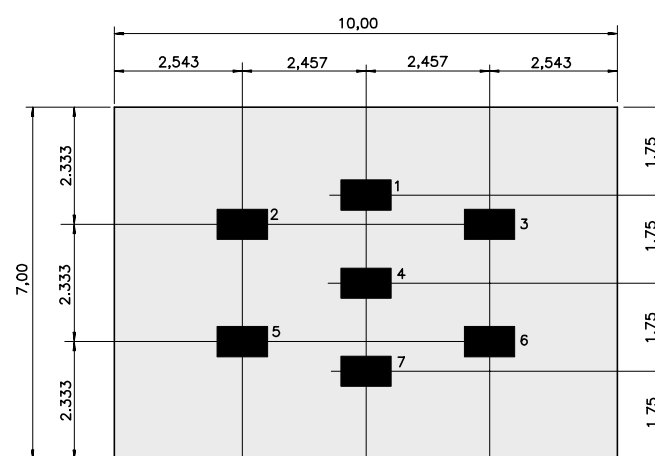


DETALHE DAS CAIXAS DE PASSAGEM
ESC.: 1:20

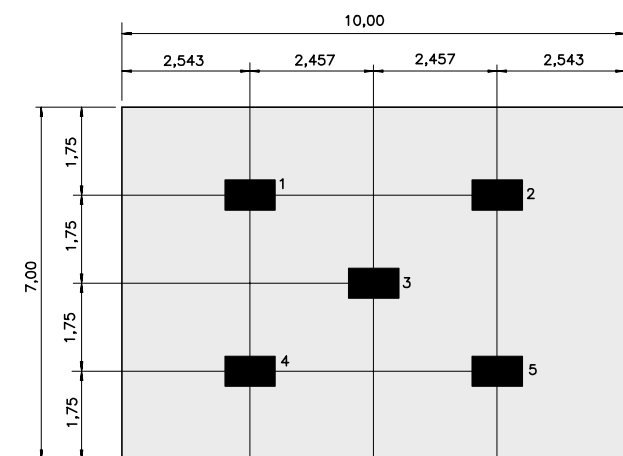
ATERRO EXPERIMENTAL – PLANTA DE DRENAGEM SUPERFICIAL
(desenho CEC-ASE-G121D)



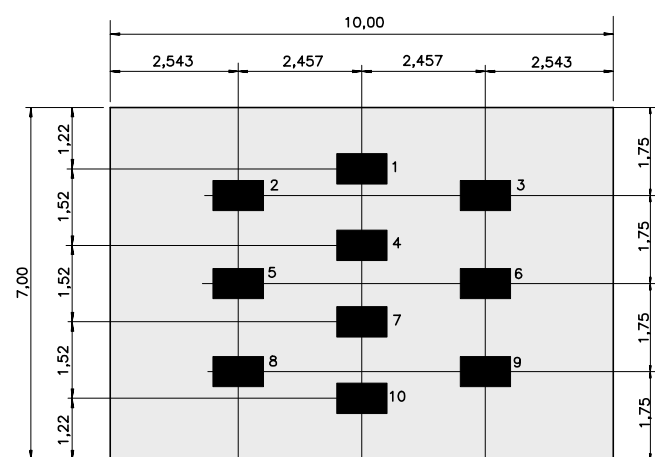
ENSAIOS PARA AS ÁREAS COM ESPESSURAS DE 0,40m
COM 4 PASSADAS



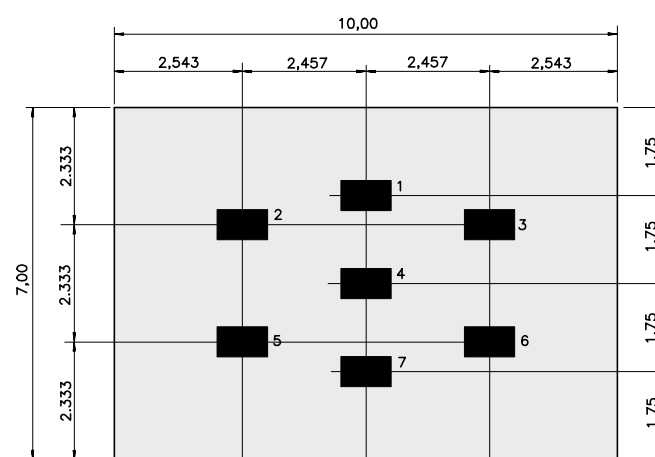
ENSAIOS PARA AS ÁREAS COM ESPESSURAS DE 0,60m
COM 4 PASSADAS



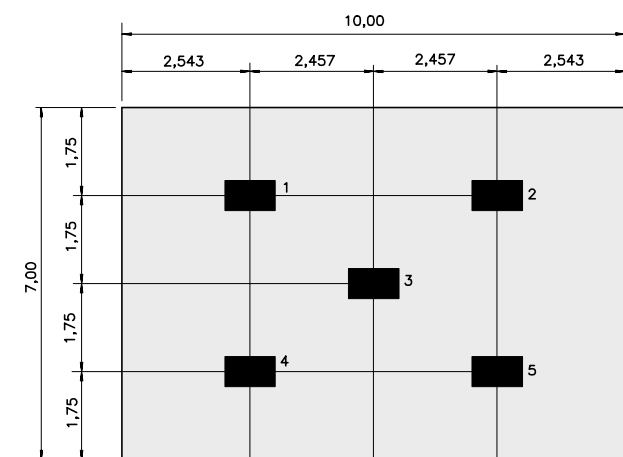
ENSAIOS PARA AS ÁREAS COM ESPESSURAS DE 0,80m
COM 4 PASSADAS



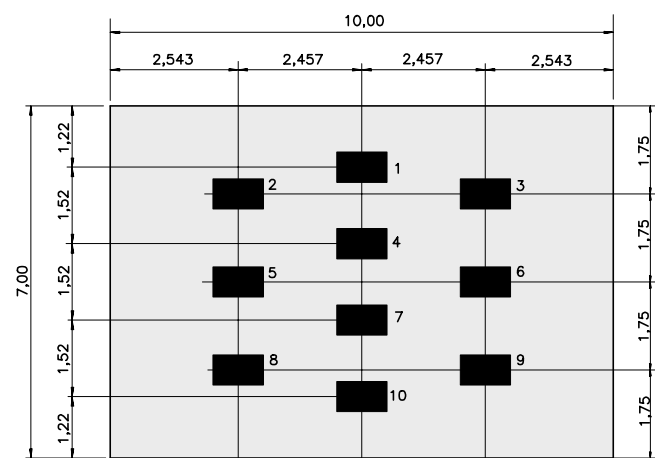
ENSAIOS PARA AS ÁREAS COM ESPESSURAS DE 0,40m
COM 6 PASSADAS



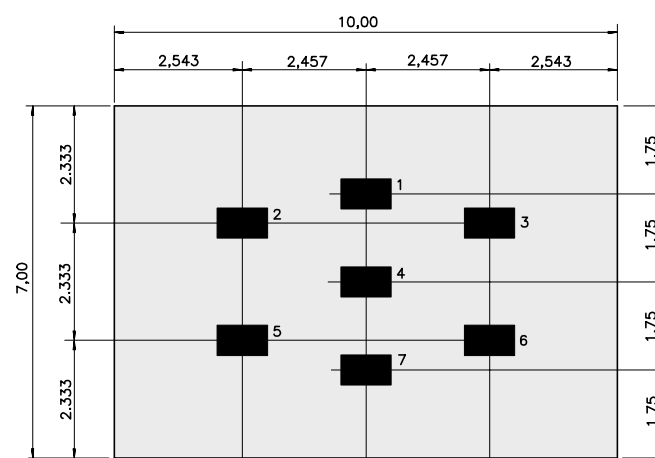
ENSAIOS PARA AS ÁREAS COM ESPESSURAS DE 0,60m
COM 6 PASSADAS



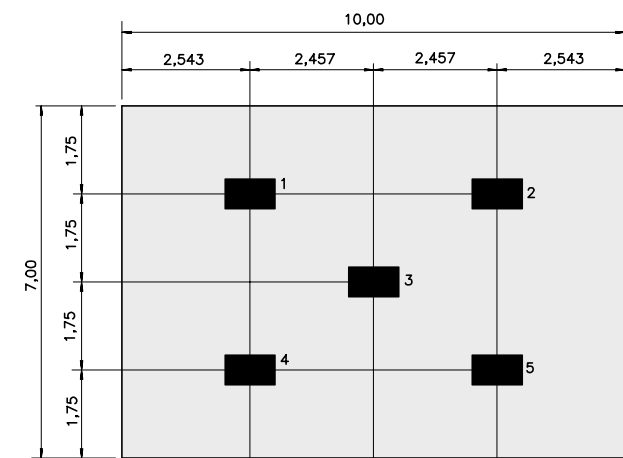
ENSAIOS PARA AS ÁREAS COM ESPESSURAS DE 0,80m
COM 6 PASSADAS



ENSAIOS PARA AS ÁREAS COM ESPESSURAS DE 0,40m
COM 8 PASSADAS



ENSAIOS PARA AS ÁREAS COM ESPESSURAS DE 0,60m
COM 8 PASSADAS



ENSAIOS PARA AS ÁREAS COM ESPESSURAS DE 0,80m
COM 8 PASSADAS

NOTAS:

- 1 - DIMENSÕES EM METRO.
- 2 - AS CAVAS DEVERÃO SER ESCAVADAS MANUALMENTE SEGUIDA DOS PROCEDIMENTOS INDICADOS NO DES. Nº 064-SSO-MOE-A1-E061 e E062.
- 3 - DEVERÃO SER INSTALADOS FILMES PLÁSTICOS ENTRE CAMADAS COMPACTADAS, DE MANEIRA QUE POSSA SER CARACTERIZADO "A POSTERIORI" OS PLANOS DE CONTATO PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS.
- 4 - OS ENSAIOS DEVERÃO SER EXECUTADOS EM TODAS AS CAMADAS PARA CADA PONTO INDICADO, DE MANEIRA A SEREM DETERMINADAS AS DENSIDADES DAS CAMADAS SUBJACENTES DEVIDO A COMPACTAÇÃO DAS SOBREJACENTES. (VIDE DES. Nº 064-SSO-MOE-A1-E062) TAL PROCEDIMENTO PODERÁ SER ALTERADO PELA FISCALIZAÇÃO EM FUNÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.

*APÊNDICE II***ATERRO EXPERIMENTAL: FICHAS DE CONTROLE
E ENSAIOS IN SITU**

Neste apêndice são apresentados os modelos de ficha de ensaio e de controle utilizados durante a execução do aterro experimental. No tocante as fichas de ensaio para determinação do peso específico in situ, as mesmas precisaram ser adequadas para contemplarem algumas adaptações e ajustes à metodologia inicialmente proposta, conforme descrito no item 3.6.2. Os modelos de ficha apresentados incluem:

- Planilha de controle para ensaio de quarteamento e composição gravimétrica.
- Planilha de controle para ensaio de peso específico in situ – plano horizontal (versão 1).
- Planilha de controle para ensaio de peso específico in situ – plano inclinado (versão 1).
- Planilha de controle para ensaio de peso específico in situ – plano horizontal e inclinado (versão 2).
- Planilha para ensaio de umidade.



PMSP-SSO/LIMPURB

ATERRO SANITÁRIO BANDEIRANTES – ATERRO EXPERIMENTAL

PLANILHA DE CONTROLE DE QUARTEAMENTO

GERAL	ENSAIO _____	HORA DE INÍCIO _____
	DATA _____	HORA DE TÉRMINO _____
	NÚM. QUARTEAMENTOS _____	TEMPO _____
	NÚM. PESSOAS _____	TÉCNICO _____
	ALTURA DO ATERRO(m) _____	ASSINATURA _____

COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS	GRUPOS	Tara (kgf)	Amostra + Tara (kgf)	Amostra (kgf)
	PLÁSTICO FILME (1)			
	PLÁSTICO DURO			
	VIDRO TRANSPARENTE			
	VIDRO ESCURO			
	SUCATA E LATAS DE FERRO			
	ALUMÍNIO			
	PAPELÃO			
	MATÉRIA ORGÂNICA			
	COURO, BORRACHA E MADEIRA (2)			
	MATERIAL DE COMPOSIÇÃO MISTA (3)			
	MATERIAL CONTAMINADO (4)			
	TRAPOS (5)			
PESO TOTAL (kgf)				
<p>(1) Sacos de lixo, sacos de supermercado, plásticos para embalagens, etc.</p> <p>(2) Sapatos, colchões, tapetes, armários, etc.</p> <p>(3) Embalagens do tipo "tetra pak", papelão com papel alumínio, fraldas descartáveis, plástico com papel alumínio, etc.</p> <p>(4) Pilhas, filmes, lâmpadas fluorescentes, fitas, remédios, etc.</p> <p>(5) Estopa, roupas, tecidos, etc.</p>				

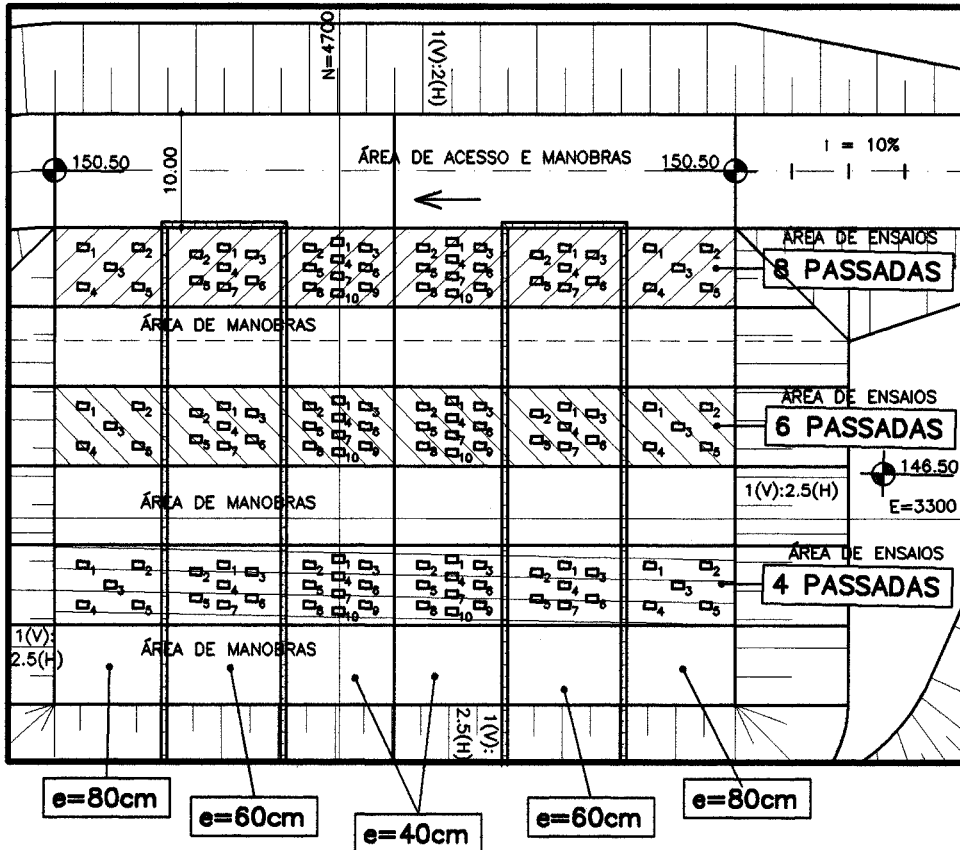
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE	AMOSTRA	P _t (kgf)	P _(u+t) (kgf)	P _(s+t) (kgf)	UMIDADE (%)
	1				
	2				
	3				
	4				
<p>P_t = PESO TARA</p> <p>P_(u+t) = PESO DA AMOSTRA ÚMIDA + TARA</p> <p>P_(s+t) = PESO DA AMOSTRA SECA + TARA</p> <p>Obs: Temperatura Máxima da Estufa = 60°C</p>					UMIDADE MÉDIA (%)

IDENTIFICAÇÃO DO COLETOR	ORIGEM/REGIONAL _____ EMPRESA _____ PLACA _____	OBSERVAÇÕES
---------------------------------	---	--------------------



PMSP-SSO/LIMPURB

ATERRO SANITÁRIO BANDEIRANTES - ATERRO EXPERIMENTAL
 PLANILHA DE CONTROLE DE PESO ESPECÍFICO E UMIDADE



ENSAIO: _____

Nº DE CAMADAS: _____

DATA: _____

TÉCNICO: _____

ASSINAT.: _____

LOCAÇÃO DO ENSAIO:

N = _____

E = _____

PESO ESPECÍFICO ÚMIDO (tf/m ³)	
--	--

PESO ESPECÍFICO SECO (tf/m ³)	
---	--

GERAL	Tempo: _____	Hora de Início: _____
		Hora de Término: _____

CARACTERÍSTICAS DA COMPACTAÇÃO	EQUIPAMENTO	<input type="checkbox"/> D6 <input type="checkbox"/> 816F	PLANO DE COMPACTAÇÃO	<input type="checkbox"/> Horizontal <input type="checkbox"/> Inclinado
	NÚMERO DE PASSADAS	<input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 8	ESPESSURA TEÓRICA DA CAMADA	<input type="checkbox"/> 0.40m <input type="checkbox"/> 0.60m <input type="checkbox"/> 0.80m

CARACTERÍSTICAS DA CAVA	Profundidade(cm): _____
	Comprimento(cm): _____
	Largura(cm): _____
	VOLUME(l): _____
	NÍVEL(m): Topo: _____ Fundo: _____

Peso Parcial	Tara (kgf)	Amostra + Tara (kgf)	Amostra (kgf)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
PESO TOTAL (kgf)			

AMOSTRA	P _t (kgf)	P _(u+t) (kgf)	P _(s+t) (kgf)	UMIDADE (%)
1				
2				
3				
4				

P_t = PESO TARA
 P_(u+t) = PESO DA AMOSTRA ÚMIDA + TARA
 P_(s+t) = PESO DA AMOSTRA SECA + TARA
 Obs: Temperatura Máxima da Estufa = 60°C

OBSERVAÇÕES



PMSP-SSO/LIMPURB

ATERRO SANITÁRIO BANDEIRANTES - ATERRO EXPERIMENTAL
 PLANILHA DE CONTROLE DE PESO ESPECÍFICO E UMIDADE

ENSAIO: _____

Nº DE CAMADAS: _____

DATA: _____

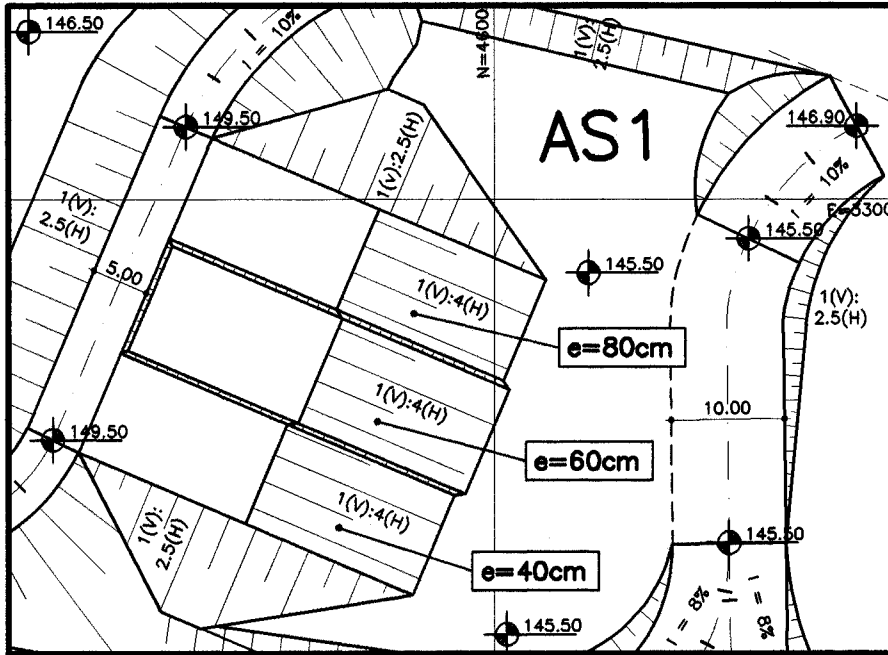
TÉCNICO: _____

ASSINAT.: _____

LOCAÇÃO DO ENSAIO:

N = _____

E = _____



PESO ESPECÍFICO ÚMIDO (tf/m ³)	
--	--

PESO ESPECÍFICO SECO (tf/m ³)	
---	--

GERAL	Tempo: _____	Hora de Início: _____
		Hora de Término: _____

CARACTERÍSTICAS DA COMPACTAÇÃO	EQUIPAMENTO	<input type="checkbox"/> D6 <input type="checkbox"/> 816F	PLANO DE COMPACTAÇÃO	<input type="checkbox"/> Horizontal <input type="checkbox"/> Inclinado
	NÚMERO DE PASSADAS	<input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 8	ESPESSURA TEÓRICA DA CAMADA	<input type="checkbox"/> 0.40m <input type="checkbox"/> 0.60m <input type="checkbox"/> 0.80m

CARACTERÍSTICAS DA CAVA	Profundidade(cm): _____
	Comprimento(cm): _____
	Largura(cm): _____
	VOLUME(l): _____
	NÍVEL(m): Topo: _____ Fundo: _____

Peso Parcial	Tara (kgf)	Amostra + Tara (kgf)	Amostra (kgf)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
PESO TOTAL (kgf)			

AMOSTRA	P _t (kgf)	P _(u+t) (kgf)	P _(s+t) (kgf)	UMIDADE (%)
1				
2				
3				
4				

P_t = PESO TARA
 P_(u+t) = PESO DA AMOSTRA ÚMIDA + TARA
 P_(s+t) = PESO DA AMOSTRA SECA + TARA
 Obs: Temperatura Máxima da Estufa = 60°C

OBSERVAÇÕES



PMSP-SSO/LIMPURB

ATERRO SANITÁRIO BANDEIRANTES – ATERRO EXPERIMENTAL

PLANILHA DE CONTROLE DE PESO ESPECÍFICO

DATA: _____ ENSAIO: _____

GERAL	Etapa: _____ Técnico: _____ Assinat.: _____	Tempo: _____ Hora de Início: _____ Hora de Término: _____
--------------	---	---

CARACTERÍSTICAS DA COMPACTAÇÃO	EQUIPAMENTO <input type="checkbox"/> D6 <input type="checkbox"/> 816F	PLANO DE COMPACTAÇÃO <input type="checkbox"/> Horizontal <input type="checkbox"/> Inclinado
	NÚMERO DE PASSADAS <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 8	ESPESSURA TEÓRICA DA CAMADA <input type="checkbox"/> 0.40m <input type="checkbox"/> 0.60m <input type="checkbox"/> 0.80m

VOLUMES – PRIMEIRA MEDIÇÃO	
① Vi: _____ Vf: _____	② Vi: _____ Vf: _____
③ Vi: _____ Vf: _____	④ Vi: _____ Vf: _____
 PROFUNDIDADES TOTAIS	 COMPRIMENTOS
 DIFERENÇA DE ALTURA	 LARGURAS

Peso Parcial	Tara (kgf)	Amostra + Tara (kgf)	Amostra (kgf)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
PESO TOTAL (kgf)			

VOLUMES – TERCEIRA MEDIÇÃO	
① Vi: _____ Vf: _____	② Vi: _____ Vf: _____
③ Vi: _____ Vf: _____	④ Vi: _____ Vf: _____
 PROFUNDIDADES TOTAIS	 COMPRIMENTOS
 DIFERENÇA DE ALTURA	 LARGURAS

VOLUMES – SEGUNDA MEDIÇÃO	
① Vi: _____ Vf: _____	② Vi: _____ Vf: _____
③ Vi: _____ Vf: _____	④ Vi: _____ Vf: _____
 PROFUNDIDADES TOTAIS	 COMPRIMENTOS
 DIFERENÇA DE ALTURA	 LARGURAS

PESO ESPECÍFICO ÚMIDO (tf/m ³)	
--	--

**ATERRO SANITÁRIO BANDEIRANTES
 ATERRO EXPERIMENTAL
 ENSAIO DE UMIDADE**

data			
horário			

ENSAIO					
Amostras	Recipiente	Tara (g)	Peso Total (g)	P. Seco+Tara (g)	P. Seco+Tara (g)

ENSAIO					
Amostras	Recipiente	Tara (g)	Peso Total (g)	P. Seco+Tara (g)	P. Seco+Tara (g)

ENSAIO					
Amostras	Recipiente	Tara (g)	Peso Total (g)	P. Seco+Tara (g)	P. Seco+Tara (g)

ENSAIO					
Amostras	Recipiente	Tara (g)	Peso Total (g)	P. Seco+Tara (g)	P. Seco+Tara (g)

ENSAIO					
Amostras	Recipiente	Tara (g)	Peso Total (g)	P. Seco+Tara (g)	P. Seco+Tara (g)

ENSAIO					
Amostras	Recipiente	Tara (g)	Peso Total (g)	P. Seco+Tara (g)	P. Seco+Tara (g)

APÊNDICE III

**ATERRO EXPERIMENTAL: DADOS
CLIMATOLÓGICOS – PRECIPITAÇÃO, TEMPERATURA,
EVAPOTRANSPIRAÇÃO, UMIDADE RELATIVA,
VELOCIDADE DOS VENTOS E INSOLAÇÃO**

Os dados climatológicos utilizados para avaliação dos líquidos percolados no aterro experimental referem-se a estação São Paulo (Mirante de Santana) operada pelo INMET, sob o código 2346117. Tais dados envolvem registros de temperatura, evapotranspiração, umidade relativa, velocidade média dos ventos e insolação, sendo estas últimas utilizadas para o cálculo da radiação solar, conforme metodologia apresentada no item 4.8. Para as precipitações foram utilizados os valores observados no pluviômetro instalado no Aterro Sanitário Bandeirantes. Os dados climatológicos apresentados incluem:

- Precipitação: dados diários no período de Fev/97 a Abr/00.
- Temperatura média compensada: dados diários no período de Jan/97 a Abr/00.
- Evapotranspiração potencial: dados mensais no período de Jul/97 a Abr/00.
- Umidade relativa: dados mensais no período de Jul/97 a Abr/00.
- Velocidade média dos ventos: dados mensais no período de Jan/97 a Set/00.
- Insolação: dados diários no período de Jul/97 a Abr/00.
- Radiação solar: dados diários calculados para o período de Jul/97 a Abr/00.

DADOS DIÁRIOS DE PRECIPITAÇÃO DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DO ATERRO BANDEIRANTES - SÃO PAULO (SP)

ANO	MÊS	DIAS																																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31				
1997	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
1997	2	16.8	0.0	14.7	0.0	0.0	15.1	0.0	0.0	0.0	38.8	0.0	37.9	20.0	20.0	12.5	2.3	43.8	14.6	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	0.0	0.0	0.0				
1997	3	0.0	0.0	19.9	0.0	5.4	0.9	0.0	21.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
1997	4	9.8	0.6	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	20.4	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
1997	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
1997	6	5.1	0.0	0.0	4.7	42.0	12.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.2	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
1997	7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
1997	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
1997	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
1997	10	0.0	27.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5		
1997	11	0.0	0.0	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
1997	12	10.2	0.0	11.3	2.8	28.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
1998	1	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.3	5.3	0.0	2.3	0.0	5.4	0.0	0.0	14.0	4.7	0.0	0.0	19.7	5.7	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
1998	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
1998	3	10.7	0.0	6.2	4.8	38.6	0.9	4.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0		
1998	4	0.0	0.5	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
1998	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1998	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1998	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1998	8	0.0	0.0	3.6	0.0	0.7	2.7	0.0	0.0	0.0	2.3	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1998	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1998	10	6.9	0.0	0.0	13.8	11.5	1.6	0.0	0.0	50.9	58.7	0.0	0.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	8.5	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	
1998	11	0.0	0.0	0.0	13.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1998	12	0.0	0.0	0.0	0.0	29.6	45.5	0.0	0.0	0.0	45.5	33.6	13.5	13.8	0.0	0.9	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1999	1	0.0	12.6	2.5	0.0	2.0	47.3	21.6	26.7	13.6	23.0	0.3	1.2	1.4	3.0	46.5	8.3	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1999	2	3.0	34.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1999	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1999	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1999	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1999	6	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1999	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1999	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1999	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1999	10	1.8	3.0	2.8	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	9.4	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1999	11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1999	12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	1	8.5	55.3	13.9	48.0	9.6	11.5	0.0	28.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	2	14.5	12.7	0.0	0.0	36.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	3	18.0	18.2	0.0	4.0	0.0	14.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	4	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

i = dias incompletos
f = dias faltantes

DADOS DIÁRIOS DE TEMPERATURA MÉDIA COMPENSADA DA ESTAÇÃO DE SÃO PAULO - SP (MIRANTE DE SANTANA)

ESTAÇÃO	ANO	DIAS																															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
83781	1997	1	22.5	21.5	20.4	20.6	21.4	22.8	23.9	24.6	23.4	21.8	21.8	22.7	23.3	23.6	23.8	22.5	21.8	22.2	24.7	24.6	23.0	22.7	22.2	21.8	22.4	21.2	20.8	21.4	23.6	24.5	22.8
83781	1997	2	24.6	21.6	23.3	25.4	25.2	23.9	23.8	24.1	22.4	23.1	23.5	22.5	22.4	0.0f	22.4	21.0	21.9	22.2	24.7	24.9	22.8	24.5	24.3	23.0	23.4	22.9	21.4	0.0f	0.0f	0.0f	
83781	1997	3	21.2	20.9	21.2	21.8	22.8	23.7	24.1	23.9	22.9	23.1	23.8	25.1	24.2	22.6	20.6	19.9	20.1	19.9	20.7	21.5	20.7	20.6	21.2	20.9	20.8	20.2	20.0	18.9	19.1	18.3	19.0
83781	1997	4	21.6	21.8	22.1	24.5	17.9	16.8	17.6	17.6	18.1	18.2	18.9	20.1	21.0	21.1	20.6	21.8	20.4	20.9	22.2	22.1	19.3	19.8	19.1	20.8	22.1	18.8	19.7	21.5	20.1	19.9	0.0f
83781	1997	5	20.4	23.0	21.6	18.9	19.6	19.0	18.2	19.7	19.1	18.6	18.4	19.6	18.1	16.5	15.9	16.9	17.3	18.3	18.6	20.0	20.3	18.3	16.5	16.0	14.8	14.8	16.8	16.3	15.2	13.5	12.8
83781	1997	6	12.2	12.6	13.7	15.7	15.6	16.5	15.4	10.2	12.6	14.0	16.4	17.0	19.1	17.1	16.7	15.7	15.2	14.9	19.6	16.4	21.2	21.6	21.6	21.5	20.8	20.7	17.1	15.5	15.1	14.7	0.0f
83781	1997	7	13.7	18.4	20.2	20.7	16.1	18.6	17.9	17.9	18.3	19.4	19.9	19.7	21.6	18.6	17.4	19.9	19.2	15.4	16.3	15.1	15.6	15.9	15.8	17.2	19.0	19.8	17.2	19.0	19.8	19.5	21.2
83781	1997	8	21.6	20.7	21.2	18.7	14.3	17.7	21.1	14.2	11.8	11.5	14.2	16.5	15.9	16.9	19.6	20.7	21.3	21.9	22.5	23.3	19.2	19.2	18.0	17.4	16.0	16.8	18.1	19.8	19.2	18.4	21.3
83781	1997	9	22.2	21.5	22.4	24.5	22.0	18.9	20.1	22.7	27.6	19.8	14.6	16.7	23.9	22.7	16.7	16.1	18.8	16.3	18.3	17.1	17.8	16.2	16.9	22.0	18.0	16.1	16.9	21.8	20.4	19.5	0.0f
83781	1997	10	20.1	18.6	15.1	19.1	24.4	19.0	16.0	17.7	22.3	24.9	23.5	22.9	23.0	21.8	25.1	19.7	15.3	16.2	17.3	17.4	18.2	17.9	18.4	22.5	21.1	20.0	20.9	24.6	24.3	22.0	23.4
83781	1997	11	24.2	26.1	24.1	20.7	23.1	24.7	23.7	22.5	25.4	25.7	27.2	27.1	25.5	21.1	18.4	20.3	21.0	19.0	18.2	20.2	24.2	23.3	23.8	23.6	21.5	21.2	22.5	17.9	18.7	19.8	0.0f
83781	1997	12	21.9	20.5	23.4	20.3	23.0	23.4	23.0	22.9	22.4	22.1	22.0	24.0	23.7	23.3	23.4	20.9	19.2	21.1	24.6	24.8	27.1	28.6	26.3	25.3	27.0	27.8	24.8	25.6	28.4	25.4	
83781	1998	1	25.8	27.0	25.5	25.4	24.9	0.0f	0.0f	18.8	0.0f	19.4	0.0f	25.8	24.3	0.0f	0.0f	23.1	23.1	24.3	0.0f	24.1	0.0f	0.0f	26.1	25.4	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	28.6
83781	1998	2	28.0	26.7	23.6	26.0	24.8	25.2	27.2	24.3	27.1	26.6	21.2	18.1	18.3	21.4	21.8	20.3	21.7	25.0	25.1	24.3	24.9	24.5	23.7	24.5	23.9	25.3	24.7	0.0f	0.0f	0.0f	
83781	1998	3	25.4	25.3	24.2	22.6	24.2	24.8	24.9	25.4	24.6	27.0	23.9	23.6	23.8	23.1	19.7	18.8	20.0	20.9	24.5	25.0	23.6	23.9	22.9	23.8	21.8	19.5	18.8	22.8	22.5	23.4	23.0
83781	1998	4	20.6	17.9	17.1	17.0	17.2	20.0	21.1	23.0	22.0	21.0	22.9	23.3	23.5	24.0	25.5	25.3	23.0	20.9	18.9	19.2	21.6	24.8	25.1	24.4	21.1	19.0	20.8	20.3	20.3	17.3	0.0f
83781	1998	5	16.4	17.6	16.1	16.3	16.3	16.0	15.6	16.5	17.9	18.8	20.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
83781	1998	6	14.8	15.5	15.2	14.4	14.0	16.2	16.8	16.8	16.8	19.2	20.1	15.1	14.8	16.4	16.0	17.0	20.2	19.2	16.4	14.4	13.9	15.1	18.6	17.2	12.5	13.3	14.8	15.3	16.4	16.2	15.1
83781	1998	7	18.2	18.5	16.9	16.0	16.8	17.4	19.1	18.5	13.3	11.9	12.5	12.2	13.3	14.0	15.8	15.4	16.3	17.2	15.8	17.2	21.6	17.7	17.7	18.1	19.8	20.5	20.0	21.9	18.1	14.3	17.1
83781	1998	8	19.6	17.4	17.5	17.4	18.1	16.3	16.5	17.6	17.8	18.7	20.7	21.7	22.1	21.4	24.9	19.5	20.3	21.8	20.7	21.2	20.0	18.0	20.5	23.4	24.3	24.0	22.9	16.6	17.1	14.0	15.7
83781	1998	9	17.4	19.5	22.5	22.5	19.2	17.6	18.8	18.3	15.7	16.1	22.5	25.6	21.6	18.0	17.7	18.0	22.7	23.0	17.3	16.5	15.8	15.2	15.3	17.4	19.4	20.2	22.0	19.6	18.0	16.7	0.0f
83781	1998	10	16.6	17.1	18.8	21.5	19.1	20.6	18.2	19.5	17.4	17.2	17.7	19.8	18.5	18.6	19.0	20.5	19.4	16.5	17.7	19.2	20.0	21.3	24.3	19.7	18.7	19.3	20.9	20.9	20.2	17.3	17.6
83781	1998	11	17.9	16.0	15.8	18.3	22.2	22.2	24.9	21.6	19.7	17.8	16.4	18.1	19.2	19.6	19.9	24.7	26.9	21.7	17.9	17.9	18.2	18.1	18.9	22.1	26.4	24.5	19.1	21.1	22.6	21.7	0.0f
83781	1998	12	21.3	24.7	25.5	22.4	21.7	21.2	22.1	24.8	25.7	22.5	22.8	24.0	24.0	25.3	22.4	23.4	22.4	23.0	21.8	22.4	26.6	24.0	19.1	19.0	19.5	21.6	21.3	24.3	23.7	24.4	24.7
83781	1999	1	22.9	21.9	23.7	24.5	23.3	20.2	20.0	22.5	23.1	23.0	22.8	22.0	21.2	22.6	22.3	23.3	23.7	25.4	28.2	28.4	27.2	24.5	24.3	25.3	25.2	24.6	22.5	24.0	25.7	24.1	23.1
83781	1999	2	23.7	24.2	24.4	23.6	24.2	24.2	26.5	23.4	23.2	22.6	23.8	23.5	23.9	25.3	23.6	24.3	25.4	25.3	23.7	23.4	23.2	21.4	22.2	23.3	23.0	23.1	22.3	23.0	0.0f	0.0f	0.0f
83781	1999	3	22.0	23.2	22.9	22.4	22.7	22.5	24.2	24.3	25.2	25.3	22.0	20.4	20.1	18.9	20.6	21.9	21.8	21.9	22.7	24.4	24.9	23.3	21.8	23.0	25.4	24.4	24.7	26.8	27.0	24.9	22.8
83781	1999	4	24.5	26.3	25.4	23.1	23.4	23.3	21.8	21.0	19.3	18.4	19.1	21.6	22.3	21.5	21.8	19.0	15.7	15.6	16.6	18.8	19.6	19.9	18.9	18.7	18.8	18.2	18.4	19.5	20.4	0.0f	0.0f
83781	1999	5	19.7	19.0	19.6	20.6	22.2	19.7	18.2	17.5	17.8	17.7	18.1	18.3	15.6	14.6	14.9	15.5	17.4	17.6	19.2	13.9	14.1	13.9	15.2	16.6	16.0	16.9	18.4	17.4	21.6	16.3	12.0
83781	1999	6	14.3	14.9	18.5	16.4	15.9	13.8	14.8	16.4	18.7	19.8	16.1	18.1	16.6	15.3	16.7	17.2	16.3	16.1	15.6	15.0	15.7	14.9	15.4	15.8	17.9	17.4	18.3	19.6	20.9	14.8	0.0f
83781	1999	7	14.2	17.6	21.3	17.1	13.4	15.1	15.9	16.1	14.6	14.5	15.8	15.1	15.6	17.7	20.0	20.9	18.7	16.7	19.0	21.3	20.2	15.4	16.0	17.6	17.9	19.8	20.6	17.1	17.9	20.0	13.1
83781	1999	8	13.8	15.6	15.2	15.9	17.0	19.0	21.1	15.5	15.9	18.4	20.3	21.3	19.6	11.6	7.8	10.4	12.5	14.7	16.2	17.3	19.1	20.6	17.8	16.7	19.2	20.9	18.9	17.7	20.8	19.8	22.6
83781	1999	9	23.9	25.2	22.4	22.0	19.9	22.9	26.0	26.4	18.7	14.3	14.7	15.1	17.7	20.2	17.5	15.4	16.1	18.0	18.1	18.2	20.0	15.8	13.0	12.4	14.3	16.5	16.6	20.9	20.8	17.6	0.0f
83781	1999	10	24.3	19.5	13.3	11.9	14.2	16.0	18.0	20.0	17.7	15.3	15.8	17.3	20.4	20.5	24.8	21.4	20.8	18.0	16.2	16.5	16.8	18.2	17.0	16.6	16.3	16.6	18.0	19.7	20.1	18.4	16.4
83781	1999	11	17.0	19.7	22.3	24.3	20.1	16.6	18.7	23.0	16.5	12.6	16.0	16.8	16.2	17.2	15.8	15.5	16.4	16.8	16.7	16.4	20.2	21.0	21.2	22.0	24.0	21.2	22.6	20.2	20.1	19.0	0.0f
83781	1999	12	20.6	21.7	23.8	23.9	23.9	21.8	20.4	22.1	21.3	20.1	19.6	19.5	19.5	21.7	24.0	23.2	22.0	21.4	24.2	23.7	23.1	23.6	20.5	21.6	21.4	21.7	23.4	23.4	24.4	24.8	
83781	2000	1	21.4	18.8	19.5	20.8	21.2	22.4	22.8	22.7	24.0	24.4	26.0	24.4	24.9	25.6	24.8	24.5	25.5	25.5	21.4	23.0	22.0	23.9	22.7	22.9	24.9	20.0	19.2	18.5	19.0	21.3	23.1
83781	2000	2	22.8	23.0	24.6	23.8	22.4	21.6	20.6	20.9	22.3	21.8	21.6	21.6	20.9	23.5	24.9	20.7	17.5	18.2	19.3	23.3	22.2	23.8	24.4	23.5	23.8	26.4	24.1	23.5	20.4	0.0f	0.0f
83781	2000	3	23.6	23.6	23.0	24.9	25.3	26.3	21.2	17.9	19.1	20.1	19.5	19.0	19.3	20.1	20.7	22.6	23.3	22.3	19.8	19.4	21.0	20.6	22.1	23.7	21.6	21.3	23.1	21.7	1		

DADOS MENSAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (PET)

ESTAÇÃO: São Paulo - SP (Mirante de Santana)

Latitude: 23:30S Longitude: 46:37 W Altitude: 792 metros

ANO	MÊS	PET (mm)	ANO	MÊS	PET (mm)
1997	7	61.0	1998	12	116.6
1997	8	64.6	1999	1	124.3
1997	9	76.6	1999	2	108.2
1997	10	89.1	1999	3	108.3
1997	11	103.9	1999	4	69.1
1997	12	127.6	1999	5	56.4
1998	1	133.5	1999	6	48.8
1998	2	111.7	1999	7	55.3
1998	3	109.2	1999	8	57.4
1998	4	83.6	1999	9	68.0
1998	5	57.6	1999	10	69.4
1998	6	46.0	1999	11	77.8
1998	7	52.3	1999	12	112.7
1998	8	74.4	2000	1	114.4
1998	9	70.1	2000	2	97.1
1998	10	78.5	2000	3	94.4
1998	11	89.1	2000	4	79.1

DADOS DE UMIDADE RELATIVA (%)																				
ESTAÇÃO DE SÃO PAULO (MIRANTE DA SANTANA)																				
ESTAÇÃO	ANO	MÊS																		
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez							
83781	1997																			
83781	1998	0.0f	77.30	75.00	72.70	72.90	72.30	72.50	71.90	67.80	63.80	67.10	74.00	75.60	75.60	73.80	69.60			
83781	1999	78.90	77.40	74.10	71.90	69.30	77.20	73.50	64.90	67.90	67.90	73.50	75.50	69.50	69.50	71.10				
83781	2000	76.40	79.20	77.80	68.80															
Média mensal		77.65	77.97	75.63	71.13	71.10	74.75	71.03	66.87	70.77	66.87	71.03	76.07	72.73	72.73	71.50				
Média trimestral			77.08			72.33			69.56					73.43						
i = dados incompletos																				
f = dados faltantes																				

DADOS DE VELOCIDADE MÉDIA DOS VENTOS (m/s) BASEADO NA MÉDIA OCORRIDA NOS PRIMEIROS DEZ MINUTOS ANTES DA OBSERVAÇÃO ESTAÇÃO DE SAO PAULO - SP (MIRANTE DE SANTANA)													
ESTAÇÃO	ANO	MÊS											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
83781	1997	6.00	5.0i	5.80	6.10	6.60	7.00	6.30	5.50	8.30	6.60	6.30	6.60
83781	1998	0.0f	5.00	6.60	5.80	7.00	7.50	5.30	8.30	8.30	7.60	6.80	6.60
83781	1999	5.00	7.80	6.10	5.60	6.60	9.60	5.30	6.60	9.50	6.60	7.80	8.50
83781	2000	5.60	7.80	7.30	5.80	6.00	8.30	8.80	6.00	9.60	0.0f	0.0f	0.0f
Média mensal		5.53	6.87	6.45	5.83	6.55	8.10	6.43	6.60	8.93	6.93	6.97	7.23
Média anual		6.87											
i = dados incompletos													
f = dados faltantes													

DADOS DIÁRIOS DE INSOLAÇÃO (HORAS DE SOL) DA ESTAÇÃO DE SÃO PAULO - SP (MIRANTE DE SANTANA)																																		
ESTACAD	ANO	MÊS	DIAS																															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
63075	1997	7	0.0	6.9	7.8	5.6	5.6	6.8	2.3	6.7	5.3	8.5	7.6	3.6	7.9	8.3	8.6	8.2	0.8	4.4	8.7	8.5	0.0	8.7	4.3	1.4	5.8	8.8	7.2	9.0	9.2	7.3	8.2	
63075	1997	8	9.4	8.8	0.0	0.0	0.0	6.7	9.1	0.0	2.3	6.8	8.7	7.0	7.9	8.9	8.6	9.5	9.6	9.6	9.5	7.5	0.0	5.1	0.0	1.2	4.2	7.1	8.0	9.4	9.3	6.2	9.2	
63075	1997	9	9.1	9.0	6.7	9.0	1.5	4.9	8.7	8.8	8.5	0.0	0.0	5.9	8.0	1.4	0.0	7.2	6.7	0.0f	6.0	0.2	0.0	1.2	1.1	2.3	8.5	1.0	0.0	0.0	7.2	0.0	0.0f	
63781	1997	10	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	0.0f	
63781	1997	11	6.7	9.1	5.8	0.1	7.9	5.5	4.2	7.2	10.9	10.6	8.9	4.5	4.5	1.4	0.0	0.5	0.0	0.0	0.1	5.1	8.9	7.4	3.7	6.5	0.7	3.0	10.8	9.3	8.0	4.0	3.7	
63781	1997	12	0.3	2.8	8.8	0.7	8.9	10.9	3.8	8.7	6.5	11.6	6.6	7.4	4.6	9.2	5.4	4.2	3.2	2.7	9.6	12.1	10.0	11.8	12.2	9.5	9.5	7.9	11.4	7.7	0.0f	11.5	6.9	
63781	1998	1	9.4	8.1	7.2	5.9	6.7	9.0	3.3	0.0	0.0	0.3	8.9	10.4	3.9	6.7	6.7	3.8	7.3	10.4	10.4	7.8	9.9	10.4	8.2	8.5	0.0f	10.5	0.0f	8.6	1.8	10.8	10.8	
63781	1998	2	9.7	8.6	2.9	8.7	8.2	7.2	7.4	0.8	7.5	5.4	0.0	0.0	0.0	2.5	2.7	0.0	5.2	11.4	9.6	7.2	9.0	4.1	0.0	0.0	0.0	3.6	6.4	0.0	0.0f	0.0f	0.0f	
63781	1998	3	3.3	7.7	6.2	4.7	4.6	8.2	9.5	7.8	7.7	9.8	2.9	4.1	4.7	0.0f	0.3	0.1	3.4	0.6	7.6	9.6	2.3	3.9	5.7	0.0	1.7	6.3	0.3	5.3	6.1	0.0	1.8	
63781	1998	4	1.0	1.7	8.5	5.3	3.1	8.9	2.2	5.0	2.1	0.7	8.6	7.5	8.5	8.4	9.6	7.4	2.6	2.7	10.8	10.3	8.0	9.2	8.2	2.7	0.7	0.0	2.8	0.7	2.3	10.4	0.0f	
63781	1998	5	10.2	10.3	0.0	0.0	3.6	3.1	0.8	9.3	8.9	10.4	10.3	8.0	5.7	1.4	1.0	0.0f	9.8	0.4	5.2	5.5	3.8	6.5	6.4	3.4	4.6	5.5	2.1	4.3	0.0	0.0	6.8	
63781	1998	6	8.3	5.5	1.3	3.1	8.4	9.0	9.4	7.2	7.1	8.4	3.2	1.0	3.6	6.0	4.7	3.0	6.1	6.0	2.8	3.3	4.9	6.5	7.6	0.2	3.1	7.9	4.5	2.8	3.2	3.4	0.0f	
63781	1998	7	8.3	6.6	0.0	1.4	4.5	7.0	7.2	6.3	0.0	1.8	0.3	0.1	3.4	2.4	7.4	5.9	7.8	9.4	0.0	3.0	8.9	1.1	4.4	4.6	5.3	5.8	8.9	6.3	5.8	0.0	5.6	
63781	1998	8	8.0	3.0	9.4	5.6	2.2	1.7	1.5	2.5	0.0	4.0	8.9	8.0	4.4	3.0	10.3	3.3	6.6	7.8	1.8	9.3	8.1	0.0	6.6	8.8	9.6	9.3	6.8	3.3	0.0	0.0	4.3	
63781	1998	9	7.3	8.6	9.2	1.4	1.6	0.1	0.1	0.4	0.0	0.2	10.3	5.4	0.0	0.0	2.8	8.1	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	3.5	5.9	9.8	5.1	7.0	1.1	0.0	0.0	0.0f
63781	1998	10	0.6	0.0	4.8	9.0	0.0	7.6	0.0	2.9	0.0	10.4	0.6	2.1	0.4	3.0	7.3	0.0	0.0	0.1	7.6	8.6	9.1	9.8	11.1	0.0	0.9	0.0	0.6	2.8	0.0	0.1	1.6	
63781	1998	11	1.8	0.0	0.0	2.6	7.7	9.2	10.4	4.5	5.7	0.0	6.1	1.3	8.5	8.7	10.7	9.0	2.9	0.1	0.3	2.2	1.0	8.0	10.2	11.8	4.7	0.0	5.5	9.1	9.8	0.0f	0.0f	
63781	1998	12	10.7	7.7	11.7	4.8	0.0	2.4	7.2	10.8	6.9	2.0	0.1	5.4	9.9	6.0	0.3	4.1	1.5	11.6	9.4	7.1	8.9	1.6	11.2	0.0	0.0	1.7	3.2	11.2	1.3	6.7	9.7	
63781	1999	1	2.4	0.5	4.9	1.7	0.9	0.0	0.0	1.4	3.0	2.8	1.9	0.9	0.0	3.3	1.2	2.0	3.8	7.0	11.3	9.6	5.4	8.0	6.4	7.1	6.7	6.2	0.9	6.6	5.1	4.2	1.5	
63781	1999	2	2.4	2.1	2.4	4.8	6.1	6.1	11.6	0.8	0.1	2.3	8.2	9.5	6.0	6.0	0.5	5.5	7.5	6.9	4.8	2.7	5.3	1.6	5.3	6.9	4.0	2.2	0.2	6.9	0.0f	0.0f	0.0f	
63781	1999	3	4.7	6.5	8.8	9.3	7.3	6.3	8.0	9.1	8.8	6.0	0.8	0.0	9.9	2.8	9.6	0.0f	8.1	9.1	9.1	9.3	9.9	1.3	0.6	3.3	10.8	5.7	7.2	10.0	7.7	7.0	2.7	
63781	1999	4	8.0	10.0	6.5	6.2	8.4	6.0	7.0	4.3	0.2	3.3	8.4	6.3	2.0	7.8	2.8	0.9	4.9	10.6	8.9	9.2	3.2	3.0	7.6	6.7	8.3	9.1	2.5	5.1	7.9	8.4	0.0f	
63781	1999	5	8.3	8.6	7.6	8.2	8.4	0.3	5.3	6.4	7.9	8.3	4.2	6.3	0.0	5.4	5.4	8.2	8.8	8.3	8.7	10.1	5.7	9.2	6.8	8.7	4.0	2.4	1.1	0.0	4.5	9.7	0.2	
63781	1999	6	9.5	8.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	2.0	7.7	3.9	0.0	5.7	3.1	0.0	2.6	5.2	8.0	5.0	0.0	0.0	8.2	1.2	5.6	6.8	7.4	4.3	7.1	8.1	7.4	1.8	0.0f	
63781	1999	7	7.4	6.4	5.9	0.0	0.0	0.3	0.0	1.7	5.5	8.8	4.8	9.7	8.3	9.2	9.1	9.6	8.8	0.0	6.8	9.5	5.4	2.2	2.8	4.9	7.1	9.9	9.4	0.0	7.5	7.3	0.0	
63781	1999	8	3.8	4.8	8.2	9.6	6.4	10.1	9.7	0.0	7.2	8.5	9.5	9.2	8.9	0.0	0.3	6.0	5.8	7.3	1.3	9.4	9.2	8.6	7.8	8.3	8.5	9.6	7.8	8.2	3.9	7.0	7.4	
63781	1999	9	9.7	9.6	8.7	9.2	7.0	4.4	6.8	1.3	0.6	0.0	0.0	0.3	5.6	5.4	0.0	9.0	1.2	8.4	5.8	5.8	6.6	6.0	5.9	8.4	8.6	10.1	9.7	10.1	5.0	4.7	0.0f	
63781	1999	10	8.4	0.0	0.0	0.0	0.7	5.3	8.1	3.5	10.6	3.2	0.5	4.6	7.9	8.2	6.4	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.7	8.5	11.7	9.1	2.1	0.0	2.9	4.7	6.9	4.9	8.9
63781	1999	11	11.5	7.5	6.4	4.0	0.1	3.0	11.5	9.7	0.0	0.0	6.4	0.1	0.0	8.3	0.5	5.8	10.3	6.6	3.1	6.5	1.8	9.1	9.3	10.9	10.3	3.3	10.0	10.0	9.2	2.5	0.0f	
63781	1999	12	9.8	8.0	6.2	11.2	11.2	4.8	2.3	4.2	0.3	0.3	0.0	0.4	0.0	1.9	11.7	11.8	12.0	11.4	7.8	11.9	11.5	8.7	2.6	4.0	6.2	5.2	4.7	8.0	8.5	10.6	5.4	
63781	2000	1	0.1	0.0	0.3	0.1	0.0	2.7	5.8	7.1	6.9	10.1	9.8	7.1	8.7	8.8	6.3	3.8	7.6	8.0	0.4	6.0	6.4	10.8	11.4	4.3	8.2	0.0	2.2	9.6	2.4	5.5	2.7	
63781	2000	2	3.6	8.6	6.3	2.9	4.1	3.8	2.3	0.4	2.8	0.3	0.1	0.5	0.0	5.4	7.4	0.1	0.0	2.0	5.0	5.1	10.4	8.7	7.1	6.7	8.4	7.6	5.5	7.3	6.1	0.0f	0.0f	
63781	2000	3	7.3	9.2	6.8	9.6	10.3	9.4	0.1	0.8	6.7	4.1	0.0	0.9	8.0	7.4	1.6	3.5	5.0	3.3	1.9	0.0	1.4	0.1	0.5	7.4	5.8	2.9	1.3	1.3	0.0	1.1	7.5	
63781	2000	4	4.4	0.6	0.0	7.9	8.7	7.6	8.8	6.0	6.8	7.9	10.1	10.3	9.7	8.0	6.2	9.5	4.9	2.3	2.2	10.0	10.4	6.3	8.2	7.7	10.3	7.8	10.0	10.1	9.4	10.1	0.0f	

Obs: os dados claros do período Jul97 a Set97 referem-se a Estação Guarulhos - SP (INMET)
i = dados incompletos
f = dados faltantes

RADIAÇÃO SOLAR (Sn) - cálculo baseado no número de horas de sol (n)

Latitude		-23.5	ao		0.25												
Longitude		46.374		66		0.70											
Dia juliano	d'	r _p	w ₁	H	S ₀	n	1997		1998		1999		2000				
							S ₀	S ₀	n	S ₀	S ₀	n	S ₀	S ₀			
1	1.032995	-0.45246	1.756970	23.42226	42.40288	-	-	-	6.4	25.49931	19.624	2.4	14.39266	11.086	3.1	10.76326	8.288
2	1.032980	-0.45132	1.756299	23.43951	42.40488	-	-	-	6.1	23.48146	18.519	0.5	11.39326	8.771	3.0	10.68122	8.163
3	1.032956	-0.39986	1.755930	23.41109	42.38740	-	-	-	7.2	21.92592	16.921	4.9	18.34838	14.122	3.3	11.07094	9.525
4	1.032922	-0.36000	1.754695	23.40461	42.38030	-	-	-	5.9	19.92599	15.325	1.7	13.27859	10.225	3.1	10.75006	8.278
5	1.032876	-0.36639	1.753802	23.39606	42.34666	-	-	-	6.7	21.17562	16.305	0.9	12.00805	9.247	3.0	10.58676	8.152
6	1.032824	-0.38487	1.752980	23.39087	42.32482	-	-	-	6.0	24.88399	18.999	0.0	10.36300	8.147	2.7	14.84780	11.433
7	1.032761	-0.35264	1.751859	23.38352	42.29912	-	-	-	3.3	15.78981	12.228	0.0	10.37490	8.143	3.8	10.74288	13.208
8	1.032688	-0.36059	1.750800	23.37512	42.27250	-	-	-	0.0	10.58813	9.137	1.4	12.70050	9.041	7.1	21.78881	16.777
9	1.032605	-0.36043	1.749662	23.36659	42.24360	-	-	-	0.0	10.58090	9.120	2.0	15.30260	11.782	5.9	21.45440	15.528
10	1.032512	-0.36625	1.748509	23.35762	42.21345	-	-	-	0.3	11.02740	9.491	2.8	14.97771	11.583	10.1	26.53264	20.415
11	1.032410	-0.36379	1.747279	23.34832	42.18109	-	-	-	8.9	24.60749	19.948	1.9	18.94791	10.431	9.8	26.02981	20.943
12	1.032296	-0.36126	1.745951	23.33879	42.14672	-	-	-	30.4	26.98787	20.765	0.9	11.95899	9.280	7.1	21.75389	16.751
13	1.032177	-0.37063	1.744650	23.32815	42.11044	-	-	-	3.9	16.68886	12.850	0.0	10.52761	8.136	8.7	24.27149	18.689
14	1.032046	-0.37980	1.743295	23.31749	42.07219	-	-	-	6.7	21.18126	15.246	2.3	15.23657	12.112	8.8	24.45029	18.802
15	1.031906	-0.37886	1.741886	23.30642	42.03198	-	-	-	6.7	21.08987	15.238	1.3	12.40205	9.981	6.3	20.48812	15.763
16	1.031756	-0.37502	1.740409	23.29499	41.98972	-	-	-	3.8	16.49822	12.704	2.0	13.09779	10.532	3.8	16.49822	12.704
17	1.031597	-0.36794	1.738752	23.28309	41.94544	-	-	-	7.2	22.02329	16.958	3.0	16.49819	12.684	7.6	22.49603	17.314
18	1.031430	-0.36267	1.737149	23.27064	41.89913	-	-	-	30.4	26.98229	20.707	7.0	15.52510	10.574	8.0	22.43271	17.790
19	1.031251	-0.36059	1.735465	23.25821	41.85075	-	-	-	30.4	26.92667	20.695	11.3	20.20244	21.769	9.4	21.09461	15.942
20	1.031063	-0.35780	1.733792	23.24580	41.80030	-	-	-	7.8	22.78822	17.824	9.6	26.99882	19.711	6.0	19.91773	15.357
21	1.030867	-0.35371	1.732041	23.23182	41.74775	-	-	-	9.5	26.02982	20.262	5.4	18.98771	14.596	6.4	20.53326	13.811
22	1.030662	-0.35011	1.730243	23.21808	41.69387	-	-	-	30.4	26.92534	20.656	6.0	20.94625	17.741	10.0	27.45932	22.241
23	1.030447	-0.34641	1.728399	23.20369	41.63826	-	-	-	8.2	22.22762	17.476	6.4	20.49665	15.785	11.4	26.36262	20.925
24	1.030224	-0.34260	1.726509	23.18965	41.57750	-	-	-	8.5	22.78156	18.318	7.1	25.56666	16.660	4.3	17.17175	13.222
25	1.029991	-0.33877	1.724574	23.17497	41.51319	-	-	-	8.9	26.34717	19.817	6.7	28.93981	18.120	8.2	23.58880	17.948
26	1.029750	-0.33489	1.722595	23.15966	41.44582	-	-	-	30.5	26.92896	20.714	6.2	20.12818	15.499	3.0	10.36320	7.980
27	1.029499	-0.33059	1.720574	23.14462	41.38755	-	-	-	9.6	25.38180	18.544	0.9	11.76373	9.050	2.2	12.60329	10.624
28	1.029240	-0.32628	1.718512	23.12945	41.32844	-	-	-	8.6	22.66225	16.375	6.6	20.71602	15.951	9.6	25.43761	19.586
29	1.028972	-0.32198	1.716408	23.11399	41.26844	-	-	-	1.8	13.14381	11.201	9.1	18.39404	14.137	3.4	14.08786	13.847
30	1.028696	-0.31769	1.714269	23.09832	41.20714	-	-	-	30.8	27.27323	21.908	6.2	16.92521	13.011	5.8	16.94937	14.899
31	1.028412	-0.31320	1.712080	23.09235	41.16378	-	-	-	30.0	27.24543	20.979	1.5	12.63258	9.727	2.7	14.53889	11.179
32	1.028119	-0.30862	1.709863	23.08629	41.02560	-	-	-	9.7	25.48966	18.627	2.4	14.02532	10.799	3.6	15.90977	12.251
33	1.027817	-0.30394	1.707607	23.04525	40.94649	-	-	-	8.6	22.72266	16.275	2.1	13.52399	10.420	8.6	22.72266	16.275
34	1.027507	-0.29928	1.705314	23.02764	40.86498	-	-	-	2.9	16.74498	11.369	2.4	13.88039	10.786	6.3	20.08713	14.475
35	1.027199	-0.29453	1.702986	23.00988	40.78103	-	-	-	8.7	23.63082	18.258	4.8	17.18329	12.643	2.9	14.74049	11.350
36	1.026884	-0.28979	1.700624	22.99181	40.69486	-	-	-	8.2	23.03034	17.720	6.1	18.72737	15.180	4.1	16.58920	12.778
37	1.026560	-0.28406	1.698229	22.97325	40.60627	-	-	-	7.2	21.43934	15.490	6.1	18.99707	15.187	3.8	15.09045	12.296
38	1.026236	-0.27925	1.695803	22.95440	40.51500	-	-	-	7.4	21.78028	16.708	11.8	28.36371	21.786	2.3	12.72333	10.566
39	1.025916	-0.27446	1.693349	22.93519	40.42193	-	-	-	0.8	11.39932	9.744	0.8	11.39932	9.744	0.4	10.78243	8.262
40	1.025591	-0.26972	1.690874	22.91578	40.32617	-	-	-	7.8	21.78989	16.777	0.1	10.23264	7.882	2.8	14.45220	11.128
41	1.025261	-0.26493	1.688366	22.89629	40.22799	-	-	-	5.4	18.47016	14.228	2.3	13.64792	10.586	3.3	10.52484	9.104
42	1.024934	-0.26010	1.685829	22.87669	40.12741	-	-	-	0.0	10.01185	7.725	6.2	22.90602	17.581	0.1	10.18764	7.944
43	1.024606	-0.25524	1.683265	22.85688	40.02440	-	-	-	0.0	10.00620	7.706	9.5	24.76860	19.089	0.5	10.79426	8.304
44	1.024276	-0.25035	1.680674	22.83694	39.91987	-	-	-	0.0	9.92974	7.689	6.0	18.32757	14.887	5.8	9.92974	7.689
45	1.023944	-0.24543	1.678056	22.81687	39.81310	-	-	-	2.5	13.93486	10.452	6.0	18.26877	14.830	5.4	16.33887	14.128
46	1.023610	-0.24049	1.675409	22.79664	39.70461	-	-	-	2.7	14.12385	10.967	0.5	10.70959	9.240	7.4	21.48247	15.488
47	1.023276	-0.23552	1.672740	22.77621	39.59400	-	-	-	0.0	9.69782	7.621	5.5	18.41861	14.181	3.1	10.05183	7.743
48	1.022941	-0.23053	1.669958	22.75564	39.48239	-	-	-	5.2	17.82386	13.789	7.8	25.47328	18.533	0.0	8.68824	7.999
49	1.022604	-0.22552	1.667156	22.73492	39.36987	-	-	-	11.4	27.48132	21.138	6.9	20.49932	15.784	2.0	12.92879	9.259
50	1.022266	-0.22049	1.664333	22.71405	39.25632	-	-	-	9.6	24.63995	18.957	4.8	17.21420	12.285	0.7	17.52279	13.492
51	1.021927	-0.21543	1.661489	22.69303	39.14186	-	-	-	7.2	20.67004	15.870	2.7	13.92766	10.732	5.1	17.63482	13.279
52	1.021588	-0.21035	1.658624	22.67199	39.02652	-	-	-	8.0	22.58034	16.265	5.3	17.98944	12.782	10.4	25.74420	19.823
53	1.021248	-0.20524	1.655738	22.65087	38.91030	-	-	-	4.1	16.01187	12.329	1.6	12.37286	9.323	8.7	23.02699	17.768
54	1.020907	-0.20011	1.652831	22.62961	38.79310	-	-	-	0.0	9.68282	7.458	5.3	17.80809	13.733	7.1	20.58895	13.938
55	1.020566	-0.19496	1.649902	22.60832	38.67500	-	-	-	0.0	9.64984	7.430	6.9	20.21140	15.583	8.7	19.92527	13.327
56	1.020224	-0.18979	1.647000	22.58699	38.55602	-	-	-	0.0	9.61625	7.402	4.0	15.72817	12.111	8.4	22.45120	17.267
57	1.019881	-0.18461	1.644114	22.56564	38.43624	-	-	-	3.6	15.03984	11.608	2.3	13.93696	9.967	7.6	21.17868	16.304
58	1.019538	-0.17941	1.641245	22.54427	38.31574	-	-	-	6.4	19.29079	14.954	0.2	9.95261	7.986	5.7	17.93229	13.799
59	1.019194	-0.17419	1.638392	22.52288	38.19454	-	-	-	0.0	9.55281	7.324	6.9	18.99262	15.387	7.3	20.63388	15.865
60	1.018850	-0.16896	1.635553	22.50147	38.07274	-	-	-	3.3	14.48014	11.258	4.7	16.93007	12.784	6.1	18.72599	14.418
61	1.018506	-0.16372	1.632726	22.48004	37.95034	-	-	-	7.7	21.08167	16.241	6.5	18.25717	14.942	7.3	20.44637	15.775
62	1.018162	-0.15847	1.629910	22.45859	37.82734	-	-	-	6.2	16.74887	14.448	8.8	22.99996	17.472	8.2	23.24989	17.937
63	1.017818	-0.15321	1.627105	22.43712	37.70384	-	-	-	4.7	16.44673	14.244	9.3	23.37771	18.011	8.8	19.63287	13.208
64	1.017474	-0.14794	1.624310	22.41563	37.57984	-	-	-	4								

RADIAÇÃO SOLAR (Sn) - cálculo baseado no número de horas de sol (n)																	
Latitude	-23.881	-23.5	ac	0.25													
Longitude	46.374		bc	0.50													
Dia juliano	d _r	T _p	W ₁	N	S ₀	n	1997		1998		1999		2000				
							S ₁	S ₂	n	S ₁	S ₂	n	S ₁	S ₂	n	S ₁	S ₂
93	0.998036	0.07966	1.538071	11.79472	32.14899	-	-	-	8.5	19.68079	15.294	6.5	16.94110	13.045	5.8	8.89924	6.822
94	0.998438	0.08028	1.533045	11.71162	31.99492	-	-	-	9.2	19.22520	13.719	6.2	16.44702	12.684	5.9	7.98573	6.103
95	0.997871	0.08045	1.528020	11.68959	31.78050	-	-	-	3.1	12.15183	9.257	6.4	13.35247	14.961	7.9	10.67317	14.379
96	0.997305	0.10030	1.527026	11.65962	31.58587	-	-	-	8.9	19.93280	15.348	6.0	16.00914	12.327	8.7	10.66280	15.140
97	0.996739	0.10713	1.524027	11.64271	31.37105	-	-	-	2.2	10.88669	8.321	7.0	17.37944	13.361	7.6	10.08179	13.823
98	0.996174	0.11396	1.523032	11.61987	31.17613	-	-	-	5.0	14.78194	11.368	4.3	13.96249	10.443	8.8	10.99904	13.991
99	0.995611	0.12059	1.518052	11.59730	30.98121	-	-	-	2.1	10.59004	8.124	0.2	9.01245	6.170	5.8	15.73969	12.378
100	0.995048	0.12736	1.513080	11.57442	30.78630	-	-	-	0.7	6.62754	6.643	3.3	12.00537	9.306	5.8	16.74012	12.890
106	0.994607	0.12404	1.512130	11.55162	30.59139	-	-	-	6.6	19.02524	14.857	6.4	18.77842	14.452	7.9	10.13036	13.943
109	0.993638	0.14367	1.509184	11.52906	30.39647	-	-	-	7.5	17.48625	13.464	6.3	15.90934	12.246	10.1	20.91070	16.304
109	0.993171	0.14727	1.508234	11.50650	30.20154	-	-	-	8.8	18.79612	14.404	2.0	10.17957	7.895	10.3	21.06943	16.223
104	0.992815	0.15382	1.503329	11.48499	30.00664	-	-	-	8.4	18.47704	14.227	7.8	17.49212	13.624	9.7	20.17580	15.328
105	0.992352	0.16033	1.500422	11.46250	29.81172	-	-	-	9.6	19.90985	15.254	2.8	11.99578	8.544	8.8	17.05097	13.751
106	0.991711	0.16679	1.497520	11.44029	29.62684	-	-	-	7.4	16.96574	13.888	0.9	9.57115	6.630	5.2	15.43280	11.860
107	0.991262	0.17329	1.494613	11.41810	29.44193	-	-	-	2.8	10.78979	8.248	4.9	13.67931	10.558	9.5	19.68147	15.090
108	0.990816	0.17988	1.491702	11.39645	29.24702	-	-	-	2.7	10.72390	8.298	10.8	20.89863	16.190	4.8	13.98623	10.468
109	0.990373	0.18658	1.488794	11.37472	29.05210	-	-	-	10.0	21.09372	16.311	9.9	18.62750	14.343	2.3	10.18986	7.854
110	0.989932	0.19211	1.486121	11.35313	28.86724	-	-	-	10.3	20.28990	15.436	9.2	18.90862	14.580	2.2	10.01149	7.709
111	0.989496	0.19638	1.483513	11.33169	28.68232	-	-	-	8.0	17.29621	13.319	2.2	11.21052	8.647	10.0	19.62949	15.261
112	0.989062	0.20143	1.481024	11.31037	28.49742	-	-	-	9.2	18.79629	14.404	3.0	10.89998	8.382	10.4	20.21738	15.967
113	0.988631	0.20521	1.477774	11.28921	28.31252	-	-	-	8.2	17.35235	13.361	7.6	16.90252	12.782	9.3	14.57399	11.528
114	0.988204	0.20852	1.475005	11.26823	28.11769	-	-	-	2.7	10.39572	8.025	6.7	15.39952	11.048	8.2	17.25782	13.289
115	0.987801	0.21147	1.472279	11.24739	27.92284	-	-	-	0.7	7.85176	6.048	0.2	17.36828	12.212	7.7	16.54236	12.738
116	0.987402	0.21408	1.469673	11.22671	27.74634	-	-	-	8.0	16.91780	13.343	9.1	18.20230	14.081	10.3	19.66620	15.143
117	0.987007	0.21648	1.467185	11.20627	27.58773	-	-	-	2.8	10.33998	7.998	2.9	9.96698	7.675	7.8	16.48659	12.694
118	0.986626	0.21859	1.464803	11.18607	27.43871	-	-	-	0.7	7.79425	6.932	5.1	13.99895	10.080	10.0	19.09827	14.692
119	0.986259	0.22048	1.462530	11.16610	27.29969	-	-	-	2.3	9.63542	7.398	7.9	16.45910	12.650	10.1	19.13963	14.715
120	0.985907	0.22214	1.460360	11.14636	27.17026	-	-	-	10.4	19.20220	14.917	8.4	16.94487	13.049	9.4	16.19399	13.963
121	0.985569	0.22359	1.458293	11.12687	27.05048	-	-	-	10.2	19.02846	14.852	8.3	16.73947	12.886	10.1	18.98176	14.359
122	0.985245	0.22485	1.456329	11.10762	26.94031	-	-	-	10.3	19.04878	14.867	8.6	17.09274	13.094	-	-	-
123	0.984935	0.22592	1.454463	11.08860	26.83974	-	-	-	8.0	16.63085	13.108	7.6	15.71839	12.134	-	-	-
124	0.984639	0.22681	1.452694	11.06980	26.74877	-	-	-	8.0	16.58989	13.073	9.2	16.34972	12.589	-	-	-
125	0.984356	0.22753	1.451021	11.05122	26.66740	-	-	-	3.6	10.61257	8.326	8.4	16.92645	12.785	-	-	-
126	0.984086	0.22818	1.449443	11.03286	26.59583	-	-	-	3.1	10.18249	7.828	0.3	8.89966	6.293	-	-	-
127	0.983829	0.22867	1.447959	11.01471	26.53406	-	-	-	8.8	17.49485	13.702	5.3	12.88878	9.770	-	-	-
128	0.983584	0.22901	1.446568	10.99676	26.48209	-	-	-	9.2	17.29667	13.518	6.4	13.90881	10.739	-	-	-
129	0.983350	0.22921	1.445270	10.97899	26.43992	-	-	-	8.9	16.74246	12.992	7.9	15.57977	11.986	-	-	-
130	0.983126	0.22928	1.444065	10.96140	26.40755	-	-	-	10.4	18.36885	14.268	9.3	15.96360	12.282	-	-	-
131	0.982911	0.22914	1.442953	10.94407	26.38498	-	-	-	10.3	18.18073	14.007	8.2	15.39474	8.899	-	-	-
132	0.982704	0.22881	1.441934	10.92690	26.37219	-	-	-	8.0	16.48821	12.908	6.3	13.90818	10.481	-	-	-
133	0.982504	0.22830	1.441007	10.91087	26.36902	-	-	-	5.7	12.79445	9.821	0.0	6.23825	4.002	-	-	-
134	0.982310	0.22763	1.440172	10.89598	26.37524	-	-	-	1.4	7.79479	6.002	5.4	12.34922	9.539	-	-	-
135	0.982131	0.22681	1.439429	10.88223	26.39087	-	-	-	1.0	7.29942	5.821	5.4	12.88841	9.642	-	-	-
136	0.981967	0.22585	1.438777	10.86961	26.41562	-	-	-	9.4	18.22987	14.818	8.2	15.99338	11.891	-	-	-
137	0.981818	0.22476	1.438214	10.85812	26.44973	-	-	-	9.8	17.18027	13.381	8.0	15.99399	11.625	-	-	-
138	0.981684	0.22354	1.437740	10.84784	26.49392	-	-	-	8.4	16.52551	13.015	8.3	15.36303	12.303	-	-	-
139	0.981554	0.22229	1.437356	10.83875	26.54819	-	-	-	5.2	11.62269	8.113	8.7	15.73646	12.139	-	-	-
140	0.981438	0.22103	1.437062	10.83084	26.61252	-	-	-	9.5	18.11630	14.837	10.1	17.23934	13.284	-	-	-
141	0.981335	0.21976	1.436858	10.82401	26.68693	-	-	-	3.8	10.17227	7.828	9.7	15.28973	9.496	-	-	-
142	0.981245	0.21849	1.436744	10.81826	26.77141	-	-	-	6.5	13.18980	10.928	9.2	16.09796	12.389	-	-	-
143	0.981168	0.21723	1.436719	10.81367	26.86584	-	-	-	8.4	15.94486	13.968	6.9	13.30445	10.285	-	-	-
144	0.981104	0.21600	1.436782	10.81022	26.96925	-	-	-	2.4	9.68543	7.367	8.7	15.11031	11.986	-	-	-
145	0.981052	0.21480	1.436933	10.80791	27.08166	-	-	-	4.8	10.87987	8.374	4.0	10.23991	7.870	-	-	-
146	0.981011	0.21364	1.437172	10.80674	27.20303	-	-	-	9.9	11.61100	9.094	2.4	8.43998	6.498	-	-	-
147	0.981081	0.21252	1.437499	10.80672	27.33340	-	-	-	2.1	6.08085	6.222	1.1	6.99805	5.387	-	-	-
148	0.981251	0.21145	1.437914	10.80782	27.47284	-	-	-	4.2	10.42517	8.027	0.0	5.77966	4.450	-	-	-
149	0.981522	0.21043	1.438417	10.80997	27.62139	-	-	-	8.0	15.76485	12.443	4.8	13.60331	8.184	-	-	-
150	0.981893	0.20956	1.439008	10.81328	27.77904	-	-	-	8.0	16.73182	14.414	9.7	16.34938	12.439	-	-	-
151	0.982364	0.20884	1.439687	10.81783	27.94581	-	-	-	8.8	18.09180	16.304	0.2	9.92798	4.981	-	-	-
152	0.982935	0.20827	1.440455	10.82362	28.12160	-	-	-	8.3	14.55186	11.305	9.5	15.03331	12.182	-	-	-
153	0.983606	0.20784	1.441313	10.83069	28.30639	-	-	-	5.5	11.52576	9.875	8.7	14.93379	11.449	-	-	-
154	0.984377	0.20756	1.442264	10.83892	28.50018	-	-	-	1.3	7.02962	5.413	0.0	6.64887	4.380	-	-	-
155	0.985248	0.20743	1.443307	10.84831	28.70307	-	-	-	3.1	9.92934	8.888	0.0	6.63941	4.395	-	-	-
156	0.986220	0.20746	1.444442	10.85885	28.91544	-	-	-	8.4	14.48323	11.388	0.1	5.71860	4.403	-	-	-
157	0.987293	0.20764	1.445669	10.87054	29.13783	-	-	-	9.0	15.08970	11.819	0.0	5.99621	4.309	-	-	-
158	0.988466	0.20796	1.446988	10.88338	29.37030	-	-	-	9.4	15.47511	12.318	0.2	5.76256	4.459	-	-	-
159	0.989749	0.20841	1.448399	10.89737	29.613												

RADIAÇÃO SOLAR (Sn) - cálculo baseado no número de horas de sol (n)																	
Latitude	23.305	-23.3	ja	0.20													
Longitude	49.3796		br	0.30													
Dia Mês	dt	t ₁	v ₁	N	1997			1998			1999			2000			
					S ₁	n	S ₂	S ₃	n	S ₄	S ₅	n	S ₆	S ₇	n	S ₈	S ₉
185	0.957031	0.40041	1.305897	30.58934	22.11852	5.6	11.30953	8.763	1.4	6.98254	5.384	0.0	5.52980	4.250	-	-	-
186	0.957060	0.39689	1.304409	30.58199	22.10722	5.6	11.40172	8.779	4.5	10.25057	7.993	0.0	5.54931	4.267	-	-	-
187	0.957099	0.39325	1.303241	30.56851	22.11677	6.0	12.60240	9.766	7.0	12.06211	9.927	0.3	5.66945	4.509	-	-	-
188	0.957146	0.38949	1.302254	30.62546	22.27415	2.3	7.96293	8.346	7.2	13.19944	10.133	0.0	5.66894	4.268	-	-	-
189	0.957206	0.38562	1.301296	30.61280	22.33333	6.7	12.63290	9.727	6.3	12.21206	9.403	1.7	5.73204	5.676	-	-	-
190	0.957275	0.38163	1.300298	30.62077	22.39629	3.3	11.38728	8.814	0.0	5.98987	4.311	5.5	11.98807	8.777	-	-	-
191	0.957353	0.37952	1.301344	30.62959	22.46301	8.3	14.92728	11.240	1.8	7.51777	5.789	8.8	14.51490	11.494	-	-	-
192	0.957440	0.37730	1.302490	30.63784	22.53244	7.6	13.69265	10.536	0.3	5.95130	4.982	4.8	10.71712	8.252	-	-	-
193	0.957538	0.38467	1.303890	30.64703	22.60357	3.6	9.47396	7.295	0.1	5.75086	4.434	9.7	15.99323	12.282	-	-	-
194	0.957645	0.38252	1.304851	30.65664	22.68207	7.9	14.07990	10.842	2.4	9.28022	7.153	8.3	14.52957	11.189	-	-	-
195	0.957761	0.37985	1.306265	30.66680	22.76880	9.3	14.54946	11.203	2.4	9.25296	6.295	9.2	15.50807	11.943	-	-	-
196	0.957887	0.37726	1.307743	30.67713	22.85262	8.6	14.81807	11.465	7.4	12.63191	10.497	8.1	15.45113	11.887	-	-	-
197	0.958023	0.37499	1.309285	30.68800	22.94441	8.2	14.33820	11.293	5.9	12.08680	9.260	8.6	16.02066	12.399	-	-	-
198	0.958168	0.37189	1.400730	30.69926	23.04262	0.8	6.81832	5.897	7.8	14.18374	10.898	8.8	16.28303	11.727	-	-	-
199	0.958322	0.36909	1.402352	30.73083	23.12811	4.4	10.53249	8.118	9.4	25.93074	12.267	0.0	5.79203	4.492	-	-	-
200	0.958486	0.36747	1.403836	30.72299	23.22715	8.7	13.22836	11.727	0.0	5.89679	4.471	6.8	13.17396	10.142	-	-	-
201	0.958659	0.36524	1.405265	30.72843	23.32960	8.3	13.98625	11.803	3.0	9.08211	7.004	9.5	16.29482	12.439	-	-	-
202	0.958842	0.36341	1.406640	30.74025	23.42540	0.0	5.87885	4.511	0.9	25.56159	11.962	5.4	11.74591	9.044	-	-	-
203	0.959034	0.35945	1.408070	30.76144	23.54452	9.7	15.40321	11.861	1.1	7.08945	5.459	2.2	6.29277	6.385	-	-	-
204	0.959234	0.35480	1.410445	30.77980	23.65891	4.3	10.62463	8.266	4.4	10.74441	9.273	2.8	6.86796	6.901	-	-	-
205	0.959444	0.34927	1.412866	30.78880	23.77950	1.4	7.48992	5.764	4.6	11.02099	8.438	4.9	11.34311	8.733	-	-	-
206	0.959664	0.34402	1.415434	30.80329	23.89130	9.8	12.88818	9.837	5.3	11.83331	9.132	7.3	13.82887	10.644	-	-	-
207	0.959892	0.34006	1.418160	30.81780	24.01320	8.9	13.73238	12.343	5.8	12.44068	9.979	9.9	16.93124	13.083	-	-	-
208	0.960129	0.33671	1.421000	30.83274	24.13817	7.2	14.89628	10.823	8.9	25.95030	12.282	9.4	16.50736	12.711	-	-	-
209	0.960374	0.33389	1.423900	30.84862	24.26615	9.0	16.13268	12.422	6.3	13.11283	10.097	0.0	6.06694	4.671	-	-	-
210	0.960628	0.33150	1.426844	30.86362	24.39709	9.2	16.42977	12.851	5.8	12.61190	9.711	7.5	14.52080	11.181	-	-	-
211	0.960892	0.32940	1.429844	30.87953	24.53094	7.3	14.36267	11.859	0.0	6.13273	4.732	7.3	14.26267	11.059	-	-	-
212	0.961164	0.32760	1.432891	30.89575	24.66762	9.2	15.44617	11.896	5.6	12.56651	9.630	0.0	5.36691	4.749	-	-	-
213	0.961445	0.32615	1.435914	30.91238	24.80710	9.4	16.88808	13.033	6.0	25.28666	11.797	3.8	10.51230	8.331	-	-	-
214	0.961734	0.32490	1.438919	30.92989	24.94980	8.8	16.28178	12.837	3.0	9.68117	7.499	4.8	11.71612	9.021	-	-	-
215	0.962031	0.32389	1.441893	30.94829	25.09516	0.0	6.27394	4.831	5.4	17.04829	13.127	8.2	18.62729	12.088	-	-	-
216	0.962337	0.32317	1.444828	30.96787	25.24361	0.0	6.31049	4.899	5.6	12.76859	9.823	5.6	17.30352	13.388	-	-	-
217	0.962651	0.32270	1.447738	30.98812	25.39361	0.0	6.34730	4.988	2.2	10.91140	6.946	6.4	13.74718	10.585	-	-	-
218	0.962972	0.32247	1.450624	30.99913	25.54437	6.7	14.26596	10.908	1.7	9.38033	6.437	30.1	18.11399	13.948	-	-	-
219	0.963302	0.32249	1.453483	31.01231	25.69693	9.1	17.32805	13.119	1.5	9.17430	6.294	9.7	17.73782	12.659	-	-	-
220	0.963640	0.32260	1.456314	31.02733	25.85112	0.0	6.46403	4.877	2.5	9.26271	7.232	0.0	6.46403	4.877	-	-	-
221	0.963986	0.32287	1.459116	31.05439	26.01596	2.3	9.21252	7.280	0.0	6.58269	5.000	7.3	14.87619	11.533	-	-	-
222	0.964349	0.32318	1.461894	31.07329	26.17733	8.4	14.98390	11.228	4.0	11.27030	8.680	8.5	16.98130	12.776	-	-	-
223	0.964720	0.32362	1.464744	31.08241	26.34330	8.7	16.81113	13.629	8.9	17.15280	13.238	9.5	17.86911	13.776	-	-	-
224	0.965109	0.32419	1.467576	31.11176	26.50682	7.0	14.97998	11.831	8.0	26.18880	12.490	8.2	17.99989	13.952	-	-	-
225	0.965502	0.32489	1.470397	31.13132	26.67461	7.9	16.32428	12.423	4.4	11.94303	9.104	8.8	17.33243	13.246	-	-	-
226	0.965899	0.32571	1.473211	31.15130	26.84430	8.0	17.42067	13.416	0.0	10.32206	7.940	0.0	6.71330	5.388	-	-	-
227	0.966300	0.32669	1.476019	31.17167	27.01592	8.6	17.25296	13.208	13.3	19.20850	14.796	0.3	7.11671	5.480	-	-	-
228	0.966705	0.32780	1.478823	31.19123	27.18809	9.5	18.22739	14.120	2.2	10.89594	9.321	6.0	14.08577	10.646	-	-	-
229	0.967114	0.32904	1.481624	31.21159	27.36037	9.6	18.55630	14.266	6.6	14.98529	11.469	5.8	13.64601	10.760	-	-	-
230	0.967527	0.33041	1.484421	31.23212	27.53486	9.6	18.85494	14.384	7.8	16.44773	12.683	7.3	15.83474	12.183	-	-	-
231	0.967944	0.33191	1.487214	31.26263	27.71860	9.8	19.83811	14.398	1.8	9.14668	7.043	1.3	8.88377	6.669	-	-	-
232	0.968365	0.33353	1.490003	31.27271	27.89809	7.9	16.29432	12.816	9.3	35.48149	14.233	8.4	16.80521	13.206	-	-	-
233	0.968791	0.33527	1.492788	31.28275	28.07820	0.0	7.01373	5.428	8.1	17.08809	13.150	8.2	16.49540	14.211	-	-	-
234	0.969221	0.33712	1.495569	31.29295	28.26304	3.1	13.43376	10.344	0.0	7.08526	5.440	6.6	17.80430	13.799	-	-	-
235	0.969654	0.33907	1.498346	31.30330	28.44425	0.0	7.11309	5.476	6.6	25.38052	11.051	7.8	16.88887	13.010	-	-	-
236	0.970092	0.34102	1.499862	31.30579	28.62876	1.2	9.66944	6.675	0.9	10.24699	14.050	8.3	17.61680	12.585	-	-	-
237	0.970534	0.34307	1.501378	31.30842	28.81422	4.2	12.52926	9.841	9.6	19.25674	14.905	6.5	17.96419	13.623	-	-	-
238	0.970980	0.34522	1.502894	31.31123	28.99964	7.1	16.27633	12.535	9.3	29.07711	14.689	6.6	18.98862	14.963	-	-	-
239	0.971430	0.34747	1.504407	31.31427	29.18792	8.0	17.91678	13.488	6.8	25.98881	13.308	7.8	17.28128	13.291	-	-	-
240	0.971883	0.34982	1.505918	31.31746	29.37899	9.4	19.40839	14.843	3.3	11.87987	8.936	8.2	17.86891	13.787	-	-	-
241	0.972339	0.35227	1.507426	31.32079	29.57276	9.3	19.37878	14.822	0.0	7.38139	5.681	3.9	12.41824	9.582	-	-	-
242	0.972800	0.35482	1.508931	31.32424	29.76915	6.2	15.46999	11.908	0.0	7.43894	5.739	7.0	16.50386	12.796	-	-	-
243	0.973266	0.35747	1.510434	31.32782	29.96840	9.2	18.49238	14.877	4.3	13.07805	10.070	7.4	17.80951	13.174	-	-	-
244	0.973737	0.36022	1.511935	31.33152	30.17046	9.1	19.41999	14.953	7.3	17.06894	13.143	9.7	20.20371	15.257	-	-	-
245	0.974212	0.36307	1.513434	31.33533	30.37509	8.6	19.38840	14.838	9.6	20.86266	14.525	9.6	20.17926	15.255	-	-	-
246	0.974691	0.36602	1.514931	31.33937	30.58161	6.7	16.49693	12.870	9.2	26.75089	15.208	8.7	19.06039	14.791	-	-	-
247	0.975174	0.36907	1.516426	31.34354	30.78999	6.0	19.88117	15.081	1.4	9.52945	7.388	6.2	19.88080	15.289	-	-	-
248	0.975661	0.37222	1.517919	31.34784	30.99931	1.9	9.71809	7.480	1.6	9.88988	7.985	7.8	17.62899	13.111	-	-	-
249	0.976152	0.37547	1.519410	31.35227	31.20967	4.9	14.31368	11.82									

RADIAÇÃO SOLAR (Sn) - cálculo baseado no número de horas de sol (n)

Latitude	23.30S	-23.5	an	0.25																	
Longitude	48.37W		bn	0.50																	
						1997				1998				1999				2000			
dia juliano	dt	α_s	α_n	β	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}	β_{11}	β_{12}	β_{13}	β_{14}	β_{15}	
277	1.001849	-0.89002	1.633853	12.29992	36.17363	3.7	14.48419	11.153	9.0	22.27776	17.194	9.8	9.04340	6.983	-	-	-	-	-	-	-
278	1.002412	-0.88688	1.633864	12.32292	36.32892	10.0	23.82732	10.347	0.0	9.80008	6.995	9.7	10.15680	7.799	-	-	-	-	-	-	-
279	1.002975	-0.88371	1.633868	12.34592	36.49625	7.4	20.36309	15.446	7.6	20.25751	25.675	5.3	16.95782	13.050	-	-	-	-	-	-	-
280	1.003538	-0.88051	1.633862	12.36872	36.65490	0.0	9.26372	7.096	0.0	9.26372	7.096	8.1	21.10596	26.390	-	-	-	-	-	-	-
281	1.004101	-0.87728	1.633847	12.39252	36.81250	0.0	9.20288	7.086	2.9	13.51040	20.463	3.5	14.40181	11.089	-	-	-	-	-	-	-
282	1.004664	-0.87401	1.633821	12.41632	36.96812	0.0	9.24294	7.116	0.0	9.24294	7.116	20.6	25.02947	39.268	-	-	-	-	-	-	-
283	1.005227	-0.87070	1.633795	12.43989	37.12282	6.8	18.42726	14.992	10.4	24.79990	29.096	3.2	14.09933	10.822	-	-	-	-	-	-	-
284	1.005790	-0.86736	1.633807	12.46344	37.28947	9.7	23.82499	10.245	0.6	10.21475	7.085	9.5	10.00530	7.750	-	-	-	-	-	-	-
285	1.006353	-0.86409	1.633879	12.48691	37.45804	4.9	15.54619	12.742	2.1	12.50210	9.627	4.6	16.24941	12.512	-	-	-	-	-	-	-
286	1.006916	-0.86085	1.633885	12.51047	37.56453	7.9	21.25740	16.260	0.4	9.89196	7.684	7.8	21.25747	26.368	-	-	-	-	-	-	-
287	1.007479	-0.85768	1.633919	12.53393	37.70890	7.0	19.96396	16.372	3.0	13.94071	20.796	8.2	21.79999	36.763	-	-	-	-	-	-	-
288	1.008042	-0.85456	1.633918	12.55808	37.85215	7.4	20.62326	15.880	7.3	20.47249	29.784	8.4	19.12899	14.719	-	-	-	-	-	-	-
289	1.008605	-0.85140	1.643933	12.57972	37.99224	7.2	20.77773	15.691	0.0	9.49701	7.333	9.8	9.49701	7.333	-	-	-	-	-	-	-
290	1.009168	-0.84829	1.640372	12.59924	38.12914	0.0	9.53229	7.240	0.0	9.53229	7.240	9.8	9.53229	7.240	-	-	-	-	-	-	-
291	1.009731	-0.84517	1.651125	12.61440	38.26406	0.0	9.56621	7.266	0.1	9.71209	7.482	8.1	9.71209	7.482	-	-	-	-	-	-	-
292	1.010294	-0.84209	1.654960	12.63009	38.39836	3.6	13.95031	10.434	7.6	21.14887	26.283	9.8	9.99999	7.992	-	-	-	-	-	-	-
293	1.010857	-0.83902	1.658878	12.64576	38.53263	9.3	17.89998	13.628	8.9	22.72196	37.496	9.0	9.63941	7.417	-	-	-	-	-	-	-
294	1.011420	-0.83598	1.659927	12.67900	38.65986	0.0	9.66466	7.442	9.1	23.55776	28.124	9.7	10.73183	9.264	-	-	-	-	-	-	-
295	1.011983	-0.83294	1.662456	12.70322	38.78944	0.0	9.69636	7.466	9.8	24.66095	39.989	9.5	22.67590	17.460	-	-	-	-	-	-	-
296	1.012546	-0.82992	1.665215	12.72721	38.90995	0.9	11.30368	9.590	11.1	26.70296	20.581	11.7	27.62056	21.268	-	-	-	-	-	-	-
297	1.013109	-0.82695	1.668194	12.74222	39.02220	5.7	18.48622	14.236	0.3	9.79605	7.534	9.1	22.68989	26.246	-	-	-	-	-	-	-
298	1.013672	-0.82401	1.671300	12.76799	39.13217	1.8	12.94891	9.463	0.9	11.36888	9.680	2.1	13.09396	10.017	-	-	-	-	-	-	-
299	1.014235	-0.82112	1.673362	12.79355	39.23999	9.3	24.30352	16.798	0.0	9.81736	7.992	9.8	9.81736	7.992	-	-	-	-	-	-	-
300	1.014798	-0.81829	1.675003	12.80972	39.35528	2.2	13.23994	10.187	0.6	10.76952	9.292	2.9	14.30695	11.036	-	-	-	-	-	-	-
301	1.015361	-0.81552	1.676275	12.82614	39.46927	0.2	22.92257	17.287	2.9	14.30695	11.036	4.7	17.11299	13.177	-	-	-	-	-	-	-
302	1.015924	-0.81281	1.677130	12.84418	39.58019	9.2	24.80796	19.546	0.0	9.80230	7.625	9.9	20.54149	25.917	-	-	-	-	-	-	-
303	1.016487	-0.81016	1.677694	12.86303	39.71773	9.9	19.32798	14.659	0.1	10.00081	7.785	4.8	17.44893	13.493	-	-	-	-	-	-	-
304	1.017050	-0.80754	1.678061	12.88363	39.85399	3.4	15.21879	11.732	1.9	12.43994	9.570	8.9	25.71139	28.298	-	-	-	-	-	-	-
305	1.017613	-0.80496	1.678131	12.90501	39.98794	6.7	20.34849	15.689	1.9	12.79391	9.691	31.5	27.77517	21.267	-	-	-	-	-	-	-
306	1.018176	-0.80242	1.678011	12.92719	40.02963	9.1	24.33214	19.999	0.0	10.00741	7.796	7.5	21.62394	26.650	-	-	-	-	-	-	-
307	1.018739	-0.80000	1.677692	12.94115	40.12904	5.0	18.02462	14.649	0.0	10.03226	7.725	9.4	19.99530	25.265	-	-	-	-	-	-	-
308	1.019302	-0.79768	1.676944	12.95687	40.19691	0.0	11.31174	7.867	2.6	14.09382	10.661	4.8	16.29436	12.524	-	-	-	-	-	-	-
309	1.019865	-0.79546	1.675786	12.97339	40.23208	7.9	22.79211	17.231	7.7	20.04143	26.932	9.3	10.29991	7.985	-	-	-	-	-	-	-
310	1.020428	-0.79335	1.674235	12.99069	40.31373	9.5	15.49473	14.384	9.2	24.40743	28.794	3.8	14.79776	11.371	-	-	-	-	-	-	-
311	1.020991	-0.79134	1.672301	13.01145	40.39411	4.2	16.86368	12.629	10.4	26.30925	20.298	31.5	28.03127	21.976	-	-	-	-	-	-	-
312	1.021554	-0.78944	1.670092	13.03327	40.50228	7.2	21.36118	16.446	4.5	17.29626	13.230	9.5	22.67582	19.446	-	-	-	-	-	-	-
313	1.022117	-0.78766	1.667620	13.04971	40.67922	10.9	27.25816	20.922	5.7	18.05250	14.671	9.8	10.16996	7.651	-	-	-	-	-	-	-
314	1.022680	-0.78599	1.664888	13.06888	40.76296	10.8	28.70377	20.977	0.0	10.78099	7.987	9.0	10.78099	7.987	-	-	-	-	-	-	-
315	1.023243	-0.78443	1.661893	13.09078	40.84393	8.9	24.33382	16.989	0.0	10.21088	7.882	8.4	20.20300	19.994	-	-	-	-	-	-	-
316	1.023806	-0.78298	1.658632	13.10328	40.92267	4.5	17.29827	13.290	6.1	15.79931	10.214	9.1	10.79991	7.999	-	-	-	-	-	-	-
317	1.024369	-0.78164	1.655105	13.11865	41.00007	4.5	17.20308	13.390	1.3	12.20179	9.457	9.0	10.29092	7.890	-	-	-	-	-	-	-
318	1.024932	-0.78041	1.651320	13.13693	41.07511	1.4	12.45818	9.592	4.5	22.56126	20.142	8.2	22.24079	17.903	-	-	-	-	-	-	-
319	1.025495	-0.77928	1.647309	13.14921	41.14820	0.0	10.28701	7.801	8.7	23.80046	26.463	9.5	11.06999	9.523	-	-	-	-	-	-	-
320	1.026058	-0.77826	1.643086	13.16366	41.21880	0.9	11.89762	8.507	10.7	27.08683	20.894	9.8	10.38998	14.927	-	-	-	-	-	-	-
321	1.026621	-0.77735	1.638686	13.18039	41.28748	0.0	10.32387	7.948	9.0	24.11991	19.683	20.3	26.49300	20.371	-	-	-	-	-	-	-
322	1.027184	-0.77654	1.634031	13.19938	41.35407	0.0	10.33852	7.961	2.9	14.80340	11.480	9.8	20.65232	15.926	-	-	-	-	-	-	-
323	1.027747	-0.77583	1.629155	13.22072	41.41858	0.1	10.31344	8.094	0.1	10.51144	8.094	3.1	15.25235	11.748	-	-	-	-	-	-	-
324	1.028310	-0.77522	1.624092	13.22773	41.46204	5.1	18.37970	14.145	0.3	10.64086	9.247	5.5	20.56661	15.936	-	-	-	-	-	-	-
325	1.028873	-0.77471	1.618866	13.23027	41.54449	8.9	24.39244	18.751	3.3	13.83790	10.685	1.8	13.53017	10.179	-	-	-	-	-	-	-
326	1.029436	-0.77429	1.613499	13.24069	41.61999	7.4	22.81776	16.994	1.0	11.96992	9.217	9.1	24.68884	19.099	-	-	-	-	-	-	-
327	1.029999	-0.77396	1.607993	13.26256	41.69822	3.7	16.22513	12.493	9.0	22.97995	17.683	9.3	25.02029	21.266	-	-	-	-	-	-	-
328	1.030562	-0.77373	1.602354	13.27410	41.73060	6.5	20.63996	15.093	10.2	26.45366	20.389	30.9	27.25999	21.238	-	-	-	-	-	-	-
329	1.031125	-0.77359	1.596595	13.28624	41.76302	0.7	11.54892	8.687	11.0	28.96309	22.320	20.2	26.62999	20.504	-	-	-	-	-	-	-
330	1.031688	-0.77354	1.590735	13.29898	41.81346	0.2	10.76366	8.291	4.7	17.64287	12.739	1.3	15.64153	12.044	-	-	-	-	-	-	-
331	1.032251	-0.77358	1.584782	13.30333	41.86297	0.6	11.49808	8.796	0.0	10.46649	8.898	20.0	26.18200	20.168	-	-	-	-	-	-	-
332	1.032814	-0.77371	1.578737	13.30933	41.90994	0.7	11.97831	9.529	9.9	15.12921	14.729	30.0	26.39229								

*APÊNDICE IV***PROGRAMA MSWSET – CÓDIGO FONTE**

Neste apêndice é apresentado o código fonte do programa MSWSET para previsão de recalques em aterros sanitários, conforme descrito no item 5.3. O programa foi desenvolvido em linguagem FORTRAN, sendo constituído pela estrutura principal (“*main program*”) e por 5 (cinco) sub-rotinas de cálculo (MARQUES, 2001). Apresentam-se ainda os arquivos de entrada e saída de dados para o caso da placa de recalque PR5, situada sob o aterro experimental. As listagens deste apêndice incluem, portanto:

- Código fonte do programa MSWSET.
- Arquivo de entrada de dados correspondente a placa de recalque PR5.
- Arquivo de saída de dados correspondente a placa de recalque PR5.
- Fluxograma do programa MSWSET

```

c          *****
c          *
c          *   EVALUATION OF SANITARY LANDFILL SETTLEMENT   *
c          *
c          *   PROGRAM MSWSET - VERSION 08/2000   *
c          *
c          *****

c  This program was developed to evaluate the different compression
c  mechanisms of the municipal solid wastes in a sanitary landfill.
c  In this way, the program takes into account the primary mechanical
c  compression, the secondary mechanical compression (creep), and the
c  secondary biological compression due to the solid waste degradation.

c  INPUT DATA

c  FILL= landfill name or title of the problem, up to 40 characters.
c  DI= initial date of the landfill construction (mm/dd/yyyy).
c  CD= date of the landfill closure (mm/dd/yyyy).
c  FD= date for final settlement prediction (mm/dd/yyyy).
c  BM= identification (name) of the monitoring device, up to 30 characters.
c  FL= foundation level (m) relates to the BM location.
c  X= distance from the point of interest (BM) to the center of the
c  surcharge. This value is used to calculate the stress influence due to
c  strip loads (surcharges). This value should be equal to zero if there
c  is no surcharge or if the surcharge is better represented by a
c  rectangular load.
c  XI= x coordinate of the point of interest (BM) in meters.
c  YI= y coordinate of the point of interest (BM) in meters.
c  NE= number of construction and aftercare events.
c  NMAT= number of different materials in the landfill.
c  NLAY= number of construction layers in the landfill.
c  NSART= event number since a relative strain or settlement curve should
c  be calculated. NSART=0 if the problem does not require this information.
c  SGE= parameter for stress influence calculation. SGE=1 means surcharge
c  due to strip load (finite width and infinite length). SGE=0 means
c  surcharge due to rectangular load. SGE=-1 means no surcharge, that is,
c  all layers are considered as infinite layers.
c  T(m)= time (days) of the event m.
c  LAY(m)= last disposed layer at the event m.
c  MAT(m)= material of the last disposed layer at event m.
c  HC(m)= control disposal parameter of the event m. HC(m)=1 means that the
c  LAY(m) was disposed at the time T(m). HC(m)=0 means that the LAY(m) was
c  previously disposed (before the time T(m)).
c  SLOAD(m)= control surcharge parameter. SLOAD(m)=0 means that the LAY(m)
c  is not a surcharge. SLOAD(m)=1 means that the LAY(m) is a surcharge. This
c  parameter is used to allow the correct calculation of the waste column
c  heights and strains.
c  W(i)= width of the surcharge (layer) i, in meters. This value should be
c  equal to zero if the surcharge is better represented by a rectangular load.
c  This value should be not referenced if SGE=-1.
c  XQ(i)= x coordinate of the left bottom corner of the rectangular surcharge
c  (layer) i, in meters. This value should be equal to zero if the surcharge
c  is better represented by a strip load. This value should be not referenced
c  if SGE=-1.
c  YQ(i)= y coordinate of the left bottom corner of the rectangular surcharge
c  (layer) i, in meters. This value should be equal to zero if the surcharge
c  is better represented by a strip load. This value should be not referenced
c  if SGE=-1.
c  DX(i)= length of the surcharge (layer) i in the x direction, in meters.
c  This value should be equal to zero if the surcharge is better represented
c  by a strip load. This value should be not referenced if SGE=-1.
c  DY(i)= length of the surcharge (layer) i in the y direction, in meters.
c  This value should be equal to zero if the surcharge is better represented
c  by a strip load. This value should be not referenced if SGE=-1.
c  HO(j)= height (thickness) of the material j as disposed at the landfill (m).
c  GO(j)= unit weight of the material j as disposed at the landfill (kN/m3).
c  CC(j)= primary mechanical compression index of the material j.
c  B(j)= secondary mechanical compression index of the material j (1/kPa).
c  C(j)= rate of secondary mechanical compression of the material j (1/day).
c  EDG(j)= compression factor due to the decomposition. It stands for the total
c  amount of compression (strain) due to biodegradation of the material j.

```

```

c   D(j)= rate of secondary biological compression of the material j (1/day).
c   NP= number of points to be checked in terms of intermediate (internal)
c   heights and settlements.
c   EVENT(i)= event number of the point i to be checked in terms of internal
c   heights and settlements. Not required if NP=0.
c   LLAY(i)= layer number of the point i to be checked in terms of internal
c   heights and settlements. Not required if NP=0.

      REAL T(100),HO(50),GO(50),CC(50),B(50),C(50),EDG(50),D(50),TPLAC(5
*0),SO(50,100),SUR(50,100),DTB(50,100),DSC(50),DTC(50,100),HT(100),
*STOT(100),SP(100),SC(100),SB(100),HTOT(100),STR(100),SPART(100),
*STRPART(100),TPART(100),HTT(10),HTTOT(10),STTOT(10),STP(10),
*STC(10),STB(10),LEVEL,W(50),IZ(50,50,100),Z(50,50,100),XQ(50),YQ(5
*0),DX(50),DY(50),XI,YI,HACT(50,100),ST1(50,100),SPP(50,100),
*SCP1(50,100),SBIO(50,100),HCCALC(50,100),SUMH1(100),SUMH2(100)
      INTEGER LAY(100),MAT(100),HC(100),MATLAY(50),SLOAD(100),LOAD(50),
*EVENT(10),LLAY(10),SGE,NLAY
      CHARACTER *40 FILL
      CHARACTER *10 DI,CD,FD
      CHARACTER *30 BM
      OPEN (UNIT=3, FILE='V8.DATA', STATUS='OLD')
      OPEN (UNIT=4, FILE='V8.OUT', STATUS='NEW')

c   INPUT DATA

      READ (3,200) FILL
      READ (3,205) DI,CD,FD
      READ (3,206) BM
      READ (3,211) FL,X,XI,YI
      READ (3,207) NE
      READ (3,208) NMAT,NLAY
      READ (3,209) NSTART,SGE
      DO 8 M=1,NE
      READ (3,210) T(M),LAY(M),MAT(M),HC(M),SLOAD(M)
8   CONTINUE
      IF (SGE.LT.0) GOTO 48
      DO 27 I=1,NLAY
      READ (3,218) W(I),XQ(I),YQ(I),DX(I),DY(I)
27  CONTINUE
48  DO 11 J=1,NMAT
      READ (3,215) HO(J),GO(J),CC(J),B(J),C(J),EDG(J),D(J)
11  CONTINUE
      READ (3,216) NP
      IF (NP.EQ.0) GOTO 18
      DO 17 I=1,NP
      READ (3,217) EVENT(I),LLAY(I)
17  CONTINUE
200 FORMAT(A40)
205 FORMAT(A10,A10,A10)
206 FORMAT(A30)
207 FORMAT(I3)
208 FORMAT(I3,I3)
209 FORMAT(I3,I3)
210 FORMAT(F8.1,4I3)
211 FORMAT(4F7.3)
215 FORMAT(F6.3,F6.3,F8.5,E12.6,E12.6,F9.6,f10.7)
216 FORMAT(I2)
217 FORMAT(I3,I3)
218 FORMAT(F6.3,4F7.3)
18  WRITE (4,300) FILL
      WRITE (4,305) DI,CD,FD
      WRITE (4,306) BM
      WRITE (4,307) FL,X,XI,YI
      WRITE (4,310) NE,NMAT,NSTART
      DO 9 I=1,NE
      WRITE (4,312) I,T(I),LAY(I),MAT(I),HC(I),SLOAD(I)
9   CONTINUE
      WRITE (4,311)
      DO 7 I=1,NMAT
      WRITE (4,313) I,HO(I),GO(I)
7   CONTINUE
      WRITE (4,314)
      DO 12 I=1,NMAT
      WRITE (4,320) I,CC(I),B(I),C(I),EDG(I),D(I)

```

```

12  CONTINUE
    IF (SGE.LT.0) GOTO 49
    WRITE (4,308)
    DO 28 I=1,NLAY
        WRITE(4,309) I,W(I),XQ(I),YQ(I),DX(I),DY(I)
28  CONTINUE
300  FORMAT('EVALUATION OF SANITARY LANDFILL SETTLEMENTS',//
*'PROGRAM MSWSET - VERSION 08',///'LOCATION/NAME = ',A40,/)
305  FORMAT('INITIAL DATE OF CONSTRUCTION = ',A10,/'DATE OF THE LANDFILL
*L CLOSURE = ',A10,/'DATA FOR FINAL PREDICTION = ',A10,/)
306  FORMAT('MONITORING DEVICE = ',A30)
307  FORMAT('FOUNDATION LEVEL (m) = ',F7.3,/, 'DISTANCE TO THE CENTER OF
* THE SURCHARGE (m) = ',F6.3,/, 'X COORDINATE OF THE MEASUREMENT POIN
*T(m) = ',F7.3,/, 'Y COORDINATE OF THE MEASUREMENT POINT(m) = ',F7.3)
308  FORMAT(/, 'SURCHARGE CHARACTERISTICS',/, 'LAYER', 2x, 'WIDTH(m)', 2x,
*'X COORDINATE', 2x, 'Y COORDINATE', 2x, 'X LENGHT(m)', 2x, 'Y LENGHT(m)'
*,/)
309  FORMAT(I3, 4x, F7.3, 5x, F7.3, 8x, F7.3, 6x, F7.3, 6x, F7.3)
310  FORMAT(/ 'BASIC DATA', // 'NUMBER OF CONSTRUCTION AND AFTERCARE EVENT
*S = ', I2, / 'NUMBER OF MATERIALS/CONSTRUCTION LAYERS = ', I2, /
*'EVENT NUMBER SINCE A RELATIVE DEFORMATION WILL BE CALCULATED = ',
*I2, //, 'BASIC DATA OF THE EVENTS', //
*'EVENT', 2x, 'TIME (days)', 2x, 'LAYER', 2x, 'MATERIAL', 2x,
*'DISPOSAL', 2x, 'LOAD CONTROL', /)
312  FORMAT(1x, I2, 4x, F7.1, 6x, I3, 5x, I3, 8x, I3, 8x, I3)
311  FORMAT(/ 'BASIC DATA OF THE MATERIALS/LAYERS', //
*'LAYER', 2x, 'HEIGHT(m)', 2x, 'MSW DENSITY(kN/m3)' //)
313  FORMAT(1x, I2, 5x, F6.3, 10x, F6.3, /)
314  FORMAT(/ 'MATERIAL/LAYERS PROPERTIES', //, 9x, 'PRIMARY', 5x, 'SECONDARY
*', 5x, 'RATE OF', 5x, 'COMPRESSION', 5x, 'RATE OF', /, 7x, 'COMPRESSION',
*3x, 'MECHANICAL', 3x, 'SECONDARY', 3x, 'FACTOR DUE TO', 3x, 'SECONDARY', /
*', 'LAYER', 5x, 'INDEX', 5x, 'COMPRESSION', 3x, 'MECHANICAL', 2x,
*'DECOMPOSITION', 3x, 'BIOLOGICAL', /, 10x, '(Cc)', 7x, 'INDEX (b)', 3x,
*'COMPRESSION', 6x, '(EDG)', 6x, 'COMPRESSION', /, 22x, '(1/kPa)', 4x,
*' (c) (1/day)', 17x, '(D) (1/day)', //)
320  FORMAT(1x, I2, 5x, F8.5, 5x, E12.6, 5x, E12.6, 6x, F9.6, 5x, f10.7, /)

c  CALCULATION OF THE STATE VALUES

49  DO 440 M=1,NE
    N=LAY(M)
    IF(HC(M).NE.1) GOTO 441
    TPLAC(N)=T(M)
    MATLAY(N)=MAT(M)
    LOAD(N)=SLOAD(M)
441  DO 442 I=1,N
    N1=MATLAY(I)
    HACT(I,M)=HO(N1)
442  CONTINUE
440  CONTINUE
    ITER=1
    MAX=10
    ER=0.01

600  DO 13 M=1,NE
    N=LAY(M)
    DO 10 I=1,N
    NN=MATLAY(I)
    SO(I,M)=HO(NN)*GO(NN)/2
    SUR(I,M)=0
    IF(I.EQ.N) GOTO 15
    DO 80 II=(I+1),N
    NN=MATLAY(II)
    IF(SGE.LT.0.OR.(W(II).EQ.0.OR.(DX(II).EQ.0.AND.DY(II).EQ.0))) GOTO
*16
    Z(II,I,M)=0
    DO 19 J=I,(II-1)
    NJ=MATLAY(J)
    IF(J.EQ.I) GOTO 22
    ZC=HACT(J,M)
    GOTO 23
22  ZC=0.5*HACT(J,M)
23  Z(II,I,M)=Z(II,I,M)+ZC
19  CONTINUE

```

```

      IF(SGE.EQ.1) THEN
      CALL STRIP(I,II,M,X,W,Z,IZ)
      ELSE
      CALL RECTANGULAR(I,II,M,XI,YI,XQ,YQ,DX,DY,Z,IZ)
      END IF
      GOTO 24
16  IZ(II,I,M)=1
24  SUR1=HO(NN)*GO(NN)*IZ(II,I,M)
      SUR(I,M)=SUR(I,M)+SUR1
80  CONTINUE
15  DTB(I,M)=T(M)-TPLAC(I)
10  CONTINUE
      DO 20 J=1,N
      NN=MATLAY(J)
      DSC(J)=HO(NN)*GO(NN)
      DTC(J,M)=T(M)-TPLAC(J)
20  CONTINUE
13  CONTINUE

c  CALCULATION OF THE SETTLEMENTS

      CALL PRIMARY(SO,SUR,HO,CC,LAY,MATLAY,NE,SP,NP,EVENT,LLAY,STP,SPP)
      CALL CREEP(HO,B,C,DSC,DTC,LAY,MATLAY,NE,SC,NP,EVENT,LLAY,STC,IZ,
*SCP1)
      CALL BIOLOGICAL(HO,EDG,D,DTB,LAY,MATLAY,NE,SB,NP,EVENT,LLAY,STB,
*SBIO)

c  ITERATION PROCESS ON HEIGHTS(Hact) AND DEPTHS(Z) VALUES

      CONV=0
      DO 450 M=1,NE
      SUMH1(M)=0
      SUMH2(M)=0
      DO 452 I=1,LAY(M)
      NI=MATLAY(I)
      ST1(I,M)=SPP(I,M)+SCP1(I,M)+SBIO(I,M)
      HCALC(I,M)=HO(NI)-ST1(I,M)
      SUMH1(M)=SUMH1(M)+(ABS(HACT(I,M)-HCALC(I,M)))**2
      SUMH2(M)=SUMH2(M)+(ABS(HCALC(I,M)))**2
452  CONTINUE
      CVG=SUMH1(M)**0.5/SUMH2(M)**0.5
      IF(CVG.LE.ER) GOTO 450
      CONV=1
450  CONTINUE
      IF(CONV.EQ.0) GOTO 500
      DO 454 M=1,NE
      DO 456 I=1,LAY(M)
      HACT(I,M)=HCALC(I,M)
456  CONTINUE
454  CONTINUE
      ITER=ITER+1
      IF(ITER.LE.MAX) GOTO 600
      WRITE(4,458)
458  FORMAT('WARNING: Z VALUES DO NOT CONVERGE',/)

c  PRESENTATION OF THE FINAL RESULTS

500  WRITE(4,365) ITER,ER
365  FORMAT('FINAL RESULTS',//,'NUMBER OF ITERATIONS=',I3,/,
*, 'MAXIMUM TOLERANCE=',F7.5,/,
* 'PARTIAL SETTLEMENTS AFTER TIME T',//,'EVENT',2x,'TIME(days)',2x,
* 'PRIMARY(m)',2x,'CREEP(m)',2x,'BIOLOGICAL(m)',/)
      DO 145 M=1,NE
      WRITE(4,360) M,T(M),SP(M),SC(M),SB(M)
360  FORMAT(1x,I2,4x,F7.1,5x,F7.4,4x,F7.4,5x,F7.4)
145  CONTINUE
      WRITE(4,319)
319  FORMAT('TOTAL COMPRESSION RESULTS AFTER TIME T',//,'EVENT',2x
*, 'TIME(days)',2x,'SETTLEMENT(m)',2x,'ACTUAL HEIGHT(m)',2x,'STRAIN
*(%)',/)
      DO 21 M=1,NE
      HT(M)=0
      N=LAY(M)
      DO 25 I=1,N

```

```

        IF (LOAD(I).EQ.1) GOTO 25
        NN=MATLAY(I)
        HT(M)=HT(M)+HO(NN)
25    CONTINUE
        STOT(M)= SP(M)+SC(M)+SB(M)
        HTOT(M)=HT(M)-STOT(M)
        STR(M)=STOT(M)/HT(M)*100
        WRITE (4,321) M,T(M),STOT(M),HTOT(M),STR(M)
321   FORMAT(1x,I2,4x,F7.1,5x,F8.3,9x,F8.3,9x,F6.2)
21    CONTINUE

c    RELATIVE SETTLEMENT CURVE CONSTRUCTION

        IF (NSTART.EQ.0) GOTO 334
        HPART=HTOT(NSTART)
        TZERO=T(NSTART)
        SZERO=STOT(NSTART)
        WRITE(4,322) T(NSTART),HTOT(NSTART),STR(NSTART)
322   FORMAT(//'RELATIVE COMPRESSION RESULTS',//'INITIAL TIME (days) =',
        *F7.1,/'ACTUAL HEIGHT(m) =',F6.2,/'STRAIN UNTIL THIS TIME(%) =',
        *F6.2,//'RELATIVE TIME(days)',2x,'RELATIVE SETTLEMENT(m)',2x,
        *'RELATIVE STRAIN(%)',/)
        DO 30 M=NSTART,NE
        SPART(M)=STOT(M)-SZERO
        STRPART(M)=SPART(M)/HPART*100
        TPART(M)=T(M)-TZERO
        WRITE (4,335) TPART(M),SPART(M),STRPART(M)
335   FORMAT(3x,F7.1,16x,F7.4,16x,F7.4)
30    CONTINUE

c    CHECKING OF INTERMEDIATE POINTS HEIGHTS AND SETTLEMENTS

334   IF (NP.EQ.0) GOTO 340
        WRITE (4,336)
336   FORMAT(//'HEIGHTS AND SETTLEMENTS OF INTERMEDIATE POINTS',//
        *'EVENT',2x,'TIME (days)',2x,'REFERENCE LAYER',2x,'SETTLEMENT(m)',
        *2x,'HEIGHT(m)',2x,'LEVEL(m)',/)
        DO 32 I=1,NP
        M=EVENT(I)
        N=LLAY(I)
        HTT(I)=0
        DO 34 J=1,N
        NN=MATLAY(J)
        HTT(I)=HTT(I)+HO(NN)
34    CONTINUE
        STTOT(I)=STP(I)+STC(I)+STB(I)
        HTTOT(I)=HTT(I)-STTOT(I)
        LEVEL=HTTOT(I)+FL
        WRITE (4,337) M,T(M),LLAY(I),STTOT(I),HTTOT(I),LEVEL
337   FORMAT(1x,I2,6x,F7.1,12x,I2,10x,F6.3,7x,F6.3,5x,F7.3)
32    CONTINUE

340   CLOSE(3)
        CLOSE(4)
        STOP
        END

c    EVALUATION OF THE PRIMARY MECHANICAL COMPRESSION

        SUBROUTINE PRIMARY(A,AA,F,FF,LL,MM,N,SP,NP,EVENT,LLAY,STP,SPP)
        INTEGER M,I,K,N,NN,NP,NK,II,LL(100),MM(50),EVENT(10),LLAY(10)
        REAL A(50,100),AA(50,100),F(50),FF(50),SPP(50,100),SP(100),STPP,
        *STP(10)
        DO 40 M=1,N
        K=LL(M)
        SP(M)=0
        DO 45 I=1,K
        IF (I.EQ.K) GOTO 45
        NN=MM(I)
        SPP(I,M)=F(NN)*FF(NN)*ALOG10((A(I,M)+AA(I,M))/A(I,M))
        SP(M)=SP(M)+SPP(I,M)
45    CONTINUE
40    CONTINUE

```

```

      IF(NP.EQ.0) GOTO 44
      DO 41 I=1,NP
      M=EVENT(I)
      NK=LLAY(I)
      STP(I)=0
      DO 42 II=1,NK
      IF(NK.EQ.LL(M).AND.II.EQ.NK) GOTO 42
      NN=MM(II)
      STPP=F(NN)*FF(NN)*ALOG10((A(II,M)+AA(II,M))/A(II,M))
      STP(I)=STP(I)+STPP
42    CONTINUE
41    CONTINUE

44    END

c    EVALUATION OF THE SECONDARY MECHANICAL COMPRESSION (CREEP)

      SUBROUTINE CREEP(HO,B,C,DSC,DTC,LL,MM,N,SC,NP,EVENT,LLAY,STC,IZ,
*SCP1)
      INTEGER M,I,J,K,N,NP,NK,NN,II,LL(100),MM(50),EVENT(10),LLAY(10)
      REAL DSC(50),DTC(50,100),HO(50),B(50),C(50),SCP(50,50,100),SC(100)
* ,STC(10),STCP,IZ(50,50,100),SCP1(50,100),FCARG
      DO 50 M=1,N
      SC(M)=0
      K=LL(M)
      DO 55 I=1,K
      SCP1(I,M)=0
      NN=MM(I)
      DO 60 J=I,K
      IF(I.EQ.J)THEN
      FCARG=DSC(J)/2
      IZ(J,I,M)=1
      ELSE
      FCARG=DSC(J)
      END IF
      SCP(J,I,M)=HO(NN)*B(NN)*IZ(J,I,M)*FCARG*(1-EXP(-C(NN)*DTC(J,M)))
      SCP1(I,M)=SCP1(I,M)+SCP(J,I,M)
      SC(M)=SC(M)+SCP(J,I,M)
60    CONTINUE
55    CONTINUE
50    CONTINUE

      IF(NP.EQ.0) GOTO 54
      DO 51 I=1,NP
      M=EVENT(I)
      NK=LLAY(I)
      STC(I)=0
      DO 52 II=1,NK
      IF(NK.EQ.LL(M).AND.II.EQ.NK) GOTO 52
      NN=MM(II)
      DO 53 J=II,LL(M)
      IF(II.EQ.J)THEN
      FCARG=DSC(J)/2
      IZ(J,II,M)=1
      ELSE
      FCARG=DSC(J)
      END IF
      STCP=HO(NN)*B(NN)*IZ(J,II,M)*FCARG*(1-EXP(-C(NN)*DTC(J,M)))
      STC(I)=STC(I)+STCP
53    CONTINUE
52    CONTINUE
51    CONTINUE

54    END

c    EVALUATION OF THE SECONDARY BIOLOGICAL COMPRESSION (DEGRADATION)

      SUBROUTINE BIOLOGICAL(HO,EDG,D,DTB,LL,MM,N,SB,NP,EVENT,LLAY,STB,
*SBIO)
      INTEGER M,I,K,N,NN,NP,NK,II,LL(100),MM(50),EVENT(10),LLAY(10)
      REAL HO(50),EDG(50),D(50),DTB(50,100),SBIO(50,100),SB(100),STB(10)
* ,STBIO
      DO 70 M=1,N
      SB(M)=0

```



```

K=LL(M)
DO 75 I=1,K
NN=MM(I)
SBIO(I,M)=HO(NN)*EDG(NN)*(1-EXP(-D(NN)*DTB(I,M)))
SB(M)=SB(M)+SBIO(I,M)
75 CONTINUE
70 CONTINUE

IF(NP.EQ.0) GOTO 74
DO 71 I=1,NP
M=EVENT(I)
NK=LLAY(I)
STB(I)=0
DO 72 II=1,NK
NN=MM(II)
STBIO=HO(NN)*EDG(NN)*(1-EXP(-D(NN)*DTB(II,M)))
STB(I)=STB(I)+STBIO
72 CONTINUE
71 CONTINUE

74 END

c CALCULATION OF THE STRESS INFLUENCE DUE TO RECTANGULAR LOAD

SUBROUTINE RECTANGULAR(I,II,M,XI,YI,XQ,YQ,DX,DY,Z,IZ)
INTEGER I,II,M,SIT
REAL XI,YI,XQ(50),YQ(50),DX(50),DY(50),Z(50,50,100),IZ(50,50,100),
*LA,BA,LB,BB,LC,BC,LD,BD,MA,NA,MB,NB,MC,NC,MD,ND,IZA,IZB,IZC,IZD
PI=3.141592654
IF(XI.GE.XQ(II).AND.XI.LE.(XQ(II)+DX(II)).AND.YI.LE.(YQ(II)+DY(II)
*) .AND.YI.GE.YQ(II)) GOTO 400
IF((XI.LE.XQ(II).OR.XI.GE.(XQ(II)+DX(II))).AND.(YI.LE.YQ(II).OR.YI
*.GE.(YQ(II)+DY(II)))) GOTO 410
IF(XI.LT.XQ(II)) GOTO 420
IF(XI.GT.(XQ(II)+DX(II))) GOTO 422
IF(YI.GT.(YQ(II)+DY(II))) GOTO 424

c CASE 1
c CASE 1.4

c Rectangle A
SIT=1
LA=XI-XQ(II)
BA=(YQ(II)+DY(II))-YI
c Rectangle B
LB=(XQ(II)+DX(II))-XI
BB=(YQ(II)+DY(II))-YI
c Rectangle C
LC=XI-XQ(II)
BC=YQ(II)-YI
c Rectangle D
LD=(XQ(II)+DX(II))-XI
BD=YQ(II)-YI
GOTO 418

c CASE 1.3

c Rectangle A
424 LA=XI-XQ(II)
BA=YI-YQ(II)
c Rectangle B
LB=(XQ(II)+DX(II))-XI
BB=YI-YQ(II)
c Rectangle C
LC=XI-XQ(II)
BC=YI-(YQ(II)+DY(II))
c Rectangle D
LD=(XQ(II)+DX(II))-XI
BD=YI-(YQ(II)+DY(II))
GOTO 418

c CASE 1.2

c Rectangle A

```

```

422  LA=XI-XQ(II)
     BA=YI-YQ(II)
c    Rectangle B
     LB=XI-XQ(II)
     BB=(YQ(II)+DY(II))-YI
c    Rectangle C
     LC=XI-(XQ(II)+DX(II))
     BC=YI-YQ(II)
c    Rectangle D
     LD=XI-(XQ(II)+DX(II))
     BD=(YQ(II)+DY(II))-YI
     GOTO 418

c    CASE 1.1

c    Rectangle A
420  LA=(XQ(II)+DX(II))-XI
     BA=YI-YQ(II)
c    Rectangle B
     LB=(XQ(II)+DX(II))-XI
     BB=(YQ(II)+DY(II))-YI
c    Rectangle C
     LC=XQ(II)-XI
     BC=YI-YQ(II)
c    Rectangle D
     LD=XQ(II)-XI
     BD=(YQ(II)+DY(II))-YI
     GOTO 418

c    CASE 3

410  SIT=3
     IF(XI.LE.XQ(II).AND.YI.LE.YQ(II)) GOTO 412
     IF(XI.LE.XQ(II).AND.YI.GE.(YQ(II)+DY(II))) GOTO 414
     IF(XI.GE.(XQ(II)+DX(II)).AND.YI.LE.YQ(II)) GOTO 416

c    CASE 3.4

c    Rectangle A
     LA=XI-XQ(II)
     BA=YI-YQ(II)
c    Rectangle B
     LB=XI-XQ(II)
     BB=YI-(YQ(II)+DY(II))
c    Rectangle C
     LC=XI-(XQ(II)+DX(II))
     BC=DY(II)
c    Rectangle D
     LD=XI-(XQ(II)+DX(II))
     BD=YI-(YQ(II)+DY(II))
     GOTO 418

c    CASE 3.3

c    Rectangle A
416  LA=XI-XQ(II)
     BA=(YQ(II)+DY(II))-YI

c    Rectangle B
     LB=XI-XQ(II)
     BB=YQ(II)-YI
c    Rectangle C
     LC=XI-(XQ(II)+DX(II))
     BC=DY(II)
c    Rectangle D
     LD=XI-(XQ(II)+DX(II))
     BD=YQ(II)-YI
     GOTO 418

c    CASE 3.2

c    Rectangle A
414  LA=(XQ(II)+DX(II))-XI
     BA=YI-YQ(II)

```

```

c   Rectangle B
      LB=(XQ(II)+DX(II))-XI
      BB=YI-(YQ(II)+DY(II))
c   Rectangle C
      LC=XQ(II)-XI
      BC=DY(II)
c   Rectangle D
      LD=XQ(II)-XI
      BD=YI-(YQ(II)+DY(II))
      GOTO 418

c   CASE 3.1

c   Rectangle A
412  LA=(XQ(II)+DX(II))-XI
      BA=(YQ(II)+DY(II))-YI
c   Rectangle B
      LB=(XQ(II)+DX(II))-XI
      BB=YQ(II)-YI
c   Rectangle C
      LC=XQ(II)-XI
      BC=DY(II)
c   Rectangle D
      LD=XQ(II)-XI
      BD=YQ(II)-YI
      GOTO 418

c   CASE 2

c   Rectangle A
400  SIT=2
      LA=XI-XQ(II)
      BA=YI-YQ(II)
c   Rectangle B
      LB=XI-XQ(II)
      BB=(YQ(II)+DY(II))-YI
c   Rectangle C
      LC=(XQ(II)+DX(II))-XI
      BC=YI-YQ(II)
c   Rectangle D
      LD=(XQ(II)+DX(II))-XI
      BD=(YQ(II)+DY(II))-YI

418  IF(Z(II,I,M).EQ.0) THEN
      IZA=0.25
      IZB=0.25
      IZC=0.25
      IZD=0.25
      GOTO 425
      ELSE

          MA=BA/Z(II,I,M)
          NA=LA/Z(II,I,M)
          IZA=(1/(4*PI))*((2*MA*NA*((MA**2+NA**2+1)**0.5)*(MA**2+NA**2+
*2))/((MA**2+NA**2+1+MA**2*NA**2)*(MA**2+NA**2+1))+ATAN(2*MA*NA*
*((MA**2+NA**2+1)**0.5)/(MA**2+NA**2+1-MA**2*NA**2))+PI*((MA**2+
*NA**2+1-MA**2*NA**2)-ABS(MA**2+NA**2+1-MA**2*NA**2))/(2*(MA**2+
*NA**2+1-MA**2*NA**2)))
          MB=BB/Z(II,I,M)
          NB=LB/Z(II,I,M)
          IZB=(1/(4*PI))*((2*MB*NB*((MB**2+NB**2+1)**0.5)*(MB**2+NB**2+
*2))/((MB**2+NB**2+1+MB**2*NB**2)*(MB**2+NB**2+1))+ATAN(2*MB*NB*
*((MB**2+NB**2+1)**0.5)/(MB**2+NB**2+1-MB**2*NB**2))+PI*((MB**2+
*NB**2+1-MB**2*NB**2)-ABS(MB**2+NB**2+1-MB**2*NB**2))/(2*(MB**2+
*NB**2+1-MB**2*NB**2)))
          MC=BC/Z(II,I,M)
          NC=LC/Z(II,I,M)
          IZC=(1/(4*PI))*((2*MC*NC*((MC**2+NC**2+1)**0.5)*(MC**2+NC**2+
*2))/((MC**2+NC**2+1+MC**2*NC**2)*(MC**2+NC**2+1))+ATAN(2*MC*NC*
*((MC**2+NC**2+1)**0.5)/(MC**2+NC**2+1-MC**2*NC**2))+PI*((MC**2+
*NC**2+1-MC**2*NC**2)-ABS(MC**2+NC**2+1-MC**2*NC**2))/(2*(MC**2+
*NC**2+1-MC**2*NC**2)))
          MD=BD/Z(II,I,M)
          ND=LD/Z(II,I,M)

```

```

      IZD=(1/(4*PI))*((2*MD*ND*((MD**2+ND**2+1)**0.5)*(MD**2+ND**2+
*2))/((MD**2+ND**2+1+MD**2*ND**2)*(MD**2+ND**2+1))+ATAN(2*MD*ND*
*((MD**2+ND**2+1)**0.5)/(MD**2+ND**2+1-MD**2*ND**2))+PI*((MD**2+
*ND**2+1-MD**2*ND**2)-ABS(MD**2+ND**2+1-MD**2*ND**2))/(2*(MD**2+
*ND**2+1-MD**2*ND**2)))
      END IF

425  IF(SIT.EQ.3) GOTO 426
      IF(SIT.EQ.2) GOTO 428
      IZ(II,I,M)=IZA+IZB-IZC-IZD
      GOTO 430
426  IZ(II,I,M)=IZA-IZB-IZC+IZD
      GOTO 430
428  IZ(II,I,M)=IZA+IZB+IZC+IZD

430  END

c    CALCULATION OF THE STRESS INFLUENCE DUE TO STRIP LOAD

      SUBROUTINE STRIP(I,II,M,X,W,Z,IZ)
      INTEGER I,II,M
      REAL X,W(50),Z(50,50,100),IZ(50,50,100),T1,T2,T3,T4,T5,T6
      T1=ATAN((X-W(II)/2)/Z(II,I,M))
      T2=ATAN((X+W(II)/2)/Z(II,I,M))
      PI=3.141592654
      T3=2*W(II)*Z(II,I,M)-4*X*Z(II,I,M)-W(II)**2*T1+4*W(II)*X*T1-4*X**2
**T1-4*Z(II,I,M)**2*T1
      T4=-2*W(II)*Z(II,I,M)-4*X*Z(II,I,M)-W(II)**2*T2-4*W(II)*X*T2-4*X**
*2*T2-4*Z(II,I,M)**2*T2
      T5=2*Z(II,I,M)**3*(W(II)**2-4*W(II)*X+4*X**2+4*Z(II,I,M)**2)
      T6=2*Z(II,I,M)**3*(W(II)**2+4*W(II)*X+4*X**2+4*Z(II,I,M)**2)
      IZ(II,I,M)=(2*Z(II,I,M)**3/PI)*(T3/T5-T4/T6)

      END

```

ARQUIVO DE ENTRADA DE DADOS

'BANDEIRANTES SANITARY LANDFILL'

05/07/197808/08/199517/04/2000

SETTLEMENT PLATE PR05

88.,29.5,10.5,27.

94

8,33

31,0

160.0,1,1,1,0

320.0,2,1,1,0

480.0,3,1,1,0

640.0,4,1,1,0

800.0,5,1,1,0

960.0,6,1,1,0

1120.0,7,1,1,0

1280.0,8,1,1,0

1440.0,9,1,1,0

1500.0,10,2,1,0

3510.0,10,2,0,0

3630.0,11,1,1,0

3750.0,12,1,1,0

3870.0,13,1,1,0

3990.0,14,1,1,0

4110.0,15,1,1,0

4230.0,16,1,1,0

4350.0,17,1,1,0

4470.0,18,1,1,0

4590.0,19,1,1,0

4710.0,20,1,1,0

4770.0,21,2,1,0

5370.0,21,2,0,0

5510.0,22,1,1,0

5650.0,23,1,1,0

5790.0,24,1,1,0

5930.0,25,1,1,0

6070.0,26,1,1,0

6120.0,27,2,1,0

6600.0,27,2,0,0

6840.0,27,2,0,0

6846.0,27,2,0,0

6853.0,27,2,0,0

6856.0,28,3,1,1

6860.0,28,3,0,1

6867.0,28,3,0,1

6874.0,28,3,0,1

6881.0,28,3,0,1

6888.0,28,3,0,1

6895.0,28,3,0,1

6902.0,28,3,0,1

6909.0,28,3,0,1

6913.0,28,3,0,1

6919.0,29,4,1,1

6923.0,29,4,0,1

6937.0,29,4,0,1

6944.0,29,4,0,1

6951.0,29,4,0,1

6954.0,30,5,1,1

6958.0,30,5,0,1

6965.0,30,5,0,1

6966.0,31,6,1,1

6972.0,31,6,0,1

6979.0,31,6,0,1

6986.0,31,6,0,1

6993.0,31,6,0,1

7000.0,31,6,0,1

7007.0,31,6,0,1

7014.0,31,6,0,1

7021.0,32,7,1,1

7036.0,33,8,1,1

7073.0,33,8,0,1

7105.0,33,8,0,1

30,10
30,21
31,27

ARQUIVO DE SAÍDA DE DADOS

EVALUATION OF SANITARY LANDFILL SETTLEMENTS

PROGRAM MSWSET - VERSION 08

LOCATION/NAME = 'BANDEIRANTES SANITARY LANDFILL'

INITIAL DATE OF CONSTRUCTION = 05/07/1978

DATE OF THE LANDFILL CLOSURE = 08/08/1995

DATA FOR FINAL PREDICTION = 17/04/2000

MONITORING DEVICE =SETTLEMENT PLATE PR05

FOUNDATION LEVEL (m) = 88.000

DISTANCE TO THE CENTER OF THE SURCHARGE (m) =29.500

X COORDINATE OF THE MEASUREMENT POINT(m) = 10.500

Y COORDINATE OF THE MEASUREMENT POINT(m) = 27.000

BASIC DATA

NUMBER OF CONSTRUCTION AND AFTERCARE EVENTS =94

NUMBER OF MATERIALS/CONSTRUCTION LAYERS = 8

EVENT NUMBER SINCE A RELATIVE DEFORMATION WILL BE CALCULATED =31

BASIC DATA OF THE EVENTS

EVENT	TIME (days)	LAYER	MATERIAL	DISPOSAL	LOAD CONTROL
1	160.0	1	1	1	0
2	320.0	2	1	1	0
3	480.0	3	1	1	0
4	640.0	4	1	1	0
5	800.0	5	1	1	0
6	960.0	6	1	1	0
7	1120.0	7	1	1	0
8	1280.0	8	1	1	0
9	1440.0	9	1	1	0
10	1500.0	10	2	1	0
11	3510.0	10	2	0	0
12	3630.0	11	1	1	0
13	3750.0	12	1	1	0
14	3870.0	13	1	1	0
15	3990.0	14	1	1	0
16	4110.0	15	1	1	0
17	4230.0	16	1	1	0
18	4350.0	17	1	1	0
19	4470.0	18	1	1	0
20	4590.0	19	1	1	0
21	4710.0	20	1	1	0
22	4770.0	21	2	1	0
23	5370.0	21	2	0	0
24	5510.0	22	1	1	0
25	5650.0	23	1	1	0
26	5790.0	24	1	1	0
27	5930.0	25	1	1	0
28	6070.0	26	1	1	0
29	6120.0	27	2	1	0
30	6600.0	27	2	0	0
31	6840.0	27	2	0	0
32	6846.0	27	2	0	0
33	6853.0	27	2	0	0
34	6856.0	28	3	1	1
35	6860.0	28	3	0	1
36	6867.0	28	3	0	1
37	6874.0	28	3	0	1

38	6881.0	28	3	0	1
39	6888.0	28	3	0	1
40	6895.0	28	3	0	1
41	6902.0	28	3	0	1
42	6909.0	28	3	0	1
43	6913.0	28	3	0	1
44	6919.0	29	4	1	1
45	6923.0	29	4	0	1
46	6937.0	29	4	0	1
47	6944.0	29	4	0	1
48	6951.0	29	4	0	1
49	6954.0	30	5	1	1
50	6958.0	30	5	0	1
51	6965.0	30	5	0	1
52	6966.0	31	6	1	1
53	6972.0	31	6	0	1
54	6979.0	31	6	0	1
55	6986.0	31	6	0	1
56	6993.0	31	6	0	1
57	7000.0	31	6	0	1
58	7007.0	31	6	0	1
59	7014.0	31	6	0	1
60	7021.0	32	7	1	1
61	7036.0	33	8	1	1
62	7073.0	33	8	0	1
63	7105.0	33	8	0	1
64	7134.0	33	8	0	1
65	7147.0	33	8	0	1
66	7161.0	33	8	0	1
67	7175.0	33	8	0	1
68	7196.0	33	8	0	1
69	7203.0	33	8	0	1
70	7224.0	33	8	0	1
71	7252.0	33	8	0	1
72	7284.0	33	8	0	1
73	7295.0	33	8	0	1
74	7317.0	33	8	0	1
75	7330.0	33	8	0	1
76	7346.0	33	8	0	1
77	7374.0	33	8	0	1
78	7409.0	33	8	0	1
79	7437.0	33	8	0	1
80	7466.0	33	8	0	1
81	7500.0	33	8	0	1
82	7527.0	33	8	0	1
83	7555.0	33	8	0	1
84	7589.0	33	8	0	1
85	7619.0	33	8	0	1
86	7647.0	33	8	0	1
87	7675.0	33	8	0	1
88	7709.0	33	8	0	1
89	7772.0	33	8	0	1
90	7800.0	33	8	0	1
91	7830.0	33	8	0	1
92	7863.0	33	8	0	1
93	7892.0	33	8	0	1
94	7924.0	33	8	0	1

BASIC DATA OF THE MATERIALS/LAYERS

LAYER	HEIGHT (m)	MSW DENSITY (kN/m ³)
1	4.000	7.000
2	1.000	17.600
3	.561	4.805
4	.704	4.020
5	.560	5.295
6	.636	4.805

7	1.034	4.805
8	.800	17.600

MATERIAL/LAYERS PROPERTIES

LAYER	PRIMARY COMPRESSION INDEX (Cc)	SECONDARY MECHANICAL COMPRESSION INDEX (b) (1/kPa)	RATE OF SECONDARY MECHANICAL COMPRESSION (c) (1/day)	COMPRESSION FACTOR DUE TO DECOMPOSITION (EDG)	RATE OF SECONDARY BIOLOGICAL COMPRESSION (D) (1/day)
1	.10605	.377119E-03	.697599E-03	.230185	.0009640
2	.00000	.000000E+00	.000000E+00	.000000	.0000000
3	.00000	.000000E+00	.000000E+00	.000000	.0000000
4	.00000	.000000E+00	.000000E+00	.000000	.0000000
5	.00000	.000000E+00	.000000E+00	.000000	.0000000
6	.00000	.000000E+00	.000000E+00	.000000	.0000000
7	.00000	.000000E+00	.000000E+00	.000000	.0000000
8	.00000	.000000E+00	.000000E+00	.000000	.0000000

SURCHARGE CHARACTERISTICS

LAYER	WIDTH(m)	X COORDINATE	Y COORDINATE	X LENGHT(m)	Y LENGHT(m)
1	.000	.000	.000	.000	.000
2	.000	.000	.000	.000	.000
3	.000	.000	.000	.000	.000
4	.000	.000	.000	.000	.000
5	.000	.000	.000	.000	.000
6	.000	.000	.000	.000	.000
7	.000	.000	.000	.000	.000
8	.000	.000	.000	.000	.000
9	.000	.000	.000	.000	.000
10	.000	.000	.000	.000	.000
11	.000	.000	.000	.000	.000
12	.000	.000	.000	.000	.000
13	.000	.000	.000	.000	.000
14	.000	.000	.000	.000	.000
15	.000	.000	.000	.000	.000
16	.000	.000	.000	.000	.000
17	.000	.000	.000	.000	.000
18	.000	.000	.000	.000	.000
19	.000	.000	.000	.000	.000
20	.000	.000	.000	.000	.000
21	.000	.000	.000	.000	.000
22	.000	.000	.000	.000	.000
23	.000	.000	.000	.000	.000
24	.000	.000	.000	.000	.000
25	.000	.000	.000	.000	.000
26	.000	.000	.000	.000	.000
27	.000	.000	.000	.000	.000
28	78.600	.701	.701	78.600	73.600
29	75.400	2.283	2.283	75.400	70.440
30	72.300	3.863	3.863	72.300	67.280
31	69.300	5.356	5.356	69.300	64.290
32	65.110	7.445	7.445	65.110	60.110
33	61.030	9.489	9.489	61.030	56.020

FINAL RESULTS

NUMBER OF ITERATIONS= 2
 MAXIMUM TOLERANCE= .01000

PARTIAL SETTLEMENTS AFTER TIME T

Marques, Afonso Celso Moruzzi. Tese de Doutorado, EESC/USP (2001).

EVENT	TIME(days)	PRIMARY(m)	CREEP(m)	BIOLOGICAL(m)
1	160.0	.0000	.0000	.0000
2	320.0	.2024	.0022	.1316
3	480.0	.4989	.0109	.3760
4	640.0	.8574	.0298	.7171
5	800.0	1.2622	.0624	1.1410
6	960.0	1.7039	.1115	1.6359
7	1120.0	2.1765	.1801	2.1917
8	1280.0	2.6754	.2703	2.7997
9	1440.0	3.1973	.3845	3.4523
10	1500.0	3.5725	.4389	3.7240
11	3510.0	3.5725	1.5778	7.6294
12	3630.0	3.9768	1.6077	7.7012
13	3750.0	4.4839	1.6674	7.8658
14	3870.0	5.0301	1.7579	8.1129
15	3990.0	5.6017	1.8801	8.4336
16	4110.0	6.1931	2.0349	8.8199
17	4230.0	6.8014	2.2231	9.2645
18	4350.0	7.4243	2.4453	9.7612
19	4470.0	8.0605	2.7023	10.3042
20	4590.0	8.7089	2.9946	10.8884
21	4710.0	9.3685	3.3228	11.5094
22	4770.0	9.8250	3.5089	11.8458
23	5370.0	9.8250	5.1705	14.3265
24	5510.0	10.3513	5.4679	14.7264
25	5650.0	10.9726	5.8143	15.1921
26	5790.0	11.6261	6.2091	15.7152
27	5930.0	12.2989	6.6516	16.2885
28	6070.0	12.9863	7.1413	16.9056
29	6120.0	13.4610	7.3390	17.1500
30	6600.0	13.4610	9.1049	18.9828
31	6840.0	13.4610	9.7894	19.6262
32	6846.0	13.4610	9.8050	19.6404
33	6853.0	13.4610	9.8233	19.6569
34	6856.0	13.5094	9.8311	19.6640
35	6860.0	13.5094	9.8416	19.6733
36	6867.0	13.5094	9.8599	19.6897
37	6874.0	13.5094	9.8781	19.7058
38	6881.0	13.5094	9.8963	19.7219
39	6888.0	13.5094	9.9143	19.7379
40	6895.0	13.5094	9.9323	19.7538
41	6902.0	13.5094	9.9502	19.7695
42	6909.0	13.5094	9.9680	19.7852
43	6913.0	13.5094	9.9781	19.7941
44	6919.0	13.5565	9.9933	19.8074
45	6923.0	13.5566	10.0035	19.8162
46	6937.0	13.5566	10.0391	19.8468
47	6944.0	13.5566	10.0567	19.8619
48	6951.0	13.5566	10.0743	19.8770
49	6954.0	13.6017	10.0818	19.8834
50	6958.0	13.6017	10.0919	19.8919
51	6965.0	13.6017	10.1096	19.9067
52	6966.0	13.6436	10.1121	19.9088
53	6972.0	13.6437	10.1274	19.9215
54	6979.0	13.6437	10.1452	19.9361
55	6986.0	13.6437	10.1629	19.9506
56	6993.0	13.6437	10.1805	19.9651
57	7000.0	13.6438	10.1980	19.9794
58	7007.0	13.6438	10.2154	19.9937
59	7014.0	13.6438	10.2327	20.0078
60	7021.0	13.7010	10.2500	20.0219
61	7036.0	13.8244	10.2875	20.0517
62	7073.0	13.8247	10.3832	20.1234
63	7105.0	13.8250	10.4640	20.1833
64	7134.0	13.8252	10.5357	20.2361
65	7147.0	13.8253	10.5674	20.2593
66	7161.0	13.8254	10.6012	20.2840
67	7175.0	13.8255	10.6347	20.3083
68	7196.0	13.8257	10.6843	20.3441
69	7203.0	13.8257	10.7007	20.3559
70	7224.0	13.8259	10.7493	20.3908
71	7252.0	13.8261	10.8131	20.4363

72	7284.0	13.8263	10.8846	20.4868
73	7295.0	13.8264	10.9088	20.5037
74	7317.0	13.8266	10.9566	20.5372
75	7330.0	13.8267	10.9846	20.5566
76	7346.0	13.8268	11.0186	20.5802
77	7374.0	13.8270	11.0772	20.6206
78	7409.0	13.8272	11.1490	20.6696
79	7437.0	13.8274	11.2052	20.7077
80	7466.0	13.8276	11.2622	20.7460
81	7500.0	13.8278	11.3277	20.7896
82	7527.0	13.8279	11.3785	20.8232
83	7555.0	13.8281	11.4303	20.8571
84	7589.0	13.8283	11.4919	20.8971
85	7619.0	13.8285	11.5450	20.9314
86	7647.0	13.8286	11.5936	20.9624
87	7675.0	13.8287	11.6412	20.9927
88	7709.0	13.8289	11.6979	21.0283
89	7772.0	13.8292	11.7994	21.0913
90	7800.0	13.8294	11.8431	21.1181
91	7830.0	13.8295	11.8890	21.1460
92	7863.0	13.8296	11.9384	21.1758
93	7892.0	13.8298	11.9809	21.2013
94	7924.0	13.8299	12.0268	21.2285

TOTAL COMPRESSION RESULTS AFTER TIME T

EVENT	TIME(days)	SETTLEMENT(m)	ACTUAL HEIGHT(m)	STRAIN (%)
1	160.0	.000	4.000	.00
2	320.0	.336	7.664	4.20
3	480.0	.886	11.114	7.38
4	640.0	1.604	14.396	10.03
5	800.0	2.466	17.534	12.33
6	960.0	3.451	20.549	14.38
7	1120.0	4.548	23.452	16.24
8	1280.0	5.745	26.255	17.95
9	1440.0	7.034	28.966	19.54
10	1500.0	7.735	29.265	20.91
11	3510.0	12.780	24.220	34.54
12	3630.0	13.286	27.714	32.40
13	3750.0	14.017	30.983	31.15
14	3870.0	14.901	34.099	30.41
15	3990.0	15.915	37.085	30.03
16	4110.0	17.048	39.952	29.91
17	4230.0	18.289	42.711	29.98
18	4350.0	19.631	45.369	30.20
19	4470.0	21.067	47.933	30.53
20	4590.0	22.592	50.408	30.95
21	4710.0	24.201	52.799	31.43
22	4770.0	25.180	52.820	32.28
23	5370.0	29.322	48.678	37.59
24	5510.0	30.546	51.454	37.25
25	5650.0	31.979	54.021	37.18
26	5790.0	33.550	56.450	37.28
27	5930.0	35.239	58.761	37.49
28	6070.0	37.033	60.967	37.79
29	6120.0	37.950	61.050	38.33
30	6600.0	41.549	57.451	41.97
31	6840.0	42.876	56.124	43.31
32	6846.0	42.906	56.094	43.34
33	6853.0	42.941	56.059	43.37
34	6856.0	43.004	55.996	43.44
35	6860.0	43.024	55.976	43.46
36	6867.0	43.059	55.941	43.49
37	6874.0	43.093	55.907	43.53
38	6881.0	43.128	55.872	43.56
39	6888.0	43.162	55.838	43.60
40	6895.0	43.196	55.804	43.63
41	6902.0	43.229	55.771	43.67
42	6909.0	43.263	55.737	43.70
43	6913.0	43.282	55.718	43.72
44	6919.0	43.357	55.643	43.80
45	6923.0	43.376	55.624	43.81

46	6937.0	43.442	55.558	43.88
47	6944.0	43.475	55.525	43.91
48	6951.0	43.508	55.492	43.95
49	6954.0	43.567	55.433	44.01
50	6958.0	43.586	55.414	44.03
51	6965.0	43.618	55.382	44.06
52	6966.0	43.665	55.335	44.11
53	6972.0	43.693	55.307	44.13
54	6979.0	43.725	55.275	44.17
55	6986.0	43.757	55.243	44.20
56	6993.0	43.789	55.211	44.23
57	7000.0	43.821	55.179	44.26
58	7007.0	43.853	55.147	44.30
59	7014.0	43.884	55.116	44.33
60	7021.0	43.973	55.027	44.42
61	7036.0	44.164	54.836	44.61
62	7073.0	44.331	54.669	44.78
63	7105.0	44.472	54.528	44.92
64	7134.0	44.597	54.403	45.05
65	7147.0	44.652	54.348	45.10
66	7161.0	44.711	54.289	45.16
67	7175.0	44.768	54.232	45.22
68	7196.0	44.854	54.146	45.31
69	7203.0	44.882	54.118	45.34
70	7224.0	44.966	54.034	45.42
71	7252.0	45.076	53.924	45.53
72	7284.0	45.198	53.802	45.65
73	7295.0	45.239	53.761	45.70
74	7317.0	45.320	53.680	45.78
75	7330.0	45.368	53.632	45.83
76	7346.0	45.426	53.574	45.88
77	7374.0	45.525	53.475	45.98
78	7409.0	45.646	53.354	46.11
79	7437.0	45.740	53.260	46.20
80	7466.0	45.836	53.164	46.30
81	7500.0	45.945	53.055	46.41
82	7527.0	46.030	52.970	46.49
83	7555.0	46.116	52.884	46.58
84	7589.0	46.217	52.783	46.68
85	7619.0	46.305	52.695	46.77
86	7647.0	46.385	52.615	46.85
87	7675.0	46.463	52.537	46.93
88	7709.0	46.555	52.445	47.03
89	7772.0	46.720	52.280	47.19
90	7800.0	46.791	52.209	47.26
91	7830.0	46.865	52.135	47.34
92	7863.0	46.944	52.056	47.42
93	7892.0	47.012	51.988	47.49
94	7924.0	47.085	51.915	47.56

RELATIVE COMPRESSION RESULTS

INITIAL TIME (days) = 6840.0

ACTUAL HEIGHT(m) = 56.12

STRAIN UNTIL THIS TIME(%) = 43.31

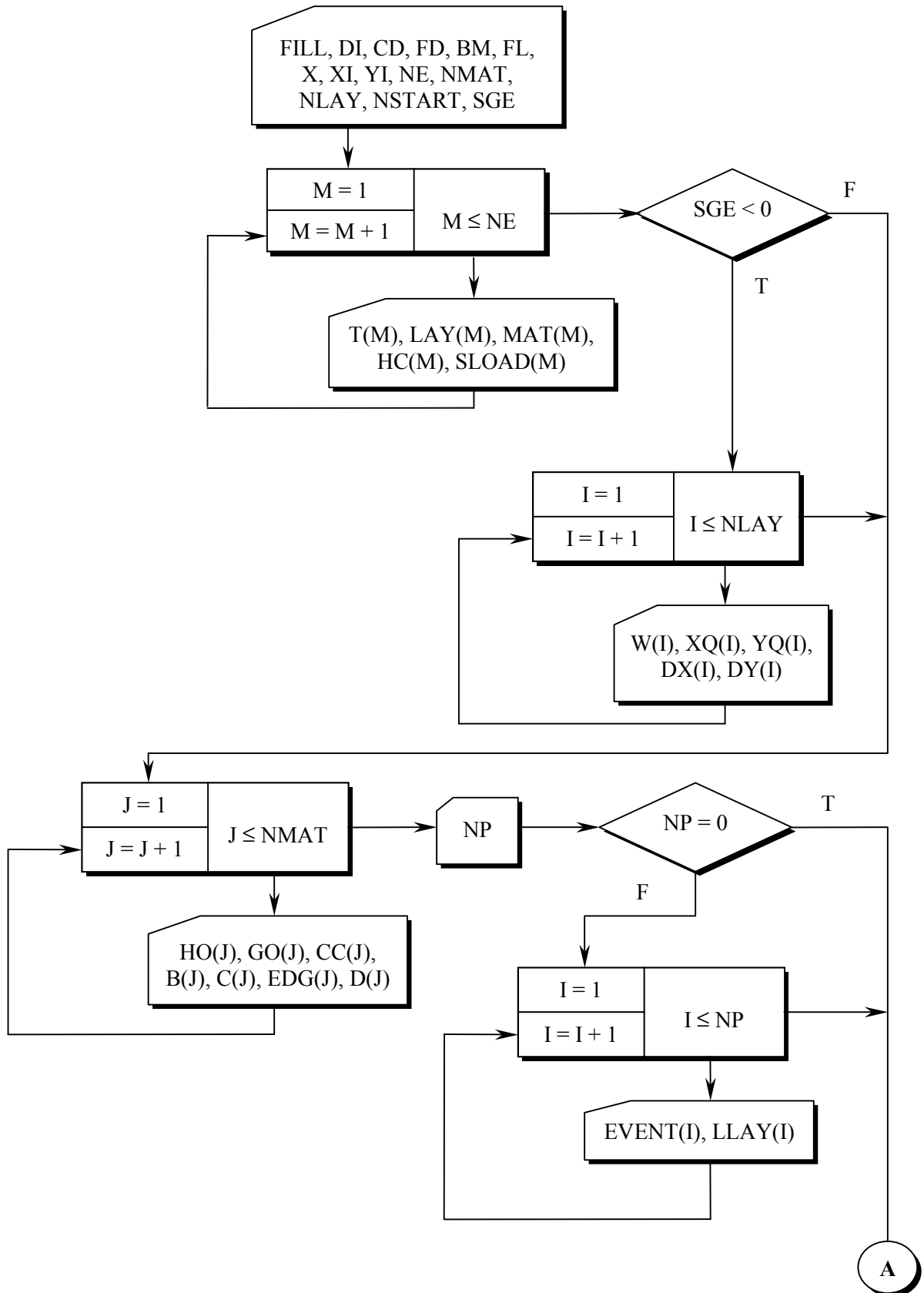
RELATIVE TIME(days)	RELATIVE SETTLEMENT(m)	RELATIVE STRAIN(%)
.0	.0000	.0000
6.0	.0299	.0533
13.0	.0647	.1152
16.0	.1279	.2279
20.0	.1478	.2633
27.0	.1824	.3250
34.0	.2169	.3864
41.0	.2511	.4474
48.0	.2852	.5081
55.0	.3190	.5684
62.0	.3527	.6284
69.0	.3861	.6880
73.0	.4052	.7219
79.0	.4807	.8565
83.0	.4998	.8905

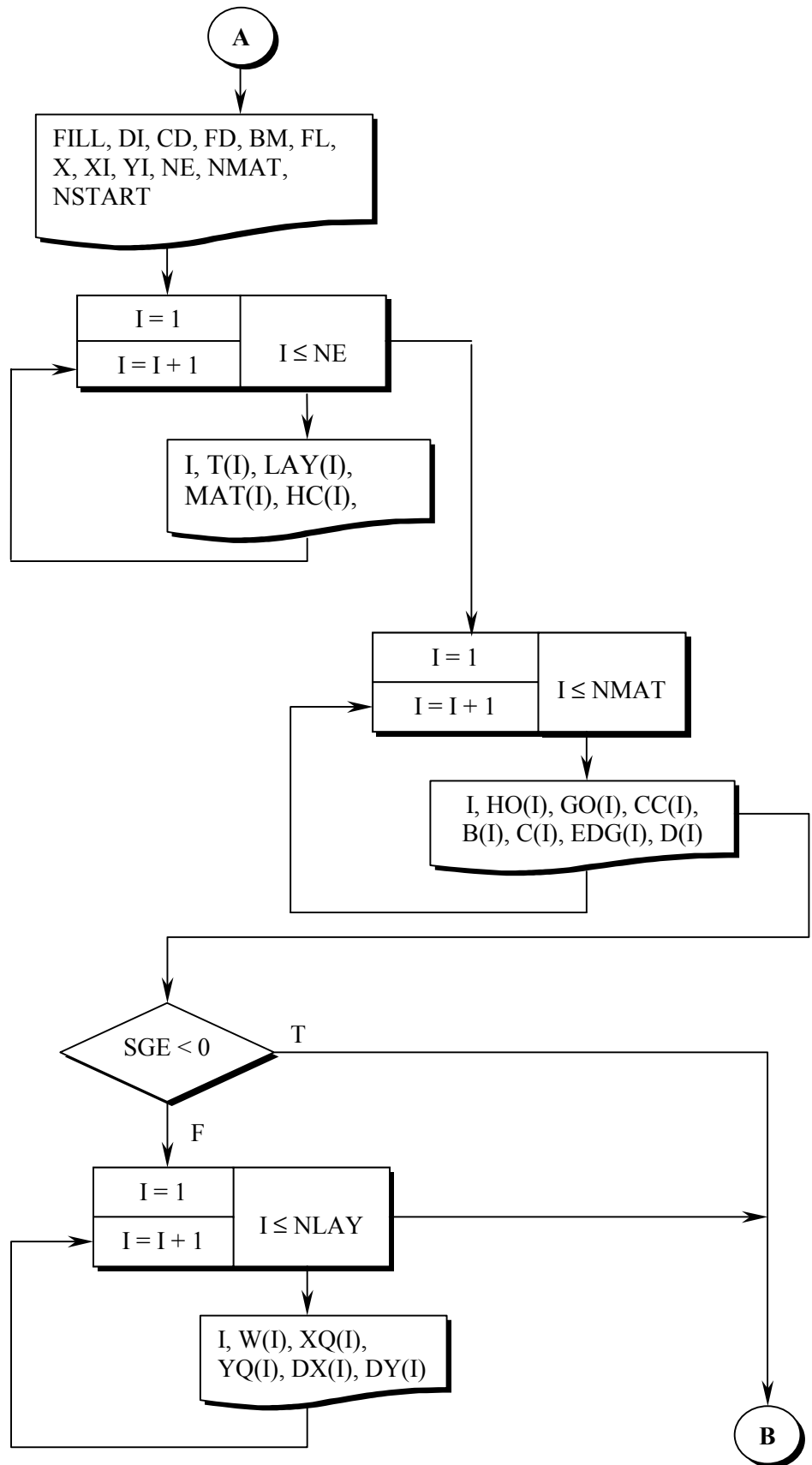
97.0	.5659	1.0084
104.0	.5987	1.0668
111.0	.6314	1.1249
114.0	.6904	1.2301
118.0	.7090	1.2633
125.0	.7416	1.3213
126.0	.7881	1.4042
132.0	.8160	1.4540
139.0	.8485	1.5118
146.0	.8807	1.5693
153.0	.9128	1.6264
160.0	.9447	1.6832
167.0	.9764	1.7397
174.0	1.0079	1.7959
181.0	1.0964	1.9536
196.0	1.2871	2.2933
233.0	1.4548	2.5921
265.0	1.5958	2.8434
294.0	1.7205	3.0656
307.0	1.7755	3.1636
321.0	1.8341	3.2679
335.0	1.8920	3.3711
356.0	1.9776	3.5237
363.0	2.0058	3.5739
384.0	2.0896	3.7232
412.0	2.1990	3.9182
444.0	2.3212	4.1358
455.0	2.3624	4.2094
477.0	2.4439	4.3545
490.0	2.4914	4.4391
506.0	2.5491	4.5419
534.0	2.6483	4.7188
569.0	2.7694	4.9344
597.0	2.8637	5.1026
626.0	2.9593	5.2728
660.0	3.0685	5.4674
687.0	3.1532	5.6183
715.0	3.2391	5.7713
749.0	3.3408	5.9526
779.0	3.4283	6.1085
807.0	3.5081	6.2507
835.0	3.5862	6.3897
869.0	3.6786	6.5545
932.0	3.8434	6.8482
960.0	3.9141	6.9741
990.0	3.9881	7.1059
1023.0	4.0674	7.2473
1052.0	4.1355	7.3685
1084.0	4.2087	7.4991

HEIGHTS AND SETTLEMENTS OF INTERMEDIATE POINTS

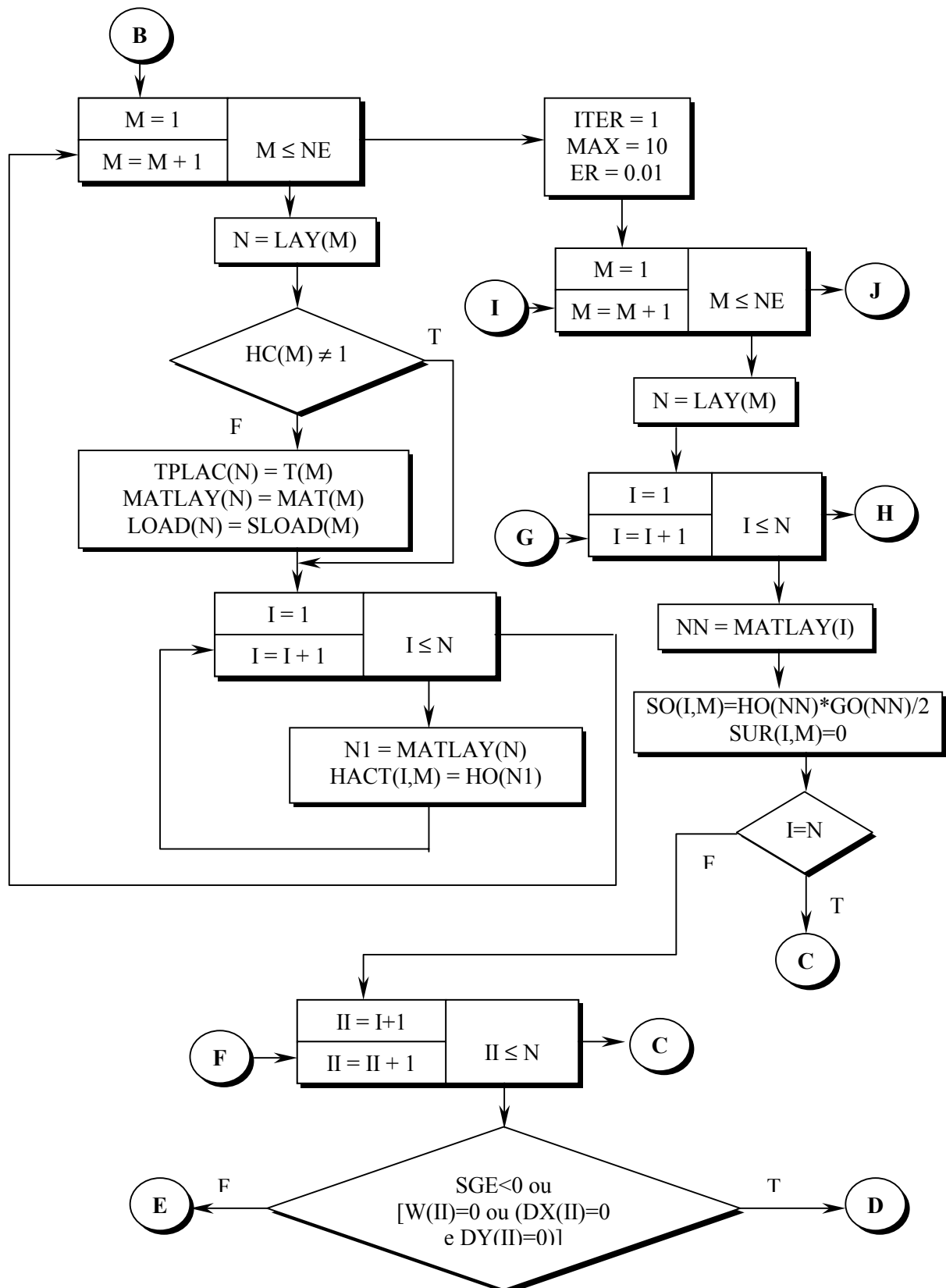
EVENT	TIME (days)	REFERENCE LAYER	SETTLEMENT(m)	HEIGHT(m)	LEVEL(m)
30	6600.0	10	20.509	16.491	104.491
30	6600.0	21	37.280	40.720	128.720
31	6840.0	27	42.877	56.123	144.124

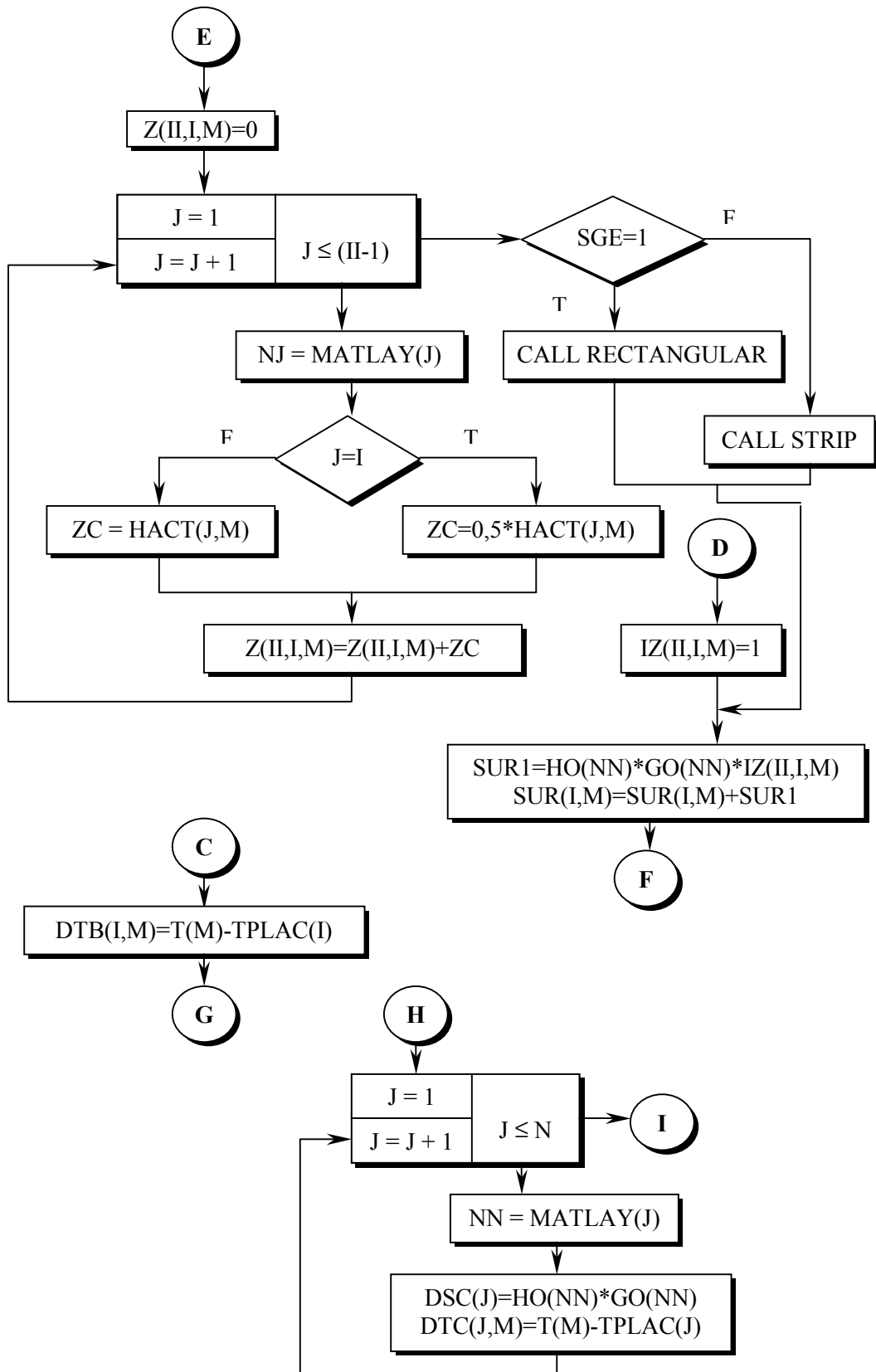
PROGRAMA MSWSET – FLUXOGRAMA

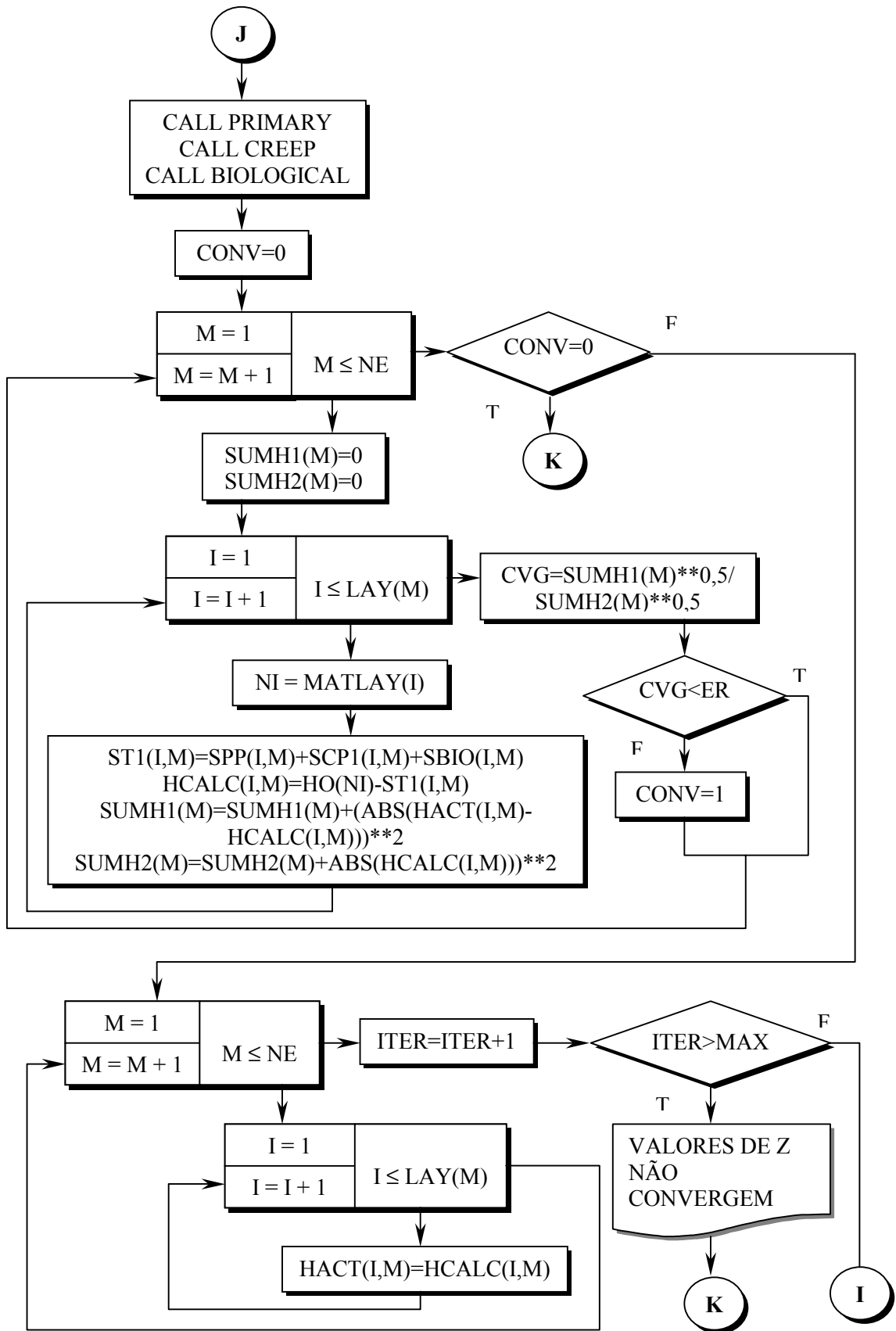


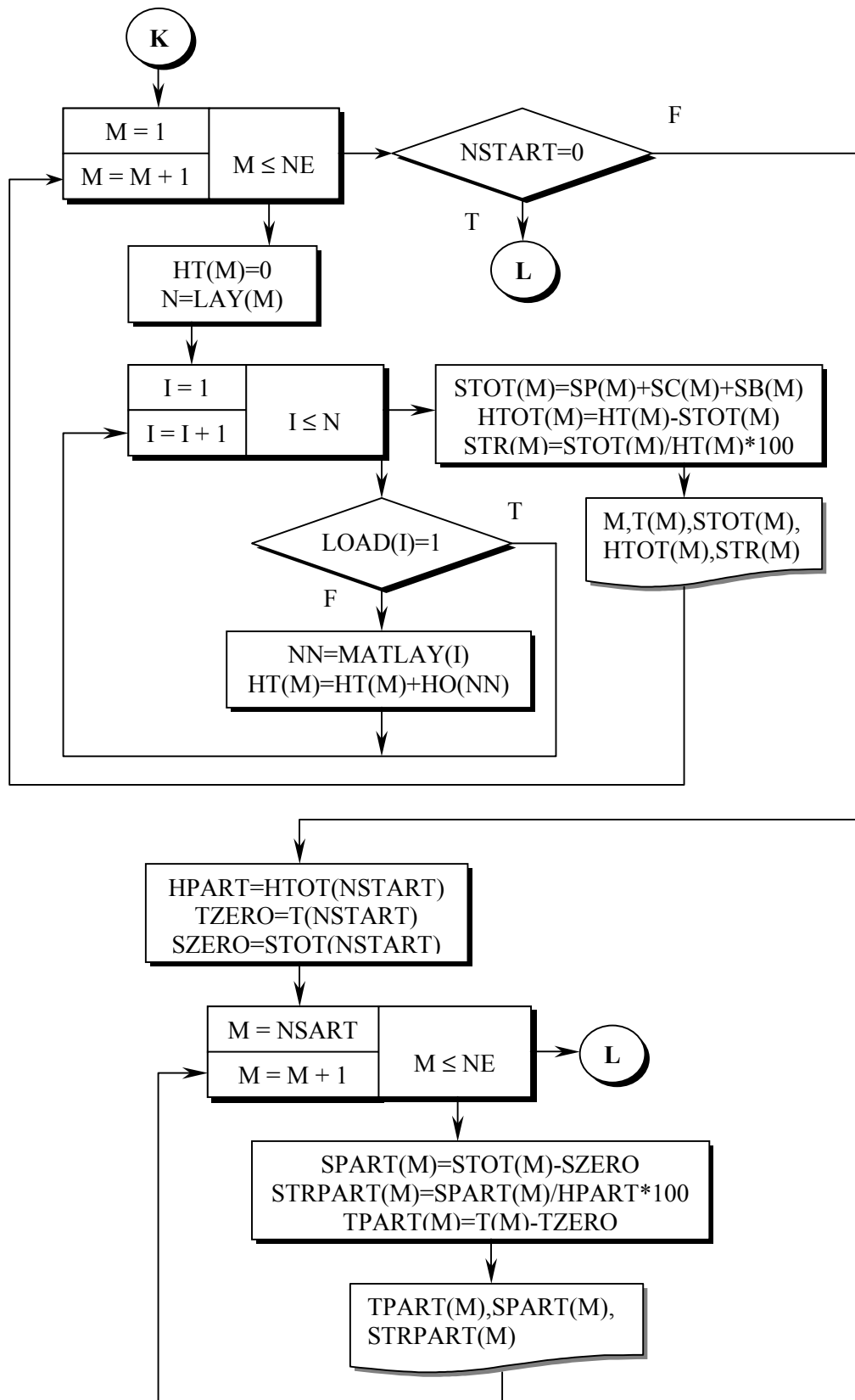


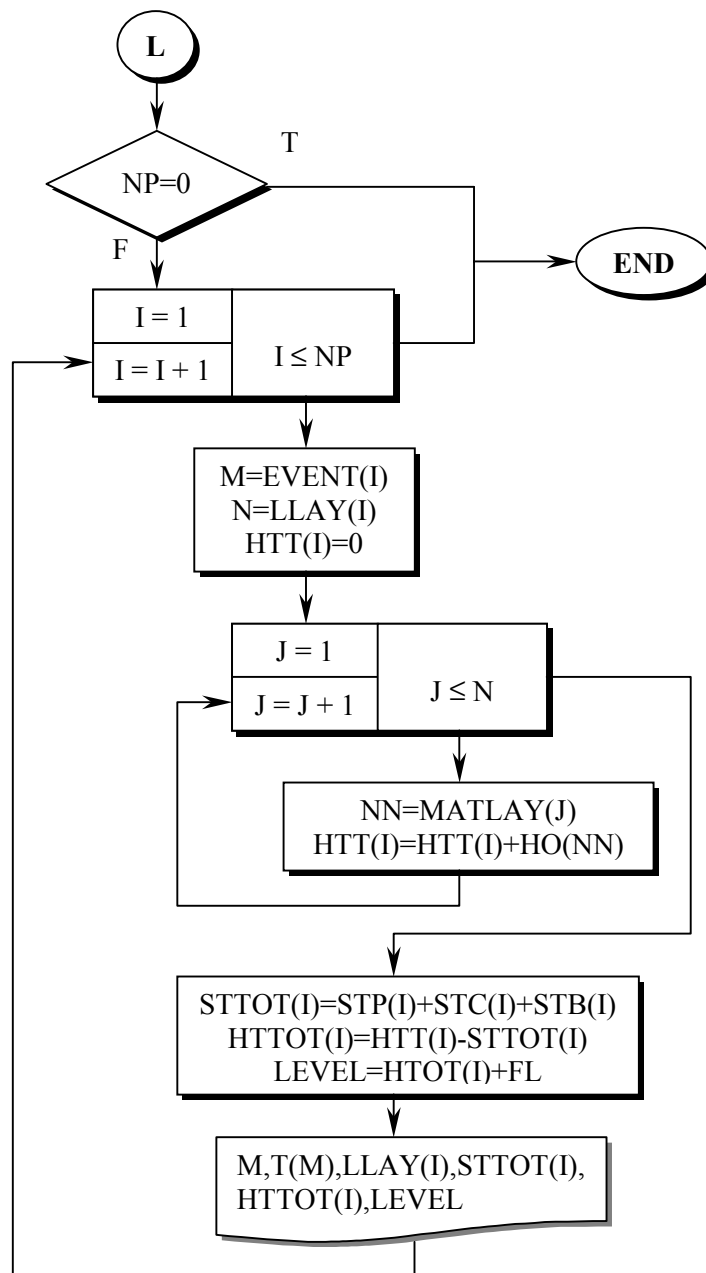
CÁLCULO DA MATRIZ DE ESTADO



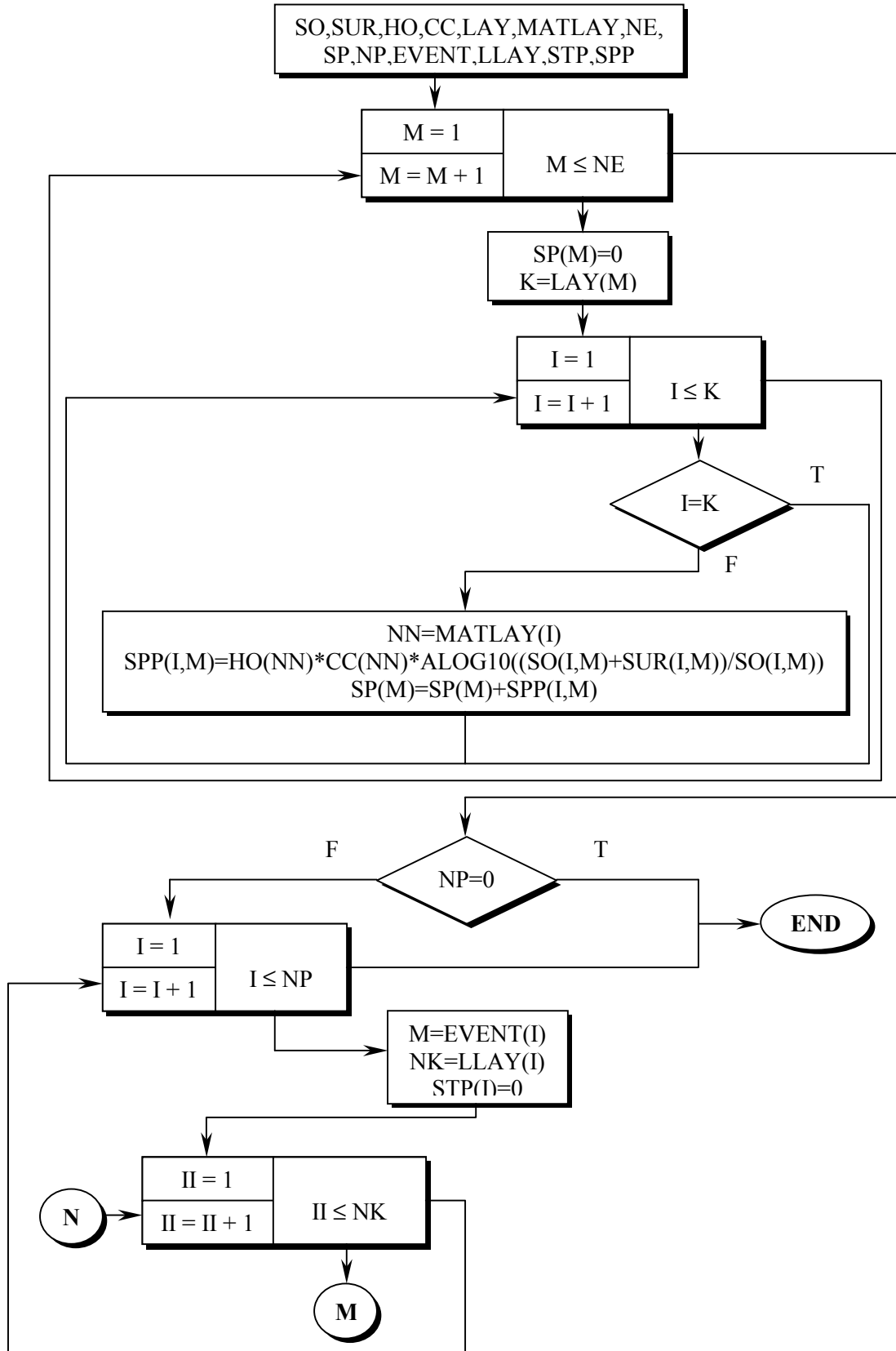


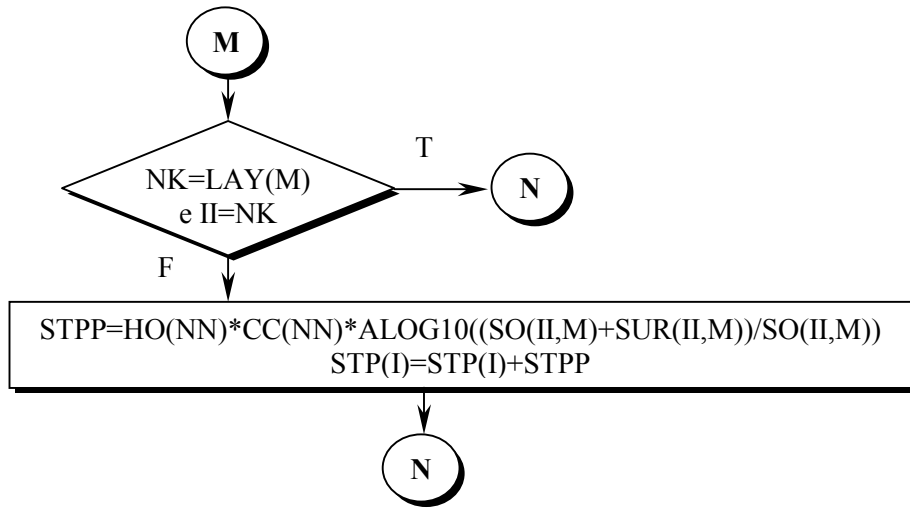




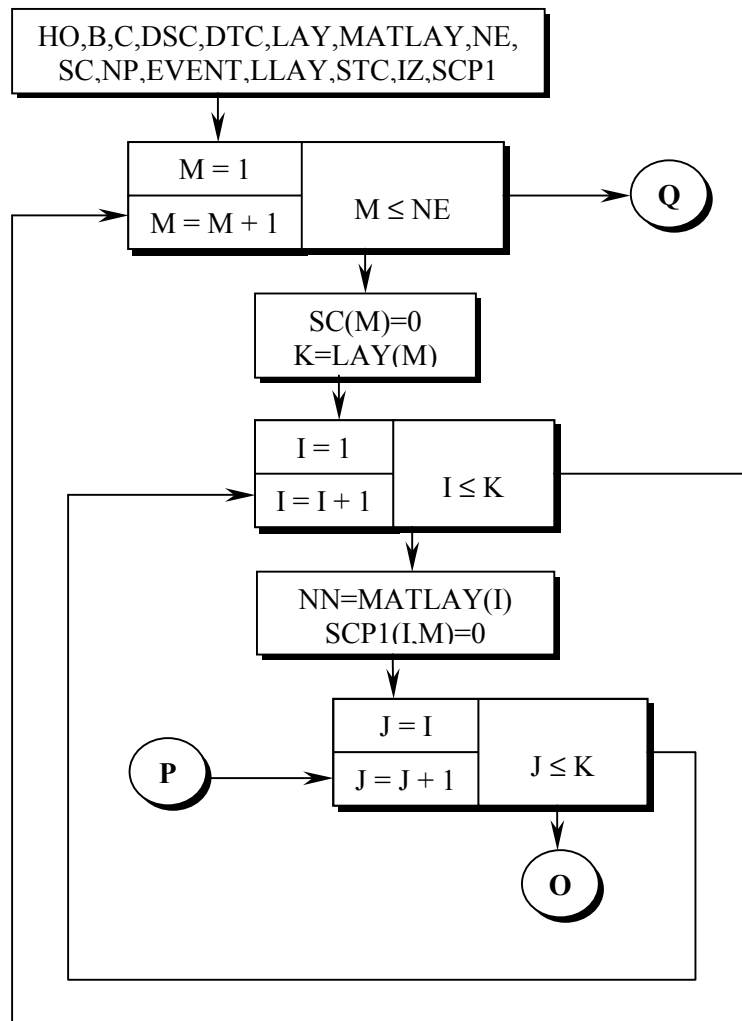


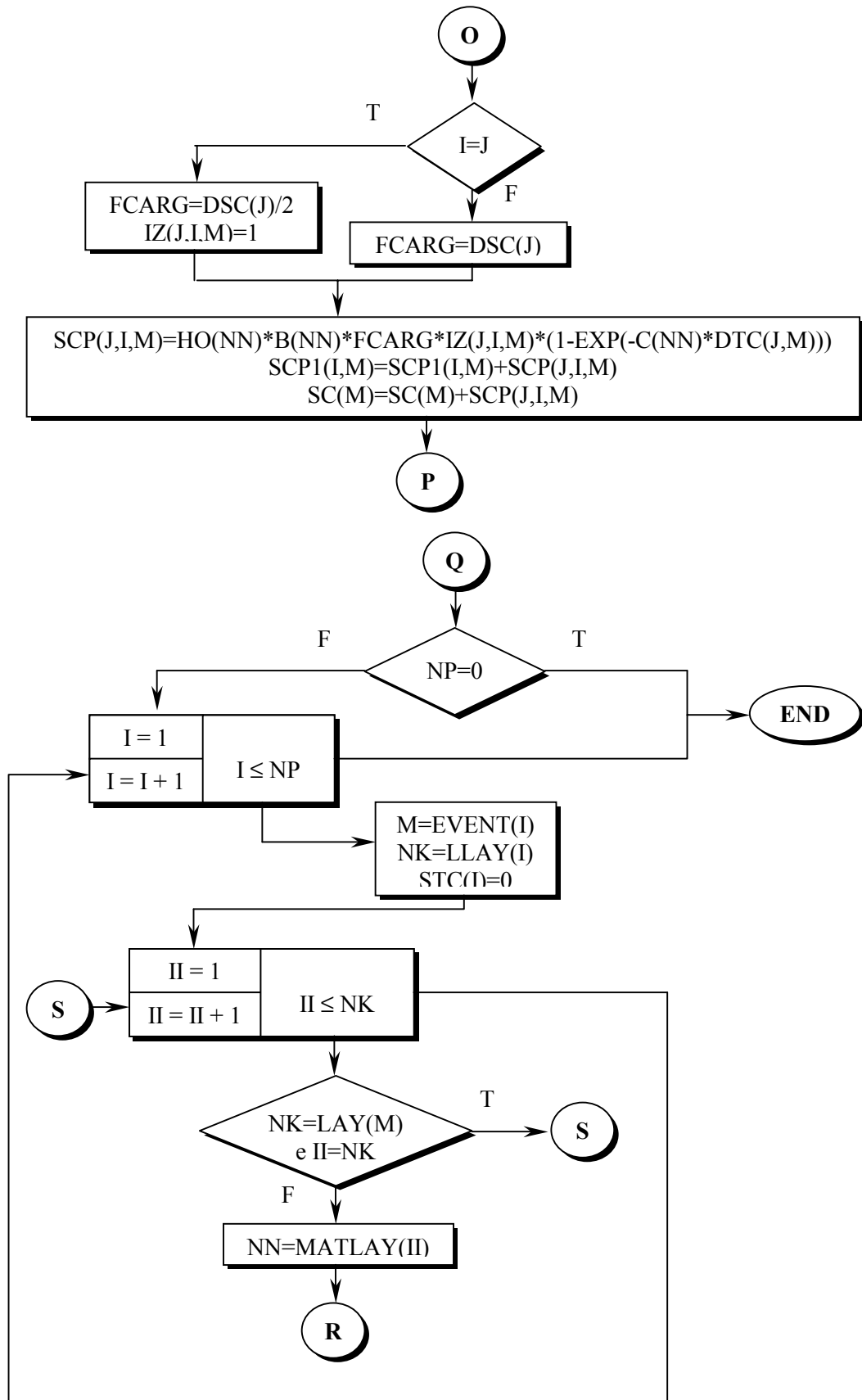
SUBROTINA PRIMARY

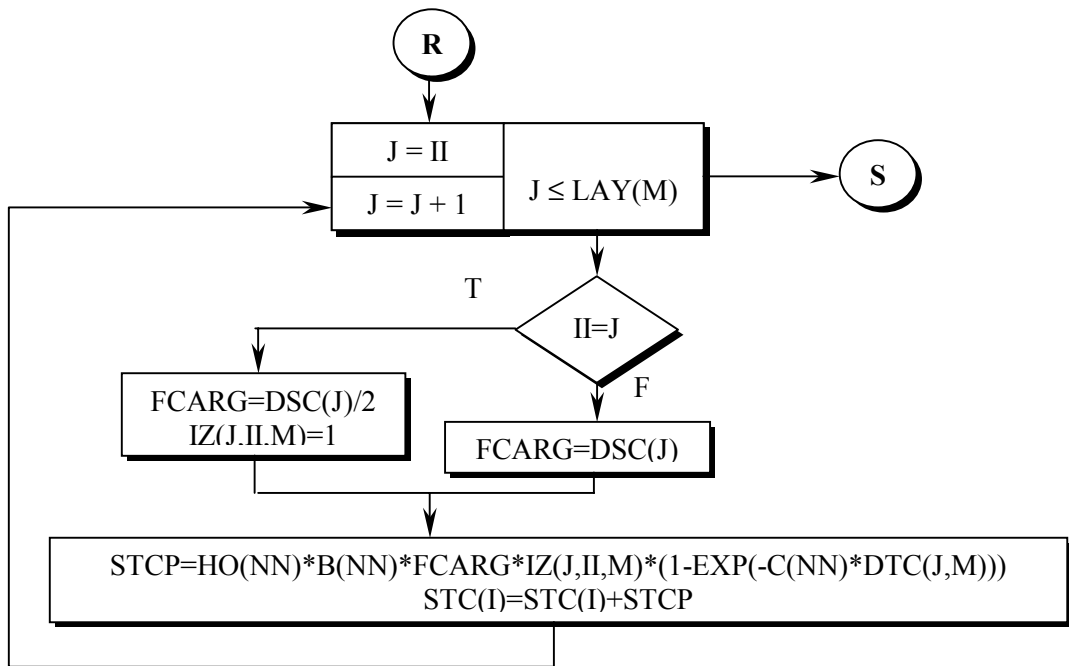




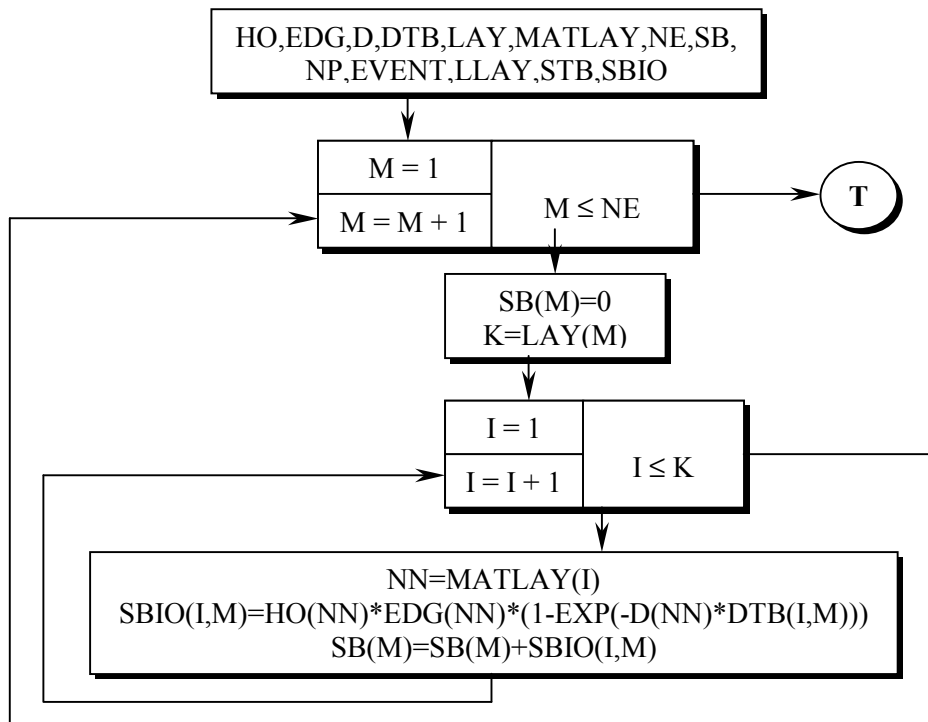
SUBROTINA CREEP

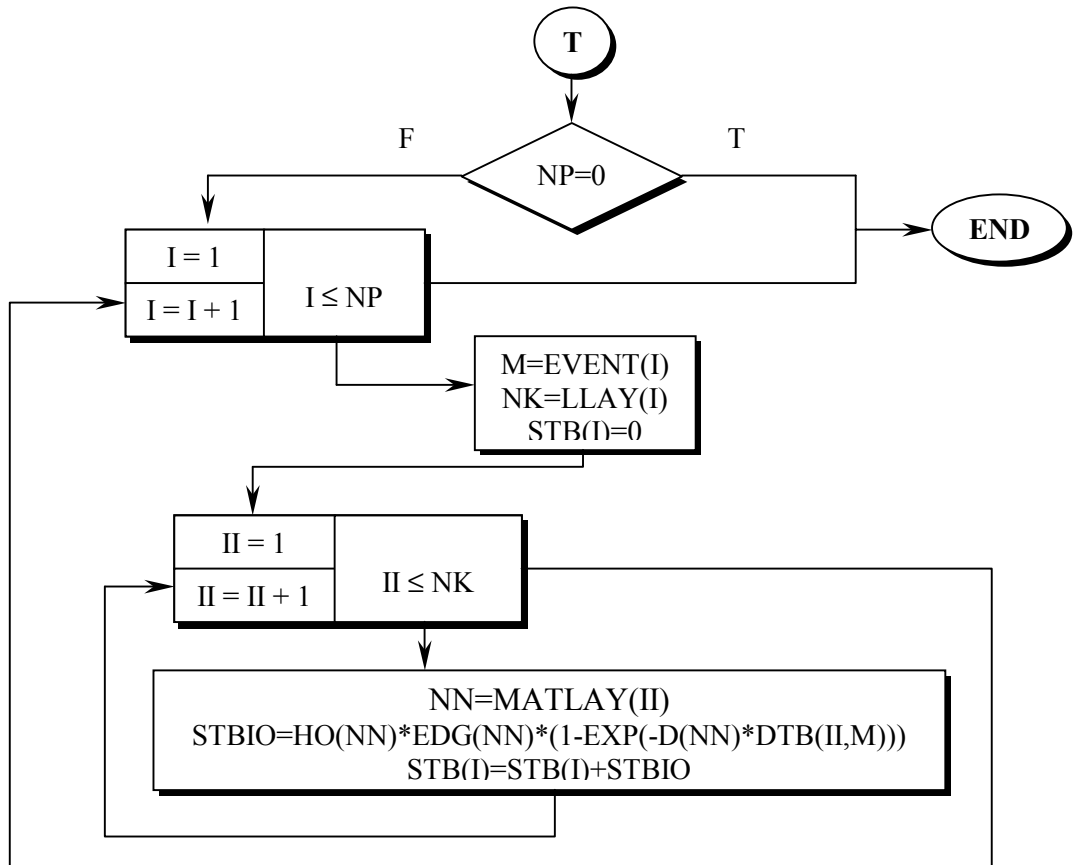






SUBROTINA BIOLOGICAL







Campus de São Carlos

**COMPACTAÇÃO E
COMPRESSIBILIDADE DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS**

VOL. I

AUTOR: AFONSO CELSO MORUZZI MARQUES

ORIENTADOR: PROF. DR. ORENCIO MONJE VILAR

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

**COMPACTAÇÃO E
COMPRESSIBILIDADE DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS**

VOLUME 1

AFONSO CELSO MORUZZI MARQUES

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Doutor em Geotecnia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar

São Carlos

2001

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

M357c Marques, Afonso Celso Moruzzi
Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos
urbanos / Afonso Celso Moruzzi Marques. -- São Carlos,
2001.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.

Área : Geotecnia.

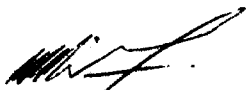
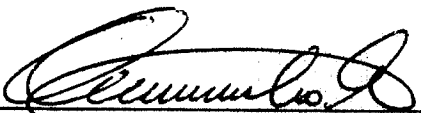
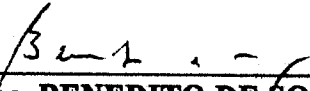
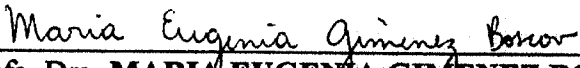
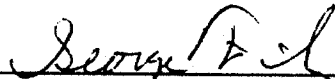
Orientador: Prof. Dr. Orencio Monje Vilar.

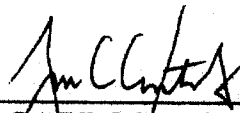
1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Aterros sanitários.
3. Compactação. 4. Peso específico. 5. Recalque. 6.
Compressibilidade. 7. Modelos reológicos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **AFONSO CELSO MORUZZI MARQUES**

Tese defendida e julgada em 17-07-2001 perante a Comissão Julgadora:

 <hr/> Prof. Tit. ORENCIO MONJE VILAR (Orientador) (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)	<hr/> APROVADO
 <hr/> Prof. Dr. VALDIR SCHALCH (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)	<hr/> APROVADO
 <hr/> Prof. Assoc. BENEDITO DE SOUZA BUENO (Escola de Engenharia de São Carlos/USP)	<hr/> APROVADO
 <hr/> Profa. Dra. MARIA EUGENIA GIMENEZ BOSCOV (Escola Politécnica/USP)	<hr/> aprovado
 <hr/> Prof. Dr. GEORGE FILZ (Virginia Tech)	<hr/> APROVADO



JOSÉ CARLOS A CINTRA
 Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia
 Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*À Suzy, Mariana e Juliana
pelo apoio, compreensão e
incentivo*

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a todas as pessoas e instituições que contribuíram para a elaboração desta pesquisa e de maneira especial,

Aos professores, funcionários e amigos do Departamento de Geotecnia pelo apoio e ensinamentos recebidos.

Aos professores e amigos do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Virginia Polytechnic Institute and State University, pela hospitalidade, ensinamentos, e experiência proporcionada.

Ao corpo técnico, funcionários e amigos da ENGECORPS – Corpo de Engenheiros Consultores S/C Ltda. pela ajuda e apoio na realização do trabalho.

Ao LIMPURB – Departamento de Limpeza Urbana da Prefeitura do Município de São Paulo e às empresas CEPOLLINA Engenheiros Consultores S/C Ltda., Construtora Heleno & Fonseca, Lyon/Caterpillar, Sansuy S.A. - Indústria de Plásticos e Nortene Plásticos Ltda., pelo apoio financeiro e operacional para viabilização do experimento.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Ministério da Educação, pelo auxílio e oportunidade de intercâmbio técnico-científico com instituição estrangeira.

Aos engenheiros Luís Sergio Kaimoto, Ricardo Coelho de Abreu, Eduardo Ferreira Leite e Silvio Luis E. de Andrade, pela ajuda e viabilização da coleta dos dados de campo.

Aos engenheiros Cláudio Michel Nahas, Alberto Lang Filho e Luis Antônio Villaça Garcia pelas discussões e contribuições técnicas durante o experimento.

Ao engenheiro Nino Carlos Teixeira Françoso pelo grande incentivo e apoio ao longo de todo o programa de pesquisa.

Aos colegas Miriam de Fátima Carvalho, Miguel Pando, Jeremy Britton e Youngji Park pelo auxílio e amizade demonstrados em momentos importantes do trabalho.

Ao professor e co-orientador George Filz, pelos ensinamentos e valiosas orientações, que em muito contribuíram para o alcance dos objetivos do trabalho.

Ao professor e orientador Orenccio Monje Vilar, pelo constante apoio e estímulo e pelas determinantes e criteriosas orientações durante a pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xviii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xxii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxiii
RESUMO.....	xxix
ABSTRACT.....	xxx

VOLUME 1

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Articulação Organizacional para Viabilização do Experimento.....	3
1.2 Estruturação do Trabalho.....	5
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES.....	7
2.1 Biodegradação dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	8
2.1.1 Geração e Características do Biogás.....	8
2.1.2 Geração e Características dos Líquidos Percolados.....	12
2.2 Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	20
2.2.1 Amostragem e Investigações In Situ.....	21
2.2.2 Propriedades Físicas.....	23
2.2.3 Propriedades Mecânicas.....	38
2.3 Estudos e Modelos propostos para Avaliação de Recalques de Aterros Sanitários.....	62
2.3.1 Modelo de SOWERS (1973).....	64
2.3.2 Modelo de YEN & SCANLON (1975).....	65
2.3.3 Estudo de EDIL et al. (1989, 1990) baseado no Modelo de GIBSON & LO (1961).....	66
2.3.4 Modelo de EDIL et al. baseado em Função de Potência (1990).....	68
2.3.5 Modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990).....	68
2.3.6 Modelo de EDGERS et al. baseado na “Rate Process Theory” (1992).....	69
2.3.7 Estudo de COUMOULOS & KORYALOS (1997, 1999).....	71
2.3.8 Estudo de LING et al. baseada em Função Logarítmica e Hiperbólica (1998).....	72
2.3.9 Outros Modelos e Propostas.....	73
2.4 Melhoria e Recuperação de Aterros Sanitários.....	80
2.4.1 Técnicas de Minimização Prévia.....	80
2.4.2 Técnicas de Melhoria das Propriedades dos Resíduos.....	82
2.4.3 Recuperação e Mineração de Aterros Sanitários.....	103

CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO E EXECUÇÃO DE ATERRO

EXPERIMENTAL	104
3.1 Arranjo Geral do Experimento.....	105
3.1.1 Zoneamento do Aterro.....	106
3.1.2 Definição da Sequência Construtiva	110
3.2 Preparação da Área.....	111
3.2.1 Relocação dos Dispositivos de Drenagem Existentes.....	111
3.2.2 Execução de Aterro de Regularização.....	114
3.2.3 Tratamento e Impermeabilização da Fundação.....	116
3.2.4 Execução do Sistema de Drenagem de Gases e Líquidos Percolados.....	117
3.2.5 Instalação da Instrumentação.....	120
3.2.6 Execução do Recobrimento Final e Sistema de Drenagem Superficial.....	122
3.2.7 Execução de Acessos e Obras Complementares.....	124
3.3 Descrição dos Equipamentos.....	124
3.4 Treinamento de Equipes para Trabalhos de Campo.....	126
3.5 Execução do Aterro.....	127
3.5.1 Lançamento e Espalhamento dos Resíduos.....	129
3.5.2 Compactação dos Resíduos.....	130
3.5.3 Cronograma de Execução.....	132
3.6 Ensaios Laboratoriais e In Situ.....	132
3.6.1 Composição Gravimétrica.....	133
3.6.2 Peso Específico dos Resíduos.....	135
3.6.3 Teor de Umidade.....	140
3.7 Controle Topográfico e Instrumentação de Campo.....	141
3.7.1 Controle das Espessuras das Camadas.....	141
3.7.2 Controle da Instrumentação de Campo.....	142
3.8 Controle Pluviométrico e Caracterização dos Líquidos Percolados.....	143
3.8.1 Controle Pluviométrico e Dados Climatológicos.....	144
3.8.2 Caracterização Físico-Química dos Líquidos Percolados.....	144
3.8.3 Medição de Vazões dos Líquidos Percolados.....	145
3.9 Serviços Complementares.....	147
CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE COMPACTAÇÃO – APRESENTAÇÃO	
E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	148
4.1 Composição Gravimétrica dos Resíduos.....	148
4.2 Teor de Umidade.....	150
4.3 Peso Específico Total e Seco.....	151
4.4 Espessuras Lançadas e Compactadas.....	153
4.5 Avaliação da Influência dos Parâmetros Construtivos sobre o Peso Específico.....	155
4.5.1 Análise e Modelagem Estatística dos Dados.....	155

4.5.2 Relação Teor de Umidade vs. Peso Específico.....	160
4.5.3 Relação Energia de Compactação vs. Peso Específico.....	164
4.6 Avaliação da Evolução do Peso Específico com a Profundidade.....	172
4.6.1 Relação Espessura Controlada x Peso Específico.....	173
4.6.2 Análise e Modelagem Estatística dos Dados.....	176
4.6.3 Relação Peso Específico vs. Profundidade vs. Equipamento de Compactação.....	180
4.7 Avaliação da Compressibilidade dos Resíduos Sólidos Urbanos face ao Efeito da Compactação.....	185
4.7.1 Compressão Mecânica Primária.....	185
4.7.2 Compressão Secundária.....	196
4.8 Avaliação do Efeito da Compactação na Geração dos Líquidos Percolados.....	208
4.8.1 Análise da Qualidade dos Líquidos Percolados.....	208
4.8.2 Geração de Líquidos Percolados.....	216
4.9 Síntese do Estudo de Compactação.....	227

VOLUME 2

CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE COMPRESSIBILIDADE – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	235
5.1 Avaliação de Modelos de Compressibilidade existentes na Literatura.....	235
5.1.1 Hipóteses e Análises Efetuadas.....	235
5.1.2 Resultados da Aplicação das Propostas.....	239
5.1.3 Análise Crítica do Desempenho dos Modelos.....	265
5.2 Concepção de Modelo Reológico Compósito para Compressão de Resíduos Sólidos Urbanos.....	270
5.3 Programa Computacional MSWSET.....	272
5.3.1 Estruturação do Programa.....	273
5.3.2 Geração de Resultados pelo Programa MSWSET.....	287
5.4 Aplicação do Programa MSWSET e Estudo para Avaliação dos Parâmetros Reológicos do Modelo Compósito.....	289
5.4.1 Seleção dos Pontos de Controle e Preparação dos Dados de Entrada.....	289
5.4.2 Avaliação dos Parâmetros Reológicos do Modelo Compósito – Interface RNLIN - MSWSET.....	294
5.4.3 Apresentação e Discussão dos Resultados do Programa MSWSET.....	297
5.5 Estudo Paramétrico a partir do Programa MSWSET.....	310
5.5.1 Influência dos Parâmetros Reológicos do Modelo Compósito.....	310
5.5.2 Efeito da Sobrecarga – Fator de Influência de Tensões I_z	316
5.5.3 Influência da Sequência Construtiva do Aterro Sanitário.....	319
5.5.4 Influência da Idade do Resíduo Aterrado.....	320

5.6 Recomendações para Aplicação do Programa MSWSET a outros Aterros Sanitários.....	321
5.7 Síntese do Estudo de Compressibilidade.....	322
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	325
6.1 Estudo de Compactação.....	325
6.1.1 Influência das Técnicas Construtivas.....	326
6.1.2 Evolução do Peso Específico com a Profundidade.....	327
6.1.3 Efeito da Compactação na Compressibilidade dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	328
6.1.4 Efeito da Compactação na Geração dos Líquidos Percolados.....	329
6.2 Estudo de Compressibilidade.....	329
6.2.1 Modelos de Compressibilidade existentes na Literatura.....	330
6.2.2 Modelo Reológico Compósito e Programa MSWSET.....	331
6.3 Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	332
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	334
APÊNDICES.....	351
Apêndice I - Aterro Experimental: Desenhos de Projeto.....	351
Apêndice II - Aterro Experimental: Fichas de Controle e Ensaio In Situ.....	360
Apêndice III - Aterro Experimental: Dados Hidroclimatológicos – Precipitação, Insolação, Temperatura, Evapotranspiração, Umidade Relativa e Velocidade dos Ventos.....	366
Apêndice IV - Programa MSWSET – Programa Fonte.....	377

LISTA DE FIGURAS

VOLUME 1

Figura 2.1.1 –Fases de geração de gases em aterros sanitários (FARQUHAR & ROVERS, 1973).....	10
Figura 2.1.2 - Esquema típico adotado pelo programa HELP (SCHROEDER et al., 1994).....	17
Figura 2.2.1 - Variação do peso específico de resíduos sólidos urbanos com a profundidade (KNOCHENMUS et al., 1998).....	27
Figura 2.2.2 - Variação do peso específico com a profundidade (OWEIS & KHERA, 1986).....	28
Figura 2.2.3 - Variação do peso específico seco com a profundidade (OWEIS & KHERA, 1986).....	29
Figura 2.2.4 - Perfis de umidade de resíduos sólidos urbanos (KNOCHENMUS et al., 1998).....	31
Figura 2.2.5 - Curvas de compactação para diferentes tipos de resíduos (KONIG & JESSBERGER, 1997).....	33
Figura 2.2.6 - Distribuição das dimensões de partículas para resíduos sólidos urbanos (JESSBERGER, 1994).....	35
Figura 2.2.7 - Relação entre coesão e ângulo de atrito de resíduos sólidos urbanos (WOJNAROWICZ et al., 1998).....	41
Figura 2.2.8 - Relação tensão vs. deformação para diferentes tipos de resíduos sólidos urbanos, obtidos a partir de ensaios triaxiais (KONIG & JESSBERGER, 1997).....	42
Figura 2.2.9 - Parâmetros de resistência mobilizados em função do nível de deformações (KOCKEL & JESSBERGER, 1995).....	43
Figura 2.2.10 - Mobilização dos parâmetros de resistência para distintas configurações de amostras (KOCKEL & JESSEBERGER, 1995).....	43
Figura 2.2.11 - Variação da resistência ao cisalhamento dos resíduos com a profundidade (SINGH & SUN, 1995).....	44
Figura 2.2.12 – inter-relação dos fatores que afetam a compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos (GRISOLIA et al., 1993).....	47
Figura 2.2.13 - Representação do processo de adensamento dos resíduos sólidos urbanos (GRISOLIA et al., 1992).....	48
Figura 2.2.14 - Variação do módulo de rigidez E_s com a tensão vertical (adaptado por WOJNAROWICZ et al., 1998).....	49

Figura 2.2.15 - Curva recalque vs. tempo em células experimentais (RAO et al., 1977).....	54
Figura 2.2.16 - Recalque total ao longo da profundidade observado após 47 dias de aplicação de carga (WATTS & CHARLES, 1990).....	58
Figura 2.3.1 - Definição da idade média do aterro, t_I (YEN & SCANLON, 1975).....	66
Figura 2.3.2 - Variação da taxa de recalque com a altura e a idade média do aterro, t_I (SOHN & LEE, 1994).....	67
Figura 2.3.3 - Modelo de compressão unidimensional proposto por BJARNGARD & EDGERS (1990).....	70
Figura 2.3.4 - Modelo hiperbólico aplicado ao aterro sanitário Meruelo (LING et al., 1998).....	73
Figura 2.3.5 - Aplicação do método observacional (MANASSERO & PASQUALINE, 1993).....	75
Figura 2.4.1 - Efeito da densificação dos resíduos na vida útil de aterros sanitários e no custo unitário de disposição (adaptada de BELFIORE et al., 1990).....	83
Figura 2.4.2 - Efeito da compactação nos recalques de aterros sanitários (DE VITO, apud OWEIS & KHERA, 1986).....	84
Figura 2.4.3 - Relação entre o peso específico dos resíduos e o número de passadas do equipamento e espessura das camadas (adaptada de SCHOMAKER, 1972).....	86
Figura 2.4.4 - Pesos específicos em função dos equipamentos de compactação (adaptado de BRATLEY, 1974).....	88
Figura 2.4.5 - Relação teor de umidade vs. peso específico seco sob efeito de diferentes técnicas de compactação (BENOIT et al, 1999).....	91
Figura 2.4.6 - Relação entre densidades finais de resíduos e espessura de camadas e número de passadas de equipamento de compactação (MATTHEWS et al., 1997).....	93
Figura 2.4.7 - Curvas recalque vs. tempo para a seção submetida a carregamento externo no aterro de Morgantown (RAO et al., 1977).....	98
Figura 2.4.8 - Efeito de sobrecarga nas taxas de recalque secundário e curvas para estimativa de recalques no tempo sob efeito do pré-carregamento.....	100
Figura 3.1 - Vista aérea do Aterro Sanitário Bandeirantes com a localização do aterro experimental.....	106
Figura 3.1.1 - Aterro experimental - Arranjo geral.....	107
Figura 3.1.2 - Aterro experimental - Identificação dos quadrantes na praça de trabalho em plano horizontal.....	108
Figura 3.1.3 - Aterro experimental - Seqüência construtiva na praça de trabalho em planos horizontais.....	111
Figura 3.1.4 - Aterro experimental - Seqüência construtiva na praça de trabalho em planos inclinados.....	113

Figura 3.2.1 - Aterro experimental – Sistema complementar de drenagem de gás.....	114
Figura 3.2.2 - Sistema complementar de drenagem de gás - Dreno horizontal de transferência.....	115
Figura 3.2.3 - Aterro experimental – Tratamento e impermeabilização da fundação....	116
Figura 3.2.4 - Detalhes e vista do tratamento de fundação do aterro experimental.....	117
Figura 3.2.5 - Aterro experimental – Sistema de drenagem de líquidos percolados e gases.....	118
Figura 3.2.6 - Detalhes do sistema de drenagem do aterro experimental.....	119
Figura 3.2.7 - Caixa de captação e amostragem de líquidos percolados.....	120
Figura 3.2.8 – Detalhe do sistema de drenagem de gases e líquidos percolados.....	121
Figura 3.2.9 - Aterro experimental – Marco superficial instalado.....	122
Figura 3.2.10 – Localização da monitoração de 2 ^a fase nas praças de trabalho em planos horizontal e inclinado.....	123
Figura 3.3.1 – Trator de esteiras tipo Bulldozer D6D – Dimensões principais.....	125
Figura 3.3.2 – Rolo compactador 816F – Dimensões principais.....	126
Figura 3.4.1 – Trajetórias e faixas de movimentação dos equipamentos nos quadrantes.....	128
Figura 3.4.2 – Treinamento operacional previamente à execução do aterro.....	128
Figura 3.5.1 – Lançamento dos resíduos nas praças de trabalho em plano horizontal e inclinado.....	129
Figura 3.5.2 – Distribuição dos volumes lançados de resíduos por etapa construtiva...	130
Figura 3.5.3 – Compactação dos resíduos nas praças de trabalho em planos horizontais e inclinados.....	131
Figura 3.5.4 – Aterro experimental: Cronograma simplificado das atividades principais.....	132
Figura 3.6.1 – Seqüência de execução dos ensaios para determinação do peso específico <i>in situ</i> dos resíduos.....	136
Figura 3.6.2 – Detalhes da execução dos ensaios para determinação do peso específico <i>in situ</i> dos resíduos.....	137
Figura 3.6.3 – Procedimento para determinação dos volumes adicionais das cavas de ensaio.....	138
Figura 3.6.4 – Locação das cavas para os ensaios de determinação do peso específico <i>in situ</i>	139
Figura 3.7.1 – Procedimento de controle das placas de recalque após as operações de compactação dos resíduos.....	143
Figura 4.1.1 – Composição média dos resíduos sólidos urbanos empregados no aterro experimental.....	149
Figura 4.5.1 – Relação peso específico total vs. teor de umidade para diferentes equipamentos operando em planos horizontais.....	159

Figura 4.5.2 – Relação peso específico seco vs. teor de umidade para diferentes equipamentos operando em planos horizontais.....	160
Figura 4.5.3 – Curva de compactação para ambos os equipamentos, admitindo 4 passadas do equipamento e espessuras lançadas de 0,30m.....	164
Figura 4.5.4 – Distribuição das espessuras das camadas lançadas na praça de trabalho em planos horizontais do aterro experimental.....	165
Figura 4.5.5 – Relação peso específico seco vs. teor de umidade vs. espessura das camadas para o trator de esteiras tipo D6D (a); para o compactador 816F (b); e para ambos equipamentos de teste operando em 6 passadas.....	168
Figura 4.5.6 – Relação peso específico seco vs. teor de umidade vs. número de passadas para o trator de esteiras tipo D6D (a); para o compactador 816F (b); e para ambos equipamentos de teste (c), assumindo espessura lançada de resíduos igual a 0,5m.....	169
Figura 4.5.7 – Relação peso específico seco vs. teor de umidade vs. número de passadas para o trator de esteiras tipo D6D operando em plano inclinado (a); em plano horizontal (b); e em ambos planos de compactação (c), admitindo espessura lançada de resíduos igual a 0,5m.....	171
Figura 4.5.8 – Curvas peso específico seco vs. teor de umidade obtidas pelo modelo para distintos equipamentos de compactação.....	172
Figura 4.6.1 – Relação entre as tensões verticais calculadas com base nos valores compactados (σ_{vc}) e nos valores lançados (σ_{vsp}).....	174
Figura 4.6.2 – Relação peso específico vs. profundidade vs. espessura das camadas para o trator de esteiras tipo D6D (a); para o compactador 816F (b); e para ambos equipamentos de teste (c) operando em 6 passadas.....	182
Figura 4.6.3 – Relação peso específico vs. profundidade vs. número de passadas do trator de esteiras tipo D6D (a); do compactador 816F (b); e de ambos equipamentos de teste (c) para espessuras lançadas de 0,5m.....	183
Figura 4.6.4 – Relação peso específico vs. profundidade a partir da extrapolação do modelo estatístico desenvolvido.....	185
Figura 4.7.1 – Relação tensão vertical vs. deformação para o trator de esteiras tipo D6D, assumindo distintas espessuras lançadas (a); número de passadas (b); e fatores de energia E^* .(c).....	192
Figura 4.7.2 – Relação tensão vertical vs. deformação para o compactador 816F, assumindo distintas espessuras lançadas (a); número de passadas (b); e fatores de energia E^* .(c).....	193
Figura 4.7.3 – Distribuição das tensões verticais em profundidade devido aos equipamentos de compactação e às pressões sobrejacentes.....	194
Figura 4.7.4 – Relação fator de energia (E^*) vs. deformação imediata (ϵ_{im}).....	196

Figura 4.7.5 – Relação entre o coeficiente de compressão (CR^*), coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v^*) e tensões verticais (σ_v), para distintos fatores de energia (E^*) aplicados pelo trator de esteiras tipo D6D.....	199
Figura 4.7.6 – Relação entre o coeficiente de compressão (CR^*), coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v^*) e tensões verticais (σ_v), para distintos fatores de energia (E^*) aplicados pelo compactador 816F.....	200
Figura 4.7.7 – Avaliação da compressão secundária do aterro experimental. Recalques totais em escala linear (a); logarítmica (b); e recalques relativos (período entre 03/98 e 09/98). Quadrantes 23 e 30 (trator de esteiras).....	202
Figura 4.7.8 – Avaliação da compressão secundária do aterro experimental. Recalques totais em escala linear (a); logarítmica (b); e recalques relativos (período entre 03/98 e 09/98). Quadrante 16 (compactador).....	203
Figura 4.7.9 – Relação entre o coeficiente de compressão secundária (C_{α}') e o fator de energia (E^*).....	206
Figura 4.7.10 – Análises físico-químicas dos líquidos percolados. DBO, DQO e pH..	207
Figura 4.8.1 – Caracterização dos líquidos percolados – DBO, DQO, DBO/DQO e pH.....	211
Figura 4.8.2 – Caracterização dos líquidos percolados – Condutância específica, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato e cloretos.....	212
Figura 4.8.3 – Caracterização dos líquidos percolados – Zinco, Arsênio, Cádmio e Chumbo.....	213
Figura 4.8.4 – Caracterização dos líquidos percolados – Mercúrio, Cromo, fenóis e sólidos suspensos totais (SST).....	214
Figura 4.8.5 – Distribuição da precipitação (P), líquidos percolados (L) e relação L/P ao longo do tempo.....	221
Figura 4.8.6 – Produção de líquidos percolados no aterro experimental. Valores observados e calculados pelo método do balanço hídrico (período Out/97 a Jul/99)....	224
Figura 4.8.7 - Líquidos percolados no aterro experimental (Simulações 1 e 2). Valores observados e calculados pelo programa HELP (período Out/97 a Jul/99).....	228
Figura 4.8.8 - Líquidos percolados no aterro experimental (Simulações 3 e 4). Valores observados e calculados pelo programa HELP (período Out/97 a Jul/99).....	229
Figura 4.8.9 - Líquidos percolados no aterro experimental (Simulação 5 e global). Valores observados e calculados pelo programa HELP (período Out/97 a Jul/99).....	230
Figura 4.9.1 – Relação entre o tipo e número de passadas do equipamento de compactação e a vida útil do aterro sanitário, para distintas demandas de resíduos.....	233
Figura 4.9.2 – Relação entre o tipo e número de passadas do equipamento de compactação e o custo unitário do resíduo aterrado.....	234

VOLUME 2

Figura 5.1.1 – Seção simplificada e níveis internos de líquidos percolados para efeito do cálculo das tensões verticais atuantes.....	237
Figura 5.1.2 – Distribuição de tensões verticais, devido ao aterro experimental, por uma seção longitudinal central.....	238
Figura 5.1.3 – Relação taxa de recalque vs. tempo para distintas definições do tempo zero (t_0).....	241
Figura 5.1.4 – Relação taxa de recalques vs. tempo para o marco superficial MSE7...	243
Figura 5.1.5 – Relação recalque observado e previsto vs. tempo, com base em funções logarítmicas integradas da solução de YEN & SCANLON. Marco superficial MSE7.....	243
Figura 5.1.6 – Relação recalque observado e previsto vs. tempo, com base em funções logarítmicas simples. Marco superficial MSE7.....	244
Figura 5.1.7 - Relação recalque observado e previsto vs. tempo, com base em funções logarítmicas simples, eliminando o período construtivo do experimento. Marco superficial MSE7.....	244
Figura 5.1.8 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos com o modelo hiperbólico.....	247
Figura 5.1.9 – Relação entre a taxa de deformação inicial (ρ_0), a deformação última esperada (ε_{ult}) e a altura do maciço (H) a partir do modelo hiperbólico.....	248
Figura 5.1.10 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos com o modelo de GIBSON & LO (1961).....	249
Figura 5.1.11 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo de GIBSON & LO (1961) e a altura do maciço (H).....	250
Figura 5.1.12 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir de modelos baseados em funções de potência.....	252
Figura 5.1.13 - – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo baseado em funções de potência e a altura do maciço (H).....	253
Figura 5.1.14 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir do modelo de EDGERS et al. (1992).....	254
Figura 5.1.15 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo de EDGERS et al. (1992) e a altura do maciço (H).....	255
Figura 5.1.16 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir do modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990).....	257
Figura 5.1.17 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990) e a altura do maciço (H).....	258
Figura 5.1.18 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir do modelo de COUMOULOS & KORYALOS (1997)	259

Figura 5.1.19 – Definição do parâmetro tempo para aplicação do modelo adaptado de SOWERS (1973).....	262
Figura 5.1.20 – Marco superficial MSE4. Curvas recalque vs. tempo para valores observados e previstos a partir do modelo adaptado de SOWERS (1973) (casos b e d).....	264
Figura 5.1.21 – Aplicação dos modelos existentes. Desvios médios de recalques para os marcos superficiais.....	267
Figura 5.1.22 – Aplicação dos modelos existentes. Desvios médios de recalques para as placas de recalque.....	267
Figura 5.1.23 – Curva recalque vs. tempo assumindo distintos tempos de início (t_0). Marco superficial MSE4.....	268
Figura 5.1.24 – Curvas recalque vs tempo observadas e previstas para distintas séries de tempo, a partir do modelo de GIBSON & LO (1961). Marco superficial MSE4.....	269
Figura 5.1.25 – Curvas recalque vs tempo observadas e previstas para distintas séries de tempo, a partir do modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990). Marco superficial MSE4.....	269
Figura 5.2.1 – Modelo reológico compósito para compressão dos resíduos sólidos urbanos.....	271
Figura 5.3.1 – Esquema conceitual para definição dos eventos, materiais e histórico de construção.....	274
Figura 5.3.2 – Esquema para consideração dos mecanismos de compressão através do conceito de superposição de efeitos.....	276
Figura 5.3.3 – Esquema para consideração dos mecanismos de compressão mecânica secundária.....	278
Figura 5.3.4– Esquema para consideração dos mecanismos de compressão biológica secundária.....	280
Figura 5.3.5 – Matriz de estado definida pelo programa MSWSET baseada no exemplo da Figura 5.3.1.....	282
Figura 5.3.6 – Evolução das alturas e recalques do maciço ao longo do tempo.....	287
Figura 5.3.7 – Esquema conceitual para reprodução de curvas de recalque relativo pelo programa MSWSET.....	288
Figura 5.4.1 – Histórico de construção do Aterro Sanitário Bandeirantes (sub-aterro AS1).....	290
Figura 5.4.2 – Modelado do terreno de fundação do aterro existente sob o aterro experimental.....	292
Figura 5.4.3 – Aterro experimental: arranjo geométrico e sistema de coordenadas utilizado para consideração de sobrecarga (representação em corte relativa ao quadrante 39).....	293

Figura 5.4.4 – Esquema para avaliação dos parâmetros do modelo através do programa MSWSET e da sub-rotina RNLIN.....	295
Figura 5.4.5 – Fluxograma simplificado para a interface RNLIN – MSWSET.....	296
Figura 5.4.6 – Curvas recalque vs. tempo (placas de recalque PR1, PR2 e PR3).....	298
Figura 5.4.7 – Curvas recalque vs. tempo (placas de recalque PR4, PR5 e PR6).....	299
Figura 5.4.8 – Curvas recalque vs. tempo (placa de recalque PR8 e marcos superficiais MSE5 e MSE6).....	300
Figura 5.4.9 – Curvas recalque vs. tempo (marcos superficiais MSE7, MSE24 e MSE25).....	301
Figura 5.4.10 – Curvas recalque vs. tempo (marcos superficiais MSE28, MSE29 e MSE30).....	302
Figura 5.4.11 – Curvas recalque vs. tempo (marcos superficiais MSE31, MSE32 e MSE33).....	303
Figura 5.4.12 – Curvas recalque vs. tempo (marcos superficiais MSE35 e MSE36)....	304
Figura 5.4.13 – Evolução dos recalques e alturas do maciço ao longo do histórico de vida do Aterro Sanitário Bandeirantes. Placa de recalque PR5.....	305
Figura 5.4.14 – Desvios de altura inicial (H_i) para as análises individualizada e global.....	307
Figura 5.4.15 – Desvios de recalque final (S_f) para as análises individualizada e global.....	307
Figura 5.4.16 - Desvios de altura inicial (H_i) obtidos para o modelo original e para a sua variante, a partir de análise global (parâmetros médios).....	309
Figura 5.4.17 - Desvios de recalque final (S_f) obtidos para o modelo original e para a sua variante, a partir de análise global (parâmetros médios).....	310
Figura 5.5.1 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão primária C_c (placa de recalque PR5).....	311
Figura 5.5.2 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão mecânica secundária b (placa de recalque PR5).....	311
Figura 5.5.3 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores da taxa de compressão mecânica secundária c (placa de recalque PR5).....	312
Figura 5.5.4 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão biológica secundária E_{DG} (placa de recalque PR5).....	312

Figura 5.5.5 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores da taxa de compressão biológica secundária d (placa de recalque PR5).....	313
Figura 5.5.6 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão primária C_c (marco superficial MSE31).....	313
Figura 5.5.7 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão mecânica secundária b (marco superficial MSE31).....	314
Figura 5.5.8 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores da taxa de compressão mecânica secundária c (marco superficial MSE31).....	314
Figura 5.5.9 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores do coeficiente de compressão biológica secundária E_{DG} (marco superficial MSE31).....	315
Figura 5.5.10 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintos valores da taxa de compressão biológica secundária d (marco superficial MSE31).....	315
Figura 5.5.11 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintas representações de carregamento do aterro experimental (placa de recalque PR5).....	317
Figura 5.5.12 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintas representações de carregamento do aterro experimental (marco superficial MSE6).....	317
Figura 5.5.13 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintas representações de carregamento do aterro experimental (marco superficial MSE31).....	318
Figura 5.5.14 – Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET para distintas seqüências construtivas do aterro existente (placa de recalque PR5).....	319
Figura 5.5.15 - Curvas recalque vs. tempo e alturas iniciais calculadas pelo programa MSWSET considerando distintos parâmetros para os resíduos antigos e novos (marco superficial MSE31).....	320

LISTA DE TABELAS

VOLUME 1

Tabela 2.1.1 - Constituição típica do biogás de aterros sanitários (PARKER, 1983)....	12
Tabela 2.1.2 - Precipitação e produção de líquidos percolados em aterros sanitários na Alemanha (EHRIG, 1983).....	13
Tabela 2.1.3. - Composição típica dos líquidos percolados em aterros sanitários novos e antigos (adaptado de TCHOBANOGLOUS et al., 1993).....	18
Tabela 2.1.4 - Caracterização dos Líquidos Percolados – parâmetros com diferenças entre as fases acética e metanogênica (EHRIG, 1983).....	19
Tabela 2.1.5 - Caracterização dos Líquidos Percolados – parâmetros sem diferenças entre as fases acética e metanogênica (EHRIG, 1983).....	20
Tabela 2.2.1 - Ensaio de resistência tipo SPT.....	22
Tabela 2.2.2 - Ensaio de resistência à penetração tipo CPT.....	23
Tabela 2.2.3 - Peso específico de resíduos sólidos urbanos (RSU).....	25
Tabela 2.2.4 - Valores de peso específico em função do grau de compactação (GACHET et al., 1998).....	26
Tabela 2.2.5 - Pesos específicos das partículas sólidas de resíduos sólidos urbanos.....	29
Tabela 2.2.6 - Valores para o teor de umidade de resíduos sólidos urbanos (RSU).....	31
Tabela 2.2.7 - Composição média dos resíduos para diferentes localidades (adaptada de BOUAZZA et al., 1996).....	34
Tabela 2.2.8 - Coeficientes de permeabilidade de resíduos sólidos urbanos (adaptada de WOJNAROWICZ et al., 1998).....	37
Tabela 2.2.9 - Ensaio de resistência - resultados obtidos.....	40
Tabela 2.2.10 - Parâmetros de resistência estimados por retro-análise (KAVAZANJIAN et al., 1995).....	46
Tabela 2.2.11 - Parâmetros de compressibilidade primária e secundária (LANDVA & CLARK, 1984,1986,1990).....	52
Tabela 2.4.1 - Pesos específicos para distintos equipamentos obtidos em aterros experimentais (CATERPILLAR, 1994, 1995, 1998, 1999, 2000).....	92
Tabela 2.4.2 - Compactação dinâmica de aterros sanitários (SAGASETA, 1993; VAN IMPE & BOUAZZA, 1996).....	94
Tabela 2.4.3 - Recalques observados por diferentes técnicas de melhoria (ONITSUKA et al., 1996).....	96
Tabela 3.1 - Aspectos básicos considerados na concepção do aterro experimental.....	105

Tabela 3.1.1 - Descrição dos procedimentos construtivos dos quadrantes na praça de trabalho em plano horizontal.....	109
Tabela 3.1.2 - Etapas construtivas para a praça de trabalho em planos horizontais.....	112
Tabela 3.1.3 - Etapas construtivas para a praça de trabalho em planos inclinados.....	113
Tabela 3.6.1 – Ensaios para determinação do peso específico <i>in situ</i> dos resíduos.....	140
Tabela 3.6.2 – Ensaios para determinação do teor de umidade dos resíduos.....	141
Tabela 3.8.1 – Caracterização físico-química dos líquidos percolados – Campanhas efetuadas.....	146
Tabela 4.1.1 – Ensaios de Composição Gravimétrica.....	150
Tabela 4.2.1 – Teores de umidade médio dos resíduos sólidos urbanos determinados ao longo da execução do experimento.....	151
Tabela 4.3.1 – Peso específico <i>in situ</i> (kN/m ³) dos resíduos sólidos urbanos determinados ao longo da execução do experimento.....	152
Tabela 4.3.2 – Peso específico seco (kN/m ³) dos resíduos sólidos urbanos determinados ao longo da execução do experimento.....	153
Tabela 4.3.3 - Peso específico “solto” (kN/m ³) dos resíduos sólidos urbanos determinados ao longo da execução do experimento.....	153
Tabela 4.4.1 – Espessuras reais (m) das camadas de resíduos sólidos urbanos lançadas no aterro experimental.....	154
Tabela 4.4.2 - Espessuras compactadas (m) das camadas de resíduos sólidos urbanos nos quadrantes 16, 18, 20, 23, 25 e 27 do aterro experimental.....	156
Tabela 4.4.3 - Espessuras compactadas (m) das camadas de resíduos sólidos urbanos nos quadrantes 9, 11, 13, 30, 32 e 34 do aterro experimental.....	157
Tabela 4.4.4 - Espessuras compactadas (m) das camadas de resíduos sólidos urbanos nos quadrantes 2, 4, 6, 37, 39 e 41 do aterro experimental.....	157
Tabela 4.5.1 – Parâmetros para o modelo de compactação.....	159
Tabela 4.5.2 – Resultados da aplicação do modelo de compactação. Compactador 816F operando em plano horizontal de compactação.....	161
Tabela 4.5.3 – Resultados da aplicação do modelo de compactação. Trator de esteiras tipo D6D em plano horizontal de compactação.....	162
Tabela 4.5.4 – Resultados da aplicação do modelo de compactação. Trator de esteiras tipo D6D operando em plano inclinado de compactação.....	163
Tabela 4.6.1 – Espessuras e profundidades das camadas para as etapas construtivas do experimento. Quadrante de ensaio 20.....	176
Tabela 4.6.2 – Pesos específicos, tensões verticais atuantes, espessuras e profundidades. Quadrante de ensaio 20.....	177
Tabela 4.6.3 – Valores X_i (peso específico, profundidade, espessura e número de passadas) utilizados no estudo estatístico. Trator de esteiras D6D em plano horizontal.....	179

Tabela 4.6.4 – Valores X_i (peso específico, profundidade, espessura e número de passadas) utilizados no estudo estatístico. Compactador 816F em plano horizontal.....	180
Tabela 4.6.5 – Parâmetros do modelo peso específico vs. profundidade.....	180
Tabela 4.7.1 – Deformações, tensões verticais atuantes, espessuras e profundidades. Quadrante de ensaio 18.....	187
Tabela 4.7.2 – Valores Y_i (deformação, tensão vertical atuante, espessura e número de passadas) utilizados no estudo estatístico. Trator de esteiras D6D em plano horizontal.....	188
Tabela 4.7.3 – Valores Y_i (deformação, tensão vertical atuante, espessura e número de passadas) utilizados no estudo estatístico. Compactador 816F em plano horizontal.....	189
Tabela 4.7.4 – Parâmetros do modelo tensão deformação das camadas sob efeito combinado da compactação e das pressões subjacentes.....	190
Tabela 4.7.5 – Deformações imediatas (ϵ_{im}) e espessuras do quadrante de ensaio 18...	195
Tabela 4.7.6 - Deformações imediatas (ϵ_{im}), espessuras lançadas (t), número de passadas (P) e fatores de energia (E^*). Síntese dos resultados médios obtidos.....	195
Tabela 4.7.7 – Coeficientes de compressão (CR^*) e de compressibilidade volumétrica (m_v^*) para distintos níveis de tensão e quadrantes de ensaio do Bulldozer D6D.....	197
Tabela 4.7.8 – Coeficientes de compressão (CR^*) e de compressibilidade volumétrica (m_v^*) para distintos níveis de tensão e quadrantes de ensaio do Compactador 816F.....	198
Tabela 4.7.9 – Parâmetros para definição dos contornos de recalque junto à base do aterro experimental.....	201
Tabela 4.7.10 – Recalques secundários do aterro experimental (período Março a Setembro de 1998).....	204
Tabela 4.7.11 – Coeficientes de compressão secundária para distintos quadrantes de ensaio.....	205
Tabela 4.8.1 – Caracterização físico-química dos líquidos percolados no aterro experimental.....	209
Tabela 4.8.2 – Caracterização dos líquidos percolados - Valores médios e faixas observadas e reportadas na literatura.....	215
Tabela 4.8.3 – Precipitações e vazões de líquidos percolados diárias (ano 1997, parcial).....	217
Tabela 4.8.4 – Precipitações e vazões de líquidos percolados diárias (ano 1998).....	218
Tabela 4.8.5 – Precipitações e vazões de líquidos percolados diárias (ano 1999, parcial).....	220
Tabela 4.8.6 – Precipitações e volumes percolados mensais médios no aterro experimental.....	221
Tabela 4.8.7 – Método do balanço hídrico. Síntese dos resultados para o período Out/97 a Jul/99.....	223

Tabela 4.9.1 – Avaliação do efeito da compactação na vida útil do aterro sanitário e no custo unitário do resíduo aterrado.....	233
---	-----

VOLUME 2

Tabela 5.1.1 – Histórico de construção simplificado do Aterro Sanitário Bandeirantes (sub-aterro AS-1).....	236
Tabela 5.1.2 – Taxas de recalque observadas. Marco superficial MSE7.....	240
Tabela 5.1.3 – Coeficientes a' e b' obtidos para o modelo de YEN & SCANLON, admitindo tempo zero (t_0) igual ao de início das leituras de controle.....	241
Tabela 5.1.4 – Marcos superficial MSE4 – Aplicação do modelo hiperbólico.....	246
Tabela 5.1.5 – Resultados de aplicação do modelo hiperbólico.....	247
Tabela 5.1.6 – Resultados de aplicação do modelo de GIBSON & LO (1961).....	249
Tabela 5.1.7 – Resultados de aplicação do modelo baseado em funções de potência...	252
Tabela 5.1.8 – Resultados da aplicação do modelo de EDGERS et al. (1992).....	254
Tabela 5.1.9 - Resultados da aplicação do modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990).....	256
Tabela 5.1.10 - Resultados da aplicação do modelo de COUMOULOS & KORYALOS (1997).....	260
Tabela 5.1.11 – Coeficientes de compressão do modelo adaptado de SOWERS (1973) para distintos casos de análise.....	263
Tabela 5.1.12 – Resultados de aplicação do modelo adaptado de SOWERS (1973)....	263
Tabela 5.1.13 – Parâmetros de compressibilidade baseados no modelo de SOWERS (1973). Valores calculados e reportados na literatura.....	265
Tabela 5.4.1 – Entrada de dados do programa MSWSET tabulada para a placa de recalque PR5.....	294
Tabela 5.4.2 – Avaliação dos parâmetros reológicos do modelo compósito. Resultados da aplicação do programa MSWSET.....	306

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia
ABMS – Associação Brasileira de Mecânica de Solos
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA – American Public Health Association
ASCE – American Society of Civil Engineers
ASTM – American Society for Testing and Materials
CD – Compactação dinâmica
CFR – Código de Regulamentos Federais dos Estados Unidos da América
CPT – Cone Penetration Test
ECA – Estacas compactadas de areia
ETC8 – European Technical Committee nº8
HELP – Hydrologic Evaluation of Landfill Performance
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
ISSMFE – International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering
LIMPURB – Departamento de Limpeza Urbana da Prefeitura do Município de São Paulo
MSE – Marco superficial do experimento
MSW – Municipal solid waste
PC – Pré-carregamento
PEAD – Polietileno de alta densidade
PR – Placa de recalque
PVC – Policloreto de vinila
RSU – Resíduo sólido urbano
SASW - Spectral Analysis of Surface Wave
SPT – Standard Penetration Test
USCS – Unified Soil Classification System
USEPA – United States Environmental Protection Agency

LISTA DE SÍMBOLOS

A	=	área de tratamento ou carregamento, m^2
A	=	parâmetros do modelo (EDGERS, 1992)
AET	=	evapotranspiração real, mm por período de tempo (ano, mês ou dia) (FENN et al., 1975)
a e b	=	constantes empíricas da relação peso específico vs. pressões sobrejacentes (KREITH, 1994)
a e b	=	parâmetros para relação entre o módulo de rigidez secante e a tensão vertical (KOCKEL et al., 1997)
a e b	=	parâmetros para o modelo de YEN & SCANLON (SOHN & LEE, 1994)
a e b	=	parâmetros de compressibilidade primária e secundária do resíduo (EDIL et al., 1990)
a e k	=	constantes do modelo de compressão (GANDOLLA et al., 1992)
b	=	coeficiente de compressão mecânica secundária (modelo compósito)
B	=	largura de placa ou área de carregamento
c	=	coesão, kPa
c	=	taxa de compressão mecânica secundária (modelo compósito)
C	=	coeficiente de escoamento superficial
C_c	=	índice de compressão primária
C_c'	=	coeficiente de compressão primária
C_{crp}	=	coeficiente de compressão secundária devido à fluência do material face ao efeito de sobrecarga.
C_α	=	índice de compressão secundária
C_α'	=	coeficiente de compressão secundária
$C_{\alpha 1}$	=	coeficiente de compressão secundária intermediária (BJARNGARD & EDGERS, 1990)
$C_{\alpha 2}$	=	coeficiente de compressão secundária de longo prazo (BJARNGARD & EDGERS, 1990)
$C_{m(t)}$	=	coeficiente de compressibilidade global dependente do tempo (GABR et al., 2000)
C_v	=	coeficiente de adensamento ou consolidação vertical, cm^2/s
COD	=	quantidade de matéria orgânica biodegradável presente nos resíduos por ano, modelo Meruelo (DIAZ et al., 1995)
CR^*	=	coeficiente de compressão combinado (compactação e compressão primária)
CV	=	coeficiente de variação, definido pela razão entre o desvio padrão e a média da amostra, %
D	=	desvio entre os recalques ou alturas calculadas e observadas, %.

D	=	módulo de compressão volumétrica, kN/m^2
d	=	taxa de compressão biológica secundária (modelo compósito)
d_r	=	distância relativa entre a terra e o sol
$D_m(t)$	=	coeficiente dependente do tempo (GABR et al., 2000)
DBO	=	demanda bioquímica de oxigênio, mg/l
DQO	=	demanda química de oxigênio, mg/l
e e d	=	espaçamentos da malha nas duas direções (compactação dinâmica)
e_0	=	índice de vazios inicial
E	=	energia aplicada na compactação dinâmica, tm/m^2
E^*	=	fator de energia, número de passadas por espessura lançada, passadas/m
E	=	módulo de elasticidade, kPa
E_{dg}	=	compressão total devido à degradação dos resíduos (modelo compósito)
E_m	=	módulo pressiométrico, kPa
E_s	=	módulo de rigidez ou de deformabilidade secante, MPa (KOCKEL et al., 1997)
FS	=	fator de segurança
G	=	módulo de deformabilidade transversal, MPa
GC	=	grau de compactação da camada
G_{LFG}	=	capacidade total de geração de gases, m^3/t de resíduos sólidos urbanos (LEONARD et al., 2000)
h_t	=	profundidade de influência do tratamento (compactação dinâmica)
H	=	altura do aterro sanitário, metros
H	=	altura de queda do bloco (compactação dinâmica)
H_f	=	altura final do maciço, metros
I	=	infiltração, mm por período de tempo (ano, mês ou dia)
I_Z	=	fator de influência de tensões
J	=	dia juliano
k	=	taxa de decomposição e degradação dos resíduos sólidos urbanos
K_h	=	coeficiente de hidrolisação, $1/\text{dia}$
K_s	=	coeficiente de reação vertical, MPa/m
L	=	líquidos percolados, $\text{m}^3/\text{ha}/\text{dia}$
L	=	espessura da camada de resíduos, metros
m	=	taxa de recalque (YEN & SCANLON, 1975)
m	=	parâmetro do modelo (EDGERS et al., 1992)
m	=	compressibilidade de referência (EDIL et al., 1990)
m	=	número de passagens do equipamento pela área de tratamento (compactação dinâmica)
m_v^*	=	coeficiente de compressibilidade volumétrica combinado (compactação e compressão primária)

n	=	horas de insolação diária
n	=	número de golpes por ponto, em cada passagem do equipamento (compactação dinâmica)
n	=	taxa de compressão (EDIL et al., 1990)
N	=	número máximo possível de horas de insolação
N	=	tempo a partir do encerramento do aterro sanitário, ano (LEONARD et al., 2000)
N_{SPT}	=	número de golpes do ensaio de penetração SPT
O	=	percentagem do material orgânico degradável (em peso) em relação a quantidade total de resíduos inicialmente depositada (LEONARD et al., 2000)
p	=	pressão sobrejacente, kPa
P_0	=	concentração da matéria orgânica degradável no instante $t = 0$, kg por tonelada de resíduo (HOEKS, 1983)
P	=	número de passadas do equipamento durante processo de compactação
P	=	precipitação, mm por período de tempo (ano, mês ou dia)
$PERC$	=	percolação, mm por período de tempo (ano, mês ou dia) (FENN et al., 1975)
PET	=	evapotranspiração potencial, mm por período de tempo (ano, mês ou dia) (FENN et al., 1975)
q	=	sobrecarga atuante à superfície
q_c	=	resistência de ponta no ensaio CPT, kPa
Q_{LFG}	=	taxa de geração de gases no tempo t (m^3/dia) (LEONARD et al., 2000)
R	=	taxa de disposição dos resíduos sólidos urbanos no aterro sanitário, t/dia
r_0	=	declinação do sol
R_0	=	escoamento superficial, mm por período de tempo (ano, mês ou dia) (FENN et al., 1975)
R^2	=	coeficiente de determinação
S	=	recalque medido ou calculado
S	=	radiação solar, MJ/m^2
S_b	=	recalque por compressão biológica secundária
S_c	=	recalque por compressão mecânica secundária
S_p	=	recalque por compressão mecânica primária
S_0	=	radiação extraterrestre diária, MJ/m^2
S_F	=	fator de recalque (LEONARD et al., 2000)
S_r	=	grau de saturação, %
S_t	=	radiação solar global
SST	=	sólidos sedimentáveis totais, mg/l
ST	=	umidade armazenada na camada de cobertura (FENN et al., 1975)
t	=	tempo

t	=	espessura lançada das camadas de resíduos
t'	=	tempo a partir da aplicação do carregamento (modelo compósito)
t''	=	tempo a partir da disposição dos resíduos (modelo compósito)
t_0	=	tempo inicial dos processos de compressão
t_c	=	espessuras compactadas das camadas de resíduos
t_c	=	tempo de construção do aterro
t_k	=	tempo crítico, a partir do qual a taxa de recalques é acelerada pelos processos de decomposição (EDGERS et al., 1992)
t_l	=	idade média do aterro (YEN & SCANLON, 1975)
T	=	temperatura, em ° Celsius
V_i	=	volume inicial
V_1	=	volume unitário de areia utilizada (estacas compactadas de areia)
V_2	=	volume unitário de levantamento (empolamento) da superfície (estacas compactadas de areia)
V_3	=	volume unitário de resíduos (estacas compactadas de areia)
X	=	coordenada Norte
w	=	teor de umidade dos resíduos
w_{ot}	=	teor de umidade ótimo do material
w_w	=	teor de umidade dos resíduos expresso em relação ao peso úmido
w_s	=	teor de umidade dos resíduos expresso em termos do peso seco
w_s	=	ângulo do pôr do sol
W	=	peso do bloco (compactação dinâmica)
W_i	=	peso do constituinte i (LANDVA & CLARK, 1990)
W_c	=	peso total dos constituintes (LANDVA & CLARK, 1990)
z	=	profundidade, metros
Y	=	coordenada Leste
α	=	produção específica de gás, m ³ /ton/ano (HOEKS, 1983)
α	=	parâmetro do modelo de compressibilidade (EDGERS et al., 1992)
α	=	coeficiente de perda de massa, modelo Meruelo (DIAZ et al., 1995)
α	=	fator de carga para compactação dinâmica, função do tipo de material
α	=	taxa de compressão para técnicas de melhoria de terrenos
α	=	coeficiente de Albedo
β e B	=	fatores que levam em conta, respectivamente, a atividade biológica dos microorganismos presentes e um fator de escala do processo de deformação em relação ao efeito de decomposição dos resíduos devido à cinética de crescimento das bactérias (WILLIAMS, 1991).
β_0 e β_1	=	constantes do método observacional (MANASSERO e PASQUALINE, 1993)
$\Delta\gamma_i$	=	acréscimo no peso específico do constituinte i (LANDVA & CLARK, 1990)

ΔST	=	variação do teor de umidade armazenado no solo (FENN et al., 1975)
ΔH	=	recalques medidos ou calculados
ΔH_1	=	recalque primário da camada de espessura H (SOWERS, 1973)
ΔH_2	=	recalque secundário da camada de espessura H (SOWERS, 1973)
ΔH_{bio}	=	recalque devido à degradação dos resíduos (EDGERS et al., 1992)
ΔH_{ult}	=	recalque final esperado (tempo infinito)
Δt	=	intervalo de tempo entre leituras
$\Delta V_{s(t)}$	=	variação volumétrica inter partículas com o tempo
$\Delta V_{v(t)}$	=	variação volumétrica intra partículas com o tempo
$\Delta \sigma$	=	acrécimo de tensão vertical
$\Delta \sigma_{oct}$	=	acrécimo das tensões normais octaédricas
$\Delta u_{(t)}$	=	acrécimo das tensões neutras
$\Delta \tau_{oct}$	=	acrécimo das tensões cisalhantes octaédricas
ε	=	deformação
$\varepsilon_{tot-dec}$	=	compressão total passível de ocorrer por conta da biodegradação dos resíduos, sendo dependente da quantidade de matéria degradável presente nos resíduos (PARK & LEE, 1997)
ε_{im}	=	deformação imediata da camada
ε_s	=	deformação secundária
ε_{ult}	=	deformação última
ϕ	=	ângulo de atrito
ϕ	=	latitude
ρ	=	taxa de recalques ($\Delta H/\Delta t$)
ρ_o	=	taxa de recalques inicial ($\Delta H/\Delta t$)
λ/b	=	taxa de compressão secundária (EDIL et al., 1990)
γ	=	peso específico do resíduo, kN/m^3
γ_c	=	peso específico médio do resíduo, kN/m^3 (LANDVA & CLARK, 1990)
γ_c	=	peso específico do resíduo compactado, kN/m^3
γ_d	=	peso específico seco do resíduo, kN/m^3
γ_i	=	peso específico inicial do resíduo, kN/m^3
γ_i	=	peso específico do constituinte i , kN/m^3 (LANDVA & CLARK, 1990)
γ_{eac}	=	peso específico dos líquidos percolados, kN/m^3
γ_p	=	peso específico do resíduo à pressão sobrejacente p , kN/m^3
γ_s	=	peso específico das partículas sólidas, kN/m^3
γ_{sat}	=	peso específico saturado dos resíduos sólidos, kN/m^3
γ_{sp}	=	peso específico do resíduo solto, kN/m^3
γ_w	=	peso específico da água igual a $9,81 \text{ kN/m}^3$
σ	=	desvio padrão
σ_v	=	tensão vertical

σ_v'	=	tensão vertical efetiva
σ_{vm}	=	tensão vertical média da camada
σ_{sur}	=	tensões no meio da camada devido à sobrecarga representada pelo aterro experimental.
θ_{FC}	=	capacidade de campo volumétrica, %
ν	=	coeficiente de Poisson

RESUMO

MARQUES, A.C.M. (2001). *Compactação e Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos*. São Carlos, 2001. 408p Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos.

Os objetivos desta pesquisa incluem: (i) estudar as características de compactação dos resíduos sólidos urbanos (RSU); (ii) avaliar os mecanismos de compressão dos RSU e o efeito de sobrecarga (aterro experimental) em maciço sanitário existente; (iii) desenvolver programa computacional para previsão de recalques em aterros sanitários.

Um aterro experimental com cerca de 24.400m^3 de RSU e altura de até 4m, distribuído em área aproximada de 8.400m^2 , foi construído em São Paulo para estudar os procedimentos de compactação de aterros sanitários. Ensaios *in situ* de grande dimensão foram executados para avaliar o peso específico do resíduo, após a compactação, em diferentes posições e camadas do experimento. Ensaios de umidade e composição dos resíduos foram realizados, assim como o levantamento das espessuras das camadas para cada etapa construtiva.

O aterro experimental foi construído sobre aterro existente, criando a oportunidade para estudar a compressão do resíduo novo e antigo. Rigoroso programa de monitoração de recalques foi implantado, de forma que as deformações do aterro experimental pudessem ser isoladas das do aterro existente. Marcos superficiais foram posicionados interna e externamente à área do experimento, e placas de recalque instaladas na base do aterro experimental. O período de monitoramento envolveu cerca de 3 anos de medidas.

A pesquisa resultou em: (i) novos subsídios e relações para a compactação dos RSU, incluindo as influências do equipamento de compactação, número de passadas, espessura das camadas, plano de compactação e teor de umidade, mostrando ser este último o parâmetro de maior impacto no processo de compactação; (ii) dados de peso específico e de sua relação com a profundidade, assim como do efeito da compactação na compressibilidade dos RSU e na geração de líquidos percolados em aterros sanitários; (iii) avaliação do desempenho de modelos de compressibilidade existentes na literatura; (iv) desenvolvimento de modelo compósito para compressibilidade dos RSU, considerando a compressão mecânica primária e secundária e a parcela devido a biodegradação dos resíduos; (v) desenvolvimento do programa MSWSET usando o modelo compósito para cálculo dos recalques de aterros como função do tempo. O modelo e programa desenvolvidos apresentaram elevado desempenho, constituindo importante ferramenta para previsão de recalques de aterros sanitários.

Palavras-chave: resíduos sólidos urbanos, aterros sanitários, compactação, peso específico, compressibilidade, recalques, modelos reológicos.

ABSTRACT

MARQUES, A.C.M. (2001). *Compaction and Compressibility of Municipal Solid Waste*. São Carlos, 2001. 408p Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos.

The objectives of this research were to: (i) study the compaction characteristics of municipal solid waste (MSW); (ii) evaluate the compression mechanisms of MSW and its response to a surcharge (waste test fill) over an existing landfill; (iii) develop a computer program for landfill settlement predictions.

A waste test fill with a volume of about 24,400 m³ and a height up to 4 m, distributed over an area of approximately 8,400 m², was constructed in Sao Paulo, to study compaction procedures for sanitary landfills. Large *in situ* tests were performed to evaluate the unit weight of waste immediately after compaction at several locations for each lift. Water content measurements and composition determinations were carried out, as well as thickness measurements of the waste layers after each construction (compaction) phase.

The test fill was constructed over an existing landfill. Thus, the test fill provided opportunities to study the compression of the new and the old waste. A rigorous program of deformation monitoring was implemented in order to separate compression of the test fill from settlement of the underlying landfill. Benchmarks were located inside and outside of the experimental area, and settlement plates were installed at the bottom of the test fill. The monitoring period encompasses around 3 years of measurements.

The research provided: (i) new guidelines and relationships for compaction of municipal solid waste, including the influences of compaction equipment, number of passes, lift thickness, water content, and compaction plane. The water content has presented larger response on the compaction process than the other variables; (ii) quantitative data regarding unit weight, the influence of depth on unit weight, water content, compressibility of MSW, and leachate generation; (iii) assessment of the performance of existing MSW compressibility models described in the literature; (iv) development of a composite model of MSW compressibility that considers primary compression, secondary mechanical compression, and compression from biodegradation; (v) development of the computer program MSWSET using the composite model of MSW compressibility to calculate landfill settlement as a function of time. The developed model and program has presented a high performance, being a powerful tool for landfill settlement prediction.

Keywords: municipal solid waste, sanitary landfills, compaction, unit weight, compressibility, settlements, rheological models

INTRODUÇÃO

A geração de resíduos apresenta-se como uma característica inerente à atividade humana, seja através de processos fisiológicos, seja através do manejo de materiais existentes. O crescimento da população através dos tempos, associado a outros aspectos de ordem econômica e social, implicou elevada concentração populacional em cidades e metrópoles (81% da população do Brasil reside atualmente em centros urbanos, segundo dados do Censo 2000 do IBGE), criando condições para o acúmulo e disposição inadequada dos resíduos gerados e conseqüentemente para a contaminação do meio ambiente.

Neste contexto e em um primeiro instante começaram a ser desenvolvidas técnicas que reduzissem os odores e vetores que poderiam comprometer a saúde pública. Com o passar do tempo, os processos de industrialização e de evolução tecnológica aumentaram ainda mais a geração de resíduos, implicando a ocupação de grandes espaços e a degradação de inúmeros locais.

Até a metade deste século, quase todos os resíduos eram descartados a céu aberto, desprovidos de qualquer técnica associada, ou seja, eram simplesmente lançados em áreas disponíveis para este fim, normalmente aquelas que possuíam características topográficas que facilitassem as operações de acesso e lançamento. Assim, as áreas mais visadas recaíam em depressões naturais e áreas abandonadas de mineração e exploração de jazidas. Somente há algumas décadas surgiram técnicas e normas para a disposição de resíduos sólidos em depósitos controlados, os quais foram denominados aterros sanitários. Tais estruturas, desde então, vem incorporando diversas tecnologias, materiais e equipamentos de construção, que visam ao controle e à minimização dos impactos ambientais decorrentes deste tipo de empreendimento. Em paralelo, outras ações e processos também foram e vêm sendo igualmente desenvolvidos para a diminuição do volume e tratamento dos resíduos a serem dispostos (programas de conscientização e de educação ambiental, legislação e tarifação

específica para coleta e disposição, incineração, reciclagem e reutilização de resíduos, tratamento e redução de volumes previamente à disposição, etc).

Observe-se de qualquer forma, que todo processo tecnológico gera resíduo. Incluem-se aqui tanto os processos que visam à recuperação da matéria, como por exemplo, os sistemas de triagem, reciclagem e compostagem, como aqueles que visam à eliminação da mesma através de processos térmicos (incineração). Tal constatação faz com que os aterros sanitários sejam sempre necessários e se apresentem como a forma principal e mais usual e econômica para disposição final dos resíduos no Brasil e em grande parte do mundo.

O Brasil, nos últimos anos, tem registrado significativas taxas de geração de resíduos, face ao crescimento populacional, aos mencionados processos de urbanização das cidades, à estratégia de apresentação e embalagem dos produtos e ao maior acesso a estes pela população, motivado pela estabilização da economia nacional. A escassez de áreas disponíveis para disposição de resíduos no entorno dos centros geradores, devido às regulamentações ambientais restritivas para este tipo de obras, soma-se aos aspectos mencionados para o agravamento do quadro atual e futuro do tratamento e destinação dos resíduos sólidos urbanos.

Outro fato digno de nota nas grandes cidades e metrópoles brasileiras, diz respeito à tendência de execução de aterros sanitários com elevadas alturas, da ordem de 100 (cem) metros, face a dificuldade de liberação de novas áreas para a disposição no município. A opção por aterros desta magnitude acaba sendo impositiva, visto que os custos decorrentes da aquisição de terras, em um primeiro momento, e das distâncias de transporte às áreas selecionadas, em um instante posterior, implicam investimentos de porte e de gerenciamento complexo (repassa das tarifas aos cidadãos, por exemplo). A cidade de São Paulo pode ser tomada como exemplo desta problemática. Possui pequena quantidade de áreas em condições legais e técnicas passíveis de instalação de novas unidades e tem que gerenciar o destino da maior parte das 16.000 toneladas de resíduos sólidos, gerados diariamente, para dois aterros sanitários (Bandeirantes e São João), já próximos do esgotamento (final de 2001).

Decorre daí a necessidade de um melhor entendimento do comportamento a médio e longo prazo destes maciços, assim como a resposta dos mesmos a distintas técnicas construtivas e operacionais, as quais isoladamente ou em conjunto possam gerar um aumento na vida útil e um melhor aproveitamento do espaço físico a eles destinados. Acrescente-se a estes aspectos, a importância nos dias atuais para a recuperação e reaproveitamento de antigas áreas de disposição, as quais demandam igualmente o conhecimento das condições geomecânicas do maciço, assim como a previsão do seu comportamento futuro.

O trato com materiais tão heterogêneos, mutáveis com o tempo e condições ambientais, além de reologia e comportamento mecânico complexo, como são os resíduos sólidos urbanos, coloca à pesquisa desafios ainda maiores para obtenção de respostas às preocupações anteriormente mencionadas. A obtenção de parâmetros e leis de comportamento para os resíduos sólidos urbanos em laboratório, ou mesmo em células experimentais de maior porte (por exemplo, lisímetros), pode conduzir a resultados insatisfatórios, quer seja pelas características do material (heterogeneidade, dimensão de partículas, susceptibilidade a processos de degradação biológica, etc), quer seja pela impossibilidade da simulação das mesmas condições presentes nos locais de disposição (fatores ambientais, histórico de carregamento, drenagem de gases e líquidos, etc). A realização de ensaios *in situ* e a monitoração de aterros sanitários apresentam-se como formas para contornar as limitações mencionadas, podendo ser utilizadas para o estudo de certas características e mecanismos dos resíduos sólidos urbanos.

O objetivo do presente trabalho está direcionado ao estudo de compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos, baseado integralmente em resultados de ensaios e controles realizados em um aterro experimental, concebido, construído e monitorado para este fim. O trabalho procura, portanto, caracterizar e analisar os parâmetros e mecanismos envolvidos na compactação e compressibilidade destes resíduos, vital para a proposição de modelos e técnicas operacionais e construtivas, seguras e a custos adequados, e que venham, em um futuro próximo, proporcionar a otimização dos projetos e das áreas de disposição, com aumento, em última análise, da vida útil dos aterros sanitários. O estudo de compactação inclui a avaliação da influência de procedimentos construtivos e de outras variáveis na densificação do material, assim como do efeito da compactação na compressibilidade dos resíduos e na geração de líquidos percolados no aterro sanitário. O estudo de compressibilidade, por sua vez, inclui a concepção de um modelo reológico compósito e de um programa de cálculo automático para previsão de recalques de aterros sanitários, os quais procuraram eliminar as limitações e deficiências detectadas em propostas existentes na literatura.

1.1 Articulação Organizacional para Viabilização do Experimento

A pesquisa que ora se apresenta teve por base, conforme mencionado, a construção e monitoração de um aterro experimental de resíduos sólidos urbanos, atividades estas que demandaram o envolvimento de diversas empresas e pessoas por um razoável período de tempo. Todo este esforço foi possível face à sensibilização por parte dos órgãos intervenientes (Poder Público, órgãos reguladores e ambientais, instituições de pesquisa,

empresas de execução e consultoria, etc) para a importância da busca de soluções à problemática atual de disposição de resíduos sólidos.

A criação de um Grupo de Trabalho pelo Departamento de Limpeza Urbana – LIMPURB da cidade de São Paulo, no ano de 1996, foi o primeiro passo para a viabilização desta pesquisa e experimento. Tal grupo contou com a participação de diversas entidades e empresas ao seu início, incluindo, entre outras, o Departamento de Limpeza Urbana - LIMPURB, o Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, e as empresas de consultoria ENGECORPS – Corpo de Engenheiros Consultores S/C Ltda. e CEPOLLINA – Engenheiros Consultores S/C Ltda. No caso específico do aterro experimental deve ser ainda ressaltada a colaboração da Construtora Heleno & Fonseca e das empresas Lion – Caterpillar, Nortene Plásticos Ltda e Sansuy S.A. – Indústria de Plásticos. Após o encerramento do Grupo de Trabalho, ao final de 1997, o Departamento de Geotecnia da EESC/USP prosseguiu com o estudo de comportamento geomecânico dos aterros sanitários, o qual foi dividido basicamente em quatro etapas principais:

- *Etapa 1- Reconhecimento e Caracterização dos Maciços:* esta etapa apoiou-se na realização de uma série de ensaios *in situ* e laboratoriais (ensaios SPT, CPT, infiltração, resistividade elétrica, “cross hole”, caracterização físico-química, etc) e na coleta de amostras, os quais objetivaram a identificação e caracterização dos resíduos no interior dos maciços.
- *Etapa 2 - Ensaios Laboratoriais Especiais:* nesta etapa foram desenvolvidos e adaptados equipamentos de maior porte para a realização de ensaios de consolidação e de compressão triaxial, visando à definição de parâmetros de resistência e deformabilidade dos resíduos sólidos urbanos.
- *Etapa 3 - Aterro Experimental:* esta etapa objetivou analisar a eficácia de técnicas construtivas e operacionais, assim como a obtenção de parâmetros para a avaliação do comportamento geomecânico dos maciços de resíduos sólidos urbanos (RSU) e dos elementos que os constituem.
- *Etapa 4 - Modelação de Comportamento e Análises de Previsão:* constituiu a etapa final do programa de pesquisa, na qual os dados obtidos foram utilizados para a formulação e proposição de modelos de compressibilidade que representem e simulem o comportamento dos aterros sanitários a médio e longo prazo.

Os trabalhos relativos às Etapas 1 e 2 foram finalizados em meados de 1999 e resultaram em um trabalho de doutoramento na EESC/USP (CARVALHO, 1999), enquanto que os trabalhos relativos às Etapas 3 e 4 são a base principal da presente pesquisa.

1.2 Estruturação do Trabalho

Este documento foi estruturado basicamente em 6 (seis) capítulos principais, acrescidos da apresentação das referências bibliográficas e dos apêndices.

No capítulo 1 é feita a colocação do problema da disposição de resíduos sólidos urbanos, inserindo-a em um contexto ambiental e geotécnico e justificando a necessidade do aprofundamento da pesquisa científica para o assunto. No capítulo 2 é feita a revisão de trabalhos anteriores, abordando os temas que direta ou indiretamente auxiliam a compreensão dos fenômenos envolvidos no comportamento geomecânico e nas técnicas construtivas utilizadas, obviamente reservando maior destaque e espaço a alguns assuntos específicos. Neste sentido, são introduzidos alguns conceitos e aspectos relacionados à geração e caracterização dos líquidos percolados e dos gases presentes nos aterros sanitários, assim como a sistematização dos parâmetros e aspectos que caracterizam os resíduos sólidos domiciliares e a discussão dos mecanismos e modelos de previsão de recalque em aterros sanitários. O capítulo se complementa com a síntese e discussão dos trabalhos e estudos realizados para a melhoria e recuperação de aterros sanitários, com destaque para os estudos relacionados a compactação e utilização de sobrecarga (pré-carregamento).

O capítulo 3 diz respeito à metodologia do trabalho, focando basicamente a execução e monitoramento do aterro experimental. Desta forma, o mesmo inclui, entre outros, os conceitos envolvidos na concepção e arranjo do aterro, os serviços realizados, os ensaios e controles executados, a seqüência de construção e os princípios tomados em consideração nas operações de lançamento, espalhamento e compactação dos resíduos sólidos urbanos.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados do estudo de compactação, incluindo as análises realizadas e os modelos adotados. Proposições relacionando o peso específico dos resíduos com os diversos parâmetros construtivos estudados (número de passadas, espessura das camadas, tipo de equipamento, etc), teor de umidade e profundidade são igualmente apresentados. O capítulo se encerra com a avaliação do efeito da compactação nas relações tensão vs. deformação do resíduo compactado e na geração dos líquidos percolados.

O capítulo 5 apresenta e discute os resultados do estudo de compressibilidade, incluindo a avaliação de desempenho dos diversos modelos discutidos no capítulo 2, com base nos dados observados ao longo da monitoração do experimento, e a descrição do modelo compósito e do programa computacional desenvolvido para avaliação de recalques em

aterros sanitários. O capítulo inclui ainda a apresentação dos estudos desenvolvidos para a avaliação dos parâmetros reológicos do modelo, assim como os resultados de estudo paramétrico para avaliação da sensibilidade de alguns dos componentes de cálculo envolvidos. A avaliação de desempenho e as potencialidades e limitações do modelo e programa propostos no estudo de compressibilidade são igualmente discutidas neste capítulo.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões e recomendações finais do trabalho, estas últimas direcionadas às potenciais linhas de pesquisa a serem desenvolvidas, seguidas das referências bibliográficas pesquisadas e citadas no trabalho e dos apêndices que subsidiam e auxiliam a compreensão do mesmo.

Capítulo 2

REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES

Como elemento de motivação do trabalho e alvo das preocupações da pesquisa apresenta-se a seguir uma revisão dos principais conceitos, propriedades e estudos relacionados aos resíduos sólidos urbanos e às unidades de disposição representadas pelos aterros sanitários, restringindo a mesma aos tópicos de correspondência direta com o tema do presente trabalho.

Inicialmente, faz-se necessário apresentar algumas definições e classificações básicas. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através de sua norma NBR 10.004/87 (“Resíduos Sólidos – Classificação”), define resíduos sólidos como: “resíduos no estado sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade, de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço de varrição, etc. Ficam incluídos 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 tornam inviáveis o seu lançamento na rede de esgoto ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnicas economicamente inviáveis, face a melhor tecnologia disponível”.

O Código de Regulamentos Federais (CFR) dos Estados Unidos, em seu título 40 – “Proteção do Meio Ambiente”, parte 257 (40 CFR 257, 1992), apresenta, por sua vez, as seguintes definições de interesse:

- resíduos sólidos (“*solid waste*”): “*any garbage, refuse, sludge, and other discarded material, including solid, liquid, semisolid, or contained gaseous material resulting from industrial, commercial, mining, and agricultural operations. This does not include solid or dissolved materials in domestic sewage, in irrigation return flows or industrial discharges that are point sources*”;

- aterro de resíduos (“*landfill*”): “*an area of land or an excavation in which wastes are placed for permanent disposal*”.
- aterro de resíduos sólidos urbanos (“*municipal solid waste landfill – MSWLF*”): “*a discrete area of land or an excavation that receives household waste*”.
- aterro sanitário (“*sanitary landfill*”): “*a facility for the disposal of solid waste which complies with the Code of Federal Regulations*”.

Quanto às classificações, diversas propostas tem sido apresentadas para representar e cobrir a elevada variabilidade de resíduos que convergem às unidades de disposição final. A NBR 10.004/87 (“Resíduos Sólidos – Classificação”) da ABNT, por exemplo, em conjunto com as normas NBR 10.005/87, 10.006/87 e 10.007/87, enquadra os resíduos em 3 classes:

- classe I: abrange os resíduos perigosos, ou seja, aqueles que apresentam periculosidade por inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade;
- classe II: abrange os resíduos não inertes, ou seja, todos aqueles não incluídos nas classes I e III, podendo apresentar propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água;
- classe III: abrange os resíduos inertes e não perigosos (rochas, tijolos, vidros, etc).

2.1 Biodegradação dos Resíduos Sólidos Urbanos

Os aterros sanitários podem ser entendidos como verdadeiros e heterogêneos reatores biológicos, tendo como principais componentes de entrada e alimentação os resíduos sólidos e a água, e como principais elementos de saída os líquidos percolados e o biogás. A decomposição dos resíduos sólidos urbanos, em um aterro sanitário, dá-se tanto por processos aeróbios quanto por processos anaeróbios de digestão da matéria orgânica, sendo a diferença básica entre os processos, a presença e ausência de oxigênio, respectivamente.

Os principais fatores que influenciam a cinética dos processos de biodegradação são: granulometria, composição e idade do resíduo; umidade contida no resíduo; temperatura no aterro; aspectos quantitativos e qualitativos de nutrientes; pH dos líquidos presentes no aterro e densidade e grau de compactação dos resíduos (PARKER, 1983).

2.1.1 Geração e Características do Biogás

Os estudos de biodegradabilidade dos resíduos em aterros sanitários foram até hoje, preferencialmente direcionados para a produção de gases, por serem estes importante fonte

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

de energia e, portanto, de elevado interesse econômico. Desta forma, várias formulações matemáticas foram desenvolvidas, visando a determinação da produção de gases em aterros sanitários (FARQUHAR & ROVERS, 1973; REES, 1980; POHLAND et al., 1983; BARLAZ et al., 1990; MCBEAN et al., 1995).

A definição de um modelo geral para a produção de gases em aterros sanitários foi inicialmente proposta por FARQUHAR & ROVERS (1973). Estes autores identificaram quatro fases para representação do processo de produção de gases ao longo do tempo, as quais foram designadas como: fase aeróbia (fase 1); fase anaeróbia, não metanogênica (fase 2), fase anaeróbia, metanogênica, não estabilizada (fase 3); e fase anaeróbia, metanogênica, estabilizada (fase 4). A Figura 2.1.1 apresenta, em termos gráficos, a evolução da composição dos gases gerados ao longo das diversas fases, identificadas segundo proposição dos autores. Posteriormente, outros estudos foram apresentados, visando complementar e subsidiar este modelo inicial com um maior número de pesquisas e resultados. Destacam-se, neste sentido, os trabalhos de REES (1980), POHLAND et al. (1983) e BARLAZ & HAM (1993). Estes últimos autores subdividem o processo de produção de gases igualmente em 4 etapas sequenciais, caracterizadas como:

- fase 1 – fase aeróbia: envolve a decomposição aeróbia da matéria orgânica, sendo o oxigênio presente nos resíduos recém depositados consumido para produção de gás carbônico (CO_2). Nota-se nesta fase, produção de CO_2 e consumo sensível de N_2 e O_2 , com nenhuma geração de gás metano. Nesta fase pode ser registrada a degradação de cerca de 5 a 10% da matéria sólida passível de transformação em gases.
- fase 2 - fase anaeróbia ácida: com a extinção do oxigênio, criam-se condições ideais para a decomposição anaeróbia do material orgânico em ácidos orgânicos, caracterizando o estágio denominado por fase ácida. Nota-se também nesta fase um aumento considerável na produção de CO_2 . Os líquidos percolados nesta fase apresentarão um pH não superior a 5 devido a presença de ácidos orgânicos e à elevada concentração de CO_2 no aterro. Serão característicos ainda, elevados valores de DBO e DQO para os líquidos percolados, devido à alta solubilidade dos ácidos orgânicos neles presentes. Nesta fase, pode ser observada a decomposição de cerca de 15 a 20% da matéria sólida com potencial de conversão a gás.
- fase 3 - fase metanogênica acelerada: nesta fase, a produção de metano e de ácidos ocorre simultaneamente, sendo a taxa de produção destes últimos significativamente menor. Com a mencionada conversão dos ácidos e do H_2 em termos de CH_4 e CO_2 , o pH no aterro irá aumentar, atingindo uma faixa entre 6.8 e 8, enquanto que as concentrações

de DBO e DQO sofrerão significativas reduções. Nestas condições (valores neutros de pH), observar-se-á ainda a redução da solubilidade de compostos inorgânicos, implicando uma menor quantidade de metais pesados contidos nos líquidos percolados. Uma parcela adicional da matéria sólida é degradada e convertida nesta fase.

- fase 4 - fase metanogênica desacelerada: esta fase ocorrerá após a conversão de toda a matéria orgânica disponível em CH_4 e CO_2 . A taxa de produção de gases diminui substancialmente nesta fase, uma vez que a maioria dos nutrientes já foi removida pelos líquidos percolados nas fases anteriores e os remanescentes apresentam lento processo de biodegradação. Os principais gases gerados nesta fase são o CH_4 e o CO_2 , sendo que pequenas quantidades de N_2 e O_2 também são igualmente registradas. A decomposição da matéria sólida atinge valores entre 50 e 70%, dependendo da produção de metano e das práticas operacionais empregadas.

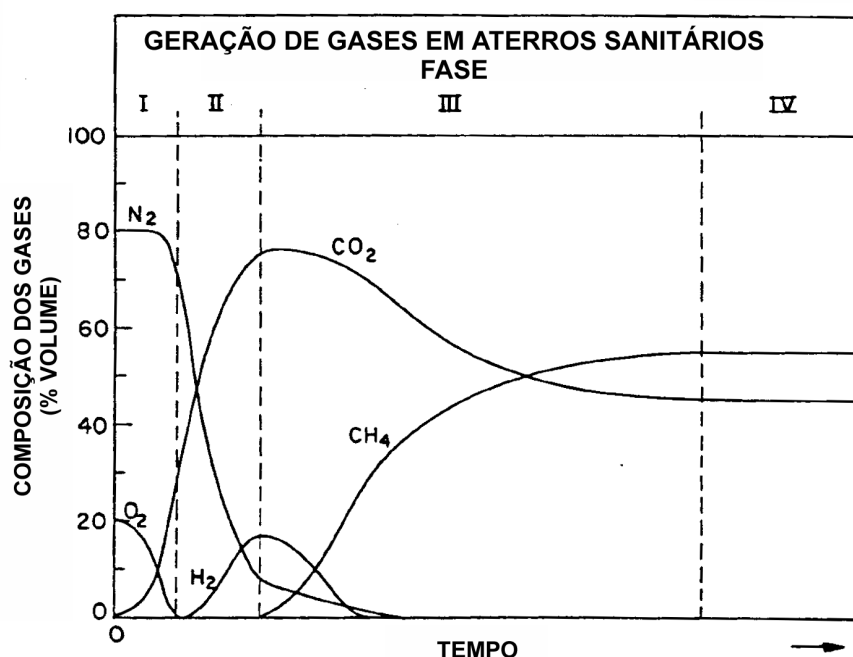


Figura 2.1.1 - Fases de geração de gases em aterros sanitários (FARQUHAR & ROVERS, 1973).

A duração de cada etapa varia em função de uma série de características peculiares do aterro, tais como: presença e distribuição de matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes, umidade presente no resíduo e no interior do aterro, grau de compactação inicial, etc. Densidades mais elevadas e/ou umidades reduzidas implicam, por exemplo, menores taxas de produção de biogás (MCBEAN et al., 1995).

A velocidade de produção do gás é função da velocidade de decomposição anaeróbia da matéria orgânica biodegradável presente no aterro. PARKER (1983) relata que cerca de 50% do potencial de geração de gás de um aterro sanitário será desenvolvido no período de 5 a 15 anos após a disposição do resíduo, podendo traços de gás metano serem detectados após várias décadas.

O teor de umidade no interior de um aterro sanitário representa importante papel no processo de decomposição e conseqüentemente no de geração de biogás. Valores de umidade entre 50 e 60% facilitam e aceleram sobremaneira o processo de biodegradação do material orgânico presente nos resíduos sólidos domiciliares. Por outro lado, baixos valores de umidade implicam o abatimento (volumes concentrados menores) e o prolongamento (maior período de influência) das curvas de produção de biogás (MCBEAN et al., 1995 e TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

Modelos teóricos para determinação das taxas de produção de gás geralmente assumem que a degradação dos resíduos orgânicos respeita uma reação de primeira ordem, gerando como sub-produtos essencialmente CH₄ e CO₂ (BARLAZ & HAM, 1993). HOEKS (1983), neste sentido, propôs a seguinte formulação para a produção específica de gás, α , em m³/ton/ano.

$$\alpha = 0,8 P_0 k e^{-kt}$$

onde:

P_0 = concentração da matéria orgânica degradável no instante $t = 0$ (kg por tonelada de resíduo)

k = coeficiente de degradação (ano⁻¹)

t = tempo (ano)

Os valores de k e P_0 são diretamente dependentes da natureza da matéria orgânica presente no resíduo, enquanto o coeficiente 0,8 corresponde ao fator de produção de gás a partir da matéria orgânica degradável, em m³/kg. A literatura reporta poucos valores para estes parâmetros, sendo os mesmos resultantes de experimentos em lisímetros ou testes com extração de gás *in situ*. FARQUHAR & ROVERS (1973), a partir de experimentos em lisímetros, por exemplo, obtiveram um valor para o coeficiente de degradação (k) igual a 0,0365 ano⁻¹. HOEKS (1983), por sua vez, apresenta valores para k iguais a 0,693; 0,139 e 0,046 ano⁻¹, respectivamente, para materiais prontamente degradáveis (resíduos alimentares), moderadamente degradáveis (podas e vegetação) e lentamente degradáveis (papel, tecidos e madeiras).

Quanto à composição, o biogás é constituído por uma série de gases que se apresentam em maiores ou menores proporções, sendo o metano (CH₄) e o gás carbônico (CO₂) os de maior representação em termos do volume gerado durante a vida do aterro. A Tabela 2.1.1 apresenta a composição típica dos gases gerados em um aterro sanitário, de onde pode ser observado que cerca de 90% dos gases gerados são representados por CH₄ e CO₂, sendo o restante uma composição de outros gases (O₂ e N₂, entre outros), denominados traços de gases ou gases secundários.

Tabela 2.1.1 Constituição típica do biogás de aterros sanitários (PARKER, 1983).

COMPONENTE	VOLUME (%)
Metano (CH ₄)	47,5
Gás Carbônico (CO ₂)	47,0
Nitrogênio (N ₂)	3,7
Oxigênio (O ₂)	0,8
Hidrocarbonetos	0,3
Hidrogênio (H ₂)	0,1
Monóxido de Carbono (CO)	0,1
Gases secundários	0,5

2.1.2 Geração e Características dos Líquidos Percolados

Os líquidos que percolam através dos resíduos sólidos e que lixiviam os materiais dissolvidos e em suspensão ali presentes englobam, basicamente, os líquidos infiltrados no aterro, provenientes de distintas fontes externas (drenagens superficiais, precipitações pluviométricas, lençóis freáticos, etc), e os líquidos gerados pela decomposição dos resíduos.

2.1.2.1 Geração dos Líquidos Percolados

A produção dos líquidos percolados é função da precipitação e da disponibilidade de água no local (recirculação dos líquidos gerados, irrigação da camada de cobertura, presença de lodos, etc), das características da camada de cobertura (umidade, vegetação, declividades, etc), das características dos resíduos depositados (composição, umidade, idade, densidade, método de disposição, etc) e do método de impermeabilização do local (CANZIANI & COSSU, 1989).

A precipitação constitui o principal fator de influência na geração de líquidos em aterros sanitários. EHRIG (1988) reporta produções de líquidos percolados na faixa de 15 a 20% das precipitações registradas, para diferentes aterros sanitários em diferentes épocas do ano. HAM & BOOTKER (1982), baseado em estudos realizados em lisímetros executados com

diferentes condições de contorno (espessura e tipo de resíduo, presença ou não de material de cobertura, etc), apresentam valores para geração de líquidos percolados variando entre 6,9 e 22,1% da precipitação registrada.

A influência dos parâmetros anteriormente citados na geração de líquidos percolados em aterros sanitários tem sido alvo de diversos estudos. CHRISTENSEN et al. (1992), por exemplo, apresentam uma completa revisão sobre os efeitos de certos procedimentos operacionais na estabilização de aterros sanitários. As técnicas discutidas pelos autores incluem, entre outras, a adição de lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes, a trituração dos resíduos, a compactação intensiva, a utilização de coberturas diárias de solo, a recirculação dos líquidos percolados e a pré-compostagem dos resíduos.

No tocante ao efeito da compactação dos resíduos, o trabalho apresentado por EHRIG (1983) e sumarizado na Tabela 2.1.2, mostra que o efeito da utilização deste procedimento na redução da quantidade de líquidos percolados é significativo. Os valores registrados situam-se na faixa de 25 a 50% da precipitação para resíduos compactados com tratores de esteiras e de 15 a 25% da precipitação para resíduos compactados com compactadores de grande porte.

Tabela 2.1.2 Precipitação e produção de líquidos percolados em aterros sanitários na Alemanha (EHRIG, 1983).

ATERRO	P (mm/ano)	L/P (%) ⁽¹⁾	L (m ³ /ha/dia)	OBSERVAÇÕES
<i>Compactadores de grande porte</i>				
1	652	15.1	2.7	-
2	651-998	12.2-29.8	3.2-8.1	Coberto e revestido com vegetação
3	651-998	16.9-21.6	3.0-5.9	-
4	632	16.3-18.3	2.8-3.2	-
5	509	16.8	2.3	-
6	556-1057	15.6-19.6	2.6-5.1	-
7	770	3.3-7.2	0.7-1.1	Aterro recente
8	-	22	3.8	Coberto com solo; recirculação dos percolados
9	-	38	6.7	Recirculação dos percolados
<i>Compactação com tratores de esteiras</i>				
10	571	31.3	4.9	-
10	571	4.4	0.4	Coberto com solo
11	501-729	25-48.2	5.3-8.3	-
12	662	58.2	10.6	-
13	632	32.3	5.9	Coberto e revestido com vegetação
14	565-655	39.2-42	6.1-7.5	-
15	636	19.9-21.4	3.5-3.7	-

(1) Relação percentual entre os líquidos percolados (L) e as precipitações (P), para o período anual, em termos dos volumes (lâminas) observados.

Estudos realizados por CAMPBELL¹ (apud CANZIANI & COSSU, 1989) em células experimentais, mostraram, por outro lado, que a produção de líquidos percolados é muito mais sensível às declividades e espessura das camadas de cobertura do que às densidades dos resíduos compactados. Nesta mesma linha, KRUEMPELBECK & EHRIG (1999), baseados na monitoração de aterros na Alemanha, indicam produções de líquidos percolados, como porcentagem das precipitações, nas faixas de 25 a 60%, 15 a 40% e 10 a 40%, respectivamente, para aterros com coberturas de solo inferiores a 1,0m, superiores a 1,0m e para coberturas com selos minerais.

O potencial de produção de líquidos percolados em um aterro sanitário pode ser avaliado a partir do seu balanço hídrico, ou seja, da diferença entre a quantidade de água externa que infiltra no aterro, somada àquela relativa a umidade dos resíduos, e das parcelas consumidas em reações químicas e biológicas e/ou transformadas em vapor d'água. O balanço hídrico de um aterro sanitário, portanto, pode ser realizado computando as principais fontes de água envolvidas e considerando o maciço e os recobrimentos intermediário e final como meios porosos com capacidade de armazenamento de água (OWEIS & KHERA, 1998). Algumas proposições e modelos de cálculo para quantificação dos líquidos percolados, neste sentido, tem sido apresentados, sendo a seguir sumarizados dois dos mais conhecidos e utilizados métodos de previsão.

a) *Método do Balanço Hídrico*

O método do balanço hídrico foi inicialmente utilizado para estimar a produção de líquidos percolados em aterros sanitários pela USEPA – United States Environmental Protection Agency (FENN et al., 1975). O método admite fluxo unidimensional, conservação de massas e transmissão de fluxos através dos resíduos e do solo, sendo normalmente utilizado em termos mensais. A equação básica para o equilíbrio de massas pode ser expressa como:

$$PERC = P - \Delta ST - AET - R_0$$

onde:

<i>PERC</i>	=	percolação
<i>P</i>	=	precipitação
<i>AET</i>	=	evapotranspiração real

¹ CAMPBELL, D.J.V. (1982). Absorptive capacity of refuse – Harwell research. Landfill Leachate Symposium, Harwell Laboratory
Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

- R_0 = escoamento superficial, determinado como uma parcela da precipitação (P), através da aplicação de um coeficiente empírico de escoamento (C)
- ΔST = variação do teor de umidade armazenado no solo

No presente método, a evapotranspiração potencial (PET) é utilizada, tendo por base leituras de campo ou valores derivados da equação de Thornthwaite (OWEIS & KHERA, 1998). A infiltração (I), por sua vez, representa a parcela da precipitação (P) que infiltra na camada de cobertura ($I = P - R_0$). No procedimento de cálculo, a diferença entre a infiltração e a evapotranspiração potencial ($I - PET$) é computada para determinar os períodos de excesso ou deficiência de umidade no solo de cobertura. Valores negativos para a referida diferença indicam falha no suprimento das necessidades de água para a vegetação existente, enquanto valores positivos correspondem a recarga das umidades armazenadas no solo e/ou percolação. Os valores negativos de ($I - PET$) são somados para determinação da perda de água potencial acumulada.

O valor inicial para a umidade armazenada na camada de cobertura (ST) é calculado como sendo o produto da profundidade do sistema radicular da vegetação existente pela quantidade de água disponível no solo na sua capacidade de campo (mm de água por metro de solo). Este valor inicial, por sua vez, é atribuído ao último mês com valor positivo para a diferença ($I - PET$). Para determinação da umidade retida no solo nos meses subseqüentes, são utilizadas tabelas normalizadas para distintas capacidades de retenção de água no solo, conforme propostas por THORNTHWAITE & MATHER² (apud FENN et al., 1975). Após a determinação das umidades de armazenamento no solo para os meses com valores negativos de ($I - PET$), pode-se calcular a variação das quantidades de água armazenada no solo (ΔST) pela simples diferença entre o valor de ST no mês em questão e o valor de ST do mês anterior.

Para os meses onde a diferença ($I - PET$) é positiva, a taxa de evapotranspiração não está limitada a disponibilidade de umidade, sendo, portanto a evapotranspiração real (AET) igual a evapotranspiração potencial (PET). Nos meses onde a diferença ($I - PET$) é negativa, a taxa de evapotranspiração está limitada à disponibilidade de umidade no solo, sendo, portanto, $AET = PET + [(I - PET) - \Delta ST]$. A percolação pode, por fim, ser calculada tendo por base a equação de equilíbrio de massa inicialmente apresentada.

² THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. In: Drexel Institute of Technology. *Publications in Climatology*. Centerton, NJ, v.10, n.3, p.185-311

b) *Program HELP/USEPA - versão 3.0 (SCHROEDER et al., 1994a,b)*

O programa HELP (“Hydrologic Evaluation of Landfill Performance”) foi desenvolvido através de um acordo de cooperação entre a U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station e a U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) visando apoiar e fornecer subsídios para os programas de recuperação ambiental nos Estados Unidos. Trata-se de um modelo hidrológico quase-bidimensional para avaliação do movimento da água através de aterros sanitários e que leva em consideração parâmetros climatológicos, propriedades dos materiais envolvidos e as características de projeto do aterro. O programa utiliza soluções técnicas para ter em conta os efeitos de armazenamento de água na superfície, degelo, escoamento, infiltração, evapotranspiração, crescimento das espécies vegetais, drenagem lateral das camadas, recirculação dos líquidos percolados e infiltração pelas barreiras de fundo, entre outros.

O programa HELP modela o aterro sanitário através do uso e definição de 4 tipos distintos de camadas: camadas com percolação vertical, camadas com drenagem lateral, barreiras impermeáveis de solo, e geomembranas, as quais podem ser visualizadas no esquema básico apresentado na Figura 2.1.2. Como principais características do programa pode-se destacar:

- processamento de cálculo é realizado numa base diária, assumindo relevada importância os dados climatológicos (temperaturas, radiação solar e precipitação). O programa fornece uma série de valores padronizados (“default parameters”), facilitando a utilização do mesmo;
- a quantidade de água que entra no sistema pela camada de cobertura (infiltração) leva em consideração a umidade armazenada, a densidade da vegetação e o potencial de escoamento e evaporativo da camada;
- a percolação vertical no solo é função do teor de umidade. Quando o solo está totalmente saturado, o fluxo respeita a lei de Darcy. Nas condições não saturadas, a condutividade hidráulica das camadas é calculada baseada numa função linear da umidade do solo. Quando o teor de umidade iguala a capacidade de campo o fluxo torna-se nulo;
- a drenagem lateral pelas camadas drenantes é computada analiticamente através da equação linearizada de Boussinesq.

Apesar de potente e versátil, preocupações com relação à precisão e acuracidade do modelo tem sido objeto de estudos e pesquisas. Diferenças percentuais na faixa de -96% a 170% entre os resultados obtidos pelo programa HELP e dados de monitoramento de campo, Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

são reportadas por MCBEAN et al. (1995). Estudos para calibração e verificação da sensibilidade de parâmetros com base no programa HELP também são encontrados na literatura, destacando neste sentido, os trabalhos de PEYTON & SCHROEDER (1993) e de ZEISS (1997). Com base nestes estudos, pode-se identificar, por exemplo, que a densidade da vegetação presente e as declividades e distâncias de drenagem apresentam pequeno impacto na quantidade de líquidos percolados. Por outro lado, as características da camada de cobertura, principalmente em termos de sua espessura e materiais empregados, acaba tendo forte impacto na geração e drenagem de líquidos pelo corpo do aterro.

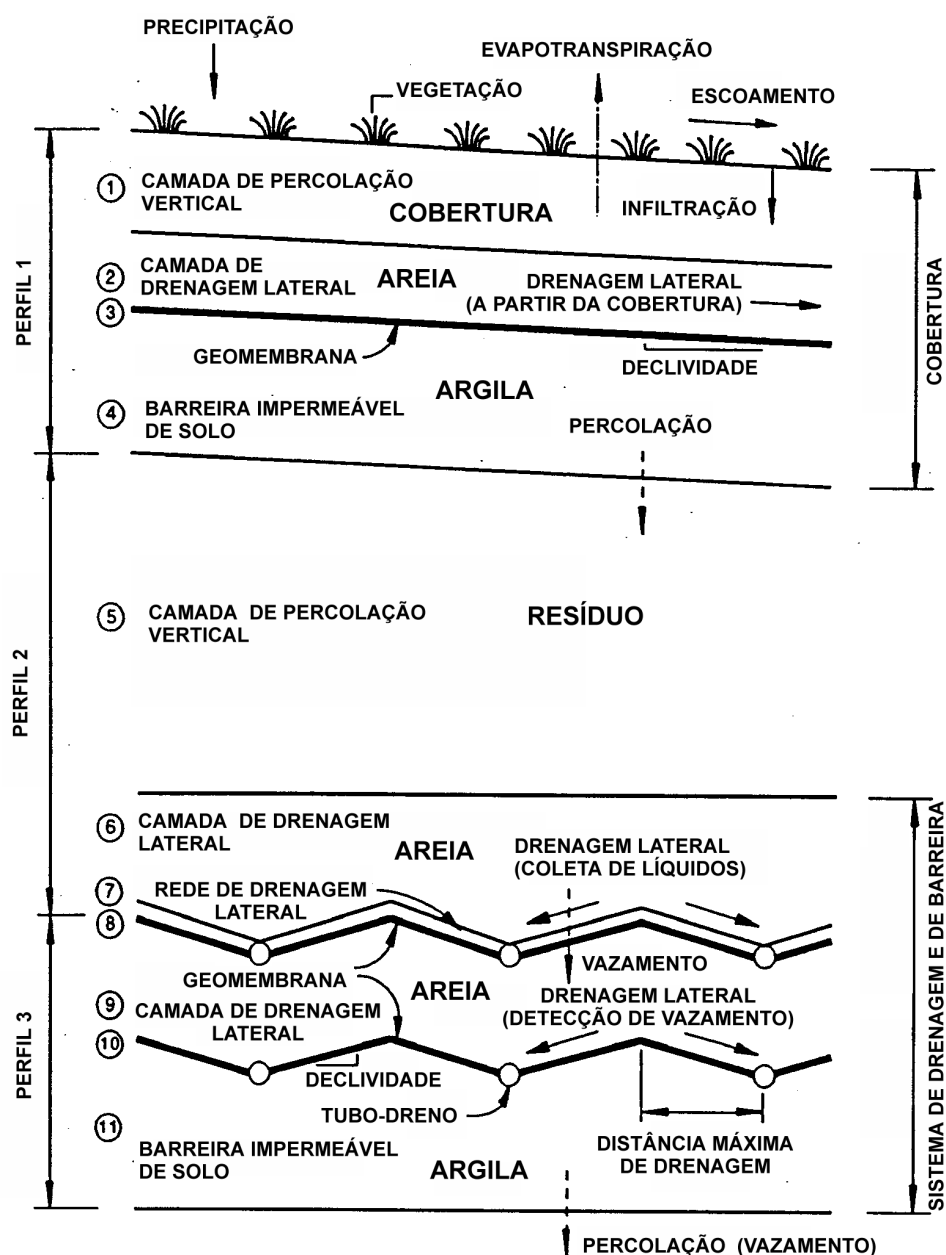


Figura 2.1.2 - Esquema típico adotado pelo programa HELP (SCHROEDER et al., 1994a).

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

2.1.2.2 Características e Composição dos Líquidos Percolados

As características e composição dos líquidos percolados são extremamente variáveis em função da idade do aterro e do tipo de resíduo aterrado (HAM & BOOKTER, 1982). A Tabela 2.1.3 apresenta valores e faixas de referência para alguns dos parâmetros monitorados em aterros sanitários. A análise desta tabela permite observar a elevada variação dos valores de concentração dos constituintes dos líquidos percolados, principalmente para os aterros novos, uma vez que tal variação também é função da fase em que a amostra é coletada (por exemplo, se os líquidos forem coletados durante a fase de decomposição ácida, ter-se-á um pH baixo e concentrações de DBO, DQO e metais pesados altas, enquanto que para coletas na fase metanogênica, ter-se-ão valores de pH entre 6,8 e 8 e concentrações de DBO e DQO baixas) (BARLAZ & HAM, 1993).

Tabela 2.1.3. - Composição típica dos líquidos percolados em aterros sanitários novos e antigos (adaptado de TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

PARÂMETRO ⁽¹⁾	ATERROS NOVOS (menos de 2 anos)		ATERROS ANTIGOS (mais de 10 anos)
	Faixa	Típico	
DBO	2.000-30.000	10.000	100-200
DQO	3.000-60.000	18.000	100-500
SST	200-2.000	500	100-400
N (orgânico)	10-800	200	80-120
N (amoniacal)	10-800	200	20-40
Nitratos	5-40	25	5-10
P (total)	5-100	30	5-10
Orto P	4-80	20	4-8
Alcalinidade (CaCO ₃)	1.000-10.000	3.000	200-1.000
pH	4.5-7.5	6	6.6-7.5
Dureza (CaCO ₃)	300-10.000	3.500	200-500
Ca	200-3.000	1.000	100-400
Mg	50-1.500	250	50-200
K	200-1.000	300	50-400
Na	200-2.500	500	100-200
Cloretos	200-3.000	500	100-400
Sulfatos	50-1.000	300	20-50
Fe (total)	50-1.200	60	20-200

(1) valores em mg/l, exceto pH.

EHRIG (1983, 1988), baseado no monitoramento de aterros sanitários na Alemanha, apresenta um abrangente estudo sobre qualidade (caracterização) dos líquidos percolados. As Tabelas 2.1.4 e 2.1.5, por exemplo, apresentam valores e faixas de referência para parâmetros que são, respectivamente, sensíveis ou não às fases de biodegradação em que se encontram os resíduos. A biodegradabilidade dos líquidos percolados é variável ao longo do

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

tempo, podendo ser monitorada em função da razão entre os valores de DBO e DQO. Valores desta relação entre 0,4 e 0,6 indicam que a matéria orgânica é facilmente biodegradável, sendo usual nos períodos iniciais do aterro, a obtenção de relações superiores a 0,5. Em contrapartida, nos aterros antigos tal relação apresenta valores entre 0,05 e 0,2.

Tabela 2.1.4 - Caracterização dos Líquidos Percolados – parâmetros com diferenças entre as fases acetogênica e metanogênica (EHRIG, 1983).

PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	FAIXA DE VALORES
<i>Fase Acetogênica</i>		
pH	6.1	4.5-7.5
DBO (mg/l)	13000	4000-40000
DQO (mg/l)	22000	6000-60000
DBO / DQO	0.58	-
SO ₄ (mg/l)	500	70-1750
Ca (mg/l)	1200	10-2500
Mg (mg/l)	470	50-1150
Fe (mg/l)	780	20-2100
Mn (mg/l)	25	0.3-65
Zn (mg/l)	5	0.1-120
Sr (mg/l)	7	0.5-120
<i>Fase Metanogênica</i>		
pH	8	7.5-9
DBO (mg/l)	180	20-550
DQO (mg/l)	3000	500-4500
DBO / DQO	0.06	-
SO ₄ (mg/l)	80	10-420
Ca (mg/l)	60	20-600
Mg (mg/l)	180	40-350
Fe (mg/l)	15	3-280
Mn (mg/l)	0.7	0.03-45
Zn (mg/l)	0.6	0.03-4
Sr (mg/l)	1	0.3-7

A evolução qualitativa dos líquidos percolados com o tempo e a reprodutibilidade de resultados e tendências de comportamento foi igualmente verificada por SCHALCH (1992) com base na execução e monitoração de dois aterros experimentais.

O efeito de distintas técnicas operacionais na qualidade dos líquidos percolados foi estudado por EHRIG (1989). Técnicas como recirculação, adição de nutrientes (lodos de estações de tratamento) e cal, compactação e alteração de espessura das camadas de resíduos são discutidas pelo autor. No caso das técnicas construtivas, a utilização de camadas pouco espessas e com maior densificação dos resíduos resultaram na antecipação da fase metanogênica e na conseqüente obtenção de baixos valores para os parâmetros orgânicos (DBO e DQO).

Tabela 2.1.5 - Caracterização dos Líquidos Percolados – parâmetros sem diferenças entre as fases acetogênica e metanogênica (EHRIG, 1983).

PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	FAIXA DE VALORES
Cl (mg/l)	6.1	4.5-7.5
Na (mg/l)	13000	4000-40000
K (mg/l)	22000	6000-60000
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /l)	0.58	-
NH ₄ (mg N/l)	500	70-1750
Org N (mg N/l)	1200	10-2500
Total N (mg N/l)	470	50-1150
NO ₃ (mg N/l)	780	20-2100
NO ₂ (mg N/l)	25	0.3-65
Total P (mg P/l)	5	0.1-120
CN (mg/l)	7	0.5-120
Fenóis (mg/l)	8	7.5-9
As (µg/l)	180	20-550
Cd (µg/l)	3000	500-4500
Co (µg/l)	0.06	-
Ni (µg/l)	80	10-420
Pb (µg/l)	60	20-600
Cr (µg/l)	180	40-350
Cu (µg/l)	15	3-280
Hg (µg/l)	0.7	0.03-45

2.2 Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos

Os aterros sanitários, ao contrário dos maciços compactados ou lançados com materiais terrosos, são constituídos por resíduos sólidos de elevada heterogeneidade, diferentes origens e composições e que são susceptíveis a processos de biodegradação, os quais afetam e alteram sobremaneira as propriedades e o comportamento geomecânico destes maciços. Neste sentido, a investigação e caracterização “geotécnica” destes materiais, apresentam-se como fator de relevada importância para as atividades de projeto, execução, operação e monitoração dos aterros sanitários, mesmo que para análises preliminares e básicas. A quantificação das propriedades físicas e mecânicas dos resíduos sólidos, no entanto, é tarefa de difícil consecução, tendo em vista (MANASSERO et al., 1996):

- elevada heterogeneidade e composição gravimétrica dos materiais;
- dificuldade de obtenção de amostras com dimensões representativas das condições *in situ*;
- inexistência de procedimentos normatizados e generalizados para amostragem e execução de ensaios “geotécnicos” com resíduos sólidos;

- alteração significativa das propriedades do material ao longo do tempo; e
- inexistência de equipes treinadas no campo com aptidão para a correta interpretação das leituras e procedimentos de investigação.

A classificação proposta pela ETC8 (1993) divide os resíduos sólidos em dois grandes grupos, procurando considerar a possibilidade ou não de aplicação das teorias da mecânica dos solos para análise de seu comportamento. Desta forma, figuram em um grupo os resíduos (“soil-like waste”) para os quais são válidos ou podem ser perfeitamente aplicáveis os procedimentos e teorias da mecânica dos solos, e em outro, aqueles resíduos (“non soil-like waste”), onde tais princípios não podem ser aplicados ou o podem com severas limitações. Os resíduos sólidos urbanos, nesta classificação, fazem parte do segundo grupo, apresentando, portanto, limitações quanto à aplicabilidade das referidas teorias (MANASSERO et al., 1996; ETC8, 1993).

A determinação das propriedades físicas (teor de umidade, peso específico, distribuição granulométrica, teor de matéria orgânica, etc), com base no anteriormente exposto, constitui tarefa de significativa complexidade. Desta forma, os procedimentos de amostragem e de investigações *in situ* e laboratoriais assumem importante papel na caracterização dos resíduos sólidos urbanos.

2.2.1 Amostragem e Investigações In Situ

A forma de amostragem e de perfuração utilizada em aterros sanitários é extremamente dependente do tipo de aterro e dos materiais a serem investigados, assim como das propriedades que se deseja determinar. As amostras obtidas em qualquer situação devem, no entanto, ser representativas do tipo e idade do resíduo e das técnicas de disposição utilizadas na execução do maciço.

Amostras de resíduos podem ser obtidas de poços, cavas ou furos exploratórios. Volumes de aproximadamente 1,5 m³ de material são suficientes para a classificação do resíduo, bem como para a determinação de suas características de resistência e deformabilidade em ensaios laboratoriais com equipamentos de grande dimensão. Geralmente, não são realizados tratamentos prévios para evitar os processos de degradação, exceto em situações onde as condições climáticas locais imponham tal intervenção (KONIG & JESSBERGER, 1997).

Ensaio convencionais de penetração tipo SPT e CPT têm sido utilizados para a investigação de aterros sanitários, visando a obtenção de informações acerca da estruturação

(espessura das camadas) do maciço e da fundação, tipo de resíduo e propriedades físicas e mecânicas do mesmo (OAKLEY, 1990; COUMOULOUS et al., 1995; SANTOS et al., 1998, CARVALHO, 1999). A utilização de ensaios convencionais de penetração (ensaio SPT) tem mostrado resultados satisfatórios em alguns aterros, normalmente constituídos por materiais mais finos oriundos de prévia trituração. Em aterros com resíduos domésticos e industriais a dificuldade da cravação e amostragem é grande, face a presença de materiais muito resistentes ou resíduos que acabam “agarrando” o equipamento (OWEIS & KHERA, 1998).

A execução de ensaios convencionais de penetração tipo SPT fica extremamente condicionada ao tipo de material. A presença de obstáculos maiores e mais resistentes (ferro, concreto, etc) ou de elementos que “agarrem” o amostrador (plástico, panos, etc) dificultam o ensaio, chegando, às vezes, a inviabilizá-lo naquele local. De qualquer forma, existem relatos da execução bem sucedida destes ensaios, conforme apresentado na Tabela 2.2.1.

Tabela 2.2.1 - Ensaios de resistência tipo SPT.

REFERÊNCIA	ATERRO SANITÁRIO	NÚMERO DE GOLPES ⁽¹⁾	OBSERVAÇÕES
SOWERS (1968)	Georgia (USA)	≤ 10	Aterros não controlados
SINGH & MURPHY (1990)	Sunnyvale (USA)	15	Aterros não controlados
GRISOLIA et al. (1992a)	Não relatado	30 a 40	Profundidades entre 0 e 25m
VELLOSO et al. (1994)	Caju (Rio de Janeiro, Brasil)	5 a 25	Valores maiores obtidos para vencer obstáculos
GABR & VALERO (1995)	Pionner Crossing (USA)	40 a 60	Aterros entre 15 e 30 anos
COUMOULOS et al. (1995)	Ano Liossia (Grécia)	25 a 65	Profundidades entre 10 e 35m; aterro não controlado
CARVALHO & VILAR (1998)	Bandeirantes (São Paulo, Brasil)	5 a 31	Profundidades entre 2 e 30m
SANTOS et al. (1998)	Muribeca (Recife, Brasil)	3 a 9	Profundidades entre 0 e 22m; ensaios a diferentes épocas

(1) valores médios ou tendências

Os ensaios penetrométricos com cone (CPT), por sua vez, enfrentam as mesmas dificuldades citadas para os ensaios SPT. Existem, no entanto, vários relatos de execução com sucesso destes ensaios, destacando os apresentados na Tabela 2.2.2. Vale lembrar que estes ensaios acabam sendo limitados pela profundidade e deflexão angular dos furos e que em alguns casos, além do registro da resistência de ponta e por atrito lateral, os equipamentos podem medir pressão neutra, temperatura e resistividade elétrica (MALONE et al., 1992 e OKOYE et al., 1995). A utilização de ensaios CPT permitiu ainda, a obtenção, Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

por meio de correlação com a resistência de ponta q_c , de valores para o índice de compressão primária (C_c) para avaliação de recalques (OAKLEY, 1990). De forma geral, os resultados obtidos pelos autores indicados na Tabela 2.2.2 apontam uma tendência de aumento da resistência com a profundidade.

Tabela 2.2.2 - Ensaio de resistência à penetração tipo CPT.

REFERÊNCIA	ATERRO	RESISTÊNCIA LATERAL (kPa)	RESISTÊNCIA DE PONTA (kPa)	OBS.
CARTIER & BALDIT (1983)	Arnouville les Mantes (França)	53-71	1600-50.000	$q_c=5500+320z$
SARGUNAN et al. (1986)	Madras (India)	Não relatado	600-2000	Profundidades entre 4,0 e 12,0m
SIEGEL et al. (1990)	Monterey Park (USA)	0-400	2500-15000	Profundidades ensaiadas de 4,8 a 37,5m e utilização de piezocone
GRISOLIA et al. (1992a)	Não relatado	Não relatado	2000-4000	Pequena tendência de aumento com a profundidade
CARVALHO & VILAR (1998)	Bandeirantes (Brasil)	56 – 1056	1200 - 18000	Profundidades ensaiadas entre 2,0 e 26,0m
KODA (1998a)	Radiowo (Polônia)	50 – 400	1000 - 25000	Profundidades ensaiadas entre 1,0 e 25,0m

Ainda no tocante às investigações *in situ* deve ser mencionada a execução de ensaios pressiométricos no Aterro Sanitário de Arnouville-les-Mantes (França), conforme relato de CARTIER & BALDIT (1983). Apesar de dificuldades de execução (perfuração, cravação, temperatura, etc), os ensaios foram realizados em profundidades de até 19,0m, tendo sido obtidos módulos pressiométricos (E_m) entre 1.200 e 55.100 kPa, com valor médio de 18.000 kPa. Ensaio pressiométrico foi igualmente realizado no aterro Syosset (Nova Iorque, EUA), conforme relatado por ZAMISKIE et al. (1994). Os ensaios foram realizados em profundidades entre 2,1 e 18,3m, resultando módulos pressiométricos (E_m) entre 400 e 8.900 kPa, com valor médio representativo igual a 3.400 kPa.

2.2.2 Propriedades Físicas

Os parâmetros “geotécnicos” para os resíduos sólidos urbanos registrados na literatura especializada apresentam elevada dispersão, apontando algumas vezes para inconsistências. Tal fato explica-se pela variação na composição dos resíduos, além das diversas Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

condicionantes que afetam as propriedades dos mesmos. Desta forma, deve-se sempre ter em consideração as condições de contorno em que foram obtidos os parâmetros apresentados (KONIG & JESSBERGER, 1997).

2.2.2.1 *Peso Específico*

O peso específico dos resíduos em aterros sanitários depende de uma série de fatores, podendo-se destacar: composição, método de lançamento e compactação, degradação com o tempo e adensamento por sobreposição de mais camadas, entre outros.

A determinação *in situ* do peso específico dos resíduos é tarefa de difícil consecução, podendo ainda apresentar elevada dispersão de resultados. Vários métodos, no entanto, têm sido utilizados, dos quais o mais simples e confiável consiste na escavação de um poço ou trincheira, com a pesagem do material e determinação do volume a partir do preenchimento da cava, devidamente impermeabilizada com manta sintética. A desvantagem desta técnica diz respeito à pequena faixa possível de obtenção de resultados, limitada a profundidades de cerca de 4,0m, além da impossibilidade de separar eventuais camadas de cobertura inseridas na vala de ensaio (GACHET et al., 1998). Estes autores avaliaram ainda a utilização de métodos não destrutivos (processos geofísicos e gravimétricos) e ensaios *in situ* (densímetros nucleares), concluindo, após a análise dos resultados e dos procedimentos e custos envolvidos, pela maior factibilidade dos métodos de determinação direta, ou seja, através da medida de pesos e volumes em cavas ou trincheiras escavadas. Com relação a utilização de densímetros nucleares, poucos relatos de aplicação e sucesso encontram-se disponíveis na literatura, face a representatividade e incertezas envolvidas com a utilização desta técnica (LANDVA & CLARK, 1990; GOTTELAND et al., 1995; WITHIAM et al., 1995).

OWEIS & KHERA (1986), por sua vez, apresentam um procedimento para determinação indireta do peso específico médio para os resíduos de um aterro sanitário, tendo por base o conhecimento das pressões de pré-adensamento e tensões neutras geradas na fundação. Tal estimativa pode ser aplicada aos casos onde os solos de fundação (argilas) apresentam comportamento normalmente consolidado antes da execução do aterro e o nível piezométrico da fundação nos pontos ensaiados sejam conhecidos.

A Tabela 2.2.3 apresenta valores médios para o peso específico de resíduos obtidos por diversos autores. A Tabela 2.2.4, por sua vez, apresenta uma síntese de valores de peso específico, em função do grau de compactação, obtidos da literatura e sistematizados por GACHET et al. (1998). Observa-se da análise da Tabela 2.2.4, a importância da compactação para o aumento dos valores da densidade *in situ* do resíduo.

Tabela 2.2.3 - Peso específico de resíduos sólidos urbanos (RSU).

CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS	PESO ESPECÍFICO (kN/m³)	REFERÊNCIA
RSU não compactado	2,2 a 2,7	MERZ & STONE (1962)
RSU bem compactado	4,7 a 9,4	SOWERS (1968)
RSU não compactado	2,9	SCHOMAKER (1972)
RSU medianamente compactado	4,7 a 5,9	
RSU bem compactado	8,8	BROMWELL (1978)
RSU não compactado	3,1	
RSU medianamente compactado	6,2	
RSU bem compactado	9,3	HAM et al. (1978)
RSU bem compactado	6,6	
RSU pouco compactado	5,5 a 6,9	SARGUNAN et al. (1986)
RSU bem compactado	6,8 a 16,2	LANDVA & CLARK (1986)
RSU bem compactado	5,4 a 8,0	WATTS & CHARLES (1990)
RSU compactado	6,3 a 9,4	OWEIS & KHERA (1990)
RSU (sem relato sobre a compacidade do material)	7,2	SHARMA et al. (1990)
RSU bem compactado	9,9 a 10,9	GALANTE et al. (1991)
RSU (sem relato sobre a compacidade dos materiais)	15,0	RICHARDSON & REYNOLDS (1991)
RSU mal compactado	3,0 a 9,0	FASSETT et al. (1994)
RSU medianamente compactado	5,0 a 8,0	
RSU bem compactado	9,0 a 10,5	VAN IMPE ³ (apud MANASSERO et al., 1996)
Resíduos de papel lançados	5,0	
Resíduos de papel triturados e compactados	8,0	
RSU bem compactado (compactação dinâmica)	10,0	ZORNBERG et al. (1999)
RSU (sem relato sobre a compacidade dos materiais)	10,0 a 15,0	

Obs.: medianamente compactado (somente tráfego de equipamentos); bem compactado (equipamentos de compactação).

O peso específico dos resíduos geralmente aumenta com a profundidade, como resultado dos processos de adensamento e compressão do maciço sob efeito das cargas sobrejacentes, conforme ilustrado na Figura 2.2.1 (KNOCHENMUS et al., 1998). Decorre deste fato, que os resíduos situados abaixo de uma determinada profundidade, entre 10,0m e 20,0m, e que apresentavam à época do lançamento reduzido grau de compactação, podem atingir uma condição comparável à de camadas inicialmente já bem compactadas (FASSETT et al., 1994). Alguns autores (KAVAZANJIAN et al., 1995) mostraram haver pequena variação (acrécimo) no peso específico abaixo de profundidades de 40,0 a 45,0m, conforme pode ser

³ VAN IMPE, W.F. (1994). Municipal and industrial waste improvement by heavy tamping. In: MEETING OF GEOTECHNICAL ENGINEERING IN THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF CONTROLLED WASTE LANDFILLS, Milazzo, Associazione Poligeotecnici Riuniti, Italy. Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

visualizado na Figura 2.2.1. KAVAZANJIAN et al. (1996) apresentam, por sua vez, resultados para o peso específico de resíduos sólidos em profundidade, obtidos a partir da utilização da técnica SASW (“Spectral Analysis of Surface Wave”) em aterro sanitários na Califórnia (EUA). Valores entre 10,0 kN/m³, à superfície, e 15,0 kN/m³ (a cerca de 60,0m de profundidade) foram registrados pelos autores.

Tabela 2.2.4 - Valores de peso específico em função do grau de compactação (GACHET et al., 1998).

PARÂMETRO ⁽²⁾	VALORES DE PESO ESPECÍFICO (kN/m ³) E GRAUS DE COMPACTAÇÃO ⁽¹⁾				
	NULO	LEVE	MÉDIO	ELEVADO	NÃO ESPECIFICADO
N	27	11	14	22	119
Mínimo (min)	1	2,4	3,5	2,5 ^(*)	1
Máximo (max)	8	6,5	7,7	12	17,3
Médio (m)	3,6	3,9	5,2	8,4	7,4
σ	2,2	1,4	1,2	2,4	4
CV (%)	60	36	24	29	54

OBS: (1) graus de compactação: nulo=estado do resíduo após simples lançamento; leve=estado após passagem de caminhões coletores; médio=estado após passagem de compactadores; elevado=estado após várias passadas dos compactadores. (2) N=número de registros obtidos; σ=desvio padrão; CV=coeficiente de variação (σ/m). (*) – valor duvidoso.

A variação do peso específico total e seco com a profundidade para resíduos novos e antigos foi igualmente apresentada por OWEIS & KHERA (1986). Os valores foram obtidos através da amostragem de resíduos em perfurações realizadas em aterro sanitário localizado na Califórnia (EUA). Os resultados apresentados nas Figuras 2.2.2 e 2.2.3, respectivamente, para pesos específicos totais e secos, indicaram: (i) aumento do peso específico com a profundidade; (ii) valores para o peso específico total dos resíduos novos ligeiramente superiores aos dos resíduos antigos, face a presença de maior umidade nos primeiros; e (iii) pesos específicos secos praticamente iguais para os resíduos novos e antigos.

O aumento do peso específico dos resíduos devido ao efeito de sobreposição de camadas também tem importância, na medida que auxilia a estimativa da quantidade de resíduo que pode ser disposta no aterro até sua capacidade limite e a determinação da parcela de recalque a esperar após o encerramento do aterro sanitário. Nesta linha, KREITH (1994) apresenta uma relação, baseada em uma função hiperbólica, que permite estimar o aumento do peso específico do resíduo em função das pressões subjacentes atuantes, definida como:

$$\gamma_p = \gamma_i + p / (a + b p)$$

onde: γ_p = peso específico do resíduo na pressão p ; γ_i = peso específico inicial do resíduo compactado; p = pressão sobrejacente; a e b = constantes empíricas.

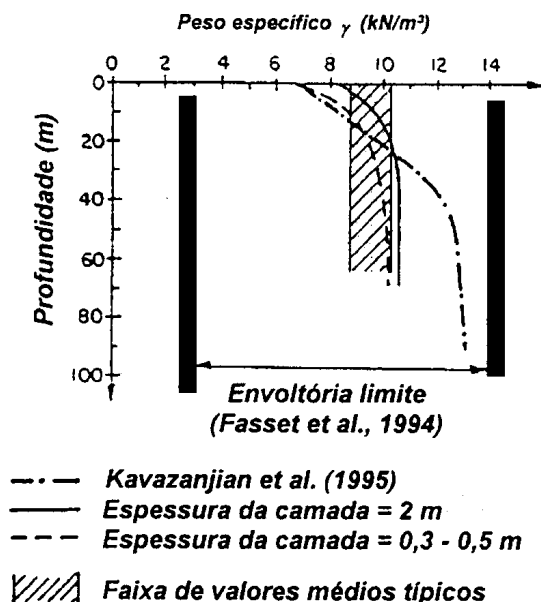


Figura 2.2.1 - Variação do peso específico de resíduos sólidos urbanos com a profundidade (KNOCHENMUS et al., 1998).

LANDVA & CLARK (1990) propuseram um método para avaliação do peso específico, tendo em conta os vazios inter e intrapartículas dos resíduos. O peso específico médio dos diversos constituintes i dos resíduos é função do peso específico da fração sólida de cada constituinte, assim como de sua porosidade e grau de saturação. Pode-se generalizar o peso específico médio do resíduo (γ_c), considerando n constituintes, como:

$$\gamma_c = \frac{1}{\sum_1^n \frac{W_i}{W_c} \frac{1}{\gamma_i}}$$

onde γ_i = peso específico do constituinte i , W_i = peso do constituinte i e W_c = peso total dos constituintes.

Em contato com água, o peso específico dos constituintes que absorvem água (tecidos, madeira, papéis, etc) irá aumentar, podendo a equação anteriormente apresentada ser expressa como:

$$\gamma_c' = \gamma_c \left(1 + \sum_1^n \frac{W_i}{W_c} \frac{\Delta\gamma_i}{\gamma_i} \right)$$

onde $\Delta\gamma_i$ corresponde ao acréscimo, devido a absorção de água, no peso específico do constituinte i .

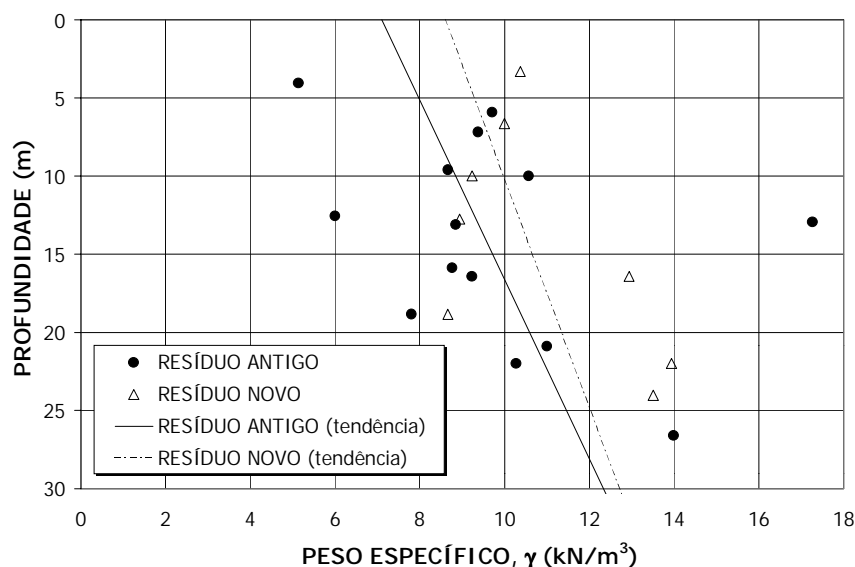


Figura 2.2.2 - Variação do peso específico com a profundidade (OWEIS & KHERA, 1986).

2.2.2.2 Peso Específico dos Sólidos

São poucos os relatos de ensaios e resultados para obtenção do peso específico das partículas sólidas (γ_s). GABR & VALERO (1995), utilizando o procedimento preconizado para solos pela ASTM – American Society for Testing and Materials, obtiveram um peso específico médio de 19,6 kN/m³. Ressalte-se que estes autores trabalharam com resíduos sólidos urbanos antigos (15 a 30 anos). CARVALHO (1999), ensaiando resíduos sólidos urbanos com cerca de 15 anos de idade, registra pesos específicos das partículas sólidas variando entre 22,4 e 25,1 kN/m³, sendo os valores mais elevados influenciados pela contaminação por solos. OWEIS & KHERA (1990) apresentam também valores para este parâmetro para alguns resíduos específicos. Por fim, vale registrar o trabalho de POWRIE & BEAVEN (1999), os quais constataram aumento do peso específico das partículas sólidas com as tensões verticais aplicadas. Segundo estes autores, tal constatação não é surpreendente, face às características deformáveis das partículas, porém pode colocar em dúvida a aplicação das teorias da mecânica dos solos, relativas aos fenômenos de variação volumétrica (compressão e consolidação), as quais assumem que as partículas sólidas são

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

incompressíveis e com densidade praticamente inalterada. A Tabela 2.2.5 apresenta uma síntese dos valores relatados.

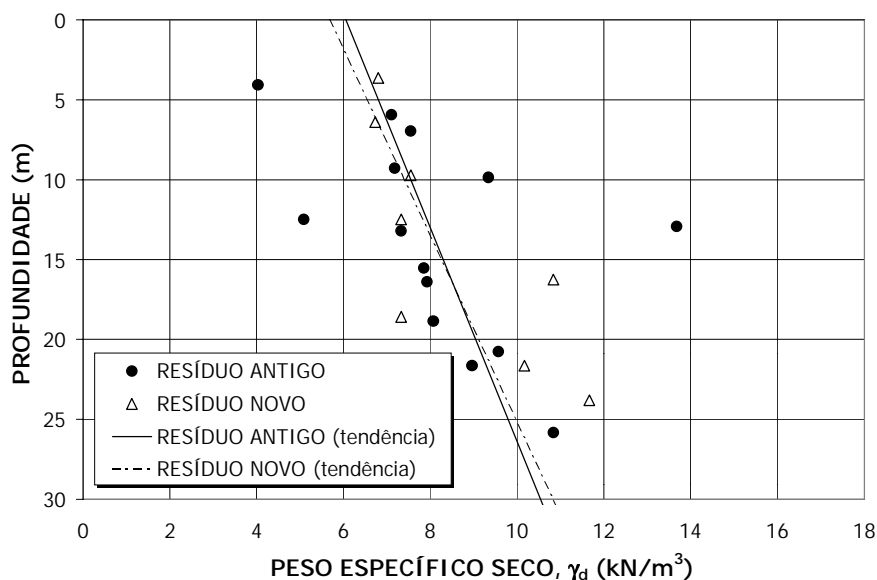


Figura 2.2.3 - Variação do peso específico seco com a profundidade (OWEIS & KHERA, 1986).

Tabela 2.2.5 - Pesos específicos das partículas sólidas de resíduos sólidos urbanos.

PESO ESPECÍFICO DOS SÓLIDOS (γ_s) (kN/m ³)	OBSERVAÇÃO	REFERÊNCIA
17,2 a 26,5	Resíduos de carvão	OWEIS & KHERA (1990)
20,6 a 26,0	Cinzas	
18,6 a 22,6	Resíduos de papel triturado	GABR & VALERO (1995)
19,6	Resíduos entre 15 e 30 anos	
22,4 a 25,1	Resíduos com 15 anos	CARVALHO (1999)
8,6	$\sigma_v = 34,0$ kPa ⁽¹⁾	POWRIE & BEAVEN (1999)
9,5	$\sigma_v = 65,0$ kPa ⁽¹⁾	
10,0	$\sigma_v = 120,0$ kPa ⁽¹⁾	
11,5	$\sigma_v = 241,0$ kPa ⁽¹⁾	
12,8	$\sigma_v = 463,0$ kPa ⁽¹⁾	

(1) tensão vertical média aplicada

2.2.2.3 Teor de Umidade

O teor de umidade dos resíduos varia com a composição inicial dos mesmos, com as condições climáticas locais (períodos chuvosos e de estiagem), com as operações de lançamento e disposição e com a capacidade e desempenho dos sistemas de drenagem interna dos líquidos percolados, sendo um importante parâmetro para a estimativa das velocidades de modificações biológicas e para a previsão do potencial de geração de líquidos percolados e gases, além de indiretamente estar associada à geração de pressões neutras no Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

interior do maciço. Em geral, o teor de umidade aumenta com o acréscimo da quantidade de matéria orgânica presente (LANDVA & CLARK, 1990). Os mecanismos de retenção de umidade na massa de resíduos sólidos urbanos podem ser classificados como (i) umidade no interior das partículas sólidas, (ii) umidade entre partículas, sustentada por tensões capilares, e (iii) umidade entre partículas, retida por camadas de baixa condutividade hidráulica (ZORNBERG et al., 1999).

O teor de umidade de resíduos sólidos (w) pode ser expresso em relação ao peso úmido (w_w) ou ao peso seco (w_d), ou seja:

$$w_w = \frac{(w_0 - w_1)}{w_0}$$

$$w_d = \frac{(w_0 - w_1)}{w_1}$$

onde w_0 corresponde ao peso inicial da amostra e w_1 ao peso da mesma amostra após secagem à temperatura de 60°C para evitar a queima do material volátil (GABR & VALERO, 1995; MANASSERO et al., 1996). Temperaturas da ordem de 85°C foram utilizadas por ZORNBERG et al. (1999) para determinação dos parâmetros de interesse.

A Tabela 2.2.6 apresenta faixas e valores de umidade obtidos para os resíduos de alguns aterros sanitários, segundo relato da literatura especializada. Os valores apresentados, com exceção dos obtidos para o aterro sanitário Ano Liossia, em Atenas, mostram uma tendência de acréscimo dos teores de umidade com o aumento da profundidade, conforme pode ser visualizado na Figura 2.2.4. A determinação e análise de perfis de umidade de aterros sanitários devem ter em conta a idade dos resíduos (disposições antigas tendem a apresentar umidades maiores do que resíduos recentes) e a presença dos recobrimentos intermediários de solo, os quais apresentam umidades normalmente inferiores à dos resíduos (KNOCHENMUS et al., 1998).

2.2.2.4 Capacidade de Campo

A capacidade de campo corresponde ao teor de umidade que os resíduos podem reter em seus poros para um valor convencionado de sucção. Em termos práticos, se quantidades de água forem adicionadas a resíduos com umidade igual ou superior à sua capacidade de campo, iguais quantidades de água serão drenadas, de forma a restaurar o equilíbrio de

umidade do material. As análises de balanço hídrico e conseqüente previsão de líquidos percolados em aterros sanitários são extremamente sensíveis a este parâmetro (SCHROEDER et al., 1994b).

Tabela 2.2.6 - Valores para o teor de umidade de resíduos sólidos urbanos (RSU).

ATERRO SANITÁRIO	UMIDADE (%)	AUTOR
Albany (EUA)	14 a 68	GIFFORD et al. (1990)
Vários (EUA)	10 a 50	EDIL et al. (1990)
Limbro Park (África do Sul)	10 a 45 ⁽¹⁾	BLIGHT et al. (1992a)
Limbro Park (África do Sul)	10 a 105 ⁽²⁾	BLIGHT et al. (1992a)
Vários (EUA)	15 a 40	TCHOBANOUGLOUS et al. (1993)
Ano Liossia (Grécia)	30 a 120	COUMOULOS et al. (1995)
Pioneer Crossing (EUA)	30 a 130	GABR & VALERO (1995)
Bandeirantes (Brasil)	45 a 110	CARVALHO (1999)
San Gabriel Valley (EUA)	10 a 50	ZORNBERG et al. (1999)

(1) valores obtidos ao início do período chuvoso; (2) valores obtidos após período chuvoso excepcional.

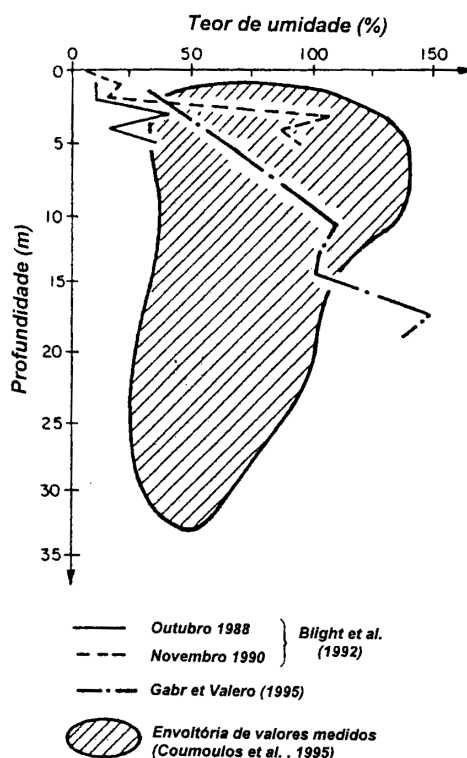


Figura 2.2.4 - Perfis de umidade de resíduos sólidos urbanos (KNOCHENMUS et al., 1998).

Alguns relatos na literatura fornecem parâmetros e relações de referência para a definição da capacidade de campo dos resíduos sólidos, ressaltando, porém a sua forte dependência com a composição e peso específico dos resíduos. FUNGAROLI & STEINER (1979) constataram, através de resultados experimentais, aumento nos valores da capacidade

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

de campo, expressa pela umidade volumétrica, com o peso específico dos resíduos, obedecendo a seguinte relação:

$$\theta_{FC} = 21,7 \ln \gamma - 5,4$$

onde, θ_{FC} corresponde a capacidade de campo, em termos volumétricos (%), e γ ao peso específico dos resíduos (kN/m^3).

BLIGHT et al. (1992b), por sua vez, apresentam valores para a capacidade de campo gravimétrica de resíduos sólidos urbanos variando entre 55% (resíduos antigos com pesos específicos da ordem de $10,0 \text{ kN/m}^3$) e 225% (resíduos frescos submetidos a reduzidas pressões de confinamento). SCHROEDER et al. (1994a) apresentam um valor de referência para capacidade de campo volumétrica igual a 29,2%, admitindo resíduo sólido com peso específico igual a $3,1 \text{ kN/m}^3$. CANZIANI & COSSU (1989) apresentam valores para a capacidade de campo volumétrica variando entre 27 e 37% em função das características do resíduo (bruto ou triturado) e do peso específico do mesmo. Os valores mais elevados correspondem a resíduos triturados e/ou com maiores pesos específicos. POWRIE & BEAVEN (1999) obtiveram valores para capacidade de campo volumétrica em laboratório entre 40,0% e 44,0% em função das tensões verticais aplicadas (valores de tensão entre 34 e 463 kPa), correspondendo os resultados mais elevados às maiores pressões de ensaio. Por fim, vale destacar o trabalho de ZORNBERG et al. (1999), os quais apresentam valores de capacidade de campo volumétrica, obtidos em laboratório, variando entre 53,0% e 47,8% para distintas pressões de confinamento. Os resultados obtidos neste trabalho, ao contrário da relação proposta por FUNGAROLI & STEINER (1979) e das tendências observadas por outros autores, não mostraram aumento da capacidade de campo volumétrica com o aumento do peso específico do material.

2.2.2.5 Compactação

KONIG & JESSBERGER (1997), com base na análise de um conjunto de curvas de compactação apresentadas na literatura, afirmaram que a variação do peso específico dos resíduos sólidos com o aumento do teor de umidade obedece a um comportamento similar ao observado para os solos. A Figura 2.2.5 apresenta o referido conjunto de curvas, obtidas para diversos tipos de resíduos, a partir de ensaios de compactação tipo Proctor.

No tocante a ensaios de compactação com resíduos sólidos urbanos em laboratório, no entanto, são muito poucos os relatos disponíveis na literatura, devendo ser destacado o

trabalho de GABR & VALERO (1995). Os autores ensaiaram resíduos domiciliares com idade entre 15 e 30 anos, utilizando os procedimentos preconizados pela norma ASTM D698-78 para compactação de solos em laboratório com energia normal (“Standard Proctor Test”). A Figura 2.2.5 mostra a relação entre o teor de umidade e o peso específico seco obtida. O peso específico seco máximo foi estimado em $9,3 \text{ kN/m}^3$ associado a um teor de umidade ótimo de 31%. A saturação completa foi atingida com um teor de umidade de cerca de 70%, correspondendo a um peso específico seco de aproximadamente $8,0 \text{ kN/m}^3$.

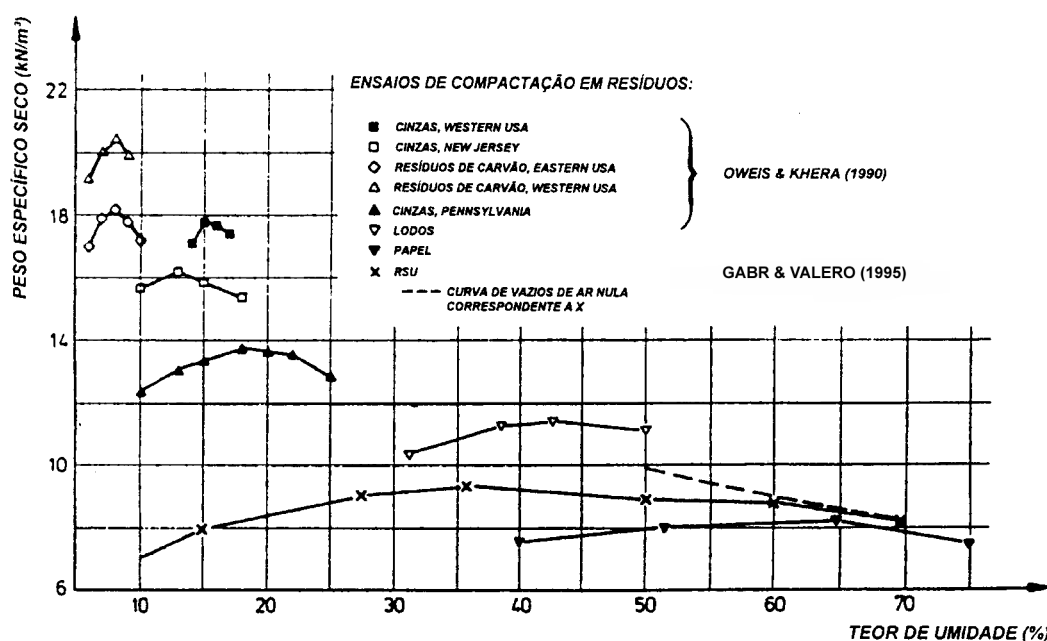


Figura 2.2.5 - Curvas de compactação para diferentes tipos de resíduos (KONIG & JESSBERGER, 1997).

A curva de índice de vazios de ar nula ($S_r = 100\%$) foi obtida utilizando para a densidade das partículas sólidas um valor igual a 2, a qual foi igualmente determinada em laboratório. A composição média dos resíduos ensaiados apresentava as seguintes percentagens em peso de materiais: cinzas, solo e rocha (33%); tecidos (23%), metais (10%), plásticos (13%), papéis (2%), madeira (9%) e materiais cerâmicos (10%). Quanto a este parâmetro, vale ainda registrar os dados apresentados por OWEIS & KHERA (1990), que apontam para relações entre pesos específicos compactados e não compactados de constituintes dos resíduos, situadas entre 3 e 5, podendo atingir valores iguais a 10 para o caso de resíduos plásticos bem compactados.

A compactação dos resíduos visando a redução de volumes e conseqüente aumento da vida útil, assim como a melhoria das propriedades mecânicas do material tem sido também

objeto de estudos e pesquisas de campo. Uma síntese destes estudos é apresentada no item 2.4.2.1 deste documento.

2.2.2.6 Composição e Distribuição das Dimensões das Partículas

A composição dos resíduos sólidos urbanos é extremamente heterogênea e dependente dos processos físico-químicos e de biodegradação atuantes. Diversos autores (BOUAZZA et al., 1996; MANASSERO et al., 1996) já relataram as variações significativas na composição dos resíduos, em diferentes países e localidades, as quais podem ser visualizadas na Tabela 2.2.7. A despeito da localização, as parcelas correspondentes à matéria orgânica e aos papéis e papelões apresentam-se com destaque em todas as composições, à semelhança da categoria “outros resíduos”.

Tabela 2.2.7 - Composição média dos resíduos para diferentes localidades (adaptada de BOUAZZA et al., 1996).

TIPO	LOCALIDADE/COMPOSIÇÃO (%)											
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Metais	1	1	3	3	5	2	2,5	4	1	3	3	6-15
Papéis	25	5	12	3	22	10	31	19	2	16	15	20-55
Plásticos	0	1	5	0	0	3	9,5	7	3	20	14	2-15
Couro, Madeira, Borracha	7	1	0	7	3	6	4	4	1	0	3	0,4-15
Tecidos	3	0	0	10	0	3	5	0	0	0	2	0-4
Orgânicos	44	45	74	15	20	61	28	59	71	58	58	9-62
Vidro	1	1	4	10	6	1	9	2	1	2	3	2-5
Outros	19	46	2	22	46	14	11	5	21	1	2	0

(1) Bangkok (Tailândia); (2) Beijin (China); (3) Nairobi (Quênia); (4) Hong Kong; (5) New York (USA); (6) Istambul (Turquia); (7) Genebra (Suíça); (8) Atenas (Grécia); (9) Cochabamba (Bolívia); (10) Wollangong (Austrália); (11) São Paulo, Brasil (CASTRO, 1996); (12) Vários, Canadá (LANDVA & CLARK, 1990).

Quanto às dimensões das partículas, a utilização dos procedimentos da mecânica dos solos (curvas granulométricas) para os resíduos sólidos urbanos, reveste-se de elevada dificuldade. JESSBERGER (1994), neste sentido, propôs, para a caracterização dos resíduos, a determinação de uma curva de gradação (dimensões) das partículas, a partir de sua equivalência com a dimensão das aberturas das peneiras de ensaio, resultando em curvas similares às obtidas para solos. A Figura 2.2.6 apresenta os resultados de distribuições de dimensões de partículas para resíduos de diferentes idades.

Registra-se a tendência de uma maior quantidade de material fino, com a evolução da idade dos resíduos, face aos diferentes estágios de decomposição a que estão submetidos os

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

mesmos. Face a heterogeneidade dos resíduos, a dimensão de suas partículas geralmente se estende por faixas amplas, sendo a distribuição típica resultante, muito próxima à dos cascalhos, com menos de 20% de finos (partículas com dimensão inferior a 75 μm).

Outros autores (TCHOBANOUGLOUS et al., 1993; GABR & VALERO, 1995; CARVALHO, 1999) propuseram e utilizaram procedimentos similares para a caracterização da distribuição de dimensões de partículas dos resíduos. CARVALHO (1999), por exemplo, amostrando e caracterizando resíduos com idade superior a 10 anos no Aterro Bandeirantes, em São Paulo, observou que as dimensões dos componentes dos resíduos situam-se em uma faixa entre 0,6mm e 100mm, sendo que cerca de 65% do material apresenta partículas menores que 30mm. CASTRO (1996) caracterizou os resíduos sólidos urbanos coletados (estado fresco) na cidade de São Paulo, em termos da dimensão básica das partículas, obtendo como distribuição média: 7,4% do material com dimensões superiores a 100mm; 28,9% com dimensões entre 50mm e 100mm; e 63,7% com dimensões inferiores a 50mm.

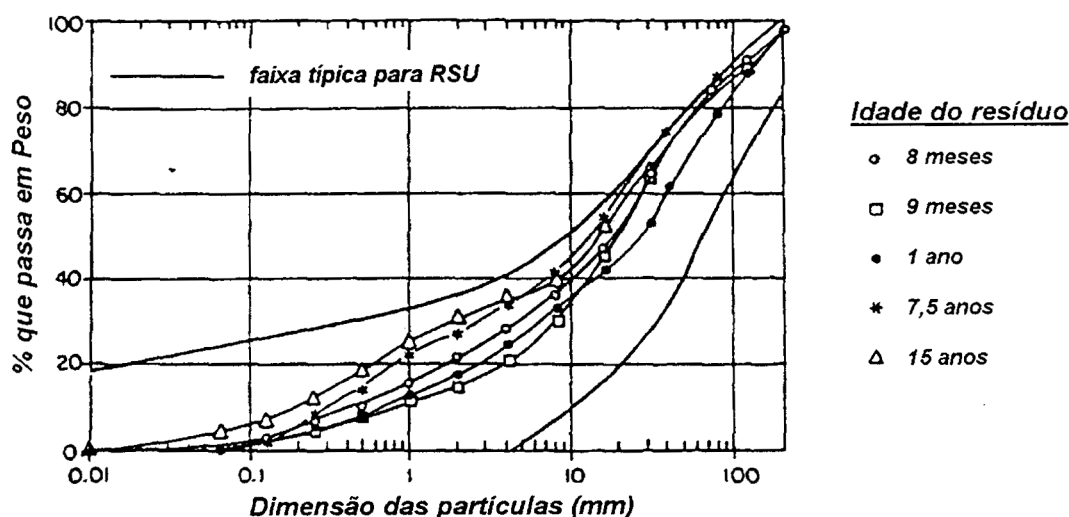


Figura 2.2.6 - Distribuição das dimensões de partículas para resíduos sólidos urbanos (JESSBERGER, 1994).

2.2.2.7 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica através dos resíduos dispostos em aterros sanitários foi avaliada por LANDVA & CLARK (1990) a partir de ensaios de percolação em poços e trincheiras escavadas. Os valores obtidos situaram-se entre 10^{-5} e 4×10^{-4} m/s, indicando ainda uma tendência, como esperado, de diminuição da permeabilidade com o aumento do peso específico dos resíduos. Alguns autores (GABR & VALERO, 1995), por outro lado, realizaram ensaios de permeabilidade em laboratório com carga constante e variável, Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

obtendo valores entre 10^{-5} e 10^{-7} m/s. Tais resultados foram obtidos em materiais com idade entre 15 e 30 anos e onde a presença de materiais impermeáveis nos corpos de prova tiveram grande influência nos valores de permeabilidade.

A permeabilidade dos resíduos constitui importante parâmetro de projeto, notadamente para a concepção e detalhamento dos sistemas de drenagem do biogás e dos líquidos percolados dos aterros sanitários. Tal parâmetro é usualmente obtido através de ensaios laboratoriais e *in situ* (poços e furos). A Tabela 2.2.8 apresenta um conjunto de resultados obtidos na literatura e sistematizados por WOJNAROWICZ et al. (1998). A análise dos resultados permite observar que os valores de permeabilidade situam-se, normalmente, entre 10^{-4} m/s e 10^{-6} m/s, o que poderia ser comparado ao comportamento de areias muito finas, sendo o coeficiente 10^{-5} m/s, um valor recomendado para uma primeira utilização em projeto (OWEIS et al., 1990; MANASSERO et al., 1996). De qualquer forma, deve-se ter em consideração que tal parâmetro é extremamente dependente das operações de lançamento e disposição, do grau de compactação inicial, das pressões do material subjacente, da temperatura e da idade e grau de decomposição do resíduo.

No tocante à relação com o peso específico, diversos autores (CHEN et al., 1977; LANDVA & CLARK, 1990; POWRIE & BEAVEN, 1999) verificaram a redução da condutividade hidráulica dos resíduos sólidos com a densificação do material. OWEIS & KHERA (1986) apresentam coeficientes de permeabilidade para os resíduos sólidos urbanos entre $1,5 \times 10^{-4}$ e $7,1 \times 10^{-6}$ m/s, para pesos específicos entre 5,6 e $11,2 \text{ kN/m}^3$, respectivamente. CHEN & CHYNOWETH (1995) apontam, na mesma linha, coeficientes de permeabilidade entre $9,6 \times 10^{-4}$ e $4,7 \times 10^{-7}$ m/s, obtidos em laboratório, para resíduos com pesos específicos entre 1,6 e $4,8 \text{ kN/m}^3$, respectivamente.

2.2.2.8 Temperatura dos Resíduos

A temperatura no interior de aterros sanitários constitui importante fator para a deflagração e evolução dos processos de degradação dos resíduos sólidos urbanos. O valor da temperatura ao longo da profundidade pode ser medido com termômetros digitais, a partir de tubos estrategicamente dispostos no aterro. COUMOULOS et al. (1995) realizaram uma série de medidas de temperatura, em diferentes períodos do ano, no aterro Ano Liossia, na Grécia, tendo obtido valores entre 40 e 60 °C a pequenas profundidades e entre 5 a 15 °C a grandes profundidades. Registre-se que estes valores não apresentaram variações, por conta de alterações na temperatura ambiente, nas diferentes épocas dos levantamentos.

Tabela 2.2.8 - Coeficientes de permeabilidade de resíduos sólidos urbanos (adaptada de WOJNAROWICZ et al., 1998).

REFERÊNCIA	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (m/s)	MÉTODO DE ENSAIO
FUNGAROLI & STEINER (1979)	10^{-5} a 2×10^{-4}	Lisímetro
OWEIS & KHERA (1986)	$2,6 \times 10^{-5}$	Estimado com base em dados de campo
LANDVA & CLARK (1990)	10^{-5} a 4×10^{-4}	Ensaio de cava
OWEIS et al. (1990)	$1,5 \times 10^{-6}$	Ensaio de campo com carga variável
	$1,1 \times 10^{-5}$	Ensaio de cava
MANASSERO et al. (1996)	$1,5 \times 10^{-5}$ a $2,6 \times 10^{-4}$	Ensaio de bombeamento
BRANDL ⁴ (apud MANASSERO et al., 1996)	7×10^{-6} a 2×10^{-5} (1)	Ensaio de campo com carga variável
	3×10^{-7} a 5×10^{-6} (2)	Ensaio de cava
BRANDL ⁵ (apud MANASSERO et al., 1996)	3×10^{-5} a 5×10^{-4} (3)	Ensaio laboratorial
	3×10^{-8} a 2×10^{-6} (4)	
GABR & VALERO (1995)	10^{-7} a 10^{-5}	Ensaio laboratorial
BEAVEN (1996)	8×10^{-6} a 10^{-4}	Ensaio de bombeamento
BLENGINO et al. (1996)	3×10^{-7} a 3×10^{-6}	Furos profundos, ensaio de campo com carga variável
LANDVA et al. (1998)	8×10^{-7} a 9×10^{-4}	Ensaio laboratorial com carga constante
CARVALHO (1999)	10^{-8} a 10^{-6}	Ensaio de campo com carga constante
POWRIE & BEAVEN (1999)	$3,7 \times 10^{-8}$ a $1,5 \times 10^{-4}$	Ensaio laboratorial com distintas pressões de confinamento

(1) compactação estática com rolo; (2) compactação dinâmica; (3) pré-tratamento; (4) resíduo muito compactado.

YOSHIDA et al. (1996) desenvolveram um modelo para avaliar a distribuição de temperaturas no interior de aterros sanitários, incorporando formulações para ter em conta os processos de geração e transporte de calor devido à decomposição biológica dos resíduos. O estudo permitiu concluir que durante o processo de aterramento a decomposição aeróbia é responsável por temperaturas mais elevadas (60 a 70 °C), enquanto que temperaturas menores, da ordem de 50 °C, podem ser atribuídas unicamente à decomposição anaeróbia dos resíduos. Os autores confirmaram portanto, que as alterações de temperatura no interior de aterros sanitários podem refletir o estágio de decomposição biológica dos resíduos, sendo

⁴ BRANDL, H. (1990). Personal communication.

⁵ BRANDL, H. (1994). Personal communication.

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

um importante parâmetro para avaliação da atividade e eventual reaproveitamento destes maciços. CARVALHO (1999) registra temperaturas da ordem de 31°C e 38°C para resíduos localizados, respectivamente, a cerca de 4,0 e 6,0m de profundidade no Aterro Sanitário Bandeirantes, em São Paulo. Para o mesmo aterro, relatórios de avanço de perfuração para instalação de drenos apontam para temperaturas entre 42°C e 59°C a profundidades da ordem de 30,0m.

2.2.3 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas básicas a serem consideradas no comportamento dos aterros sanitários dizem respeito a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade dos resíduos, as quais são extremamente dependentes da composição e das propriedades mecânicas de seus constituintes, sem mencionar a variação destas últimas com o tempo, face aos estágios de degradação a que estão sujeitos os materiais. A obtenção de parâmetros e a análise de estabilidade e deformabilidade dos aterros sanitários carecem de modelos e métodos específicos que sejam aplicados a estes materiais. Os procedimentos da mecânica dos solos, associados ou não à presença de reforços, são atualmente utilizados. No caso dos resíduos sólidos, porém, importantes diferenças e características de comportamento reforçam a necessidade da busca de modelos de análise próprios, tais como: índice de vazios muito elevado, implicando significativa compressibilidade volumétrica; partículas de distintas naturezas, muitas delas frágeis e deformáveis; processo de decomposição com o tempo, implicando auto consolidação; e variação das propriedades dos materiais com o tempo (MANASSERO et al., 1996).

As propriedades mecânicas para os resíduos com partículas de pequenas dimensões e com comportamento similar ao dos solos (“soil-like waste”) podem ser avaliadas a partir de métodos e ensaios laboratoriais convencionais. Para resíduos com partículas de grandes dimensões, por outro lado, modificações nos equipamentos e procedimentos de ensaio são necessárias. Neste sentido, a execução de ensaios *in situ* ou aterros experimentais apresentam-se como opção adequada para a obtenção de parâmetros mecânicos para os resíduos com comportamento não similar ao dos solos (“non soil-like waste”).

2.2.3.1 Resistência ao Cisalhamento

Os parâmetros de resistência para os resíduos sólidos urbanos são usualmente determinados a partir de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais, em dispositivos de grande

dimensão, ensaios *in situ* ou através de retro-análise, com base em dados e registros de monitoração.

a) ensaios laboratoriais

Os ensaios de cisalhamento direto, *in situ* ou em laboratório, juntamente com os ensaios triaxiais, têm sido utilizados por diversos autores, admitindo a validade da lei de Mohr-Coulomb, representada por um ângulo de atrito (ϕ) e uma coesão (c) para os resíduos sólidos urbanos. Nestes ensaios, a ruptura não tem sido claramente identificada para os níveis de deformação factíveis aos equipamentos, implicando a fixação de um critério de deformação para a definição dos parâmetros de resistência. A Tabela 2.2.9 apresenta uma síntese de valores de resistência ao cisalhamento obtidos para distintos tipos de resíduos, relatados na literatura especializada, enquanto que a Figura 2.2.7 ilustra resultados, relações e envoltórias propostas para os parâmetros de coesão e ângulo de atrito.

Os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos são extremamente dependentes do nível de deformações impostos aos mesmos, conforme constatado por diversos autores (JESSBERGER & KOCKEL, 1991; GRISOLIA et al., 1992a e 1995) e ilustrado na Figura 2.2.8. Observa-se que a ruptura não é claramente atingida, mesmo para elevadas tensões de compressão, e que o resíduo apresenta um comportamento do tipo “strain hardening”, ou seja, continua a ganhar resistência com o aumento das deformações a que é submetido (KONIG & JESSBERGER, 1997). Desta forma, faz-se necessário incorporar um critério de deformação para que os parâmetros de resistência fiquem claramente definidos. A Figura 2.2.9 apresenta a variação dos parâmetros de resistência mobilizados, obtidos a partir de ensaios triaxiais em amostras de grande dimensão, para várias idades de resíduo, em função das deformações registradas (KOCKEL & JESSBERGER, 1995).

A Figura 2.2.9 permite ainda observar que o ângulo de atrito máximo é mobilizado para deformações menores ou iguais a 20%, podendo este valor ser entendido como representativo do material em seu estado limite de ruptura. A coesão, por outro lado, necessita de deformações bem maiores para sua mobilização, não sendo observado um valor que caracterize a condição limite do material (KONIG & JESSBERGER, 1997). Outra constatação importante diz respeito a ampla faixa de variação dos valores de resistência, mobilizados para uma determinada deformação, em função da idade do resíduo. Para $\epsilon=20\%$, por exemplo, o ângulo de atrito varia entre 10 e 40° e a coesão entre 25 e 200 kPa, em função

da idade do resíduo. Os resultados não permitem concluir, no entanto, qualquer relação entre redução da resistência com aumento da idade do resíduo.

Tabela 2.2.9. - Ensaios de resistência - resultados obtidos.

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA				
REFERÊNCIA	ATERRO	c (kPa)	Ø (°)	OBSERVAÇÕES
LUKAS (1985)	Chicago (EUA)	39,0	34,5	ensaio triaxial CU
	Edmonton (Canadá)	23,0	24,0	resíduo triturado (cisalhamento direto)
LANDVA & CLARK (1990)	Blackfoot (Canadá)	16,0	33,0	resíduo antigo (cisalhamento direto)
		19,0	39,0	resíduo antigo (cisalhamento direto)
	Hantsport (Canadá)	0	36,0	resíduo antigo (cisalhamento direto)
JESSBERGER & KOCKEL (1991)	-	22,0	46,0	ensaio triaxial em amostras de grande dimensão ($\epsilon = 20\%$)
KÖLSCH (1993,1995)	-	0	26,4	resíduo novo (cisalhamento direto)
		0	17,7	resíduo antigo (cisalhamento direto)
DEL GRECO & OGGIERI (1993)	Chivasso (Itália)	16,0	21,0	$\gamma=5,0 \text{ kN/m}^3$ (cisalhamento direto)
		24,0	22,0	$\gamma=7,0 \text{ kN/m}^3$ (cisalhamento direto)
GABR & VALERO (1995)	Pioneer Crossing (USA)	0-27,5	20,5-39,0	resíduo antigo (cisalhamento direto)
		16,8	34,0	resíduo antigo (ensaio triaxial CU)
SHIMIZU (1996)	Tokyo Port (Japão)	15,0 a 91,0	8,0 a 20,4	resíduos antigos (ensaio triaxial CD)
		26,0 a 36,0	4,3 a 6,4	resíduos antigos (ensaio triaxial UU)
		48,0 a 116,0	30,0 a 47,0	resíduos novos (cisalhamento direto)
CARVALHO (1999)	Bandeirantes (São Paulo)	42,0 a 60,0	21,0 a 27,0	resíduos antigos (ensaio triaxial CD)

A parcela significativa de resistência dos resíduos sólidos urbanos, mobilizada com o aumento das deformações, pode ser explicada pelo efeito de reforço que alguns de seus constituintes fibrosos (plásticos, papéis, pedaços de madeira, etc) passam a desempenhar, contribuindo assim para um incremento do intercepto de coesão. Neste sentido, KOCKEL & JESSBERGER (1995) propõe analisar os resíduos como uma matriz composta, constituída por duas componentes: uma básica, onde estão presentes as partículas finas e médias Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

($\leq 120\text{mm}$), e uma reforçada, que engloba as partículas fibrosas e de maiores dimensões ($>120\text{mm}$). Os mesmos autores, a partir de ensaios laboratoriais, mostraram que a resistência ao cisalhamento da componente básica da matriz (partículas $\leq 120\text{mm}$) é quase que totalmente condicionada pela resistência friccional, com ângulos de atrito máximo entre 42° e 45° , mobilizados com elevadas deformações. Por outro lado, a parcela de coesão é preponderante na componente reforçada da matriz, sendo função direta da resistência à tração dos “elementos de reforço” e mobilizada com deformações superiores a 20%. A Figura 2.2.10 apresenta os resultados obtidos para o ângulo de atrito e coesão, para distintas configurações das amostras.

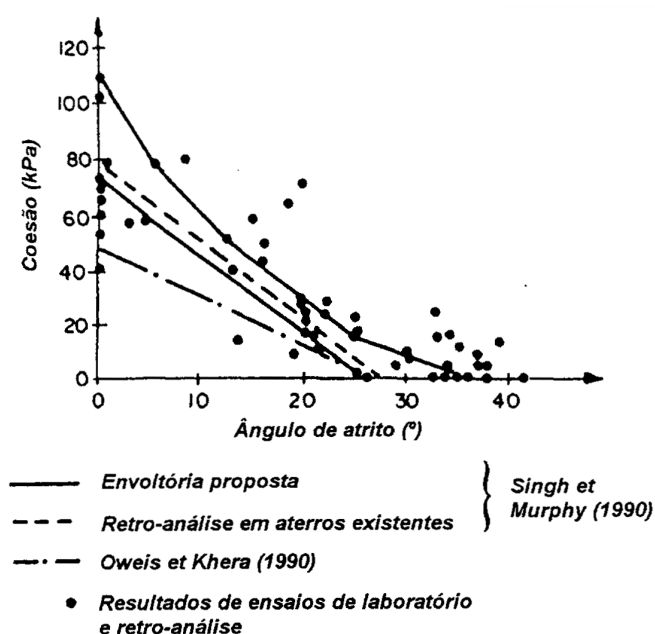


Figura 2.2.7 - Relação entre coesão e ângulo de atrito de resíduos sólidos urbanos (adaptado por WOJNAROWICZ et al., 1998).

Caso o efeito de reforço não se faça presente, em função, por exemplo, da composição do resíduo (inexistência de plásticos, tecidos etc), passa a ser preponderante para a resistência ao cisalhamento o teor de umidade, conforme relatado por GABR & VALERO (1995). Estes autores observaram redução significativa da parcela de coesão, de 100 kPa para 40 kPa, quando o teor de umidade foi acrescido de 55% para cerca de 65%.

Com base em resultados de ensaios laboratoriais, KOCKEL & JESSBERGER (1995) indicam uma envoltória linear para definir a mobilização da resistência ao cisalhamento dos resíduos, ressaltando que a envoltória bi-linear, característica de maciços reforçados, não se faz aqui presente, uma vez que os “elementos de reforço” nos resíduos apresentam distintos comprimentos e comportamentos tensão vs. deformação. Por outro lado, KAVAZANJIAN et

al. (1995), com base em resultados de ensaios laboratoriais e *in situ* e em retro-análises, propõe uma envoltória de resistência bi-linear com as seguintes características: para tensões inferiores a 30 kPa, os resíduos apresentam comportamento puramente coesivo ($c=24\text{kPa}$), enquanto que para tensões superiores a 30 kPa, o comportamento passa a ser friccional com um ângulo de atrito igual a 33° . A partir de resultados publicados, MANASSERO et al. (1996) propõe uma envoltória de resistência tri-linear com as seguintes características: para tensões inferiores a 20 kPa, os resíduos apresentam comportamento puramente coesivo ($c=20\text{kPa}$); enquanto que para tensões situadas no intervalo entre 20 e 60 kPa, o comportamento passa a ser puramente friccional ($\phi=38^\circ$). Para tensões superiores a 60 kPa, os resíduos possuem ambas as parcelas ($c \geq 20\text{kPa}$ e $\phi=30^\circ$).

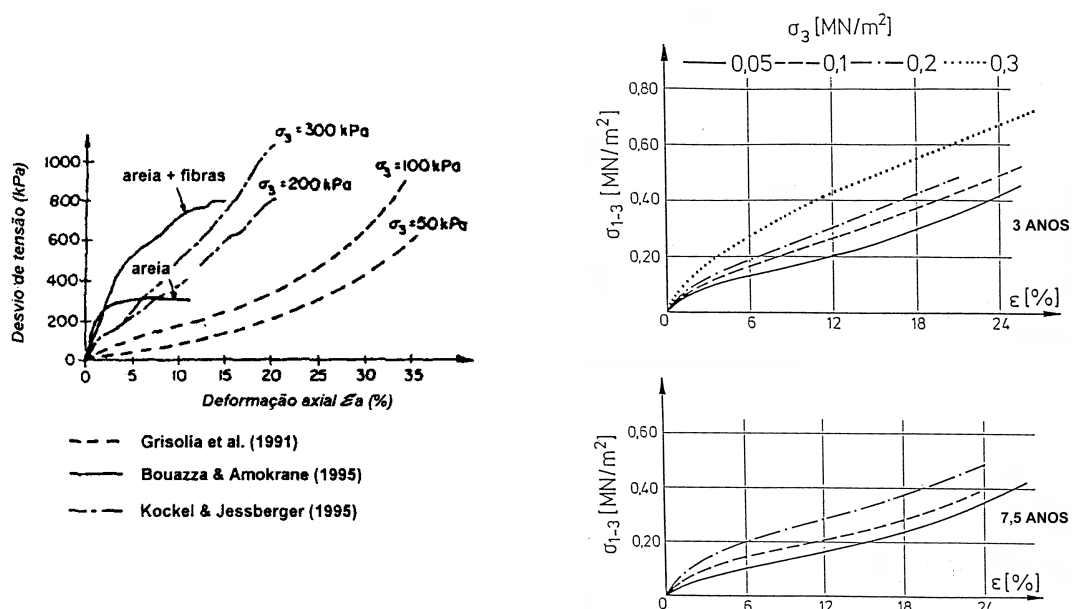


Figura 2.2.8 - Relação tensão vs. deformação para diferentes tipos de resíduos sólidos urbanos, obtidos a partir de ensaios triaxiais (KONIG & JESSBERGER, 1997).

A resistência ao cisalhamento dos resíduos é influenciada por diversos fatores, tais como, a composição e idade do resíduo, o teor de umidade e de matéria orgânica, o grau de compactação e a dimensão das partículas. Devido ao intertravamento das partículas, a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos normalmente aumenta com as tensões normais atuantes. SINGH & SUN (1995), com base em valores medidos e observados, apresentam uma relação entre a resistência ao cisalhamento dos resíduos e a profundidade, conforme pode ser visualizada na Figura 2.2.11, juntamente com a proposição de outros autores. Os autores sugerem também a existência de uma profundidade crítica, a partir da qual as tensões verticais efetivas não contribuem para a resistência ao cisalhamento dos

resíduos. Baseado no gráfico da Figura 2.2.11 observa-se uma profundidade crítica da ordem de 55,0m e valores limites para resistência dos resíduos de cerca de 250 kN/m².

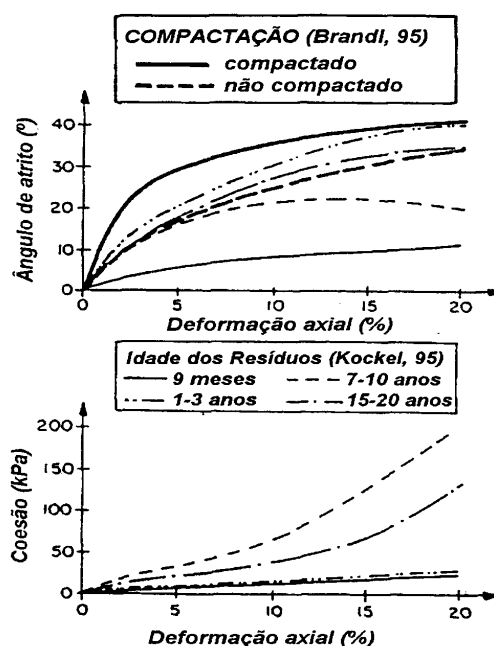


Figura 2.2.9 - Parâmetros de resistência mobilizados em função do nível de deformações (KONIG & JESSBERGER, 1997).

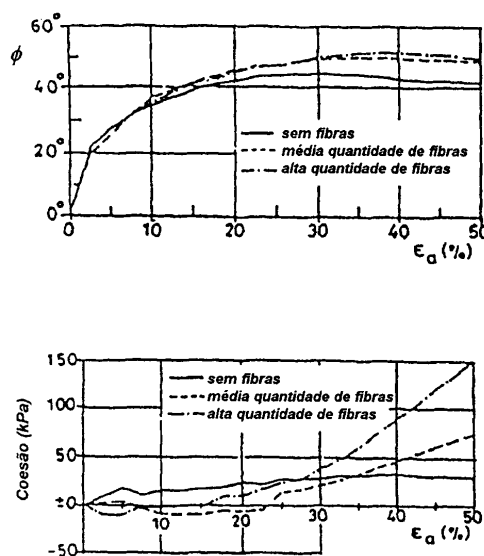


Figura 2.2.10 - Mobilização dos parâmetros de resistência para distintas configurações de amostras (KOCKEL & JESSEBERGER, 1995).

Além deste efeito, acréscimos de densidade com o tempo podem igualmente aumentar a resistência dos resíduos, efeito este que pode ser anulado ou mesmo revertido, perante a intensidade dos processos de biodegradação atuantes no maciço (KNOCHENMUS et al., 1998). Quanto à compactação, estudos realizados por BRANDL (1995) demonstram que o Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

ângulo de atrito para resíduos compactados é significativamente superior ao obtido para resíduos não compactados, especialmente para baixas deformações axiais, conforme apresentado na Figura 2.2.9.

b) ensaios in situ

Outra forma de obtenção das características de resistência dos resíduos sólidos baseia-se em ensaios *in situ*. Diversos trabalhos relatam resultados de investigações do tipo SPT, CPT, pressiômetro, etc, porém todas elas apresentam elevada dispersão de valores, tornando complexa a interpretação dos dados. No caso do ensaio SPT, não existem atualmente correlações entre o número de golpes N_{SPT} e a resistência ao cisalhamento dos resíduos. A presença de obstáculos no maciço a ser ensaiado torna dificultosa a realização das investigações, assim como a análise dos resultados, devendo as propriedades resistentes ser confirmadas por outros métodos (por exemplo, ensaios laboratoriais), antes de sua utilização em projetos e trabalhos de pesquisa (KNOCHENMUS et al., 1998). Quanto aos ensaios CPT, alguns autores (KODA, 1998b e DUCHÊNE et al., 1998) apresentam parâmetros de resistência (c e ϕ) em função dos resultados obtidos.

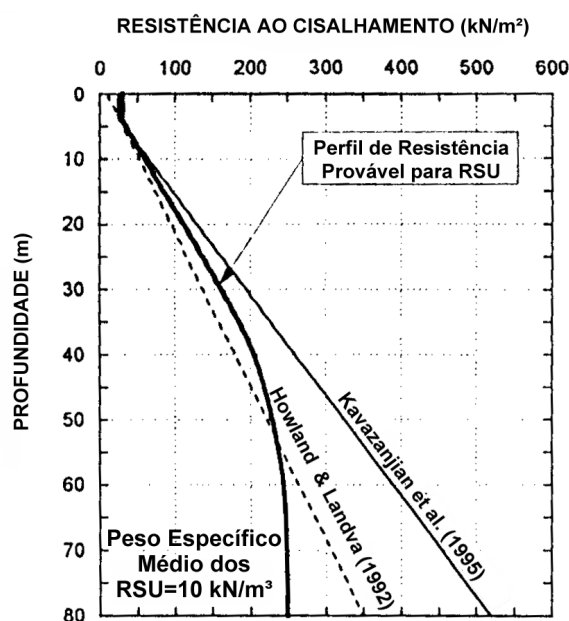


Figura 2.2.11 - Variação da resistência ao cisalhamento dos resíduos com a profundidade (SINGH & SUN, 1995).

WITHIAM et al. (1995) descrevem a realização de 5 ensaios de cisalhamento de resíduos sólidos urbanos *in situ*. Os autores ensaiaram amostras com dimensões de 1,5 x 1,5 x 1,5m, submetendo-as a tensões normais que variaram entre 0 e 21 kPa. A envoltória de Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

ruptura foi definida por uma coesão c de 10 kPa e um ângulo de atrito de cerca de 30° . Ensaio semelhante foi realizado por RICHARDSON & REYNOLDS (1991), resultando em valores de coesão (c) iguais a 10 kPa e ângulo de atrito (ϕ) entre 18° e 43° .

Os ensaios sísmicos, tipo “Cross-Hole” e “Down-Hole” permitem, por sua vez, a obtenção de propriedades dinâmicas dos materiais e têm sido utilizados para o reconhecimento e caracterização de aterros sanitários (SHARMA et al., 1990). A partir da velocidade de propagação da onda pelo maciço e da densidade dos materiais investigados, é possível determinar o módulo de Young, o coeficiente de Poisson e o módulo de deformabilidade transversal dos materiais. SHARMA et al. (1990), desta forma, obtiveram valores iguais a 28,9MPa, 84,4MPa e 0,46, respectivamente, para o módulo de deformabilidade transversal ou de cisalhamento (G), módulo de elasticidade ou de deformação (E) e para o coeficiente de Poisson (ν). Os parâmetros foram obtidos no aterro de Richmond, Califórnia (EUA), baseados em um peso específico estimado de $7,2 \text{ kN/m}^3$.

Ensaio sísmico tipo “cross hole”, realizados no Aterro Sanitário Bandeirantes em São Paulo, indicaram valores entre 0,25 e 0,35 para o coeficiente de Poisson e de 25MPa e 10MPa para os módulos de deformação (E) e de cisalhamento (G), respectivamente, admitindo um peso específico de 8 kN/m^3 (CARVALHO & VILAR, 1998).

c) retro-análise

As propriedades de resistência obtidas a partir de retro-análises devem ser utilizadas e vistas com cuidado, uma vez que podem existir diversas combinações para os parâmetros de resistência que satisfazem a condição de equilíbrio (uma equação e duas incógnitas). A Tabela 2.2.10 apresenta alguns valores estimados por retro-análise para aterros sanitários existentes, simulando diversas condições geométricas e de segurança dos mesmos (KAVAZANJIAN et al., 1995). Os ângulos de atrito apresentados foram obtidos, assumindo uma coesão de 5 kPa e utilizando o método de Bishop simplificado. KODA (1998a, b), a partir de retro-análise, estimou parâmetros de resistência para resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários da Polônia, tendo obtido ângulos de atrito de 26° e 21° , e coesão de 20 e 15 kPa, respectivamente, para resíduos antigos e recentes. EID et al. (2000), baseados na ruptura ocorrida em aterro sanitário próximo a Cincinnati, Ohio (EUA), definiram valores de 40 kPa para a coesão (c) e de 35° para o ângulo de atrito (ϕ).

Tabela 2.2.10 - Parâmetros de resistência estimados por retro-análise (KAVAZANJIAN et al., 1995).

ATERRO SANITÁRIO	TALUDE MÉDIO		TALUDE MÁXIMO		ÂNGULO DE ATRITO DO RESÍDUO (°)		
	ALTURA (m)	TALUDE (H:V)	ALTURA (m)	TALUDE (H:V)	FS=1	FS=1,1	FS=1,2
Lopez Canyon, CA	120	2,5:1	35	1,7:1	25	27	29
Oil, CA	75	2:1	20	1,6:1	28	30	34
Babylon, NY	30	1,9:1	10	1,25:1	30	34	38
Private, OH	40	2:1	10	1,2:1	30	34	37

2.2.3.2 Compressibilidade

Os fatores que afetam e condicionam a magnitude dos recalques provocados por peso próprio ou sobrecargas são muitos e se inter-relacionam entre si, podendo ser destacados (EDIL et al., 1990; WALLIS, 1991): densidade ou índice de vazios inicial dos resíduos; quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos; altura do aterro sanitário; trajetória de tensões durante e após a disposição dos resíduos; nível dos líquidos percolados e faixa de variação do mesmo no interior do maciço; e condições ambientais (umidade, temperatura, presença de gases, etc). A Figura 2.2.12 apresenta a inter-relação entre os diversos fatores que influenciam a compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos, segundo GRISOLIA et al. (1993).

Devido à elevada heterogeneidade e deformabilidade dos resíduos sólidos, assim como o significativo índice de vazios presente nos maciços sanitários, MANASSERO et al. (1996) propuseram representar o processo de adensamento dos resíduos sólidos urbanos em diversas fases, quais sejam:

- recalque por compressão física devido à distorção mecânica, flexão, esmagamento e reorientação das partículas, sob peso próprio dos resíduos e do material de cobertura;
- recalque causado pela migração de pequenas partículas para grandes vazios existentes;
- recalque provocado pelo processo de consolidação e pelo comportamento viscoso envolvendo a estrutura sólida e as partículas ou componentes isolados;
- recalque provocado pela decomposição e biodegradação da matéria orgânica;
- recalque por colapso dos componentes, provocado por processos físico-químicos, tais como corrosão, oxidação e degradação de compostos inorgânicos.

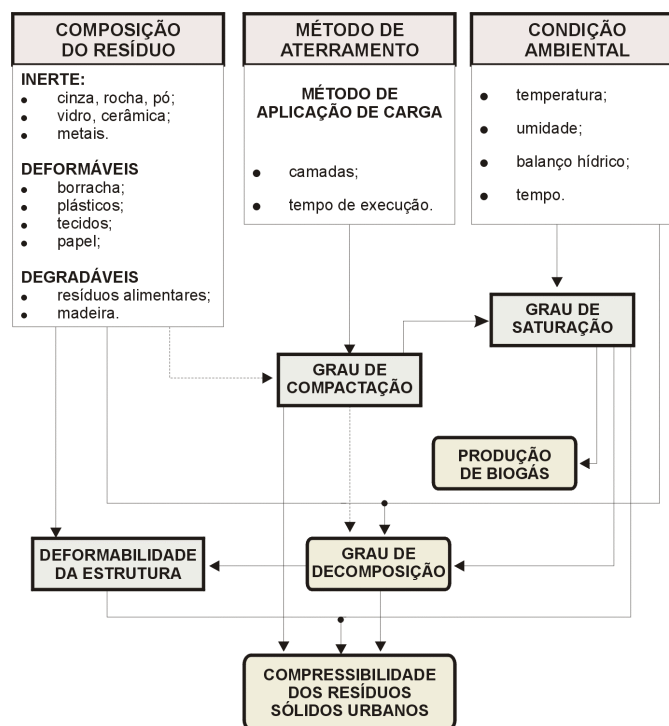


Figura 2.2.12 - inter-relação dos fatores que afetam a compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos (GRISOLIA et al., 1993).

Tal proposição apresenta grande similaridade com o modelo proposto por GRISOLIA et al. (1992b), cuja representação gráfica encontra-se indicada na Figura 2.2.13. Segundo estes autores, os resíduos apresentam, em sua fase sólida, materiais inertes (metais, vidros, etc), elementos de elevada deformabilidade (embalagens plásticas, papel e tecidos), e componentes degradáveis (materiais orgânicos). No processo de deformação descrito pelos autores os resíduos passam por 5 fases: compressão inicial (fase 1); compressão residual dos elementos de elevada deformabilidade (fase 2); compressão devido a processos de deformação lenta e biodegradação (fase 3); estabilização das deformações (fase 4); e deformação residual (fase 5).

Os parâmetros de compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos podem ser determinados através de ensaios laboratoriais, ensaios *in situ* ou retro-análises, a partir de praças ou aterros experimentais. Uma das maiores limitações dos ensaios laboratoriais, diz respeito à não consideração da parcela de recalque devido à decomposição do resíduo, face ao elevado tempo necessário para a mobilização deste mecanismo (KNOCHENMUS et al., 1998). Quanto aos ensaios *in situ*, destacam-se como os mais usados os ensaios de placa, além dos planos de monitoração baseados em instrumentos estrategicamente instalados nos aterros sanitários. A limitação dos ensaios de placa reside no fato da zona de influência do ensaio estar limitada às camadas superficiais, implicando resultados não representativos, face

à heterogeneidade dos resíduos que compõe o maciço. SANTOS et al. (1998) relatam a realização de ensaios de placa em resíduos sólidos urbanos, tendo sido inferidos valores de coeficiente de reação vertical (K_v), variando entre 1,72 e 9,09 MPa/m. O limite inferior corresponde aos resultados de ensaios executados diretamente sobre os resíduos, enquanto os valores superiores estão associados aos ensaios sobre material de recobrimento, mostrando assim a influência deste componente na deformabilidade do maciço.

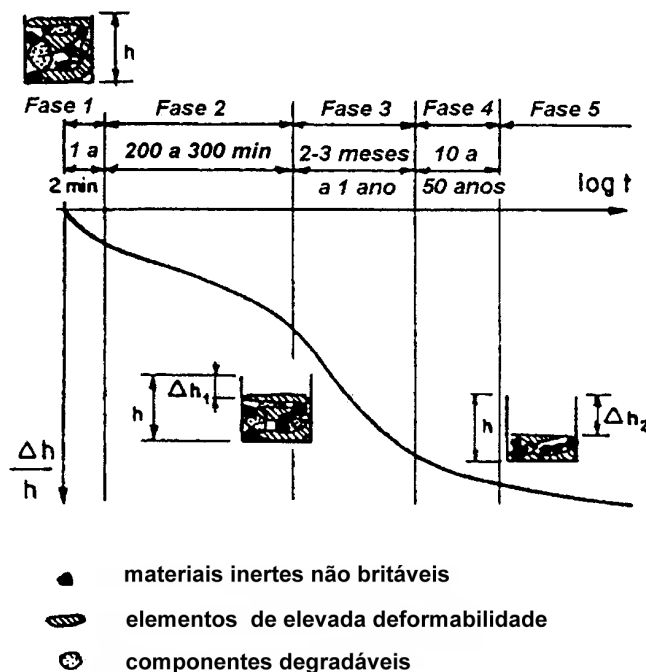


Figura 2.2.13 - Representação do processo de adensamento dos resíduos sólidos urbanos (GRISOLIA et al., 1992b).

A análise dos resultados de programas de monitoração de aterros apresenta-se como importante ferramenta para interpretação e modelagem dos processos de deformação dos resíduos, permitindo a obtenção de curvas de recalque representativas e realistas, como relatado por BOUTWELL & FIORE (1995) e KOCKEL et al. (1997). Tais autores apresentam curvas de recalque compostas basicamente por três segmentos distintos: compressão inicial, finalizada alguns dias após a aplicação da carga; compressão secundária e uma terceira componente do recalque, provavelmente devido a biodegradação dos resíduos (BOUTWELL & FIORE, 1995).

Dos resultados dos ensaios laboratoriais pode ser estimado o módulo de rigidez secante (E_s) do material, o qual depende da tensão vertical (σ_v), nível de deformações (ϵ), composição, grau de compactação e idade do resíduo, entre outros. O valor de E_s pode ser estimado por uma relação linear do tipo $E_s = a + b \sigma_v$, sendo E_s expresso em MPa e a e b parâmetros obtidos a partir de ensaios de compressão com valores indicados na Figura 2.2.14 Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

juntamente com envoltórias obtidas por outros autores (MANASSERO et al., 1996). É importante notar que face a duração limitada do ensaio, os resultados obtidos não consideram as variações ocorridas ao longo do tempo, como resultado dos processos de degradação física, química e biológica dos resíduos. Valores de módulo de rigidez para os resíduos sólidos situam-se geralmente entre 0,5 MPa e 2,5 MPa (JESSBERGER & KOCKEL, 1991).

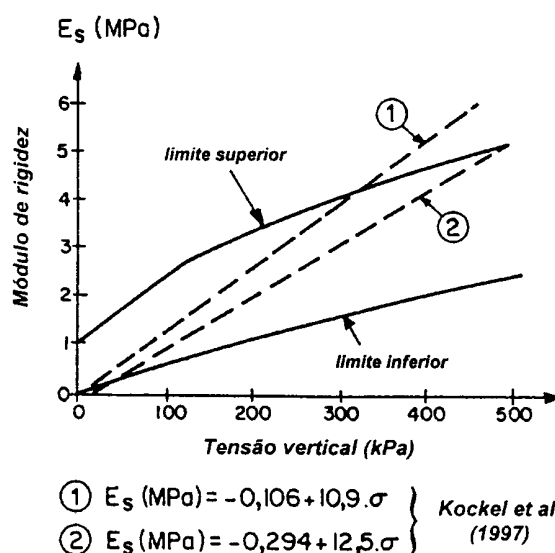


Figura 2.2.14 - Variação do módulo de rigidez E_s com a tensão vertical (adaptado por WOJNAROWICZ et al., 1998).

A deformação dos aterros sanitários ao longo do tempo, normalmente é estimada utilizando a teoria de consolidação unidimensional, com o recalque total sendo composto por uma parcela primária e outra secundária (SOWERS, 1973). Neste sentido, faz-se necessário à determinação do índice de compressão primária (C_c), para estimar o recalque primário, e o índice de compressão secundária (C_α) para estimar o recalque secundário, o qual, ao contrário dos solos, inclui reduções volumétricas devido à fluência e à decomposição química e biológica dos resíduos (MANASSERO et al., 1996). SOWERS (1973) sugere valores para o índice de compressão primária (C_c), em função do índice de vazios inicial (e_0), variando entre $0,15e_0$ (resíduos com pouca matéria orgânica) e $0,55e_0$ (resíduos com elevada matéria orgânica). Quanto ao índice de compressão secundária (C_α), o mesmo autor, apresenta valores variando entre $0,03e_0$ (condições não favoráveis à degradação) e $0,09e_0$ (condições favoráveis à degradação). Face à dificuldade para a determinação do índice de vazios inicial dos resíduos sólidos, recorre-se com freqüência, nos estudos de compressibilidade, aos coeficientes de compressão primária (C_c') e secundária (C_α'), definidos, respectivamente, como os gradientes das curvas log (pressões) vs. recalque e log (tempo) vs. recalque. Diversos estudos, baseados ou não nas premissas de consolidação Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

unidimensional, têm sido realizados no sentido de determinar parâmetros de compressibilidade para os resíduos sólidos urbanos. Apresentam-se na seqüência uma síntese das pesquisas realizadas em laboratório, em células experimentais, e baseadas na monitoração de aterros sanitários.

2.2.3.2.1 Estudos em Laboratório

a) CHEN et al. (1977)

Neste trabalho, resíduos sólidos urbanos triturados foram submetidos a ensaios de consolidação unidimensional em consolidômetro com 171mm de diâmetro. Os ensaios foram conduzidos com amostras de resíduos frescos e “envelhecidos” em laboratório (condições ambientais controladas para aceleração dos processos de decomposição), procurando verificar este efeito na compressibilidade dos resíduos sólidos. A influência da razão de incremento de carga na magnitude das deformações secundárias e no comportamento da curva tempo vs. deformação também foi objeto de análise do trabalho. Dos resultados obtidos pelos autores podem ser destacados: (i) a curta duração para a fase de compressão primária dos resíduos; (ii) observação de maiores taxas de deformação secundária, para ambas amostras ensaiadas (resíduo fresco e envelhecido), quando associadas a maiores razões de incremento de carga; (iii) maior susceptibilidade dos resíduos envelhecidos às deformações secundárias em comparação com os resíduos frescos.

b) RAO et al. (1977)

Os resíduos sólidos utilizados neste estudo apresentavam composição constituída por papéis (40%), metais (10%), resíduos alimentares (15%), resíduos de poda e jardinagem (15%), vidros (10%), cinzas e rochas (4%), plásticos (3%), tecidos (2%) e madeira (1%). Os ensaios foram conduzidos em um consolidômetro de grande dimensão (cerca de 0,60m de diâmetro e 0,23m de altura), sendo as amostras compactadas com teor de umidade de 30% (base seca) e densidades de 2,3; 2,9; 3,5; e 4,1 kN/m³ em dois conjuntos (com e sem tratamento). No conjunto com tratamento as amostras receberam injeção de cimento visando verificar a influência deste procedimento na melhoria das propriedades mecânicas do material. Os estudos mostraram que a compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos depende, entre outros, do histórico de tensões, da densidade inicial do material e da magnitude das tensões atuantes, podendo os principais resultados dos ensaios ser sumarizados como:

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

- redução progressiva dos recalques, para um mesmo nível de tensões, com o aumento da densidade inicial da amostra, sendo tal efeito menos pronunciado para tensões mais elevadas. Tal comportamento foi observado nas amostras com e sem injeção de cimento;
- coeficientes de recalque (C_s), com significado semelhante ao coeficiente de compressão primária (C_c'), crescentes com o aumento da densidade inicial da amostra, tanto para amostras injetadas como para aquelas sem tratamento. Valores para este parâmetro entre 0,160 e 0,235 (amostras sem tratamento) e entre 0,149 e 0,230 (amostras injetadas) foram obtidos nos ensaios;
- efeito benéfico da injeção de cimento nas amostras, no tocante a redução dos recalques observados (cerca de 50% em alguns casos). Tal efeito, no entanto, está diretamente relacionado com o aumento de densidade provocado pela injeção;
- valores para o coeficiente de compressão secundária (C_{α}') entre 0,015 e 0,045, apresentando praticamente nenhuma variação em relação ao nível de tensões aplicado e à densidade inicial da amostra.

c) *WARDWELL & NELSON (1981)*

Estes autores procuraram avaliar o efeito da decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos na compressibilidade dos mesmos. Neste sentido, amostras com distintas quantidades de matéria orgânica e nutrientes foram preparadas e submetidas a ensaios de compressão unidimensional por um período de 6 meses. Amostras duplicadas sem a presença de nutrientes foram igualmente preparadas e ensaiadas.

Nas amostras onde o processo de decomposição foi predominante e acelerado pela presença de nutrientes o coeficiente de compressão secundária (C_{α}') não se mostrou constante e sim variável com o tempo. Adicionalmente, a compressão destas amostras foi significativamente mais elevada do que a registrada nas amostras deficientes em nutrientes, sendo as deformações secundárias mais elevadas com o acréscimo de matéria orgânica presente nos resíduos.

Os autores propuseram a utilização de um modelo reológico baseado no modelo de GIBSON & LO (1961) para ter em conta a compressão secundária e os efeitos da decomposição biológica. A identificação e o conceito do tempo crítico, t_k , correspondente ao tempo a partir do qual uma abrupta mudança nos recalques observados ocorre, foi apresentado. A partir deste ponto a compressão secundária é acelerada pela combinação dos processos de fluência e de aumento da decomposição causada pela atividade microbiana.

d) LANDVA & CLARK (1984, 1986, 1990)

Amostras deformadas de resíduos sólidos provenientes de 5 diferentes aterros sanitários no Canadá foram ensaiadas em consolidômetro de grande dimensão (diâmetro de 450mm). Os valores obtidos para o coeficiente de compressão primária (C_c') e para o coeficiente de compressão secundária (C_{α}'), para os distintos aterros sanitários, estão apresentados na Tabela 2.2.11.

Tabela 2.2.11 - Parâmetros de compressibilidade primária e secundária (LANDVA & CLARK, 1984, 1986, 1990).

ATERRO SANITÁRIO	COEFICIENTE DE COMPRESSÃO PRIMÁRIA (C_c')	COEFICIENTE DE COMPRESSÃO SECUNDÁRIA (C_{α}') ⁽¹⁾	FAIXA DE PRESSÕES DE ENSAIO (kPa)
Kingston	0,17	0,0210	20 a 200
Edmonton	0,35	0,0180	80 a 200
Hantsport	0,22	0,0280	80 a 200
Ottawa	0,21	0,0070	20 a 400
Edmundston	0,36	0,0020	20 a 400
Stolport	-	0,0150	0 a 150

(1) valores obtidos para intervalos de carregamento contidos na faixa de pressões apresentada

e) SARGUNAN *et al.* (1986)

Os autores reportam a realização de ensaio de consolidação unidimensional com resíduos sólidos urbanos do aterro de Madras (Índia), cuja composição básica apresenta material putrescível (56%), papéis e metais (14%) e materiais inertes (30%). Os resíduos ensaiados apresentavam peso específico da ordem de 6,0kN/m³ e índice de vazios igual a 2,86. O índice de compressão primária (C_c) foi calculado como sendo igual a 0,44, enquanto índices de compressão secundária (C_{α}) entre 0,0036 e 0,005 foram registrados.

f) GABR & VALERO (1995)

Neste trabalho amostras de resíduos sólidos do aterro Pioneer Crossing, Pensilvânia (EUA), com idade entre 15 e 30 anos, foram submetidas a ensaios de consolidação unidimensional, segundo os mesmos procedimentos preconizados para amostras de solo. Neste sentido, 6 corpos de prova foram preparados e ensaiados, na umidade natural, em anéis de consolidação (diâmetro de 63mm e altura de 22mm), sendo eliminadas das amostras partículas com dimensão superior a 6,3mm. Como resultados destes ensaios foram obtidos coeficientes de compressão primária (C_c') entre 0,15 e 0,22. Assumindo índice de vazios

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

inicial entre 1,0 e 3,0, os autores apresentam valores entre 0,03 e 0,09 para o índice de compressão secundária (C_{α}) e entre 0,4 e 0,9, para o índice de compressão primária (C_c). Os autores observaram ainda que o índice de compressão secundária (C_{α}) parece ser mais dependente das condições favoráveis à atividade biológica em comparação ao inicialmente proposto por SOWERS (1973).

g) *CARVALHO (1999)*

Amostras representativas dos resíduos sólidos urbanos dispostos no Aterro Sanitário Bandeirantes, em São Paulo, com cerca de 10 anos de idade, foram submetidas a ensaios de compressão unidirecional em consolidômetro de grandes dimensões (365mm de diâmetro e 385mm de altura). Os ensaios foram realizados com amostras deformadas, no teor de umidade natural (valores entre 60 e 90%) e com pesos específicos iniciais distintos para cada caso ensaiado. Foram executados 6 ensaios com aplicação de estágios de carga vertical entre 10 e 640 kPa, podendo ser destacados os seguintes resultados e constatações:

- Valores para o índice de compressão primária (C_c) variando entre 0,56 e 0,92, sendo observada forte dependência entre estes valores e o índice de vazios inicial da amostra (menores índices de vazios resultam em menores índices de compressão primária). Com relação ao coeficiente de compressão primária (C_c'), valores entre 0,175 e 0,229 foram obtidos, com valor médio igual a 0,20;
- Valores para o índice de compressão secundária (C_{α}) variando entre 0,0213 e 0,0442, podendo ser tomado um valor médio para este parâmetro igual a 0,032. Tais valores mostraram-se pouco influenciados pelo índice de vazios e praticamente independentes das sobrecargas. Para o coeficiente de compressão secundária (C_{α}') foram obtidos valores entre 0,0105 e 0,0160, com valor médio de 0,013;

2.2.3.2.2 *Estudos em Células Experimentais*

a) *RAO et al. (1977)*

Duas células experimentais (3,0m de largura x 3,0m de comprimento x 1,5m de profundidade) foram construídas e preenchidas com resíduos sólidos urbanos, sendo cobertas por uma camada de solo com cerca de 0,53m de espessura. Uma das células foi tratada com injeção de cimento para verificar o efeito deste procedimento na compressibilidade dos resíduos sólidos. A Figura 2.2.15 apresenta o esquema das células experimentais utilizadas e Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

as curvas recalque vs. tempo obtidas. Os resultados indicaram recalques, ao final do período de 3 anos, menores para a célula com resíduos injetados, apesar de nos períodos iniciais tais células apresentarem uma taxa de recalques mais elevada. Os autores também observaram, com base no monitoramento das condições ambientais, maiores taxas de recalque nos períodos relacionados a temperaturas e precipitações locais mais elevadas, face a aceleração dos processos de decomposição biológica dos resíduos.

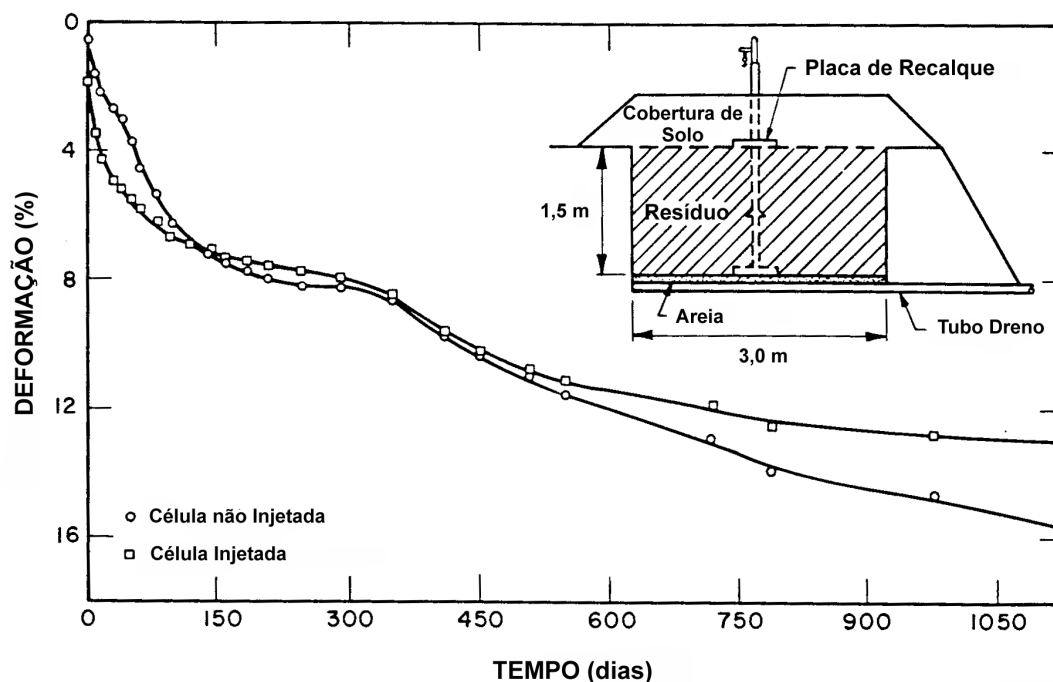


Figura 2.2.15 - Curva recalque vs. tempo em células experimentais (RAO et al., 1977).

b) MOORE & PEDLER (1977)

Diversos ensaios de carregamento de placa foram realizados sobre resíduos sólidos urbanos dispostos em célula experimental (1,8m de largura x 1,2m de comprimento x 1,0m de profundidade), visando avaliar a influência de alguns fatores (densidade inicial dos resíduos, espessura da camada de cobertura e utilização de sobrecarga) na compressibilidade dos resíduos. A composição dos resíduos ensaiados apresentava produtos de papel (42%), resíduos alimentares (24,5%), materiais ferrosos (11,0%), plásticos (10,5%) e vidros e outros materiais inertes (12,0%). A massa específica dos resíduos variou entre 240 e 330 kg/m³, sendo os mesmos cobertos por uma simples camada ou por camadas intercaladas de solo. Os ensaios foram realizados com placas circulares de diâmetro igual a 30cm, 45cm e 60cm. Como principais conclusões do estudo podem ser destacadas:

- aumento do recalque, sob um determinado nível de carregamento, com o aumento da área carregada, porém com valores inferiores aos previstos pela teoria da elasticidade;
- a compressibilidade dos resíduos é inversamente proporcional à densidade dos mesmos, apesar da elevada dispersão dos resultados obtidos;
- significativa redução da compressibilidade dos resíduos com a aplicação de pré-carregamento;
- redução dos recalques com o aumento da espessura da camada de solo de cobertura;
- obtenção de coeficientes de compressão secundária (C_{α}') entre 0,05 e 0,07.

c) *WALL & ZEISS (1995)*

Os autores procuraram, baseados na execução e monitoração de células experimentais, avaliar o efeito da utilização de técnicas de manejo dos resíduos na aceleração dos processos de degradação e na conseqüente estabilização biológica dos mesmos, assim como determinar os efeitos da biodegradação na compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos. Seis células (diâmetro de 0,57m e profundidade de 1,70m) foram construídas e preenchidas com resíduos sólidos urbanos com composição baseada predominantemente na presença de papéis (42%) e matéria orgânica (21%). Três destas células foram concebidas como reatores biológicos, operadas com a recirculação dos líquidos percolados e adição conjunta de lodos de estações de efluentes e de nutrientes, enquanto as outras três células foram projetadas como câmaras fechadas. Para a avaliação de recalques, uma pressão de cerca de 10kN/m² foi aplicada no topo das células, sendo o período de observação de cerca de 225 dias. Alguns resultados deste estudo podem ser sumarizados como se segue:

- aumento significativo dos recalques iniciais (imediate) e primário dos resíduos com a elevação do teor de umidade;
- ocorrência dos recalques iniciais imediatamente após a aplicação do carregamento, correspondendo a reduções na altura inicial das células da ordem de 26% e 17%, respectivamente, para as células biologicamente ativas (reatores biológicos) e para as células inertizadas (câmaras fechadas);
- ocorrência da compressão primária durante os primeiros 30 dias do experimento, resultando em compressões adicionais de 15% e 12%, respectivamente, para as células biologicamente ativas e inertizadas. Coeficientes de compressão primária (C_c') iguais a 0,25 (células ativas) e 0,21 (células inertes) foram igualmente calculados;

- valores para o coeficiente de compressão secundária (C_{α}') foram avaliados entre 0,033 e 0,056 (células ativas) e 0,037 e 0,049 (células inertes), sendo observado uma relação linear entre os recalques secundários e o logaritmo do tempo;
- pequena influência dos efeitos da biodegradação na magnitude ou taxa de recalque secundário no período observado (225 dias). Para períodos longos, no entanto, o aumento das taxas de degradação provavelmente implicará, segundo os autores, aceleração das taxas de recalque.

d) BEAVEN (1996)

Para avaliação do efeito da aplicação de tensões (profundidade dos aterros sanitários) nos recalques e densidades *in situ* dos resíduos, assim como na condutividade hidráulica dos mesmos foram realizados ensaios de compressão unidimensional em célula de grande porte (diâmetro de 2,0m e profundidade de 3,0m) apta a simular carregamentos correspondentes a colunas de 50,0m de resíduos. Os resíduos ensaiados apresentavam composição predominantemente constituída por papéis (35,1%) e materiais putrescíveis (22%), umidade natural da ordem de 34% e peso específico inicial igual a 7,0 kN/m³. Os ensaios envolveram a aplicação de 3 estágios de cargas (40, 165 e 322 kPa), em amostras não saturadas e saturadas até atingir a capacidade de campo do material. Os resultados indicaram aumento do peso específico total e do peso específico seco com o aumento das tensões aplicadas, sendo registrado um valor de 9,0 kN/m³ para o peso específico total, após a aplicação do último estágio de carga. Coeficientes de compressão primária (C_c') iguais a 0,20 e 0,25, respectivamente, para os resíduos na umidade natural e na capacidade de campo, foram calculados. POWRIE & BEAVEN (1999), em trabalho posterior e tendo por base o mesmo equipamento de ensaio, apresentaram relações entre o peso específico saturado (γ_{sat}) e seco (γ_d) do material e as tensões verticais efetivas (σ_v'), como sendo:

$$\gamma_{sat} = 0,6691 (\sigma_v')^{0,0899}$$

$$\gamma_d = 0,1554 (\sigma_v')^{0,248}$$

e) EL-FADEL & AL-RASHED (1998)

Este estudo envolveu a construção e monitoração de 6 grandes células experimentais (30,0m de largura x 30,0m de comprimento x 15,0m de profundidade), as quais foram preenchidas com resíduos sólidos urbanos com massas específicas iniciais variando entre Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

688 e 765 kg/m³. Cada célula foi submetida a diferentes tratamentos (adição de água, nutrientes, lodos de estações de tratamento de efluentes e recirculação de líquidos percolados), visando avaliar o efeito dos mesmos nos processos de biodegradação e estabilização dos resíduos. As células foram cobertas com geomembranas e os recalques foram monitorados por cerca de 4 anos (1576 dias) através do nivelamento de marcos superficiais instalados nas células. Os resultados indicaram aumento das taxas de recalque com a elevação do teor de umidade dos resíduos (recirculação ou adição direta de água), estando este fato associado às maiores taxas de biodegradação dos resíduos obtidas com estas práticas. Os autores utilizaram os modelos de consolidação unidimensional e de função de potência, propostos, respectivamente, por BJARNGARD & EDGERS (1990) e EDIL et al. (1990), para comparação com os valores observados e para obtenção de parâmetros de compressibilidade. Tais modelos serão melhor detalhados no item 2.3 deste trabalho. Valores para os parâmetros m e n (função de potência) entre $5,8 \times 10^{-5}$ e $1,6 \times 10^{-5}$ e entre 0,50 e 0,67, respectivamente, foram calculados. Para o modelo de compressão unidimensional foram obtidos valores entre 0,015 e 0,035, para o coeficiente de compressão secundária intermediária ($C_{\alpha 1}$), e entre 0,132 e 0,250, para o coeficiente de compressão secundária de longo termo ($C_{\alpha 2}$).

2.2.3.2.3 Estudos baseados em Monitoração de Aterros Sanitários

a) Interstate Highway I84 - KEENE (1977)

Para a construção de uma rodovia (Interstate I84) em Connecticut (EUA) um antigo depósito de resíduos sólidos urbanos teve de ser relocado para uma nova área de disposição. O material removido tinha idade entre 40 e 50 anos e apresentava elevada parcela de materiais terrosos (52%), sendo disposto no novo local em camadas de cerca de 0,75m, compactadas pelo tráfego de caminhões e por um trator de esteira tipo D8. Baseados nos resultados de monitoração instalada no aterro após sua conclusão, pode-se constatar uma redução de cerca de 17% no volume devido à compactação dos resíduos. Os recalques foram monitorados por cerca de 50 meses e permitiram calcular valores para o coeficiente de compressão secundária (C_{α}') entre 0,014 e 0,034. A compressão primária ocorreu rapidamente, cerca de 15 dias após a conclusão do aterro, tendo sido estimado para esta parcela um valor de 3% da espessura inicial do aterro. Este reduzido valor está certamente associado à elevada parcela de solo presente, à idade do resíduo e aos trabalhos de compactação realizados.

b) Brogborough & Calvert Landfills – WATTS & CHARLES (1990)

Estudos de campo envolvendo a monitoração de recalques e a execução de ensaios de placa foram realizados nos aterros de Brogborough e Calvert, localizados no sul da Inglaterra. No aterro de Brogborough, camadas com 2,0m de espessura foram dispostas e compactadas (compactador Caterpillar 816F) com um peso específico estimado de $5,4\text{kN/m}^3$. No caso do aterro de Calvert, camadas com pequena espessura foram utilizadas e compactadas resultando pesos específicos da ordem de $8,0\text{kN/m}^3$. Para a leitura de recalques à superfície e ao longo da profundidade dos maciços, extensômetros magnéticos foram instalados, permitindo ainda a leitura dos níveis de líquidos percolados no interior do aterro. Os ensaios de carregamento de placa ($1,93\text{m}$ de largura x $1,75\text{m}$ de comprimento) foram realizados no aterro de Calvert e utilizaram pressões da ordem de 30kN/m^2 por um período de 8 meses. A Figura 2.2.16 apresenta o recalque total, após 47 dias da aplicação da carga, observado ao longo da profundidade abaixo da área carregada, assim como as leituras de recalque para o mesmo período em uma área não carregada do aterro. Observa-se que o efeito do carregamento se faz presente até uma profundidade de cerca de $1,5B$, onde B corresponde a largura da base da placa de carga.

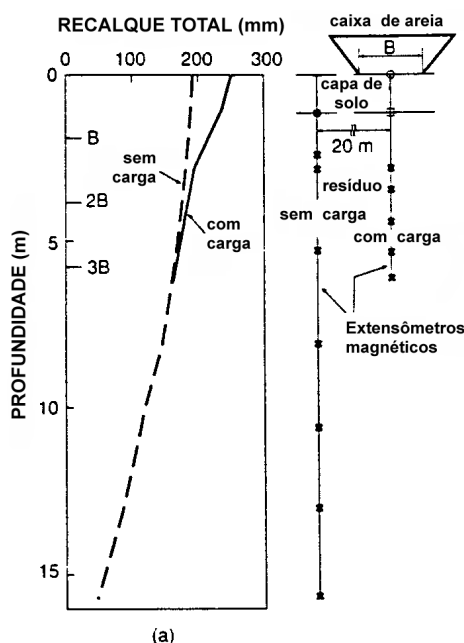


Figura 2.2.16 - Recalque total, ao longo da profundidade, observado após 47 dias de aplicação de carga (WATTS & CHARLES, 1990).

Com base nos acréscimos de carga (disposição de novas camadas) nos aterros e conseqüente resposta em termos de recalques, os autores observaram para o módulo de Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

compressão volumétrica (D), definido como a razão entre o incremento de carga e de deformação produzida por esta em compressão unidimensional, valores da ordem de 1000kN/m^2 . Neste trabalho, a compressão secundária é atribuída a processos de fluência e de biodegradação dos resíduos, apresentando os recalques associados a ambos os processos uma relação aproximadamente linear com o logaritmo do tempo. Coeficientes de compressão secundária devido à fluência iguais a 0,02 e coeficientes de compressão secundária devido a biodegradação iguais a 0,10 (aterro de Brogborough) e 0,23 (aterro de Calvert) foram estimados a partir dos resultados da monitoração. Para o cálculo dos coeficientes de compressão secundária os autores enfatizam a importância e dificuldade para a correta definição do tempo de início (“zero time”) do processo de biodegradação. Tempos de início correspondentes ao encerramento do aterro ou a metade do período construtivo são normalmente utilizados, conduzindo, porém, a parâmetros de compressibilidade completamente distintos.

c) Schisto Landfill - FRANTZIS (1991)

O aterro sanitário de Schisto (Grécia) foi executado em camadas de 3,5 a 4,0m, dispostas e compactadas por tratores de esteira, tendo um peso específico inicial estimado em $6,0\text{kN/m}^3$. Com base na monitoração dos recalques do aterro, por cerca de 7 anos, FRANTZIS (1991) observou que cerca de 18% e 65% dos recalques totais observados ocorreram, respectivamente, após os 6 primeiros meses e após 3 anos de observação. Segundo o autor, a maior parcela do recalque registrada em longo prazo deve-se à ativação dos processos de degradação biológica dos resíduos. O autor observou ainda decréscimo das taxas de recalque ao longo do tempo (taxas médias iniciais de 4,6 cm/mês, nos primeiros 5 meses, reduzidas a 0,4 cm/mês, nos últimos 2 anos de monitoração) e recalques totais da ordem de 25% da altura total inicial do maciço.

d) Central New England Landfill – DRUSHEL & WARDWELL (1991)

Com o objetivo de verificar a integridade de sistemas de cobertura para o aterro sanitário de Central New England (EUA), os autores analisaram os resultados de 6 meses de monitoração de recalques em pontos distintos do maciço. Coeficientes de compressão secundária (C_{α}') entre 0,14 e 0,95 foram calculados, sendo tais valores elevados em comparação com os apresentados na literatura.

e) Limache Landfill – ESPINACE et al. (1991)

Baseados na monitoração do aterro sanitário de Limache (Chile), por um período de 6 anos, e em ensaios de densidade *in situ*, os autores estimaram os parâmetros de compressibilidade para os resíduos sólidos urbanos depositados, tendo por base as formulações e conceitos propostos por SOWERS (1973). Os resíduos aterrados apresentavam 89,0% de matéria orgânica, 3,9% de plásticos, 3,9% de papéis e 3,2% outros materiais. Valores de peso específico entre 5,0 e 9,0 kN/m³ foram igualmente registrados. Valores para o índice de compressão primária (C_c) e secundária (C_α) foram calculados entre 0,13 e 0,40 e entre 0,14 e 0,59, respectivamente. Com base nestes valores e em índice de vazios iniciais estimados entre 0,78 e 2,20 foram calculados coeficientes de compressão primária (C_c') entre 0,05 e 0,13 e coeficientes de compressão secundária (C_α') entre 0,08 e 0,26. Para a estimativa do índice de vazios inicial foi adotado um valor de 16,0 kN/m³ para o peso específico das partículas sólidas. Os parâmetros de compressibilidade secundária mostraram forte dependência com o intervalo de tempo adotado para cálculo.

f) Rio Vigne Landfill - GRISOLIA et al. (1993)

Resíduos sólidos urbanos (65%) e lodos de estações de tratamento de efluentes (35%) foram depositados no aterro sanitário Rio Vigne (Itália), entre 1983 e 1988, com um peso específico estimado da ordem de 8,0 kN/m³. Os recalques foram monitorados durante três períodos distintos, sendo observado pelos autores que: (i) resíduos sólidos recentemente depositados (menor idade) apresentaram maiores taxas de recalque, provavelmente associadas ao fato de que as compressões primárias ainda não tinham sido totalmente finalizadas; (ii) maiores taxas de recalque, em períodos sem acréscimo de carga, estavam associadas a alterações do material, principalmente devido à decomposição da matéria orgânica.

g) Meruelo Landfill – SANCHEZ-ALCITURRI et al. (1993)

O aterro sanitário Meruelo (Espanha) foi monitorado por cerca de 3 anos, sendo os resíduos depositados constituídos basicamente por matéria orgânica (52%), papéis (21,9%), plásticos (8,3%), metais (3,2%), vidros (4,1%), e outros materiais (10,5%). Os resíduos foram compactados com rolo compactador com pesos específicos estimados entre 8,0 e 10,0 kN/m³. Os recalques totais atingiram cerca de 3,0 a 4,0% da altura total do maciço, sendo as taxas de recalque decrescentes com o tempo. Os autores verificaram boa Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

concordância entre a evolução dos recalques com o tempo e uma função semilogarítmica. Outras 3 (três) propostas para previsão de recalques (SOWERS, 1973; YEN & SCANLON, 1975; e GANDOLLA et al., 1992) foram testadas pelos autores, tendo sido verificada razoável concordância entre as taxas de recalque observadas e calculadas pelas propostas mencionadas após 2 anos de monitoração. Para os períodos iniciais, as taxas observadas se apresentaram sistematicamente mais elevadas do que as previstas.

h) Beddingham Landfill – DI STEFANO (1996)

Neste estudo, 6 (seis) células de pressão foram instaladas no interior do aterro sanitário de Beddingham (Inglaterra) com o propósito de avaliar a compressão dos resíduos durante e após a construção do mesmo. As células foram dispostas sobre resíduos antigos (3 células) e sob resíduos frescos recentemente depositados (3 células). Os resultados mostraram, após cerca de 15 meses de monitoração, recalques mais elevados em posições próximas aos taludes naturais do local de implantação do aterro (antiga área de mineração). Tal comportamento foi igualmente observado por MORRIS & WOODS (1990) e denominado de efeito de borda. Os autores também sugerem que quando os resíduos não são carregados (deposição de outras camadas ou aplicação de sobrecargas externas) um aumento do índice de vazios, face aos processos de biodegradação, pode ocorrer, resultando em recalques imediatos quando posteriores carregamentos forem aplicados. Os resultados do estudo indicaram recalques da ordem de 14% da altura inicial do maciço para um período de 4 meses, com valores extremos de cerca de 50% para o período de 15 meses. Tais números, segundo o autor, sugerem que deformações normalmente relatadas como usuais para aterros sanitários entre 10 e 35% da altura inicial dos maciços podem estar subestimando o real potencial de recalque dos resíduos.

i) Aterro Sanitário Bandeirantes – CARVALHO (1999)

Recalques em 4 distintos pontos do Aterro Sanitário Bandeirantes (São Paulo), ao longo de 7 anos, foram analisados, verificando a sua aderência a algumas propostas para avaliação de recalques existentes na literatura. O modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990) foi utilizado, visto que as deformações observadas apresentavam dois trechos lineares (distintas inclinações) com o logaritmo do tempo, resultando em coeficientes de compressão secundária intermediária ($C_{\alpha 1}$) e de longo termo ($C_{\alpha 2}$), respectivamente, iguais a 0,010 e 0,083 (valores médios). Os tempos críticos (t_c), correspondentes à mudança de inclinação das

curvas, foram calculados entre 146 e 172 dias. O autor ressalta o fato de que o valor obtido para o coeficiente $C_{\alpha 1}$ corresponde a apenas 12% do valor encontrado para o coeficiente $C_{\alpha 2}$, o que estaria indicando a importância e participação dos recalques devido à degradação dos resíduos na compressão total do maciço. O modelo de GIBSON & LO (1961) também foi aplicado aos dados observados, admitindo nula a parcela de compressão primária do modelo e peso específico dos resíduos igual a $15,0 \text{ KN/m}^3$ para cálculo das tensões verticais atuantes. Valores calculados para o parâmetro de compressão secundária (b) e para a taxa de compressão secundária (λ/b), conforme definidos no modelo, situaram-se, respectivamente, entre $6,5 \times 10^{-4}$ e $3,0 \times 10^{-4}$ e entre $9,91 \times 10^{-4}$ e $1,12 \times 10^{-3}$. Registre-se que o recalque total observado no período de 7 anos correspondeu a cerca de 12% da altura do aterro ao início da monitoração e que ambos os modelos verificados mostraram excelente aderência com os valores observados no campo.

j) Northern & Southern California Landfills – SHARMA (2000)

Neste estudo, os resultados da monitoração de recalques de três aterros sanitários localizados na Califórnia (EUA) foram analisados e verificados em termos de sua aderência com a proposta de SOWERS (1973), baseada na teoria de consolidação unidimensional de solos. No primeiro caso, os recalques de um aterro submetido a carregamento externo foram analisados por um período de cerca de 2 anos após a aplicação da sobrecarga, tendo sido obtido um coeficiente de compressão secundária ($C_{\alpha'}$) igual a 0,02. Neste caso, o aterro possuía basicamente resíduos sólidos urbanos (80%) e cinzas (20%). Nos dois outros casos analisados, os recalques observados se deram por ação do peso próprio (ausência de carregamentos externos), tendo sido calculados coeficientes de compressão secundária ($C_{\alpha'}$) entre 0,19 e 0,28. Vale ressaltar que os tempos de início e término da compressão secundária para os casos com e sem carregamento externo foram definidos com distintos critérios. No primeiro caso, somente o período pós-aplicação da sobrecarga foi considerado, enquanto no segundo, parte do período construtivo, acrescido da totalidade do período pós-encerramento do aterro, foi considerado.

2.3 Estudos e Modelos propostos para Avaliação de Recalques de Aterros Sanitários

Com o processo de desenvolvimento e expansão urbana, tem crescido o interesse pela reutilização de antigas áreas de disposição de resíduos. Preocupações relativas a este reaproveitamento, no entanto, incluem os elevados recalques, as baixas capacidades de

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

carga, a geração de gases e o ambiente quimicamente agressivo, entre outras, associada a estas áreas. Destes problemas, a magnitude e duração dos recalques despontam entre os mais importantes, constituindo a previsão de recalques futuros, com base em modelos teóricos ou empíricos, objeto de diversos estudos e pesquisas nos últimos anos. A previsão de recalques mostra-se ainda como importante subsídio para definição e garantia de integridade das camadas de cobertura e para a otimização de uso de aterros sanitários.

O recalque final dos resíduos apresenta-se como um valor de difícil avaliação, sendo composto por um recalque inicial, observado em um curto período de tempo após a construção do aterro, e por um secundário que ocorre ao longo de um período de tempo significativo. A taxa de recalques diminui com o tempo e com o aumento da profundidade do resíduo em relação à superfície do aterro. Sob seu peso próprio, os resíduos normalmente apresentam recalques que atingem de 5% a 30% de sua espessura original, sendo que a maior parte deste ocorre nos primeiros dois anos após sua disposição (MANASSERO et al., 1996). Para efeito exclusivamente de avaliação de volumes disponíveis, alguns autores (EDIL et al., 1990) sugerem também para os recalques valores entre 10% e 40% da espessura inicial do aterro, em função do tipo de resíduo e do grau de compactação obtido quando da disposição dos resíduos.

Os recalques de aterros sanitários normalmente são estimados considerando um mecanismo de consolidação unidimensional (aproximações elásticas ou relações do tipo e vs. $\log \sigma$). A aplicação destes modelos para os resíduos, no entanto, é complexa devida:

- os índices de compressão primária e secundária são função do índice de vazios inicial, cujo valor é variável e de difícil obtenção;
- as relações do tipo e vs. $\log \sigma'$ ou e vs. $\log t$ são freqüentemente não lineares, implicando variação significativa dos índices de compressão C_c e C_α em função das tensões geradas nos aterros sanitários;
- os recalques primários são função das tensões efetivas, as quais dependem do peso específico dos resíduos e dos níveis de líquidos percolados, parâmetros estes, igualmente, de difícil avaliação.

A definição de um adequado modelo para previsão de recalques, assim como de seus parâmetros de cálculo, apresenta-se como principal fator limitante nas análises de deformabilidade de aterro sanitários. Tal dificuldade decorre da interação de diferentes mecanismos (fluência, degradação biológica, etc) no processo de compressão dos resíduos, os quais seguem leis próprias de comportamento e são governados por parâmetros distintos

entre si. A proposição e utilização de métodos empíricos, formulados a partir da observação e interpretação de dados obtidos de aterros sanitários específicos, tem sido relatada por diversos autores. Estes modelos, segundo SAGASETA (1993), devem apresentar como características: (i) serem dimensionalmente corretos; (ii) serem definidos por um pequeno número de parâmetros; (iii) terem, estes parâmetros, claro significado físico; (iv) fornecerem previsões razoáveis para longos intervalos de tempo; (v) incluírem a influência do maior número de fatores intervenientes (espessura de camadas, compactidade, etc).

GOURC et al. (1998) dividem os modelos para avaliação da deformabilidade dos resíduos sólidos em três grandes grupos: (i) os que consideram os recalques primários e os de longo prazo (secundário); (ii) os que consideram somente os de longo prazo, ou seja, modelos aplicáveis a aterros já encerrados, onde é admitida a total ocorrência dos recalques primários; e (iii) os que consideram somente a parcela dos recalques secundários correspondente à biodegradação dos resíduos, não considerando, portanto, a componente mecânica (fluência) dos recalques de longo prazo.

Apresenta-se a seguir uma síntese dos modelos e formulações propostos e utilizados para avaliação de recalques de aterros sanitários.

2.3.1 Modelo de SOWERS (1973)

Trata-se da primeira proposta para avaliação de recalques de aterros sanitários. O autor adota um modelo baseado na teoria de adensamento da mecânica dos solos, sendo os recalques primários relacionados aos incrementos de carga e ocorrendo de forma rápida (menos de 1 mês) e com pequeno ou nenhum acréscimo de pressão neutra. Quanto aos recalques de longo prazo, os quais incluem os fenômenos de fluência e biodegradação, o modelo admite a linearidade da relação recalque vs. logaritmo do tempo. Os índices de compressibilidade primária (C_c) e secundária (C_α), utilizados no modelo, são admitidos proporcionais ao índice de vazios inicial do material (e_0) e variáveis em função da quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos e das condições ambientais presentes, conforme apresentado no item 2.2.3.2. Os recalques primários (ΔH_1) e secundários (ΔH_2) são obtidos através das equações:

$$\Delta H_1 = H \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0}$$

$$\Delta H_2 = H \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \log \frac{t_2}{t_1}$$

onde:

ΔH_1 = recalque primário da camada de espessura H

ΔH_2 = recalque secundário da camada de espessura H

e_o = índice de vazios inicial da camada

C_c = índice de compressão primária

C_α = índice de compressão secundária

σ_o = tensão vertical inicial atuante no meio da camada

$\Delta\sigma$ = acréscimo de tensão vertical no meio da camada em consideração

t_1 = tempo inicial do período para obtenção do recalque secundário

t_2 = tempo final do período para obtenção do recalque secundário

2.3.2 Modelo de YEN & SCANLON (1975)

Neste modelo os autores sugerem que a taxa de recalques decresce linearmente com o logaritmo do tempo. Tal proposição foi baseada em resultados da monitoração de três aterros sanitários com espessuras entre 6,0 e 38,0 metros por períodos de até 9 anos. As observações e o modelo aplicam-se somente aos recalques de longo prazo (secundários). Os autores trabalham com os parâmetros m e t_1 , definidos, respectivamente, como a taxa de recalques e a idade média do aterro, e representados pelas equações:

$$m = \Delta H / \Delta t \qquad t_1 = t - t_c / 2$$

onde:

m = taxa de recalque

ΔH = recalques medidos

Δt = intervalo de tempo entre leituras

t = tempo do início da construção à leitura

t_c = tempo de construção do aterro

Este modelo tem o mérito de considerar na análise das taxas de recalque, através do parâmetro t_1 , os períodos de construção dos aterros sanitários, os quais sendo normalmente longos devem ser levados em conta na avaliação de comportamento do maciço. O conceito da idade média do aterro, parâmetro t_1 , pode ser melhor compreendido com a visualização da Figura 2.3.1. Os autores sugerem assim uma relação do tipo $m = a - b \log t_1$, com os parâmetros a e b variando com a espessura do aterro (H) e com o tempo de construção do maciço (t_c). As taxas de recalque obtidas através deste modelo decrescem com o tempo,

tornando-se nulas após 200 ou 300 meses, contradizendo, porém as observações de aterros mais antigos, que demonstram que os recalques se prolongam por períodos mais longos (MANASSERO et al., 1996). Observações em aterros, desde suas fases iniciais, também apontam para relações não lineares entre a taxa de recalques e o logaritmo do tempo, quando os períodos de tempo são mais elevados (acima de 10 anos), conforme relatado por SANCHEZ-ALCITURRI et al. (1993).

Para o período analisado por YEN & SCANLON (1975), por outro lado, as taxas de recalque determinadas pelo modelo proposto apresentam concordância com os resultados obtidos pelo modelo de SOWERS (1973), conforme confirmado por MANASSERO et al. (1996). Os autores verificaram ainda uma tendência de aumento das taxas de recalque com o aumento da altura dos aterros, limitado, no entanto, a uma altura máxima a partir da qual as taxas de recalque não se alteram significativamente.

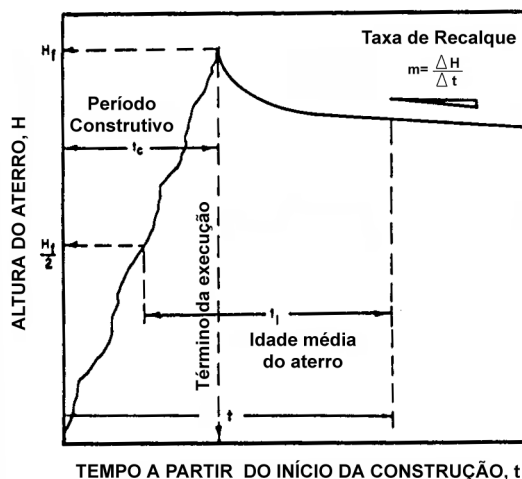


Figura 2.3.1 - Definição da idade média do aterro, t_1 (YEN & SCANLON, 1975)

SOHN & LEE (1994), a partir dos dados e proposta de YEN & SCANLON (1975), apresentam estudo para definição das constantes a e b do modelo descrito, em função da altura do maciço (H_f). Para a faixa de alturas analisadas, estes autores constataram uma relação linear entre os parâmetros a e b e a altura dos maciços, conforme equações a seguir apresentadas. A Figura 2.3.2, baseada nestas equações, apresenta curvas para variação da taxa de recalque em função das alturas do aterro e da idade média do aterro (t_1).

$$a = 0,00095 H_f + 0,0985$$

$$b = 0,00035 H_f + 0,00509$$

onde H_f corresponde a altura do maciço em metros.

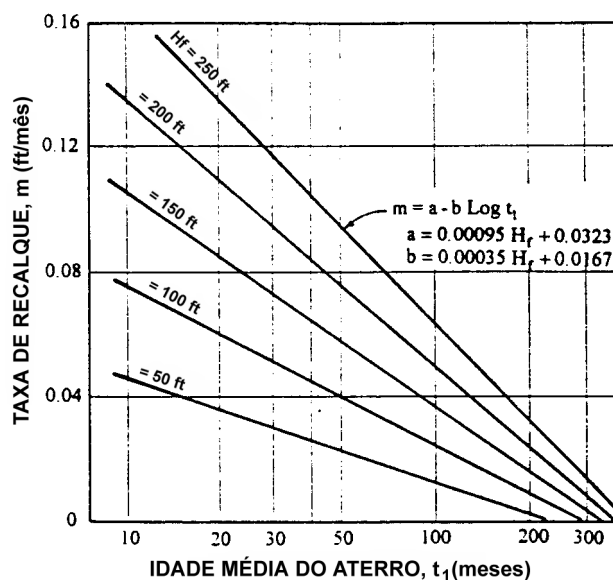


Figura 2.3.2 - Variação da taxa de recalque com a altura e a idade média do aterro, t_1 (SOHN & LEE, 1994)

2.3.3 Estudo de EDIL et al. (1989, 1990) baseado no Modelo de GIBSON & LO (1961)

Os autores propõem um modelo visco-elástico linear baseado no modelo reológico de GIBSON & LO (1961), muito utilizado para avaliação da compressão secundária em solos turfosos e orgânicos. O modelo associa em série um elemento de Hooke (mola com constante a), que simula a compressão primária do resíduo, ao corpo de Kelvin, traduzido pela associação em paralelo de um elemento de Hooke (mola com constante b) e um elemento de Newton (amortecedor com viscosidade λb), e que simula a compressão secundária do elemento. O recalque do resíduo, desta forma, pode ser avaliado pela equação:

$$\Delta H = H \sigma_v \{a + b [1 - e^{-(\lambda/b)t}]\}$$

onde:

ΔH = recalque

H = altura inicial do aterro

a e b = parâmetros de compressibilidade primária e secundária do resíduo

σ_v = tensão vertical atuante

λ/b = taxa de compressão secundária

t = tempo a partir da aplicação da carga

Os autores aplicaram este modelo em 4 aterros sanitários com distintas condições de contorno (altura total, estado de tensão, idade do aterro, operação do aterro e tempo de observação dos recalques), obtendo valores para os parâmetros de compressibilidade entre $5,11 \times 10^{-7}$ e $3,80 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$ (parâmetro a), $1,0 \times 10^{-4}$ e $5,87 \times 10^{-3} \text{ kPa}^{-1}$ (parâmetro b) e $9,2 \times 10^{-5}$ e $4,3 \times 10^{-3} \text{ dia}^{-1}$ (parâmetro λ/b). Os autores observaram ainda as seguintes tendências: (i) redução do parâmetro de compressibilidade primária (a) com o aumento de tensões; (ii) redução do parâmetro de compressibilidade secundária (b) com o aumento de tensões; e (iii) aumento da taxa de compressão secundária (λ/b) com o aumento da taxa de deformações. Os autores registraram ainda diferenças percentuais entre os valores calculados com o modelo, após 2 anos, e os observados, variando entre +4,0 e -21,0%, com os valores negativos correspondendo a recalques calculados inferiores aos observados (valores subestimados).

2.3.4 Modelo de EDIL et al. baseado em Função de Potência (1990)

Neste estudo, os autores propuseram a utilização de uma função de potência para reproduzir os fenômenos de compressão secundária dos resíduos sólidos, segundo a equação:

$$\Delta H = H \sigma_v m (t / t_r)^n$$

onde: m corresponde à compressibilidade de referência, n à taxa de compressão; e t_r ao tempo de referência, considerado igual a 1 dia no estudo original apresentado. Os outros parâmetros têm o mesmo significado do modelo descrito no item 2.3.3.

À semelhança do modelo anterior, os autores utilizaram esta proposição em 4 aterros sanitários com distintas condições de contorno, obtendo valores médios para os parâmetros m e n iguais a $2,5 \times 10^{-5} \text{ kPa}^{-1}$ e 0,65, respectivamente. Neste caso não foram observadas quaisquer tendências de comportamento para os parâmetros do modelo em relação às tensões verticais atuantes ou às taxas de recalque. Foram obtidas diferenças percentuais entre os valores calculados com o modelo, após 2 anos, e os observados, variando entre +6,0 e -14,0%.

2.3.5 Modelo de BJARNGARD & EDGERS (1990)

Este modelo foi proposto a partir da compilação e análise de diversos dados de observação e monitoração de aterros sanitários (BJARNGARD, 1989), gerando um procedimento empírico de avaliação de recalques, cuja formulação é apresentada a seguir.

$$\frac{\Delta H}{H} = C_c \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} + C_{\alpha 1} \log \frac{t_2}{t_1} + C_{\alpha 2} \log \frac{t_3}{t_2}$$

onde:

ΔH = recalque

H = altura inicial da camada sob análise

σ_0 = tensão vertical efetiva inicial ao meio da camada sob análise

$\Delta\sigma$ = incremento de tensão vertical ao meio da camada sob análise

t_1 = tempo, em dias, para conclusão da compressão inicial

t_2 = tempo, em dias, para conclusão da compressão intermediária

t_3 = tempo, em dias, para o qual é feita a previsão do recalque

C_c = coeficiente de compressão primária

$C_{\alpha 1}$ = coeficiente de compressão secundária intermediária

$C_{\alpha 2}$ = coeficiente de compressão secundária de longo prazo

Os autores observaram que a evolução dos recalques ocorre em 3 fases. Na fase inicial, os recalques ocorrem de forma rápida pela compressão mecânica dos resíduos e redução dos vazios existentes. Na segunda fase, correspondente a compressão secundária intermediária, os recalques são dominados essencialmente por interações mecânicas, enquanto que na última fase, referente à compressão secundária de longo prazo, os efeitos da biodegradação dos resíduos são acrescidos aos mecanismos da fase anterior, implicando taxas de recalque mais elevadas. Coeficientes de compressão secundária intermediária ($C_{\alpha 1}$) entre 0,003 e 0,038 (média de 0,019) e secundária ($C_{\alpha 2}$) entre 0,017 e 0,51 (média de 0,125) foram determinados com a aplicação do modelo aos casos analisados. A Figura 2.3.3 ilustra, de forma esquemática, o modelo descrito. FASSETT et al. (1994) apresentaram proposta semelhante a este modelo, exceto pelo fato do coeficiente de compressão secundária ser representado por um único valor, o que a torna similar ao modelo de SOWERS (1973). Estes autores propõem, para a definição dos parâmetros de compressibilidade e para avaliação de recalques, um procedimento empírico baseado na compilação e análise dos dados de monitoração de diversos aterros sanitários.

2.3.6 Modelo de EDGERS et al. baseado na “Rate Process Theory” (1992)

Neste estudo, os autores propuseram a utilização de um modelo para estimar a deformação de longo prazo (compressão secundária), tendo em conta os processos de compressão mecânica e de biodegradação dos resíduos sólidos. A compressão mecânica é Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

avaliada com o uso de um modelo de 3 parâmetros, tendo por base a “Rate Theory Process” comumente utilizada para descrever a deformação de solos (SINGH & MITCHELL, 1968). Esta formulação foi inicialmente desenvolvida para simular somente a compressão secundária, mas os autores a utilizaram em aterros sanitários em operação, onde a parcela de compressão primária também se faz presente. Desta forma, pode-se afirmar que tal formulação envolve a compressão primária e secundária em uma mesma equação, conforme apresentado na seqüência:

$$\varepsilon = \varepsilon_l + A e^{\alpha D} t_l / (1 - m) [(t/t_l)^{1-m} - 1] \quad m \neq 1$$

$$\varepsilon = \varepsilon_l + A e^{\alpha D} t_l \ln (t/t_l) \quad m = 1$$

onde:

A , α e m = parâmetros do modelo

t = tempo decorrido

D = tensão vertical efetiva (σ_v')

ε = deformação (recalque dividido pela altura do aterro)

ε_l e t_l = valores de referência ($\varepsilon_l = 0$ e $t_l = 1$ dia, valores adotados no estudo)

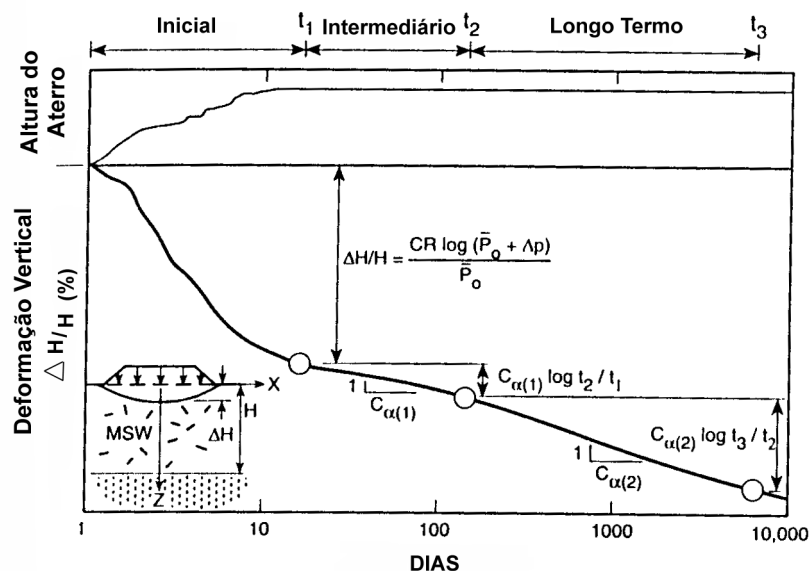


Figura 2.3.3 Modelo de compressão unidimensional proposto por BJARNGARD & EDGERS (1990).

A parcela relativa à biodegradação dos resíduos foi modelada baseada na curva típica de crescimento de bactérias, a qual apresenta um período inicial de baixo ou nulo crescimento, seguido de uma fase de rápido e exponencial desenvolvimento. Segue-se uma fase estacionária, observada quando a máxima população é atingida, declinando e atingindo por Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

fim uma fase terminal. Desta forma, os autores sugerem o uso da formulação seguinte, para os casos onde os resíduos apresentem elevadas taxas de decomposição, acrescida às outras equações representativas do processo de compressão mecânica.

$$\Delta H_{bio} = H B [e^{\beta(t-t_k)} - 1]$$

onde:

- ΔH_{bio} = recalque devido à degradação dos resíduos
 H = altura do aterro
 t = tempo para o qual é feita a previsão de recalques
 t_k = tempo crítico, a partir do qual a taxa de recalques é acelerada pelos processos de decomposição
 β e B = fatores que levam em conta, respectivamente, a atividade biológica dos microorganismos presentes e um fator de escala do processo de deformação em relação ao efeito de decomposição dos resíduos devido à cinética de crescimento das bactérias. A partir de retro-análises com os dados da monitoração de aterros, foram obtidos valores de β entre 0,1223 e 1,267 (WILLIAMS, 1991).

2.3.7 Estudo de COUMOULOS & KORYALOS (1997, 1999)

Os autores apresentaram uma proposta para a previsão de recalques de longo prazo de aterros sanitários baseada na atenuação das taxas de deformação vertical que se verifica com o tempo, admitindo uma relação linear entre a compressão secundária e o logaritmo do tempo, conforme representado pelas equações seguintes:

$$\varepsilon = \Delta H / H = C_{\alpha}' \log (t / t_1)$$

$$\Delta \varepsilon / \Delta t = 0,434 C_{\alpha}' / t$$

onde:

- $\Delta \varepsilon / \Delta t$ = taxa de deformação vertical
 t e t_1 = tempos decorridos, na curva de compressão secundária, após o encerramento do aterro
 ε = deformação secundária (recalque dividido pela altura do aterro)
 C_{α}' = coeficiente de compressão secundária

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

O tempo inicial (t_0), a partir do qual são estabelecidos os tempos t_1 e t , corresponde ao encerramento do aterro sanitário. Analisando diversos resultados da literatura, os autores encontraram coeficientes de compressão secundária (C_{α}') variando entre 0,02 e 0,25, com a grande maioria apresentando valores próximos a 0,07.

2.3.8 Estudo de LING et al. baseado em Função Logarítmica e Hiperbólica (1998)

Estes autores propuseram a utilização de funções logarítmicas e hiperbólicas para reprodução das curvas de recalques observados. No caso das funções logarítmicas, os recalques (ΔH) podem ser avaliados a partir da integração da equação básica proposta por YEN & SCANLON (1975), admitindo como tempo inicial (t_0) o tempo correspondente ao início das medidas de recalque, resultando:

$$\Delta H = [a - b (\log t - 1)] t$$

onde: a e b são os parâmetros do modelo e t é o tempo decorrido após o início das leituras de campo.

Da análise da equação original de YEN & SCANLON (1975) observa-se que o tempo t está limitado a um valor máximo (t_{max}), correspondente a taxa de recalque ($\Delta H/\Delta t$) nula. Desta forma tem-se $t_{max} = 10^{a/b}$ e conseqüentemente recalques finais $\Delta H_{ult} = b t_{max}$.

Os autores também propuseram e verificaram a utilização de uma equação logarítmica simples para a previsão de recalques futuros, conforme a seguir apresentado, sendo o parâmetro t definido da mesma forma:

$$\Delta H = a' - b' \log t$$

onde: a' e b' são parâmetros do modelo.

Os autores utilizaram dados de 3 aterros sanitários (Spadra, Wisconsin e Meruelo) para verificarem a aplicabilidade dos modelos. Foram obtidos coeficientes de correlação (R) entre 0,36 e 0,59 com a análise baseada em taxas de recalque (integração da equação de YEN & SCANLON, 1975) e entre 0,97 e 0,99 com a análise baseada em recalques (equação logarítmica simples).

No tocante às funções hiperbólicas, os autores propuseram a utilização da equação seguinte para previsão de recalques. À semelhança dos modelos baseados em funções Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

logarítmicas, esta proposição incorpora em uma única equação os recalques primários e secundários, sendo o tempo inicial (t_0) correspondente ao início das medidas de recalque.

$$\Delta H = t / [1 / \rho_0 + t / \Delta H_{ult}]$$

onde: ρ_0 é a taxa de recalques inicial ($\Delta H/\Delta t$) e ΔH_{ult} é o recalque final esperado (tempo infinito).

A aplicação deste modelo aos dados dos 3 aterros sanitários mencionados resultou em elevada aderência, com coeficientes de correlação (R) entre 0,93 e 0,99. A Figura 2.3.4 apresenta os resultados obtidos com a aplicação do modelo no aterro Meruelo (Espanha).

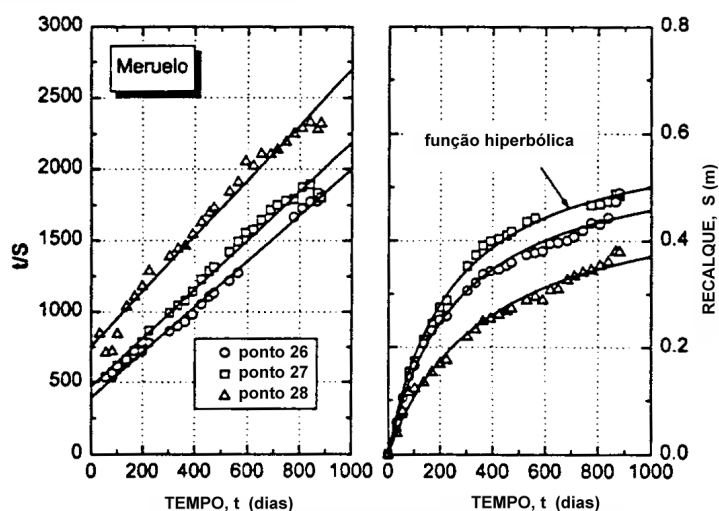


Figura 2.3.4 - Modelo hiperbólico aplicado ao aterro sanitário Meruelo (LING et al., 1998).

2.3.9 Outros Modelos e Propostas

Alguns outros estudos e propostas para previsão e avaliação de recalques em aterros sanitários têm sido apresentadas e registradas na literatura, sendo, no entanto, menos divulgadas e utilizadas, quer pela complexidade e/ou especificidade das mesmas, quer por requerer ainda maior comprovação. A seguir é apresentada uma breve descrição destas propostas:

a) Modelo de ZIMMERMAM et al. (1977)

Os autores apresentaram um modelo matemático baseado em duas equações simultâneas, uma delas não linear. O modelo necessita de 5 parâmetros que precisam ser assumidos ou

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

determinados através de ensaios em laboratório ou *in situ*. Em uma primeira parte do modelo, a equação geral da continuidade baseada na teoria das misturas é utilizada para representar o processo de dissipação das pressões neutras ao longo do tempo. Esta parcela inclui ainda os processos de degradação dos resíduos, simulados por uma lei exponencial de redução de massa. Os processos de fluência são simulados na outra parte do modelo, baseados na proposta de MURAYAMA & SHIBATA⁶ (apud ZIMMERMAM et al., 1977). Este modelo foi aplicado e mostrou boa aderência com os resultados de ensaios laboratoriais de consolidação unidimensional de resíduos sólidos urbanos triturados, não havendo registro de sua aplicação em aterros sanitários, talvez pela necessidade de parâmetros de difícil determinação no campo (índice de vazios e coeficiente de permeabilidade inicial e final, por exemplo).

b) Proposta de GANDOLLA et al. (1992)

Os autores, baseados em ensaios de consolidação em lisímetros (diâmetro de 1,0m e altura de 3,0m), verificaram boa concordância dos resultados com equações exponenciais decrescentes, propondo para a previsão de recalques (ΔH) o uso da formulação:

$$\Delta H = H a (e^{-kt} - 1)$$

onde a e k são constantes do modelo, tendo sido determinados pelos autores valores iguais a 44,161 e 0,0077, respectivamente, e H correspondendo à altura do maciço.

Ressalte-se que a formulação proposta mostrou boa aderência com a compressão de resíduos sólidos urbanos triturados submetidos somente a peso próprio (compressão secundária). O autor sugeriu ainda a aplicação do conceito de superposição de efeitos para cálculo do recalque total de aterros sanitários. Desta forma, o recalque de cada camada é individualmente calculado, tendo por base o tempo decorrido desde sua deposição, sendo o recalque final o resultado da soma das contribuições individuais de cada camada.

c) Método Observacional – MANASSERO & PASQUALINE (1993)

Os autores relatam a aplicação com sucesso do método observacional (ASAOKA, 1978) para previsão de recalques em aterros sanitários. Para tanto faz-se necessário que uma série

⁶ MURAYAMA, S.; SHIBATA, T. (1964). Flow and stress relaxation of clays. *Rheology and Soil Mechanics Symposium of the International Union of Theoretical and Applied Mechanics*, Grenoble.

de $(n + 1)$ leituras de recalques (ΔH), obtidos sob carga constante, e para intervalos de tempo (Δt) constantes esteja disponível. Estas observações são plotadas em gráfico, tendo o recalque ΔH_n como ordenada e o recalque ΔH_{n-1} como abscissa. Os pontos deverão formar uma linha reta, sendo a inclinação e o intercepto iguais as constantes β_0 e β_1 , correspondentes a formulação básica do método:

$$\Delta H_j = \beta_0 + \beta_1 \Delta H_{j-1}$$

onde ΔH_j corresponde ao recalque no tempo t_j ($t_j = j\Delta t$, $j = 1, 2, \dots, n$). O recalque final pode ser calculado graficamente (intersecção da reta plotada com a reta $\Delta H_n = \Delta H_{n-1}$) ou analiticamente através da equação $\Delta H_{ult} = \beta_0 / [1 - \beta_1]$. A Figura 2.3.5 apresenta a utilização do método para 5 distintos monumentos, sendo os intervalos de tempo iguais a 50 dias e os recalques apresentados em função da altura do maciço, ou seja, em termos de deformações (ε_j , ε_{j+1}).

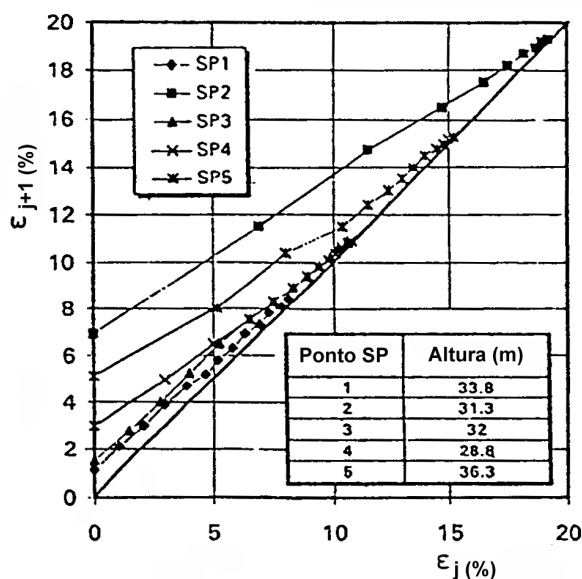


Figura 2.3.5 - Aplicação do método observacional (MANASSERO & PASQUALINE, 1993).

d) Modelo Meruelo (DIAZ et al., 1995, ESPINACE et al., 1999)

Este modelo tem por base o processo de perda de massa dos materiais degradáveis que ocorre durante a fase anaeróbia, a qual é condicionada, por sua vez, pela taxa de hidrolisação da matéria orgânica presente nos resíduos. Os fenômenos de perda de massa e conseqüente perda de volume ao longo do tempo podem ser associados aos recalques (ΔH) esperados, segundo a formulação seguinte proposta pelos autores. É importante ressaltar que o modelo Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

descrito é válido somente para a previsão dos recalques em longo prazo sob ação dos processos de decomposição (compressão secundária devido a biodegradação dos resíduos).

$$\Delta H = \alpha H COD \left[1 - \left(\frac{1}{K_h t_c} \right) \left(e^{-K_h(t-t_c)} - e^{-K_h t} \right) \right]$$

onde:

- α = coeficiente de perda de massa
- H = altura do aterro
- COD = quantidade de matéria orgânica biodegradável presente nos resíduos por ano
- t_c = tempo de construção do aterro (dias)
- K_h = coeficiente de hidrolisação (dia^{-1})
- t = tempo para o qual se deseja prever os recalques

Vale aqui registrar o trabalho de SOLER et al. (1995) que apresentam um modelo conceitual para avaliação de recalques, onde a parcela de compressão devido a biodegradação dos resíduos também seria avaliada com base no processo de perda de massa e conseqüente perda de volume dos materiais. Neste modelo as outras parcelas de contribuição (compressão primária, fluência, etc) seriam igualmente consideradas. Tal modelo, no entanto, vem sendo desenvolvido com base nos resultados de ensaios realizados em consolidômetro de grande dimensão não havendo até o momento maior detalhamento e comprovação prática de sua validade.

e) Proposta de VAN MEERTEN et al. (1995, 1997)

Neste modelo, os autores consideram os recalques primários e os secundários devido à compressão mecânica (processo de fluência), ou seja, o modelo não considera os recalques devido a biodegradação dos resíduos. A compressão primária é simulada no modelo por uma função de potência em função das pressões aplicadas, enquanto que a compressão secundária é calculada tendo por base que em uma escala logarítmica as taxas de deformação secundária, os volumes e as pressões atuantes respeitam uma relação linear (“*isotaches model*”). A formulação gerada por estes conceitos requer o conhecimento prévio de diversos parâmetros, os quais são de difícil determinação em termos práticos. Neste sentido, os autores modificaram o modelo, agrupando variáveis e introduzindo um procedimento matemático que permitisse a partir da interpolação de dados oriundos da monitoração de campo reproduzir as curvas recalque vs. tempo dos aterros sanitários. À semelhança de Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

GANDOLA et al. (1992), os autores também consideram na avaliação de recalques a contribuição isolada das camadas, tendo em conta o tempo em que as mesmas foram depositadas. Vale registrar que procedimentos matemáticos para cálculo das contribuições individuais das camadas foram propostos por MORRIS & WOODS (1990) e por BLEIKER et al. (1995). No primeiro caso, os autores utilizaram os conceitos propostos por SOWERS (1973), porém o procedimento apresentado não considera o histórico de construção do maciço. No segundo caso, os autores utilizaram o modelo de GIBSON & LO (1961) como base do procedimento, porém sem considerar, de forma específica, a componente de recalque relativa a biodegradação dos resíduos.

f) Proposta de PARK & LEE (1997)

Tais autores apresentam uma proposta para avaliação dos recalques de longo prazo (compressão secundária) de aterros sanitários, baseada em duas componentes: compressão mecânica e compressão devido a biodegradação dos resíduos. Para o primeiro caso, os autores utilizam formulação similar à apresentada por SOWERS (1973), ou seja, com as deformações expressas em função do logaritmo do tempo. Para a parcela devido a biodegradação dos resíduos, os autores baseiam a sua proposta no processo de hidrólise, o qual é responsável pela solubilização dos materiais e pode ser expresso por uma equação cinética de primeira ordem (HOEKS, 1983; WALL & ZEISS, 1995). A relação entre a decomposição (solubilização) da matéria degradável e a perda de volume e conseqüente indução de recalques é a base do modelo. Os autores assumem, desta forma, que o processo de compressão devido à solubilização pode ser igualmente caracterizado por uma equação de primeira ordem, o que acaba conduzindo a formulação seguinte:

$$\varepsilon_{dec} = \varepsilon_{tot-dec} (1 - e^{-kt})$$

onde:

$\varepsilon_{tot-dec}$ = compressão total passível de ocorrer por conta da biodegradação dos resíduos, sendo dependente da quantidade de matéria degradável presente nos resíduos;

k = taxa de deformação que ocorre devido à decomposição dos resíduos;

t = tempo decorrido após o início dos processos de decomposição.

O modelo foi aplicado e comparado com resultados obtidos em testes executados em lisímetros, sob distintas condições de decomposição. Utilizando a recirculação dos líquidos percolados (condição favorável à decomposição) foram obtidos valores para os parâmetros Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

$\varepsilon_{tot-dec}$ e k , iguais a 0,072 e 2,37 ano⁻¹, respectivamente. Sem a recirculação (condição menos favorável à decomposição) foram obtidos, para os mesmos parâmetros, valores iguais a 0,061 e 1,750 ano⁻¹, respectivamente.

g) *Proposta de GABR et al. (2000)*

Neste trabalho, os autores apresentam uma proposta para avaliação de recalques em aterros submetidos à recirculação dos líquidos percolados (“*bioreactor landfills*”). Para estes casos, face a aceleração dos processos de biodegradação dos resíduos, a utilização das propostas baseadas na teoria de adensamento dos solos é questionada, sendo o seu uso recomendado somente para as fases mais avançadas do processo de degradação. Para as fases iniciais, correspondentes aos estágios 1, 2 e parte do 3, conforme descrito no item 2.1.1 (BARLAZ et al., 1990), a compressão dos resíduos é governada por alterações no índice de vazios e na dimensão e distribuição das partículas do material, sem qualquer acréscimo de pressões neutras. Neste sentido, os autores propõem um modelo, para os estágios iniciais, onde a compressão dos resíduos, devido ao aumento do índice de vazios e à deformação das partículas sólidas, é governada pela variação do estado de tensão do material sob peso próprio e carregamento externo. As variações volumétricas ($\Delta V_{(t)}$) com o tempo podem então ser calculadas como:

$$\Delta V_{(t)} = \Delta V_{s(t)} + \Delta V_{v(t)} = V_i \{ C_{m(t)} [\Delta \sigma_{oct} - \Delta u_{(t)}] + D_{m(t)} \Delta \tau_{oct} \}$$

onde:

$\Delta V_{s(t)}$ = variação volumétrica inter partículas com o tempo

$\Delta V_{v(t)}$ = variação volumétrica intra partículas com o tempo

V_i = volume inicial

$C_{m(t)}$ = coeficiente de compressibilidade global dependente do tempo

$D_{m(t)}$ = coeficiente dependente do tempo

$\Delta \sigma_{oct}$ = acréscimo das tensões normais octaédricas

$\Delta u_{(t)}$ = acréscimo das tensões neutras

$\Delta \tau_{oct}$ = acréscimo das tensões cisalhantes octaédricas

Os parâmetros apresentados podem ser obtidos através de ensaios laboratoriais de compressão triaxial sob diferentes condições de contorno (idade da amostra, tempo de ensaio, etc). Os autores ressaltam a importância de considerar o modelo para camadas

individuais de resíduos, tendo por base o tempo em que as mesmas foram dispostas e o correspondente estágio de decomposição do material. Tal proposta, no entanto, não foi ainda testada em casos reais, necessitando comprovação posterior.

h) Proposta de LEONARD et al. (2000)

Os autores apresentam uma proposta para avaliação dos recalques devido a biodegradação dos resíduos sólidos, tendo em conta a transformação da massa de sólidos em gás. Nesta proposta, a curva de geração de gás para um determinado aterro deve ser inicialmente definida, sendo para tanto proposta a seguinte equação:

$$Q_{LFG} = 0,029 G_{LFG} R (e^{-kN} - e^{-kt})$$

onde:

- Q_{LFG} = taxa de geração de gases no tempo t (m^3/dia);
- G_{LFG} = capacidade total de geração de gases (m^3/t de resíduos sólidos urbanos);
- R = taxa de disposição dos resíduos sólidos urbanos no aterro sanitário (t/dia);
- k = taxa de decomposição dos resíduos (ano^{-1});
- N = tempo a partir do encerramento do aterro sanitário (ano);
- t = tempo a partir da disposição dos resíduos sólidos urbanos (ano).

Com base na curva de geração de gases é calculado o fator de recalques (S_F), ou seja, a relação entre a quantidade de gases (perda de massa) ainda esperada (a_I) e a quantidade total (passada e futura) estimada (a_T). A avaliação destas quantidades é feita a partir da integração da curva de geração entre os períodos de interesse. O recalque devido à biodegradação dos resíduos (ΔH_{bio}) pode então ser estimado como:

$$\Delta H_{bio} = O H S_F$$

onde:

- O = percentagem do material orgânico degradável (em peso) em relação à quantidade total de resíduos inicialmente depositada;
- H = espessura do aterro (ou camada analisada)
- S_F = fator de recalque = a_I / a_T

Para a compressão secundária devido à fluência do material, os autores sugerem a utilização de equação similar à proposta por SOWERS (1973) com um coeficiente de Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

compressão secundária igual a 0,02 (WATTS & CHARLES, 1990). A aplicação do método para o aterro sanitário OII na Califórnia (EUA) mostrou, na média, uma tendência para obtenção de maiores valores de recalque (cerca de 10%) em comparação com os valores observados.

2.4 Melhoria e Recuperação de Aterros Sanitários

Face a crescente escassez de áreas apropriadas para disposição de resíduos sólidos, vem conquistando cada vez maior interesse a utilização de técnicas e processos que reduzam previamente o volume lançado nos aterros, aumentando assim a vida útil dos mesmos, e/ou de metodologias executivas que conduzam à melhoria das propriedades mecânicas dos resíduos, possibilitando assim, por outro lado, viabilizar ampliações dos maciços, dentro de níveis de segurança adequados. No primeiro caso podem ser citadas as técnicas de trituração e de enfardamento dos resíduos, enquanto que para o segundo, despontam como mais usuais, os processos de compactação intensiva, compactação dinâmica e pré-carregamento do maciço. Em outra linha de atuação, devem ser igualmente citadas as intervenções para recuperação e mineração de aterros sanitários encerrados, visando o reaproveitamento das áreas ocupadas pelos mesmos.

2.4.1 Técnicas de Minimização Prévia

As técnicas para minimização prévia envolvem os processos e sistemas que procuram reduzir o volume de resíduos previamente ao lançamento nos aterros sanitários, sendo os procedimentos mais utilizados a trituração e o enfardamento. Ressalte-se que tais técnicas constituem parte do processo de disposição dos resíduos, uma vez que após tratamento, os mesmos deverão ser conduzidos às praças de trabalho do aterro para lançamento, espalhamento e compactação (resíduos triturados) ou para simples posicionamento dos fardos (enfardamento).

2.4.1.1 Trituração dos Resíduos

O processo de trituração de resíduos sólidos foi iniciado no começo da década de 30 nos Estados Unidos, porém somente a partir da década de 70 é que o processo passou a ser utilizado em maior escala (inclusive na Europa), face a necessidade do aumento da vida útil das destinações (DIAZ et al., 1979). A trituração permite uma significativa redução dos vazios existentes na massa dos resíduos, implicando maior densificação nas praças de

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

lançamento, após a passagem dos equipamentos compactadores (tratores de esteira ou compactadores), podendo atingir densidades finais 40% superiores às de resíduos não triturados (NAHAS et al., 1996).

Os trituradores são constituídos basicamente por uma câmara de carga, cilindros de trituração, equipamento de descarga e um motor para acionamento e operação do sistema. Existem, no mercado internacional, diversos modelos, os quais apresentam variações em função da capacidade e produções horárias, tipo do resíduo a ser processado, dimensões do resíduo pós-processamento e sistema de instalação (fixo ou móvel), aspectos estes a serem considerados na seleção do equipamento para um determinado aterro (DIAZ et al., 1979).

As principais vantagens da trituração, seguida de uma compactação adequada, podem ser sintetizadas em: menor possibilidade de atração de roedores e insetos; redução dos odores; maior densidade após compactação (cerca de 30 a 40% em relação às obtidas com resíduos brutos, sob mesmas condições de compactação); diminuição dos custos de transporte, quando utilizada em unidades de transbordo, menor risco de incêndio, necessidade de menor quantidade de material de recobrimento e aceleração dos processos de biodegradação. Quanto às desvantagens, podem ser citadas: custos iniciais mais elevados (maior número de instalações e equipamentos, com necessidade de sistemas elétricos, hidráulicos ou a diesel de média a grande potência); perda do efeito de entrelaçamento dos materiais e maior nível de ruído na região do aterro (NAHAS et al., 1996).

2.4.1.2 Enfardamento dos Resíduos

O processo de enfardamento dos resíduos caracteriza-se pela compactação e prensagem prévia dos materiais em câmaras apropriadas, gerando fardos auto-sustentáveis e amarrados, os quais são transportados e empilhados no aterro sanitário. De forma geral, tal processo opera com uma esteira transportadora, a qual recebe e conduz os resíduos à câmara de prensagem, normalmente composta por cilindro compactador acionado por sistema hidráulico. À prensa está associado um sistema de amarração automática com arames de aço, que fornece maior segurança e integridade aos fardos, cuja forma paralelepipedal facilita sobremaneira as operações de transporte e empilhamento no aterro (ROBINSON, 1986).

As dimensões dos fardos produzidos são função do equipamento, podendo, no entanto, serem citadas dimensões básicas da ordem de 1,0m x 1,0m x 1,5m (altura x largura x comprimento), com pesos específicos em torno de 12kN/m³ (ROBINSON, 1986). Dentre as principais vantagens deste processo, podem ser destacadas: redução prévia da umidade dos resíduos; redução do potencial de geração dos líquidos percolados e gases; possibilidade de

transporte em reboques abertos, de forma mais controlada e econômica; facilidade de descarga e empilhamento no aterro; redução da dispersão de papéis; redução substancial de odores; maior densidade final; redução da espessura dos recobrimentos diários; redução do tempo entre a disposição e o uso futuro do terreno; aceleração da produção de gás metano pela antecipação da fase anaeróbia do aterro; e otimização do sistema de drenagem de líquidos percolados. Quanto às desvantagens, tem-se: elevado custo inicial (necessidade de maior número de instalações e equipamentos); elevado nível de ruído; e necessidade de fornecimento de energia elétrica para equipamentos de elevada potência (NAHAS et al., 1996).

2.4.2 Técnicas de Melhoria das Propriedades dos Resíduos

A utilização de técnicas para melhoria das propriedades dos resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários tem por objetivo aumentar a resistência dos mesmos e antecipar os recalques do maciço, seja para obtenção de volumes adicionais de disposição, seja para o reaproveitamento da área para outras finalidades.

2.4.2.1 Compactação Convencional e Intensiva

A compactação dos resíduos sólidos, realizada pelo tráfego de equipamentos de transporte e espalhamento (tratores de lâmina, etc.) e/ou por equipamentos específicos para este fim (rolos compactadores), representa o processo mais usual para densificação dos resíduos empregado em aterros sanitários. A compactação dos resíduos apresenta-se como fator de elevada importância nas operações de aterros sanitários, visto que maiores densidades implicam, por um lado, volumes adicionais de disposição e conseqüentemente maior vida útil para os aterros, e por outro, maiores resistências, melhorando assim a estabilidade dos maciços. Além disto, o processo de densificação resulta em menores assentamentos, importante aspecto para integridade dos sistemas de drenagem e de recobrimento (BOUAZZA et al., 1996).

A densificação dos resíduos sólidos e o aumento da vida útil dos aterros sanitários através da compactação, podem também estar associada a uma redução no custo unitário do resíduo disposto, conforme apresentado na Figura 2.4.1, adaptada de BELFIORE et al. (1990). Os autores simulam para um caso real, o aumento da vida útil do aterro e a redução do custo unitário de disposição para diferentes demandas diárias de resíduos sólidos.

No tocante à estabilidade de aterros sanitários, JENEIVAN et al. (1996) mostram que o aumento da rigidez dos resíduos, traduzida, por exemplo, pela maior compactação dos Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

mesmos, conduz a maiores fatores de segurança, ou de outra forma, possibilita com igual segurança operar aterros com alturas mais elevadas. DE VITO⁷ (apud OWEIS & KHERA, 1986) recomenda a aplicação gradual de equipamentos de compactação (pesos operacionais e número de passadas), para obtenção da máxima eficiência do processo, em termos da antecipação dos recalques esperados, conforme ilustrado na Figura 2.4.2.

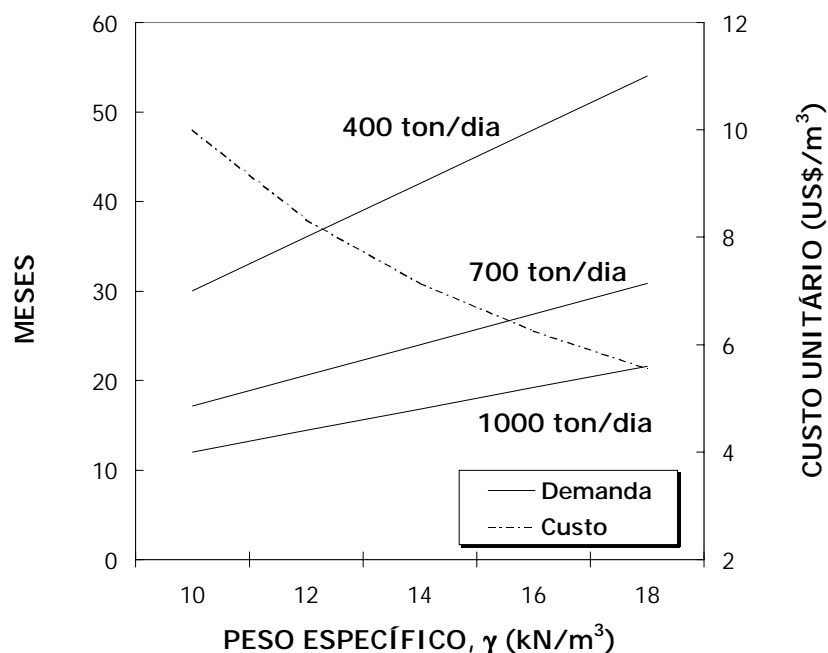


Figura 2.4.1 - Efeito da densificação dos resíduos na vida útil de aterros sanitários e no custo unitário de disposição (adaptada de BELFIORE et al., 1990).

Face ao exposto, o processo de compactação acabou experimentando nos últimos anos uma grande evolução, graças ao desenvolvimento de equipamentos mais eficientes, que permitem obter elevados graus de compactação. Atualmente encontram-se disponíveis no mercado, compactadores com carga (peso) operacional entre 22 e 45 toneladas. A obtenção de elevados graus de compactação permite ainda minimizar o espalhamento dos resíduos pela ação do vento; reduzir o risco de incêndio; limitar a migração dos percolados e gases e reduzir a espessura das camadas de recobrimento diárias (NAHAS et al., 1996).

A seleção dos equipamentos deve levar em conta quatro aspectos principais: a vida útil esperada para o aterro, a demanda e a composição dos resíduos, a quantidade e características do material de recobrimento e o método de disposição e exigências quanto à

⁷ DE VITO, J.C. (1970). Waste degradation: settling foundation properties. In: FOUNDATION ENGINEERING CONFERENCE ON THE APPLICATION OF THE ENVIRONMENTAL RESEARCH AND DEVELOPMENT ON LANDFILL DISPOSAL OF SOLID WASTE. Deerfield Academy, Deerfield, MA

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

densidade final requerida. Ressalte-se que o emprego econômico dos equipamentos é função direta da demanda diária de resíduos, sendo recomendados equipamentos de 22 toneladas para demandas de até 700 ton/dia, de 34 toneladas para demandas de até 1.200 ton/dia e de 45 toneladas para demandas superiores a 1.500 ton/dia (HOLAND, 1995).

Do ponto de vista operacional, podem ainda ser citadas as seguintes vantagens deste processo: possibilidade de processamento de grandes volumes de resíduos; utilização de poucos equipamentos (trator de lâmina e compactador) e reduzida mão de obra; e manutenção do “efeito de entrelaçamento” dos resíduos no maciço, favorável a sua estabilidade. Quanto às desvantagens em comparação aos processos de enfardamento e trituração prévia, pode-se citar: menores densidades; maiores espessuras de material de recobrimento; necessidade de maior infra-estrutura para drenagem de gases e líquidos; e maior possibilidade de dispersão dos resíduos por ventos (GODOI et al., 1996).

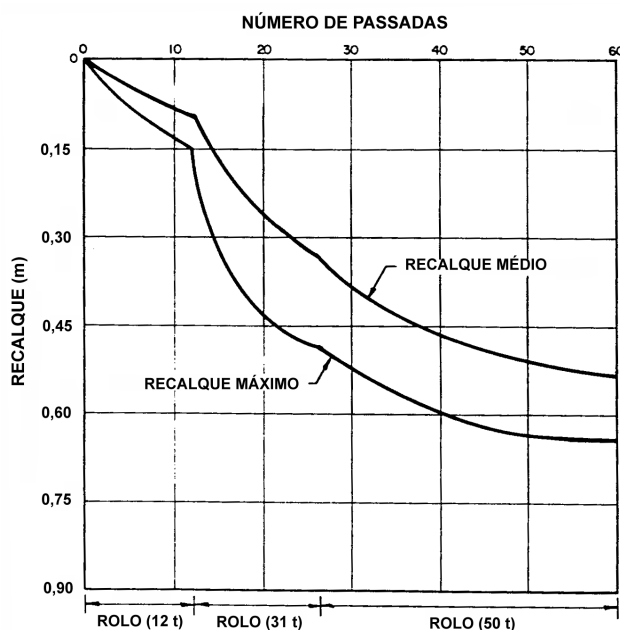


Figura 2.4.2 - Efeito da compactação nos recalques de aterros sanitários (DE VITO, apud OWEIS & KHERA, 1986).

Face à heterogeneidade dos resíduos e à elevada gama de fatores intervenientes no processo de compactação, diversas pesquisas foram desenvolvidas, muitas delas baseadas na execução de aterros experimentais, para obtenção e aferição dos parâmetros construtivos e operacionais para execução de aterros sanitários. Incluem-se aqui o conhecimento da curva de compactação característica dos equipamentos, a adequada espessura das camadas e o número de passagens do equipamento de compactação, de forma a obter as máximas compacidades com o mínimo de energia despendida. Alguns destes estudos são sintetizados a seguir:

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

a) Monterey Park Landfill – ASCE (1959)

A redução de volume provocada pelo emprego de eficientes técnicas de compactação é uma meta que vem sendo estudada há algum tempo. No final da década de 50, ensaios de compactação de resíduos, visando simular as técnicas e procedimentos construtivos utilizados e avaliar as taxas de redução de volume foram realizados no aterro de Monterey Park, Califórnia (EUA). Os resíduos ensaiados eram constituídos basicamente por papéis (51-61%), solo (0-11%), podas de jardinagem (25-30%) e outros (9-13%). Os testes (3) executados compreenderam o depósito e compactação dos resíduos, sob distintas condições, em cavas com cerca de 5,0m de profundidade escavada em solo. No teste 1, resíduos misturados com solo foram compactados em camadas de pequena espessura, sendo introduzidas camadas de cobertura de solo para cada uma das 11 camadas de resíduos compactadas. No teste 2, não foram utilizadas camadas intermediárias de solo, sendo os resíduos compactados em camadas de pequena espessura através da aplicação de 20 golpes com energia próxima a 900 kg.m/m^2 . O teste 3 foi similar ao teste 2, porém utilizando menor energia de compactação, correspondente à técnica utilizada no aterro Monterey Park. Os resultados foram apresentados em termos do percentual de redução de volume após compactação, tendo sido obtidos valores iguais a 67%, 33% e 30%, respectivamente, para os testes 1, 2 e 3. Os autores colocam que a adição de solo (teste 1), apesar de melhorar a compactação dos resíduos, tende a reduzir de forma significativa a capacidade e vida útil do aterro. Em conjunto a estes testes, levantamentos topográficos realizados no aterro ao longo de 5 anos, indicaram uma redução adicional de cerca de 25% em relação ao volume inicialmente disposto, por conta dos recalques do maciço.

b) Spadra Landfill - MERZ & STONE (1962)

O experimento foi realizado junto ao aterro sanitário Spadra, Califórnia (EUA). Neste estudo, 6 células (5,5m de profundidade) foram construídas e preenchidas, sob diferentes condições (espessura de camadas, adição de água, presença de solo, etc), com resíduos sólidos urbanos constituídos por papéis (65%), podas de jardinagem (25%), material putrescível (5%) e material inerte (5%). O teor de umidade inicial dos resíduos era 54% (base seca) e os pesos específicos finais obtidos situaram-se entre 3,2 e $5,6 \text{ kN/m}^3$. Dentre as principais conclusões do estudo, realizadas após 22 meses de observação, podem ser destacadas: (i) a maior parte dos recalques, independente da técnica de construção utilizada, ocorreu no primeiro mês; (ii) a densidade inicial dos resíduos, dispostos em células onde as condições anaeróbias sejam maximizadas (cobrimento dos resíduos, por exemplo), pôde ser Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

significativamente aumentada com a adição de água e com a compactação do material; (iii) células construídas maximizando condições aeróbias apresentaram taxas de recalques superiores às construídas privilegiando as condições anaeróbias.

c) *Estudo de SCHOMAKER (1972)*

Trata-se do primeiro trabalho, onde a influência do número de passadas e espessura das camadas no peso específico final dos resíduos é apresentada (Figura 2.4.3). O estudo não menciona, no entanto, quaisquer detalhes relacionados à obtenção das curvas (composição e teor de umidade do resíduo, tipo e características do equipamento utilizado, inclinação do plano de compactação, etc) o que torna difícil sua utilização prática. O autor apresenta importantes conceitos relativos à compactação e aos recalques de resíduos sólidos urbanos, destacando: (i) devido as suas propriedades físicas, os resíduos sólidos são menos receptivos à compactação vibratória do que os solos; (ii) o número de passadas ideal depende da composição e teor de umidade dos resíduos; (iii) os recalques em aterros sanitários estão extremamente associados ao teor de umidade dos resíduos, sendo observadas menores taxas de recalque quando baixas umidades se fazem presentes; (iv) a magnitude e taxa de recalques de um aterro sanitário são fortemente influenciadas pela forma de construção do maciço (técnicas utilizadas, tempo e ritmo de construção, etc). Pesos específicos da ordem de $8,8\text{kN/m}^3$ e $2,9\text{ kN/m}^3$ são associados a aterros sanitários executados com elevada e baixa compactação, respectivamente, enquanto valores entre $4,7$ a $5,9\text{ kN/m}^3$ são observados quando moderada compactação é utilizada.

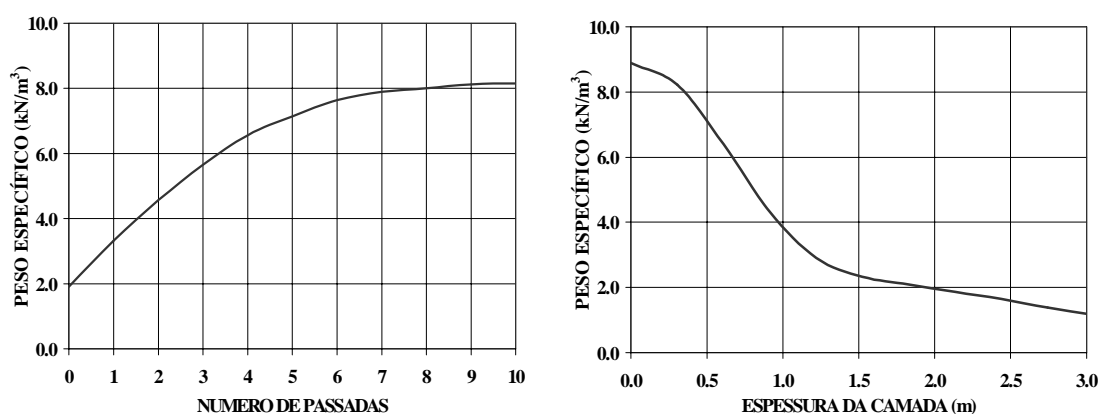


Figura 2.4.3 - Relação entre o peso específico dos resíduos e o número de passadas do equipamento e espessura das camadas (adaptada de SCHOMAKER, 1972).

d) Springwell Lane Landfill – BRATLEY (1977)

Com o objetivo de verificar o desempenho de diferentes equipamentos utilizados para compactação de resíduos, traduzido em termos dos pesos específicos obtidos, foram realizados testes de compactação junto ao aterro sanitário Springweel Lane, Doncaster (Inglaterra). Foram utilizados 9 distintos equipamentos, sendo 6 compactadores (rolos metálicos), 2 compactadores de pneus e 1 trator convencional. Os resíduos utilizados apresentavam material putrescível (28%), papéis (24%), metais (11%), tecidos (4%), material com dimensão inferior a 2cm (15%), vidro (11%), plásticos (5%) e outros (2%). Os testes foram executados sob as mesmas condições, em células com dimensões conhecidas, para todos os equipamentos, envolvendo a compactação de camadas em pequenas espessuras e plano ligeiramente inclinado (técnica “onion skin”). Não são detalhados, no entanto, o número de passadas e a exata espessura das camadas de resíduos. As determinações do peso específico foram realizadas com base na pesagem prévia de todo resíduo e material de cobertura depositado e no levantamento dos volumes aterrados após as operações de compactação e deposição de material de cobertura. A Figura 2.4.4 apresenta os pesos específicos obtidos (resíduos mais cobertura e somente resíduos) para os equipamentos testados. Algumas constatações podem ser observadas: (i) os compactadores proporcionaram pesos específicos mais elevados do que os equipamentos convencionais, sendo da ordem do dobro no caso dos tratores; (ii) o uso de mesmo equipamento (Weatherill) sob mesmas condições, porém utilizando rolo metálico ao invés de pneus, resultou em um ganho de densidade da ordem de 37%; (iii) nenhuma correlação entre o peso total, a largura dos rolos dos equipamentos e o peso específico foi obtida.

e) Estudo de HAM et al. (1978)

Através da simulação de técnicas construtivas normalmente utilizadas em aterros sanitários, este estudo teve por objetivo avaliar a influência da umidade dos resíduos, da presença de solos de cobertura e das pressões, vibrações e tempo de operação dos equipamentos de compactação nos valores das densidades finais dos resíduos. Os autores realizaram testes laboratoriais e *in situ* com resíduos triturados e *in natura* (não pré-processados), podendo ser destacados entre os diversos resultados e conclusões (tendências) observadas, os seguintes pontos:

- aumento médio de densidade da ordem de 15% para o resíduo triturado em relação ao não processado, sob mesmas condições de compactação, umidade e composição dos resíduos;
- a introdução do efeito de vibração dos equipamentos implica aumento de densidades em ambos os resíduos (triturados e não processados), com magnitude proporcional ao grau de vibração aplicada. No caso, por exemplo, de elevadas vibrações e baixas pressões de compactação, acréscimos de densidade da ordem de 25% foram obtidos para ambos os resíduos.

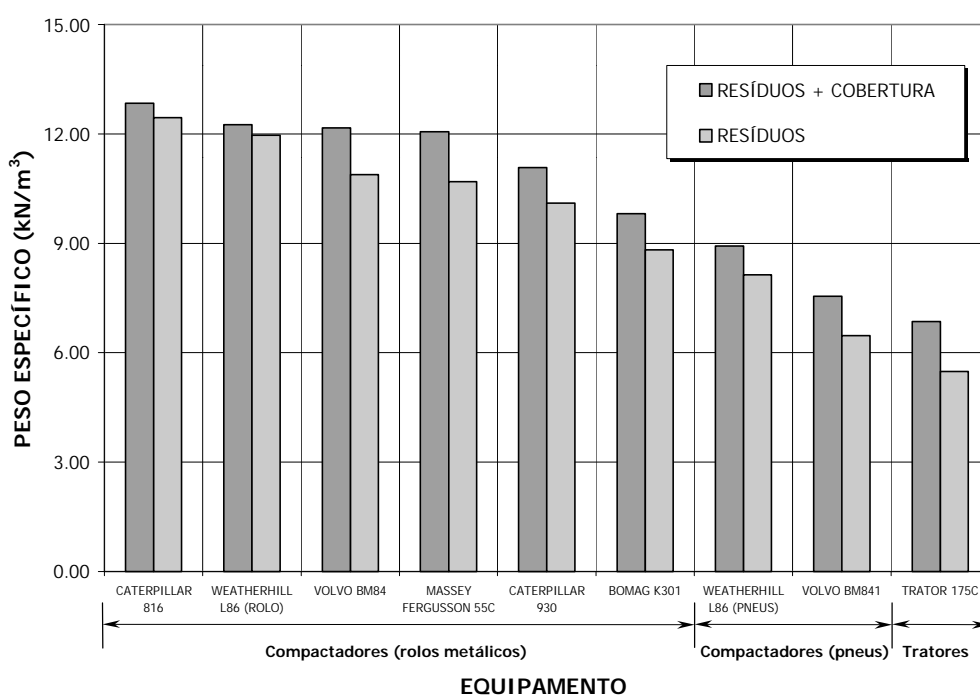


Figura 2.4.4 - Pesos específicos em função dos equipamentos de compactação (adaptado de BRATLEY, 1977).

f) Aterro experimental de Stewartby - CAMPBELL & PARKER (1980)

Este experimento teve por objetivo avaliar a influência de diferentes técnicas e equipamentos de compactação nos pesos específicos de resíduos sólidos urbanos. Oito células, cada uma com dimensão de 50m x 25m e 3,5m de profundidade, foram construídas e preenchidas com resíduos (teor de umidade médio igual a 25%), sendo os pesos e volumes dos materiais (resíduos e solo de cobertura) rigorosamente controlados durante as fases do experimento. Os autores utilizaram o conceito de densidade efetiva, inicialmente proposto por STONE & KAHLE (1977) e definido pela relação entre a massa dos resíduos e o volume ocupado pelos resíduos e pelo material de cobertura, tendo sido obtidos valores entre 0,5 e

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

0,75t/m³. Em termos de pesos específicos dos resíduos foram registrados valores mínimos iguais a 4,6 kN/m³ (resíduo disposto em camada simples e sem compactação) e valores máximos iguais a 10,6 kN/m³ (resíduo disposto segundo o método “onion skin” e compactado com equipamento Caterpillar 816). Os valores encontrados neste estudo são comparáveis ao estudo de BRATLEY (1977), cujas densidades efetivas situam-se entre 0,5 e 0,9 t/m³, sendo os maiores valores justificados por menores quantidades de solo de cobertura utilizadas.

g) Chicago Shopping Center Area – LUKAS (1985)

O autor relata a utilização de compactação convencional e dinâmica em um antigo depósito de resíduos sólidos urbanos em Chicago (EUA), assim como ensaios *in situ* realizados para avaliação das referidas técnicas, visando o aproveitamento da área para construção de um Shopping Center.

No tocante às técnicas convencionais foram testadas seções constituídas por 3 camadas de 0,30m, compactadas com rolo vibratório ou com rolo estático tipo pé de carneiro. A utilização do rolo vibratório resultou em um peso específico seco de 17,8 kN/m³ após 5 passadas do equipamento, enquanto que com o rolo pé de carneiro foram obtidos resultados mais baixos e erráticos (pesos específicos variando entre 13,0 e 14,0 kN/m³). Para efeito comparativo foram realizados diversos ensaios *in situ* para determinação da densidade dos resíduos não compactados. O peso específico médio resultante situou-se entre 11,7 e 14,2kN/m³, com valores mínimos entre 7,0 e 8,0kN/m³. Vale frisar que os elevados pesos específicos relatados estão associados à constituição dos resíduos, que neste caso não apresentavam matéria orgânica e papéis, mas sim elevada percentagem de solo, metais, fragmentos de concreto e outros materiais inertes. Também com o objetivo de verificar a eficiência do tratamento foram realizados ensaios pressiométricos antes e depois da compactação, tendo sido constatada significativa melhoria das propriedades dos resíduos.

h) Greene Valley Test Cells - SUPRENANT & LEMKE (1994)

Para avaliação das densidades finais obtidas com diferentes procedimentos e equipamentos de compactação foram construídas duas células de testes (12 x 21m) escavadas em área plana e com paredes praticamente verticais. Foram utilizados nas células resíduos sólidos urbanos isentos de entulhos, material de construção ou lodos de estações de tratamento de efluentes, sem, no entanto, serem detalhadas a composição e teor de umidade dos mesmos. Os testes foram realizados de forma que diferentes espessuras de camadas

(0,3m a 0,9m), diferente número de passadas (2, 4, 6 e 8) e diferentes compactadores (31,7t e 45,0t) fossem avaliados. Para avaliação das densidades, recorreu-se à pesagem prévia dos resíduos lançados nas células de ensaio e ao levantamento topográfico, após cada fase executiva, para definição dos volumes aterrados. Os principais resultados obtidos podem ser sumarizados como se segue:

- influência do equipamento: a utilização de compactadores de 45,0t resultou em acréscimos de densidade de até 14% em relação aos compactadores de 31,0t;
- influência da espessura das camadas: a utilização de espessuras de 0,30m resultou em aumentos de densidade da ordem de 25% em relação a espessuras de 0,75m, admitindo o mesmo número de passadas (4);
- influência do número de passadas: comparando os resultados obtidos com 4 e 8 passadas do equipamento, foram observados aumentos de densidade de cerca de 3% e 9%, respectivamente, para camadas com 0,30m e 0,75m de espessuras;
- pesos específicos máximos obtidos da ordem de 10,0 kN/m³.

i) Estudo de HOLLAND (1995)

HOLLAND (1995) relata o resultado de ensaios realizados em aterros experimentais executados com resíduos sólidos domiciliares, indicando os seguintes valores médios de peso específico, em função dos equipamentos utilizados: 7,0 kN/m³ (compactadores de 21 a 23 toneladas), 10 kN/m³ (compactadores de 32 a 36 toneladas) e 12 kN/m³ (compactadores de 45 toneladas). Os resultados foram obtidos com 5 passadas do equipamento, valor que se mostrou adequado, visto que acima deste número o ganho em densidade era mínimo perante um maior tempo e custo operacional. Vale ainda frisar alguns fatores a serem observados para a otimização do planejamento operacional dos aterros sanitários, que resultaram das observações e testes efetuados: a espessura das camadas não deve superar 0,50 m; o número de passadas do equipamento de compactação deve situar-se entre 3 e 5 passadas; a praça (distância) de compactação não deve superar 40,0m; e a necessidade do treinamento e familiaridade do operador da máquina com o equipamento e as condições da praça de trabalho.

j) Estudo de BENOIT et al. (1999)

Os autores realizaram ampla investigação, baseada em ensaios laboratoriais e *in situ*, para a caracterização geotécnica de resíduos constituídos por cinzas provenientes da Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

incineração de resíduos sólidos urbanos e lodos (desidratados) de estações de tratamento de efluentes. Apesar do material estudado não apresentar as mesmas características dos resíduos sólidos urbanos, a sua citação neste item se faz importante pela similaridade de alguns resultados obtidos no estudo de compactação. No tocante ao estudo de compactação, foram ensaiados materiais isolados (cinzas) e materiais misturados (cinzas e lodos em diferentes proporções). Os resultados do ensaio de Proctor não apresentaram uma relação teor de umidade vs. peso específico seco típica para solos, indicando aumento dos pesos específicos secos com a redução do teor de umidade, sem qualquer presença de um valor de pico. Os ensaios de campo foram realizados para verificar as melhores condições de disposição destes resíduos em termos de equipamento de compactação, número de passadas, espessura de camadas e características das misturas. Os resultados dos ensaios de campo também apresentaram similar tendência para a relação teor de umidade vs. peso específico seco dos resíduos. Os ensaios *in situ* demonstraram ainda que o peso específico dos resíduos é totalmente governado pelo teor de umidade, apresentando pouca significância e influência a espessura de camadas, número de passadas ou mesmo o tipo de equipamento de compactação utilizado, conforme pode ser visualizado na Figura 2.4.5.

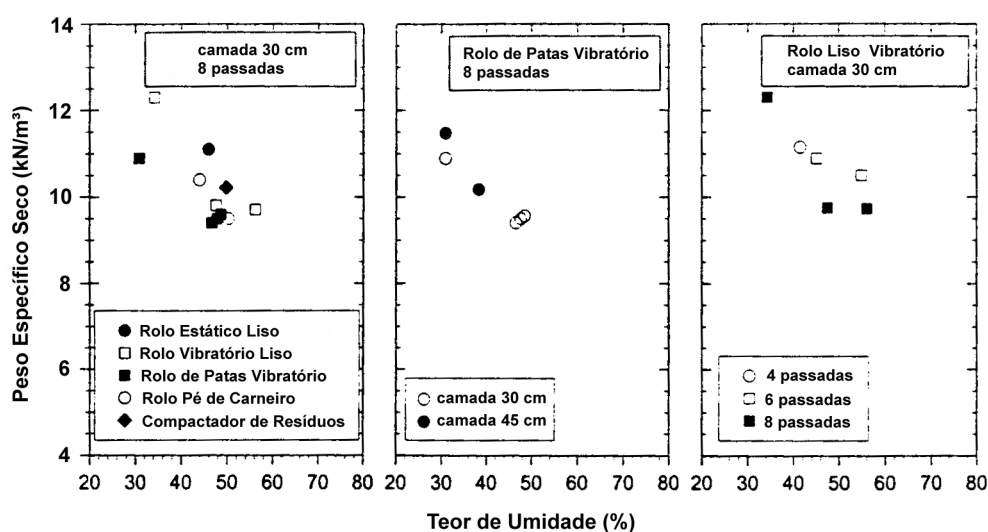


Figura 2.4.5 - Relação teor de umidade vs. peso específico seco sob efeito de diferentes técnicas de compactação (BENOIT et al., 1999).

k) CATERPILLAR Performance Tests (1994 – 2000)

CATERPILLAR (1994a) apresenta um procedimento para execução de aterros experimentais e ensaios para controle de densidades obtidas e avaliação das variáveis operacionais (espessura das camadas, número de passagens, etc) e das variáveis relacionadas ao equipamento (peso operacional, largura e tipo dos rolos de compactação, etc). Com base Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

em ensaios realizados segundo este procedimento, CATERPILLAR (1994b, 1995, 1998, 1999, 2000) realizou diversos testes *in situ* para verificar e comparar o desempenho de distintos equipamentos. Os ensaios foram executados com distintas espessuras e número de passadas. A Tabela 2.4.1 apresenta uma síntese destes ensaios em termos dos pesos específicos obtidos. A elevada variação de pesos específicos obtida para equipamentos similares pode ser explicada pelas diferentes condições de contorno que envolveram os ensaios (composição e teor de umidade do resíduo, operador, etc).

Tabela 2.4.1 - Pesos específicos para distintos equipamentos obtidos em aterros experimentais (CATERPILLAR, 1994b, 1995, 1998, 1999, 2000).

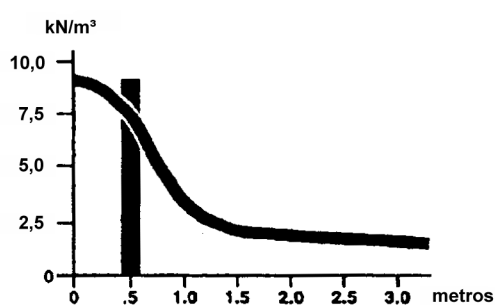
EQUIPAMENTO	PESO ESPECÍFICO (kN/m ³)					LOCAL (ANO) (espessura)
	PASSADAS DO EQUIPAMENTO					
	2	3	4	5	10	
Caterpillar 826C ⁽¹⁾	-	5,5	5,7	5,5	-	Illinois, EUA (1994) (0,45 a 0,60m)
Rex 3-90C ⁽²⁾	-	5,8	5,7	5,9	6,3	
Caterpillar 836 ⁽³⁾	-	7,0	7,0	7,3	-	
Caterpillar 826C ⁽⁴⁾	-	8,0	8,5	11,0	-	Oxfordshire, UK (1995) (0,50m)
Hanomag CD280 ⁽⁴⁾	-	6,7	6,7	7,2	-	
Bomag BC601RB ⁽⁴⁾	-	6,2	7,1	7,1	-	
Caterpillar 816B ⁽⁴⁾	-	6,2	6,7	6,3	-	Berlin, Alemanha (1998) (0,50m)
Caterpillar 826G ⁽⁵⁾	-	9,0	-	9,1	-	
Bomag BC670RB ⁽⁶⁾	-	8,1	-	8,4	-	
Caterpillar 826G ⁽⁷⁾	6,3	7,8	8,5	9,6	-	Brogborough, UK (2000) (0,50m)
Bomag BC771RB ⁽⁸⁾	6,2	7,2	7,9	8,2	-	(0,50m)

Pesos operacionais: (1) 33,5t; (2) 42,8t; (3) 45,8t; (4) não disponível; (5) 33,9t; (6) 32,0t; (7) 34,9t; (8) 36,7t

MATTHEWS et al. (1997), apoiados nestes resultados e em alguns testes laboratoriais complementares, indicam as seguintes faixas de pesos específicos finais obtidas para os equipamentos ensaiados: tratores de esteira (4,75 a 5,90 kN/m³); compactador 816F, peso operacional de 22,8t (5,20 a 7,20 kN/m³); compactador 826G, peso operacional de 33,4t (5,80 a 8,80 kN/m³); e compactador 836, peso operacional de 45,4t (7,0 a 10,6 kN/m³). A composição média dos resíduos, utilizada nestes ensaios, apresentava a seguinte distribuição: papel (42%), resíduos orgânicos (16%), vidro (14%), metal (12%), plásticos (5%), madeira (5%), borracha e couro (4%) e têxteis (2%). Segundo os mesmos autores, os principais fatores que influenciam a compactação são: composição gravimétrica dos resíduos, teor de umidade, características dos equipamentos (peso, número de rodas, distribuição do peso, largura das rodas e formato, disposição e número de patas), espessura das camadas, número de passadas do equipamento, espessura total do maciço e inclinação das praças de compactação. A Figura 2.4.6 apresenta os resultados dos ensaios de densidade em relação à espessura das camadas e número de passadas do equipamento, os quais são muito similares Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

aos obtidos por SCHOMAKER (1972). Observa-se que espessuras da ordem de 0,60m e número de passadas em torno de 3 a 4 vezes, representam valores adequados para o planejamento operacional de aterros sanitários que tenham por base estes ensaios. Vale ainda ressaltar, na pesquisa mencionada, a indicação dos autores quanto ao teor de umidade de 50%, como ideal para a compactação dos resíduos, e a adequabilidade dos equipamentos de compactação para rampas com inclinação não superiores a 1V:4H, ao contrário dos equipamentos com esteiras, que podem trabalhar com rampas mais inclinadas (1V:3H).

Espessura da Camada



Compactação

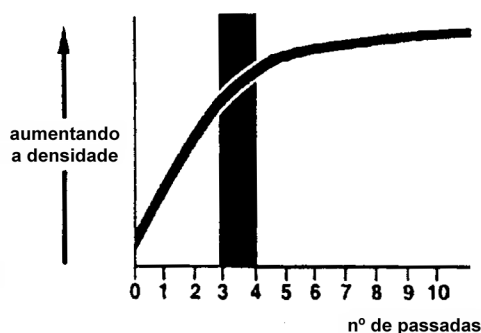


Figura 2.4.6 - Relação entre densidades finais de resíduos e espessura de camadas e número de passadas de equipamento de compactação (MATTHEWS et al., 1997).

2.4.2.2 Compactação Dinâmica

Trata-se de um dos métodos mais utilizados para a melhoria das propriedades mecânicas de aterros sanitários. Consiste na queda de blocos pesados de concreto ou aço (retangulares, circulares ou octogonais), com pesos variando entre 5 e 20 toneladas, a partir de alturas que podem atingir até 40m. Geralmente, são impostos 5 a 10 golpes para cada ponto, os quais são posicionados na área de tratamento, segundo uma malha com espaçamento entre 5 a 10m. Várias passagens são realizadas pelos pontos, sendo que em algumas delas, pontos centralizados em relação à malha original são igualmente tratados (KONIG & JESSBERGER, 1997).

A profundidade de influência do tratamento (h_t) é um dos primeiros parâmetros a ser estudado, sendo o mesmo normalmente tomado como proporcional à raiz quadrada da energia aplicada em cada golpe, ou seja:

$$h_t = \alpha \sqrt{WH}$$

onde: W corresponde ao peso do bloco e H a altura de queda. O fator α varia em função do material, porém valores superiores a 0,35 são aplicáveis ao caso dos resíduos sólidos urbanos (VAN IMPE, 1995; KIM, 1996).

A Tabela 2.4.2 apresenta uma síntese de aplicações da técnica de compactação dinâmica em aterros sanitários. A tabela inclui dados sobre o local, características e resultados do tratamento, cuja intensidade é definida normalmente pela energia específica aplicada, dada por:

$$E = \sum_{i=1}^m \frac{n_i W_i H_i}{e_i d_i}$$

onde: m é o número de passagens do equipamento pela área, e em cada passagem, n é o número de golpes por ponto, W é o peso do bloco de queda, H é a altura livre de queda, e e e d , são os espaçamentos da malha nas duas direções.

Tabela 2.4.2 - Compactação dinâmica de aterros sanitários (SAGASETA, 1993; VAN IMPE & BOUAZZA, 1996).

LOCAL	ÁREA (m ²)	ALTURA (m)	IDADE (anos)	W (ton)	H (m)	A (m ²)	E (tm/m ²)	S (m)
East London	teste	6,5	40	14	14	4	260	0,58
Redditch	22.000	5 a 6	15	15	20	4	260	0,50
Hertfordshire	30.000	8	15 a 20	15	20	4	220	0,5
Arkansas	18.000	6 a 12	5	18	28	-	876	1,6 a 2,5
Pontevedra	34.000	8 a 10	-	12	20	-	212	-
Barcelona	24.000	6 a 8	10	15	20	-	225	-
Haifa	14.000	25	20	11	15	4	-	-
Tulsa	90000	6	-	18	23	3,7	312	0,66
Maldegen	30000	4 a 8	20	13	10	-	15 a 55	0,4 a 0,5
M25 Bell Lane	13.500	4,5	6 a 10	17	15	3,5	281	0,7 a 1,0
M25 Poyle	-	6	<10	15	20	-	150	0,6

W/H/A = peso/altura/área do bloco de queda; E = energia aplicada; S = recalque verificado.

Os resultados do tratamento podem ser fornecidos de diversas maneiras: aumento da rigidez e da resistência do maciço, comportamento de instalações posteriormente implantadas sobre a área tratada ou pelo recalque (S) registrado à superfície provocado pela compactação dinâmica, conforme pode ser observado na Tabela 2.4.2. Destas medidas, nota-se que os resíduos sólidos com idade recente são os mais compressíveis, com recalques entre 1,0 e 1,5m, para energias variando de 200 a 400 tm/m², enquanto que resíduos mais antigos apresentam recalques da ordem de metade destes valores (SAGASETA, 1993).

O controle da eficiência da compactação dinâmica, no tocante ao aumento da resistência e rigidez do maciço, assume grande importância para garantia das condições de uso futuro da área tratada (LUKAS, 1985). Diversos métodos de controle *in situ* podem ser empregados para avaliar o resultado do processo de compactação: ensaios de placa, ensaios de penetração (SPT e CPT), ensaios pressiométricos, “WAK Test” e ensaios geofísicos, notadamente o procedimento SASW (“Spectral Analysis of Surface Waves”), conforme relatado por BOUAZZA et al. (1996) e KONIG & JESSBERGER (1997).

O procedimento SASW é um ensaio sísmico para determinação da rigidez dos materiais a partir do perfil de velocidades transversais registradas no maciço. Tais registros podem também ser realizados em aterros sanitários, avaliando a dispersão das ondas de superfície no local, a qual é expressa em termos de uma curva de dispersão (velocidade de propagação contra comprimento da onda). Uma vez determinada a curva de dispersão, calcula-se o perfil de rigidez no local, através de algoritmos próprios. A utilização deste procedimento tem mostrado resultados satisfatórios, sendo uma técnica simples e que apresenta relações custo-benefício bem atrativas (BOUAZZA et al., 1996).

Vale também registrar a influência da compactação dinâmica na permeabilidade dos maciços, tendo sido registrados decréscimos da ordem de 50% nos valores de condutividade hidráulica após a aplicação do tratamento (KONIG & JESSBERGER, 1997).

2.4.2.3 Pré-Carregamento e Utilização de Sobrecarga

A técnica de pré-carregamento de aterros sanitários, visando a utilização futura da área, conduz a redução do índice de vazios e à consolidação e antecipação dos recalques do maciço de resíduos. O carregamento, normalmente é representado por camadas de solo ou por tanques e reservatórios de água, os quais devem ser retirados após atingido o efeito desejado. Desta forma, para áreas maiores, este tratamento não é o mais indicado, devendo ser substituído, por exemplo, pela compactação dinâmica do maciço. Outras técnicas envolvendo a execução de estacas compactadas com areia e a injeção de caldas por pressão no maciço são igualmente registradas na literatura especializada (KONIG & JESSBERGER, 1997). A Tabela 2.4.3 apresenta resultados obtidos pela aplicação de algumas técnicas de melhoria dos maciços, conforme relatado e sistematizado por ONITSUKA et al. (1996). Observam-se recalques da ordem de 15 a 16% da espessura inicial da camada de resíduos (3,65 a 4,25m), quando da aplicação de sobrecargas, representadas por espessuras de 7,0 a 9,0m de solo.

Tabela 2.4.3 - Recalques observados por diferentes técnicas de melhoria (ONITSUKA et al., 1996).

MÉTODO	DADOS DO PROCESSO	RECALQUE (S)	(L)	TAXA DE COMPRESSÃO (α)	OBS.
ECA	a = 53% V ₁ = 217 m ³	S = 9,9 cm V ₂ = -12,5 m ³	L = 2,92 m V ₃ = 421 m ³	0,487	$\alpha=(V_1+V_2)/V_3$
ECA	a = 34% V ₁ = 358 m ³	S = 23,2 cm V ₂ = -33,1m ³	L = 6,41 m V ₃ = 1083 m ³	0,299	$\alpha=(V_1+V_2)/V_3$
CD	E = 4,9 MNm/m ²	S = 139,1 cm	L = 4,0m	0,348	$\alpha = S/L$
CD	E = 4,9 MNm/m ²	S = 207,5 cm	L = 10,0m	0,208	$\alpha = S/L$
PC	H = 7,0m	S = 55,0 cm	L = 3,65m	0,151	$\alpha = S/L$
PC	H = 9,0m	S = 66,9 cm	L = 4,25m	0,157	$\alpha = S/L$

L = espessura da camada de resíduos; ECA = estacas compactadas de areia; CD = compactação dinâmica; PC = pré-carregamento; a = índice de melhoria da estaca de areia; V₁ = volume unitário de areia utilizada; V₂ = volume unitário de levantamento (empolamento) da superfície; V₃ = volume unitário de resíduos; E = energia aplicada; H = altura de aterro para pré-carregamento.

Diversos estudos e trabalhos tem sido desenvolvidos nos últimos anos, tendo por base a aplicação de sobrecarga sobre aterros sanitários para a avaliação dos mecanismos e parâmetros de compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos. Descrevem-se a seguir alguns destes estudos, destacando seus principais resultados:

a) Yellow Freight System Facility – ZOINO (1971)

Trata-se de um dos primeiros registros de aplicação de sobrecarga sobre depósito de resíduos sólidos como forma de melhorar as propriedades mecânicas do mesmo. A opção pelo pré-carregamento mostrou-se a solução mais factível para a construção de um terminal de cargas sobre um antigo depósito de resíduos com cerca de 8,0m, localizado próximo a Boston (EUA). Medidas de recalque durante e após o carregamento foram efetuadas para a determinação de parâmetros que auxiliassem a previsão de recalques futuros na área. Com base nos resultados da monitoração e aplicando os conceitos da teoria de adensamento para solos, o autor obteve coeficientes de compressão primária (C_c'), secundária (C_{α}') e de adensamento (C_v) para o material iguais a $0,257 \pm 0,077$, $0,024 \pm 0,020$ e $0,036 \pm 0,029\text{cm}^2/\text{s}$, respectivamente.

b) California Highway I52 – (CHANG & HANNON, 1976)

Neste estudo duas técnicas de melhoria das propriedades mecânicas dos resíduos sólidos foram testadas, visando à utilização de aterro sanitário encerrado, com cerca de 6,0m de espessura, como fundação para a rodovia I52 na Califórnia (EUA). Em uma primeira área de Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

teste (Área I), o material foi compactado com até 25 passadas de rolo compactador de 50 toneladas, sendo avaliado o recalque induzido a cada 5 passadas. Após esta operação, o material foi saturado com água e submetido a carregamento constituído por aterro de solo compactado com cerca de 3,0m de altura. Na outra área de teste (Área II), os resíduos foram submetidos a carregamento similar ao da Área I, porém sem receberem prévia compactação. Nesta área, malhas de aço foram instaladas no aterro de solo executado, visando reduzir os recalques diferenciais. Como resultados deste estudo podem ser destacados:

- somente cerca de 25% do recalque total foi eliminado/antecipado com a compactação prévia do material. Os máximos recalques obtidos com a compactação foram verificados após 25 passadas do equipamento, sendo que 85% dos mesmos se deram após 10 passadas;
- a utilização de sobrecarga mostrou elevada eficiência na aceleração dos recalques. Quanto à magnitude dos recalques (observados por um período de 400 dias), cerca de 50% dos mesmos foram registrados antes da finalização do aterro de sobrecarga, enquanto que 80% ocorreram 30 dias após a finalização do mesmo.
- A utilização de malhas de aço no interior do aterro de sobrecarga não mostrou vantagem significativa na redução dos recalques diferenciais.

c) Morgantown Landfill – RAO et al. (1977)

Uma seção do aterro sanitário de Morgantown, West Virginia (EUA), com cerca de 3,0m de espessura e constituída por resíduos de idade avançada foi submetida a carregamento externo para avaliação dos efeitos deste procedimento na evolução dos recalques. A sobrecarga foi realizada através da execução de aterro em uma área retangular (cerca de 15m de largura e 45m de comprimento), correspondendo a uma pressão de cerca de 48,0 kPa à superfície dos resíduos. Os recalques foram monitorados em 3 pontos distintos do aterro por cerca de 1 ano, conforme apresentado na Figura 2.5.7. A análise da figura permite observar que a magnitude e taxa de recalques na seção central do aterro são bem superiores às verificadas nas extremidades do carregamento, face às tensões verticais atuantes nos resíduos. Recalques da ordem de 20% da espessura inicial do aterro foram observados nesta seção central. Segundo os autores, a contribuição da decomposição biológica dos resíduos nos recalques totais observados não deve ter sido significativa em comparação com as deformações induzidas pelo carregamento externo.

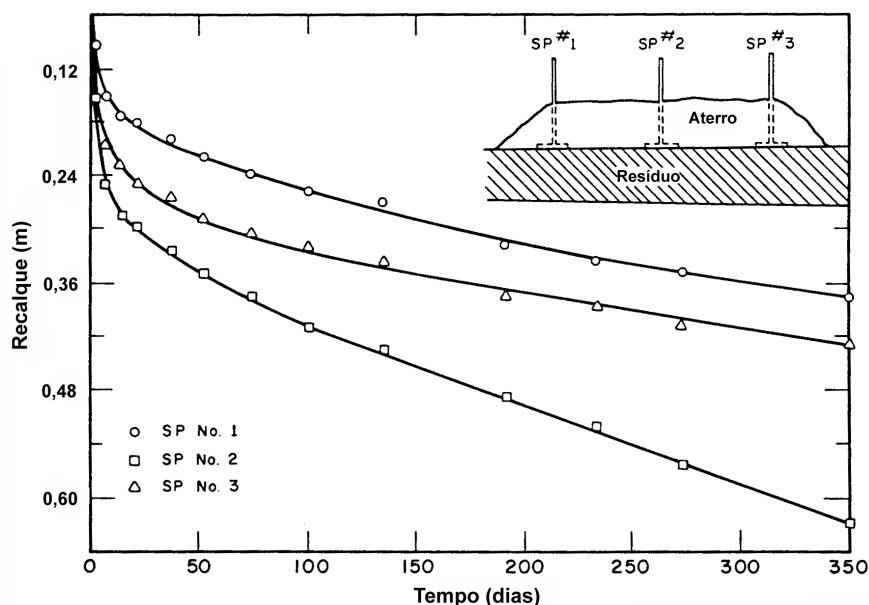


Figura 2.4.7 - Curvas recalque vs. tempo para a seção submetida a carregamento externo no aterro de Morgantown (RAO et al., 1977).

d) Interstate Highway I85 – SHEURS & KHERA (1980)

Visando a utilização e estabilização de antigas áreas de deposição de resíduos sólidos urbanos para a construção da rodovia I85 em New Jersey (EUA), sobrecargas (aterros com cerca de 1,8m de altura) foram aplicadas e mantidas por um período de até 24 meses. A espessura total dos depósitos variava entre 5,0 e 9,5m de resíduos, os quais apresentavam peso específico da ordem de $11,3 \text{ kN/m}^3$. Cerca de 66% dos recalques totais registrados foram observados após a finalização do aterro de sobrecarga, enquanto que cerca de 77 e 83% dos mesmos foram registrados, respectivamente, 1 e 3 meses após a conclusão do aterro. Os recalques observados apresentaram forte relação com o histórico de tensões. Deformações entre 5 e 7% foram registradas quando as relações entre o acréscimo de tensões, causado pela sobrecarga, e as tensões existentes eram inferiores a unidade. Quando esta relação se mostrou igual ou superior a 1,4, deformações entre 11 e 14% foram observadas. Coeficientes de compressão primária (C_c') entre 0,16 e 0,20 foram calculados com base nos resultados da monitoração.

e) Interstate Highway I85 – BURLINGAME (1985)

Neste estudo, são apresentadas e complementadas as análises realizadas no item anterior, tendo por base cerca de 4 a 5 anos de monitoração de recalques. Com base nos dados adicionais, incluindo valores para o coeficiente de compressão primária (C_c') iguais a 0,35 Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

obtidos em laboratório, o autor constatou que a maior parte dos recalques primários ocorreram nos primeiros 12 meses, podendo os mesmos ser conservativamente previstos com o uso das teorias da mecânica dos solos. Outra constatação de interesse diz respeito à redução dos recalques secundários com a aplicação de sobrecargas. Para a avaliação dos recalques secundários o autor propôs equação similar à utilizada na mecânica dos solos, porém acrescida de um fator multiplicativo igual ao $\log(1+\Delta p/p)$, onde p corresponde à pressão inicial atuante no meio do aterro sanitário e Δp à pressão adicional resultante da aplicação da sobrecarga. Coeficiente de compressão secundária (C_α') igual a 0,04 pôde ser estimado tendo por base os resultados da monitoração e à utilização da equação descrita.

f) Footscray School & Geelong Industrial Estate – WALKER & KURZEME (1984, 1985)

Neste estudo, os autores apresentam curvas para previsão de recalques de depósitos de resíduos sólidos urbanos sob efeito de pré-carregamento. Tal procedimento teve por base o carregamento e observação de recalques de dois antigos depósitos, identificados pelo seu uso futuro como Footscray School (Caso A) e Geelong Industrial Estate (Caso B). No caso A quatro (4) configurações básicas de carregamento foram aplicadas: 1,0m de solo sobre terreno natural; 1,0 a 2,0m de solo sobre 9,0m de resíduos; 1,0 a 2,0m de solo sobre 15,0m de resíduos; e 7,0m de solo sobre 8,0m de resíduos. No caso B configurações correspondentes a 2,2m de solo sobre terreno natural; 3,3m de solo sobre 3,0m de resíduos; e 3,2m de solo sobre 2,8m de resíduos foram utilizadas. Em ambos os casos, os recalques começaram a ser monitorados após a conclusão dos aterros de sobrecarga, não sendo contabilizados, portanto, os recalques imediatos ocorridos. As diversas combinações entre taxas de recalque observadas (recalques secundários), espessuras da camada de resíduos e alturas da sobrecarga foram colocadas em gráfico, sob as formas apresentadas na Figura 2.4.8, permitindo assim a previsão de recalques ao longo do tempo para distintas combinações de sobrecarga (altura do aterro) e espessura do depósito de resíduos. Deve ser ressaltado que as curvas obtidas são válidas para uso local, visto terem sido obtidas sob condições de contorno específicas presentes naqueles depósitos (composição, idade e teor de umidade do resíduo, histórico de aplicação de tensões, etc).

g) Collier Road Landfill – DODT et al. (1987)

O aterro sanitário de Collier Road (Michigan, EUA) recebeu resíduos sólidos urbanos e industriais entre 1969 e 1982. Entre 1985 e 1986 o aterro sofreu uma expansão, representada pela disposição de alturas de até 11m de resíduos sobre a camada de cobertura então Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

existente. Seis pontos foram monitorados em termos de recalques (um deles na área de expansão), tendo sido observado: (i) recalques da ordem de 6 a 7% da altura inicial do maciço para pontos diretamente sob o carregamento e taxas de recalques decrescentes com o tempo; (ii) recalques, devidos à compressão primária, observados dentro do período de 2 meses após a aplicação do novo carregamento; (iii) recalques secundários tendem a continuar, podendo representar parcela significativa do recalque total esperado; (iv) recalques ocorrem não somente sob a área carregada, mas também em pontos distantes da mesma. Esta última observação, no entanto, demanda maior investigação, uma vez que, segundo os autores, os recalques registrados em regiões distantes da área carregada podem estar quase que totalmente associados à degradação dos resíduos que continua se processando em todo o maciço.

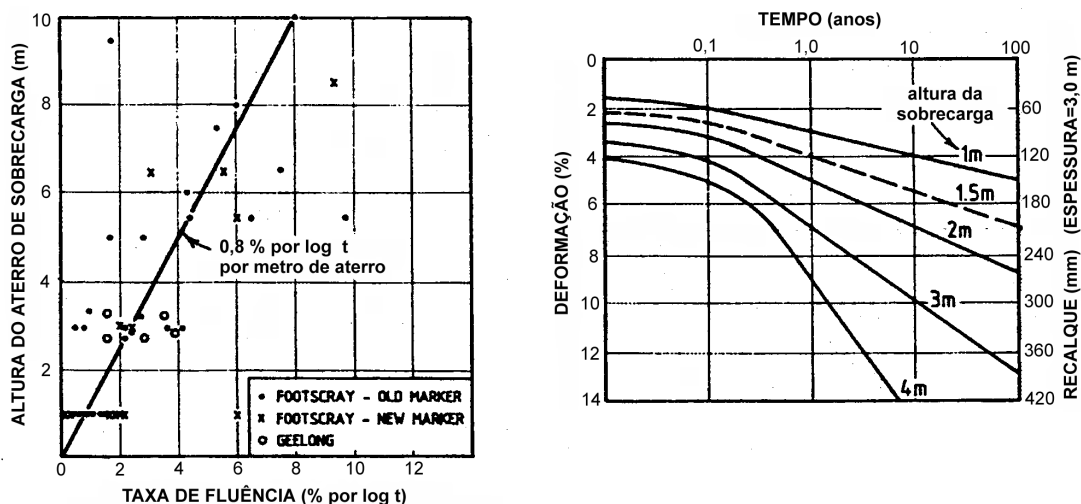


Figura 2.4.8 - Efeito de sobrecarga nas taxas de recalque secundário e curvas para estimativa de recalques no tempo sob efeito de pré-carregamento.

h) Lanchester Landfill – DEUTSCH et al. (1994)

Com o objetivo de determinar a factibilidade de futuras ampliações para o aterro sanitário de Lanchester (Pensilvânia, EUA), um aterro de solo foi executado sobre o maciço de resíduos sólidos com altura tal que as ampliações previstas fossem inteiramente simuladas com o experimento. A densidade do material de aterro (sobrecarga) foi cuidadosamente controlada para a correta avaliação das pressões aplicadas. Os recalques do aterro sanitário foram monitorados por placas de recalque posicionadas em 6 distintos pontos da área carregada. Com base nos resultados observados, constatou-se que os recalques primários ocorreram praticamente após 4 meses do início da construção do aterro, tendo sido calculados coeficientes de compressão primária (C_c'), baseados na equação de adensamento Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

unidimensional utilizada para solos, entre 0,15 e 0,39, com valor médio igual a 0,22. Adicionalmente às placas de recalque, 64 pontos na área carregada foram topograficamente levantados, prévia e posteriormente à aplicação da sobrecarga. Tais levantamentos permitiram a análise estatística dos recalques (ΔH) através de um modelo de regressão linear múltipla, segundo a equação:

$$\Delta H = b_0 + b_1 H + b_2 \Delta \sigma_s$$

onde H corresponde a espessura (altura) inicial dos resíduos; $\Delta \sigma_s$ às pressões aplicadas pela sobrecarga e b_0 , b_1 e b_2 a coeficientes da regressão. As análises estatísticas resultaram em um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,72.

i) Syosset Landfill – ZAMISKIE et al. (1994)

Aterros de sobrecarga (quatro), constituídos por solos arenosos e com alturas entre 2,4 e 3,1m, foram construídos sobre o aterro sanitário de Syosset (Nova Iorque, EUA), visando avaliar o efeito destas sobrecargas na compressão dos resíduos aterrados. O aterro sanitário apresentava espessuras entre 4,3 e 27,5m, tendo sido observado teores de umidade e pesos específicos para os resíduos sólidos, respectivamente, entre 2 e 67% e entre 3,0 e 22,9 kN/m³ com valor médio igual a 12,0 kN/m³. Com base nos recalques observados, coeficientes de compressão primária (C_c') entre 0,0083 e 0,0394 foram obtidos, admitindo válida para os resíduos a teoria de adensamento unidimensional dos solos. Tais valores são significativamente menores que os reportados na literatura. Segundo os autores, os baixos valores estão associados à elevada parcela de solo presente, idade dos resíduos (20 a 60 anos), baixa parcela de matéria orgânica presente nos resíduos e prévia utilização da área, implicando pré-carregamento da mesma. Coeficientes de compressão secundária (C_{α}') foram igualmente calculados, tendo sido registrados valores entre 0,00115 e 0,00529. Os autores utilizaram a teoria de adensamento unidimensional e os parâmetros mencionados para previsão de recalques futuros, tendo obtido recalques totais de 3 a 10 vezes menores que os que seriam obtidos utilizando parâmetros de compressibilidade reportados na literatura.

j) Belvidere Landfill – TANG et al. (1994)

O aterro de Belvidere (Illinois, EUA) esteve em operação entre as décadas de 30 e 70, tendo sido lá depositados resíduos sólidos urbanos e industriais em espessuras que variaram entre 10 e 15m. Os recalques do aterro foram monitorados (placas de recalque) após a execução do sistema de cobertura (sobrecarga), o qual era constituído por cerca de 1,5m de Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

solos argilosos e arenosos. Coeficientes de compressão primária (C_c'), admitindo a teoria de adensamento unidimensional de solos, foram calculados entre 0,138 e 0,325. Um método probabilístico para complementar a avaliação de recalques e conseqüente definição do sistema de cobertura final do aterro foi proposto, tendo por variáveis as declividades possíveis para as camadas de cobertura e os custos associados à execução das mesmas.

h) BOUTWELL & FIORE (1995)

Parâmetros de compressibilidade para resíduos sólidos urbanos saturados foram calculados, tendo por base a monitoração de recalques de um aterro sanitário submetido a diferentes sobrecargas. Três distintas sobrecargas, representadas por aterros de solo compactado com 1,0, 2,0 e 3,0m de altura, foram aplicadas sobre maciços com espessuras de cerca de 5,0m de resíduos. Baseados nos resultados da monitoração (13 meses) e no modelo de adensamento unidimensional proposto por SOWERS (1973), para compressão primária, e por BJARNGARD & EDGERS (1990), para compressão secundária, os autores calcularam os seguintes parâmetros: coeficientes de compressão primária (C_c') entre 0,09 e 0,19, coeficientes de compressão secundária intermediária (C_{ai}) entre 0,0066 e 0,0120 e coeficientes de consolidação vertical (C_v) entre 0,43 e 0,75 cm^2/s .

i) Massachusetts Landfill – STULGIS et al. (1995)

Neste estudo, um aterro de solo compactado (sobrecarga) foi construído sobre aterro sanitário existente em Massachusetts (EUA) visando definir parâmetros de compressibilidade para os resíduos sólidos urbanos ali depositados. O aterro foi concebido de forma que as tensões atuantes ao longo de toda a profundidade do aterro sanitário (espessura de cerca de 24,3m) fossem iguais ou superiores a 50% das tensões aplicadas à superfície. Os resíduos sólidos presentes no aterro sanitário possuíam teor de umidade da ordem de 24% e peso específico de 14,2 kN/m^3 . Ensaio laboratoriais para caracterização química de resíduos amostrados no aterro foram igualmente realizados com o propósito de avaliar a extensão dos processos de degradação. Os resultados destes ensaios indicaram que os resíduos sólidos aterrados encontram-se próximos das fases de estabilização discutidas no item 2.1.1. Com base nos recalques observados foram calculados coeficientes de compressão primária (C_c') e secundária (C_{α}'), respectivamente, iguais a 0,16 e 0,02. Uma proposta alternativa para avaliação da compressão secundária foi apresentada, baseada no fato de que esta parcela de compressão ocorre como resultado da transformação da matéria orgânica biodegradável em gases com o tempo. Os recalques de longo prazo, obtidos com base nesta Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

proposta, foram consistentes com os calculados através da adoção dos parâmetros e modelo de compressão unidimensional descritos.

2.4.3 Recuperação e Mineração de Aterros

A recuperação de áreas ocupadas por aterros encerrados deve ter em conta que após a conclusão das atividades de disposição, um aterro sanitário continua em atividade biológica, ou seja, gerando gases e líquidos percolados, processo que muitas vezes pode permanecer por longos períodos. Dentre as várias técnicas utilizadas para recuperação de áreas, as mais difundidas são a remediação e a mineração de aterros (GODOI et al., 1996).

- *remediação*: abrange basicamente três partes distintas: a remediação propriamente dita, a mitigação e o monitoramento. Na etapa de remediação é eliminada, toda ou grande parte das fontes geradoras do problema, juntamente com as ações para sua eliminação. A etapa de mitigação envolve a redução da severidade do problema. No caso específico de ações relativas a geração de líquidos percolados, podem ser destacadas: a impermeabilização do local para minimizar a entrada de água e conseqüentemente a geração de líquidos; o abandono de poços contaminados e substituição dos mesmos por novas linhas de serviço; e a implantação de sistema de tratamento de água de poços contaminados, todas estas ações visando à preservação e garantia da saúde pública e proteção do ecossistema circunvizinho. O monitoramento, por sua vez, é utilizado para detectar a eficiência da remediação, existindo diversas modalidades de controle, em função do tipo de problema (por exemplo, problemas de potencial contaminação por líquidos percolados exigem o monitoramento do lençol freático e dos efluentes líquidos originados no aterros) (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).
- *mineração*: trata-se da recuperação de áreas de aterros sanitários, baseada na abertura, retirada e eventual reaproveitamento de resíduos de aterros antigos, além da introdução, em alguns casos, de sistemas mais eficientes de impermeabilização de fundo e de drenagem. O emprego de novas tecnologias e equipamentos vem permitindo recuperar o solo e as águas subterrâneas, além da adequada segregação e tratamento de resíduos inertes, e conseqüentemente, o reaproveitamento dos diversos materiais. Esta tarefa é realizada a partir de peneiradores e trituradores de alta eficiência (móveis ou estacionários), de modo que o material peneirado (solo de recobrimento, composto orgânico estabilizado, pneus e outros) possa ser separado e reaproveitado, dotando a área de condições para recebimento de novos resíduos, em um processo de otimização do espaço disponível (NAHAS et al., 1996).

Marques, Afonso Celso Moruzzi Marques. Tese de Doutorado. EESC/USP (2001).

Capítulo 3

DESCRIÇÃO E EXECUÇÃO DE ATERRO EXPERIMENTAL

Tendo em vista a elevada heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos e a dificuldade de reprodução em laboratório de todos os aspectos inerentes aos aterros sanitários, a execução de protótipos em escala real apresenta-se como um procedimento bastante representativo e adequado para avaliação do comportamento geomecânico do material, notadamente os relativos à compactação e compressibilidade dos resíduos sólidos. A presente pesquisa, neste sentido, teve como base metodológica a execução de um aterro experimental de resíduos sólidos urbanos especificamente projetado, executado e monitorado para este fim, acompanhado por uma extensa campanha de ensaios e controles de campo. A execução do experimento sobre aterro sanitário existente permitiu também a obtenção de importantes subsídios para a formulação de modelos de comportamento para os materiais aterrados, tendo em consideração o efeito de sobrecarga representado pelo aterro experimental.

O aterro experimental foi concebido de forma que a sua execução e monitoramento permitissem a definição de parâmetros e o estudo de comportamento de distintos componentes de um aterro sanitário. A premissa básica de sua concepção e execução foi, portanto, a de obter um maciço protótipo para realização de estudos e pesquisas relacionadas à disposição e tratamento de resíduos sólidos urbanos. A Tabela 3.1 procura ilustrar, de forma sintética, os aspectos que foram considerados na concepção do referido aterro.

O estudo de compactação e compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos envolveu, em termos de trabalhos de campo, a realização de ensaios e controles *in situ* para definição do peso específico do material, submetido a distintas técnicas construtivas (equipamento de compactação, inclinação do plano de compactação, espessura das camadas e número de

passadas do equipamento), assim como o controle e monitoramento dos recalques do aterro experimental e do aterro sanitário existente que lhe serviu de fundação.

Tabela 3.1 - Aspectos básicos considerados na concepção do aterro experimental.

ATIVIDADE	CONCEITOS E PARÂMETROS
Técnicas Construtivas	Curvas de compactação (influência de equipamentos, número de passadas e espessura de camadas), utilização de materiais sintéticos (geogrelhas) como elementos de reforço, avaliação da eficiência de planos de compactação horizontais e inclinados, etc.
Comportamento Geomecânico	Compressibilidade e resistência dos materiais (modelos reológicos, previsão de recalques, provas de carga, ensaios <i>in situ</i> e laboratoriais), influência da presença de inclusões sintéticas, etc.
Drenagem de Líquidos Percolados e Gases	Produção e caracterização de líquidos percolados e gases, eficiência de sistemas de drenagem, colmatação dos drenos, agressividade aos materiais drenantes, etc.
Tratamento da Fundação	Comportamento e eficiência de barreiras horizontais (solos argilosos, geomembranas, etc).
Instrumentação	Utilização de novas tecnologias e procedimentos, correlações de leituras com parâmetros de deformação e resistência, etc.

3.1 Arranjo Geral do Experimento

O aterro experimental foi executado junto ao Aterro Sanitário Bandeirantes, localizado na zona norte do município de São Paulo, próximo à rodovia dos Bandeirantes (Km 26,5), e responsável pelo recebimento e disposição de cerca de 7.000 toneladas diárias de resíduos sólidos. O aterro teve a sua construção iniciada em 1978, sendo constituído por 5 grandes setores operacionais, denominados sub-aterros AS1, AS2, AS3, AS4 e AS5, os quais englobam uma área de cerca de 100 hectares e alturas máximas da ordem de 100m. Na presente data e à época do início de construção do experimento, os sub-aterros AS1, AS2 e AS3 já se encontravam desativados, estando as operações concentradas nos sub-aterros AS4 e AS5. A capacidade máxima do aterro deverá estar esgotada até o término do ano 2001. Ao início do trabalho foram pré-selecionadas duas áreas para construção do aterro experimental: uma sobre o topo do sub-aterro AS1, desativado cerca de 24 meses antes do início da execução do experimento, e outra localizada sobre terreno natural e próxima às lagoas de tratamento de líquidos percolados do aterro sanitário. A necessidade de utilização, a posteriori, desta última área, aliada às características do material de fundação, conduziram ao descarte desta área, tendo assim sido selecionada a área sobre o sub-aterro AS1. A Figura 3.1 apresenta uma vista aérea do referido aterro com a indicação da área escolhida para o aterro

experimental. A área selecionada teve que respeitar e atender alguns fatores, tais como: (i) possuir as dimensões mínimas requeridas pelo projeto para simulação das técnicas construtivas e para atuação como sobrecarga do maciço; (ii) possuir, em sua proximidade, instrumentação de controle de recalques para avaliação do impacto e efeito da sobrecarga no maciço existente; (iii) permitir acesso à chegada dos carregamentos de resíduos (veículos coletores) e dos equipamentos de apoio e construção (caminhões, compactadores, etc); e (iv) possuir mínima interferência com a operação diária do aterro.

O sub-aterro AS1, onde está localizado o aterro experimental, foi iniciado à mesma época do Aterro Sanitário Bandeirantes como um todo (1978), tendo sido objeto de um significativo escorregamento no ano de 1991 (BENVENUTO & CUNHA, 1991) e de processos de alteamento e expansão em 1988 e 1993. O encerramento deste sub-aterro se deu por volta de Abril de 1995.



Figura 3.1 - Vista aérea do Aterro Sanitário Bandeirantes com a localização do aterro experimental

3.1.1 Zoneamento do Aterro

O aterro experimental foi dividido basicamente em duas grandes praças de trabalho, sendo a inclinação do plano de compactação das camadas o que as diferenciava. A Figura 3.1.1 apresenta a planta geral do aterro experimental com a indicação e distribuição dos parâmetros básicos monitorados e analisados durante a execução do aterro.

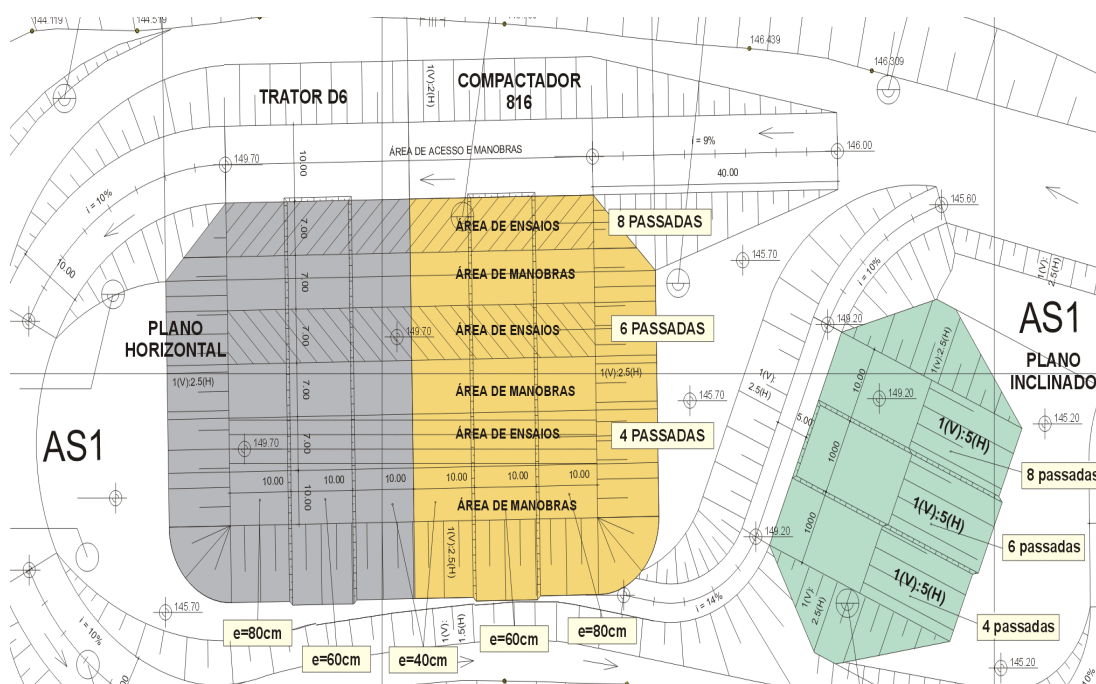


Figura 3.1.1 - Aterro experimental – Arranjo geral.

A maior praça de trabalho foi reservada para o lançamento e compactação dos resíduos em planos horizontais, incluindo uma região destinada exclusivamente ao acesso das áreas de ensaio e manobra dos equipamentos. O aterro experimental, nesta praça de trabalho, envolveu um volume total de resíduos lançados de cerca de 21.100m^3 , distribuídos em uma área de aproximadamente 6.900m^2 e com alturas atingindo cerca de 4,0 m. Esta última dimensão corresponde a altura de uma célula típica de resíduos nos aterros sanitários brasileiros. Os taludes laterais do aterro foram definidos com uma inclinação igual a 1,0V; 2,5H.

Esta praça, por sua vez, foi sub-dividida em diversos quadrantes, visando avaliar a influência de distintos procedimentos construtivos sobre o peso específico final dos resíduos. Os quadrantes de ensaio possuem dimensões regulares iguais a 7,0m x 10,0m, enquanto que os quadrantes correspondentes às áreas de acesso e manobras apresentam dimensões iguais a 7,0m x 10,0m (quadrantes internos) e 10,0m x 10,0m (quadrantes externos). A Figura 3.1.2 e a Tabela 3.1.1 apresentam, respectivamente, a localização e a descrição (técnicas operacionais utilizadas) de cada um dos mencionados quadrantes de trabalho. Os procedimentos construtivos avaliados na praça de trabalho executada em planos horizontais abrangeram:

- tipo de equipamento: foram utilizados e avaliados o rolo compactador Caterpillar tipo 816F e o trator de esteiras tipo Bulldozer D6. A opção por estes equipamentos decorreu

da necessidade de verificação do desempenho e da influência dos equipamentos usualmente utilizados na execução dos aterros sanitários brasileiros (tratores de esteira tipo D6) e de equipamentos de maior porte, especificamente concebidos para a compactação de resíduos sólidos urbanos (compactador Caterpillar 816F), na densificação dos materiais;

- número de passadas dos equipamentos: foram empregadas 4, 6 e 8 passadas, sendo que em duas etapas específicas da construção (6^a. e 7^a. etapas) foram utilizadas 2 passadas ao invés de 4;
- espessura das camadas: foram projetadas espessuras de lançamento de resíduos iguais a 0,4; 0,6; e 0,8m. Em uma única etapa da construção (10^a. etapa) alterou-se a espessura de 0,8m para 1,2m.

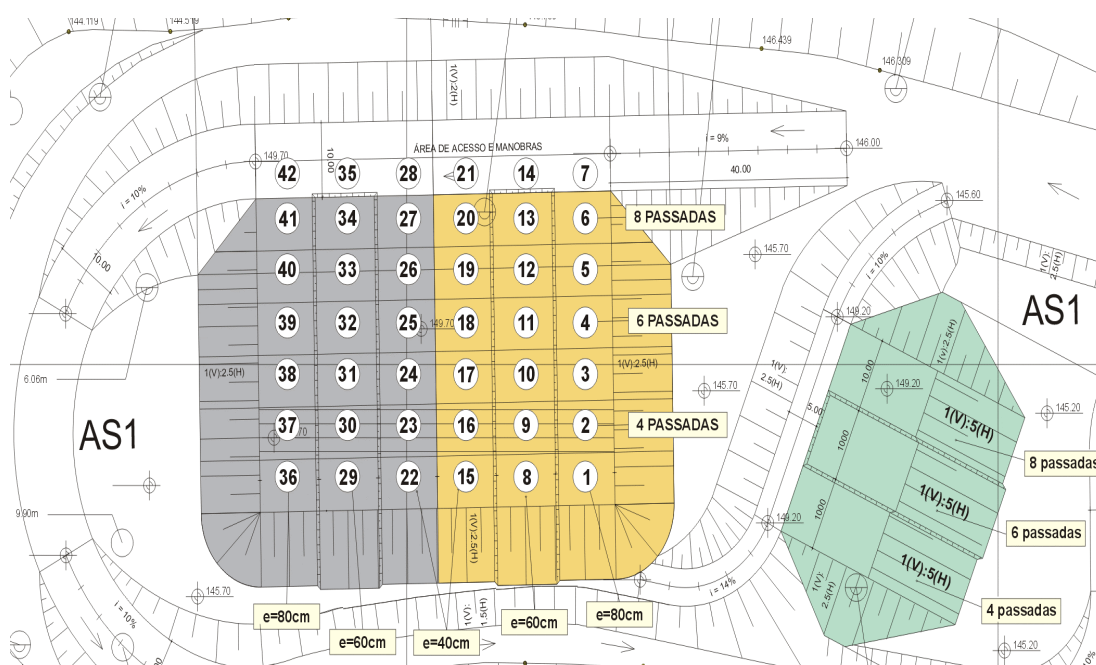


Figura 3.1.2 - Aterro experimental – Identificação dos quadrantes na praça de trabalho em plano horizontal.

A região destinada ao acesso principal da área de ensaio também foi executada com resíduos dispostos em camadas horizontais. Em parte desta região (quadrantes 7, 14 e 21) foram dispostas geogrelhas (resistência à tração de 6,8 kN/m), com distintas distribuições no interior do maciço, visando avaliar a influência e eficácia da inserção destes elementos nas condições de trafegabilidade e na capacidade de carga das vias de acesso executadas com resíduos sólidos.

A segunda praça de trabalho envolveu uma região com menores dimensões, tendo sido reservada para o lançamento e compactação dos resíduos unicamente em planos inclinados.

Nesta região cerca de 3.300m³ de resíduos foram lançados e compactados em um área de aproximadamente 1.500m².

Esta praça de trabalho foi projetada com taludes 1,0V:5,0H, tendo sido previsto somente o tráfego e compactação dos resíduos com trator de esteira tipo Bulldozer D6, similar ao utilizado na praça de compactação horizontal. Tal praça apresenta-se como um elemento de controle inicial, uma vez que incorpora as técnicas usualmente praticadas nos aterros sanitários brasileiros. Para viabilizar a sua execução foi previsto e executado um aterro (dique) de solo para funcionar como elemento de apoio às operações de lançamento e compactação dos resíduos.

Tabela 3.1.1 - Descrição dos procedimentos construtivos dos quadrantes na praça de trabalho em plano horizontal.

QUAD	DESCRIÇÃO	QUAD	DESCRIÇÃO	QUAD	DESCRIÇÃO
Q1	A/M	Q15	A/M	Q29	A/M
Q2	C-E80-4P	Q16	C-E40-4P	Q30	B-E60-4P
Q3	A/M	Q17	A/M	Q31	A/M
Q4	C-E80-6P	Q18	C-E40-6P	Q32	B-E60-6P
Q5	A/M	Q19	A/M	Q33	A/M
Q6	C-E80-8P	Q20	C-E40-8P	Q34	B-E60-8P
Q7	A/M	Q21	A/M	Q35	A/M
Q8	A/M	Q22	A/M	Q36	A/M
Q9	C-E60-4P	Q23	B-E40-4P	Q37	B-E80-4P
Q10	A/M	Q24	A/M	Q38	A/M
Q11	C-E60-6P	Q25	B-E40-6P	Q39	B-E80-6P
Q12	A/M	Q26	A/M	Q40	A/M
Q13	C-E60-8P	Q27	B-E40-8P	Q41	B-E80-8P
Q14	A/M	Q28	A/M	Q42	A/M

Obs: A/M = área de acesso e manobra; C = compactador Caterpillar 816F; B = trator de esteiras tipo Bulldozer D6; E40, E60, E80 = espessuras projetadas para lançamento das camadas de resíduos iguais a 40cm, 60cm e 80cm, respectivamente; 4P, 6P, 8P = número de passadas dos equipamentos iguais a 4, 6 e 8 vezes, respectivamente.

Esta praça de trabalho não contou com áreas específicas para acesso e manobras dos equipamentos, havendo somente três (3) áreas de ensaios, cada qual com largura de 10,0m e comprimento variável em função da fase construtiva. Foram monitorados e analisados, nesta praça, os seguintes procedimentos construtivos:

- número de passadas do equipamento (trator de esteiras tipo Bulldozer D6): foram empregadas 4, 6 e 8 passadas;
- espessura das camadas: foram projetadas espessuras de lançamento de resíduos iguais a 0,4; 0,6; e 0,8m.

3.1.2 Definição da Seqüência Construtiva

A execução do aterro experimental respeitou diferentes seqüências construtivas em suas praças de trabalho em planos horizontais e inclinados. Em ambos os casos, porém, as etapas construtivas envolveram, nesta ordem, os serviços de: (i) lançamento dos resíduos segundo a espessura projetada para as camadas; (ii) compactação dos resíduos com o procedimento operacional (equipamento e número de passadas) previamente especificado; e (iii) realização de ensaios e controles *in situ*.

a) Plano horizontal

O aterro experimental, em sua praça de trabalho em planos horizontais, abrangeu 10 (dez) etapas construtivas. Tais etapas foram definidas tendo por base os seguintes critérios:

- minimização dos desníveis (degraus) entre quadrantes executados com diferentes espessuras de camadas;
- garantia do total confinamento lateral do material (resíduos) em todos os quadrantes e etapas construtivas, quando da realização das operações de compactação;
- utilização de um volume de resíduos para cada etapa não superior a um limite máximo, valor este estabelecido de forma a garantir que as operações de lançamento e/ou compactação de uma etapa pudessem ser realizadas em períodos não superiores a 3 dias.

A Figura 3.1.3 apresenta a seqüência construtiva estabelecida segundo os mencionados critérios e representada em termos da seção transversal do aterro. A Tabela 3.1.2, por sua vez, apresenta a descrição das etapas construtivas. Com base nesta seqüência construtiva e no arranjo do aterro experimental foram executadas (10) dez camadas com espessura de 0,40m (quadrantes 15 a 28), 7 (sete) camadas com espessura de 0,60m (quadrantes 8 a 14 e 29 a 35), 4 (quatro) camadas com espessura de 0,80m (quadrantes 1 a 7 e 36 a 42) e 1 (uma) camada com espessura de 1,20m (quadrantes 1 a 7 e 36 a 42). As etapas construtivas 1, 3, 4, 6 e 7, face aos volumes de resíduos envolvidos, foram executadas em duas sub-etapas, uma envolvendo os quadrantes correspondentes ao trator de esteiras tipo D6 e outra os quadrantes relativos ao compactador Caterpillar 816F.

b) Plano Inclinado

O aterro experimental, em sua praça de trabalho em plano inclinado, envolveu sete (7) etapas construtivas. Ao contrário da praça de trabalho em planos horizontais, os resíduos

aqui foram dispostos nos quadrantes de ensaio com espessuras variáveis ao longo das etapas construtivas. A Figura 3.1.4 e a Tabela 3.1.3 apresentam, respectivamente, a seqüência construtiva utilizada e a descrição sucinta dos serviços realizados nas etapas construtivas. Com base nesta seqüência e no arranjo do aterro experimental foram executadas (3) três camadas com espessura de 0,40m, 2 (duas) camadas com espessura de 0,60m e 2 (duas) camadas com espessura de 0,80m.

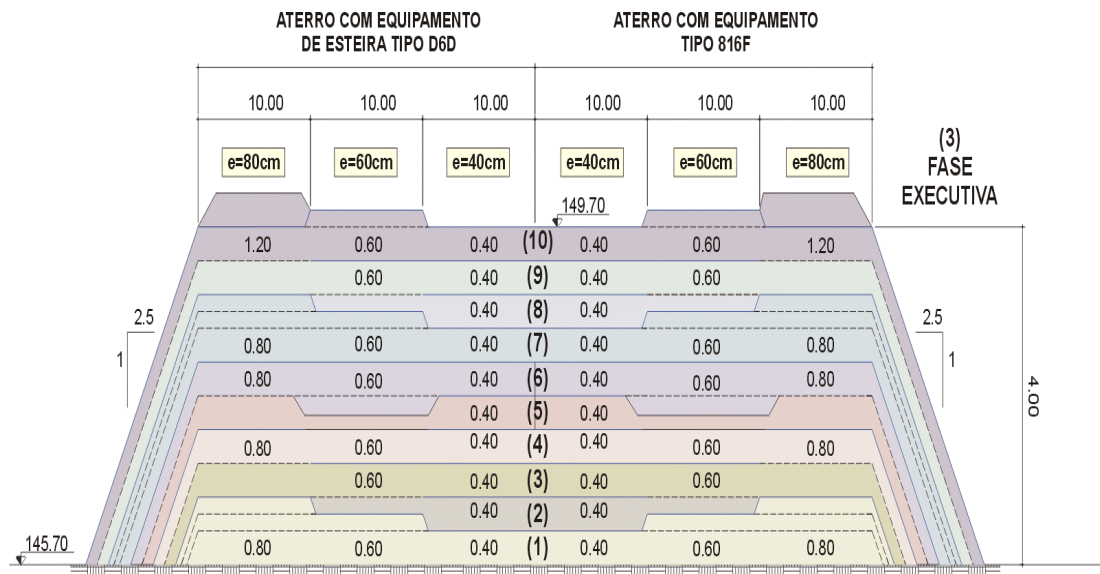


Figura 3.1.3 - Aterro experimental – Seqüência construtiva da praça de trabalho em planos horizontais

3.2 Preparação da Área

O aterro experimental teve início em Janeiro de 1997, com a implantação do sistema de infra-estrutura da área de ensaio, incluindo as readequações necessárias para instalação e controle dos diversos componentes projetados. Uma vez que o experimento foi locado no topo do sub-aterro AS1, cuidados especiais foram tomados para o adequado registro e interpretação dos parâmetros durante a monitoração do aterro existente, assim como para a minimização das interferências com o mesmo. Tais serviços incluíram:

3.2.1 Relocação dos dispositivos de drenagem existentes

A área onde foi implantado o aterro experimental possui natural predisposição para grande escape de gases do aterro sanitário, fato constatado pelos elevados fluxos de gases observados nos poços verticais (PDR) existentes próximos à área. A manutenção destes drenos e poços verticais na área de implantação, aliada à necessidade de impermeabilização da fundação do aterro experimental implicaram a implantação de um sistema complementar

de drenagem de gás do aterro principal, de maneira que fossem captadas e controladas todas as emissões de gases que convergiam para o local do experimento.

Tabela 3.1.2 - Etapas construtivas para a praça de trabalho em planos horizontais.

ETAPA	DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS
1	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> nas 1 ^{as} camadas de 0,40m, 0,60m e 0,80m.
2	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 2 ^a camada de 0,40m. Lançamento parcial (cerca de 0,20m) da espessura da 2 ^a camada de 0,60m, visando garantir o confinamento lateral dos quadrantes.
3	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 2 ^a camada de 0,60m e na 3 ^a de 0,40m. Lançamento parcial (cerca de 0,40m) da espessura da 2 ^a camada de 0,80m, visando garantir o confinamento lateral dos quadrantes.
4	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 2 ^a camada de 0,80m e na 4 ^a de 0,40m. Lançamento parcial (cerca de 0,40m) da espessura da 3 ^a camada de 0,60m, visando garantir o confinamento lateral dos quadrantes.
5	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 3 ^a camada de 0,60m e na 5 ^a de 0,40m. Lançamento parcial (cerca de 0,40m) da espessura da 3 ^a camada de 0,80m, visando garantir o confinamento lateral dos quadrantes.
6	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 3 ^a camada de 0,80m, na 4 ^a de 0,60m e na 6 ^a de 0,40m.
7	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 4 ^a camada de 0,80m, na 5 ^a de 0,60m e na 7 ^a de 0,40m.
8	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 8 ^a camada de 0,40m. Lançamento parcial (cerca de 0,20m) da espessura da 6 ^a camada de 0,60m, visando garantir o confinamento lateral dos quadrantes.
9	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 6 ^a camada de 0,60m e na 9 ^a de 0,40m. Lançamento parcial (cerca de 0,40m) da espessura da 1 ^a camada de 1,20m, visando garantir o confinamento lateral dos quadrantes.
10	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 1 ^a camada de 1,20m, na 7 ^a de 0,60m e na 10 ^a de 0,40m.

Tal sistema consistiu em uma rede de drenos “cegos”, executados no topo do sub-aterro AS1, procurando conectar os dispositivos de drenagem que seriam obstruídos a elementos remanescentes posicionados nas adjacências da área. A execução deste sistema envolveu os seguintes trabalhos: (i) remanejamento de poços verticais de drenagem, quando de sua interferência com a implantação do aterro experimental, através da execução de drenos horizontais de transferência e da posterior implantação de placa de concreto armado sobre seu topo para evitar fuga de material e subsidências localizadas no futuro; (ii) execução de drenos horizontais de transferência, através da abertura de valas, escavadas em resíduos aterrados, com largura da ordem de 0,80m e profundidade de cerca de 1,20m e posterior

preenchimento com material granular grosseiro (“rachão”), devidamente envolto em manta geotêxtil com abertura de filtração maior ou igual a 110 μ m; (iii) reconstituição do selo de cobertura com solo argiloso.

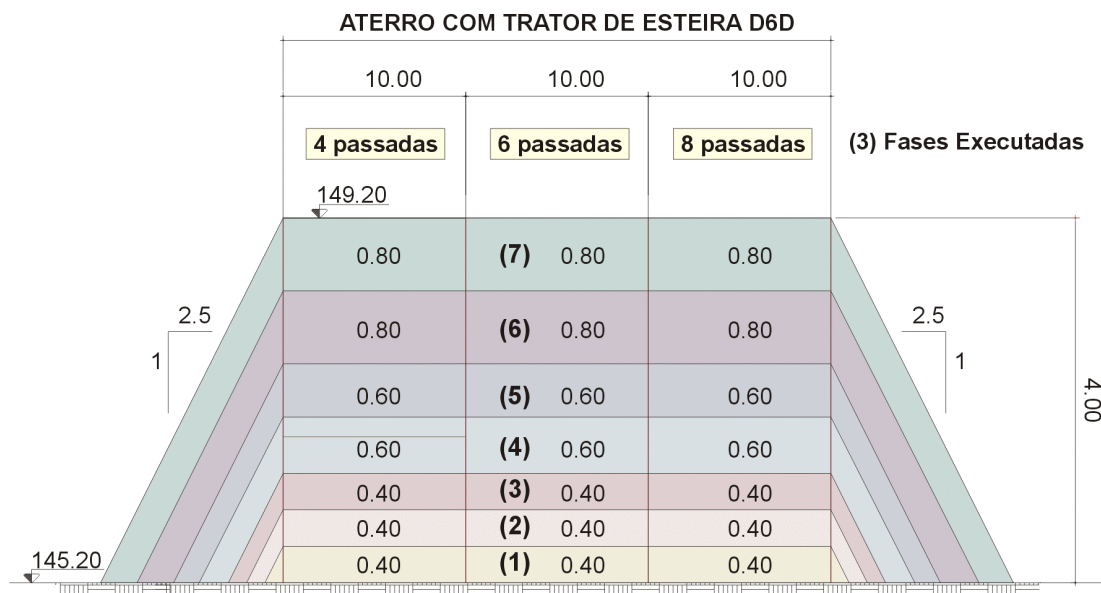


Figura 3.1.4 - Aterro experimental – Sequência construtiva da praça de trabalho em planos inclinados.

Tabela 3.1.3 - Etapas construtivas para a praça de trabalho em planos inclinados.

ETAPA	DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS
1	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 1 ^a camada de 0,40m após 4, 6 e 8 passadas do equipamento (Bulldozer D6D).
2	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 2 ^a camada de 0,40m após 4, 6 e 8 passadas do equipamento (Bulldozer D6D).
3	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 3 ^a camada de 0,40m após 4, 6 e 8 passadas do equipamento (Bulldozer D6D).
4	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 1 ^a camada de 0,60m após 4, 6 e 8 passadas do equipamento (Bulldozer D6D).
5	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 2 ^a camada de 0,60m após 4, 6 e 8 passadas do equipamento (Bulldozer D6D).
6	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 1 ^a camada de 0,80m após 4, 6 e 8 passadas do equipamento (Bulldozer D6D).
7	Lançamento, compactação e realização de ensaios e controles <i>in situ</i> na 2 ^a camada de 0,80m após 4, 6 e 8 passadas do equipamento (Bulldozer D6D).

As Figuras 3.2.1 e 3.2.2 apresentam, respectivamente, o sistema de drenagem complementar de gases executado e detalhes dos drenos horizontais de transferência. A análise da Figura 3.2.1 permite observar que uma malha de drenos horizontais para captação de gases foi implantada sob a base do aterro experimental, visando minimizar as pressões que poderiam atuar durante e após a execução do aterro experimental, dificultando o controle

e leituras de recalque na região. Observa-se ainda que somente um dreno vertical, poço PDR29, teve que ser eliminado.

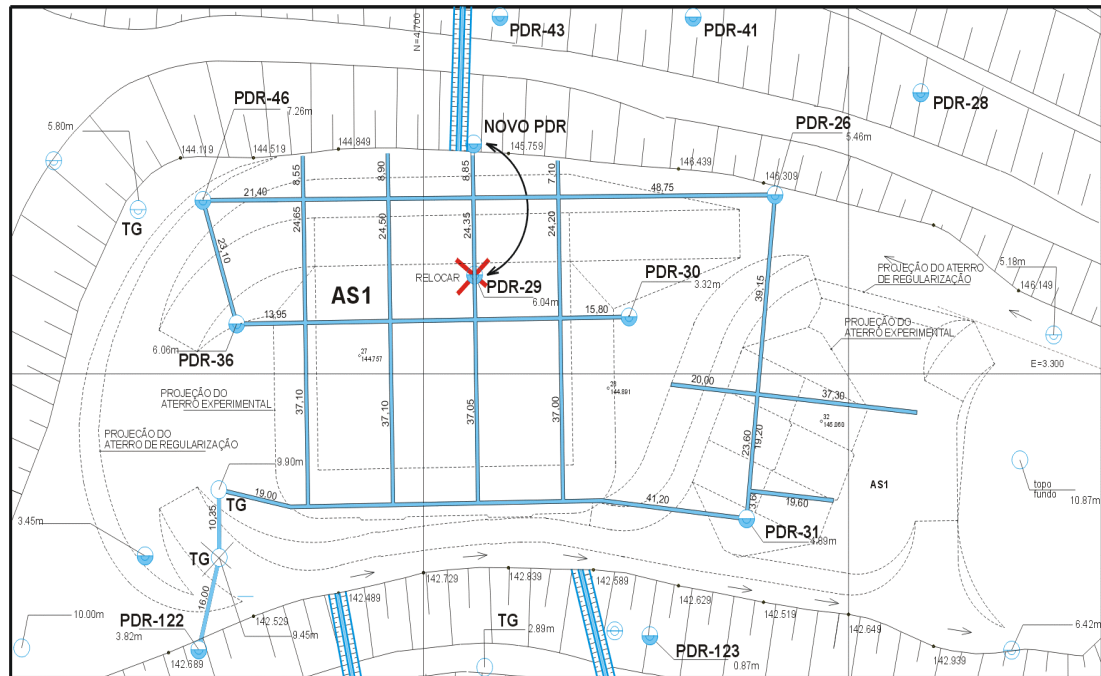


Figura 3.2.1 - Aterro experimental – Sistema complementar de drenagem de gás

3.2.2 Execução do Aterro de Regularização

A área de implantação do aterro experimental foi submetida a serviços de terraplenagem para regularização das plataformas de operação e das bases para instalação dos sistemas de impermeabilização e drenagem de líquidos percolados. Os trabalhos incluíram ainda a execução de um aterro em solo com cerca de 4,0m de altura e taludes 1,0V:5,0H para simular as técnicas de compactação em plano inclinado, conforme já mencionado. O aterro de regularização consistiu em um maciço compactado em solo com espessuras variáveis entre 0,60m e 2,0m, correspondendo as maiores espessuras a regiões isoladas localizadas na porção NW do sub-aterro AS1.

O solo empregado na constituição deste aterro foi proveniente das escavações para implantação dos sub-aterros AS4 e AS5, apresentando predominância de material silto-argiloso. O aterro foi executado, respeitando as seguintes premissas básicas: (i) camadas lançadas com espessura de no máximo 0,25m; (ii) teor de umidade próximo da umidade ótima ($w_{ót}$) do material, referida à energia normal de compactação, dentro da faixa de $0,95w_{ót}$ a $1,10w_{ót}$; (iii) grau de compactação mínimo ($GC_{mín}$) da ordem de 95%, referido à energia normal de compactação. O controle de compactação foi efetuado através de aferição táctil-visual inicial e periódica por engenheiro especialista complementado pela execução de

ensaios *in situ*, com a utilização de cilindro de cravação, procedendo, quando era o caso, às operações necessárias de umedecimento ou secagem para o ajuste do teor de umidade aos valores requeridos; (iv) utilização de rolo tipo pé de carneiro, com no mínimo 5 passadas, valor este aferido quando da execução das primeiras camadas; (v) implantação de declividades mínimas na praça de compactação da ordem de 0,50 %, de maneira que fossem garantidos o escoamento e o controle de águas pluviais. Na iminência de eventos chuvosos a praça sempre era selada com a utilização de rolo liso; e (vi) execução de terraplenagem até o nível 145,10m na área de projeção do aterro experimental, elevação esta correspondente ao nível de instalação do sistema de impermeabilização com geomembranas.

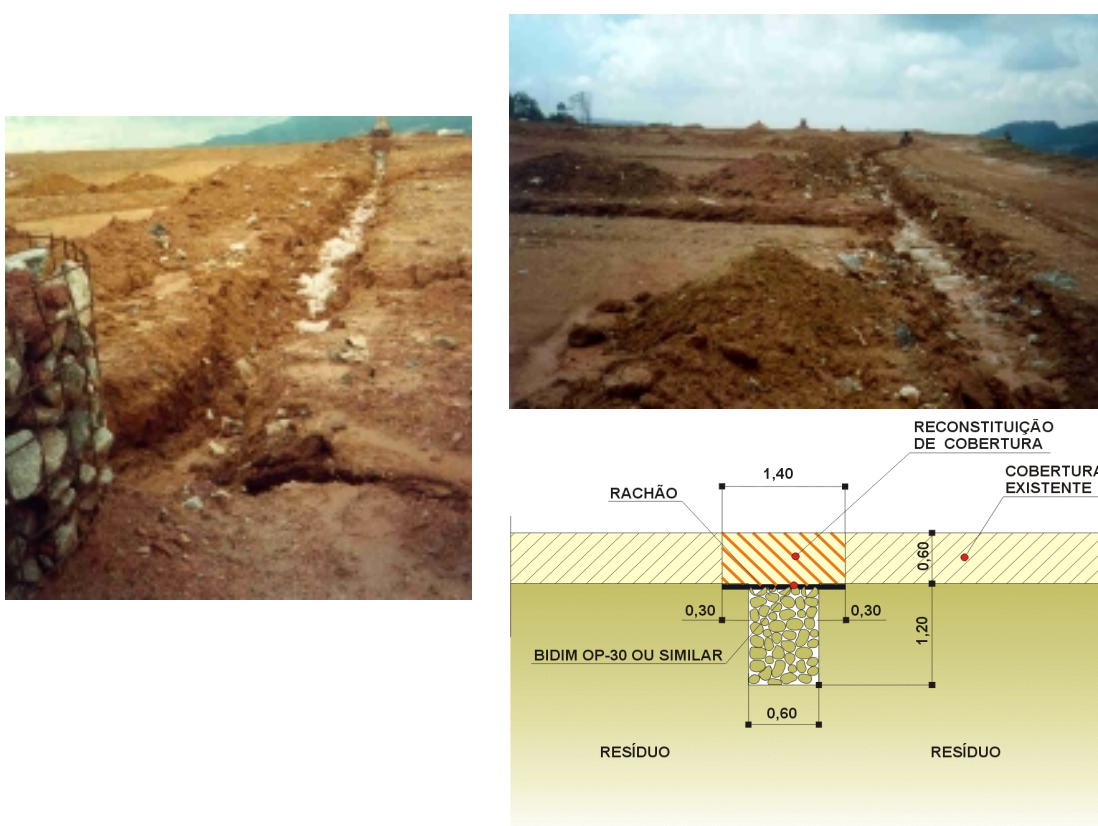


Figura 3.2.2 - Sistema complementar de drenagem de gás - Dreno horizontal de transferência.

Na área correspondente a praça de trabalho em plano inclinado foi executado aterro em solo compactado com 4,0m de altura e taludes 1,0V:5,0H (talude de testes) e 1,0V:2,5H (talude externo). A base e a crista deste aterro situavam-se próximos à elevação 145,20m e 149,20m, respectivamente. A execução deste aterro também respeitou as premissas de compactação retro-mencionadas. Os platôs, bermas e taludes do aterro principal que sofreram alterações com o alteamento do aterro experimental foram revestidos com grama para minimizar o risco de erosões causadas por eventuais precipitações.

3.2.3 Tratamento e Impermeabilização da Fundação

Sob o corpo do aterro, na região prevista para execução do mesmo segundo planos horizontais de lançamento e compactação de resíduos, foram instalados dois tipos de material para impermeabilização do mesmo, quais sejam: geomembranas de PEAD e de PVC, com 1,0mm de espessura. Sob os trechos iniciais e finais do acesso principal ao aterro experimental não foram utilizadas geomembranas, sendo a impermeabilização do maciço realizada por camada de solo argiloso com 0,60m de espessura. O tratamento diferenciado pretendeu avaliar a médio e longo prazo o comportamento e eficiência destes materiais, sendo objeto de pesquisa específica, ora em andamento no Departamento de Geotecnia da EESC/USP (MAIA, 2001). Na área prevista para execução do aterro segundo planos inclinados de lançamento e compactação de resíduos, foi instalada geomembrana de PVC de 1,0mm de espessura. A Figura 3.2.3 apresenta a disposição dos distintos tratamentos no aterro experimental.

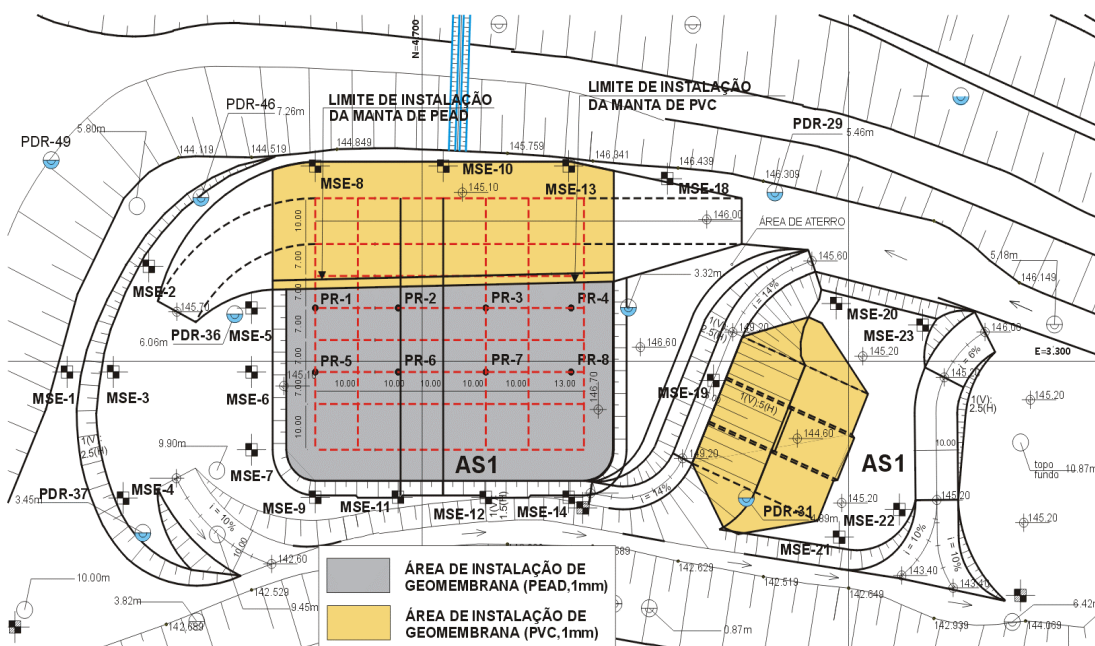


Figura 3.2.3 - Aterro experimental – Tratamento e impermeabilização da fundação.

O posicionamento das geomembranas foi efetuado por equipes especializadas, tendo sido após o seu posicionamento realizados ensaios e testes de estanqueidade das mesmas. Na região de contato entre as duas geomembranas (PEAD e PVC) foi executada uma superposição de materiais com cerca de 2,0m de comprimento. Junto as valas escavadas para conformação dos drenos de fundação (sistema de drenagem dos líquidos percolados) foram deixadas “folgas” de material para evitar o tracionamento excessivo das peças, quando em carga, visto esta região ser passível de elevada concentração de tensões. A limpeza e retirada

de materiais pontiagudos (galhos, pedras, etc) das plataformas de instalação foram igualmente realizadas para garantir a integridade das geomembranas.

Por fim, foi executada camada de solo compactado para proteção mecânica das geomembranas com cerca de 0,60m de espessura. Os rasgos e/ou perfurações eventualmente detectados nas mantas foram corrigidos pela emenda de um “manchão” do mesmo material para garantir a estanqueidade da mesma. Registre-se que foram mínimos (um registro apenas) os serviços de emenda por conta de rasgos nas mantas. A camada de solo de proteção foi executada com material similar ao do aterro de regularização (solo silto-argiloso), isento de detritos e matéria orgânica, compactado de forma que fosse garantido um grau de compactação superior a 95% relativo ao ensaio de Proctor Normal. A Figura 3.2.4 apresenta alguns detalhes do tratamento executado.



Figura 3.2.4 - Detalhes e vista do tratamento de fundação do aterro experimental.

3.2.4 Execução do Sistema de Drenagem de Gases e Líquidos Percolados

O sistema de drenagem de líquidos percolados foi implantado junto a fundação, sendo composto por valetas interligadas e preenchidas com material granular grosseiro ($D_{50}=10\text{cm}$)

envolto em manta geotêxtil, com abertura de filtração superior a $110\mu\text{m}$. O sistema de drenos horizontais, relativo à praça de trabalho em planos horizontais, converge para uma caixa de captação para amostragem e medição dos volumes de líquidos percolados. Na praça de trabalho correspondente à disposição em planos inclinados, o sistema de drenagem foi complementado pela execução de um tapete drenante junto à base do aterro e com declividade direcionada para a linha de drenos horizontais. Tais drenos, por sua vez, foram diretamente conectados à rede de drenagem existente do aterro principal. As Figuras 3.2.5 e 3.2.6 ilustram, respectivamente, o arranjo geral do sistema de drenagem, incluindo as áreas com geomembranas de PVC e PEAD (regiões 1 e 2), e alguns detalhes de sua execução.

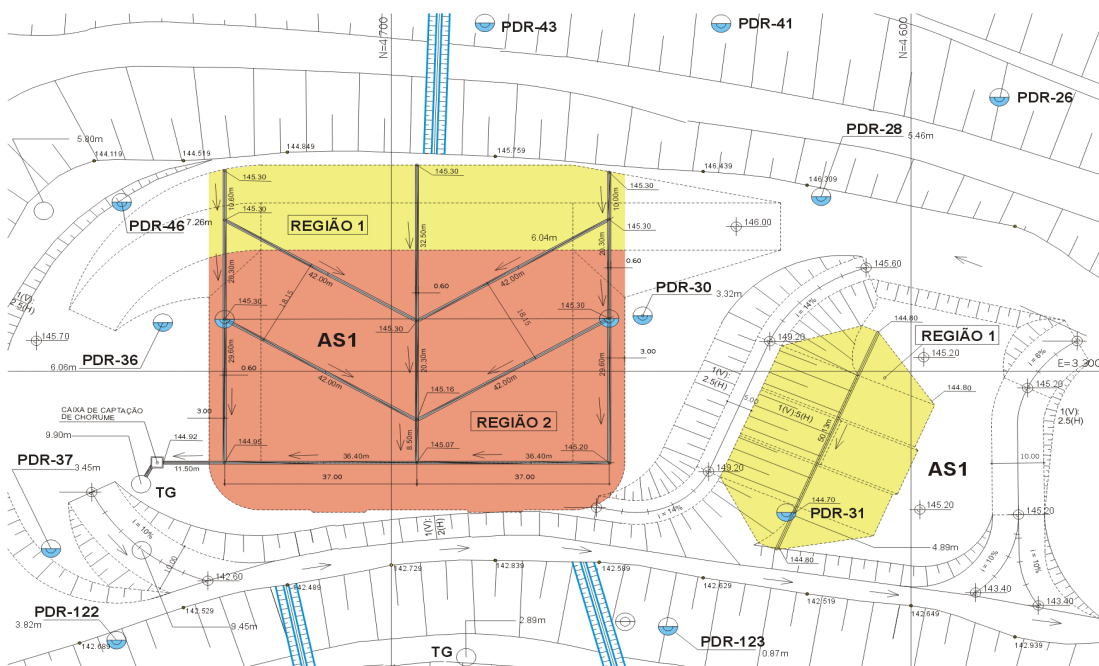


Figura 3.2.5 - Aterro experimental – Sistema de drenagem de líquidos percolados e gases.

Os drenos horizontais foram executados após a conclusão do aterro de recobrimento (proteção mecânica) da geomembrana, através da abertura de cavas de dimensões de cerca de $0,60\text{m} \times 0,60\text{m}$. A caixa de captação dos líquidos percolados, indicada na Figura 3.2.7, foi executada com paredes em blocos de concreto, revestidos com argamassa de cimento desempenada e laje de fundo em concreto magro com espessura da ordem de 10cm . Tal caixa é constituída por 3 módulos:

- tanque de chegada e amostragem dos líquidos percolados. Este compartimento é fechado com tampa metálica, para evitar a entrada das águas de chuva e a conseqüente perturbação dos resultados de vazão e caracterização físico-química das amostras. À saída deste compartimento encontra-se implantado um vertedor triangular, cuja relação

entre altura das lâminas vertidas (h) e vazões percoladas (Q) obedece a seguinte equação:

$$Q (l/s) = 0,014 \times h (cm)^{2,5}$$

- tanque de acesso, dotado de escada tipo marinheiro para descida de técnicos e realização de amostragem e leituras;
- tanque de descarga. Unidade situada a jusante do vertedor triangular e que está interligada, através de tubulação (D = 0,40m), ao sistema de drenagem global do aterro principal.

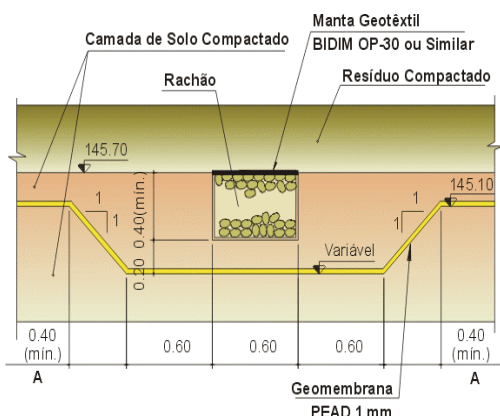


Figura 3.2.6 - Detalhes do sistema de drenagem do aterro experimental.

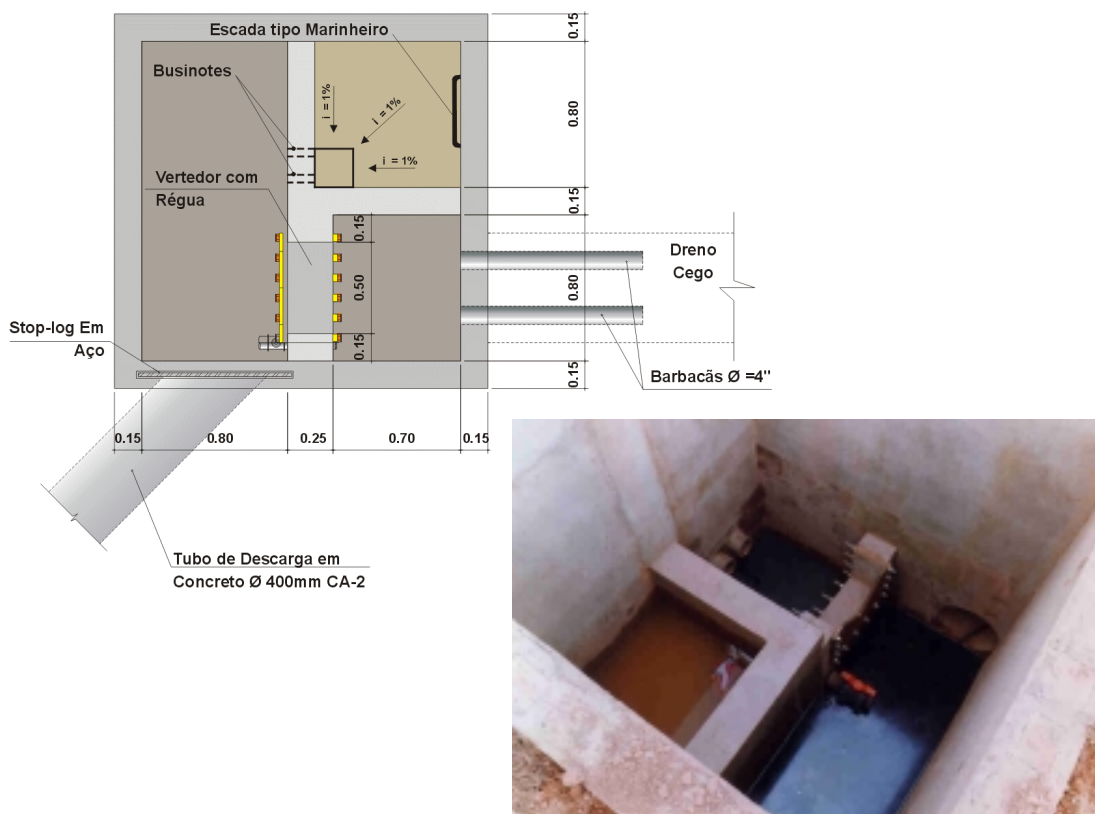


Figura 3.2.7 - Caixa de captação e amostragem de líquidos percolados.

Com relação ao controle e captação dos gases gerados, foram instalados, na praça de trabalho em planos horizontais, 2 (dois) drenos verticais devidamente conectados e associados à rede de drenagem de líquidos percolados executada junto à fundação, conforme pode ser visualizado na Figura 3.2.8. A Figura 3.2.5 apresenta a locação destes drenos, os quais apresentam diâmetro total de 2,00m executados com tubos perfurados de concreto ($D=0,60m$) envoltos com material granular grosseiro, tipo rachão, e tela metálica. Na praça de trabalho em plano inclinado, a drenagem dos gases foi feita conectando o sistema de drenagem de líquidos percolados ao dreno de gás existente PDR-31.

3.2.5 Instalação da Instrumentação

A instrumentação instalada na área de ensaio teve por objetivo o controle de recalques do aterro experimental e do aterro existente, tendo a mesma sido instalada em duas fases distintas: ao início dos trabalhos e após o fechamento do aterro experimental.

3.2.5.1 Monitoração do Aterro – Fase 1

A localização da área de ensaio sobre o aterro sanitário existente requereu que especial atenção fosse dada ao controle dos recalques, procurando diferenciar os que correspondiam

ao aterro antigo dos registrados no aterro experimental. Neste sentido, foram implantados, ao início dos trabalhos, 23 (vinte e três) marcos superficiais (MSE-1 a MSE-23) na área externa ao aterro experimental e sobre o maciço existente, e 8 (oito) placas de recalque (PR1 a PR8) junto a base do aterro experimental, diretamente sobre o aterro principal. Desta forma e estabelecendo uma frequência conjunta para leitura dos instrumentos, foi possível registrar as deformações globais e individuais dos maciços. As Figuras 3.2.3 e 3.2.9 ilustram, respectivamente, a locação dos dispositivos mencionados e detalhes de sua instalação. Os marcos superficiais MSE-15, MSE-16 e MSE-17 foram desativados logo após sua instalação para criação de alternativas de acesso à área de ensaios. Assim, 20 (vinte) marcos superficiais, implantados nesta fase, foram efetivamente controlados e monitorados.



Figura 3.2.8 – Detalhe do sistema de drenagem de gases e líquidos percolados.

As placas de recalque tiveram suas hastes demarcadas a cada 10cm a partir da base, tendo sido cada marca identificada para facilitar as leituras através de visada pelo distanciômetro. Para instalação das placas de recalque foi aberta uma cava de dimensões 1,0m x 1,0m e profundidade de 0,40m, ficando a base das mesmas localizadas cerca de 0,20m acima da cota de instalação das geomembranas. Após a escavação, o fundo da cava foi compactado manualmente (apiloado) e revestido com manta de PEAD de 2mm, seguido pelo posicionamento e nivelamento inicial da placa. Por fim, procedeu-se ao fechamento da cava com reaterro compactado manualmente. As hastes das placas de recalque foram perfuradas para também servirem como medidores do nível interno de líquidos percolados no maciço, após a conclusão do mesmo.

Os marcos superficiais foram instalados com procedimento similar ao das placas de recalque. Cavas com dimensões de 0,70m x 0,70m x 0,70m foram abertas, tendo sido o fundo das mesmas submetido a compactação manual. Elementos de concreto foram então

instalados, seguidos da verificação de prumo (verticalidade) e do nivelamento inicial dos mesmos.



Figura 3.2.9 - Aterro experimental – Marco superficial instalado.

3.2.5.2 Monitoração do Aterro – Fase 2

Em uma segunda fase dos trabalhos, um conjunto complementar de marcos superficiais foi instalado sobre o aterro experimental, sendo esta atividade realizada após a conclusão e recobrimento do mesmo. O principal propósito desta instrumentação complementar foi a obtenção dos recalques do aterro experimental e principal de forma individualizada. Na praça de trabalho em planos horizontais, foram instalados 17 (dezesete) marcos, estrategicamente distribuídos pelos diversos quadrantes e áreas de ensaio do aterro. Na praça de trabalho em plano inclinado 5 (cinco) marcos foram implantados, de maneira a cobrir toda a área ensaiada. A Figura 3.2.10 apresenta a locação e distribuição da monitoração complementar nas praças de trabalho em plano horizontal e inclinado.

3.2.6 Execução do Recobrimento Final e Sistema de Drenagem Superficial

O recobrimento final do aterro experimental foi executado cerca de 1 (uma) semana após o término dos ensaios *in situ* da última camada de resíduos compactados. Em ambas as praças de trabalho, os recobrimentos foram executados com solo silto-argiloso compactado proveniente de escavações próximas ao aterro sanitário, tendo sido utilizada uma espessura mínima igual a 0,60m. Na praça de trabalho em plano horizontal, as espessuras de recobrimento se mostraram bem variáveis entre os quadrantes, face as diferentes técnicas construtivas utilizadas, tendo sido observadas espessuras médias da ordem de 0,80m. Após a compactação do material, a área foi protegida com o plantio de grama.

Visando garantir a integridade das áreas externas ao experimento contra a erosão foi concebido e implantado um sistema de drenagem superficial em todo o entorno do aterro experimental. Tal sistema abrangeu a execução de um conjunto de canaletas em bica corrida ou com grama em placas (sistemas provisórios), dispostas na crista do aterro e nas bases dos taludes, de modo que as águas pluviais fossem captadas e conduzidas até caixas de passagem, e daí ao sistema de drenagem do aterro principal. As canaletas em bica corrida apresentavam forma triangular, tendo sido assentadas sobre aterro compactado com no mínimo 0,60m de espessura. Respeitaram ainda declividades longitudinais mínimas de 0,5% e profundidades de 0,25m.

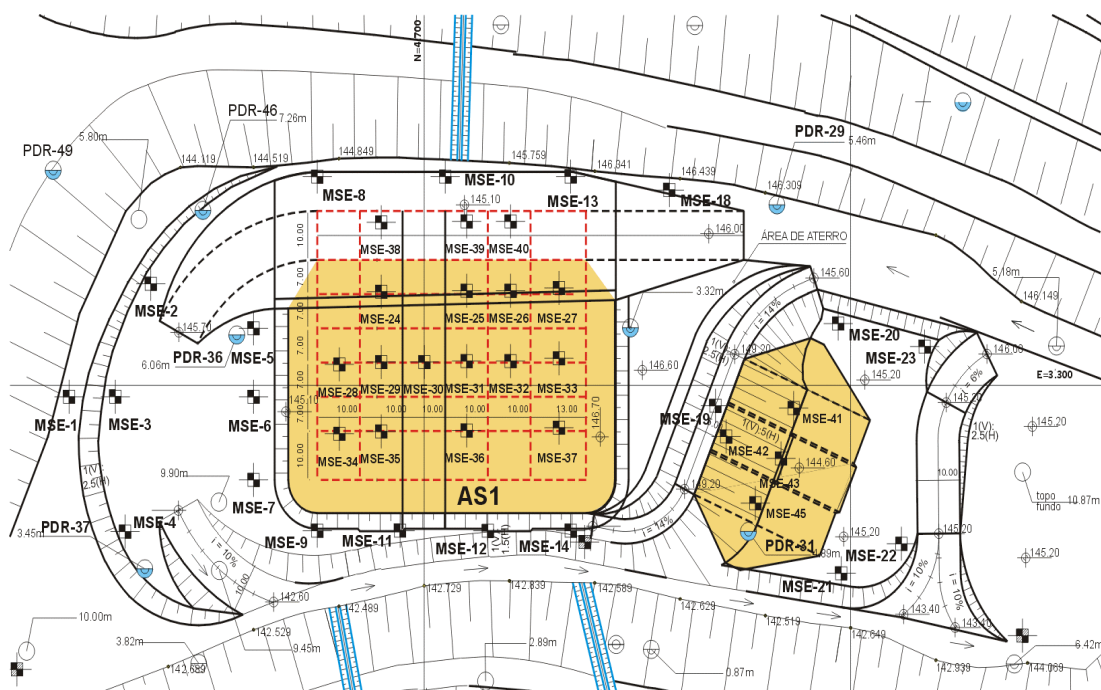


Figura 3.2.10 – Localização da monitoração de 2ª fase nas praças de trabalho em plano horizontal e inclinado.

As caixas de passagem, por sua vez, foram executadas com alvenaria de blocos, possuindo dimensões internas de 1,20m x 1,20m e laje de fundo em concreto armado com espessura de 0,08m, assente sobre aterro compactado com espessura mínima de 0,60m e lastro de concreto magro com 0,06m de espessura. Os tubos de concreto utilizados foram de classe CA-2, instalados em valas escavadas e assentes sobre berço de concreto magro. O platô do aterro experimental procurou respeitar declividades nunca inferiores a 0,5%, a fim de evitar o acúmulo de água proveniente de eventuais precipitações na praça de compactação.

3.2.7 Execução de Acessos e Obras Complementares

As regiões destinadas ao acesso dos equipamentos sofreram tratamento com revestimento primário (bica corrida), visando garantir o fluxo de veículos, mesmo após a ocorrência de precipitações intensas. Como obras e serviços complementares devem ser mencionados:

- serviços de proteção superficial dos taludes e plataformas através do plantio de grama;
- serviços de sinalização e demarcação das áreas de acesso, manobras, ensaios, estocagem de material, etc.;
- implantação de laje de concreto armado com cerca de 100m², visando a realização dos ensaios de caracterização dos resíduos;
- implantação de unidades (“contêineres”) para armazenamento de materiais e equipamento de apoio às operações executivas, incluindo um laboratório de campo para execução dos ensaios de umidade dos resíduos e de compactação dos materiais terrosos utilizados.

No Apêndice I apresenta-se um conjunto de desenhos que descrevem em maior detalhe o projeto do aterro experimental e de seus componentes.

3.3 Descrição dos Equipamentos

A execução do aterro experimental envolveu a utilização de dois grupos de equipamentos: os equipamentos de teste, cujo desempenho e influência nas propriedades dos resíduos sólidos urbanos se desejou avaliar, e os equipamentos de apoio utilizados basicamente nas operações de lançamento e transporte dos resíduos. Os equipamentos de testes utilizados foram o trator de esteiras tipo Bulldozer D6D e o rolo compactador Caterpillar 816F. A seleção do trator de esteiras como um dos equipamentos de teste se fez por ser este o equipamento normalmente utilizado nos aterros e unidades de disposição brasileiras, sendo assim um importante elemento de controle para o estudo de compactação. Ao contrário dos países desenvolvidos, onde a utilização de rolos compactadores de grande porte, especificamente desenhados para a densificação dos resíduos sólidos, já é uma realidade e prática usual, no Brasil o uso destes equipamentos restringe-se a poucos aterros sanitários, fato este condicionado principalmente pelo porte de investimentos envolvidos na aquisição do equipamento. A carência de dados e informações relativos à influência da utilização dos compactadores de grande porte no comportamento e propriedades de

compactação dos resíduos sólidos urbanos brasileiros motivou a seleção do compactador 816F para o presente estudo.

a) Trator de Esteiras tipo Bulldozer D6D

A compactação dos resíduos sólidos na praça de trabalho em plano inclinado e nos quadrantes 22 a 42 da praça em plano horizontal do aterro experimental foi realizada por trator de esteiras tipo Bulldozer D6D de fabricação Caterpillar, sendo uma mesma máquina utilizada durante todo o experimento. Tal equipamento teve seu peso aferido em balança eletrônica antes do início dos testes, registrando um peso total com lâmina e proteções, tal como utilizado nas praças de trabalho, de 14.720 kg. Tal equipamento possui duas esteiras com largura de 0,51m e comprimento de 2,66m, o que resulta em uma área total de contato com o resíduo de 2,72m². As dimensões principais deste equipamento estão apresentadas na Figura 3.3.1.

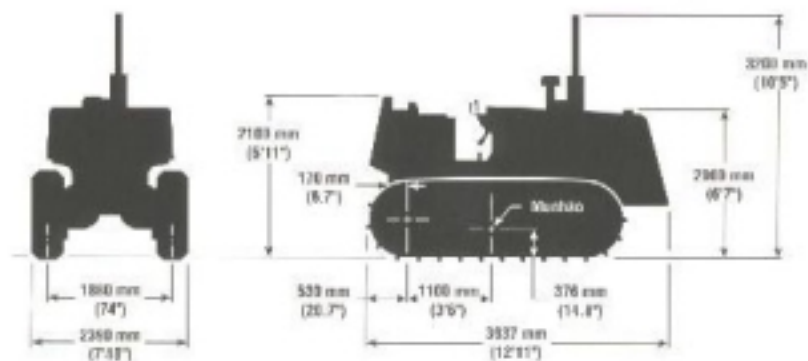


Figura 3.3.1 – Trator de esteiras tipo Bulldozer D6D – Dimensões principais.

b) Rolo Compactador Caterpillar 816F

O rolo compactador 816F, de fabricação Caterpillar, foi empregado na execução dos quadrantes 1 a 21 da praça em plano horizontal do aterro experimental, tendo o seu peso sido igualmente aferido em balança eletrônica logo ao início dos trabalhos. O peso total obtido, incluindo sua lâmina e proteções, tal como utilizado nos testes, foi de 22.780 kg. Tal equipamento possui 4 rolos com largura de 1,016m e diâmetro de 1,3m. A área de contato com o resíduo, neste caso, acaba sendo uma função inversa da compactidade dos materiais, ou seja, quanto mais compactado o resíduo menor a área de contato com os mesmos. Outra importante característica deste equipamento diz respeito à presença de patas (dentes) em

cada rolo de compactação. No equipamento em questão foram utilizadas 20 (vinte) patas do tipo ponta (“tip teeth”) por rolo A Figura 3.3.2 apresenta as principais dimensões do equipamento.

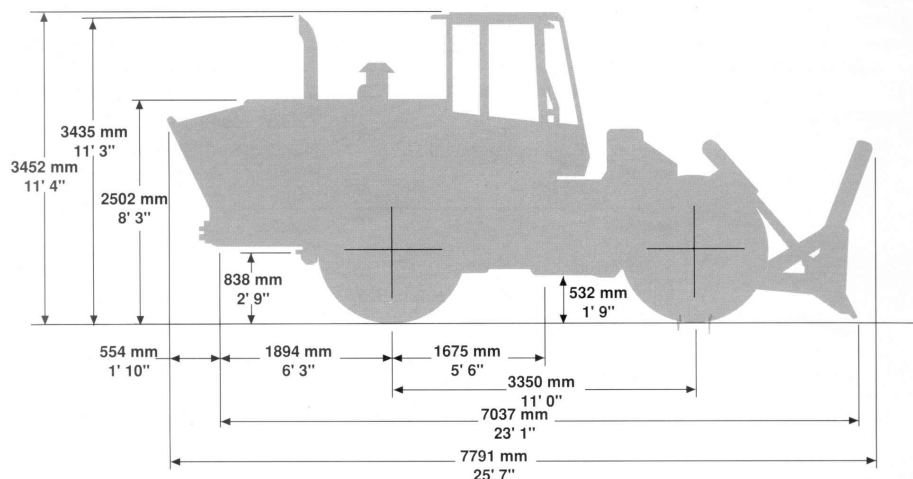


Figura 3.3.2 – Rolo compactador 816F – Dimensões principais.

c) Equipamentos de Apoio

O lançamento dos resíduos na praça de trabalho em planos horizontais foi realizado através de tratores de menor porte, tipo D4, e por guindastes, estes últimos operando fora da área do aterro. No caso das praças de trabalho em planos inclinados, somente os guindastes foram utilizados na operação de lançamento. Para a execução dos ensaios de cava foram também utilizados caminhões pipa (provimento de água para preenchimento das cavas) e geradores (acionamento de bombas para esgotamento de água das cavas e iluminação da área em ocasiões especiais), além de retro-escavadeira de pequeno porte, empregada para auxiliar a abertura de cavas nas fases finais de construção.

3.4 Treinamento de Equipes para Trabalhos de Campo

Antes do início da execução do aterro experimental foram realizadas algumas reuniões e ensaios simulados para orientar os técnicos e operadores que estariam envolvidos nos trabalhos, devendo ser destacado:

- apresentação da concepção do projeto e dos objetivos da pesquisa à operadora do Aterro Sanitário Bandeirantes, Construtora Heleno & Fonseca, visando acertar algumas formas de apoio aos trabalhos, incluindo fornecimento de equipamentos e de mão de obra e infra-estrutura básica (energia, acessos, etc). Foram ainda repassados os critérios básicos

para execução do experimento, tais como: cronogramas, frequência e características dos testes e ensaios, monitoramentos e registros e postura diante de condições operacionais críticas para execução dos trabalhos (chuva, ventos, aparecimento de aves, insetos, odores, etc);

- orientação às equipes de topografia acerca dos levantamentos e controles necessários, incluindo frequências, precisões, equipamentos, etc e do seu inter-relacionamento com o cronograma de execução do maciço;
- orientação aos operadores dos equipamentos de teste e execução de treinamento, em área junto ao sub-aterro AS4, para aferição das trajetórias e procedimentos operacionais dos equipamentos. A concepção do aterro previu a compactação dos resíduos segundo a movimentação dos equipamentos na direção avante e em ré sobre distintas faixas até que todo o quadrante de ensaio fosse coberto. A Figura 3.4.1 apresenta o conceito básico empregado para a movimentação dos equipamentos de teste no aterro experimental. Vale destacar que foram utilizados somente dois operadores ao longo de todo o experimento, o mesmo para cada equipamento de teste. Nesta atividade foram ainda definidas e testadas as velocidades dos equipamentos (marcha ré e avante) e a factibilidade de algumas manobras, giros, retornos, etc. Com relação as velocidades, foram estabelecidos valores iguais a 4,9km/h (avante, em 1^a. marcha) e 5,5 km/h (em marcha ré), para o rolo compactador, e 5,9km/h (avante, em 2^a. marcha) e 6,4km/h (em marcha ré), para o trator de esteira. As velocidades foram aferidas com radar, tendo sido constatado que para as velocidades dos equipamentos serem da mesma ordem de grandeza, o trator de esteiras deveria trabalhar em 2^a. marcha e o rolo compactador em 1^a. marcha. A Figura 3.4.2 ilustra detalhes do treinamento mencionado.
- orientação aos técnicos braçais no tocante aos seguintes trabalhos: (i) espalhamento e acerto manual de camadas de resíduos; (ii) auxílio na separação e coleta dos resíduos para ensaios; (iii) abertura de cavas para execução de ensaios de densidade.

3.5 Execução do Aterro

O aterro experimental foi executado com resíduo sólido domiciliar bruto, proveniente predominantemente das AR's (Administrações Regionais) Freguesia do Ó, Pirituba, Jaguaré e Lapa, todos transportados por veículos coletores, evitando assim a utilização de material trazido por caminhões tipo carreta de outras origens ou de unidades de transbordo. A descarga dos resíduos, em área contígua ao aterro experimental, era realizada somente após a identificação do veículo coletor e verificação de sua procedência. Ao início de cada etapa de

construção foram realizados ensaios de caracterização do resíduo, incluindo a composição gravimétrica e o teor de umidade do resíduo. O controle dos resíduos antes de sua disposição nas praças de trabalho, incluiu ainda o descarte de materiais de grande porte (pneus, eletrodomésticos, sofás, colchões, etc) que poderiam prejudicar os serviços de lançamento e compactação, assim como a realização dos ensaios *in situ*.

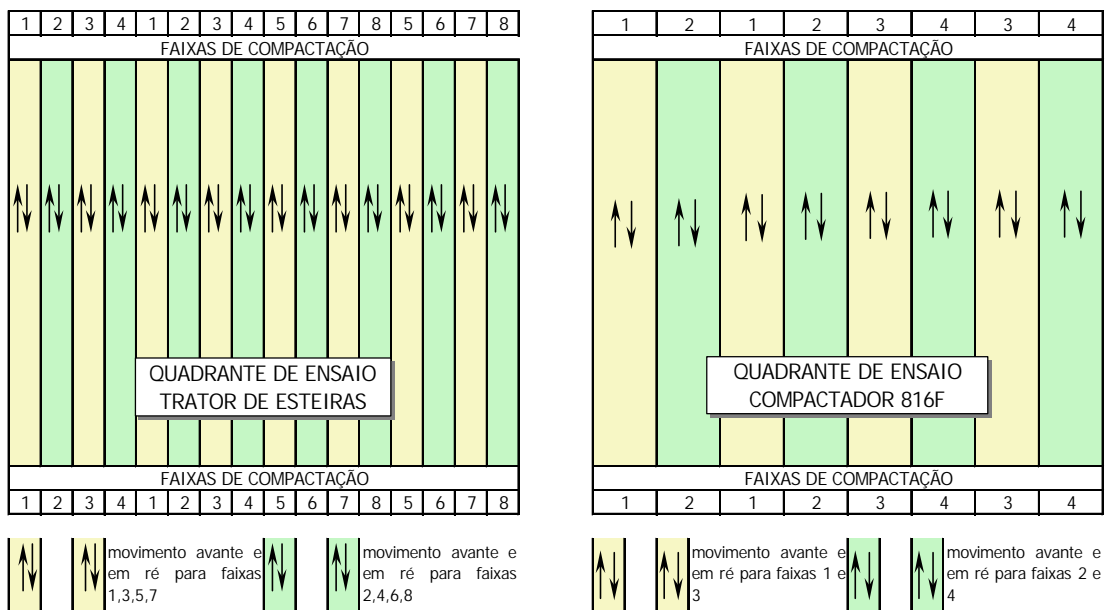


Figura 3.4.1 – Trajetórias e faixas de movimentação dos equipamentos nos quadrantes.



Figura 3.4.2 – Treinamento operacional previamente à execução do aterro.

3.5.1 Lançamento e Espalhamento dos Resíduos

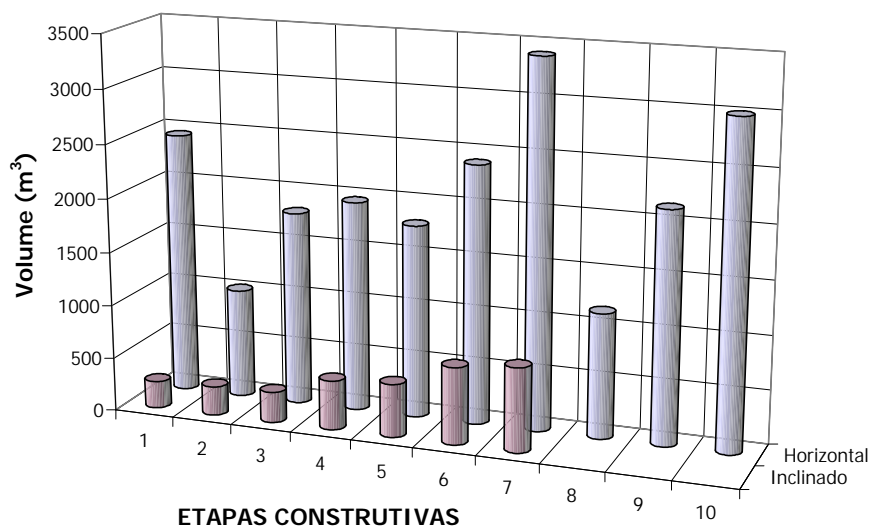
O lançamento e espalhamento dos resíduos, após identificação dos veículos coletores e retirada de materiais de grande porte, foram realizados a partir das áreas de acesso e manobra com o auxílio de equipamento de pequeno porte (tratores tipo D4), ou ainda com guindastes operando fora da área do aterro. No caso da praça de trabalho em planos inclinados foram empregados somente guindastes (“clam-shell”) operando fora da área de ensaios. A Figura 3.5.1 apresenta detalhes da operação de lançamento. Tal procedimento procurou garantir que nenhum outro equipamento, além dos compactadores, trafegasse sobre as áreas de ensaio.

A operação de espalhamento consistiu no arranjo manual das camadas de resíduos. A espessura requerida das camadas foi controlada topograficamente mediante a utilização de cruzetas de referência, sendo os acertos finais realizados através de operações manuais complementares. A Figura 3.5.2 apresenta a distribuição dos volumes lançados por etapa para as praças de trabalho em planos horizontais e inclinados, sendo os volumes indicados baseados na geometria das camadas.



Figura 3.5.1 – Lançamento dos resíduos nas praças de trabalho em plano horizontal e inclinado.

Na praça de trabalho em planos horizontais, imediatamente antes e logo após a conclusão dos serviços de lançamento de uma determinada etapa construtiva, toda a área passava por controle topográfico, visando a determinação “a posteriori” das reais espessuras lançadas na praça de trabalho.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
■ Inclinado	253	270	285	460	496	718	783			
□ Horizontal	2446	1018	1810	1962	1796	2404	3406	1162	2152	3006

Figura 3.5.2 – Distribuição dos volumes lançados de resíduos por etapa construtiva.

3.5.2 Compactação dos Resíduos

Os serviços de compactação foram iniciados imediatamente após o término do lançamento dos resíduos. Nesta operação foram observados os tempos de compactação de cada quadrante e verificadas as velocidades dos equipamentos, as quais foram mantidas constantes nos valores apresentados no item 3.4. A movimentação dos equipamentos respeitou o conceito de cobertura de faixas descrito igualmente no item 3.4, respeitando o número de passadas especificado para cada quadrante de ensaio. Encerradas as operações de compactação, a área era novamente submetida a amplo controle topográfico, visando agora a determinação das espessuras das camadas compactadas.

Após este controle, toda a área era coberta com filme plástico amarelo (polietileno de baixa densidade) de resistência praticamente nula. Tal filme tinha basicamente duas funções: (i) minimizar, durante a construção do experimento, os problemas associados a ventos e odores; e (ii) constituir um elemento de marcação do contato entre camadas, para avaliação das densidades dos resíduos e espessura das camadas inferiores, conforme procedimento a ser apresentado nos itens 3.6.2 e 3.7.1, sendo esta última a principal função deste material. Ressalte-se que este filme era rasgado antes do lançamento da camada sobrejacente para que o mesmo não se constituísse em barreira à percolação interna ou mesmo em reforço do maciço. A Figura 3.5.3 ilustra detalhes de etapas e procedimentos construtivos reportados durante a execução do experimento.

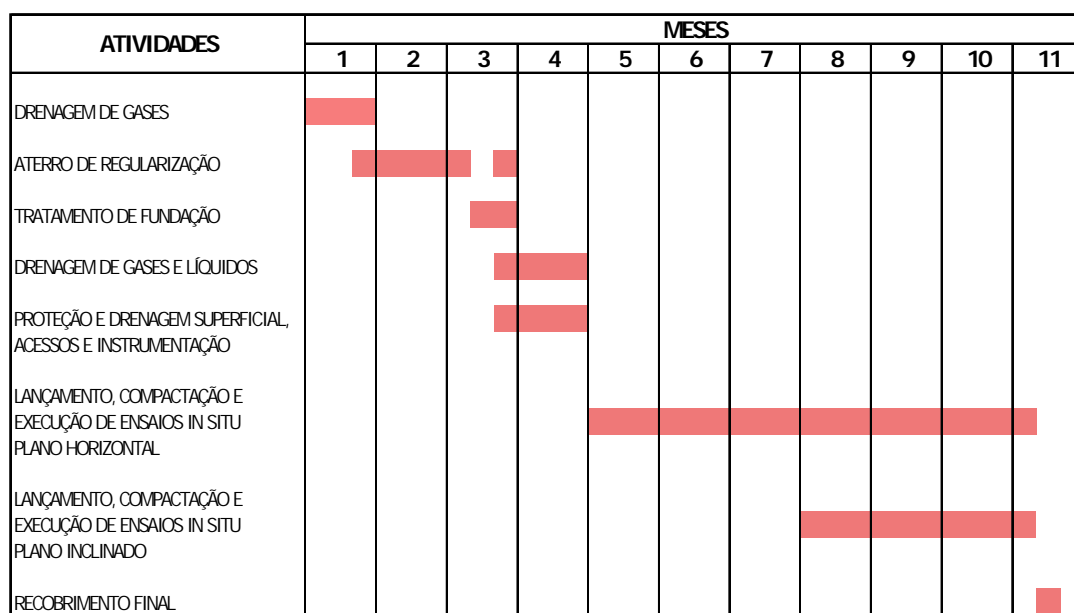


Figura 3.5.3 – Compactação dos resíduos nas praças de trabalho em planos horizontais e inclinados

Em períodos chuvosos prolongados as operações (lançamento e compactação) do aterro experimental eram paralisadas, procurando cobrir as praças de trabalho com o mencionado filme plástico amarelo. Cessado o período chuvoso, a manta era retirada e os trabalhos retomados. As amostras coletadas para caracterização e determinação de umidade eram igualmente acondicionadas e protegidas contra chuvas.

3.5.3 Cronograma de Execução

A execução do aterro experimental, incluindo os serviços de lançamento, compactação e execução dos ensaios de campo, envolveu um período total de cerca de 6 (seis) meses. Os trabalhos foram iniciados pela praça de trabalho em planos horizontais, tendo sido, em sua 5^a etapa construtiva, disparados os serviços relativos à praça em planos inclinados. A Figura 3.5.4 apresenta um cronograma simplificado com as principais atividades realizadas durante a execução do experimento.



Obs: mês 1 corresponde a Janeiro/97

Figura 3.5.4 – Aterro experimental: Cronograma simplificado das atividades principais.

3.6 Ensaios Laboratoriais e In Situ

Os resíduos sólidos dispostos no aterro experimental foram submetidos a ensaios laboratoriais e *in situ*, visando a obtenção de subsídios para o estudo de compactação. Neste sentido, foram realizados ensaios para determinação da composição gravimétrica, peso

específico e teor de umidade dos resíduos aterrados, cujos procedimentos de ensaio a seguir se descrevem.

3.6.1 Composição Gravimétrica

A composição dos resíduos sólidos urbanos apresenta-se como um dos fatores que podem afetar o processo de compactação dos resíduos (FASSETT et al., 1994 e BOLTON, 1995). Visando minimizar elevadas variações na composição dos resíduos, executou-se o aterro experimental com resíduos oriundos de setores de coleta com semelhantes características (fontes geradoras e padrões urbanos) no município de São Paulo. Para confirmação deste propósito foram realizadas, de forma amostral, caracterizações físicas dos resíduos, através da determinação da sua composição gravimétrica (porcentagem de cada componente em relação ao peso total do resíduo).

A caracterização física dos resíduos incluiu os seguintes procedimentos básicos: seleção das amostras; homogeneização e quarteamento; e caracterização física.

a) Seleção das Amostras

Durante a execução de determinadas etapas construtivas (1^a, 4^a, 7^a, 8^a, 9^a e 10^a na praça de trabalho em planos horizontais e 2^a, 3^a e 5^a na praça em planos inclinados) foram coletadas amostras de cerca de 10.000 kg na pilha de descarga dos veículos coletores, ou alternativamente desviado o volume total de um coletor, para a área destinada aos ensaios de caracterização. Em algumas etapas construtivas (7^a e 10^a da praça de trabalho em planos horizontais), face a magnitude dos volumes envolvidos nas mesmas, foram executados dois ensaios para caracterização dos resíduos aterrados. Tal caracterização utilizou amostras finais com cerca de 500 a 600kg, obtidas após as etapas de homogeneização e quarteamento de lotes iniciais de aproximadamente 10.000kg, garantindo assim uma boa amostragem do material (KLEE & CARRUTH, 1970). No total foram realizados 11 (onze) ensaios de composição gravimétrica. Todos os ensaios foram executados na ausência de chuvas, uma vez que as mesmas poderiam prejudicar e distorcer os resultados. Materiais mais susceptíveis a absorverem umidade (papel e papelão) poderiam, por exemplo, ter o seu peso alterado, maximizando sua participação em detrimento a outros componentes da amostra.

b) Homogeneização e Quarteamento

Face à elevada heterogeneidade dos resíduos, assume relevada importância o processo de homogeneização das amostras para que as mesmas sejam representativas do seu material de

origem. Tal processo foi iniciado na área de ensaio e sobre laje de concreto armado (dimensões de 10,0m x 10,0m), especificamente construída para este fim, com o rasgamento dos sacos de lixo, serviço este executado com o auxílio de garfos e foices. Seguiram-se os trabalhos de mistura e homogeneização da pilha de resíduos com o auxílio de uma pá carregadeira, visando a obtenção de uma massa visivelmente uniforme.

A partir daí foi feito o quarteamento das amostras de forma a reduzir a quantidade inicialmente coletada para cerca de 500 a 600kg. O procedimento obedecido neste quarteamento consistiu na separação em 4 partes com aproximadamente mesmo peso (cerca de 2.500kg) desprezando em seguida duas partes “vis-à-vis”. As 2 partes restantes (cerca de 5.000kg) eram então novamente misturadas e homogeneizadas para novo quarteamento, resultando em 4 montes de aproximadamente 1.250kg. Assim como no primeiro quarteamento foram descartadas duas partes e as restantes misturadas. Este procedimento foi repetido até que a amostra final apresentasse cerca de 500 a 600kg. Tal procedimento foi utilizado previamente por CASTRO (1996) para caracterização dos resíduos sólidos urbanos de diferentes regiões do município de São Paulo.

c) Caracterização Física

Esta atividade foi iniciada com o estabelecimento dos 12 (doze) grupos de materiais utilizados para a classificação dos componentes presentes nos resíduos. Tais grupos foram baseados no trabalho de CASTRO (1996) e envolveram os seguintes materiais:

Grupo 1: plástico filme (sacos de lixo e de supermercado, embalagens tipo “magipack”, etc.);

Grupo 2: plástico duro;

Grupo 3: vidro;

Grupo 4: sucata e latas de ferro;

Grupo 5: alumínio;

Grupo 6: papel;

Grupo 7: papelão;

Grupo 8: matéria orgânica;

Grupo 9: couro, borracha e madeira (sapato, colchões, tapetes, armários, etc);

Grupo 10: material de composição mista ou composição dupla (papel com alumínio, plástico filme com alumínio, etc);

Grupo 11: tecidos e trapos (tendas, roupas, estopa, etc).

Grupo 12: material contaminado (pilhas, lâmpadas fluorescentes, remédios, seringas, etc);

Sobre as amostras finais homogeneizadas foi realizada a separação manual dos diversos materiais constituintes, de acordo com os grupos anteriormente citados. Para cada um desses grupos foram determinados os seus pesos, com auxílio de tambores de 100 litros, nos quais eram depositados em cada ensaio os respectivos constituintes. Os resultados obtidos eram anotados em planilha própria especificamente desenvolvida para este fim, cujo modelo está apresentado no Apêndice II deste trabalho. Apesar de indicado na referida planilha, o teor de umidade dos resíduos não foi determinado nos ensaios de caracterização.

3.6.2 *Peso Específico dos Resíduos*

A determinação do peso específico dos resíduos foi realizada imediatamente após o término das operações de compactação, através da execução de ensaios de cava em cada quadrante de teste e em cada etapa construtiva do aterro experimental. O ensaio consistia na abertura manual de uma cava com larguras entre 0,60 e 0,90m e comprimentos entre 1,00 e 1,20m, sendo a altura da mesma igual a espessura da camada do quadrante de teste. O material escavado era pesado, seguido do revestimento da cava com manta plástica impermeável e flexível. O ensaio prosseguia com o preenchimento da cava com água e conseqüente determinação do seu volume, através da utilização de reservatório graduado. Por fim, o volume de preenchimento era esgotado e se recompunha a cava manualmente com o resíduo escavado. Do material escavado, eram separadas, no mínimo, 3 (três) amostras para determinação, no laboratório de campo, do teor de umidade do resíduo. A Figura 3.6.1 apresenta a seqüência de execução dos ensaios para determinação do peso específico *in situ* do material. Em síntese, para cada área compactada foram realizados ensaios de determinação de peso específico, a partir da abertura de cava com dimensões definidas, na retirada e pesagem do resíduo escavado e na posterior determinação do volume da cava. De posse do peso e do volume de resíduo retirado, determinava-se o peso específico do resíduo. A Figura 3.6.2 ilustra alguns dos procedimentos descritos, conforme executados no campo.

Os trabalhos de escavação eram iniciados com a colocação sobre a camada de resíduos de um gabarito de madeira com as dimensões da cava a ser aberta. Com o auxílio de pás e enxadas, a cava era aprofundada até ser encontrado o contato com a fundação (1^a etapa construtiva) ou com as camadas subjacentes (demais etapas construtivas). Para evitar a presença de reentrâncias nas paredes laterais das cavas todo material tipo plástico, tecidos, panos, etc eram cortados com faca junto à face das paredes.

Nos primeiros ensaios foi utilizada uma manta de PVC com 1,0mm de espessura para revestimento da cava. Entretanto, verificou-se que a mesma não possibilitava uma perfeita conformação às irregularidades das paredes laterais das cavas interferindo nos resultados.

Assim, a manta de PVC foi substituída pelo mesmo filme plástico amarelo utilizado para a cobertura e separação das camadas, o que se mostrou adequado à execução dos ensaios.

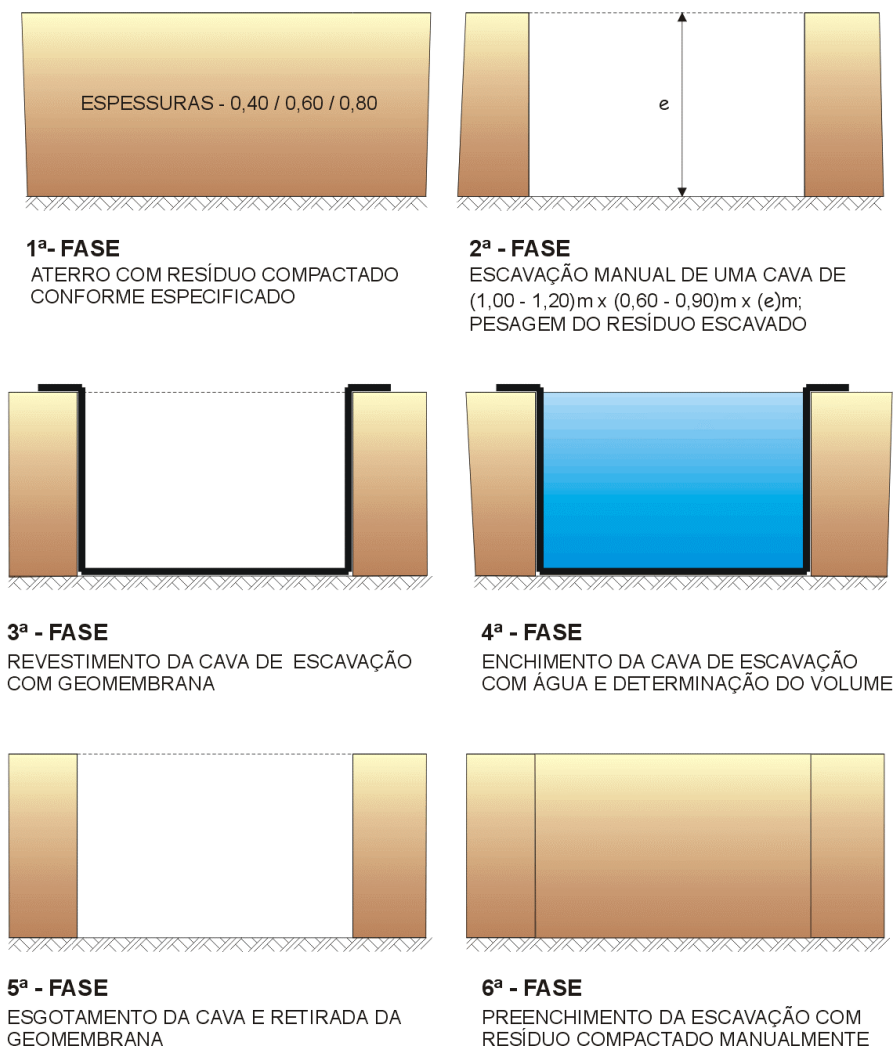


Figura 3.6.1 – Sequência de execução dos ensaios para determinação do peso específico *in situ* dos resíduos.

Durante a execução dos ensaios algumas adaptações tiveram que ser feitas para a adequada determinação do peso específico *in situ* dos resíduos. Face a irregularidade das camadas de resíduos após os serviços de compactação, a determinação do volume das cavas com base no volume de preenchimento das mesmas com água teve que ser complementada pelo cálculo de um volume adicional que levasse em conta as diferentes profundidades (alturas) observadas em pontos distintos da cava. Para o cálculo deste volume adicional eram determinados, após o preenchimento com água, as alturas entre o nível de água e o topo da camada de resíduo em 9 (nove) pontos da cava (vértices, centro e ponto médio das paredes laterais), assim como a largura e comprimento segundo 3 (três) distintos alinhamentos em ambas as dimensões. O preenchimento da cava com água era interrompido no momento em

que se observava o início de extravazão de água por algum ponto, no caso o ponto de menor elevação. De posse das alturas, larguras e comprimentos medidos calculava-se o volume adicional de material, como sendo o resultado da soma de 4 (quatro) prismas. A Figura 3.6.3 procura ilustrar o procedimento adotado para cálculo deste volume adicional.



Figura 3.6.2 – Detalhes da execução dos ensaios para determinação do peso específico *in situ* dos resíduos.

Tal procedimento foi utilizado a partir da 2ª etapa construtiva da praça de trabalho em planos horizontais. Na 1ª etapa, a avaliação do referido volume adicional foi igualmente realizada, porém tendo por base um prisma único definido pelas alturas registradas nos 4 vértices da cava escavada.

No caso da praça em planos inclinados, os ensaios de cava foram realizados segundo o mesmo procedimento, porém desprezando o prisma triangular correspondente a parte superior da cava escavada, conforme pode ser observado na Figura 3.6.3. Os resultados dos ensaios realizados foram anotados em planilhas padrão, apresentadas no Apêndice II, as quais foram desenvolvidas especificamente para este fim. Com a execução dos ensaios e a necessidade de certas adequações à metodologia inicialmente proposta, um modelo mais adequado de planilha, considerando, por exemplo, os parâmetros para o cálculo do volume adicional da cava, foi desenvolvido estando igualmente apresentado no referido apêndice deste documento.

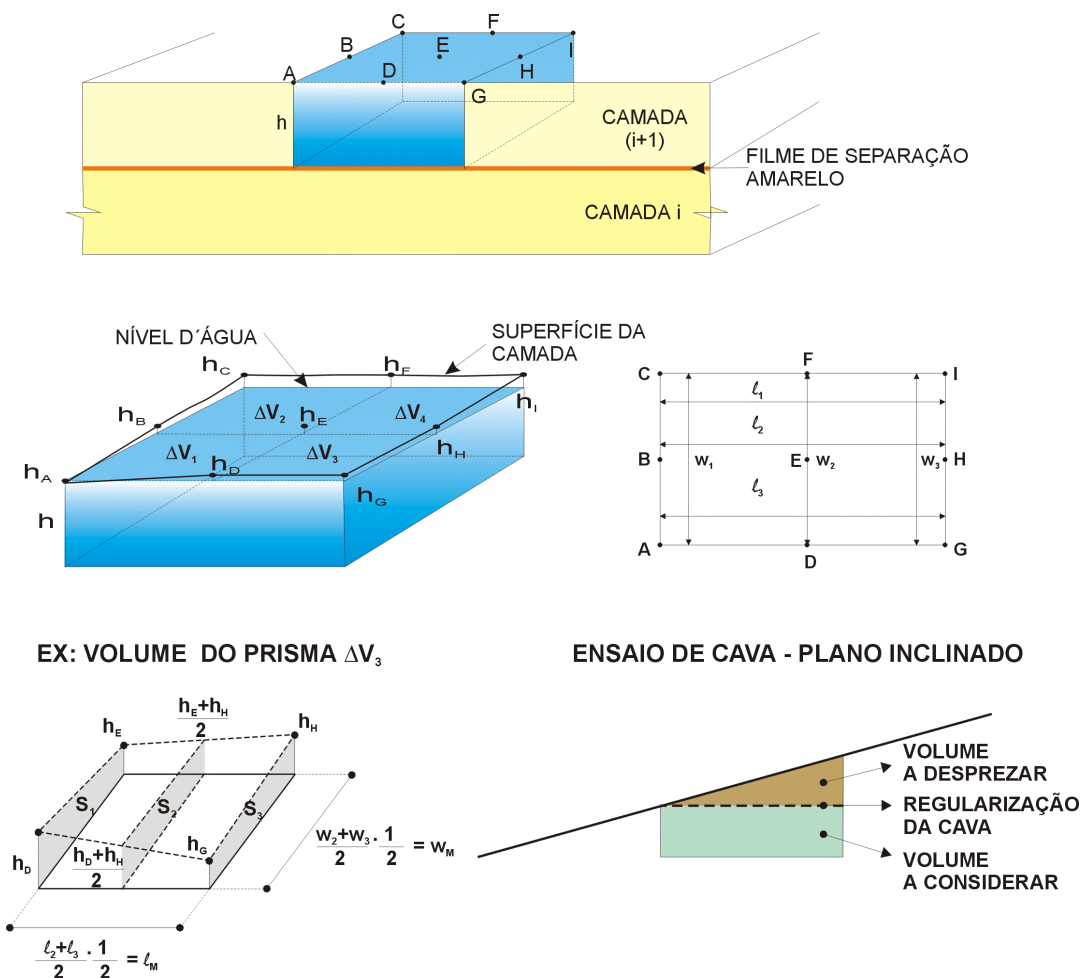


Figura 3.6.3 – Procedimento para determinação dos volumes adicionais das cavas de ensaio.

A partir da 2^a. camada, o procedimento descrito também foi realizado nas camadas subjacentes da praça de trabalho em plano horizontal, com o intuito de definir a influência das tensões sobrejacentes nas densidades das camadas já compactadas. A colocação do filme plástico colorido permitiu definir o contato entre camadas. Este procedimento, no entanto, não se mostrou viável face a dificuldade de sua realização, nomeadamente para profundidades superiores a 1,0m, e por também resultar em valores totalmente inconsistentes. A avaliação da densidade das camadas inferiores, neste sentido, foi realizada com base em medidas indiretas, oriundas do nivelamento topográfico da base das camadas nos pontos de ensaio, após cada operação de compactação. Neste caso, após finalizado o ensaio da camada superior, a cava era aprofundada até serem encontrados os sucessivos contatos das camadas, sendo estes níveis registrados topograficamente. Tal escavação, por sua vez, foi executada por escavação manual até a 7^a etapa construtiva, sendo a partir daí realizada com auxílio de retro-escavadeira posicionada na área de manobra.

A localização dos ensaios para determinação do peso específico em cada camada foi previamente definida nos estudos, de forma que em planta os pontos respeitassem uma equidistância mínima de cerca de 2,0m, procurando sempre a região central do quadrante de teste e evitando a coincidência de locação de ensaios entre etapas construtivas distintas. A Figura 3.6.4 apresenta o conceito utilizado e como exemplo a locação das cavas de ensaio para os quadrantes com espessura projetada de 0,40m e 0,60m submetidos a 6 passadas do equipamento. No Apêndice I apresenta-se a locação das cavas de ensaio em todos os quadrantes de teste do aterro experimental em sua praça de trabalho em planos horizontais.

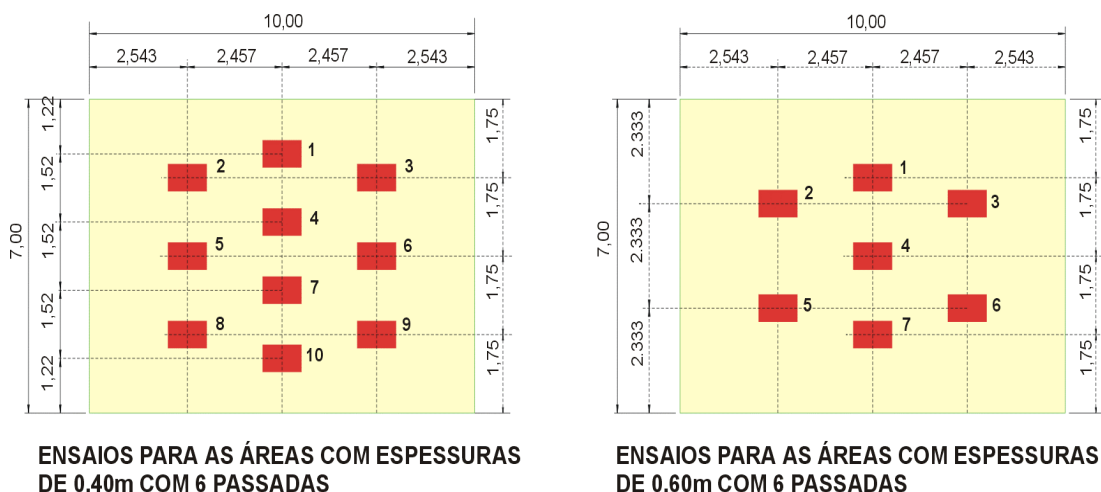


Figura 3.6.4 – Locação das cavas para os ensaios de determinação do peso específico *in situ*.

Para cada cava ensaiada foram realizadas pelo menos duas determinações de seu volume, ou seja, após um ensaio completo, a cava era totalmente esgotada, sendo iniciado um novo

preenchimento com água e novas determinações das dimensões básicas para cálculo do volume adicional. Em cada etapa construtiva e imediatamente após a operação de lançamento, foram realizadas algumas determinações do peso específico dos resíduos “soltos”, segundo o procedimento mencionado, para avaliar a eficiência da compactação (densificação) dos mesmos.

Foram realizados um total de 179 ensaios de cava, segundo o procedimento descrito, sendo 143 na praça de trabalho em plano horizontal, 21 na praça em planos inclinados e 15 com resíduos soltos, previamente à sua compactação. A Tabela 3.6.1 apresenta uma síntese dos ensaios realizados.

Tabela 3.6.1 – Ensaios para determinação do peso específico *in situ* dos resíduos.

TESTES E MEDIÇÕES	ETAPAS CONSTRUTIVAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ
<i>Praça de Trabalho em Plano Horizontal – Resíduos Compactados</i>											
<i>Rolo Compactador 816F</i>											
Massa	9	3	6	12	6	9	10	3	6	6	70
Volume	9	6	11	24	12	18	20	6	12	12	130
Peso Específico	9	6	11	24	12	18	20	6	12	12	130
<i>Trator de Esteiras D6D</i>											
Massa	9	4	6	12	6	9	9	3	6	9	73
Volume	23	8	12	24	12	18	18	6	12	18	151
Peso Específico	23	8	12	24	12	18	18	6	12	18	151
<i>Praça de Trabalho em Plano Horizontal – Resíduos Soltos</i>											
Massa	-	-	3	2	2	2	2	2	2	-	15
Volume	-	-	6	4	4	4	4	4	4	-	30
Peso Específico	-	-	6	4	4	4	4	4	4	-	30
<i>Praça de Trabalho em Plano Inclinado – Resíduos Compactados</i>											
Massa	3	3	3	3	3	3	3	-	-	-	21
Volume	6	6	6	6	6	6	6	-	-	-	42
Peso Específico	6	6	6	6	6	6	6	-	-	-	42

3.6.3 Teor de Umidade

A determinação do teor de umidade do resíduo foi realizada para cada amostra coletada durante os ensaios de peso específico *in situ*. Para cada ensaio foram coletadas 3 (três) amostras, as quais eram acondicionadas em recipiente próprio, pesadas imediatamente após a coleta, colocadas em estufa com temperatura controlada em 60°C, para evitar a queima do material volátil, e novamente pesada, após a secagem do material. Tais ensaios e determinações foram realizados no laboratório de campo localizado no Aterro Bandeirantes.

O valor do teor de umidade foi obtido em termos do peso seco do material, ou seja, baseada na relação entre o peso da água contida nos resíduos e o peso dos sólidos (peso do resíduo após secagem em estufa). Foram realizados 429 ensaios para determinação do teor de

umidade dos resíduos, correspondentes às duas praças de trabalho e às distintas etapas construtivas e quadrantes de teste do aterro experimental. A Tabela 3.6.2 apresenta a distribuição dos ensaios executados nas diversas etapas construtivas.

Tabela 3.6.2 – Ensaios para determinação do teor de umidade dos resíduos.

PRAÇA DE TRABALHO	ETAPAS CONSTRUTIVAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ
Planos Horizontais	54	24	36	36	24	54	45	18	36	42	369
Planos Inclinados	9	9	9	9	9	9	6	-	-	-	60

3.7 Controle Topográfico e Instrumentação de Campo

Os serviços topográficos envolveram basicamente dois tipos de controles. Em um primeiro grupo incluem-se os levantamentos visando à determinação das espessuras lançadas e compactadas dos resíduos nas diversas etapas construtivas do experimento. O outro grupo corresponde ao controle da instrumentação instalada, visando à avaliação das deformações verticais e horizontais do aterro experimental e do aterro principal.

3.7.1 Controle das Espessuras das Camadas

Após todas as operações de lançamento, compactação, ensaios *in situ*, etc, era realizado de forma sistemática e intensiva o nivelamento das praças de trabalho em diversos pontos internos aos quadrantes. Tal controle permitiu, de forma indireta, avaliar a eficácia da compactação e a compressão dos materiais após cada etapa executiva, tanto das camadas superiores como das inferiores.

O controle topográfico visando a determinação das espessuras lançadas e compactadas dos resíduos envolveu os seguintes levantamentos:

- nivelamento dos quadrantes de teste antes e após lançamento dos resíduos e imediatamente após a compactação dos mesmos para cada etapa construtiva. Tal nivelamento foi realizado no ponto central do quadrante e nos centros das cavas de ensaio previstas para o respectivo quadrante. O propósito do nivelamento do centro das cavas de ensaio era obter um conjunto maior de pontos no interior do quadrante de teste;
- locação e nivelamento do topo e base de cada cava de ensaio para determinação do peso específico *in situ*. O nivelamento do topo era executado imediatamente antes do início do ensaio e o da base após a abertura da cava;

- nivelamento dos contatos entre camadas durante a escavação e abertura de cava de ensaio. Tal nivelamento era realizado tendo por base a identificação de filme plástico amarelo presente entre as camadas;

A determinação das espessuras lançadas também levou em conta a deformação do maciço principal, obtida através das leituras das placas de recalque instaladas. Tal consideração se fez necessária visto que as operações de lançamento, dependendo da etapa construtiva, demandavam cerca de 3 a 4 dias de trabalho. Nestes casos, a espessura lançada, calculada como a diferença entre as leituras antes e após o lançamento dos materiais, foi acrescida da parcela de recalque registrada no período de tempo entre os controles efetuados (início e término do lançamento). Para a obtenção das espessuras lançadas dos resíduos, trabalhou-se ainda com os valores médios dos diversos pontos levantados em cada quadrante de teste, sendo desprezadas as leituras inconsistentes. O nivelamento do contato entre camadas durante a escavação das cavas de ensaio foi a base de dados para a avaliação das espessuras compactadas das camadas de resíduo.

3.7.2 Controle da Instrumentação de Campo

Dois conjuntos de instrumentos foram controlados topograficamente durante e após a execução do aterro experimental, quais sejam: marcos superficiais e placas de recalque.

Os marcos superficiais, por sua vez, foram instalados em duas fases, conforme descrito no item 3.2.5. A primeira fase envolveu 20 (vinte) marcos superficiais, locados em área externa ao experimento, sendo a leitura inicial realizada em 30/04/97, pouco antes do lançamento da 1^a camada de resíduos no aterro experimental. O controle destes marcos envolveu principalmente o nivelamento dos marcos, ou seja, a leitura das deformações verticais dos mesmos, sendo em algumas leituras também registradas as deformações horizontais dos instrumentos. O controle foi realizado ao longo de toda a execução do experimento, sendo as leituras realizadas em datas-marco pré-estabelecidas (lançamento e/ou compactação de camadas). Após a conclusão do experimento, as leituras e controles tiveram prosseguimento com periodicidade mensal. Para efeito do estudo de compressibilidade foram utilizadas as leituras realizadas até 17/04/2000, totalizando um período de cerca de 3 anos de observação.

Os marcos superficiais de 2^a fase envolveram 21 novos instrumentos locados sobre as duas praças de trabalho do aterro experimental. Os marcos foram instalados após a conclusão e fechamento do aterro, sendo a leitura inicial realizada em 30/03/98. O controle destes marcos envolveu unicamente o registro das deformações verticais com uma periodicidade

mensal. Para efeito do estudo de compressibilidade foram utilizadas as leituras realizadas até 17/04/2000, totalizando um período de cerca de 2 anos de observação.

As placas de recalque foram instaladas à mesma época dos marcos superficiais de 1ª fase. À semelhança destes marcos, estes equipamentos foram monitorados durante toda a construção do experimento, subsidiando não só o estudo de compressibilidade, mas também a aferição e determinação das espessuras lançadas dos resíduos. Para este último caso, o controle das placas foi realizado antes e depois do lançamento dos resíduos e após a compactação das camadas. A Figura 3.7.1 ilustra o procedimento executado imediatamente após a compactação dos resíduos. Vale mencionar que as placas de recalque foram constituídas por hastes com extremidades rosqueáveis, o que permitiu o acoplamento de novos segmentos e extensões, conforme se processava o alteamento do aterro.

As placas de recalque foram monitoradas até 01/09/98, com uma leitura isolada em 16/08/99, totalizando um período total de cerca de 2,3 anos, o qual foi utilizado no estudo de compressibilidade.

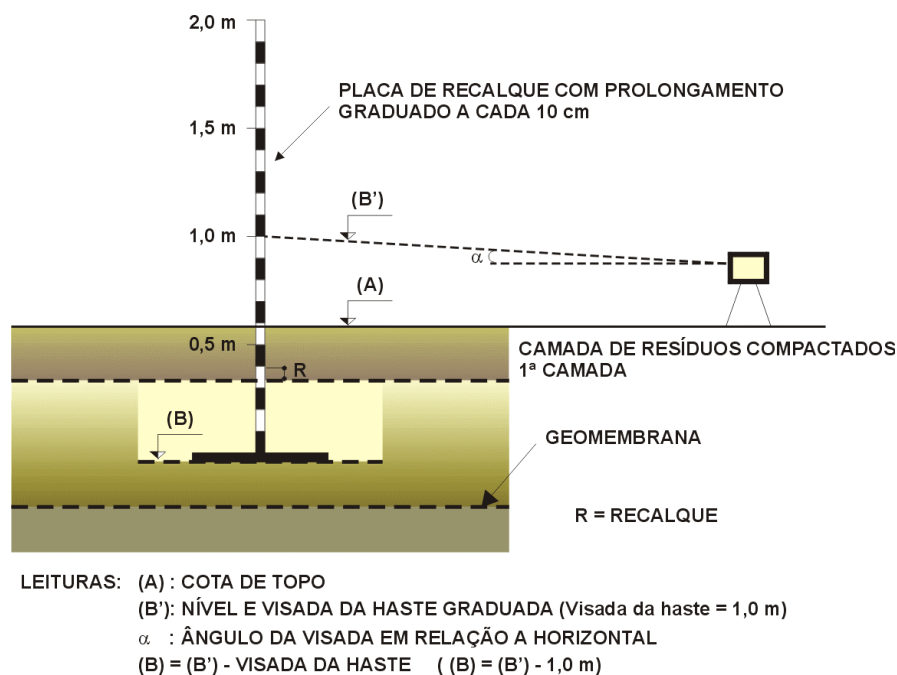


Figura 3.7.1 – Procedimento de controle das placas de recalque após as operações de compactação dos resíduos.

3.8 Controle Pluviométrico e Caracterização dos Líquidos Percolados

Alguns controles e ensaios foram realizados durante o experimento, visando a avaliação do efeito da compactação intensiva na geração dos líquidos percolados no aterro experimental. Tais controles e ensaios incluíram o registro pluviométrico e a caracterização dos líquidos percolados, em termos de sua quantidade e qualidade.

3.8.1 Controle Pluviométrico e Dados Climatológicos

O registro das precipitações ocorridas em um período de 24 horas foi realizado diariamente, durante e após o período de execução do aterro experimental. As precipitações foram registradas no início da manhã (7:00h), em pluviômetro padrão instalado na área do Aterro Sanitário Bandeirantes, em uma distância aproximada de 200m do aterro experimental.

Outros dados climatológicos de interesse para o estudo e a avaliação teórica dos volumes de líquidos gerados no aterro experimental envolveram: temperaturas diárias, evapotranspiração mensal, umidade relativa, insolação e velocidade média dos ventos. Para a obtenção destes dados foi selecionado o posto climatológico Mirante Santana, localizado no município de São Paulo, nas proximidades da área do Aterro Sanitário Bandeirantes. Tal posto é operado pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), sendo identificado pelo código 2346117.

3.8.2 Caracterização Físico-Química dos Líquidos Percolados

A caracterização físico-química dos líquidos percolados no aterro experimental, em sua praça de trabalho em planos horizontais, foi realizada tendo por base uma campanha de amostragem iniciada em 07/10/97, logo após os serviços de compactação da 9^a etapa construtiva do experimento, e que se estendeu até 02/02/99, totalizando um período de cerca de 1,3 anos.

Os ensaios envolveram a determinação de 23 diferentes parâmetros e foram realizados pela empresa ATEMAE (Assessoria Técnica em Serviços para o Meio Ambiente). Todos os ensaios e métodos de análise respeitaram os procedimentos preconizados pela American Public Health Association (APHA, 1989).

As amostras foram coletadas na caixa de recepção dos líquidos percolados, sendo os mesmos acondicionados em frascos plásticos. A amostragem dos líquidos percolados obedeceu a frequências semanais, quinzenais e mensais, em função do parâmetro a ser determinado e do tempo após o encerramento do aterro experimental. Neste sentido, durante os primeiros 4 (quatro) meses de controle foram respeitadas as frequências e ensaios a seguir indicados:

- frequência de 7 dias: ensaios para determinação da DQO (Demanda Química de Oxigênio)

- frequência de 15 dias: ensaios para determinação da condutividade específica; pH (laboratório e campo); Nitrogênio Nitrato; Nitrogênio Amoniacal; Fenóis e Sólidos Sedimentáveis.
- frequência de 30 dias: ensaios para determinação de Cloretos; Cianetos; Fluoretos; DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio); Sólidos Totais e Dissolvidos; Sólidos Suspensos; e metais pesados, incluindo Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cromo, Mercúrio, Prata e Zinco.

Neste período houve uma falha de registros no mês 3 (Dezembro/97) com relação aos controles semanais e quinzenais. Após este período inicial (4 meses), as amostragens e ensaios foram realizados com frequência mensal até 03/11/98. Após esta data, uma última amostragem e série de ensaios foi realizada em 02/02/99, ou seja, respeitando neste caso, uma periodicidade trimestral. A Tabela 3.8.1 apresenta as campanhas e ensaios realizados durante o experimento.

3.8.3 Medição de Vazões dos Líquidos Percolados

A medição de vazões dos líquidos percolados foi realizada junto ao vertedor triangular instalado na caixa de recepção com pelo menos uma leitura diária. Durante a execução do experimento procurou-se realizar duas determinações ao longo do dia, normalmente pela manhã, logo ao início dos trabalhos, e à tarde, ao fim da jornada de serviços. Nos períodos chuvosos, e na medida do possível, medições complementares foram realizadas para melhor integração e determinação dos volumes gerados na praça de trabalho em planos horizontais. Tal controle foi iniciado em 07/10/97, após os serviços de compactação da 9^a etapa construtiva, sendo realizado de forma quase ininterrupta até o mês de Julho de 1999 (algumas falhas foram registradas no período de controle, nomeadamente nos meses de Jan/98, Fev/98, Mai/99, Jun/99 e Jul/99).

As medidas, via correlação com a geometria do vertedor triangular, foram realizadas a partir da observação da lâmina vertente sobre o vertedor, a qual foi registrada com o auxílio de régua graduada instalada junto ao mesmo. A equação para correlação da altura da lâmina com a vazão dos líquidos percolados está apresentada no item 3.2.4. As vazões dos líquidos percolados foram igualmente avaliadas com auxílio de recipientes graduados posicionados imediatamente a jusante do vertedor. Recipientes plásticos com capacidade para armazenamento de cerca de 2.000ml e cronômetros para registro do tempo foram utilizados neste caso. Tal procedimento permitiu assim, que a partir do registro dos tempos e volumes

Tabela 3.8.1 – Caracterização físico-química dos líquidos percolados – Campanhas efetuadas.

PARÂMETROS ENSAIADOS	CAMPANHAS EFETUADAS																							
	1997											1998											1999	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		
ANO DIA/MÊS	07/ 10	14/ 10	21/ 10	28/ 10	04/ 11	12/ 11	18/ 11	25/ 11	30/ 12	06/ 01	13/ 01	20/ 01	03/ 03	07/ 04	06/ 05	01/ 06	01/ 07	11/ 08	01/ 09	06/ 10	03/ 11	02/ 02		
Arsênio	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Bário	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Cádmio	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Chumbo	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Cianeto	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Cloro	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Condutividade Específica	X		X		X		X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Cromo Total	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
DBO	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
DQO	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Fenóis	X		X		X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Fluoreto	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Mercurio	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Nitrogênio Amoniacal	X		X		X		X		X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Nitrogênio Nitrato	X		X		X		X		X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
pH	X		X		X		X		X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Prata	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Sólidos Totais	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Sólidos Dissolvidos Totais	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Sólidos Suspensos Totais	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Sólidos Sedimentáveis	X		X		X		X		X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Zinco	X				X			X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
pH (campo)	X		X		X			X			X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		

de acumulação dos líquidos percolados, fossem obtidas as vazões geradas. As vazões geradas, no instante da leitura, foram determinadas como o valor médio de 3 (três) medições sucessivas de volume e tempo. Este método de controle complementar se fez necessário, uma vez que para pequenas vazões e conseqüentemente pequenas lâminas sobre o vertedor triangular, imprecisões eram geradas, tanto nos coeficientes da correlação entre lâmina e vazão, como na medição da altura da lâmina vertente, invalidando a equação apresentada no item 3.2.4. A vazão diária foi obtida a partir da integração das leituras realizadas ao longo de um período de 24 horas.

3.9 Serviços Complementares

Durante a execução do aterro experimental alguns serviços e atividades complementares foram realizadas, podendo ser destacados:

- desinfecção da área de trabalho: durante a execução dos ensaios foi necessária a utilização de procedimentos e técnicas de desintetização em toda a área do aterro experimental, face ao elevado número de moscas que se proliferavam nos resíduos lançados. Tal sistemática foi efetuada ao início de cada etapa executiva, visando garantir as condições de trabalhabilidade na praça e a segurança dos técnicos e operadores. Ressalte-se que os produtos utilizados tiveram sua dosagem e lançamento muito bem caracterizados, sendo escolhidos produtos com mínimo impacto ambiental.
- sinalização das praças de trabalho: visando facilitar as operações de lançamento e compactação, assim como o controle das diversas variáveis envolvidas no experimento foram instaladas placas de sinalização junto aos quadrantes e faixas de ensaio, com as respectivas características das mesmas. Além disto todo o aterro foi piqueteado para fácil identificação dos quadrantes de teste e áreas de manobra e acesso. Tal intervenção se fez necessária, visto que principalmente após o posicionamento do filme plástico amarelo, demarcatório do contato entre camadas, todas as referências anteriores eram perdidas.
- reorganização de acessos e dispositivos de drenagem: durante e principalmente após a construção do aterro experimental, foram realizados alguns serviços para reorganização dos acessos e da drenagem superficial existente. Dentre estes, merece destaque, a execução de reaterro com solo, envolvendo uma altura de cerca de 1,5m, na área localizada entre a praça de trabalho em planos horizontais e em planos inclinados. Tal reaterro foi necessário para possibilitar um melhor acesso e operação dos equipamentos de lançamento após a 3^a. etapa construtiva do aterro (praça em planos horizontais). Tal intervenção resultou na eliminação dos marcos superficiais MSE15, MSE16 e MSE17.

Capítulo 4

ESTUDO DE COMPACTAÇÃO: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O estudo de compactação desenvolvido foi baseado nos ensaios, controles e levantamentos realizados durante a construção do aterro experimental. Tais estudos envolveram a obtenção de parâmetros e modelos de comportamento para caracterização e entendimento das propriedades de compactação dos resíduos sólidos urbanos, incluindo a influência de distintas técnicas operacionais na densificação dos materiais. O estudo envolveu ainda a avaliação do efeito da compactação no incremento do peso específico com a profundidade, na compressibilidade dos resíduos e na geração dos líquidos percolados no aterro experimental. Descrevem-se na seqüência as diversas análises e resultados destes estudos.

4.1 Composição Gravimétrica dos Resíduos

A distribuição média dos componentes, considerando todo o conjunto de resultados está ilustrada na Figura 4.1.1, podendo ser sintetizada como: plástico duro (4,1%), plástico filme (8,5%), tecidos (3,5%), vidro (1,3%), alumínio (0,7%), couro, borracha e madeira (5,3%), sucata e latas de ferro (3,5%), papel (5,9%), papelão (6,5%), material de composição mista (4,4%) e matéria orgânica (56,3%). A Tabela 4.1.1, por sua vez, apresenta, os resultados individualizados dos 11 (onze) ensaios realizados, assim como análise estatística, em termos dos valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação dos componentes. A composição dos resíduos sólidos urbanos utilizados no aterro experimental, obtida através de 11 (onze) determinações realizadas, apresentou elevada variação, confirmando a grande heterogeneidade destes materiais, mesmo para setores de coleta com idênticos padrões urbanos e características de geração. Coeficientes de variação para os componentes,

definidos como a razão entre o desvio padrão e o valor médio de uma amostra, situam-se entre 14,7% (matéria orgânica) e 83,0% (couro, borracha e madeira). Eliminando os valores extremos (mínimo e máximo) registrados para cada grupo de materiais, admitindo eventuais problemas na amostragem ou tendências isoladas, obtêm-se coeficientes de variação na faixa entre 11,2% (matéria orgânica) e 44,1% (sucata e latas de ferro), com mínimo impacto nos valores médios. Tais valores estão coerentes com as variações obtidas por CASTRO (1996) para resíduos sólidos urbanos oriundos de setores de coleta com semelhantes características.

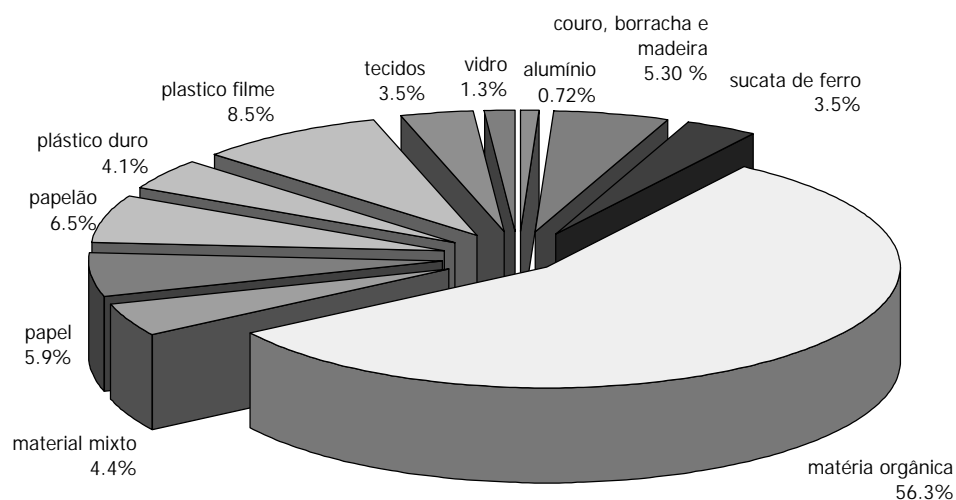


Figura 4.1.1 – Composição média dos resíduos sólidos urbanos empregados no aterro experimental.

Alguns pontos de interesse podem ser destacados a partir da análise dos resultados: (i) a presença de materiais do grupo 12 (pilhas, lâmpadas fluorescentes, remédios, seringas, etc) foi insignificante, tendo sido as pequenas quantidades reportadas desprezadas para efeito da definição da composição do material; (ii) os materiais dos grupos 4 (sucatas e latas de ferro) e 8 (couro, borracha e madeira), por sua vez, são os que apresentam maior variabilidade de participação ao longo dos ensaios executados; (iii) os materiais pertencentes ao grupo 8, classificados como matéria orgânica (restos alimentares, podas, vegetação, etc), constituem o componente principal dos resíduos utilizados no experimento, apresentando ainda a menor variabilidade, em termos de sua participação na composição dos resíduos, nos ensaios executados.

O estudo de compactação desenvolvido não considerou a composição dos resíduos como uma variável adicional na análise, procurando, no entanto, caracterizar a distribuição de seus componentes e minimizar a variabilidade dos mesmos. Deve-se ter presente, portanto, que o

estudo tem sua aplicabilidade válida para resíduos com composição média similar aos aqui apresentados.

Tabela 4.1.1 – Ensaios de composição gravimétrica

ENSAIOS	GRUPO DE MATERIAIS (% em peso) ^(*)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	17,1	4,0	1,0	4,7	0,9	5,5	6,7	49,7	4,1	2,9	3,5
2	7,1	4,4	1,2	3,3	0,8	9,4	5,8	57,0	3,5	4,2	3,3
3	7,8	5,2	0,7	2,7	0,3	1,9	11,0	48,4	17,5	3,7	0,9
4	9,7	4,9	1,8	6,4	0,8	6,2	11,1	41,7	6,9	6,3	4,2
5	8,1	6,1	2,0	4,7	1,1	8,4	6,9	50,7	3,3	4,9	3,9
6	6,4	2,8	1,3	1,5	0,8	5,4	3,8	61,2	7,6	5,2	4,0
7	8,3	3,7	0,7	1,7	0,5	3,6	3,9	68,7	3,6	3,6	1,8
8	2,6	2,4	0,6	6,1	0,5	6,1	4,3	65,7	3,3	4,2	4,2
9	8,3	3,5	0,9	1,3	0,8	5,7	7,1	61,8	3,2	3,5	3,9
10	11,3	3,6	1,2	2,9	0,8	5,3	8,8	52,7	3,0	4,9	5,4
11	7,2	4,4	3,0	3,1	0,8	7,2	2,1	61,5	2,3	5,2	3,3
Média	8,5	4,1	1,3	3,5	0,7	5,9	6,5	56,3	5,3	4,4	3,5
Desvio Padrão	3,6	1,1	0,7	1,8	0,2	2,1	2,9	8,3	4,4	1,0	1,2
Coefficiente de Variação ^(**)	42,4	26,8	53,8	51,4	28,6	35,6	44,6	14,7	83,0	22,7	34,3
Coefficiente de Variação ^(***)	18,3	19,5	33,3	44,1	14,3	22,0	36,9	11,2	39,5	15,9	22,9

(*) Grupos: (1) plástico filme; (2) plástico duro; (3) vidro; (4) sucata e latas de ferro; (5) alumínio; (6) papel; (7) papelão; (8) matéria orgânica; (9) couro, borracha e madeira; (10) material de composição mista; (11) tecidos e trapos.

(**) valores calculados considerando todos os resultados do grupo.

(***) valores calculados eliminando os resultados extremos do grupo.

4.2 Teor de Umidade

A Tabela 4.2.1 apresenta os teores de umidade determinados para as diferentes etapas construtivas e áreas (quadrantes) de teste do aterro experimental. Os valores apresentados representam a média dos ensaios realizados, normalmente em número de 3 (três) por área de teste. Os teores de umidade foram calculados em termos do peso seco do material. A análise dos resultados permite observar valores superiores a 100% para boa parte dos casos, com um valor médio igual a 146,1%, desvio padrão de 88,9% e coeficiente de variação de 60,9%.

Os valores apresentados foram determinados a partir de amostras coletadas durante os ensaios de densidade *in situ*. Em certos casos, tais ensaios foram executados alguns dias após as operações de compactação dos resíduos, gerando eventualmente variações de umidade entre o instante da compactação e o da amostragem, por conta de evaporação e precipitação. A colocação de filme plástico amarelo ao término das operações de compactação teve

também por função minimizar esta variação, nomeadamente à relativa a evaporação. Quanto às precipitações, registre-se que somente durante uma das etapas construtivas (2ª etapa da praça de trabalho em planos horizontais) foi observada ocorrência de chuvas mais intensas no período entre a compactação e amostragem (precipitações entre 45 e 65mm). Os resultados desta etapa, no entanto, apresentaram valores próximos ao teor de umidade médio, demonstrando, em princípio, terem sido pouco impactados pelas chuvas observadas no período. Assumiu-se, desta forma, que os valores obtidos correspondiam aos teores de umidade dos resíduos no instante da compactação das praças de trabalho do aterro experimental.

Tabela 4.2.1 – Teores de umidade médio dos resíduos sólidos urbanos determinados ao longo da execução do experimento.

ETAPAS	PRAÇA DE TRABALHO										
	HORIZONTAL								INCLINADO		
	COMPACTADOR				TRATOR DE ESTEIRAS D6D						
	PASSADAS DO EQUIPAMENTO										
	2	4	6	8	2	4	6	8	4	6	8
<i>Espessura projetada das camadas = 0,40m</i>											
1	-	40.70	65.57	64.13	-	189.33	89.37	68.07	369.98	238.00	115.53
2	-	93.77	166.77	185.63	-	164.20	172.80	118.93	183.37	237.23	67.12
	-	-	-	-	-	-	-	12.87	-	-	-
3	-	13.60	12.63	11.13	-	9.09	10.17	12.99	155.15	94.91	177.05
4	-	221.72	151.55	210.93	-	19.31	14.05	17.23	-	-	-
5	-	188.81	127.05	129.85	-	150.69	70.43	215.13	-	-	-
6	-	88.23	185.93	146.43	-	168.67	191.87	86.93	-	-	-
7	181.92	-	96.23	104.76	179.42	-	139.81	237.42	-	-	-
8	91.25	-	47.69	102.91	220.84	-	117.77	142.34	-	-	-
9	-	243.23	257.40	170.21	-	160.55	278.81	503.42	-	-	-
10	-	137.75	128.94	138.76	-	160.32	154.88	179.48	-	-	-
<i>Espessura projetada das camadas = 0,60m</i>											
1	-	62.63	86.10	86.87	-	204.00	128.13	193.40	-	-	-
3	-	9.00	9.10	11.27	-	7.35	8.73	13.07	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	287.94	93.27	105.41
5	-	199.53	152.18	133.45	-	112.35	164.53	104.04	130.20	165.40	225.57
6	-	240.47	119.60	83.57	-	114.43	127.33	163.30	-	-	-
7	111.41	-	86.49	115.77	122.26	-	234.67	157.82	-	-	-
9	-	188.39	295.74	141.58	-	246.52	164.15	128.21	-	-	-
10	-	171.77	-	189.93	-	113.50	350.81	305.09	-	-	-
<i>Espessura projetada das camadas = 0,80m</i>											
1	-	96.20	82.87	98.17	-	138.85	168.70	182.27	-	-	-
4	-	101.46	208.84	151.57	-	21.42	21.52	23.22	-	-	-
6	-	510.73	140.83	221.57	-	130.73	304.90	317.90	198.58	300.30	182.3
7	139.16	-	109.50	106.20	99.59	-	324.71	213.21	154.62	-	154.53
<i>Espessura projetada das camadas = 1,20m</i>											
10	-	-	-	-	-	140.23	153.13	198.39	-	-	-

4.3 Peso Específico Total e Seco

As Tabelas 4.3.1 e 4.3.2 apresentam, respectivamente, os pesos específicos total (γ) e seco (γ_d) obtidos nos ensaios *in situ* realizados após as operações de compactação das áreas (quadrantes) de teste ao longo das etapas construtivas do aterro experimental. Os valores

apresentados representam a média dos ensaios realizados, os quais envolveram normalmente duas determinações de volume em uma mesma cava escavada, conforme descrito no item 3.6.2.

Tabela 4.3.1 – Peso específico *in situ* (kN/m³) dos resíduos sólidos urbanos determinados ao longo da execução do experimento.

ETAPAS	PRAÇA DE TRABALHO										
	HORIZONTAL						INCLINADO				
	COMPACTADOR			TRATOR DE ESTEIRAS D6D							
	PASSADAS DO EQUIPAMENTO										
	2	4	6	8	2	4	6	8	4	6	8
<i>Espessura projetada das camadas = 0,40m</i>											
1	-	7.45	10.00	9.71	-	7.94	7.16	9.22	9.71	9.81	8.92
2	-	6.96	6.28	7.16	-	5.10	7.94	8.04	7.65	7.26	7.06
	-	-	-	-	-	-	-	7.45	-	-	-
3	-	6.57	7.94	7.55	-	9.71	8.73	9.32	10.10	11.18	5.98
4	-	5.39	5.69	7.06	-	9.41	7.75	9.32	-	-	-
	-	5.88	6.47	8.63	-	9.41	14.02	11.87	-	-	-
5	-	6.08	8.83	6.67	-	9.90	6.67	8.34	-	-	-
6	-	7.94	8.34	5.30	-	6.57	7.94	8.63	-	-	-
7	4.02	-	5.30	3.43	5.88	-	6.47	9.22	-	-	-
	-	-	-	5.20	-	-	-	-	-	-	-
8	4.61	-	8.73	6.67	7.55	-	9.61	7.94	-	-	-
9	-	8.34	7.94	11.28	-	9.22	5.39	6.96	-	-	-
10	-	6.18	6.08	8.34	-	7.55	7.94	5.69	-	-	-
<i>Espessura projetada das camadas = 0,60m</i>											
1	-	8.24	9.22	7.75	-	8.04	8.83	7.55	-	-	-
3	-	8.63	8.43	8.92	-	6.47	6.77	8.24	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	8.63	9.90	10.39
5	-	8.24	8.43	10.88	-	7.26	7.45	6.47	7.55	9.41	10.39
6	-	7.75	6.47	7.16	-	5.98	9.81	8.63	-	-	-
7	7.84	-	10.00	5.39	5.98	-	7.94	6.57	-	-	-
9	-	11.87	8.63	10.30	-	9.51	10.00	10.39	-	-	-
10	-	7.06	9.12	13.73	-	5.98	8.53	7.16	-	-	-
<i>Espessura projetada das camadas = 0,80m</i>											
1	-	8.63	9.41	9.22	-	7.26	9.61	6.37	-	-	-
4	-	9.90	9.41	9.81	-	9.12	8.92	7.55	-	-	-
	-	8.14	10.30	8.43	-	7.45	8.14	7.16	-	-	-
6	-	9.90	8.34	8.04	-	7.26	8.83	7.84	9.71	11.47	11.47
7	8.83	-	8.92	7.65	6.37	-	7.45	9.41	9.81	9.51	9.22
<i>Espessura projetada das camadas = 1,20m</i>											
10	-	-	-	-	-	9.51	9.81	8.53	-	-	-

Ensaios para determinação do peso específico “solto” dos resíduos, imediatamente após as operações de lançamento, foram igualmente realizados ao longo da execução da praça de trabalho em planos horizontais do aterro experimental. A Tabela 4.3.3 apresenta uma síntese dos resultados obtidos, os quais representam a média obtida a partir de duas determinações do volume das cavas escavadas.

O peso específico “solto” médio dos resíduos apresenta um valor de 4,89kN/m³, com desvio padrão igual a 1,02kN/m³ e coeficiente de variação de 20,9%. Tais valores auxiliaram a determinação das tensões verticais atuantes nas camadas, conforme se apresentará nos itens subsequentes.

Tabela 4.3.2 -- Peso específico seco (kN/m^3) dos resíduos sólidos urbanos determinados ao longo da execução do experimento.

ETAPAS	PRAÇA DE TRABALHO										
	HORIZONTAL								INCLINADO		
	COMPACTADOR				TRATOR DE ESTEIRAS D6D						
	PASSADAS DO EQUIPAMENTO										
	2	4	6	8	2	4	6	8	4	6	8
<i>Espessura projetada das camadas = 0,40m</i>											
1	-	5.30	6.08	5.88	-	2.75	3.73	5.49	2.06	2.94	4.12
2	-	3.63	2.35	2.55	-	1.96	2.94	3.63	2.75	2.16	4.22
3	-	-	-	-	-	-	-	6.57	-	-	-
3	-	5.79	7.06	6.77	-	8.92	7.84	8.24	3.92	5.69	2.16
4	-	1.67	2.26	2.26	-	7.84	6.77	7.94	-	-	-
5	-	2.06	3.82	2.94	-	3.92	3.92	2.65	-	-	-
6	-	4.22	2.94	2.16	-	2.45	2.75	4.61	-	-	-
7	1.47	-	2.65	2.55	2.06	-	2.75	2.75	-	-	-
8	2.45	-	5.88	3.33	2.35	-	4.41	3.24	-	-	-
9	-	2.45	2.26	4.22	-	3.53	1.47	1.18	-	-	-
10	-	2.55	2.65	3.53	-	2.84	3.14	2.06	-	-	-
<i>Espessura projetada das camadas = 0,60m</i>											
1	-	5.10	4.90	4.12	-	2.65	3.92	2.55	-	-	-
3	-	7.94	7.75	8.04	-	6.08	6.28	7.26	-	-	-
4	-	0.00	-	-	-	-	-	-	2.26	5.10	5.10
5	-	2.75	3.33	4.71	-	3.43	2.84	3.14	3.24	3.53	3.14
6	-	2.26	2.94	3.92	-	2.84	4.31	3.33	-	-	-
7	3.73	-	5.39	2.55	2.65	-	2.35	2.55	-	-	-
9	-	4.12	2.16	4.31	-	2.75	3.82	4.51	-	-	-
10	-	2.65	-	4.71	-	2.75	1.86	1.77	-	-	-
<i>Espessura projetada das camadas = 0,80m</i>											
1	-	4.41	5.10	4.61	-	3.04	3.63	2.26	-	-	-
4	-	4.90	3.04	3.92	-	7.55	7.35	6.08	-	-	-
6	-	1.67	3.43	2.55	-	3.14	2.16	1.86	3.24	2.84	4.12
7	3.73	-	4.22	3.73	3.14	-	1.77	3.04	3.82	-	3.63
<i>Espessura projetada das camadas = 1,20m</i>											
10	-	-	-	-	-	3.92	3.92	2.84	-	-	-

Tabela 4.3.3 - Peso específico “solto” (kN/m^3) dos resíduos sólidos urbanos determinados ao longo da execução do experimento.

ENSAIOS	QUADRANTES	ETAPAS						
		3	4	5	6	7	8	9
1	Trator de esteiras	3,53	4,02	6,47	5,30	4,80	4,31	5,79
2	Compactador	4,31	5,98	4,51	3,63	3,43	5,10	6,37
3		5,59	-	-	-	-	-	-

4.4 Espessuras Lançadas e Compactadas

As espessuras das camadas de resíduos em cada quadrante de teste, após as operações de lançamento e compactação, foram determinadas com base em controle topográfico para cada etapa construtiva da praça de trabalho em planos horizontais do aterro experimental. No caso das espessuras lançadas, foram utilizados os dados do nivelamento topográfico das camadas, em pontos distintos de cada área de teste, antes e após a operação de lançamento, assim

como as leituras das placas de recalque, de forma que fossem consideradas as deformações do maciço de fundação no período entre os levantamentos executados, conforme descrito no item 3.7.1. A Tabela 4.4.1 apresenta as espessuras lançadas reais para cada área de teste ao longo da execução do experimento, conforme procedimento descrito.

Tabela 4.4.1 – Espessuras reais (m) das camadas de resíduos sólidos urbanos lançadas no aterro experimental.

ETAPAS	PRAÇA DE TRABALHO EM PLANOS HORIZONTAIS							
	COMPACTADOR				TRATOR DE ESTEIRAS D6D			
	PASSADAS DO EQUIPAMENTO							
	2	4	6	8	2	4	6	8
<i>Espessura projetada das camadas = 0,40m</i>								
1	-	0.315	0.289	0.289	-	0.290	0.238	0.328
2	-	0.487	0.240	0.250	-	0.222	0.340	0.450
3	-	0.501	0.338	0.457	-	0.322	0.436	0.266
4	-	0.299	0.285	0.430	-	0.271	0.293	0.349
5	-	0.407	0.298	0.246	-	0.360	0.270	0.221
6	-	0.376	0.283	0.257	-	0.294	0.238	0.163
7	0.210	-	0.297	0.101	0.318	-	0.355	0.375
8	0.476	-	0.380	0.212	0.370	-	0.349	0.243
9	-	0.242	0.303	0.333	-	0.305	0.248	0.215
10	-	0.410	0.294	0.264	-	0.191	0.177	0.105
<i>Espessura projetada das camadas = 0,60m</i>								
1	-	0.475	0.359	0.509	-	0.410	0.268	0.428
3	-	0.612	0.466	0.614	-	0.532	0.406	0.596
5	-	0.718	0.684	0.617	-	0.561	0.613	0.511
6	-	0.622	0.527	0.460	-	0.525	0.364	0.325
7	0.456	-	0.307	0.327	0.358	-	0.595	0.345
9	-	0.553	0.529	0.533	-	0.681	0.429	0.406
10	-	0.499	0.564	0.519	-	0.139	0.387	0.209
<i>Espessura projetada das camadas = 0,80m</i>								
1	-	0.850	0.568	0.648	-	0.677	0.561	0.651
4	-	0.909	0.821	0.918	-	0.603	0.704	0.778
6	-	0.780	0.622	0.529	-	0.640	0.560	0.425
7	0.576	-	0.609	0.552	0.733	-	0.636	0.656
<i>Espessura projetada das camadas = 1,20m</i>								
10	-	0.913	0.901	0.928	-	0.623	1.034	0.879

A análise dos resultados apresentados permite observar desvios, algumas vezes significativos, em relação às espessuras projetadas para as camadas, a despeito do rigoroso controle efetuado durante os serviços de lançamento. Para os quadrantes de teste com espessura projetada de 0,40m foram obtidos valores médios de 0,305m, com desvio padrão de 0,088m. Para os quadrantes com espessuras especificadas de 0,60m, 0,80m e 1,20m foram obtidos valores médios iguais a 0,477m, 0,667m e 0,880m, e desvios padrão de 0,130m, 0,124m e 0,137m, respectivamente. As espessuras lançadas reais foram utilizadas como base para o estudo de compactação, sendo as espessuras lançadas de projeto, a partir deste ponto do trabalho, utilizadas somente como forma de referência para as respectivas áreas de teste.

As espessuras compactadas, por sua vez, foram avaliadas com base no levantamento (nivelamento) dos contatos das diversas camadas, possibilitado pela disposição prévia de material demarcador (filme plástico amarelo) entre as mesmas. Desta forma, para cada etapa construtiva, pôde ser avaliada a espessura da última camada compactada, assim como das camadas subjacentes. Este procedimento foi realizado somente na praça de trabalho em planos horizontais do aterro experimental. Tais espessuras foram utilizadas no estudo de compactação, possibilitando a avaliação do incremento do peso específico em profundidade e a reprodução de curvas tensão vs. deformação para os resíduos sob o efeito conjunto de compactação e compressão mecânica do resíduo.

A Tabela 4.4.2 apresenta uma síntese das espessuras compactadas, para cada etapa construtiva, nos quadrantes de teste 16, 18, 20, 23, 25 e 27 (correspondentes às espessuras projetadas das camadas iguais a 0,40m), obtidas a partir do procedimento descrito. As Tabelas 4.4.3 e 4.4.4 apresentam, por sua vez, as espessuras compactadas, para cada etapa construtiva, nos quadrantes de teste 9, 11, 13, 30, 32 e 34 (espessuras projetadas das camadas iguais a 0,60m) e quadrantes 2, 4, 6, 37, 39 e 41 (espessuras projetadas das camadas iguais a 0,80m e 1,20m), respectivamente.

Conforme pode ser observado na Tabela 4.4.4, não foi possível ser executada a compactação dos quadrantes 2, 4 e 6 na 10^a etapa construtiva. Neste caso, face a maior espessura das camadas lançadas, cerca de 0,90m, o compactador não conseguiu se movimentar, ficando o equipamento literalmente atolado na massa de resíduos a compactar.

4.5 Avaliação da Influência dos Parâmetros Construtivos sobre o Peso Específico

O estudo para verificação da influência dos parâmetros construtivos controlados sobre o peso específico dos resíduos sólidos urbanos teve por base os resultados dos ensaios *in situ* (teor de umidade e peso específico), assim como dos levantamentos topográficos realizados para controle das espessuras lançadas das camadas de resíduos no aterro experimental. Para a caracterização do comportamento dos resíduos submetidos à compactação e para a obtenção de relações entre os diversos parâmetros de interesse foi realizada a análise e modelagem estatística dos dados como a seguir se descreve.

4.5.1 Análise e Modelagem Estatística dos Dados

A análise de regressões múltiplas não lineares foi a base para o estudo e modelagem estatística dos dados. Tal análise foi feita a partir do programa SAS (“Statistical Analysis

Tabela 4.4.2 - Espessuras compactadas (m) das camadas de resíduos sólidos urbanos nos quadrantes 16, 18, 20, 23, 25 e 27 do aterro experimental.

ETAPAS	REFERÊNCIA	PRAÇA DE TRABALHO EM PLANOS HORIZONTAIS							
		COMPACTADOR				TRATOR DE ESTEIRAS D6D			
		PASSADAS DO EQUIPAMENTO							
		2	4	6	8	2	4	6	8
<i>Espessura projetada das camadas = 0,40m</i>									
1	camada 1	-	0.199	0.159	0.160	-	0.235	0.135	0.184
2	camada 2	-	0.080	0.160	0.219	-	0.210	0.250	0.220
	camada 1	-	0.287	0.233	0.208	-	0.275	0.182	0.211
3	camada 3	-	0.300	0.260	0.370	-	0.396	0.300	0.386
	camada 2	-	0.180	0.130	0.190	-	0.156	0.140	0.193
	camada 1	-	0.166	0.090	0.177	-	0.245	0.217	0.164
4	camada 4	-	0.206	0.231	0.185	-	0.260	0.190	0.280
	camada 3	-	0.175	0.103	0.210	-	-	0.353	0.359
	camada 2	-	0.200	0.092	0.200	-	0.190	0.140	0.284
5	camada 1	-	0.180	0.120	0.103	-	0.170	-	-
	camada 5	-	0.320	0.230	-0.120	-	0.435	0.135	0.082
	camada 4	-	0.173	0.168	0.222	-	0.203	0.272	0.143
	camada 3	-	0.125	0.100	0.095	-	0.205	0.101	0.216
	camada 2	-	0.100	0.116	0.146	-	0.157	0.205	0.185
6	camada 1	-	0.150	0.119	0.174	-	0.112	0.195	0.210
	camada 6	-	-	-	-	-	0.205	0.240	0.152
	camada 5	-	-	-	-	-	0.279	0.105	0.158
	camada 4	-	-	-	-	-	0.181	0.132	0.150
	camada 3	-	-	-	-	-	0.240	0.215	0.170
	camada 2	-	-	-	-	-	0.131	0.098	0.202
7	camada 1	-	-	-	-	-	0.124	0.090	0.188
	camada 7	0.249	-	0.127	0.224	0.257	-	0.212	0.273
	camada 6	0.169	-	0.190	0.018	0.285	-	0.175	0.127
	camada 5	0.134	-	0.155	0.142	0.150	-	0.130	0.150
	camada 4	0.110	-	0.130	0.107	0.130	-	0.120	0.160
	camada 3	0.114	-	0.106	0.170	0.130	-	0.110	0.150
8	camada 2	0.090	-	0.119	0.140	0.170	-	0.170	0.190
	camada 1	-	-	-	-	0.180	-	0.100	0.076
	camada 8	0.370	-	0.160	0.072	0.220	-	0.300	0.000
	camada 7	0.170	-	0.250	0.288	0.160	-	0.240	0.000
	camada 6	0.200	-	0.160	0.205	0.160	-	0.100	0.000
	camada 5	0.170	-	0.140	0.145	0.195	-	0.180	0.000
	camada 4	0.150	-	0.130	0.110	0.165	-	0.210	0.000
9	camada 3	0.180	-	0.170	0.130	0.200	-	0.110	0.000
	camada 2	0.110	-	0.050	0.058	0.280	-	0.080	0.000
	camada 1	0.080	-	0.070	0.057	0.170	-	0.080	0.000
	camada 9	-	0.180	0.090	0.110	-	0.160	0.130	0.160
	camada 8	-	0.140	0.190	0.190	-	0.260	0.190	0.220
	camada 7	-	0.230	0.190	0.138	-	0.230	0.170	0.160
	camada 6	-	0.230	0.140	0.222	-	0.250	0.220	0.200
	camada 5	-	0.250	0.200	0.170	-	0.280	0.170	0.180
10	camada 4	-	0.150	0.140	0.100	-	0.180	0.190	0.170
	camada 3	-	0.240	0.110	0.110	-	0.070	0.120	0.170
	camada 2	-	0.110	0.080	0.090	-	0.090	0.050	0.070
	camada 1	-	0.160	0.120	0.066	-	0.120	0.050	0.060
	camada 10	0.000	0.180	0.080	0.190	0.000	0.220	0.210	0.120
	camada 9	0.000	0.190	0.200	0.210	0.000	0.090	0.140	0.160
	camada 8	0.000	0.210	0.130	0.240	0.000	0.170	0.130	0.160
	camada 7	0.000	0.160	0.110	0.120	0.000	0.170	0.150	0.170
	camada 6	0.000	0.180	0.130	0.090	0.000	0.140	0.180	0.150
	camada 5	0.000	0.190	0.130	0.100	0.000	0.170	0.110	0.100
camada 4	0.000	0.130	0.130	0.080	0.000	0.190	0.090	0.160	
10	camada 3	0.000	0.200	0.100	0.100	0.000	0.220	0.090	0.150
	camada 2	0.000	0.150	0.130	0.110	0.000	0.240	0.150	0.090
	camada 1	0.000	0.250	0.130	0.090	0.000	0.400	0.260	0.300

Tabela 4.4.3 - Espessuras compactadas (m) das camadas de resíduos sólidos urbanos nos quadrantes 9, 11, 13, 30, 32 e 34 do aterro experimental.

ETAPAS	REFERÊNCIA	PRAÇA DE TRABALHO EM PLANOS HORIZONTAIS							
		COMPACTADOR				TRATOR DE ESTEIRAS D6D			
		PASSADAS DO EQUIPAMENTO							
		2	4	6	8	2	4	6	8
<i>Espessura projetada das camadas = 0,60m</i>									
1	camada 1	-	0.335	0.297	0.310	-	0.260	0.315	0.305
3	camada 2	-	0.369	0.281	0.360	-	0.354	0.290	0.370
	camada 1	-	0.253	0.129	0.156	-	0.342	0.263	0.277
5	camada 3	-	0.420	0.389	0.337	-	0.315	0.430	0.215
	camada 2	-	0.336	0.280	0.392	-	0.311	0.302	0.358
	camada 1	-	-	-	-	-	0.237	0.177	0.290
6	camada 4	-	-	-	-	-	0.395	0.275	0.290
	camada 3	-	-	-	-	-	0.320	0.332	0.267
	camada 2	-	-	-	-	-	0.323	0.218	0.243
	camada 1	-	-	-	-	-	0.220	0.145	0.241
7	camada 5	0.375	-	0.250	0.195	0.297	-	0.318	0.234
	camada 4	0.410	-	0.360	0.320	0.418	-	0.350	0.273
	camada 3	0.240	-	0.190	0.260	0.310	-	0.340	0.290
	camada 2	0.160	-	0.220	0.160	0.280	-	0.230	0.200
	camada 1	-	-	-	-	0.210	-	0.120	0.160
9	camada 6	-	0.400	0.330	0.400	-	0.460	0.370	0.325
	camada 5	-	0.280	0.210	0.210	-	0.220	0.250	0.225
	camada 4	-	0.290	0.220	0.290	-	0.275	0.260	0.180
	camada 3	-	0.300	0.220	0.240	-	0.275	0.220	0.150
	camada 2	-	0.240	0.240	0.160	-	0.330	0.150	0.225
	camada 1	-	0.220	0.100	0.160	-	0.280	0.200	0.315
10	camada 7	-	0.320	0.320	0.110	-	0.350	0.200	0.230
	camada 6	-	0.290	0.210	0.130	-	0.230	0.250	0.265
	camada 5	-	0.250	0.185	0.200	-	0.200	0.230	0.215
	camada 4	-	0.260	0.225	0.220	-	0.220	0.320	0.180
	camada 3	-	0.240	0.200	0.230	-	0.310	0.250	0.250
	camada 2	-	0.300	0.117	0.190	-	0.210	0.180	0.170
	camada 1	-	0.280	0.128	0.280	-	0.410	0.390	0.340

Tabela 4.4.4 - Espessuras compactadas (m) das camadas de resíduos sólidos urbanos nos quadrantes 2, 4, 6, 37, 39 e 41 do aterro experimental.

ETAPAS	REFERÊNCIA	PRAÇA DE TRABALHO EM PLANOS HORIZONTAIS							
		COMPACTADOR				TRATOR DE ESTEIRAS D6D			
		PASSADAS DO EQUIPAMENTO							
		2	4	6	8	2	4	6	8
<i>Espessura projetada das camadas = 0,80m</i>									
1	camada 1	-	0.375	0.415	0.285	-	0.488	0.460	0.400
4	camada 2	-	0.740	0.529	0.528	-	0.519	0.469	0.528
	camada 1	-	0.405	0.338	0.373	-	0.310	0.371	0.361
6	camada 3	-	-	-	-	-	0.530	0.380	0.300
	camada 2	-	-	-	-	-	0.346	0.357	0.466
	camada 1	-	-	-	-	-	0.376	0.295	0.303
7	camada 4	0.230	-	0.300	0.203	-	-	0.426	0.435
	camada 3	0.480	-	0.315	0.405	-	-	0.366	0.345
	camada 2	0.600	-	0.375	0.350	-	-	0.380	0.410
	camada 1	-	-	-	-	-	-	0.230	0.220
<i>Espessura projetada das camadas = 1,20m</i>									
10	camada 5	-	-	-	-	-	0.750	0.810	0.734
	camada 4	-	-	-	-	-	0.490	0.300	0.276
	camada 3	-	-	-	-	-	0.450	0.370	0.270
	camada 2	-	-	-	-	-	0.290	0.330	0.290
	camada 1	-	-	-	-	-	0.290	0.310	0.390

System”) versão 6.12⁸, tendo sido testados e verificados diversos modelos (por exemplo, os baseados em funções matemáticas do tipo logarítmica, hiperbólica, exponencial e polinomial) para correlacionar os parâmetros do estudo (peso específico total e seco, teor de umidade, espessuras das camadas de resíduos lançadas, equipamentos, inclinação do plano de compactação e número de passadas do equipamento).

A utilização do peso específico total não mostrou qualquer tendência de comportamento quando correlacionado com os demais parâmetros monitorados. A Figura 4.5.1, por exemplo, apresenta a relação obtida entre o peso específico total e o teor de umidade para os resíduos compactados por ambos os equipamentos de ensaio. Conforme pode ser visualizado, nota-se uma elevada dispersão dos dados sem que seja observada qualquer tendência de comportamento. A utilização do peso específico seco como variável dependente do estudo, no entanto, indicou uma clara tendência de comportamento quando correlacionado com o teor de umidade dos resíduos, conforme pode ser visualizado na Figura 4.5.2. As análises de regressões múltiplas não lineares efetuadas procuraram definir e explorar esta tendência, tendo sido obtida uma boa concordância entre os valores medidos e os calculados a partir do uso de funções logarítmicas correlacionando os parâmetros do estudo. Na Figura 4.5.2 apresenta-se ainda a curva de saturação ($S_r = 100\%$) calculada admitido um peso específico para as partículas sólidas de $21,6 \text{ kN/m}^3$.

O modelo de compactação final obtido correlaciona o peso específico seco, o teor de umidade, o número de passadas do equipamento e a espessura lançada das camadas, sendo representado pela equação (4.1) apresentada na seqüência. A Tabela 4.5.1, por sua vez, apresenta os valores dos parâmetros do modelo para distintas condições de execução, no caso as relativas à inclinação dos planos de trabalho e aos equipamentos de compactação.

$$\gamma_d = [a + b \ln(w) + c \ln(t) + d \ln(P)] \gamma_w \quad (4.1)$$

onde:

γ_d = peso específico seco (kN/m^3)

γ_w = peso específico da água = $9,806 \text{ kN/m}^3$

a, b, c, d = parâmetros do modelo (Tabela 4.5.1)

w = teor de umidade (%)

t = espessura das camadas lançadas (m)

P = número de passadas do equipamento

⁸ SAS version 6.12 – SAS Institute Inc. SAS Circle, Box 8000, Cary, NC, 27512-8000.

Tabela 4.5.1 – Parâmetros para o modelo de compactação.

CONDIÇÃO		PARÂMETROS				R^2
Equipamento	Plano	a	b	c	d	
CAT 816	Horizontal	1.1097 ($p<0.0001$)	-0.1614 ($p<0.0001$)	0.0847 ($p=0.0003$)	0.0613 ($p=0.0161$)	0,811
D6D	Horizontal	1.1303 ($p<0.0001$)	-0.1736 ($p<0.0001$)	0.0195 ($p=0.2919$)	0.0485 ($p=0.0365$)	0,882
D6D	Inclinado	1.4216 ($p<0.0001$)	-0.2015 ($p<0.0001$)	0.0775 ($p=0.1334$)	0.0083 ($p=0.8738$)	0,705
Ambos	Ambos	1.1296 ($p<0.0001$)	-0.1669 ($p<0.0001$)	0.0547 ($p<0.0001$)	0.0523 ($p=0.0012$)	0,834

Obs: o valor de p indica a probabilidade de ser incorreta a afirmação de que exista uma associação entre a variável dependente e independente, ou seja, quanto menor o valor de p , maior a probabilidade de haver uma associação entre as variáveis analisadas. Tradicionalmente, pode-se dizer e concluir que a variável independente pode ser usada para prever a variável dependente quando $p<0.05$.

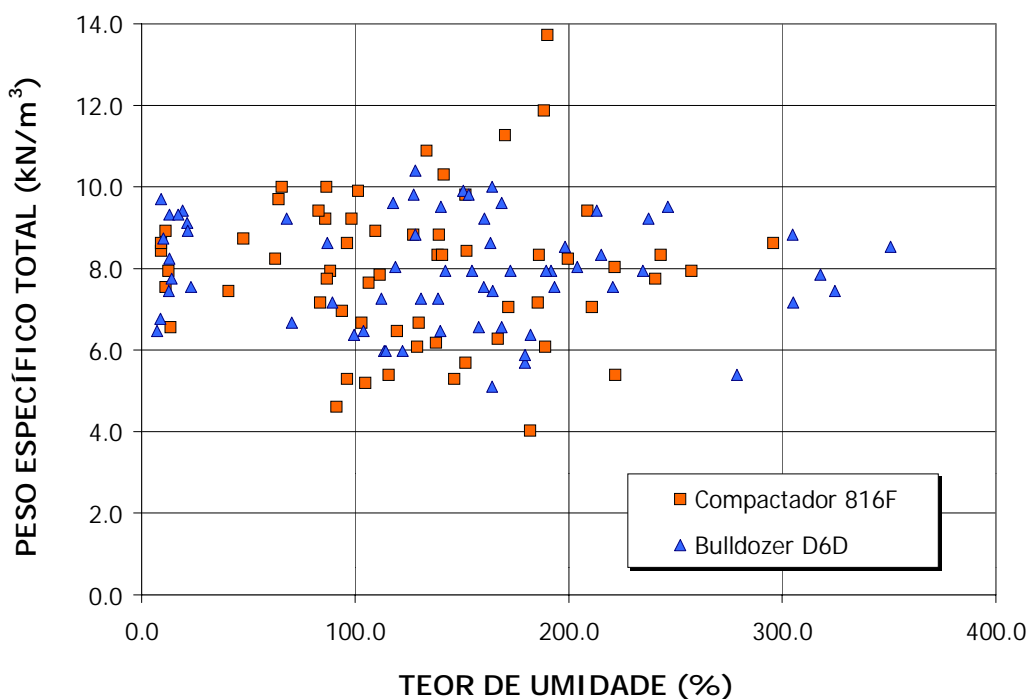


Figura 4.5.1 – Relação peso específico total vs. teor de umidade para diferentes equipamentos operando em planos horizontais.

A utilização do modelo apresentado gerou coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,705 e 0,882 para os casos analisados. As variáveis utilizadas no modelo (teor de umidade, espessura das camadas e número de passadas do equipamento) mostraram distintos níveis de significância para reproduzir e explicar as variações observadas. O teor de umidade, no entanto, mostrou-se a variável predominante do modelo e de maior significância em todas as análises, sendo a principal responsável pelo comportamento dos resíduos no processo de compactação, conforme pode ser constatado pelos reduzidos valores da probabilidade p associada ao parâmetro b do modelo. As probabilidades p associadas às

outras variáveis (espessura das camadas e número de passadas) apresentaram valores mais elevados, indicando, em uma primeira análise, uma menor influência no processo de compactação, conforme se discutirá na seqüência. A Tabela 4.5.2 apresenta os valores utilizados na análise e modelagem estatística, assim como os valores e desvios obtidos com a utilização do modelo desenvolvido para o caso do compactador 816F operando em planos horizontais. As Tabelas 4.5.3 e 4.5.4 sumarizam, por sua vez, os casos do trator de esteiras tipo D6D operando, respectivamente, em planos horizontais e inclinados.

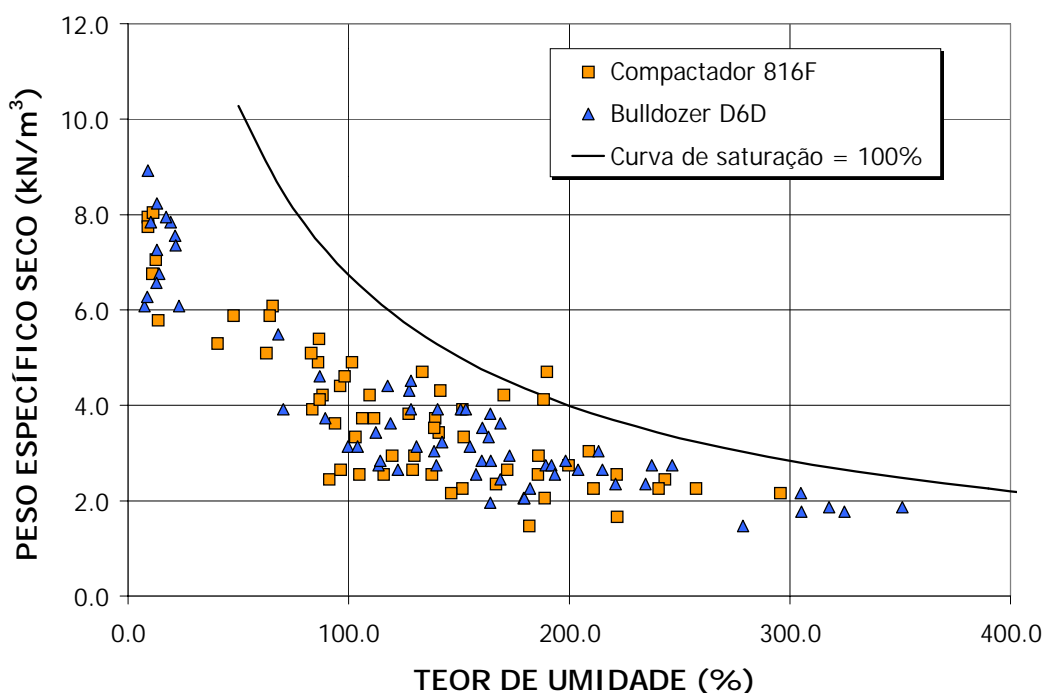


Figura 4.5.2 – Relação peso específico seco vs. teor de umidade para diferentes equipamentos operando em planos horizontais.

4.5.2 Relação Teor de Umidade vs. Peso Específico

Ao contrário dos solos, os valores obtidos para a relação entre o peso específico seco e o teor de umidade dos resíduos sólidos submetidos à compactação não se ajustam segundo curvas côncavas com um peso específico seco máximo e correspondente teor de umidade ótimo.

Os pontos, para todos os casos analisados, respeitaram uma relação do tipo logarítmica, conforme já mencionado, com um comportamento similar ao da curva de saturação máxima, ou seja, redução dos pesos específicos secos com o aumento do teor de umidade. Tal comportamento pode ser visualizado na Figura 4.5.3 que apresenta os resultados obtidos e a curva de compactação global (ambos os equipamentos) gerada pelo modelo, admitindo 4

Tabela 4.5.2 – Resultados da aplicação do modelo de compactação. Compactador 816F operando em plano horizontal de compactação.

PLANO HORIZONTAL COMPACTADOR 816F																															
Etapas	Espessura das camadas (t) = variável (plano horizontal) e 0,40m (espessura de projeto)								6 PASSADAS								8 PASSADAS														
	2 PASSADAS		4 PASSADAS		6 PASSADAS		8 PASSADAS		Observado		Preciso		Resíduo		Observado		Preciso		Resíduo		Observado		Preciso		Resíduo						
	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	P	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	P	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	P	γ_d (kN/m ³)	w (%)				
1	5,30	41,70	0,305	4	4,09	0,41	-	5,30	66,67	0,309	4,31	5,80	64,13	0,309	4,62	6,00	64,13	0,309	4,62	6,00	64,13	0,309	4,62	6,00	64,13	0,309	4,62	6,00	64,13	0,309	
2	5,63	39,77	0,487	4	3,93	0,30	-	5,63	98,77	0,240	2,66	5,85	106,63	0,250	3,71	6,77	111,13	0,457	3,71	6,77	111,13	0,457	3,71	6,77	111,13	0,457	3,71	6,77	111,13	0,457	
3	5,79	31,90	0,501	4	2,01	0,32	-	5,79	17,63	0,338	7,04	6,77	111,13	0,457	3,71	6,77	111,13	0,457	3,71	6,77	111,13	0,457	3,71	6,77	111,13	0,457	3,71	6,77	111,13	0,457	
4	1,67	221,72	0,288	4	2,16	0,00	-	2,26	91,06	0,206	2,97	2,26	210,00	0,430	2,96	2,26	210,00	0,430	2,96	2,26	210,00	0,430	2,96	2,26	210,00	0,430	2,96	2,26	210,00	0,430	
5	2,06	168,81	0,437	4	2,67	0,62	-	3,82	527,06	0,298	3,29	3,82	129,66	0,246	3,27	3,82	129,66	0,246	3,27	3,82	129,66	0,246	3,27	3,82	129,66	0,246	3,27	3,82	129,66	0,246	
6	4,22	88,23	0,336	4	3,81	0,40	-	3,84	526,93	0,283	2,64	3,84	146,43	0,257	3,11	3,84	146,43	0,257	3,11	3,84	146,43	0,257	3,11	3,84	146,43	0,257	3,11	3,84	146,43	0,257	
7	1,47	101,92	0,210	1,77	-	-	-	2,66	98,23	0,269	3,72	2,66	104,76	0,101	2,07	2,66	104,76	0,101	2,07	2,66	104,76	0,101	2,07	2,66	104,76	0,101	2,07	2,66	104,76	0,101	
8	2,46	91,26	0,476	3,54	-	-	-	5,80	47,69	0,360	5,04	5,80	33,53	0,191	3,51	5,80	33,53	0,191	3,51	5,80	33,53	0,191	3,51	5,80	33,53	0,191	3,51	5,80	33,53	0,191	
9	-	-	-	-	3,36	0,00	-	2,66	357,40	0,303	2,16	2,66	4,72	170,21	0,333	3,06	4,72	170,21	0,333	3,06	4,72	170,21	0,333	3,06	4,72	170,21	0,333	3,06	4,72	170,21	0,333
10	-	-	-	-	137,75	0,430	4	3,10	0,63	-	-	2,66	138,76	0,264	3,26	2,66	138,76	0,264	3,26	2,66	138,76	0,264	3,26	2,66	138,76	0,264	3,26	2,66	138,76	0,264	
Espessura das camadas (t) = variável (plano horizontal) e 0,40m (espessura de projeto)																															
Etapas	2 PASSADAS		4 PASSADAS		6 PASSADAS		8 PASSADAS		Observado		Preciso		Resíduo		Observado		Preciso		Resíduo		Observado		Preciso		Resíduo						
	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	P	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	P	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	P	γ_d (kN/m ³)	w (%)				
1	5,10	62,63	0,476	4	4,66	0,66	-	4,90	86,10	0,369	4,06	4,12	86,07	0,909	4,61	4,12	86,07	0,909	4,61	4,12	86,07	0,909	4,61	4,12	86,07	0,909	4,61	4,12	86,07	0,909	
2	7,94	9,00	0,632	4	7,63	6,11	-	7,75	9,30	0,486	7,63	8,04	11,27	0,614	7,89	8,04	11,27	0,614	7,89	8,04	11,27	0,614	7,89	8,04	11,27	0,614	7,89	8,04	11,27	0,614	
3	2,76	196,63	0,738	4	3,06	0,26	-	3,33	592,18	0,664	3,66	4,71	133,46	0,617	3,96	4,71	133,46	0,617	3,96	4,71	133,46	0,617	3,96	4,71	133,46	0,617	3,96	4,71	133,46	0,617	
4	2,26	240,87	0,622	4	2,64	0,38	-	2,84	110,60	0,657	3,06	3,92	83,67	0,460	4,48	3,92	83,67	0,460	4,48	3,92	83,67	0,460	4,48	3,92	83,67	0,460	4,48	3,92	83,67	0,460	
5	3,73	111,41	0,468	3,19	0,54	-	-	5,29	88,49	0,307	5,92	5,29	175,77	0,327	3,68	5,29	175,77	0,327	3,68	5,29	175,77	0,327	3,68	5,29	175,77	0,327	3,68	5,29	175,77	0,327	
6	4,12	188,26	0,563	4	2,93	1,19	-	3,36	366,74	0,526	2,43	4,31	141,66	0,533	3,77	4,31	141,66	0,533	3,77	4,31	141,66	0,533	3,77	4,31	141,66	0,533	3,77	4,31	141,66	0,533	
7	2,66	171,77	0,499	4	2,99	0,26	-	2,66	0,664	-	-	4,71	109,93	0,519	3,26	4,71	109,93	0,519	3,26	4,71	109,93	0,519	3,26	4,71	109,93	0,519	3,26	4,71	109,93	0,519	
Espessura das camadas (t) = variável (plano horizontal) e 0,20m (espessura de projeto)																															
Etapas	2 PASSADAS		4 PASSADAS		6 PASSADAS		8 PASSADAS		Observado		Preciso		Resíduo		Observado		Preciso		Resíduo		Observado		Preciso		Resíduo						
	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	P	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	P	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	P	γ_d (kN/m ³)	w (%)				
1	4,41	96,20	0,060	4	4,36	0,06	-	5,30	62,07	0,608	4,90	4,61	66,17	0,608	4,61	4,61	66,17	0,608	4,61	4,61	66,17	0,608	4,61	4,61	66,17	0,608	4,61	4,61	66,17	0,608	
2	4,90	101,46	0,909	4	4,32	0,58	-	3,04	208,84	0,671	3,54	3,92	151,59	0,918	4,11	3,92	151,59	0,918	4,11	3,92	151,59	0,918	4,11	3,92	151,59	0,918	4,11	3,92	151,59	0,918	
3	1,67	519,23	0,390	4	1,64	0,03	-	3,43	540,83	0,622	3,73	3,43	271,59	0,526	3,06	3,43	271,59	0,526	3,06	3,43	271,59	0,526	3,06	3,43	271,59	0,526	3,06	3,43	271,59	0,526	
4	3,73	139,16	0,576	3,03	0,70	-	-	4,22	909,50	0,609	4,11	0,30	3,73	106,20	0,692	4,26	3,73	106,20	0,692	4,26	3,73	106,20	0,692	4,26	3,73	106,20	0,692	4,26	3,73	106,20	0,692
Espessura das camadas (t) = variável (plano horizontal) e 1,20m (espessura de projeto)																															
Etapas	2 PASSADAS		4 PASSADAS		6 PASSADAS		8 PASSADAS		Observado		Preciso		Resíduo		Observado		Preciso		Resíduo		Observado		Preciso		Resíduo						
	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	P	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	P	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Obs	t (m)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	P	γ_d (kN/m ³)	w (%)				
10	-	-	-	-	0,901	-	-	-	-	-	-	0,901	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

Tabela 4.5.3 – Resultados da aplicação do modelo de compactação. Trator de esteiras tipo D6D em plano horizontal de compactação.

PLANO HORIZONTAL																			
TRATOR DE ESTEIRAS TIPO D6D																			
Espessura das camadas (θ) = variável (plano horizontal) e 0,40m (espessura de projeto)																			
Etapas	2 PASSADAS			4 PASSADAS			6 PASSADAS			8 PASSADAS			8 PASSADAS						
	Observada Y _o (kN/m²)	w(%)	θ(m)	Observada Y _o (kN/m²)	θ(m)	P	Previsão Y _p (kN/m²)	Resíduo	Observada Y _o (kN/m²)	w(%)	θ(m)	Previsão Y _p (kN/m²)	Resíduo	Observada Y _o (kN/m²)	w(%)	θ(m)	Previsão Y _p (kN/m²)	Resíduo	
1	-	-	-	2,75	189,33	0,280	4	2,69	0,17	3,73	69,37	0,228	4,01	5,40	69,07	0,228	4,67	0,67	
2	-	-	-	1,96	164,20	0,222	4	2,77	-0,81	2,94	372,80	0,340	2,96	3,63	118,93	0,450	2,76	-0,76	
3	-	-	-	6,92	9,09	0,322	4	7,77	1,15	7,84	10,17	0,438	7,85	0,24	12,99	0,266	7,45	0,78	
4	-	-	-	7,84	19,25	0,271	4	6,46	-1,38	6,77	14,05	0,293	7,20	-0,44	7,94	17,21	0,349	7,03	0,92
5	-	-	-	3,92	160,69	0,300	4	3,01	-0,91	3,82	70,43	0,270	4,44	-0,52	2,66	216,13	0,221	2,64	0,81
6	-	-	-	2,46	168,67	0,294	4	2,70	-0,23	2,75	991,87	0,298	2,71	0,03	4,61	88,93	0,163	4,12	0,49
7	2,06	159,42	0,318	-	-	-	-	-	-	2,75	330,81	0,345	3,33	2,75	237,42	0,376	2,52	0,17	
8	2,36	220,04	0,370	-	-	-	-	-	-	4,41	112,77	0,348	3,62	3,24	142,24	0,343	3,36	-0,13	
9	-	-	-	3,53	160,56	0,326	4	2,87	-0,66	1,47	270,81	0,348	2,08	-1,45	509,42	0,215	1,19	-0,01	
10	-	-	-	2,84	160,32	0,191	4	2,78	-0,06	3,14	194,98	0,177	3,02	2,06	179,48	0,195	2,81	-0,75	

Espessura das camadas (θ) = variável (plano horizontal) e 0,60m (espessura de projeto)																			
Etapas	2 PASSADAS			4 PASSADAS			6 PASSADAS			8 PASSADAS			8 PASSADAS						
	Observada Y _o (kN/m²)	w(%)	θ(m)	Observada Y _o (kN/m²)	θ(m)	P	Previsão Y _p (kN/m²)	Resíduo	Observada Y _o (kN/m²)	w(%)	θ(m)	Previsão Y _p (kN/m²)	Resíduo	Observada Y _o (kN/m²)	w(%)	θ(m)	Previsão Y _p (kN/m²)	Resíduo	
1	-	-	-	2,65	204,00	0,470	4	2,52	-0,13	3,92	328,13	0,268	3,42	2,95	193,40	0,428	2,96	-0,40	
2	-	-	-	6,08	7,36	0,532	4	6,23	0,17	6,38	13,73	0,496	6,07	-0,30	7,36	13,07	0,526	7,60	-0,34
3	-	-	-	3,43	112,36	0,161	4	3,69	0,26	4,15	964,53	0,613	3,16	-0,54	3,14	104,04	0,611	4,04	-0,90
4	-	-	-	2,84	114,43	0,526	4	3,56	0,71	4,31	327,33	0,364	3,49	0,62	3,33	163,30	0,326	3,18	0,75
5	2,95	132,36	0,368	-	-	-	-	-	-	2,36	234,67	0,596	2,55	2,95	152,62	0,346	3,26	-0,70	
6	-	-	-	2,75	246,62	0,681	4	2,29	-0,45	3,83	964,16	0,428	3,09	-0,73	4,51	126,21	0,482	3,64	0,87
7	-	-	-	2,75	113,50	0,139	4	3,31	0,56	1,86	350,81	0,389	1,76	0,08	1,77	306,09	0,209	2,04	-0,27

Espessura das camadas (θ) = variável (plano horizontal) e 0,20m (espessura de projeto)																			
Etapas	2 PASSADAS			4 PASSADAS			6 PASSADAS			8 PASSADAS			8 PASSADAS						
	Observada Y _o (kN/m²)	w(%)	θ(m)	Observada Y _o (kN/m²)	θ(m)	P	Previsão Y _p (kN/m²)	Resíduo	Observada Y _o (kN/m²)	w(%)	θ(m)	Previsão Y _p (kN/m²)	Resíduo	Observada Y _o (kN/m²)	w(%)	θ(m)	Previsão Y _p (kN/m²)	Resíduo	
1	-	-	-	3,04	138,06	0,677	4	3,27	-0,23	3,83	668,70	0,661	3,10	-0,53	2,36	102,29	0,651	3,13	-0,07
2	-	-	-	7,95	27,42	0,883	4	6,43	-1,12	7,35	21,52	0,704	6,64	0,71	6,08	23,22	0,778	6,67	-0,59
3	-	-	-	3,14	130,73	0,640	4	3,36	0,22	3,36	304,90	0,560	2,06	-1,07	1,86	317,90	0,426	2,10	-0,34
4	3,14	99,69	0,723	-	-	-	-	-	-	1,77	324,71	0,638	2,00	-0,24	3,04	213,21	0,696	2,86	0,78

Espessura das camadas (θ) = variável (plano horizontal) e 1,20m (espessura de projeto)																			
Etapas	2 PASSADAS			4 PASSADAS			6 PASSADAS			8 PASSADAS			8 PASSADAS						
	Observada Y _o (kN/m²)	w(%)	θ(m)	Observada Y _o (kN/m²)	θ(m)	P	Previsão Y _p (kN/m²)	Resíduo	Observada Y _o (kN/m²)	w(%)	θ(m)	Previsão Y _p (kN/m²)	Resíduo	Observada Y _o (kN/m²)	w(%)	θ(m)	Previsão Y _p (kN/m²)	Resíduo	
10	-	-	-	3,92	143,23	0,633	4	3,24	-0,68	3,32	593,13	1,034	3,38	-0,45	2,84	198,39	0,979	3,04	-0,30

Tabela 4.5.4 – Resultados da aplicação do modelo de compactação. Trator de esteiras tipo D6D operando em plano inclinado de compactação.

PLANO INCLINADO (1,00/5,00)																
TRATOR DE ESTEIRAS TIPO D6D																
Espessura das camadas (t) = 0,40m (espessura de projeto)																
Etapas	4 PASSADAS					6 PASSADAS					8 PASSADAS					
	Observado		Previsto			Observado		Previsto			Observado		Previsto			
	γ_s (kN/m ³)	w(%)	q _{net}	F	γ_s (kN/m ³)	Estímo	γ_s (kN/m ³)	w(%)	q _{net}	γ_s (kN/m ³)	Estímo	γ_s (kN/m ³)	w(%)	q _{net}	γ_s (kN/m ³)	Estímo
1	2,36	307,28	1,40	4	3,12	3,30	2,54	230,30	0,48	3,20	1,36	4,12	175,50	1,40	4,00	3,00
2	2,78	302,57	1,40	4	3,08	-0,31	2,78	237,23	0,48	2,88	-0,43	4,22	87,12	1,40	4,30	-0,88
3	3,81	305,18	1,40	4	3,30	3,50	3,00	243,91	0,48	4,30	1,20	3,35	177,00	1,40	3,35	-1,31
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Espessura das camadas (t) = 0,60m (espessura de projeto)																
Etapas	4 PASSADAS					6 PASSADAS					8 PASSADAS					
	Observado		Previsto			Observado		Previsto			Observado		Previsto			
	γ_s (kN/m ³)	w(%)	q _{net}	F	γ_s (kN/m ³)	Estímo	γ_s (kN/m ³)	w(%)	q _{net}	γ_s (kN/m ³)	Estímo	γ_s (kN/m ³)	w(%)	q _{net}	γ_s (kN/m ³)	Estímo
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	2,36	307,34	1,50	4	2,40	-0,31	3,30	250,37	0,48	4,14	1,36	3,35	156,41	1,50	4,00	3,00
5	3,24	330,28	0,60	4	4,08	-0,81	3,60	266,40	0,48	3,60	-0,27	3,18	228,67	0,60	3,00	0,12
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Espessura das camadas (t) = 0,80m (espessura de projeto)																
Etapas	4 PASSADAS					6 PASSADAS					8 PASSADAS					
	Observado		Previsto			Observado		Previsto			Observado		Previsto			
	γ_s (kN/m ³)	w(%)	q _{net}	F	γ_s (kN/m ³)	Estímo	γ_s (kN/m ³)	w(%)	q _{net}	γ_s (kN/m ³)	Estímo	γ_s (kN/m ³)	w(%)	q _{net}	γ_s (kN/m ³)	Estímo
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	3,24	305,58	1,00	4	3,45	-0,39	2,84	300,30	0,48	3,24	1,20	4,12	181,5	1,00	3,00	0,46
7	3,81	344,61	1,00	4	3,90	-0,39	-	-	-	-	-	3,60	164,60	1,00	3,00	-0,36

passadas do equipamento e espessuras lançadas de 0,30m. Tal tendência foi observada de uma forma muito preliminar por FASSETT et al. (1994), a partir da sistematização de dados disponíveis da literatura. Resultados similares foram igualmente constatados por BENOIT et al. (1999), porém trabalhando com materiais provenientes da mistura de cinzas de incineradores e lodos de estações de tratamento de águas residuárias.

A não constatação do aumento do peso específico seco para baixos valores de umidade (região equivalente ao ramo seco da curva de compactação de solos), pode estar associada, numa primeira avaliação e tendo como referência o comportamento dos solos, ao não desenvolvimento do efeito de capilaridade e de pressões neutras negativas, assim como a inexistência do efeito de lubrificação das partículas sólidas, fatores que podem justificar densidades crescentes na curva de compactação tradicional de solos, no seu ramo seco, conforme discutido por OLSON (1963). Vale lembrar que a ocorrência de relações teor de umidade vs. peso específico seco sem a definição de um valor máximo é, também, observada em solos com características mineralógicas peculiares, que afetam, por outras razões, os fatores mencionados (LEE & SUEDEKAMP, 1972).

As diferenças entre as relações observadas e as obtidas por GABR & VALERO (1995), apresentadas em maior detalhe no item 2.2.2.5, podem ser explicadas pela utilização, por estes autores, de resíduos antigos (15 a 30 anos) e com alta percentagem de materiais particulados (cerca de 33%) em sua composição. Ressalte-se que estes autores apresentam um dos únicos relatos da utilização de ensaios de compactação convencional em laboratório

(ensaio Proctor normal) para caracterização de resíduos sólidos urbanos. Neste sentido, acrescenta-se às justificativas mencionadas para a diferença de comportamento observada, aquelas relativas às limitações de representatividade de ensaios laboratoriais para os resíduos sólidos, face às dimensões e características dos materiais envolvidos.

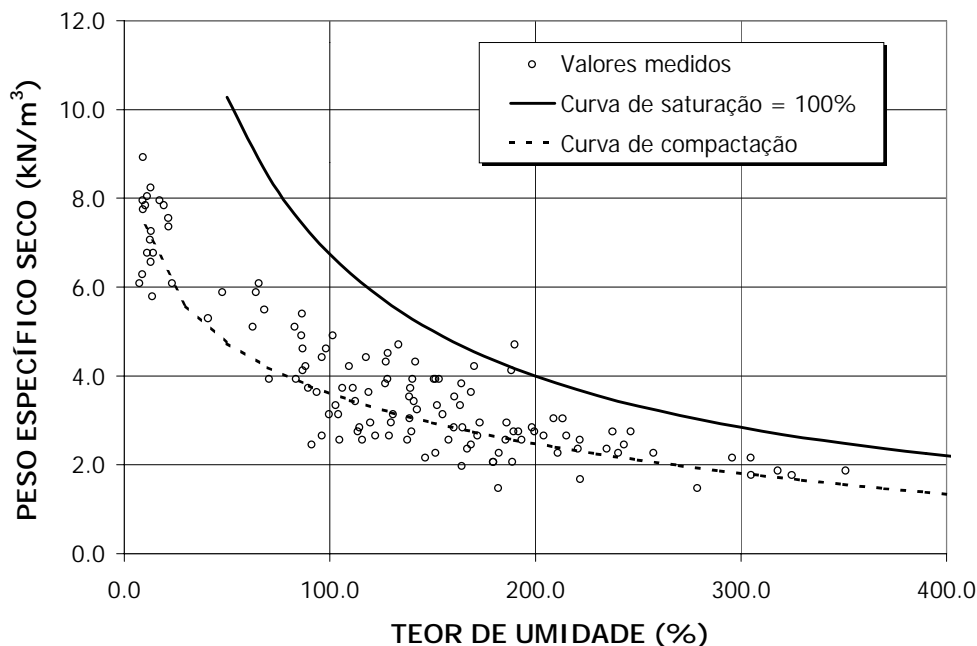


Figura 4.5.3 – Curva de compactação para ambos os equipamentos, admitindo 4 passadas do equipamento e espessuras lançadas de 0,30m.

4.5.3 Relação Energia de Compactação vs. Peso Específico

O efeito da energia de compactação foi avaliado de forma indireta, a partir da utilização de diferentes técnicas construtivas no aterro experimental. A variação de equipamento, espessura das camadas, número de passadas e inclinação do plano de compactação, acaba por transferir às camadas lançadas de resíduos sólidos urbanos diferentes energias de compactação. Com base na modelagem estatística realizada foi produzido um conjunto de gráficos, onde as distintas técnicas construtivas, o peso específico seco e o teor de umidade dos materiais puderam ser relacionados para a compreensão e caracterização do processo de compactação dos resíduos sólidos urbanos, conforme a seguir se descreve.

4.5.3.1 Efeito da Espessura das Camadas

A análise estatística dos dados utilizou a espessura lançada real (t) das camadas de resíduos, a qual foi avaliada no campo através de controle topográfico. Tais espessuras, conforme já mencionado, apresentaram por vezes desvios significativos dos valores

projetados. Visando a elaboração dos gráficos e curvas de compactação foram estabelecidas espessuras de referência que pudessem representar de forma mais fiel as faixas de espessuras utilizadas no campo. A Figura 4.5.4 apresenta a distribuição de espessuras controladas no aterro experimental para a praça de trabalho em planos horizontais em seus diversos quadrantes de ensaio. A partir da sistematização destes dados foram definidas espessuras de referência iguais a 0,3; 0,5 e 0,7m, sendo as faixas de espessuras para apresentação dos resultados fixadas como: $0,2\text{m} \leq t < 0,4\text{m}$; $0,4\text{m} \leq t < 0,6\text{m}$; e $0,6\text{m} \leq t < 0,8\text{m}$. Observa-se da referida figura que somente alguns pontos apresentaram espessuras fora das faixas definidas. Os valores correspondentes aos mesmos foram excluídos da representação gráfica final dos resultados.

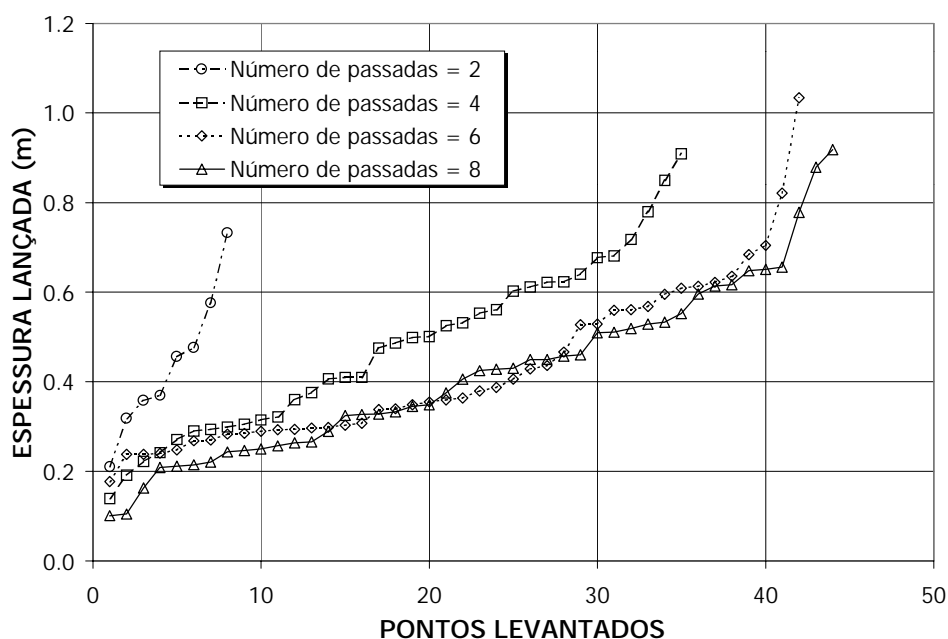


Figura 4.5.4 – Distribuição das espessuras das camadas lançadas na praça de trabalho em planos horizontais do aterro experimental.

A Figura 4.5.5 apresenta os resultados e as curvas de comportamento, obtidas através do modelo de compactação obtido (equação 4.1), admitindo 6 passadas dos equipamentos de teste. São apresentados inicialmente os resultados para os distintos equipamentos de teste (Bulldozer D6D e compactador 816F) e na seqüência a comparação entre os referidos equipamentos com base no modelo desenvolvido. Os resultados são apresentados em termos das espessuras e faixas de referência estabelecidas anteriormente. Apresenta-se ainda, na mesma figura e como forma de referência, a curva de saturação ($S_r = 100\%$) admitindo um peso específico para as partículas sólidas igual a $21,6\text{kN/m}^3$. Tendências de comportamento similares foram obtidas com a aplicação do modelo para 8 e 4 passadas dos equipamentos de teste.

A análise destas figuras permite observar que a espessura das camadas acabou desempenhando um papel de menor importância no processo de compactação, confirmando os resultados do estudo estatístico realizado. Admitindo, por exemplo, o emprego do compactador 816F e espessuras lançadas de 0,5m, uma variação do teor de umidade de 50% para 150% implica a redução do peso específico seco de 5,19 para 3,45kN/m³ (cerca de 34%). Assumindo agora um teor de umidade igual a 150%, a variação de espessuras de 0,7m para 0,3m, resulta em redução do peso específico seco de 3,73 para 3,03kN/m³ (cerca de 18%). As diferenças percentuais obtidas são ainda maiores para teores de umidade menores. Para ambos os equipamentos há uma tendência de incremento do peso específico seco com o aumento da espessura, o que contradiz as práticas operacionais utilizadas para densificação dos resíduos (BOLTON, 1995). Na verdade esta tendência foi gerada como resultado da análise e modelagem estatística dos dados, a qual incorpora todos os desvios decorrentes da heterogeneidade dos resíduos e dos ensaios *in situ* executados. Tal observação pode ainda estar associada ao processo de dilaceração da superfície da camada provocado pela passagem dos equipamentos nas operações de compactação dos resíduos. O fato importante a ser extraído destas observações é que este parâmetro apresentou menor influência no processo de compactação, em comparação com o teor de umidade. Vale ainda notar que os resíduos compactados pelo trator de esteiras tipo D6D apresentaram menor sensibilidade a este parâmetro em comparação aos compactados pelo equipamento 816F. A alteração da espessura lançada, no primeiro caso, resultou em mínimo impacto no peso específico seco dos materiais, independente do número de passadas do equipamento.

4.5.3.2 Efeito do Número de Passadas do Equipamento

À semelhança das espessuras lançadas, a influência do parâmetro número de passadas sobre o peso específico seco foi reproduzido a partir do modelo de compactação obtido. Neste caso, os valores preconizados no projeto foram rigorosamente respeitados e controlados durante os trabalhos de execução do experimento.

A Figura 4.5.6 apresenta os resultados e as curvas de comportamento, obtidas através do modelo de compactação desenvolvido, para diferente número de passadas do equipamento. As curvas peso específico seco vs. teor de umidade foram calculadas admitindo uma espessura de 0,5m para a camada lançada de resíduos. Os resultados, por sua vez, são apresentados em termos da faixa de espessura contida entre os valores 0,4 e 0,6m. São indicados inicialmente os resultados para os distintos equipamentos de teste (Bulldozer D6D e compactador 816F) e na seqüência a comparação entre os referidos equipamentos com base no modelo desenvolvido. Apresenta-se igualmente, na mesma figura e como forma de

Marques, Afonso Celso Moruzzi. Tese de Doutorado, EESC/USP (2001).

referência, a curva de saturação ($S_r = 100\%$) admitindo um peso específico para as partículas sólidas igual a $21,6\text{kN/m}^3$. Tendências de comportamento similares foram obtidas com a aplicação do modelo para 0,3 e 0,7m de espessura lançada de resíduos.

Da análise das referidas figuras pode ser constatada que a influência do parâmetro número de passadas apresenta igualmente um papel menos importante que o do teor de umidade no processo de compactação. Admitindo, por exemplo, o emprego do trator de esteiras e 6 passadas do equipamento, uma variação do teor de umidade de 50% para 150% implica a redução do peso específico seco de 5,14 para $3,27\text{kN/m}^3$ (cerca de 36%). Assumindo agora um teor de umidade igual a 150%, a variação do número de passadas de 8 para 4, resulta em redução do peso específico seco de 3,41 para $3,08\text{kN/m}^3$ (cerca de 10%). À semelhança da análise anterior, as diferenças percentuais obtidas são ainda maiores para teores de umidade menores. Neste caso, os resíduos compactados por ambos os equipamentos tiveram uma resposta bem semelhante e coerente com as práticas operacionais utilizadas para densificação dos materiais (BOLTON, 1995), ou seja, aumento do peso específico seco com o aumento do número de passadas. Vale observar ainda, que para maiores espessuras das camadas (0,5 e 0,7m) o compactador proporcionou maiores pesos específicos secos do que o trator de esteiras. Tal tendência acabou não se verificando com o emprego de espessuras menores (0,3m), situação na qual o desempenho dos equipamentos foi praticamente o mesmo.

Em suma, os resultados obtidos permitem observar uma menor influência da energia de compactação, em termos da espessura das camadas e do número de passadas do equipamento, quando comparadas com o papel desempenhado pelo teor de umidade dos resíduos no momento da compactação. Em alguns casos, o aumento da energia imposta (aumento do número de passadas ou diminuição da espessura das camadas) não implica ganhos significativos de peso específico, ficando a diferença entre curvas muito próxima à magnitude dos erros embutidos nas determinações dos pesos específicos e teores de umidade.

4.5.3.3 Efeito da Inclinação do Plano de Compactação

O efeito da inclinação do plano de compactação pode ser avaliado tendo por base os resultados obtidos com o trator de esteiras operando em plano horizontal (inclinação nula) e em plano inclinado na relação 1,0V:5,0H (inclinação de $11,3^\circ$). No caso do plano inclinado, apesar do menor número de pontos de observação e da não realização de levantamento topográfico complementar para a verificação das espessuras lançadas, foi possível serem estabelecidos parâmetros consistentes para o modelo de compactação.

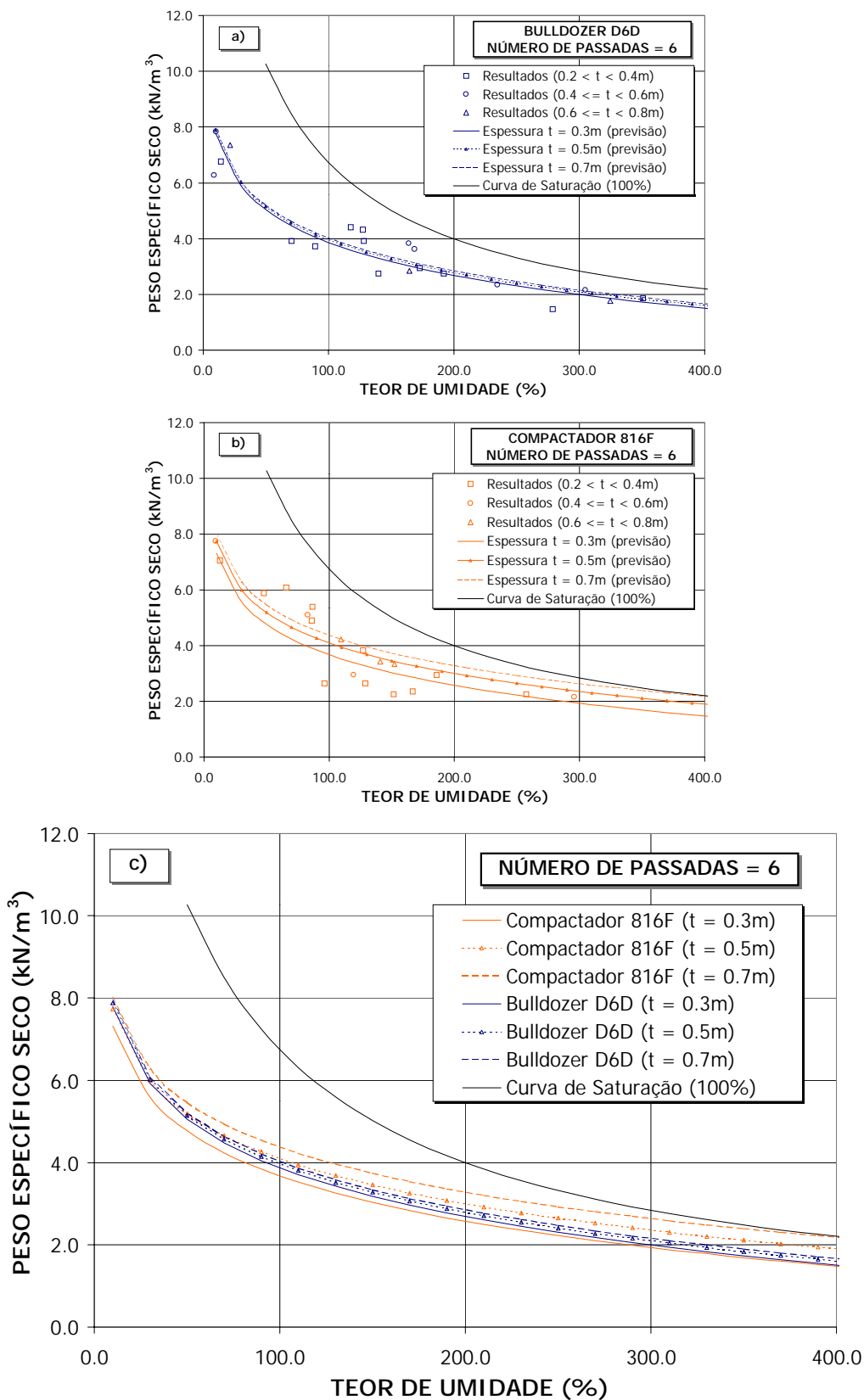


Figura 4.5.5 – Relação peso específico seco vs. teor de umidade vs. espessura das camadas para o trator de esteiras tipo D6D (a); para o compactador 816F (b); e para ambos os equipamentos de teste (c) operando em 6 passadas.

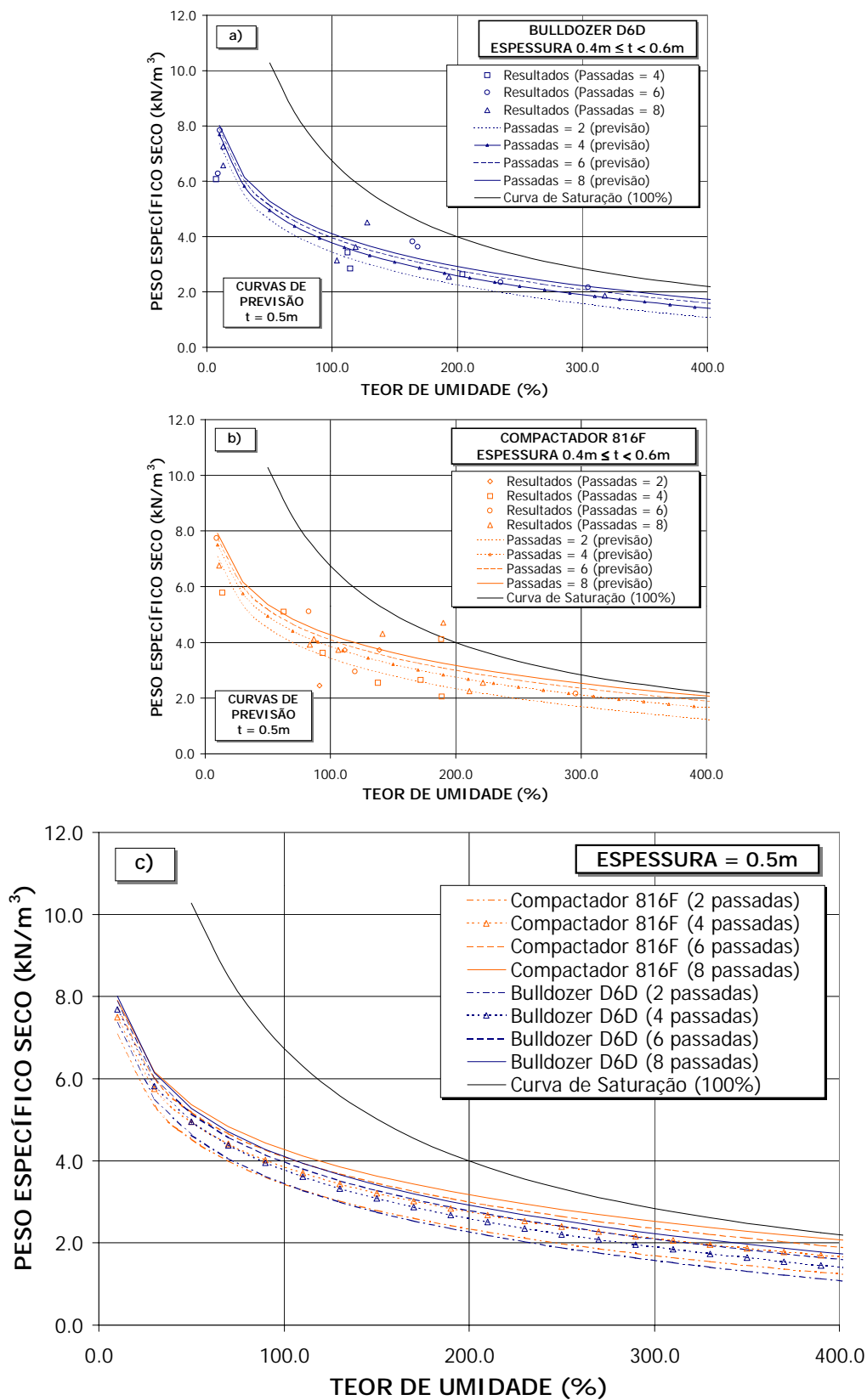


Figura 4.5.6 – Relação peso específico seco vs. teor de umidade vs. número de passadas para o trator de esteiras tipo D6D (a); para o compactador 816F (b); e para ambos os equipamentos de teste (c), assumindo espessura lançada de resíduos igual a 0,5m.

A Figura 4.5.7 apresenta os resultados e as curvas de comportamento, obtidas através do modelo de compactação desenvolvido (equação 4.1). As curvas peso específico seco vs. teor de umidade vs. número de passadas do equipamento foram calculadas admitindo uma espessura de 0,5m para a camada lançada de resíduos. Os resultados, por sua vez, são apresentados em termos da faixa de espessura contida entre os valores 0,4 e 0,6m. São indicados inicialmente os resultados para as distintas inclinações do plano de compactação (inclinado de 1,0V:5,0H e horizontal) e na seqüência a comparação entre as referidas inclinações com base no modelo desenvolvido. Apresenta-se igualmente, na mesma figura e como forma de referência, a curva de saturação ($S_r = 100\%$) admitindo um peso específico para as partículas sólidas igual a $21,6\text{kN/m}^3$. As mesmas tendências de comportamento foram observadas quando utilizadas espessuras de 0,3 e 0,7m.

A análise das figuras mencionadas permite observar que também para planos inclinados de compactação o efeito do número de passadas do equipamento e da espessura lançada de resíduos resulta em menor impacto nos valores do peso específico seco. A operação em planos inclinados, admitindo espessuras de 0,7m, resultou maiores pesos específicos secos para os resíduos, independente do número de passadas. Para espessuras menores (0,3 e 0,5m), no entanto, as relações verificadas pelo modelo praticamente se equivalem. É interessante ainda notar que para menores teores de umidade há uma pequena vantagem (maior densificação) com a operação em planos inclinados, independente dos demais parâmetros construtivos (número de passadas e espessura das camadas lançadas).

A tendência de obtenção de maiores pesos específicos, quando utilizado um plano de compactação inclinado, pode ser justificada pelas menores áreas de contato e pela translação do centro de massa do equipamento nesta situação, resultando na transferência de maiores tensões aos resíduos. Tal procedimento construtivo, no entanto, apresentou praticamente o mesmo efeito na densificação dos resíduos quando comparado com o advindo da alteração da espessura das camadas e/ou do número de passadas do equipamento.

4.5.3.4 Efeito do Equipamento de Compactação

O efeito dos equipamentos de compactação utilizados sobre a compactação dos resíduos sólidos no aterro experimental pode ser visualizado na Figura 4.5.8, na qual são apresentados todos os resultados obtidos e as curvas de comportamento calculadas pelo modelo de compactação, assumindo uma espessura para a camada lançada de 0,5m e um número de passadas igual a 6, para ambos os equipamentos. Da análise desta figura, assim como das figuras anteriormente apresentadas, nota-se pequena diferença entre a compactação obtida por ambos os equipamentos.

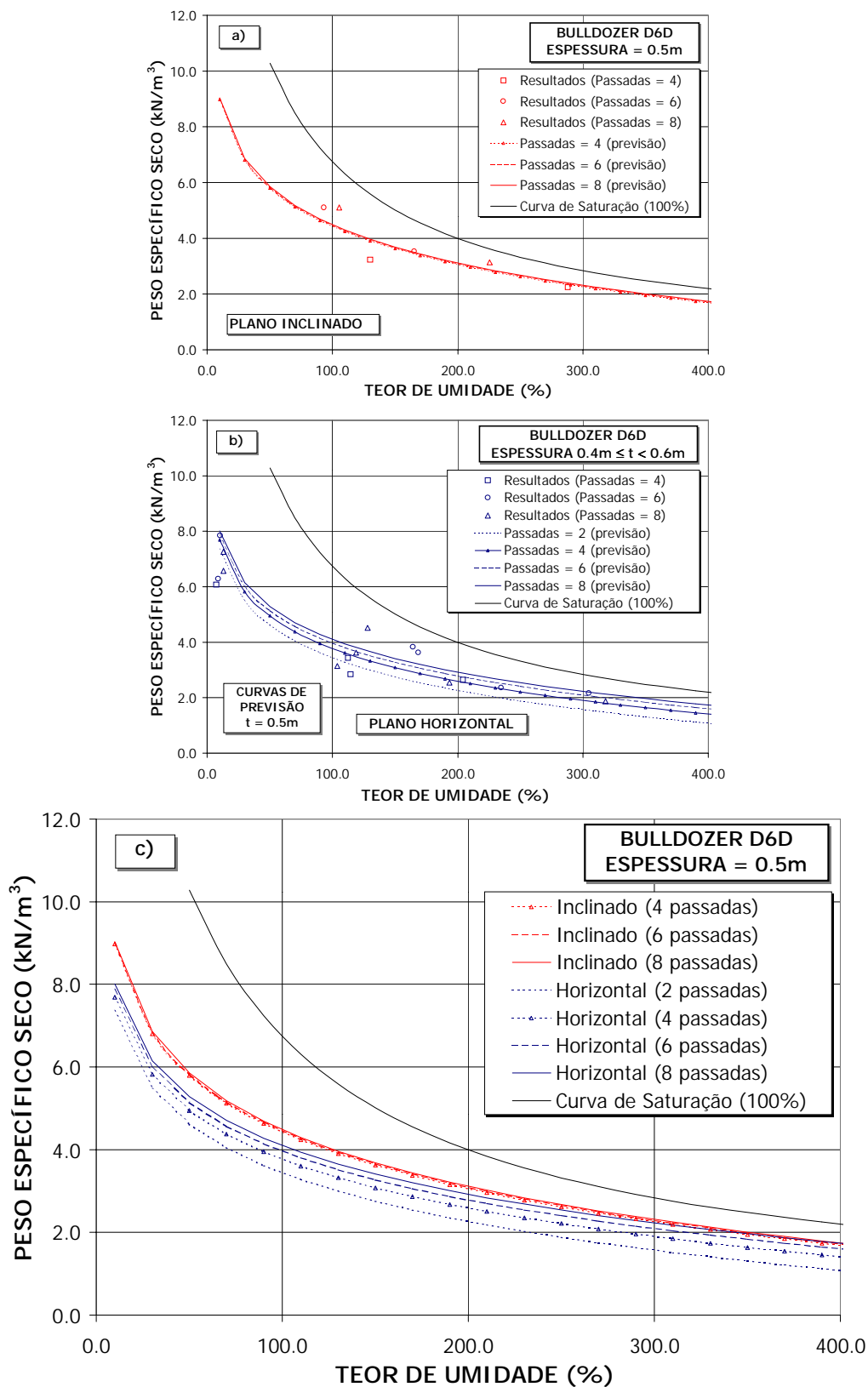


Figura 4.5.7 – Relação peso específico seco vs. teor de umidade vs. número de passadas para o trator de esteiras tipo D6D operando em plano inclinado (a); em plano horizontal (b); e em ambos planos de compactação (c), admitindo espessura lançada de resíduos igual a 0,5m.

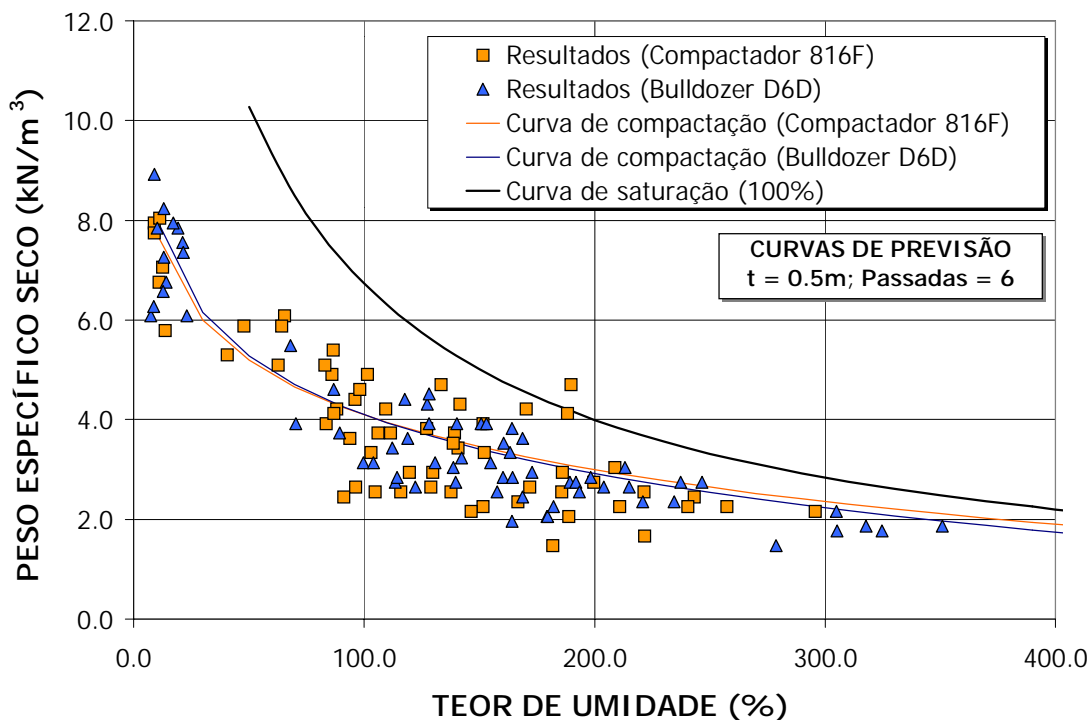


Figura 4.5.8 – Curvas peso específico seco vs. teor de umidade obtidas pelo modelo para distintos equipamentos de compactação.

Diversos aspectos podem influenciar a eficiência de compactação dos equipamentos, podendo ser destacados o peso do equipamento, a forma e dimensões dos rolos, e a velocidade dos equipamentos, entre outros (BOLTON, 1995). Os dois primeiros aspectos relacionam-se às pressões transmitidas aos resíduos, tendo fundamental papel no processo de densificação. No aterro experimental, apesar do maior peso do compactador 816F em relação ao trator de esteiras tipo D6, pressões menores ou equivalentes eram transmitidas às camadas de resíduos pelo primeiro quando considerada uma maior área de contato dos rolos compactadores com os resíduos. Esta situação ocorria, por exemplo, quando o compactador movia-se sobre camadas não compactadas (início do teste) ou mais espessas, acarretando uma maior penetração dos rolos nos resíduos e conseqüente aumento da área de contato. Tal situação acaba justificando, numa análise global dos resultados, os comportamentos observados. Quanto à velocidade dos equipamentos cabe lembrar que a mesma foi mantida constante durante todos os testes, conforme descrito no item 3.4, não devendo este parâmetro ter tido influência nos resultados observados.

4.6 Avaliação da Evolução do Peso Específico com a Profundidade

O conhecimento do peso específico em profundidade apresenta grande interesse prático, seja para cálculo e análise de estabilidade dos maciços, seja para avaliação da

compressibilidade e do aumento da vida útil dos aterros sanitários. A determinação deste parâmetro no campo e ao longo da profundidade dos maciços, constitui, no entanto, tarefa extremamente difícil e complexa. Assim, com base nos levantamentos e controles efetuados no aterro experimental e em algumas hipóteses de cálculo procurou-se modelar, a partir de análise estatística, a evolução do peso específico em profundidade.

4.6.1 Relação Espessura Controlada vs. Peso Específico

Anteriormente à análise estatística fez-se necessária a sistematização dos dados, de forma que fossem estabelecidos para os quadrantes de ensaio e para os diversos pontos de controle, os parâmetros tensão vertical média da camada (σ_{vm}), peso específico total (γ), profundidade (z) e espessura lançada média das camadas (t_m), conforme a seguir se descreve:

- tensão vertical média da camada (σ_{vm}): o valor da tensão vertical média de cada camada, em cada quadrante de ensaio, foi calculado tendo por base os pesos específicos do resíduo compactado (γ_c) e do resíduo solto (γ_{sp}), determinados através dos ensaios *in situ*, e das espessuras compactadas (t_c) e lançadas (t) das camadas, calculadas a partir dos controles topográficos realizados, segundo a formulação:

$$\sigma_{vm} = \frac{(\gamma_{sp} \cdot t + \gamma_c \cdot t_c)}{2}$$

Observa-se que as tensões verticais das camadas foram calculadas como sendo a média entre os parâmetros compactados e os lançados, procurando com isso considerar um universo amostral maior de valores e minimizar os erros embutidos nas determinações *in situ*. Tal cálculo assume, de forma simplificada, que a massa e a área da camada (elemento de análise) permanecem constantes entre os instantes do lançamento e da compactação dos resíduos. A Figura 4.6.1 apresenta a relação, para as diversas camadas estudadas, entre a tensão vertical calculada com base no controle das camadas compactadas (σ_{vc}) e das camadas lançadas (σ_{vsp}).

Baseado nas tensões verticais médias das camadas foi também possível avaliar as tensões verticais atuantes sobre cada camada devido à sobreposição de novas camadas durante a execução do aterro experimental. A determinação destas tensões respeitou a seguinte formulação:

$$\sigma_{i,j} = \frac{1}{2}\sigma_{vm,i} + \sum_{k=i+1}^j \sigma_{vm,k}$$

onde:

$\sigma_{i,j}$ = tensão vertical atuante na camada i , devido à disposição da camada j

$\sigma_{vm,k}$ = tensão vertical média da camada k

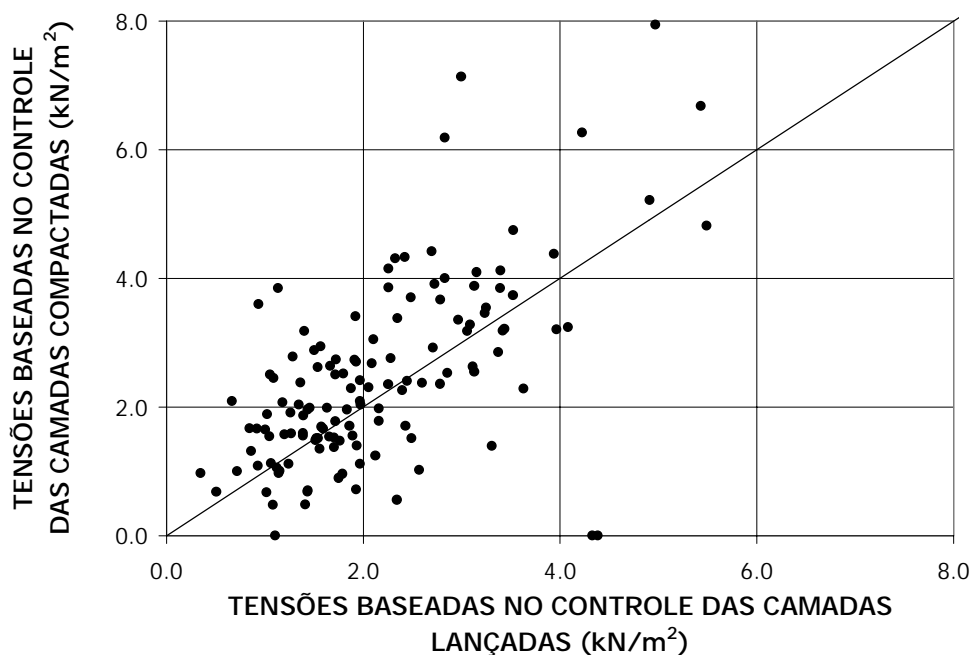


Figura 4.6.1 – Relação entre as tensões verticais calculadas com base nos valores compactados (σ_{vc}) e nos valores lançados (σ_{vsp}).

- peso específico total (γ): o peso específico de cada camada, neste caso, foi avaliado para cada quadrante de ensaio e para cada etapa construtiva, segundo a seguinte formulação:

$$\gamma_{i,j} = \frac{\sigma_{vm,i}}{t_{c(i,j)}}$$

onde:

$\gamma_{i,j}$ = peso específico da camada i , após disposição e compactação da camada j .

$\sigma_{vm,i}$ = tensão vertical média da camada i .

$t_{c(i,j)}$ = espessura compactada da camada i , após disposição e compactação da camada j .

- profundidade (z): a profundidade de cada camada foi calculada tendo como referência o centro da mesma e as espessuras das camadas sobrejacentes após cada etapa construtiva. Desta forma, conhecido o conjunto de espessuras compactadas para as diversas etapas

construtivas pode-se determinar as correspondentes profundidades, segundo a seguinte formulação:

$$z_{i,j} = \frac{t_{c(i,j)}}{2} + \sum_{k=i+1}^j t_{c(k,j)}$$

onde:

$z_{i,j}$ = profundidade da camada i com relação à disposição e compactação da camada j .

$t_{c(i,j)}$ = espessura compactada da camada i , após disposição e compactação da camada j .

$t_{c(k,j)}$ = espessura compactada da camada k , após disposição e compactação da camada j .

- espessura lançada média das camadas (t_m): visando também correlacionar a evolução do peso específico em profundidade com as distintas técnicas construtivas utilizadas no aterro experimental foi utilizado o conceito da espessura lançada média das camadas. Tal conceito procurou ter em conta as distintas espessuras lançadas que acabaram contribuindo, de forma indireta, para a definição da profundidade z em cada situação de cálculo. A determinação deste parâmetro obedeceu, portanto, a seguinte formulação:

$$t_{m(i,j)} = \frac{\sum_{k=i}^j t_k}{j}$$

onde:

$t_{m(i,j)}$ = espessura lançada média da camada i , relativa à disposição e compactação da camada j

t_k = espessura lançada da camada k

O número de passadas do equipamento (P) também foi considerado no estudo, porém neste caso, face às características deste parâmetro (valores absolutos e constantes para cada quadrante de ensaio e etapa construtiva), nenhum ajuste ou hipótese complementar teve que ser realizada.

As Tabelas 4.6.1 e 4.6.2 apresentam os parâmetros descritos, calculados para o quadrante 20 do aterro experimental, caracterizado por espessuras projetadas de 0,4m, planos horizontais de compactação e submetido a 8 passadas do compactador 816F. Procedimento de cálculo similar foi efetuado para os demais quadrantes de ensaio do experimento. Na referida tabela pode-se verificar que alguns valores mostraram-se inconsistentes (valores negativos, por exemplo), tendo os mesmos sido desconsiderados nas análises. Por outro lado,

alguns valores não se encontram apresentados por não terem sido determinados no campo no decorrer do experimento.

Tabela 4.6.1 – Espessuras e profundidades das camadas para as etapas construtivas do experimento. Quadrante de ensaio 20.

QUADRANTE DE ENSAIO 20 (COMPACTADOR 816F - 8 PASSADAS)										
<i>Espessura compactada de cada camada após cada etapa construtiva</i>										
CAMADAS (i)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Espe ssura lançada (m)	0.289	0.250	0.457	0.430	0.246	0.257	0.101	0.212	0.333	0.264
ETAPAS (j)										
1	0.160									
2	0.208	0.219								
3	0.177	0.190	0.370							
4	0.103	0.200	0.210	0.185						
5	0.174	0.146	0.095	0.222	-0.120					
6	-	-	-	-	-	-				
7	-	0.140	0.170	0.107	0.142	0.018	0.224			
8	0.057	0.058	0.130	0.110	0.145	0.205	0.288	0.072		
9	0.066	0.090	0.110	0.100	0.170	0.222	0.138	0.190	0.110	
10	0.090	0.110	0.100	0.080	0.100	0.090	0.120	0.240	0.210	0.190
PROFUNDIDADE Z (m)										
<i>Altura compactada acumulada (m) sobre a metade de cada camada após cada etapa construtiva</i>										
CAMADAS (i)										
ETAPAS (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.080									
2	0.323	0.109								
3	0.648	0.465	0.185							
4	0.647	0.495	0.290	0.093						
5	0.430	0.270	0.150	-0.009	-0.060					
6	-	-	-	-	-	-				
7	-	0.731	0.576	0.437	0.313	0.233	0.112			
8	1.036	0.979	0.885	0.765	0.637	0.462	0.216	0.036		
9	1.163	1.085	0.985	0.880	0.745	0.549	0.369	0.205	0.055	
10	1.285	1.185	1.080	0.990	0.900	0.805	0.700	0.520	0.295	0.095

4.6.2 Análise e Modelagem Estatística dos Dados

Com base no procedimento descrito no item anterior foi produzido um conjunto de pontos X_i compostos por 4 variáveis: peso específico (γ), profundidade (z), espessura lançada média (t_m) e número de passadas do equipamento (P), ou seja:

$$X_i = [\gamma_i, z_i, t_{m,i}, P_i]$$

A estes pontos, foram acrescentados ainda alguns resultados de medições diretas do peso específico em camadas profundas realizadas no aterro experimental, conforme procedimento descrito no item 3.6.2. Recorde-se que os ensaios de medição direta do peso específico em profundidade foram abandonados no decorrer do experimento pelas dificuldades de sua realização.

Tabela 4.6.2 – Pesos específicos, tensões verticais atuantes, espessuras e profundidades. Quadrante de ensaio 20.

QUADRANTE DE ENSAIO 20 (COMPACTADOR S16F - 8 PASSADAS)					
ETAPAS (j)	Espessuras lançadas, t (m)	Peso específico solo γ_{sp} (kN/m ³)	Espessuras compactadas, t _c (m)	Peso específico compactado γ_c (kN/m ³)	Tensão vertical média, σ_{vm} (kN/m ²)
1	0,289	4,805	0,160	5,708	1,471
2	0,250	4,805	0,219	7,158	1,384
3	0,457	4,315	0,370	7,551	2,382
4	0,430	5,982	0,185	7,845	2,010
5	0,246	4,511	-0,120	6,668	1,108
6	0,257	3,628	0,000	5,295	0,932
7	0,101	3,432	0,224	4,315	0,347
8	0,212	5,099	0,072	6,668	0,781
9	0,335	6,334	0,110	11,277	1,681
10	0,264	4,805	0,190	8,335	1,426
CAMADA 1			VALORES OBTIDOS		
Tensões atuantes (kN/m ²)	Espessuras compactadas, t _c (m)	Espessuras lançadas médias, t _m (m)	Profundidade da camada, z (m)	Peso específico γ (kN/m ³)	Peso específico relativo
0,735	0,160	0,289	0,080	5,193	1,000
2,120	0,208	0,269	0,323	na	-
4,502	0,177	0,332	0,648	na	-
6,512	0,103	0,356	0,647	14,281	1,553
7,620	0,174	0,334	na	-	-
8,553	nd	0,321	nd	-	-
8,899	nd	0,290	nd	-	-
9,680	0,057	0,280	1,036	na	-
11,361	0,066	0,286	1,163	22,287	2,424
12,787	0,090	0,284	1,285	na	-
CAMADA 2					
0,692	0,219	0,250	0,109	6,322	1,000
3,074	0,190	0,353	0,465	7,287	1,133
5,084	0,200	0,379	0,495	na	-
6,193	0,146	0,345	0,270	9,483	1,500
7,125	nd	0,328	nd	-	-
7,471	0,140	0,290	0,731	9,889	1,564
8,252	0,058	0,279	0,979	na	-
9,833	0,090	0,286	1,085	15,803	2,433
11,360	0,110	0,283	1,185	na	-
CAMADA 3					
1,191	0,370	0,457	0,185	6,437	1,000
3,201	0,210	0,443	0,290	11,342	1,762
4,310	0,095	0,377	na	-	-
5,242	nd	0,347	nd	-	-
5,588	0,170	0,298	0,576	14,013	2,176
6,369	0,130	0,284	0,885	18,322	2,846
8,050	0,110	0,291	0,985	21,653	3,364
9,476	0,100	0,287	1,080	23,818	3,700
CAMADA 4					
1,005	0,185	0,430	0,093	10,866	1,000
2,114	0,222	0,338	na	-	-
3,046	nd	0,311	nd	-	-
3,392	0,107	0,258	0,437	18,707	1,729
4,173	0,110	0,249	0,765	18,275	1,682
5,854	0,100	0,263	0,880	20,102	1,850
7,280	0,080	0,263	0,990	25,128	2,313
CAMADA 5					
0,554	-0,120	0,246	na	-	-
1,486	nd	0,251	nd	-	-
1,833	0,142	0,201	0,313	na	-
2,614	0,145	0,204	0,637	na	-
4,295	0,170	0,230	0,745	na	-
5,721	0,100	0,235	0,900	na	-
CAMADA 6					
0,466	nd	0,257	nd	-	-
0,813	0,018	0,179	0,233	na	-
1,593	0,205	0,190	0,462	na	-
3,275	0,222	0,226	0,549	na	-
4,701	0,090	0,233	0,805	na	-
CAMADA 7					
0,173	0,224	0,101	0,112	na	-
0,954	0,288	0,156	0,216	na	-
2,635	0,138	0,215	0,369	na	-
4,061	0,120	0,227	0,700	na	-
CAMADA 8					
0,390	0,072	0,212	0,036	10,841	1,000
2,072	0,190	0,272	0,205	na	-
3,498	0,240	0,270	0,520	na	-
CAMADA 9					
0,841	0,110	0,335	0,055	15,286	1,000
2,267	0,210	0,296	0,295	na	-
CAMADA 10					
0,713	0,190	0,264	0,095	7,506	1,000

nd = dado não disponível
na = dado não utilizado

As Tabelas 4.6.3 e 4.6.4 apresentam o conjunto de pontos X_i , obtidos para os quadrantes de ensaio operados pelo trator de esteiras tipo D6D e pelo compactador 816F, respectivamente.

O estudo e modelagem estatística realizado teve por base análises de regressões múltiplas não lineares, procurando correlacionar os parâmetros mencionados, tendo como variável independente o peso específico dos resíduos (γ). As análises foram realizadas através do programa SIGMAPLOT, versão 6.0⁹, com utilização de rotinas similares às utilizadas pelo programa SAS, empregado no estudo anterior. A opção pelo emprego do programa SIGMAPLOT, neste caso, deveu-se a uma melhor interface gráfica para geração dos resultados. O total de pontos X_i utilizado nestas análises foi de 182 e 142, respectivamente, para as praças de trabalho operadas pelo trator de esteiras tipo D6D e pelo compactador 816F. Foram testados e verificados diversos modelos (por exemplo, os baseados em funções matemáticas do tipo logarítmica, hiperbólica, exponencial, polinomial e de potência) para correlacionar os parâmetros do estudo.

O modelo hiperbólico, apesar da dispersão dos dados, apresentou o melhor desempenho entre as diversas relações testadas para ajustar os dados observados. O modelo final obtido obedece a equação a seguir apresentada, enquanto a Tabela 4.6.5 sumariza os parâmetros do modelo para os distintos equipamentos de teste.

$$\gamma = a_1 + a_2 P/t + z / (b_1 + b_2 P/t + [c_1 + c_2 P/t] z) \quad (4.2)$$

onde:

z = profundidade (m)

P = número de passadas

t = espessura lançada das camadas (m)

γ = peso específico dos resíduos sólidos (kN/m^3)

$a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$ = parâmetros do modelo (conforme apresentado na Tabela 4.6.5).

Apesar da elevada dispersão dos dados observados, dos baixos coeficientes de determinação (R^2) e da significância das variáveis, associadas às elevadas probabilidades (p), procurou-se desenvolver modelos fisicamente consistentes para reprodução da relação peso específico vs. profundidade para distintas técnicas construtivas. Neste sentido, as análises basearam-se nas sugestões de KREITH (1994), que observou o melhor desempenho de funções hiperbólicas para ajustar e reproduzir a mencionada relação, conforme descrito no item 2.2.2.1. Os comportamentos assim obtidos, ou seja, aumento do peso específico com a

⁹ SIGMAPLOT 2000 for Windows, versão 6.0 – SPSS Inc.

profundidade, tendendo a um valor assintótico, assim como os valores calculados, encontram-se dentro das tendências e faixas normalmente reportadas na literatura, conforme será apresentado e discutido na seqüência.

Tabela 4.6.3 – Valores X_i (peso específico, profundidade, espessura e número de passadas) utilizados no estudo estatístico. Trator de esteiras D6D em plano horizontal.

BULLDOZER D6D - PLANO HORIZONTAL														
QUADRANTE	t_w (s)	r (m)	γ (kNm ⁻³)	P (passadas)	QUADRANTE	t_w (s)	r (m)	γ (kNm ⁻³)	P (passadas)	QUADRANTE	t_w (s)	r (m)	γ (kNm ⁻³)	P (passadas)
Q37	0.328	0.092	8.891	3	Q33	0.290	0.118	6.936	4	Q34	0.428	0.152	7.147	3
	0.348	0.661	9.935	3		0.276	0.535	9.588	4		0.512	0.508	7.889	3
ensaio direto	0.328	0.092	9.218	3		0.297	1.212	9.056	4		0.512	0.718	7.516	3
ensaio direto	0.389	0.326	10.198	3		0.306	1.465	9.588	4		0.465	0.920	9.045	3
ensaio direto	0.348	0.661	10.689	3		0.306	1.580	13.583	4		0.441	1.077	15.625	3
	0.458	0.110	8.788	3	ensaio direto	0.290	0.118	7.943	4	ensaio direto	0.428	0.152	7.551	3
	0.358	0.403	10.017	3	ensaio direto	0.256	0.348	6.962	4	ensaio direto	0.512	0.508	9.886	3
	0.321	0.534	10.450	3	ensaio direto	0.278	0.674	10.983	4		0.596	0.185	6.962	3
	0.290	0.731	9.569	3		0.222	0.185	5.089	4		0.554	0.394	7.195	3
	0.364	0.955	10.174	3		0.272	0.355	5.625	4		0.477	0.678	10.600	3
ensaio direto	0.458	0.110	7.747	3		0.294	0.921	6.807	4		0.444	0.897	12.879	3
ensaio direto	0.358	0.403	10.002	3		0.294	0.971	8.158	4		0.437	0.992	11.448	3
	0.349	0.140	7.797	3		0.298	1.037	6.288	4		0.511	0.108	10.929	3
	0.163	0.076	7.153	3		0.308	1.475	11.875	4		0.325	0.145	7.288	3
	0.269	0.337	8.561	3	ensaio direto	0.222	0.185	5.099	4		0.335	0.370	7.734	3
	0.275	0.137	7.988	3	ensaio direto	0.272	0.474	10.895	4		0.359	0.640	11.729	3
	0.215	0.080	7.368	3		0.271	0.130	6.800	4		0.321	0.800	11.729	3
	0.244	0.385	14.555	3		0.315	0.536	8.710	4		0.345	0.117	6.826	3
	0.277	0.630	13.645	3		0.308	0.575	9.768	4		0.375	0.437	7.099	3
	0.261	1.005	12.843	3		0.322	0.818	10.736	4		0.328	0.603	7.429	3
	0.239	0.940	13.645	3		0.319	1.279	9.823	4		0.406	0.162	8.811	3
	0.221	0.041	12.907	3		0.301	1.055	9.305	4		0.307	0.363	10.806	3
	0.278	0.460	13.492	3		0.294	0.183	7.082	4	Q30	0.410	0.130	7.889	4
	0.234	0.525	12.699	3		0.327	0.460	9.074	4		0.501	0.745	8.567	4
Q25	0.238	0.067	7.815	4		0.296	0.720	10.370	4		0.507	1.148	9.229	4
	0.363	0.835	11.722	4		0.318	0.129	5.911	4		0.477	1.410	9.668	4
	0.318	0.967	10.550	4		0.331	0.535	6.604	4	ensaio direto	0.410	0.130	8.041	4
	0.315	1.260	13.187	4		0.296	0.565	8.935	4	ensaio direto	0.471	0.525	9.512	4
ensaio direto	0.238	0.067	7.158	4		0.370	0.110	7.401	4		0.532	0.177	5.889	4
ensaio direto	0.289	0.341	8.433	4		0.289	0.395	9.578	4		0.546	0.471	6.783	4
ensaio direto	0.338	0.549	12.943	4		0.305	0.080	10.123	4		0.529	0.877	6.454	4
	0.340	0.125	7.239	4	Q32						0.494	1.165	7.445	4
	0.388	0.370	12.926	4	ensaio direto	0.268	0.157	8.825	6		0.531	1.395	6.318	4
	0.356	0.613	12.926	4	ensaio direto	0.337	0.421	9.904	6		0.466	1.415	9.926	4
	0.335	0.610	8.829	4		0.406	0.145	5.854	6		0.561	0.157	9.390	4
	0.322	0.832	10.647	4		0.461	0.716	7.788	6		0.481	0.870	9.542	4
ensaio direto	0.340	0.125	7.943	4		0.494	1.123	7.381	6		0.531	1.092	10.756	4
ensaio direto	0.388	0.370	10.198	4		0.481	1.175	11.338	6		0.525	0.198	6.510	4
	0.436	0.150	6.929	4		0.466	1.340	9.432	6		0.521	0.817	9.351	4
	0.310	0.585	9.668	4		0.613	0.215	8.338	6		0.426	0.890	11.689	4
	0.293	0.095	8.548	4		0.488	0.441	10.799	6		0.358	0.148	5.883	4
	0.267	0.411	12.303	4		0.524	0.838	10.545	6		0.519	0.570	7.942	4
	0.289	0.577	13.534	4		0.478	1.125	14.342	6		0.393	0.680	8.737	4
	0.270	0.067	9.836	4		0.364	0.138	8.408	6		0.681	0.230	9.041	4
	0.288	0.452	10.193	4		0.463	0.750	8.893	6	Q41	0.651	0.200	7.097	3
	0.273	0.865	12.046	4		0.595	0.159	8.466	6		0.715	0.708	7.864	3
	0.355	0.106	7.257	4		0.512	0.495	10.748	6		0.618	0.917	9.369	3
	0.317	0.405	9.850	4		0.470	0.565	11.785	6		0.628	1.300	12.904	3
	0.282	0.555	10.257	4		0.429	0.185	8.358	6		0.778	0.264	6.639	3
	0.349	0.150	7.311	4		0.408	0.325	12.369	6		0.602	0.533	7.523	3
	0.298	0.225	11.544	4		0.387	0.180	8.914	6		0.628	0.985	8.559	3
	0.248	0.065	8.223	4							0.685	1.425	12.088	3
Q39	0.561	0.230	7.735	4							0.425	0.150	7.675	3
	0.633	0.654	9.990	4							0.694	1.145	8.528	3
	0.688	0.885	12.061	4							0.656	0.218	8.331	3
	0.699	1.965	11.477	4							0.768	0.872	13.130	3
	0.704	0.234	7.283	4							0.879	0.367	7.144	3
	0.632	0.558	9.568	4						Q37	0.677	0.244	6.961	4
	0.633	0.982	8.989	4							0.640	0.674	10.958	4
	0.734	1.645	10.351	4							0.648	1.064	9.035	4
	0.568	0.190	8.736	4							0.655	2.125	11.714	4
	0.598	0.609	8.634	4							0.603	0.260	6.583	4
	0.744	1.295	8.540	4							0.622	0.703	9.755	4
	0.636	0.213	7.334	4							0.658	1.835	11.638	4
	0.835	0.960	10.386	4							0.640	0.265	6.827	4
	1.034	0.405	7.971	4							0.665	1.465	8.040	4

Tabela 4.6.4 – Valores X_i (peso específico, profundidade, espessura e número de passadas) utilizados no estudo estatístico. Compactador 816F em plano horizontal.

COMPACTADOR 816F - PLANO HORIZONTAL														
QUADRANTE	t_m (m)	z (m)	γ (kN/m ³)	P (passadas)	QUADRANTE	t_m (m)	z (m)	γ (kN/m ³)	P (passadas)	QUADRANTE	t_m (m)	z (m)	γ (kN/m ³)	P (passadas)
Q09	0.289	0.890	9.193	8	Q18	0.289	0.079	9.368	6	Q16	0.315	0.108	7.529	4
casca direto	0.356	0.647	14.281	8	casca direto	0.288	0.486	12.412	6	casca direto	0.434	0.563	9.826	4
casca direto	0.289	0.890	9.706	8	casca direto	0.296	0.674	12.517	6	casca direto	0.400	0.671	9.324	4
casca direto	0.269	0.923	12.748	8	casca direto	0.302	1.280	12.412	6	casca direto	0.402	0.793	9.989	4
casca direto	0.332	0.648	12.748	8	casca direto	0.301	1.285	11.458	6	casca direto	0.368	1.618	9.364	4
casca direto	0.250	0.309	6.322	8	casca direto	0.289	0.079	18.082	6	casca direto	0.315	0.108	7.453	4
casca direto	0.353	0.465	7.287	8	casca direto	0.264	0.236	18.492	6	casca direto	0.401	0.224	10.294	4
casca direto	0.379	0.493	6.922	8	casca direto	0.289	0.433	7.158	6	casca direto	0.434	0.563	11.373	4
casca direto	0.290	0.731	9.889	8	casca direto	0.246	0.080	6.742	6	casca direto	0.487	0.048	6.962	4
casca direto	0.283	1.185	12.596	8	casca direto	0.269	0.325	9.297	6	casca direto	0.494	0.398	9.327	4
casca direto	0.250	0.309	7.158	8	casca direto	0.288	0.380	11.725	6	casca direto	0.501	0.158	6.888	4
casca direto	0.353	0.465	10.689	8	casca direto	0.296	0.556	9.299	6	casca direto	0.400	0.294	11.806	4
casca direto	0.457	0.185	6.437	8	casca direto	0.296	0.767	9.064	6	casca direto	0.378	1.158	11.488	4
casca direto	0.443	0.290	11.342	8	casca direto	0.303	1.180	13.483	6	casca direto	0.359	1.308	8.610	4
casca direto	0.298	0.976	14.811	8	casca direto	0.302	1.075	8.297	6	casca direto	0.365	1.348	10.332	4
casca direto	0.430	0.893	10.866	8	casca direto	0.246	0.080	6.276	6	casca direto	0.299	0.103	7.136	4
casca direto	0.212	0.836	10.841	8	casca direto	0.289	0.325	18.188	6	casca direto	0.353	0.406	8.517	4
casca direto	0.264	0.895	7.506	8	casca direto	0.338	0.130	6.776	6	casca direto	0.323	0.607	13.398	4
casca direto	0.569	0.155	7.818	8	casca direto	0.314	0.925	18.363	6	casca direto	0.354	0.965	9.823	4
casca direto	0.569	0.155	7.747	8	casca direto	0.285	0.136	6.731	6	casca direto	0.335	1.105	9.823	4
casca direto	0.562	0.438	8.923	8	casca direto	0.292	0.534	9.236	6	casca direto	0.346	1.173	11.333	4
casca direto	0.614	0.180	9.229	8	casca direto	0.291	0.537	11.961	6	casca direto	0.407	0.168	5.930	4
casca direto	0.617	0.168	9.571	8	casca direto	0.309	0.775	11.961	6	casca direto	0.331	0.485	14.162	4
casca direto	0.468	0.645	12.406	8	casca direto	0.308	0.880	11.187	6	casca direto	0.367	0.825	11.163	4
casca direto	0.484	1.820	13.439	8	casca direto	0.306	0.845	11.961	6	casca direto	0.342	0.905	7.591	4
casca direto	0.491	0.775	14.824	8	casca direto	0.296	0.115	7.337	6	casca direto	0.353	1.015	9.888	4
casca direto	0.327	0.888	5.574	8	casca direto	0.293	0.395	18.887	6	casca direto	0.476	0.185	5.586	4
casca direto	0.533	0.200	9.392	8	casca direto	0.315	0.640	12.053	6	casca direto	0.376	0.473	9.842	4
casca direto	0.359	0.348	7.513	8	casca direto	0.312	0.730	8.477	6	casca direto	0.240	0.096	8.477	4
casca direto	0.359	0.148	9.218	8	casca direto	0.309	0.715	12.980	6	casca direto	0.410	0.099	8.555	4
casca direto	0.412	0.346	10.180	8	casca direto	0.297	0.064	6.661	6	casca direto	0.475	0.168	7.525	4
casca direto	0.466	0.341	8.947	8	casca direto	0.319	0.465	7.690	6	casca direto	0.543	0.456	9.964	4
casca direto	0.575	0.529	8.879	8	casca direto	0.388	0.080	18.419	6	casca direto	0.573	1.638	11.459	4
casca direto	0.496	0.910	11.300	8	casca direto	0.328	0.345	12.823	6	casca direto	0.562	1.808	9.803	4
casca direto	0.583	1.100	10.358	8	casca direto	0.303	0.045	14.781	6	casca direto	0.475	0.168	8.335	4
casca direto	0.684	0.185	8.184	8	casca direto	0.294	0.040	11.869	6	casca direto	0.583	0.456	11.179	4
casca direto	0.512	0.870	14.471	8	Q6	0.648	0.142	18.071	8	casca direto	0.612	0.185	8.947	4
casca direto	0.387	0.125	7.108	8	casca direto	0.918	0.264	9.760	8	casca direto	0.665	0.588	9.826	4
casca direto	0.418	0.435	8.462	8	casca direto	0.666	0.783	14.723	8	casca direto	0.592	1.398	13.754	4
casca direto	0.467	0.623	9.606	8	casca direto	0.552	0.182	8.491	8	casca direto	0.718	0.218	7.972	4
casca direto	0.529	0.165	9.427	8	casca direto	0.858	0.188	9.760	4	casca direto	0.599	0.908	13.951	4
casca direto	0.547	0.425	14.813	8	Q2	0.906	0.330	8.183	4	casca direto	0.587	1.128	11.163	4
casca direto	0.564	0.160	8.794	8	casca direto	0.755	1.030	18.083	4	casca direto	0.570	1.248	13.951	4
casca direto	0.568	0.207	7.995	8	casca direto	0.576	0.113	8.710	4	casca direto	0.456	0.188	6.811	4
casca direto	0.685	0.698	9.816	8						casca direto	0.505	0.548	8.851	4
casca direto	0.823	0.264	9.571	8						casca direto	0.503	0.735	9.817	4
casca direto	0.684	0.803	13.502	8						casca direto	0.553	0.208	10.339	4
casca direto	0.615	0.458	7.168	8						casca direto	0.526	0.465	14.268	4
casca direto	0.689	0.150	7.943	8						casca direto	0.499	0.168	7.277	4

Tabela 4.6.5 – Parâmetros do modelo peso específico vs. profundidade.

PARÂMETROS	EQUIPAMENTO	
	COMPACTADOR 816F	BULLDOZER D6D
a_1 (kN/m ³)	6,4127 ($p=0.0003$)	6,0418 ($p<0.0001$)
a_2 (kN/m ²)	0,0560 ($p=0.4485$)	0,0696 ($p=0.0323$)
b_1 (m ⁴ /kN)	0,0523 ($p=0.631$)	0,2652 ($p=0.0077$)
b_2 (m ⁵ /kN)	0,0021 ($p=0.7455$)	-0,0062 ($p=0.0023$)
c_1 (m ³ /kN)	0,1976 ($p=0.0157$)	0,1340 ($p=0.0429$)
c_2 (m ⁴ /kN)	-0,0026 ($p=0.6825$)	-0,0004 ($p=0.8689$)
R^2	0.27	0.39

Obs: o significado da probabilidade p consta da Tabela 4.5.1.

4.6.3 Relação Peso Específico vs. Profundidade vs. Equipamento de Compactação

Com base no modelo descrito no item anterior (equação 4.2) foram produzidas curvas de evolução do peso específico vs. profundidade para distintas técnicas construtivas (espessura

lançada das camadas e número de passadas) e para os dois equipamentos de teste, conforme a seguir se descreve.

4.6.3.1 Influência da Espessura das Camadas

Para a geração e apresentação das curvas do modelo foram utilizadas as mesmas espessuras e faixas de referência discutidas no item 4.5.3.1. A Figura 4.6.2 apresenta os resultados e as curvas de previsão, desenvolvidas a partir do modelo estatístico, admitindo 6 passadas dos equipamentos de teste. São apresentados, inicialmente, os resultados individualizados para o trator de esteiras tipo D6D e para o compactador 816F, sendo na seqüência feita a comparação de desempenho entre ambos equipamentos com base no modelo. Tendências de comportamento similares foram obtidas quando consideradas 8 e 4 passadas dos equipamentos de teste.

A análise desta figura e dos resultados advindos da aplicação do modelo permite observar uma tendência de aumento do peso específico em profundidade com o aumento da energia transferida aos resíduos, representada no caso pela redução da espessura das camadas. O compactador 816F apresentou, para praticamente todas as situações, um melhor desempenho em termos de uma maior densificação dos resíduos. Apenas para o caso de elevadas energias aplicadas (8 passadas do equipamento e espessuras de 0,3m), o trator de esteiras tipo D6D mostrou comportamento similar ao do compactador.

4.6.3.2 Influência do Número de Passadas

À semelhança do caso anterior, foram produzidas curvas para evolução do peso específico em profundidade, fazendo variar o número de passadas dos equipamentos de teste. A Figura 4.6.3 apresenta os valores observados e as curvas geradas a partir do modelo estatístico, admitindo uma espessura lançada de 0,5m. São apresentados, inicialmente, os resultados individualizados para o trator de esteiras tipo D6D e para o compactador 816F, sendo na seqüência feita a comparação de desempenho entre ambos equipamentos com base no modelo. Também para este caso pode ser observada uma elevada dispersão dos dados. Procedimento análogo foi efetuado para geração das curvas de comportamento, admitindo espessuras lançadas de 0,7m e 0,3m, tendo sido observadas tendências similares às indicadas na Figura 4.6.3.

A análise da figura mencionada e dos resultados do modelo permite observar uma tendência para o aumento do peso específico em profundidade à medida que o número de

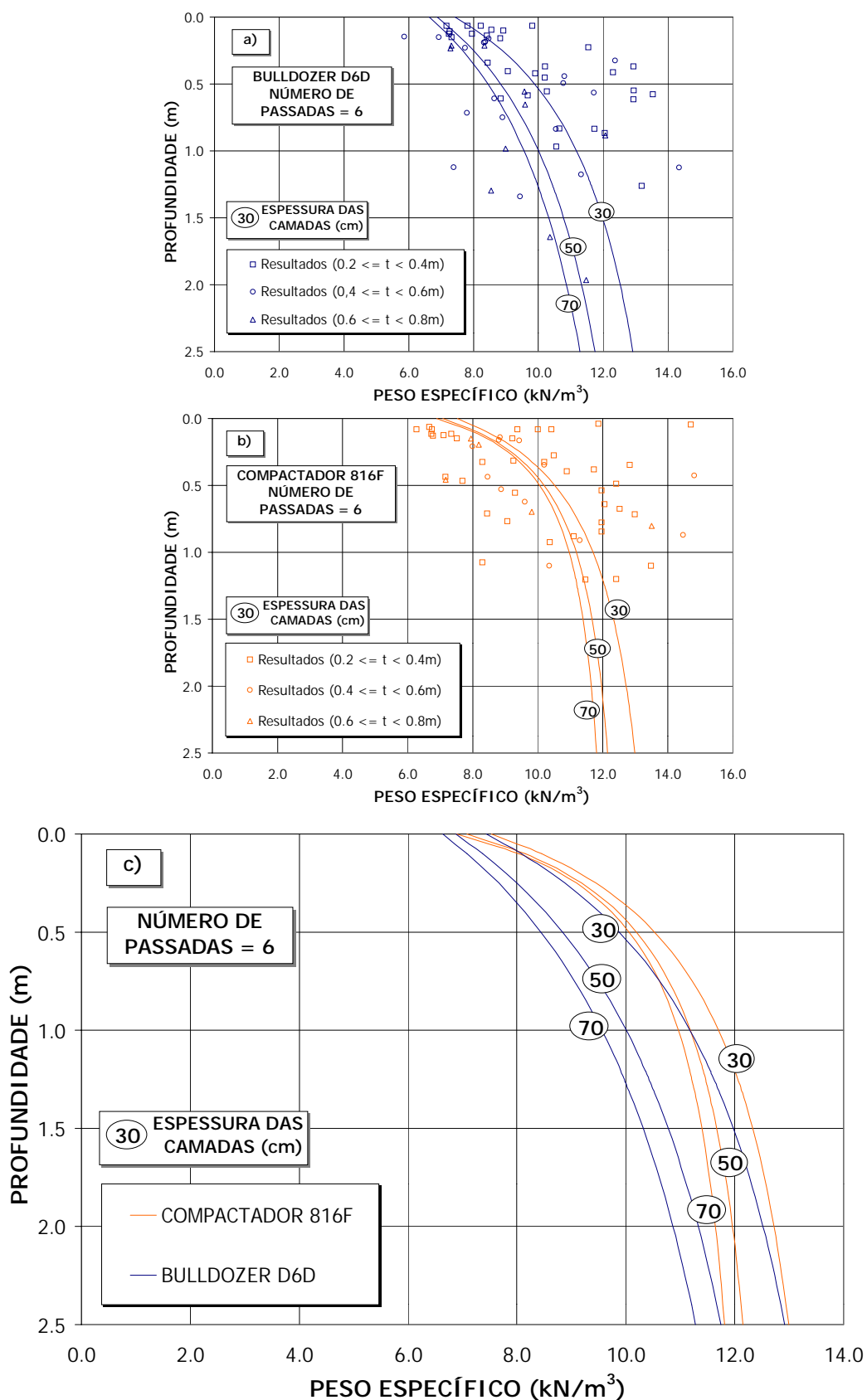


Figura 4.6.2 – Relação peso específico vs. profundidade vs. espessura das camadas para o trator de esteiras tipo D6D (a); para o compactador 816F (b); e para ambos os equipamentos de teste (c) operando em 6 passadas.

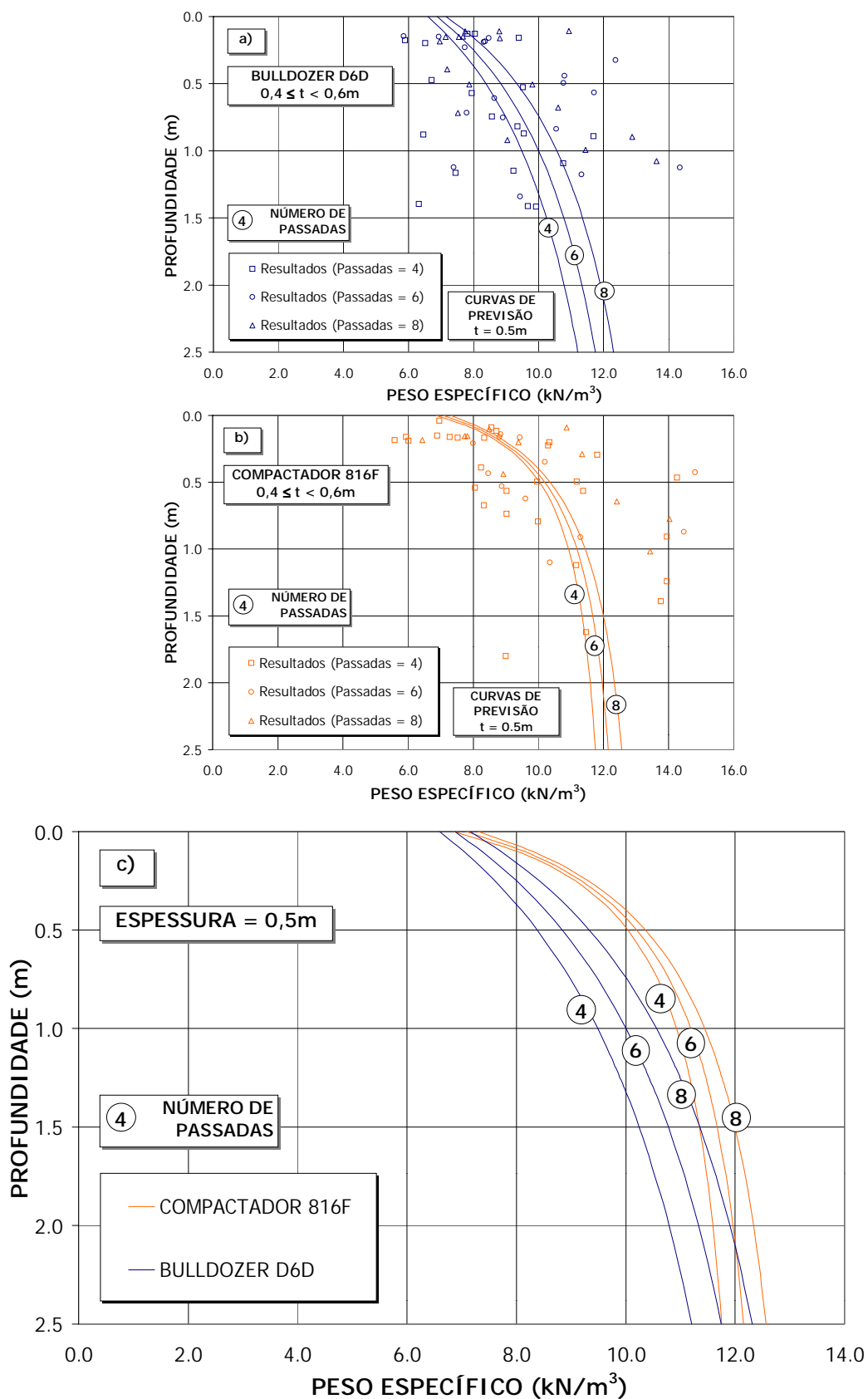


Figura 4.6.3 – Relação peso específico vs. profundidade vs. número de passadas do trator de esteiras tipo D6D (a); do compactador 816F (b); e de ambos os equipamentos de teste (c), para espessuras lançadas de 0,5m.

passadas é incrementado. Nota-se também, um melhor desempenho, em termos da densificação dos resíduos, do compactador 816F para praticamente todas as situações. Somente no caso de menores espessuras há uma certa similaridade de comportamentos entre os equipamentos testados.

Os resultados apresentados através da aplicação do modelo mostram, em suma, o aumento do peso específico dos resíduos em profundidade com o aumento da energia transferida aos mesmos (redução das espessuras das camadas e/ou aumento do número de passadas do equipamento). Tal comportamento era esperado e justifica-se pelo próprio processo construtivo do experimento (camadas sucessivas submetidas à compactação intensiva) e pela elevada compressibilidade do material quando submetido à compressão.

A maior densificação do material em profundidade, proporcionada pelo compactador 816F, pode estar associada, numa primeira análise, à presença de patas nos rolos, as quais auxiliam a trituração e compactação dos resíduos, e à dimensão dos rolos, as quais possibilitam a transferência de pressões a maiores profundidades.

Apesar dos resultados obtidos terem ficado limitados ao aterro experimental, envolvendo, portanto profundidades não superiores a 4,0m, procurou-se utilizar o modelo desenvolvido e extrapolar os seus resultados para maiores profundidades, visando a comparação com alguns dados existentes na literatura, acerca do peso específico em profundidade. A Figura 4.6.4 apresenta os resultados obtidos com o modelo, assumindo a utilização do compactador 816F e espessuras constantes de lançamento de 0,5m. Na mesma figura são apresentados resultados obtidos por OWEIS & KHERA (1986), para resíduos novos e antigos, e por CARVALHO (1999), obtidos no próprio Aterro Sanitário Bandeirantes, a partir de tradagem do material. Observe-se que os dados desta última referência mostraram-se por vezes inconsistentes e pouco confiáveis, face aos erros embutidos no método utilizado para determinação do peso específico em profundidade.

Observa-se da análise da figura que os valores previstos pelo modelo são superiores às tendências observadas por OWEIS & KHERA (1986) e inferiores aos registros de CARVALHO (1999). No primeiro caso, os resultados estão consistentes, considerando que os dados referem-se a aterros sanitários localizados nos EUA, cujos resíduos apresentam composições bem distintas, normalmente associadas a menores teores de umidade, e que ainda os resíduos do presente estudo foram submetidos à compactação intensiva, certamente superior à aplicada nos casos apresentados. Quanto aos resultados do Aterro Bandeirantes, os valores mais elevados justificam-se pelo fato dos resíduos amostrados conterem, em sua composição, significativa parcela de materiais terrosos (material de cobertura das células).

Vale ressaltar que a extrapolação do modelo não é recomendada e que a sua apresentação neste estudo teve caráter meramente investigativo, no sentido de comprovação e verificação das tendências observadas no campo e reproduzidas pelo modelo estatístico desenvolvido. Por fim, vale ainda frisar que o modelo desenvolvido deve ser utilizado com ressalva, já que os valores medidos no campo não traduziram, de forma patente, a tendência de incremento de peso específico com a profundidade, conforme pode ser constatado pela elevada dispersão de dados observada nas figuras 4.6.2 e 4.6.3.

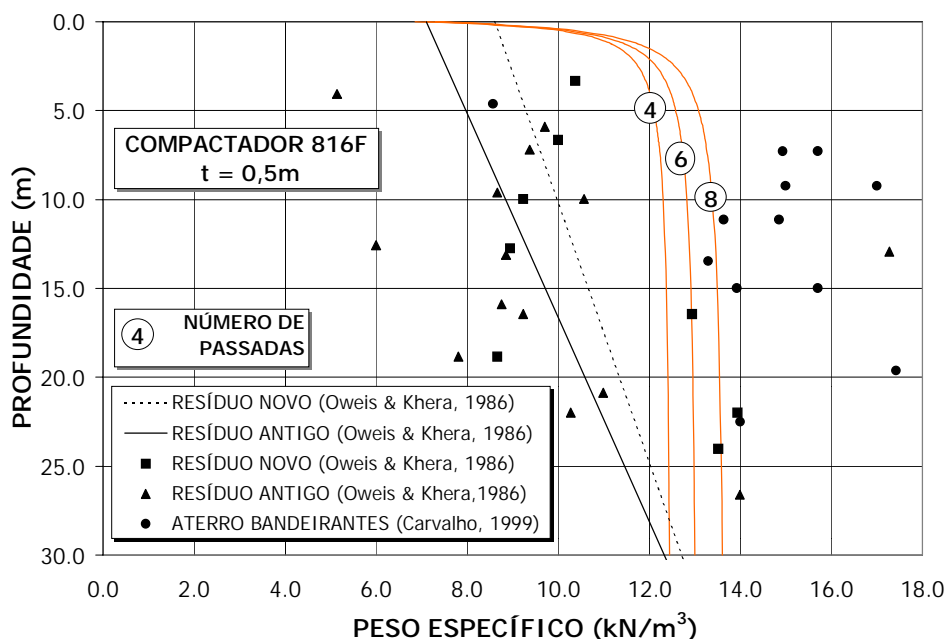


Figura 4.6.4 – Relação peso específico vs. profundidade a partir da extrapolação do modelo estatístico desenvolvido.

4.7 Avaliação da Compressibilidade dos Resíduos Sólidos Urbanos face ao Efeito da Compactação

O efeito da compactação sobre a compressão primária e secundária dos resíduos sólidos dispostos no aterro experimental foi avaliada tendo por base os resultados dos ensaios *in situ* e os levantamentos e controles topográficos efetuados.

4.7.1 Compressão Mecânica Primária

4.7.1.1 Relação Espessura Controlada vs. Deformação

O nivelamento topográfico das camadas de resíduos após as operações de compactação permitiu que fossem correlacionadas a tensão vertical atuante, as técnicas construtivas utilizadas e as deformações para cada quadrante de ensaio. Nesta parte do estudo, além dos

parâmetros definidos e calculados conforme descrito no item 4.6.1, foi utilizada a deformação das camadas (ϵ), definida como se segue:

- deformação das camadas (ϵ): o valor da deformação de cada camada, em cada quadrante de ensaio, foi calculado tendo por base as espessuras compactadas iniciais e as espessuras determinadas após a disposição e compactação das camadas sobrejacentes no aterro experimental, conforme a seguinte formulação:

$$\epsilon_{i,j} = 1 - \frac{t_{c(i,j)}}{t_{c(i,i)}}$$

onde:

$\epsilon_{i,j}$ = deformação da camada i após a disposição e compactação da camada j .

$t_{c(i,j)}$ = espessura compactada da camada i após a disposição e compactação da camada j .

$t_{c(i,i)}$ = espessura compactada da camada i após a disposição e compactação da própria camada i .

A Tabela 4.7.1 apresenta os parâmetros utilizados no estudo (tensão vertical atuante, espessuras compactadas, espessuras lançadas médias e deformações), calculados para o quadrante 18 do aterro experimental, caracterizado por espessuras projetadas de 0,4m, planos horizontais de compactação e submetido a 6 passadas do compactador 816F. Procedimento de cálculo similar foi efetuado para os demais quadrantes de ensaio do experimento. À semelhança do ocorrido no estudo anterior, os valores considerados inconsistentes foram eliminados da análise estatística realizada.

4.7.1.2 Análise e Modelagem Estatística dos Dados

Com base no procedimento descrito foi produzido um conjunto de pontos Y_i compostos por 4 variáveis: deformação (ϵ_i), tensão vertical atuante (σ_i), espessura lançada média ($t_{m,i}$) e número de passadas do equipamento (P_i), ou seja:

$$Y_i = [\epsilon_i, \sigma_i, t_{m,i}, P_i]$$

As Tabelas 4.7.2 e 4.7.3 apresentam o conjunto de pontos Y_i , obtidos para os quadrantes de ensaio operados pelo trator de esteiras tipo D6D e pelo compactador 816F, respectivamente.

Tabela 4.7.1 – Deformações, tensões verticais atuantes, espessuras e profundidades. Quadrante de ensaio 18.

QUADRANTE DE ENSAIO 18 (COMPACTADOR S16F - 6 PASSADAS)					
ETAPAS @	Espessuras lançadas, t (m)	Densidade específica sobre γ_{sp} (kN/m ³)	Espessuras compactadas, t _c (m)	Densidade específica compactada γ_c	Tensão vertical média, σ_{vm} (kN/m ²)
1	0,289	4,805	0,159	10,002	1,489
2	0,240	4,805	0,160	6,276	1,079
3	0,338	4,315	0,260	7,943	1,762
4	0,285	5,982	0,211	6,080	1,555
5	0,298	4,511	0,230	8,325	1,687
6	0,283	3,628	nd	8,335	1,028
7	0,297	3,432	0,127	5,295	0,846
8	0,380	5,099	0,160	8,727	1,687
9	0,303	6,734	0,090	7,943	1,323
10	0,294	4,805	0,080	6,080	0,950
CAMADA 1			VALORES OBTIDOS		
Tensões atuantes (kN/m ²)	Espessuras compactadas, t _c (m)	Espessuras lançadas médias, t _m (m)	Profundidade da camada, z (m)	Deformação relativa, $\epsilon_{z0,0}/\epsilon_{z0,0}$	Deformação (σ)
0,745	0,159	0,289	0,079	1,000	0,000
1,823	0,233	0,264	0,276	na	-
3,585	0,090	0,289	0,435	na	-
5,140	0,120	0,288	0,486	0,755	0,345
6,828	0,119	0,290	0,674	0,748	0,252
7,855	nd	0,289	-	-	-
8,701	nd	0,290	-	-	-
10,368	0,070	0,301	1,095	na	-
11,691	0,120	0,302	1,200	0,755	0,345
12,641	0,130	0,301	1,205	0,818	0,182
CAMADA 2					
0,539	0,160	0,240	0,080	1,000	0,000
2,301	0,130	0,289	0,325	0,813	0,187
3,896	0,092	0,288	0,380	0,575	0,425
5,543	0,116	0,290	0,556	0,725	0,275
6,571	nd	0,289	-	-	-
7,417	0,119	0,290	0,767	0,744	0,256
9,084	0,050	0,303	1,035	na	-
10,407	0,080	0,303	1,100	0,500	0,500
11,357	0,130	0,302	1,075	0,812	0,188
CAMADA 3					
0,881	0,260	0,338	0,130	1,000	0,000
2,436	0,103	0,312	0,283	na	-
4,123	0,100	0,307	0,448	na	-
5,151	nd	0,301	-	-	-
5,997	0,106	0,300	0,655	na	-
7,664	0,170	0,314	0,925	0,654	0,346
8,987	0,110	0,312	1,095	na	-
9,937	0,100	0,310	0,960	na	-
CAMADA 4					
0,777	0,231	0,285	0,116	1,000	0,000
2,465	0,168	0,292	0,314	0,727	0,275
3,493	nd	0,289	-	-	-
4,339	0,130	0,291	0,537	0,563	0,437
6,006	0,130	0,309	0,775	0,563	0,437
7,329	0,140	0,308	0,880	0,606	0,394
8,278	0,130	0,306	0,845	0,563	0,437
CAMADA 5					
0,844	0,230	0,298	0,115	1,000	0,000
1,872	nd	0,291	-	-	-
2,717	0,155	0,293	0,395	0,674	0,326
4,384	0,140	0,315	0,640	0,609	0,391
5,708	0,200	0,312	0,710	0,870	0,130
6,657	0,130	0,309	0,715	0,565	0,435
CAMADA 6					
0,514	nd	0,283	-	-	-
1,360	0,190	0,290	0,222	-	-
3,027	0,160	0,320	0,490	-	-
4,350	0,140	0,316	0,540	-	-
5,299	0,130	0,311	0,585	-	-
CAMADA 7					
0,423	0,127	0,297	0,064	1,000	0,000
2,090	0,250	0,338	0,285	1,989	na
3,413	0,190	0,327	0,375	1,496	na
4,363	0,110	0,319	0,465	0,866	0,134
CAMADA 8					
0,834	0,160	0,380	0,080	1,000	0,000
2,157	0,190	0,341	0,185	1,188	na
3,106	0,130	0,326	0,345	0,812	0,188
CAMADA 9					
0,662	0,090	0,303	0,045	1,000	0,000
1,611	0,200	0,299	0,180	2,222	na
CAMADA 10					
0,475	0,080	0,294	0,040	1,000	0,000

nd = dado não disponível
na = dado não utilizado

Tabela 4.7.2 – Valores Y_i (deformação, tensão vertical atuante, espessura e número de passadas) utilizados no estudo estatístico. Trator de esteiras D6D em plano horizontal.

BULLDOZER D6D - PLANO HORIZONTAL															
QUADRANTE	σ_v (kN/m ²)	t_m (m)	ϵ	P (passadas)	QUADRANTE	σ_v (kN/m ²)	t_m (m)	ϵ	P (passadas)	QUADRANTE	σ_v (kN/m ²)	t_m (m)	ϵ	P (passadas)	
Q07	0.818	0.328	0.000	8	Q34	1.090	0.428	0.000	8	Q41	1.419	0.651	0.000	8	
	3.690	0.340	0.309	8		3.666	0.512	0.092	8		4.925	0.715	0.098	8	
	0.967	0.450	0.000	8		6.015	0.512	0.049	8		7.228	0.618	0.243	8	
	1.906	0.358	0.123	8		8.127	0.465	0.210	8		10.851	0.628	0.490	8	
	5.147	0.321	0.159	8		9.724	0.441	0.475	8		1.753	0.778	0.000	8	
	6.234	0.290	0.082	8		1.288	0.596	0.000	8		4.855	0.602	0.117	8	
	8.393	0.304	0.136	8		3.638	0.554	0.032	8		7.679	0.620	0.223	8	
	1.092	0.349	0.000	8		5.749	0.477	0.343	8		12.923	0.685	0.451	8	
	3.237	0.244	0.464	8		7.346	0.444	0.459	8		1.151	0.425	0.000	8	
	5.396	0.277	0.429	8		10.210	0.437	0.392	8		10.019	0.654	0.100	8	
	7.622	0.261	0.393	8		1.175	0.511	0.000	8		1.812	0.656	0.000	8	
	8.127	0.239	0.429	8		1.056	0.325	0.000	8		7.855	0.768	0.366	8	
	0.529	0.221	0.000	8		2.653	0.335	0.059	8		2.622	0.879	0.000	8	
	0.544	0.163	0.000	8		5.516	0.329	0.379	8	Q07	1.699	0.677	0.000	4	
	2.702	0.269	0.344	8		6.521	0.521	0.579	8		5.874	0.640	0.365	4	
	1.079	0.375	0.000	8		0.799	0.345	0.000	8		3.692	0.640	0.230	4	
	3.306	0.278	0.414	8		3.662	0.375	0.038	8		15.206	0.635	0.406	4	
	3.810	0.234	0.377	8		4.666	0.328	0.081	8		1.688	0.603	0.000	4	
	0.589	0.215	0.000	8		1.432	0.406	0.000	8		5.306	0.622	0.333	4	
Q05	0.527	0.238	0.000	6		2.436	0.307	0.185	6		11.820	0.650	0.441	4	
	8.627	0.303	0.333	6	Q32	0.849	0.406	0.000	6		1.809	0.640	0.000	4	
	10.165	0.310	0.259	6		6.747	0.461	0.248	6		8.323	0.665	0.151	4	
	12.339	0.315	0.407	6		9.439	0.494	0.207	6	Q23	0.815	0.290	0.000	4	
	0.905	0.340	0.000	6		12.531	0.481	0.483	6		4.789	0.276	0.277	4	
	2.984	0.388	0.440	6		14.314	0.466	0.379	6		10.086	0.297	0.234	4	
	4.608	0.356	0.440	6		1.793	0.613	0.000	6		11.715	0.306	0.277	4	
	5.933	0.335	0.180	6		4.105	0.488	0.228	6		13.394	0.306	0.489	4	
	8.733	0.322	0.320	6		6.797	0.524	0.209	6		0.534	0.222	0.000	4	
	1.039	0.436	0.000	6		11.672	0.478	0.419	6		3.439	0.272	0.095	4	
	5.250	0.310	0.283	6		1.156	0.364	0.000	6		5.366	0.294	0.252	4	
	0.812	0.293	0.000	6		6.941	0.467	0.055	6		7.338	0.294	0.736	4	
	3.399	0.267	0.305	6		1.346	0.595	0.000	6		8.737	0.298	0.190	4	
	4.937	0.289	0.368	6		4.438	0.512	0.214	6		11.985	0.308	0.571	4	
	0.663	0.270	0.000	6		6.221	0.478	0.277	6		0.894	0.271	0.000	4	
	3.463	0.288	0.037	6		3.329	0.468	0.324	6		3.311	0.315	0.239	4	
	7.573	0.273	0.185	6		0.891	0.387	0.000	6		4.663	0.308	0.304	4	
	0.769	0.355	0.000	6	Q30	1.015	0.418	0.000	4		7.810	0.322	0.365	4	
	4.032	0.317	0.198	6		6.058	0.501	0.088	4		9.430	0.319	0.308	4	
	4.880	0.282	0.242	6		8.629	0.507	0.154	4		10.350	0.301	0.269	4	
	1.097	0.349	0.000	6		10.376	0.477	0.192	4		3.873	0.327	0.220	4	
	2.166	0.298	0.367	6		1.042	0.532	0.000	4		6.413	0.296	0.317	4	
	0.534	0.248	0.000	6		4.000	0.546	0.121	4		0.739	0.318	0.000	4	
Q09	1.779	0.561	0.000	6		6.572	0.539	0.088	4		4.807	0.331	0.105	4	
	5.195	0.633	0.193	6		8.319	0.494	0.209	4		4.928	0.296	0.339	4	
	8.355	0.608	0.359	6		12.478	0.531	0.068	4		0.814	0.370	0.000	4	
	17.827	0.699	0.326	6		13.346	0.466	0.407	4		3.354	0.289	0.227	4	
	1.708	0.704	0.000	6		1.479	0.561	0.000	4		0.890	0.305	0.000	4	
	4.868	0.632	0.239	6		5.796	0.481	0.016	4						
	7.984	0.633	0.190	6		9.956	0.531	0.127	4						
	14.440	0.734	0.296	6		1.286	0.525	0.000	4						
	1.580	0.560	0.000	6		7.192	0.521	0.304	4						
	4.696	0.598	0.037	6		7.860	0.426	0.443	4						
	11.152	0.744	0.026	6		0.874	0.358	0.000	4						
	1.558	0.636	0.000	6		5.032	0.519	0.259	4						
	8.014	0.835	0.296	6		5.700	0.393	0.327	4						
	3.228	1.034	0.000	6		2.079	0.681	0.000	4						

O estudo e modelagem estatística realizado teve também por base análises de regressões múltiplas não lineares, procurando correlacionar os parâmetros mencionados, tendo como variável independente, neste caso, a deformação das camadas (ϵ). As análises aqui foram também realizadas através do programa SIGMAPLOT, versão 6.0. O total de pontos Y_i utilizado nestas análises foi de 159 e 121, respectivamente, para as praças de trabalho operadas pelo trator de esteiras tipo D6D e pelo compactador 816F. Para correlacionar os parâmetros de estudo e reproduzir as curvas tensão vs. deformação devido ao efeito combinado da compactação e das pressões sobrejacentes, foram testados e verificados

diversos modelos, dentre os quais, os baseados em funções matemáticas do tipo logarítmica, hiperbólica, exponencial, polinomial e de potência).

Tabela 4.7.3 – Valores Y_i (deformação, tensão vertical atuante, espessura e número de passadas) utilizados no estudo estatístico. Compactador 816F em plano horizontal.

COMPACTADOR 816F - PLANO HORIZONTAL															
QUADRANTE	α_i (kN/m ²)	t_m (m)	σ	P (passadas)	QUADRANTE	α_i (kN/m ²)	t_m (m)	σ	P (passadas)	QUADRANTE	α_i (kN/m ²)	t_m (m)	σ	P (passadas)	
Q10	0.755	0.289	0.000	E	Q13	0.745	0.289	0.000	6	Q16	0.749	0.315	0.000	4	
	6.512	0.356	0.356	E		5.148	0.288	0.245	6		5.155	0.434	0.166	4	
	0.692	0.250	0.000	E		6.828	0.290	0.252	6		6.629	0.400	0.095	4	
	3.074	0.353	0.132	E		11.691	0.382	0.245	6		8.527	0.402	0.246	4	
	5.084	0.379	0.087	E		12.641	0.381	0.182	6		14.204	0.368	0.196	4	
	6.193	0.345	0.333	E		8.539	0.240	0.000	6		3.633	0.501	0.000	4	
	7.471	0.290	0.361	E		2.381	0.289	0.187	6		2.587	0.400	0.417	4	
	11.340	0.283	0.498	E		3.856	0.288	0.425	6		8.556	0.378	0.400	4	
	1.191	0.457	0.000	E		5.543	0.290	0.275	6		10.082	0.359	0.200	4	
	3.201	0.443	0.432	E		7.417	0.290	0.256	6		11.622	0.365	0.333	4	
	5.888	0.298	0.541	E		10.407	0.383	0.580	6		9.737	0.299	0.000	4	
	1.005	0.430	0.000	E		11.357	0.382	0.188	6		2.634	0.353	0.162	4	
	0.390	0.212	0.000	E		8.881	0.338	0.000	6		4.739	0.323	0.467	4	
	0.713	0.264	0.000	E		7.664	0.334	0.346	6		6.786	0.354	0.274	4	
Q13	1.212	0.509	0.000	E		8.773	0.285	0.000	6		8.332	0.335	0.274	4	
	1.661	0.614	0.000	E		2.465	0.292	0.273	6		9.852	0.346	0.370	4	
	1.613	0.617	0.000	E		4.339	0.291	0.437	6		8.949	0.407	0.000	4	
	4.367	0.468	0.228	E		6.066	0.389	0.437	6		3.634	0.331	0.581	4	
	8.124	0.484	0.288	E		7.329	0.388	0.394	6		5.181	0.367	0.469	4	
	10.136	0.491	0.318	E		8.278	0.386	0.437	6		6.626	0.342	0.219	4	
	0.543	0.327	0.000	E		8.844	0.298	0.000	6		8.166	0.353	0.406	4	
	1.878	0.533	0.000	E		2.717	0.293	0.326	6		3.633	0.476	0.000	4	
Q11	1.116	0.359	0.000	6		4.384	0.315	0.391	6		4.689	0.376	0.432	4	
	1.243	0.466	0.000	6		5.788	0.312	0.130	6		8.763	0.242	0.000	4	
	4.427	0.575	0.004	6		6.657	0.389	0.435	6		8.730	0.410	0.000	4	
	8.116	0.496	0.217	6		8.423	0.297	0.000	6	Q9	3.280	0.475	0.000	4	
	11.227	0.503	0.146	6		4.363	0.319	0.134	6		4.542	0.543	0.245	4	
	1.592	0.684	0.000	6		8.834	0.380	0.000	6		16.555	0.573	0.343	4	
	8.392	0.512	0.434	6		3.186	0.326	0.189	6		18.884	0.562	0.164	4	
	0.889	0.307	0.000	6		8.662	0.383	0.000	6		3.631	0.612	0.000	4	
	3.999	0.418	0.160	6		8.475	0.294	0.000	6		4.999	0.665	0.089	4	
	6.813	0.467	0.260	6	Q6	1.435	0.648	0.000	3		13.644	0.592	0.330	4	
	1.555	0.529	0.000	6		2.577	0.538	0.000	3		3.634	0.718	0.000	4	
	4.370	0.547	0.364	6		6.221	0.666	0.337	3		6.184	0.599	0.429	4	
	1.407	0.564	0.000	6		8.862	0.552	0.000	3		10.319	0.587	0.286	4	
Q4	1.659	0.568	0.000	6	Q7	1.838	0.850	0.000	4		12.648	0.570	0.429	4	
	6.722	0.695	0.186	6		3.028	0.989	0.000	4		3.127	0.456	0.000	4	
	2.532	0.821	0.000	6		7.862	0.755	0.189	4		5.263	0.505	0.253	4	
	7.173	0.684	0.291	6		1.062	0.744	0.000	4		7.591	0.503	0.333	4	
	1.192	0.609	0.000	6							2.683	0.553	0.000	4	
											4.386	0.526	0.275	4	
											3.164	0.499	0.000	4	

O modelo hiperbólico apresentou, também neste caso, o melhor desempenho entre as diversas relações testadas para ajustar os dados observados. O modelo final obtido obedece a equação 4.3, a seguir apresentada, enquanto a Tabela 4.7.4 sumariza os parâmetros do modelo para os distintos equipamentos de teste.

$$\varepsilon = a_1 + a_2 P/t + \sigma / (b_1 + b_2 P/t + [c_1 + c_2 P/t] \sigma) \quad (4.3)$$

onde:

ε = deformação da camada

P = número de passadas

t = espessura lançada das camadas (m)

σ = tensão vertical atuante na camada (kN/m²)

$a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$ = parâmetros do modelo (conforme apresentado na Tabela 4.7.4).

Tabela 4.7.4 – Parâmetros do modelo tensão deformação das camadas sob efeito combinado da compactação e das pressões subjacentes.

PARÂMETROS	EQUIPAMENTO	
	COMPACTADOR 816F	BULLDOZER D6D
a_1	-0,3516 ($p=0.3544$)	-0,1617 ($p=0.0870$)
a_2 (m)	0,0045 ($p=0.8273$)	0,0022 ($p=0.6462$)
b_1 (kN/m ²)	2,1871 ($p=0.5479$)	7,8937 ($p=0.0928$)
b_2 (kN/m)	-0,0179 ($p=0.9295$)	-0,0981 ($p=0.6325$)
c_1	1,4834 ($p=0.0240$)	1,7217 ($p<0.0001$)
c_2 (m)	-0,0031 ($p=0.9276$)	-0,0095 ($p=0.5524$)
R^2	0.63	0.61

Obs: o significado da probabilidade p consta da Tabela 4.5.1.

As correlações obtidas com o modelo desenvolvido resultaram coeficientes de determinação (R^2) da ordem de 0,60. Apesar das elevadas probabilidades p , associadas as variáveis do modelo, e dos valores observados apresentarem uma certa dispersão, fruto das imprecisões dos levantamentos de campo e das simplificações e hipóteses assumidas nos cálculos, relações tensão vs. deformação e tendências de comportamento para o material puderam ser obtidas, as quais são apresentadas e discutidas na seqüência.

4.7.1.3 Relação Tensão vs. Deformação face ao Efeito Combinado da Compactação e das Pressões Subjacentes para distintos Equipamentos de Teste

Com base no modelo estatístico descrito no item anterior foram reproduzidas as curvas tensão vs. deformação para os resíduos sólidos urbanos submetidos ao efeito da compactação e das pressões subjacentes sob diferentes técnicas construtivas. Para representação dos pontos observados e das curvas de comportamento foram utilizadas as mesmas espessuras e faixas de referência discutidas no item 4.5.3.1. Introduziu-se neste estudo, também para efeito de apresentação e discussão dos resultados o parâmetro denominado fator de energia (E^*), definido pela razão entre o número de passadas (P) e a espessura das camadas (t). Quanto maior o valor de E^* maior será a energia aplicada e transferida aos resíduos durante o processo de compactação.

A Figura 4.7.1 apresenta, para o trator de esteiras tipo D6D, os resultados e as curvas resultantes para dois casos distintos. No primeiro caso, apresenta-se o efeito de distintas espessuras das camadas, assumindo constante e igual a 6, o número de passadas do equipamento. No segundo caso, foram consideradas espessuras entre 0,4 e 0,6m, verificando-se o efeito do número de passadas. Por fim, apresenta-se na mesma figura as curvas tensão vs. deformação geradas pelo modelo para distintos valores do fator de energia E^* . A Figura

4.7.2, por sua vez, apresenta similar conjunto de resultados para o compactador 816F. Ressalte-se que os valores de deformação nula ($\varepsilon = 0$) estão associados à primeira compactação das camadas, situação em que não existem camadas subjacentes e as tensões verticais atuantes correspondem à metade do peso próprio da camada em questão.

Da análise das figuras observa-se que as deformações registradas são diretamente proporcionais ao fator de energia aplicado, ou seja, quanto maior este fator maiores serão as deformações esperadas. Tal comportamento mostra que as deformações registradas no aterro experimental foram uma resposta direta aos procedimentos construtivos empregados mais do que às pressões subjacentes dispostas no experimento. A Figura 4.7.3 apresenta o resultado de análise simplificada efetuada para mostrar a influência da compactação e das pressões subjacentes nos quadrantes de ensaio com espessura projetada igual a 0,6m. Na figura são apresentadas as curvas de distribuição de tensão em profundidade devido ao peso operacional dos equipamentos. As curvas foram calculadas tendo por base o arranjo e a geometria dos equipamentos de compactação e as formulações propostas por Boussinesq em 1885. No caso do compactador, distintas curvas são apresentadas, assumindo diferentes áreas e pressões de contato do equipamento com os resíduos. As pressões devido às camadas subjacentes, por sua vez, foram calculadas e sistematizadas tendo por base os valores de tensões verticais, espessuras e profundidades apresentadas nas análises descritas nos itens anteriores. Percebe-se que as tensões transmitidas aos resíduos devido aos equipamentos de compactação são maiores que as pressões subjacentes até a profundidade de cerca de 1,3m, predominando a partir daí os valores das pressões de recobrimento das camadas. Tal análise foi igualmente efetuada para os quadrantes com espessuras projetadas de 0,4 e 0,8m, tendo sido observado similares resultados e tendências. Tais resultados mostram que, para as profundidades e espessuras envolvidas no aterro experimental, todas as camadas foram submetidas a tensões iniciais, devidas ao processo de compactação, superiores às tensões subjacentes. A despeito das hipóteses simplificadoras desta análise, pode-se concluir que a maior parcela das deformações observadas esteja diretamente relacionada ao efeito da compactação, desempenhando esta um importante papel na antecipação das deformações e recalques dos materiais aterrados.

De forma complementar e com base nas espessuras lançadas e compactadas de cada camada foi possível avaliar ainda para cada quadrante de ensaio e cada etapa construtiva as deformações imediatas dos resíduos devido ao processo de compactação. A Tabela 4.7.5 apresenta para o quadrante de ensaio 18, as espessuras lançadas e compactadas para cada etapa construtiva, assim como as deformações imediatas (ε_{im}), calculadas como se segue:

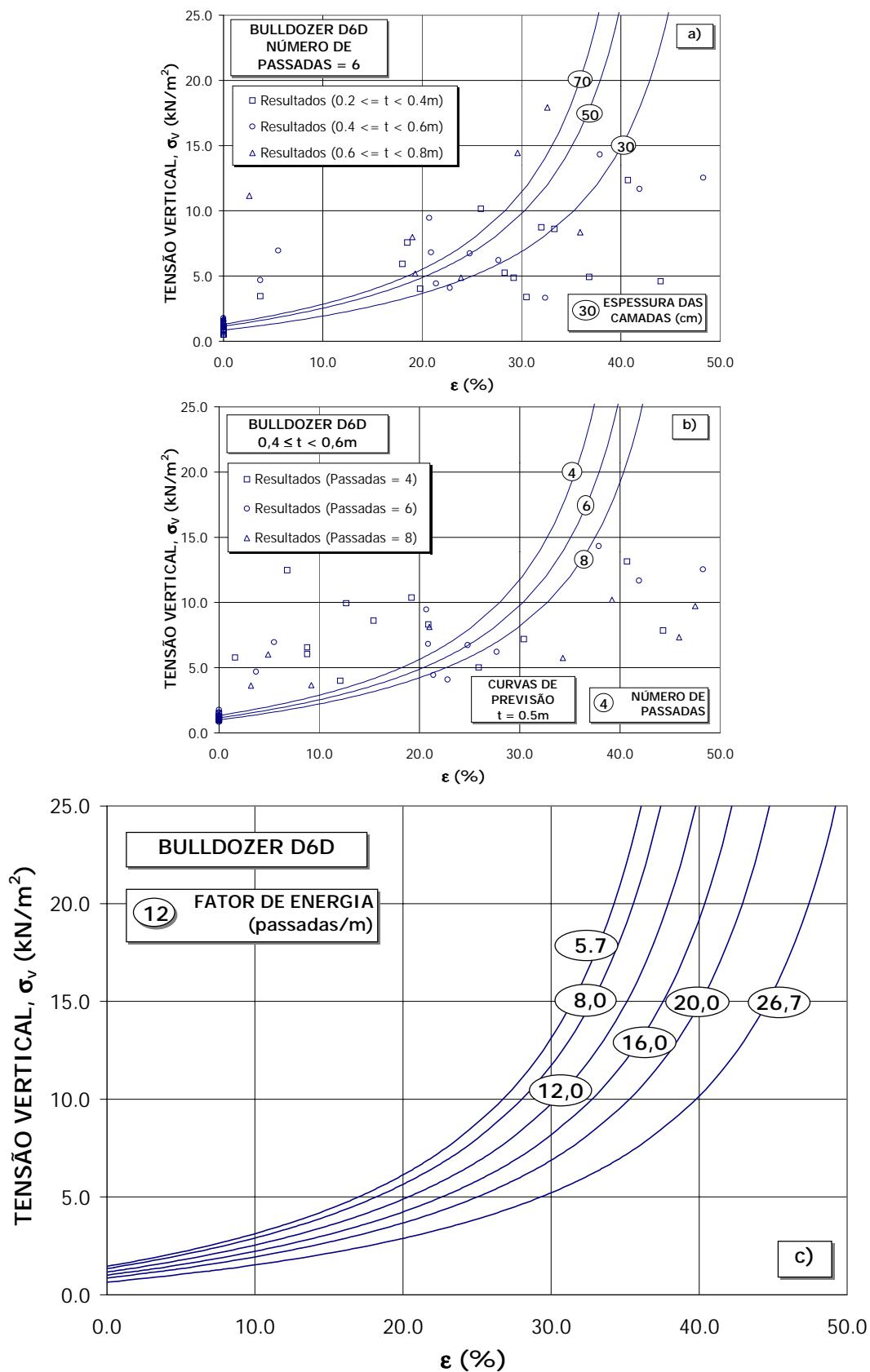


Figura 4.7.1 – Relação tensão vertical vs. deformação para o trator de esteiras tipo D6D, assumindo distintas espessuras lançadas (a); número de passadas (b) e fatores de energia E^* (c).

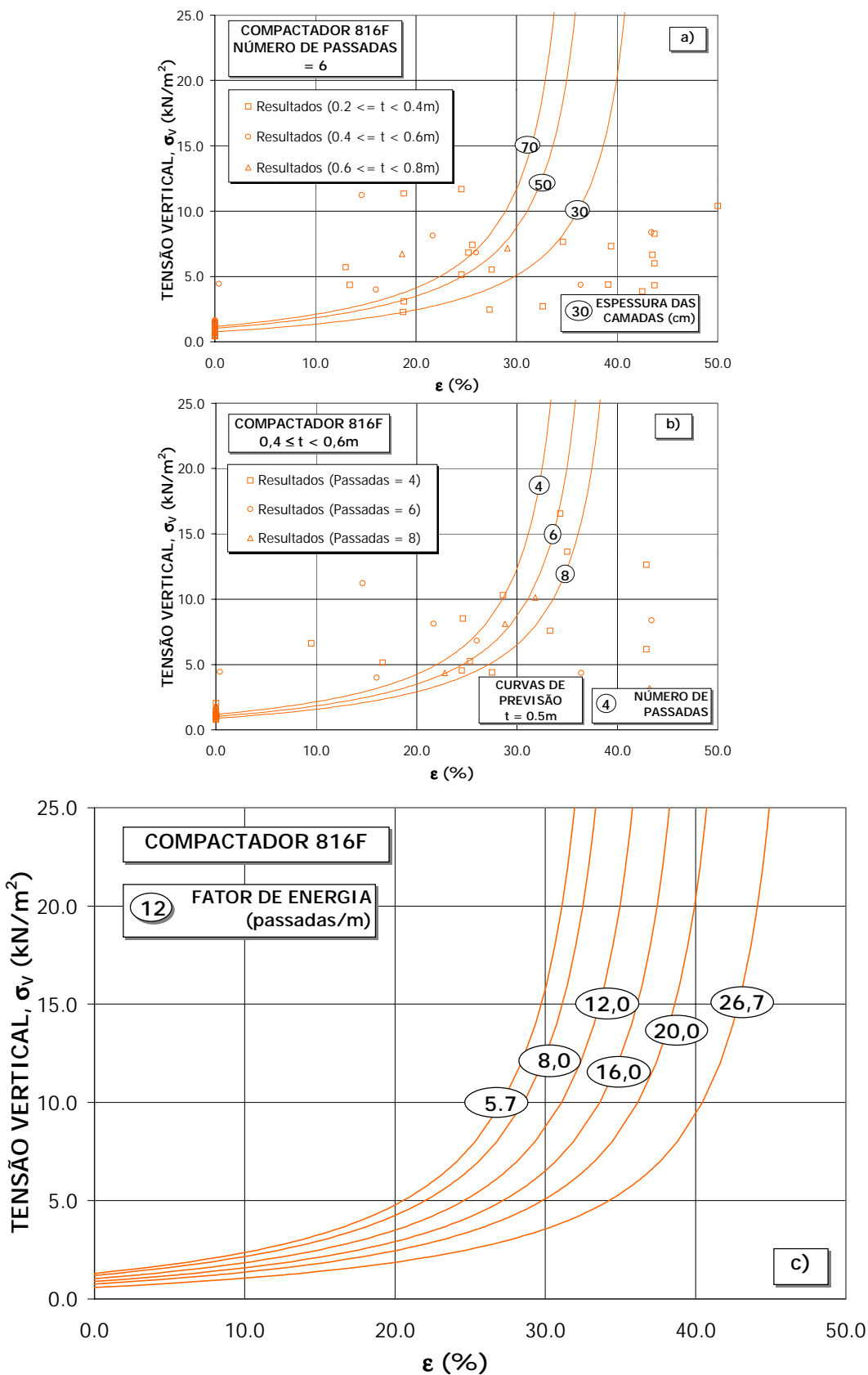


Figura 4.7.2 – Relação tensão vertical vs. deformação para o compactador 816F, assumindo distintas espessuras lançadas (a); número de passadas (b) e fatores de energia E^* (c).

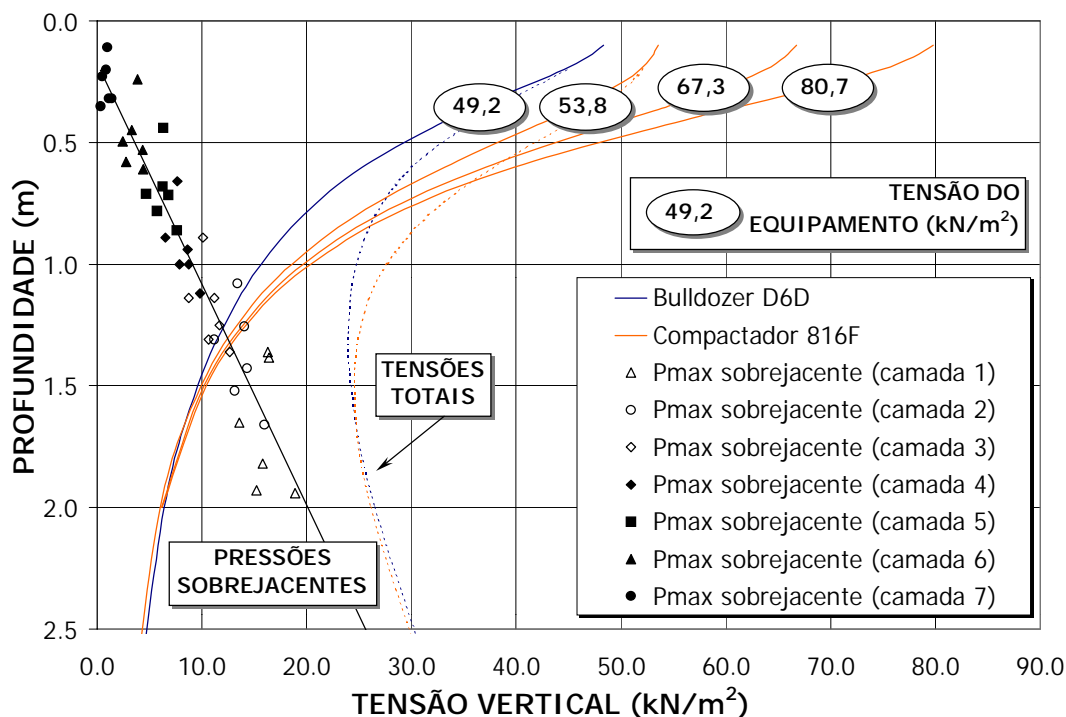


Figura 4.7.3 – Distribuição das tensões verticais em profundidade devido aos equipamentos de compactação e às tensões sobrejacentes.

$$\varepsilon_{im,i} = 1 - \frac{t_i}{t_{c,i}}$$

onde:

$\varepsilon_{im,i}$ = deformação imediata da camada i

t_i = espessura lançada da camada i

$t_{c,i}$ = espessura compactada da camada i

Tal procedimento foi repetido para os demais quadrantes de ensaio, tendo sido obtidas a Tabela 4.7.6 e a Figura 4.7.4, que sintetizam os resultados médios obtidos. A análise dos resultados permite observar uma tendência, conforme esperado, de aumento da compressão imediata das camadas com o incremento das energias transferidas às mesmas. Nesta análise, o rolo compactador apresentou uma menor sensibilidade ao fator de energia, porém sempre com respostas mais positivas do que o trator de esteiras, no tocante à compressão imediata dos resíduos.

Tabela 4.7.5 – Deformações imediatas (ϵ_{im}) e espessuras do quadrante de ensaio 18.

ETAPA	ESPESSURA LANÇADA (m)	ESPESSURA COMPACTADA (m)	ϵ_{im} (%)
1	0,289	0,159	44,98
2	0,240	0,160	33,33
3	0,338	0,260	23,08
4	0,285	0,231	18,98
5	0,298	0,230	22,87
6	0,283	-	-
7	0,297	0,127	57,24
8	0,380	0,160	57,89
9	0,303	0,090	70,30
10	0,294	0,080	72,79
Média ⁽¹⁾	0,303	-	44,61

(1) – valor médio não considera a etapa 6

Tabela 4.7.6 - Deformações imediatas (ϵ_{im}), espessuras lançadas (t), número de passadas (P) e fatores de energia (E^*). Síntese dos resultados médios obtidos.

EQUIPAMENTO	P (passadas)	t (m)	E^*	ϵ_{im} (%)
COMPACTADOR	4	0,378	10,58	33,30
		0,552	7,25	32,00
		0,778	5,14	44,84
	6	0,303	19,80	44,61
		0,485	12,37	33,26
		0,666	9,01	37,75
		0,319	25,08	41,99
		0,520	15,38	38,22
	8	0,706	11,33	53,91
		0,296	13,51	23,68
BULLDOZER D6D	4	0,511	7,83	31,35
		0,64	6,25	19,69
		0,316	18,99	36,01
	6	0,466	12,88	31,93
		0,699	8,58	27,66
		0,323	24,77	38,40
	8	0,435	18,39	31,24
		0,678	11,80	30,07

4.7.1.4 Avaliação dos Coeficientes de Compressão e de Compressibilidade Volumétrica para distintos Equipamentos de Compactação

Baseado no modelo estatístico para reprodução das relações tensão vs. deformação dos resíduos, foi possível calcular os coeficientes de compressão (CR^*) e de compressibilidade volumétrica (m_v^*) para diferentes níveis de tensão vertical (σ_v). Ressalte-se que estes coeficientes de compressibilidade levam em consideração os mecanismos de compressão devido à compactação e à compressão primária dos resíduos. As Tabelas 4.7.7 e 4.7.8

apresentam os valores calculados para estes parâmetros, respectivamente, para o trator de esteiras e para o compactador. As Figuras 4.7.5 e 4.7.6 apresentam, por sua vez, a relação dos coeficientes de compressibilidade e a tensão vertical para os fatores de energia (E^*) extremos aplicados aos resíduos, respectivamente, para o trator de esteiras e para o compactador.

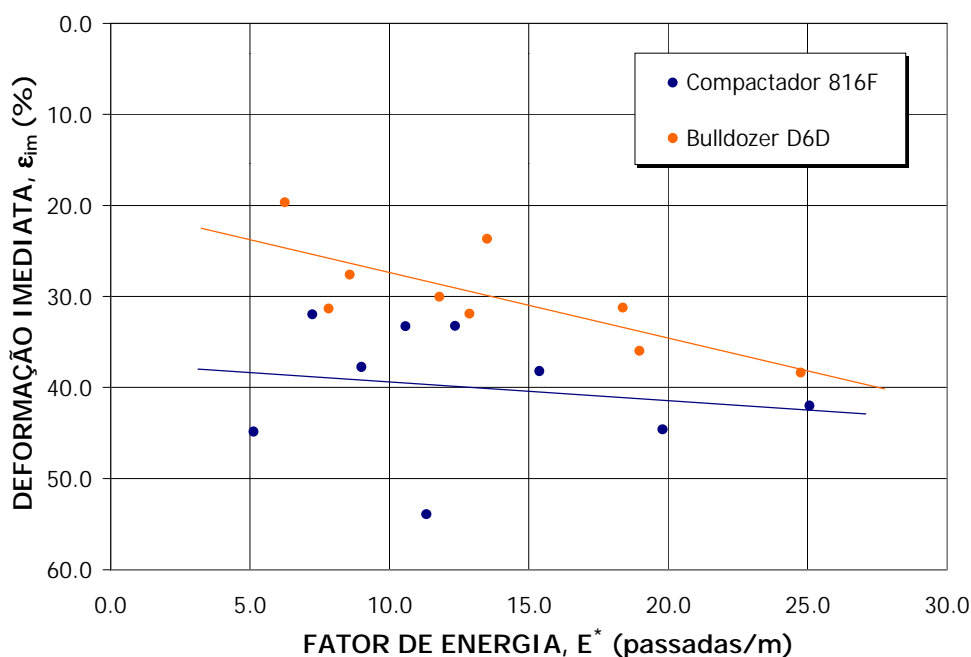


Figura 4.7.4 – Relação fator de energia (E^*) vs. deformação imediata (ϵ_{im}).

A análise dos resultados permite notar que ambos os coeficientes de compressibilidade se mostraram pouco sensíveis às variações do fator de energia (E^*), havendo uma redução destes coeficientes com o aumento das tensões verticais atuantes. No caso do coeficiente de compressão (CR^*) tal comportamento não é monotônico, tendo sido observados valores baixos e crescentes para níveis de tensão reduzidos até ser atingido um valor de pico, a partir do qual o comportamento obedece à tendência mencionada, ou seja, de redução com o incremento das tensões verticais. A razão para os baixos valores de CR^* nas faixas reduzidas de tensão pode estar associada aos pequenos valores de tensão (σ_v) utilizados para calcular os coeficientes CR^* .

4.7.2 Compressão Secundária

O estudo que se segue procurou avaliar o efeito da compactação na compressão secundária dos resíduos dispostos no aterro experimental. Tal análise teve por base os

resultados da monitoração instalada nas áreas de teste e realizada no período pós-construção do experimento, conforme descrito na seqüência.

Tabela 4.7.7 – Coeficientes de compressão (CR^*) e de compressibilidade volumétrica (m_v^*) para distintos níveis de tensão e quadrantes de ensaio do Bulldozer D6D.

BULLDOZER D6D - PLANO HORIZONTAL														
P (passadas)			8				6				4			
E* (Passadas/m)			26.7				20.0				13.3			
t (m)			0.3				0.3				0.3			
σ_v (kN/m ²)	$(\sigma_v^* - \sigma_v) / \sigma_v^{85}$	$\Delta\sigma_v$ (kN/m ²)	σ (%)	$\Delta\sigma$ (%)	CR^*	m_v^* (m ² /kN)	σ (%)	$\Delta\sigma$ (%)	CR^*	m_v^* (m ² /kN)	σ (%)	$\Delta\sigma$ (%)	CR^*	m_v^* (m ² /kN)
0.1			-8.5				-10.1				-11.8			
1.0	0.316	0.9	4.5	13.0	0.130	0.044	3.6	11.8	0.118	0.131	-3.0	10.7	0.107	0.119
2.0	1.414	1.0	14.0	9.5	0.316	0.095	10.5	8.8	0.294	0.088	7.2	8.2	0.274	0.082
4.0	2.828	2.0	25.6	11.5	0.383	0.058	21.4	10.9	0.363	0.055	17.6	10.4	0.345	0.052
6.0	4.899	2.0	32.3	6.7	0.382	0.034	27.9	6.5	0.369	0.033	23.9	6.3	0.357	0.031
8.0	6.928	2.0	36.7	4.4	0.352	0.022	32.2	4.3	0.345	0.022	28.1	4.2	0.337	0.021
10.0	8.944	2.0	39.8	3.1	0.321	0.016	35.3	3.1	0.317	0.015	31.1	3.0	0.312	0.015
14.0	11.832	4.0	43.9	4.1	0.280	0.010	39.4	4.1	0.279	0.010	35.2	4.0	0.277	0.010
20.0	16.733	6.0	47.4	3.5	0.228	0.006	42.9	3.6	0.230	0.006	38.7	3.6	0.229	0.006
30.0	24.495	10.0	50.5	3.1	0.175	0.003	46.1	3.1	0.178	0.003	41.9	3.1	0.179	0.003
60.0	42.426	30.0	54.0	3.4	0.114	0.001	49.6	3.5	0.116	0.001	45.4	3.5	0.118	0.001
P (passadas)			8				6				4			
E* (Passadas/m)			16.0				12.0				8.0			
t (m)			0.5				0.5				0.5			
σ (kN/m ²)	$(\sigma^* - \sigma) / \sigma^{85}$	$\Delta\sigma$ (kN/m ²)	σ (%)	$\Delta\sigma$ (%)	CR^*	m_v^* (m ² /kN)	σ (%)	$\Delta\sigma$ (%)	CR^*	m_v^* (m ² /kN)	σ (%)	$\Delta\sigma$ (%)	CR^*	m_v^* (m ² /kN)
0.1			-11.1				-12.1				-13.0			
1.0	0.316	0.9	8.0	11.1	0.111	0.124	-1.5	10.6	0.106	0.117	-3.0	10.0	0.100	0.112
2.0	1.414	1.0	8.5	8.5	0.281	0.085	6.6	8.1	0.270	0.081	4.8	7.8	0.259	0.078
4.0	2.828	2.0	19.1	10.6	0.352	0.053	16.9	10.3	0.342	0.051	14.8	10.0	0.332	0.050
6.0	4.899	2.0	25.5	6.4	0.362	0.032	23.1	6.2	0.355	0.031	20.9	6.1	0.347	0.031
8.0	6.928	2.0	29.7	4.3	0.341	0.021	27.3	4.2	0.336	0.021	25.0	4.1	0.330	0.021
10.0	8.944	2.0	32.8	3.0	0.314	0.015	30.3	3.0	0.311	0.015	28.0	3.0	0.307	0.015
14.0	11.832	4.0	36.8	4.1	0.278	0.010	34.4	4.0	0.276	0.010	32.0	4.0	0.274	0.010
20.0	16.733	6.0	40.4	3.6	0.229	0.006	37.9	3.5	0.229	0.006	35.6	3.5	0.228	0.006
30.0	24.495	10.0	43.5	3.1	0.178	0.003	41.1	3.1	0.179	0.003	38.7	3.1	0.179	0.003
60.0	42.426	30.0	47.0	3.5	0.117	0.001	44.6	3.6	0.118	0.001	42.3	3.6	0.119	0.001
P (passadas)			8				6				4			
E* (Passadas/m)			11.4				8.6				5.7			
t (m)			0.7				0.7				0.7			
σ (kN/m ²)	$(\sigma^* - \sigma) / \sigma^{85}$	$\Delta\sigma$ (kN/m ²)	σ (%)	$\Delta\sigma$ (%)	CR^*	m_v^* (m ² /kN)	σ (%)	$\Delta\sigma$ (%)	CR^*	m_v^* (m ² /kN)	σ (%)	$\Delta\sigma$ (%)	CR^*	m_v^* (m ² /kN)
0.1			-12.2				-12.9				-13.6			
1.0	0.316	0.9	-1.7	10.5	0.105	0.116	-2.8	10.1	0.101	0.112	-3.8	9.8	0.098	0.109
2.0	1.414	1.0	6.3	8.1	0.268	0.081	5.1	7.9	0.261	0.079	3.8	7.6	0.254	0.076
4.0	2.828	2.0	16.6	10.2	0.340	0.051	15.1	10.0	0.333	0.050	13.7	9.8	0.326	0.049
6.0	4.899	2.0	22.8	6.2	0.354	0.031	21.2	6.1	0.348	0.031	19.7	6.0	0.343	0.030
8.0	6.928	2.0	27.0	4.2	0.335	0.021	25.4	4.1	0.331	0.021	23.8	4.1	0.328	0.020
10.0	8.944	2.0	30.0	3.0	0.310	0.015	28.3	3.0	0.308	0.015	26.7	3.0	0.305	0.015
14.0	11.832	4.0	34.0	4.0	0.276	0.010	32.4	4.0	0.274	0.010	30.7	4.0	0.273	0.010
20.0	16.733	6.0	37.6	3.5	0.229	0.006	35.9	3.5	0.228	0.006	34.2	3.5	0.228	0.006
30.0	24.495	10.0	40.7	3.1	0.179	0.003	39.0	3.1	0.179	0.003	37.4	3.1	0.178	0.003
60.0	42.426	30.0	44.3	3.6	0.118	0.001	42.6	3.6	0.118	0.001	41.0	3.6	0.119	0.001

4.7.2.1 Avaliação dos Recalques Secundários no Aterro Experimental

Os recalques do aterro experimental e do aterro existente foram monitorados por placas de recalque (localizadas sob o aterro experimental e sobre o aterro existente) e por marcos

superficiais (localizados fora do aterro experimental, antes e durante a sua construção, e sobre o mesmo, após o seu encerramento), conforme descrito no item 3.7.2.

Tabela 4.7.8 – Coeficientes de compressão (CR^*) e de compressibilidade volumétrica (m_v^*) para distintos níveis de tensão e quadrantes de ensaio do Compactador 816F.

COMPACTADOR 816F - PLANO HORIZONTAL														
P (passadas)			8				6				4			
E* (Pasadas/m)			26.7				20.0				13.3			
τ (m)			0.3				0.3				0.3			
σ_v (kN/m ²)	$(\sigma_v^* - \sigma_{v0})^{0.85}$	$\Delta\sigma_v$ (kN/m ²)	e(%)	Δe (%)	CR*	m_v^* (m ³ /m ³)	e(%)	Δe (%)	CR*	m_v^* (m ³ /m ³)	e(%)	Δe (%)	CR*	m_v^* (m ³ /m ³)
0.1			-17.8				-21.1				-24.4			
1.0	0.316	0.9	9.0	26.7	0.267	0.297	4.6	25.7	0.257	0.285	0.3	24.7	0.247	0.275
2.0	1.414	1.0	21.2	12.2	0.405	0.122	16.6	12.0	0.400	0.120	12.2	11.9	0.395	0.119
4.0	2.828	2.0	31.5	10.4	0.344	0.052	27.1	10.4	0.346	0.052	22.7	10.4	0.347	0.052
6.0	4.899	2.0	36.2	4.6	0.263	0.023	31.8	4.7	0.267	0.024	27.4	4.8	0.271	0.024
8.0	6.928	2.0	38.8	2.6	0.210	0.013	34.4	2.7	0.214	0.013	30.2	2.7	0.218	0.014
10.0	8.944	2.0	40.5	1.7	0.174	0.008	36.2	1.7	0.178	0.009	31.9	1.8	0.182	0.009
14.0	11.832	4.0	42.5	2.0	0.140	0.005	38.2	2.1	0.144	0.005	34.1	2.2	0.147	0.005
20.0	16.733	6.0	44.1	1.6	0.105	0.003	39.9	1.7	0.108	0.003	35.8	1.7	0.111	0.003
30.0	24.495	10.0	45.4	1.3	0.075	0.001	41.3	1.4	0.077	0.001	37.2	1.4	0.079	0.001
60.0	42.426	30.0	46.8	1.4	0.045	0.000	42.7	1.4	0.047	0.000	38.7	1.5	0.049	0.000
P (passadas)			8				6				4			
E* (Pasadas/m)			16.0				12.0				8.0			
τ (m)			0.5				0.5				0.5			
σ_v (kN/m ²)	$(\sigma_v^* - \sigma_{v0})^{0.85}$	$\Delta\sigma_v$ (kN/m ²)	e(%)	Δe (%)	CR*	m_v^* (m ³ /m ³)	e(%)	Δe (%)	CR*	m_v^* (m ³ /m ³)	e(%)	Δe (%)	CR*	m_v^* (m ³ /m ³)
0.1			-23.1				-25.0				-27.0			
1.0	0.316	0.9	2.0	25.1	0.251	0.279	-8.5	24.5	0.245	0.273	-3.0	24.0	0.240	0.266
2.0	1.414	1.0	34.0	12.0	0.397	0.120	11.4	11.9	0.394	0.119	8.8	11.8	0.391	0.118
4.0	2.828	2.0	24.4	10.4	0.347	0.052	21.8	10.5	0.347	0.052	19.2	10.5	0.347	0.052
6.0	4.899	2.0	29.2	4.7	0.269	0.024	26.6	4.8	0.271	0.024	24.0	4.8	0.273	0.024
8.0	6.928	2.0	31.9	2.7	0.217	0.014	29.2	2.7	0.219	0.014	26.8	2.8	0.221	0.014
10.0	8.944	2.0	33.6	1.8	0.181	0.009	31.1	1.8	0.183	0.009	28.6	1.8	0.185	0.009
14.0	11.832	4.0	35.8	2.1	0.146	0.005	33.2	2.2	0.148	0.005	30.8	2.2	0.150	0.005
20.0	16.733	6.0	37.4	1.7	0.110	0.003	35.0	1.7	0.111	0.003	32.5	1.7	0.113	0.003
30.0	24.495	10.0	38.8	1.4	0.079	0.001	36.4	1.4	0.080	0.001	33.9	1.4	0.081	0.001
60.0	42.426	30.0	40.3	1.4	0.048	0.000	37.8	1.5	0.049	0.000	35.4	1.5	0.050	0.000
P (passadas)			8				6				4			
E* (Pasadas/m)			11.4				8.6				5.7			
τ (m)			0.7				0.7				0.7			
σ_v (kN/m ²)	$(\sigma_v^* - \sigma_{v0})^{0.85}$	$\Delta\sigma_v$ (kN/m ²)	e(%)	Δe (%)	CR*	m_v^* (m ³ /m ³)	e(%)	Δe (%)	CR*	m_v^* (m ³ /m ³)	e(%)	Δe (%)	CR*	m_v^* (m ³ /m ³)
0.1			-25.3				-26.7				-28.1			
1.0	0.316	0.9	-0.9	24.4	0.244	0.272	-2.7	24.1	0.241	0.267	-4.4	23.7	0.237	0.263
2.0	1.414	1.0	11.0	11.8	0.394	0.118	9.1	11.8	0.391	0.118	7.3	11.7	0.389	0.117
4.0	2.828	2.0	21.4	10.5	0.347	0.052	19.6	10.5	0.347	0.052	17.7	10.5	0.347	0.052
6.0	4.899	2.0	26.2	4.8	0.271	0.024	24.4	4.8	0.273	0.024	22.6	4.8	0.274	0.024
8.0	6.928	2.0	29.0	2.7	0.219	0.014	27.1	2.8	0.221	0.014	25.3	2.8	0.222	0.014
10.0	8.944	2.0	30.7	1.8	0.183	0.009	28.9	1.8	0.185	0.009	27.1	1.8	0.186	0.009
14.0	11.832	4.0	32.9	2.2	0.148	0.005	31.1	2.2	0.149	0.005	29.3	2.2	0.151	0.005
20.0	16.733	6.0	34.6	1.7	0.112	0.003	32.9	1.7	0.113	0.003	31.1	1.8	0.114	0.003
30.0	24.495	10.0	36.0	1.4	0.080	0.001	34.3	1.4	0.081	0.001	32.6	1.4	0.082	0.001
60.0	42.426	30.0	37.5	1.5	0.049	0.000	35.8	1.5	0.050	0.000	34.1	1.5	0.050	0.001

Para as análises em questão, foram utilizadas as medições de recalque sob a base (placas de recalque) e sobre o topo (marcos superficiais) do aterro experimental. Um período comum de leituras, após o encerramento do experimento (03/98 a 09/98), foi selecionado e as diferenças entre os dados observados (marcos superficiais e placas de recalque) permitiram isolar e definir a compressão secundária dos resíduos em cada quadrante de ensaio.

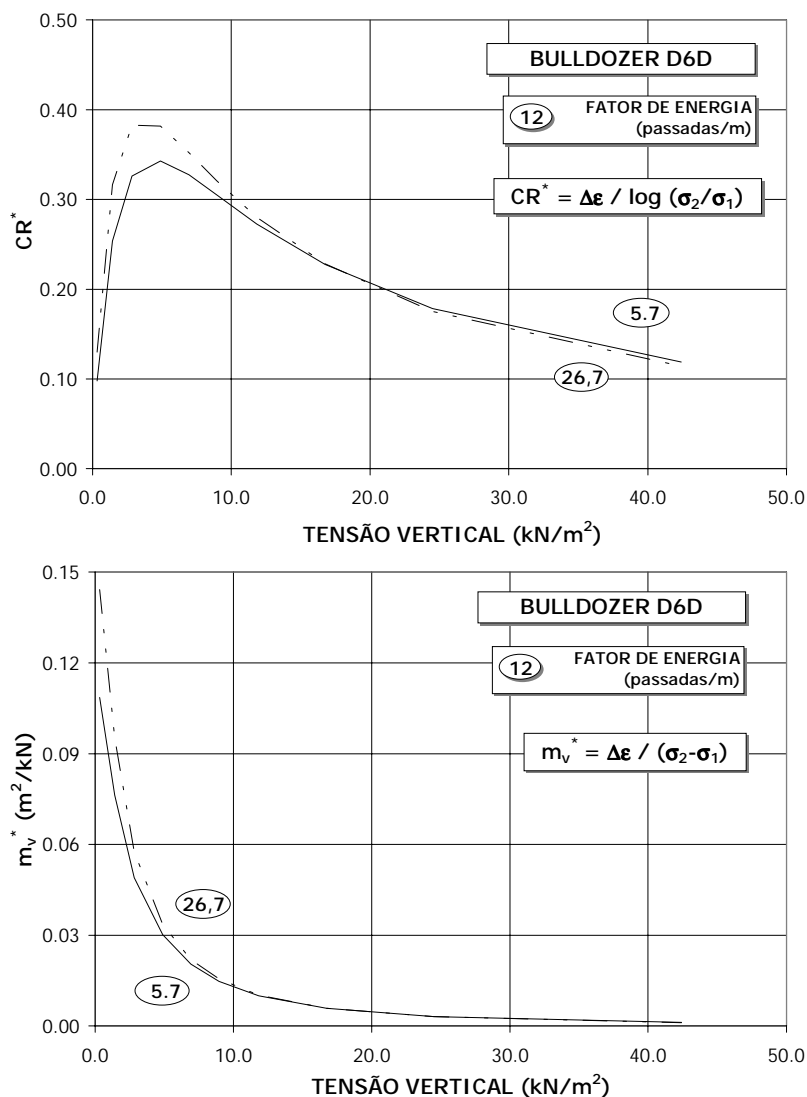


Figura 4.7.5 – Relação entre o coeficiente de compressão (CR^*), coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v^*) e tensões verticais (σ_v), para distintos fatores de energia (E^*) aplicados pelo trator de esteiras tipo D6D.

Uma vez que as placas de recalque e os marcos superficiais não estavam localizados na mesma posição, algumas correções e ajustes precisaram ser realizados, de forma que os recalques utilizados nos cálculos correspondessem às mesmas posições na área de ensaio. Diferentes aproximações foram verificadas e testadas para este fim, tendo sido selecionada a utilização de duas superfícies de contorno: uma para reprodução dos recalques totais no início do período comum de leituras (S_i), denominada superfície 1; e outra para reproduzir os recalques relativos, ou seja, a diferença entre os registros ao final e ao início do período comum de leituras (ΔS_i), denominada superfície 2. Para ambas as superfícies, os recalques correspondiam ao aterro existente, isto é, definidos ao nível da base do aterro experimental. Tais contornos foram obtidos através de regressões múltiplas baseadas em superfícies

quádricas do tipo parabolóide. O primeiro contorno teve por objetivo a representação, em uma mesma base gráfica, dos recalques registrados por diferentes instrumentos (placas de recalque e marcos superficiais), enquanto o segundo possibilitou a obtenção dos recalques do aterro existente nos pontos de interesse, ao longo do período comum de registros. Para as análises de regressão foram utilizadas, como variáveis do estudo, as coordenadas Norte e Leste (X_i , Y_i), os recalques (S_i) e os recalques relativos (ΔS_i) de 6 (seis) placas de recalque e de 14 (quatorze) marcos superficiais. As superfícies de contorno obtidas respeitaram as equações a seguir apresentadas, tendo sido obtidos coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,91 e 0,80, respectivamente, para as superfícies 1 e 2.

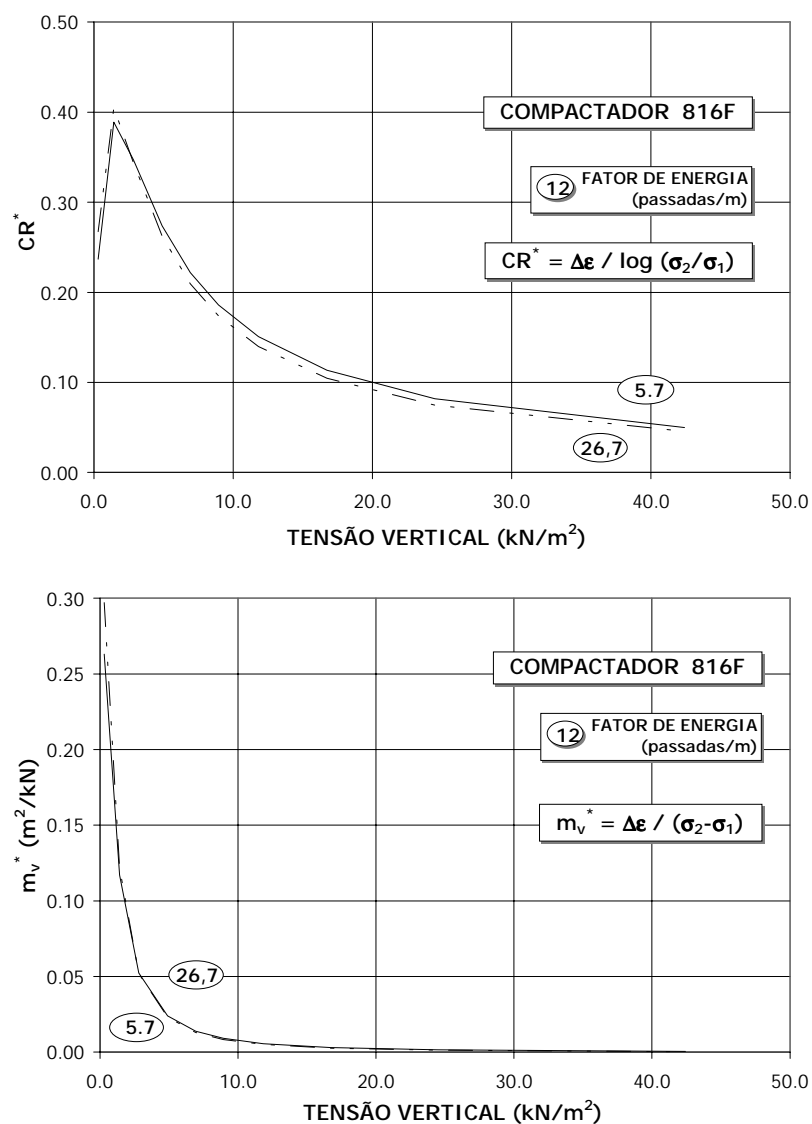


Figura 4.7.6 – Relação entre o coeficiente de compressão (CR^*), coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v^*) e tensões verticais (σ_v), para distintos fatores de energia (E^*) aplicados pelo compactador 816F.

Superfície 1:

$$S_i = p_0 + p_1X_i + p_2Y_i + p_3X_i^2 + p_4Y_i^2$$

Superfície 2:

$$\Delta S_i = p_0' + p_1'X_i + p_2'Y_i + p_3'X_i^2 + p_4'Y_i^2$$

onde:

S_i = recalque do ponto i ao início do período comum de leituras

ΔS_i = recalque relativo para o ponto i entre o final e o início do período comum de leituras

X_i = coordenada Norte do ponto i

Y_i = coordenada Leste do ponto i

p_j e p_j' = parâmetros do modelo, conforme indicado na Tabela 4.7.9.

Tabela 4.7.9 – Parâmetros para definição dos contornos de recalque junto à base do aterro experimental.

SUPERFÍCIE	PARÂMETROS				
	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4
Superfície 1	2,627,378	-1,204	0,110	$1,28 \times 10^{-4}$	$1,46 \times 10^{-5}$
	p_0'	p_1'	p_2'	p_3'	p_4'
Superfície 2	521,326	-0,290	0,095	$3,09 \times 10^{-5}$	$-1,39 \times 10^{-5}$

Desta forma, conhecidas as coordenadas dos marcos superficiais localizados sobre o aterro experimental, foram determinados os recalques totais do aterro existente nestes pontos, ao início do período comum de monitoração, assim como os recalques relativos no intervalo de tempo já referido. A Figura 4.7.7 apresenta as curvas de recalque registradas pelas placas de recalque e marcos superficiais ao longo de todo período de monitoração e as curvas de recalque relativo do aterro experimental e do aterro existente, no período comum de leituras, ambas incorporando os ajustes decorrentes do procedimento descrito. Tais curvas referem-se aos marcos superficiais MS34 e MS35, localizados, respectivamente, nos quadrantes de ensaio 30 e 23, os quais foram compactados com 4 passadas do trator de esteiras. As placas de recalque PR5 e PR6, localizadas junto aos quadrantes citados, tiveram suas leituras igualmente representadas. A Figura 4.7.8 apresenta conjunto similar de resultados, porém relativos a quadrantes de ensaio operados pelo compactador 816F.

A Tabela 4.7.10 apresenta os recalques secundários do aterro experimental, no período comum mencionado, para todos os marcos superficiais posicionados sobre o experimento.

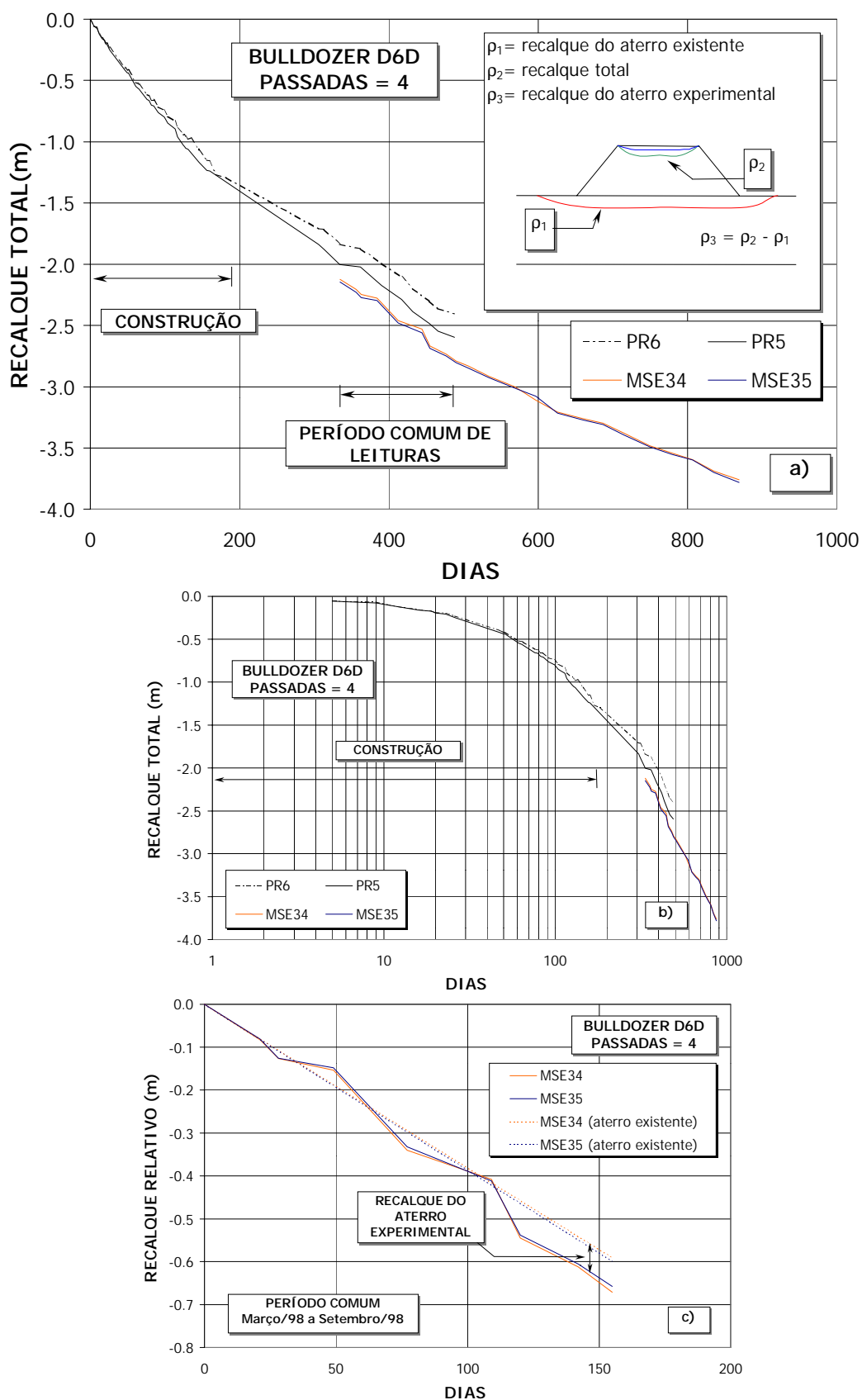


Figura 4.7.7 – Avaliação da compressão secundária do aterro experimental. Recalques totais em escala linear (a) e logarítmica (b) e recalques relativos (período entre 03/98 e 09/98) (c). Quadrantes 23 e 30 (tratores de esteiras).

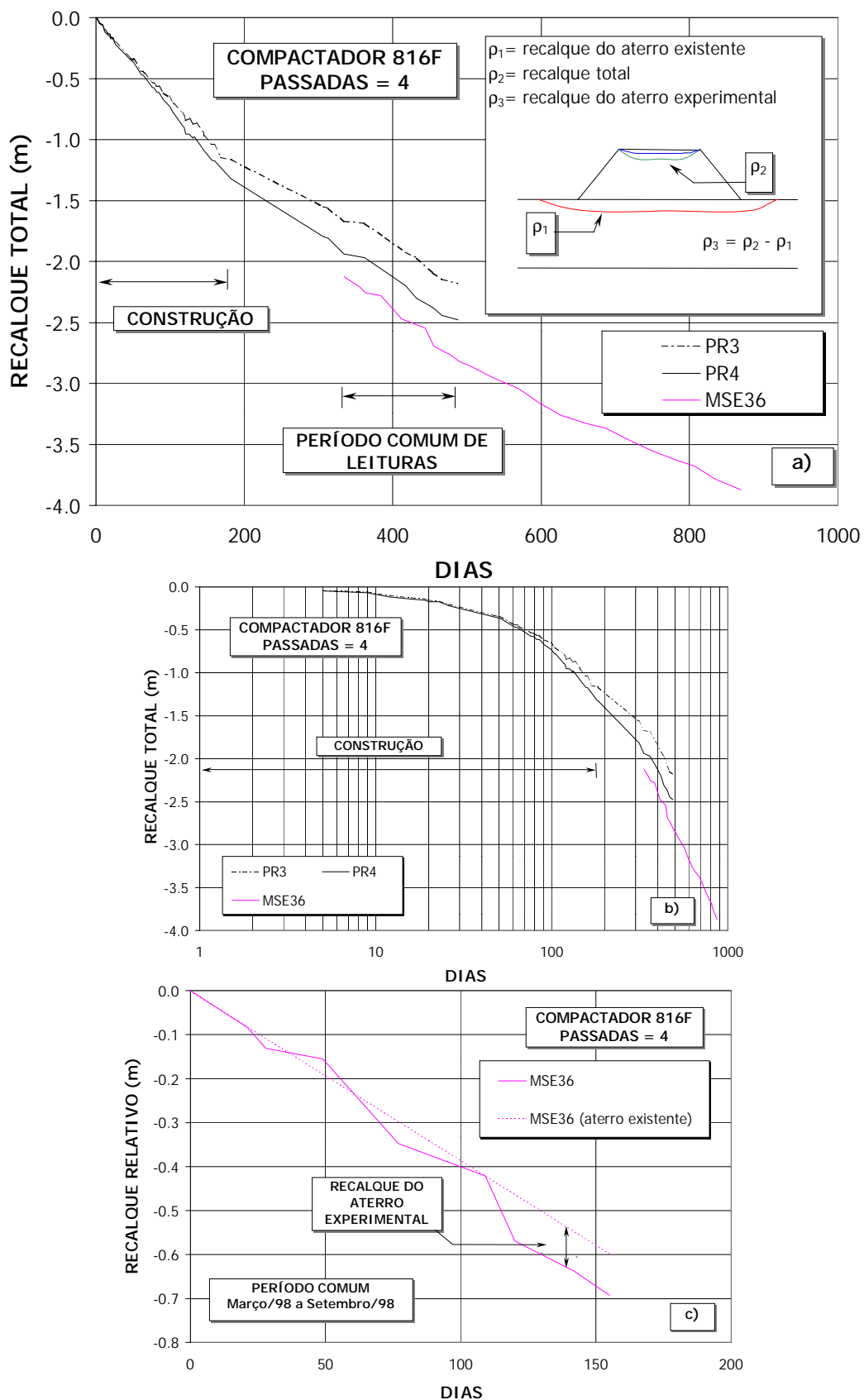


Figura 4.7.8 – Avaliação da compressão secundária do aterro experimental. Recalques totais em escala linear (a) e logarítmica (b) e recalques relativos (período entre 03/98 e 09/98) (c). Quadrante 16 (compactador).

Tabela 4.7.10 – Recalques secundários do aterro experimental (período Março a Setembro de 1998).

MONUMENTO	RECALQUES SECUNDÁRIOS (PERÍODO: MARÇO A SETEMBRO/98) (m)		
	ATERRO EXISTENTE + EXPERIMENTAL	ATERRO EXISTENTE	ATERRO EXPERIMENTAL
PR1	-	0,547	-
PR2	-	0,536	-
PR3	-	0,511	-
PR4	-	0,542	-
PR5	-	0,593	-
PR6	-	0,568	-
MSE24	0,587	0,528 ⁽¹⁾	0,059
MSE25	0,543	0,527 ⁽¹⁾	0,016
MSE26	0,574	0,517 ⁽¹⁾	0,057
MSE27	0,552	0,500 ⁽¹⁾	0,052
MSE28	0,624	0,552 ⁽¹⁾	0,072
MSE29	0,624	0,560 ⁽¹⁾	0,064
MSE30	0,603	0,564 ⁽¹⁾	0,039
MSE31	0,601	0,559 ⁽¹⁾	0,042
MSE32	0,629	0,550 ⁽¹⁾	0,079
MSE33	0,662	0,532 ⁽¹⁾	0,130
MSE34	0,671	0,591 ⁽¹⁾	0,080
MSE35	0,657	0,599 ⁽¹⁾	0,058
MSE36	0,693	0,598 ⁽¹⁾	0,095
MSE37	0,711	0,571 ⁽¹⁾	0,140

(1) – valores calculados através do modelo de superfície 2.

4.7.2.2 Avaliação do Coeficiente de Compressão Secundária face a distintas Técnicas de Compactação

O coeficiente de compressão secundária (C_{α}'), neste estudo, foi avaliado a partir da formulação clássica da mecânica dos solos, inicialmente aplicada aos resíduos sólidos por SOWERS (1973), conforme descrito no item 2.3.1 e apresentada na seqüência:

$$C_{\alpha}' = \frac{\Delta H}{H \log \frac{t_2}{t_1}}$$

onde:

ΔH = recalque secundário

H = altura da coluna de resíduos

$\varepsilon_s = \Delta H / H$ = deformação secundária

t_1 = tempo para conclusão da compressão primária

t_2 = tempo para previsão dos recalques

A definição do tempo zero (t_0), ou seja, o tempo de início dos processos de compressão secundária mostra-se extremamente importante na análise, visto ter um impacto significativo nos valores calculados. No presente estudo, diferentes tempos zero foram verificados, tendo sido assumido para este parâmetro o tempo correspondente ao final da construção do experimento. Embora os processos de degradação e fluência do material tenham provavelmente sido iniciados no decorrer da construção do aterro, mostrou-se adequada a fixação do tempo zero após todos os efeitos externos (disposição e compactação de camadas) terem sido encerrados. A partir do valor t_0 pode-se definir os valores $t_1 = 152$ dias (início do período comum de leituras) e $t_2 = 307$ dias (término do referido período).

Para determinação das alturas da coluna de resíduos (H), em cada ponto de interesse, foram utilizadas, de forma simplificada, as espessuras compactadas das camadas aterradas nos respectivos quadrantes de ensaio. A Tabela 4.7.11 sumariza os resultados obtidos enquanto que a Figura 4.7.9 apresenta a relação entre o fator de energia (E^*) e o coeficiente de compressão secundária (C_{α}').

Tabela 4.7.11 – Coeficientes de compressão secundária para distintos quadrantes de ensaio.

PONTO	RECALQUE (m)	QUAD.	t(m)	P	E*	ALTURA, H (m)	ϵ_v (%)	C_{α}'
MSE24	0.059	34	0.435	8	18.391	1.650	3.60	0.1180
MSE25	0.016	20	0.319	8	25.078	1.330	1.22	0.0400
MSE26	0.057	13	0.520	8	15.385	1.360	4.21	0.1377
MSE27	0.052	6	0.706	8	11.331	ns	-	-
MSE28	0.072	39	0.699	6	8.584	2.120	3.39	0.1110
MSE29	0.064	32	0.466	6	12.876	1.820	3.50	0.1145
MSE30	0.039	25	0.316	6	18.987	1.510	2.60	0.0852
MSE31	0.042	18	0.303	6	19.802	1.270	3.27	0.1071
MSE32	0.079	11	0.485	6	12.371	1.385	5.70	0.1868
MSE33	0.130	4	0.666	6	9.009	ns	-	-
MSE34	0.080	37	0.640	4	6.250	2.270	3.52	0.1154
MSE35	0.058	30	0.466	4	8.584	1.930	3.00	0.0983
MSE36	0.095	16	0.378	4	10.582	1.840	5.16	0.1690
MSE37	0.140	2	0.778	4	5.141	ns	-	-

ns = não utilizado

Os coeficientes de compressão secundária obtidos situaram-se entre 0,04 e 0,18. Valores reportados por BJARNGARD & EDGERS (1990) para este parâmetro situam-se entre 0,003 e 0,038 (estágio inicial) e entre 0,017 e 0,51 (estágio avançado). As deformações secundárias (ϵ_v) para o período analisado situaram-se, por sua vez, entre 1,22 e 5,70%. Apesar dos poucos pontos de análise, uma boa correlação entre o coeficiente de compressão secundária e o fator de energia foi obtida para os resíduos compactados pelo compactador 816F, conforme apresentado na Figura 4.7.9. Neste caso, o aumento da energia transferida às camadas,

durante a compactação, resultou em menores recalques secundários. Tal tendência, no entanto, não foi observada nos quadrantes de ensaio operados pelo trator de esteira, nos quais os coeficientes de compressão secundária mostraram-se praticamente insensíveis às alterações do fator de energia. Esta última constatação coincide com as observações de FASSETT et al. (1994) que também não encontrou qualquer correlação entre a compactação e a compressão secundária dos resíduos sólidos. Vale lembrar que estes autores basearam suas observações apenas na sistematização de dados disponíveis na literatura, muitas vezes carentes de detalhes que permitissem a sua correta interpretação.

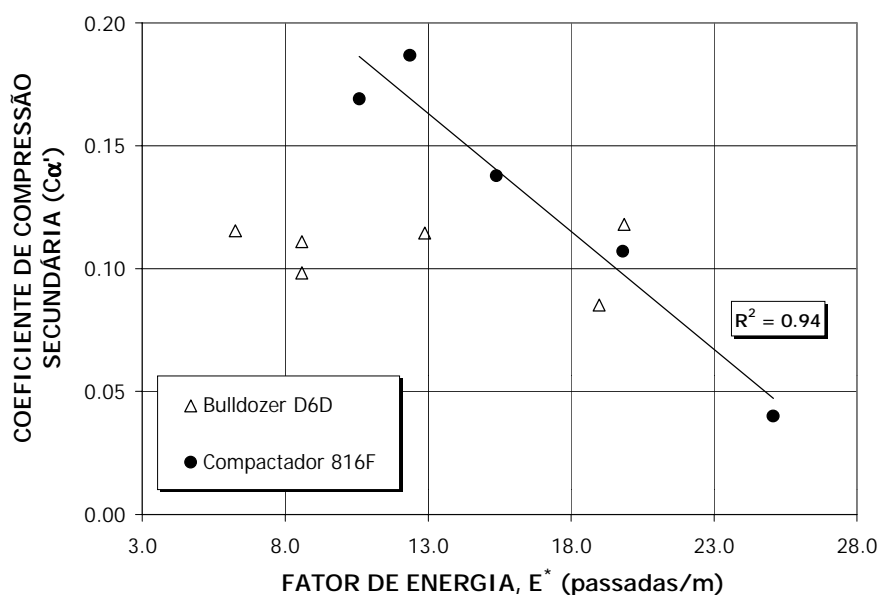


Figura 4.7.9 – Relação entre o coeficiente de compressão secundária ($C_{\alpha'}$) e o fator de energia (E^*).

Conforme descrito, os coeficientes de compressão secundários obtidos enquadram-se na faixa reportada na literatura como correspondente ao estágio mais avançado de degradação dos materiais. Visando verificar o estágio de degradação dos resíduos no aterro experimental e conseqüentemente o parâmetro t_0 adotado nos cálculos, foram analisadas as caracterizações físico-químicas dos líquidos percolados ao longo do tempo. A Figura 4.7.10 apresenta o resultado para os parâmetros DBO, DQO e pH dos líquidos percolados. Baseado na configuração das curvas e na comparação dos parâmetros físico-químicos com valores de referência, pôde-se verificar que os resíduos encontram-se, no período compreendido entre os tempos t_1 e t_2 , na 3ª fase de um processo de degradação típica, ou seja, na fase anaeróbia metanogênica (BARLAZ & HAM, 1993).

Esta fase corresponde a elevadas taxas de decomposição, sendo esperadas, portanto, altas taxas de compressão secundária (estágio avançado). O estágio avançado relatado na literatura

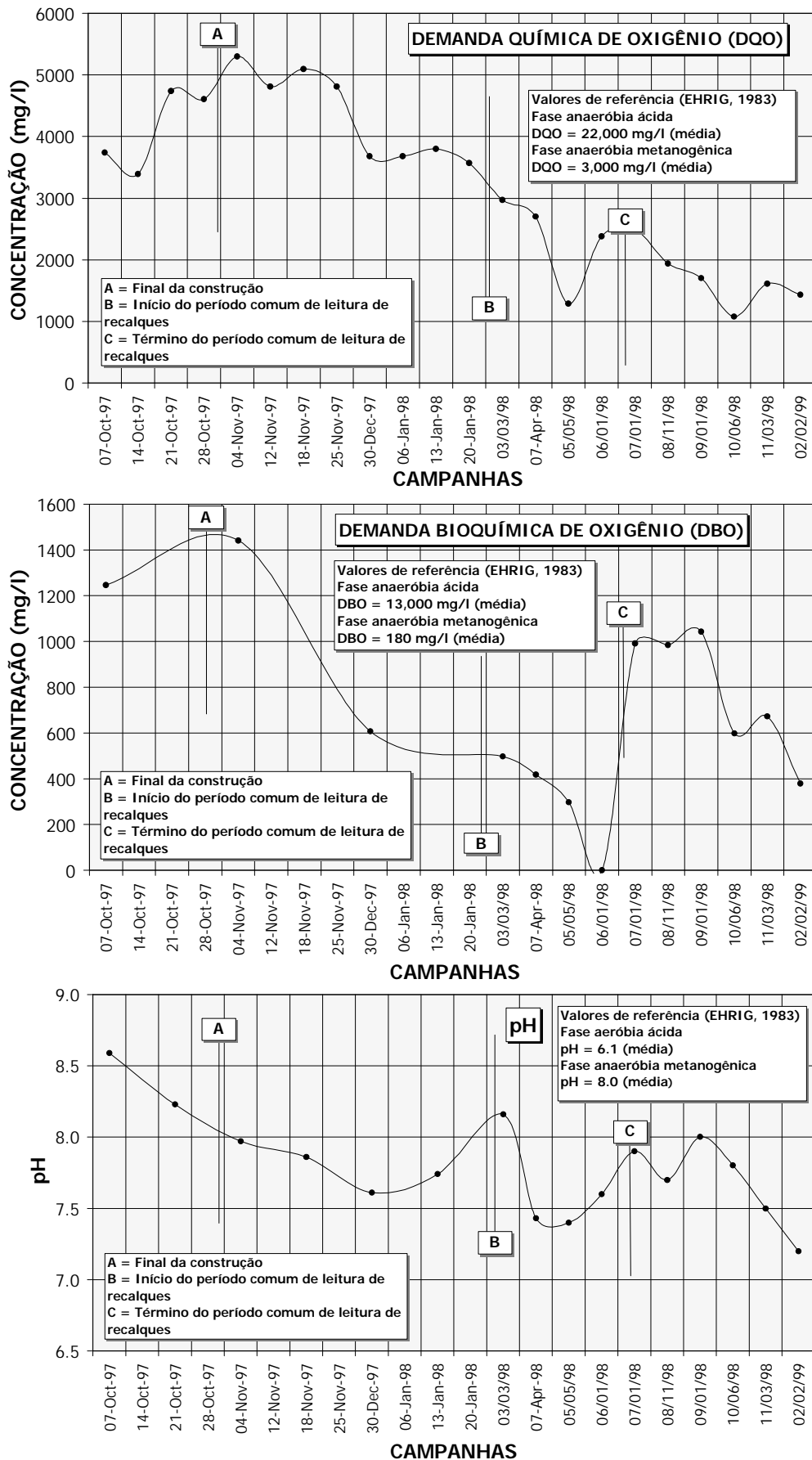


Figura 4.7.10 – Análises físico-químicas dos líquidos percolados. DBO, DQO e pH.

Marques, Afonso Celso Moruzzi. Tese de Doutorado, EESC/USP (2001).

inicia-se cerca de 100 dias após o encerramento do aterro, o que está em acordo com as hipóteses de tempo assumidas anteriormente. Desta forma, acredita-se que as análises apresentadas neste item resultaram em um conjunto consistente de valores para a compressão secundária de resíduos submetidos a distintas técnicas de compactação.

4.8 Avaliação do Efeito da Compactação na Geração dos Líquidos Percolados

A geração dos líquidos percolados apresenta-se como um dos maiores problemas gerenciais e ambientais na operação de aterros sanitários. Diversas soluções operacionais (por exemplo, recirculação dos líquidos) ou de tratamento dos líquidos percolados tem sido propostas e estudadas, porém pouco se conhece sobre os efeitos reais da compactação dos resíduos na qualidade e quantidade dos líquidos percolados nos aterros sanitários (CHRISTENSEN et al., 1992). Baseado em caracterizações físico-químicas e em medições de vazão dos líquidos percolados no aterro experimental, procurou-se, nesta parte do estudo, avaliar preliminarmente os efeitos da compactação na geração destes sub-produtos. Ressalte-se que as análises que se seguem não tiveram o aprofundamento dos demais estudos realizados, devendo ser encaradas como uma contribuição inicial ao tema, direcionada à realidade brasileira.

4.8.1 Análise da Qualidade dos Líquidos Percolados

A caracterização dos líquidos percolados e da sua evolução com o tempo foi realizada a partir de campanhas de amostragem no aterro experimental e de ensaios laboratoriais, conforme descritos no item 3.8.2. A Tabela 4.8.1 apresenta os resultados obtidos para os 23 parâmetros avaliados nas campanhas realizadas, enquanto as Figuras 4.8.1 a 4.8.4 apresentam a evolução com o tempo de alguns dos referidos parâmetros. São também indicadas, nas correspondentes figuras, os valores médios e a faixa típica de valores reportados na literatura.

A Tabela 4.8.2, por sua vez, sumariza os resultados médios e as faixas de valores observados, comparando-os com valores reportados na literatura. De forma geral, os valores observados enquadram-se nas faixas apresentadas na literatura, apesar da elevada amplitude destas. Do ponto de vista qualitativo, nenhuma variação ou comportamento diferenciado do reportado na literatura, no tocante a evolução dos parâmetros físico-químicos dos líquidos percolados, pôde ser identificado e conseqüentemente associado aos efeitos da compactação.

Tabela 4.8.1 – Caracterização físico-química dos líquidos percolados no aterro experimental.

Temperatura da Amostra	AMOSTRAGEM (tempo, em dias e data)													
	31,0°C	32,0°C	37,0°C	39,0°C	37,0°C	*	41,0°C	41,0°C	41,0°C	38,0°C	38,0°C	33,0°C	33,0°C	36,0°C
Temperatura do Ar	20,0 °C	21,0 °C	18,0 °C	33,0 °C	26,0 °C	*	28,0 °C	27,0 °C	28,0 °C	35,0 °C	28,0 °C	28,0 °C	28,0 °C	27,0 °C
PARÂMETRO	AMOSTRAGEM (tempo, em dias e data)													
	0	7	14	21	28	36	42	49	84	91	98	105	147	
	07-Oct-97	14-Oct-97	21-Oct-97	28-Oct-97	04-Nov-97	12-Nov-97	18-Nov-97	25-Nov-97	30-Dec-97	06-Jan-98	13-Jan-98	20-Jan-98	03-Mar-98	
Unidade	Expressão													
Arsênio	mg/L	0,084			0,085				0,017					0,085
Bário	mg/L	1,94			2,36				2,46					0,22
Cádmio	mg/L	0,002			0,01				0,01					0,005
Chumbo	mg/L	0,05			0,1									0,1
Cianeto	mg/L	0,035			0,035				0,035					0,035
Cloreto	mg/L				2750				2325					1710
Condut. Específica a 25°C	µohm/cm	10230		19140	20000		18720		18520		18610			14600
Cromo Total	mg/L	0,58			0,91				0,94					0,22
DEO	mg/L	1246			1440				607					497
DQO	mg/L	3740	3390	4740	4610	5300	4810	5090	3680	3680	3800	3570	2970	
DBODQO		0,333			0,272				0,165				0,167	
Fosforo	mg/L	1,92		1,83	0,63		1,57		0,63		1,58		0,31	
Fluoreto	mg/L	0,1			1				1				0,5	
Mercurio	mg/L	0,0007			0,0006				0,0005				0,005	
Nitrogênio Amoniacal	mg/L	480		780	800		1300		1160		1520		800	
Nitrogênio Nitrato	mg/L										0,34		7,5	
pH	-	8,59		8,23	7,97		7,86		7,61		7,74		8,16	
Prata	mg/L	0,002			0,005				0,02				0,005	
Sólidos Totais	mg/L	10485			10510				9040				6600	
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	9985			9210				8790				6390	
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	500			1300				250				210	
Sólidos Sedimentáveis	mL/L	0,1		0,1	0,1		0,1		0,5		0,1		0,1	
Zinco	mg/L	1,05			1,52				0,88				0,55	
pH (Campo)	-	8,3		7,8	7,3	7,5			7,5		7,9		8,2	
valor suspeito														

Tabela 4.8.1 – Caracterização físico-química dos líquidos percolados no aterro experimental (continuação).

Temperatura da Amostra	Temperatura do Ar	PARÂMETRO	Unidade	Expressão	AMOSTRAGEM (tempo, em dias e data)												Average	Mín	Max
					32,0°C	28,0°C	28,0°C	23,0°C	24,0°C	24,0°C	24,0°C	24,0°C	23,0°C	28,0°C	27,0°C	28,0°C			
					182	210	236	266	308	329	365	392	483						
					07-Apr-98	05-May-98	01-Jun-98	01-Jul-98	11-Aug-98	01-Sep-98	06-Oct-98	03-Nov-98	02-Feb-99						
		Arsenio	mg/L	As	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.085	0.34	0.17	0.17						
		Bário	mg/L	Ba	3.13	2.49	2.05	2.41	1.95	1.52	2.4	3.36	1.98						
		Cálcio	mg/L	Ca	0.005	0.005	0.005	0.005	0.0005	0.005	0.005	0.005	0.005						
		Chumbo	mg/L	Pb	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1						
		Cianeto	mg/L	CN	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.04						
		Cloro	mg/L	Cl	1700	900	1437	1512	1524	257	1162	454	750						
		Condut. Específica a 25°C	µmho/cm	-	15190	8450	11700	12520	11280	10150	9250	10520	8340						
		Cromo Total	mg/L	Cr	0.34	0.15	0.32	0.24	0.15	0.15	0.14	0.05	0.004						
		DBO	mg/L	O2	418	297	486	592	984	1043	598	672	379						
		DQO	mg/L	O2	2700	1290	2380	2490	1940	1700	1080	1610	1430						
		DBODQO	mg/L	-	0.155	0.230	0.204	0.398	0.507	0.614	0.554	0.417	0.265						
		Fenóis	mg/L	C6H5OH	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	1.26	0.63	0.63	0.63						
		Fluoreto	mg/L	F	1	1.2	1.2	1	3.5	0.5	1.6	1	1						
		Mercurio	mg/L	Hg	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005						
		Nitrogênio Amônia	mg/L	N	1400	640	340	300	300	245	300	660	500						
		Nitrogênio Nitrato	mg/L	N		3.2		9			1		1						
		pH	-	-	7.43	7.4	7.6	7.9	7.7	8	7.8	7.5	7.2						
		Prata	mg/L	Ag	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005						
		Sólidos Totais	mg/L	-	6260	3105	5005	5430	4845	4350	3615	4120	3025						
		Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	-	6140	3045	4930	5385	4795	4280	3563	4015	2989						
		Sólidos Suspensos Totais	mg/L	-	120	60	75	45	50	70	52	105	36						
		Sólidos Sedimentáveis	mL/L	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1						
		Zinco	mg/L	Zn	0.38	0.13	0.21	0.26	0.37	0.21	0.06	0.16	0.22						
		pH (Campo)	-	-	7.5	7.2	7.6	7.9	7.9	7.8	7.4	7.5	6.9						
		valor suposto																	

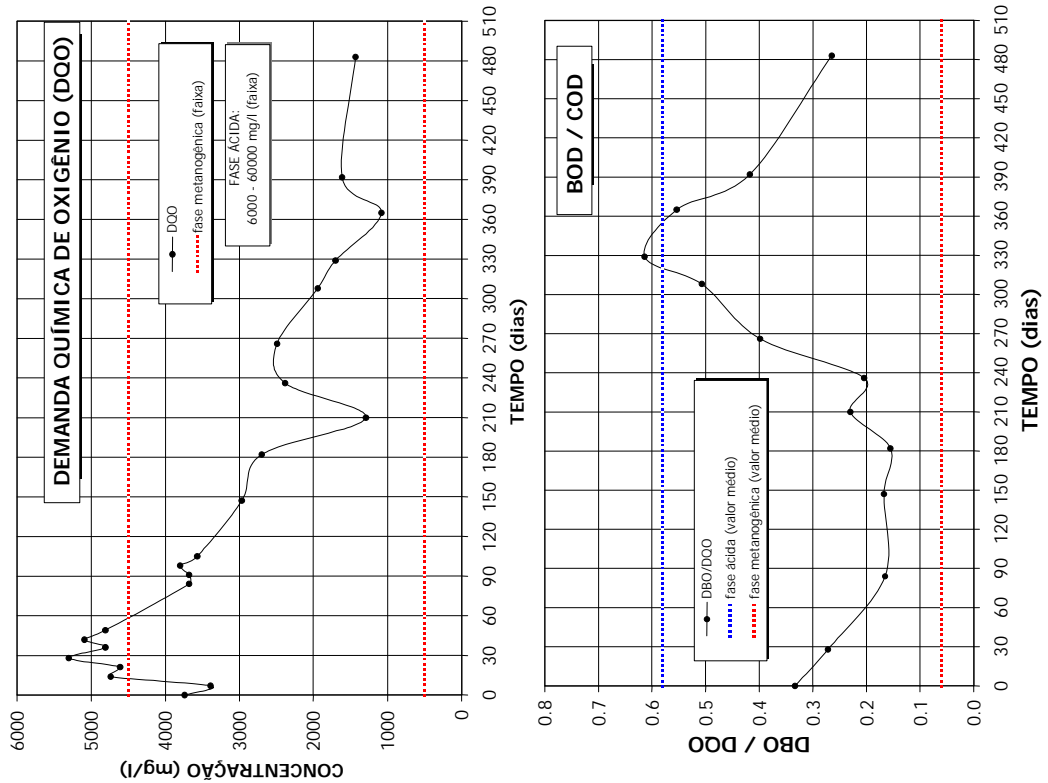
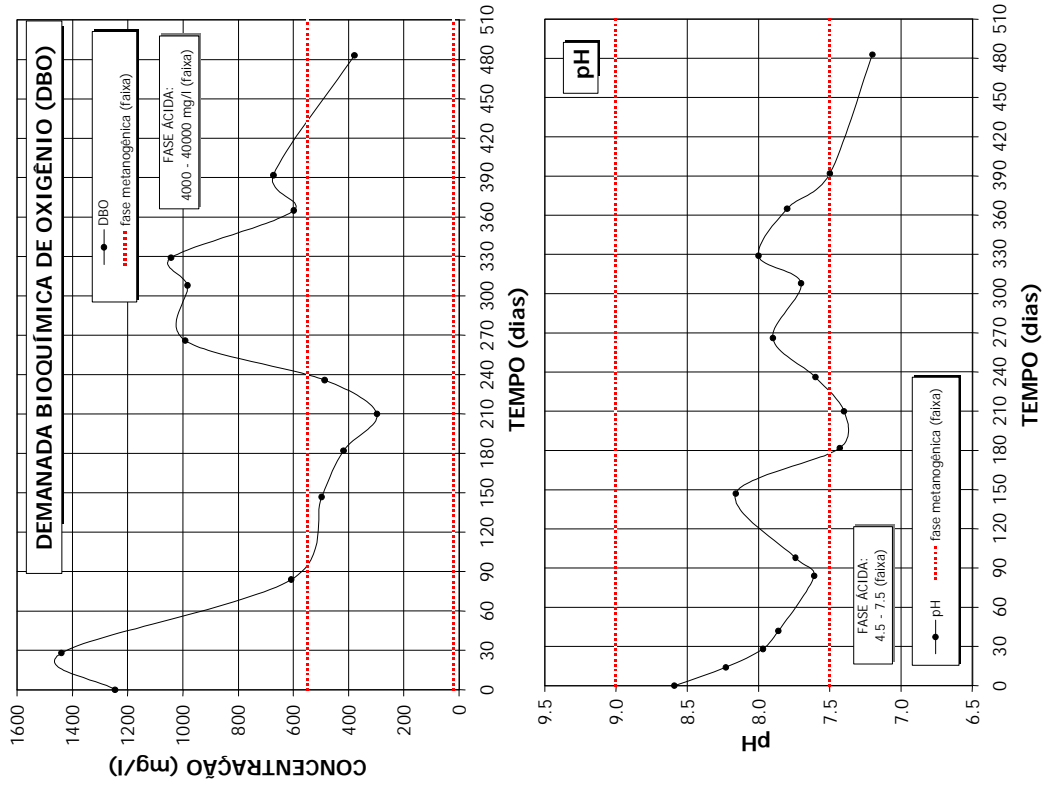


Figura 4.8.1 – Caracterização dos líquidos percolados – DBO, DQO, DBO/DOO e pH.

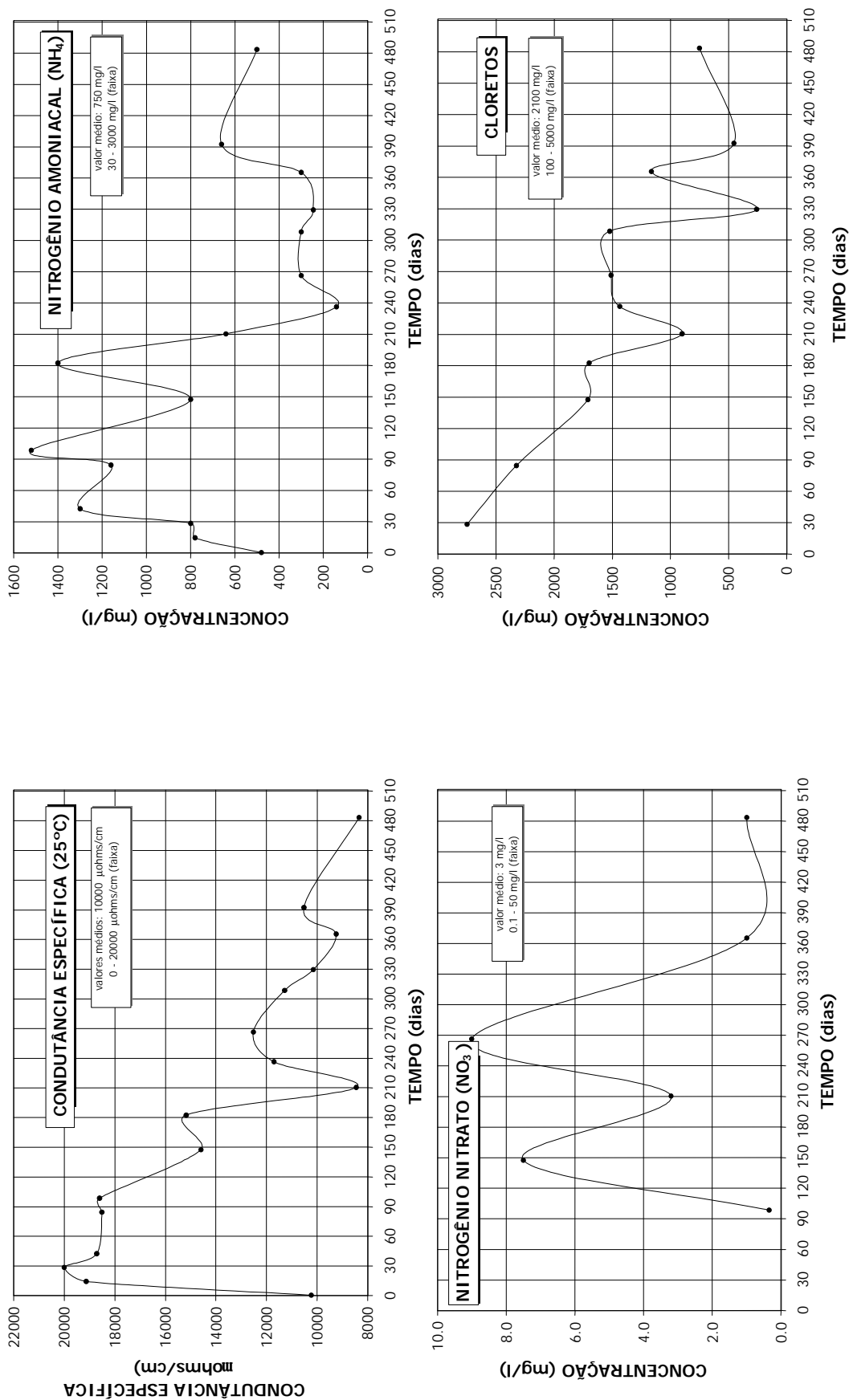


Figura 4.8.2 – Caracterização dos líquidos percolados – Condutância específica, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nítrato e cloretos.

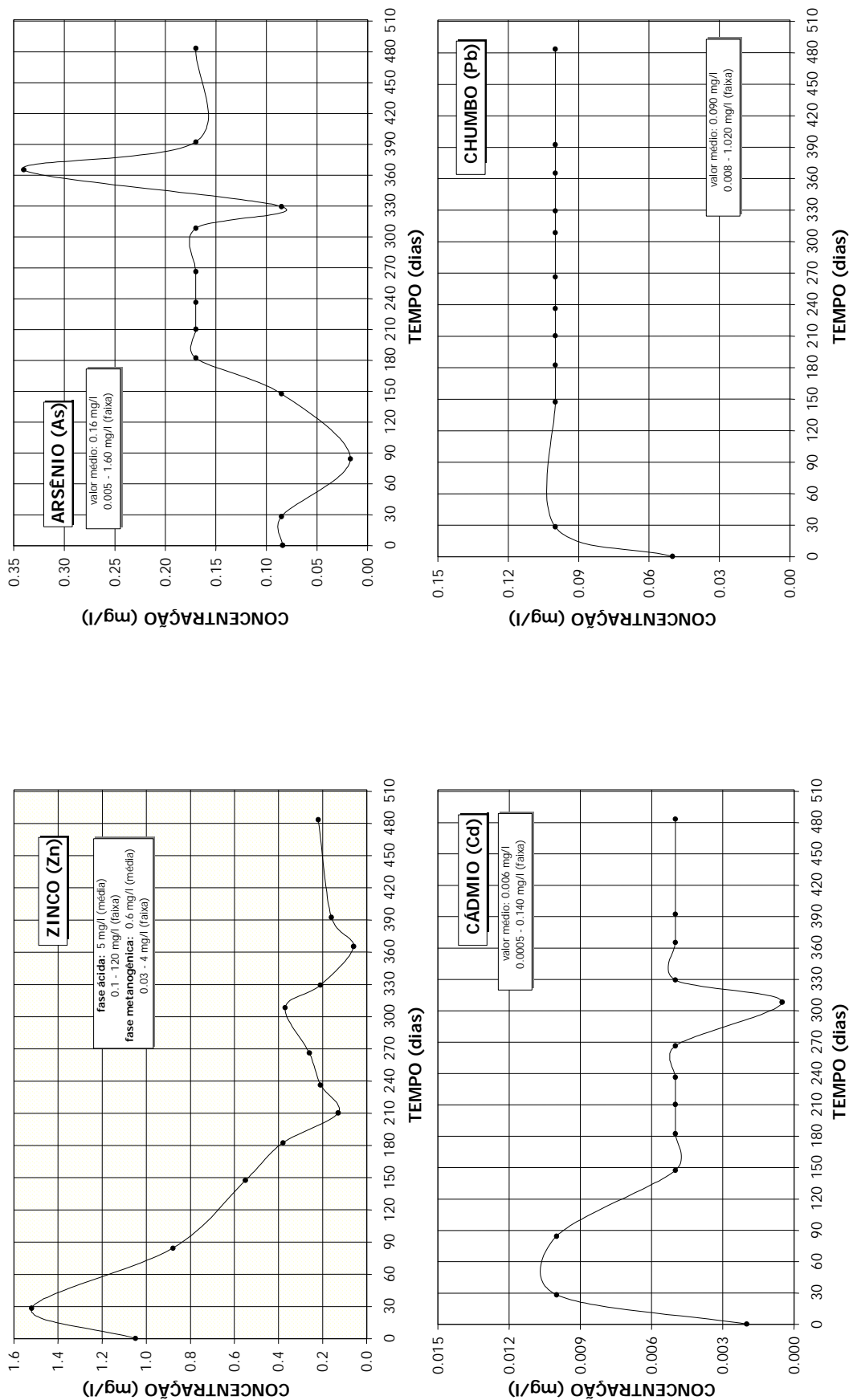


Figura 4.8.3 – Caracterização dos líquidos percolados – Zinco, Arsênio, Cádmio e Chumbo.

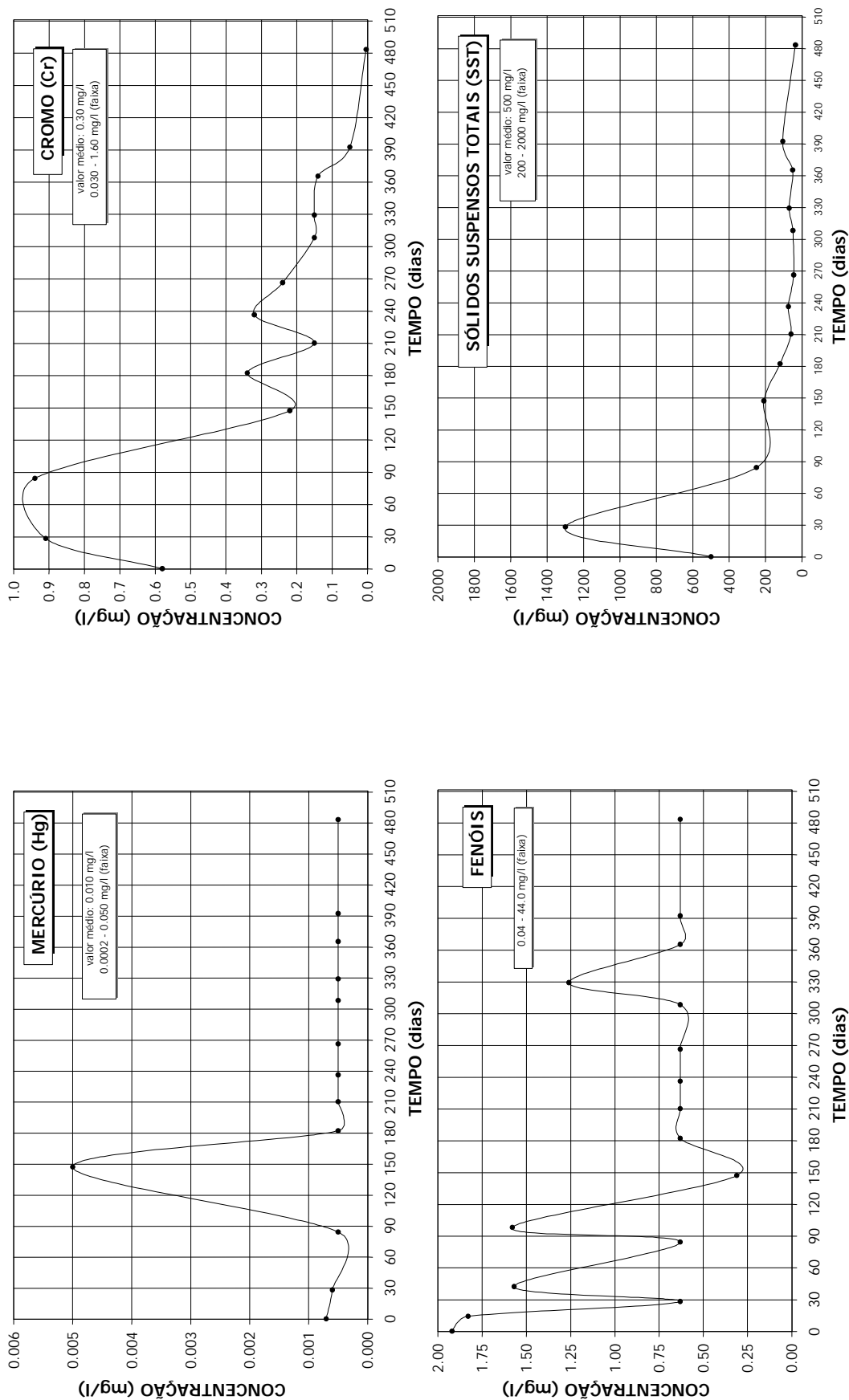


Figura 4.8.4 – Caracterização dos líquidos percolados – Mercúrio, Cromo, fenóis e sólidos suspensos totais (SST).

Tabela 4.8.2 – Caracterização dos líquidos percolados - Valores médios e faixas observadas e reportadas na literatura.

DADOS DA LITERATURA					DADOS OBSERVADOS		
<i>GRUPO 1: parâmetros com valores distintos para as fases ácida e metanogênica (EHRIG, H.J. - 1988)</i>							
PARÂMETRO	UNIDADE	MÉDIA	FAIXA		MÉDIA	FAIXA	
			Min	Max		Min	Max
FASE ÁCIDA							
pH	-	6.1	4.5	7.5	-	-	-
DBO	mg/l	13000	4000	40000	-	-	-
DQO	mg/l	22000	6000	60000	-	-	-
DBO/DQO	-	0.58	-	-	-	-	-
SO ₄	mg/l	500	70	1750	-	-	-
Ca	mg/l	1200	10	2500	-	-	-
Mg	mg/l	470	50	1150	-	-	-
Fe	mg/l	780	20	2100	-	-	-
Mn	mg/l	25.0	0.3	65.0	-	-	-
Zn	mg/l	5.0	0.1	120.0	-	-	-
Sr	mg/l	7.0	0.5	15.0	-	-	-
FASE METANOGENICA							
pH	-	8.0	7.5	9.0	7.79	7.20	8.59
DBO	mg/l	180.0	20.0	550.0	743.00	297.00	1440.00
DQO	mg/l	3000	500	4500	3218.64	1080.00	5300.00
DBO/DQO	-	0.06	-	-	0.33	0.15	0.61
SO ₄	mg/l	80	10	420	-	-	-
Ca	mg/l	60	20	600	-	-	-
Mg	mg/l	180	40	350	-	-	-
Fe	mg/l	15	3	280	-	-	-
Mn	mg/l	0.7	0.03	45.0	-	-	-
Zn	mg/l	0.6	0.03	4.0	0.46	0.06	1.52
Sr	mg/l	1.0	0.3	7.0	-	-	-
<i>GRUPO 2: Parâmetros sem diferença entre fases</i>							
PARÂMETRO	UNIDADE	MÉDIA	FAIXA		MÉDIA	FAIXA	
			Min	Max		Min	Max
Cl	mg/l	2100	100	5000	1373.42	257.00	2750.00
Na	mg/l	1350	50	4000	-	-	-
K	mg/l	1100	10	2500	-	-	-
Alcalinidade	mg CaCO ₃ /l	6700	300	11500	-	-	-
NH ₄	mg N/l	750	30	3000	707.81	140.00	1520.00
OrgN	mg N/l	600	10	4250	-	-	-
TotalN	mg N/l	1250	50	5000	-	-	-
NO ₃	mg N/l	3.0	0.1	50.0	3.67	0.34	9.00
NO ₂	mg N/l	0.5	0.0	25.0	-	-	-
TotalP	mg P/l	6.0	0.1	30.0	-	-	-
CN	mg/l	-	0.04	90	0.04	0.04	0.04
Fenóis	mg/l	-	0.04	44	0.92	0.31	1.92
As	mg /l	160	5	1600	145.08	17.00	340.00
Cd	mg /l	6.0	0.5	140.0	5.19	0.50	10.00
Co	mg /l	55	4	950	-	-	-
Ni	mg /l	200	20	2050	-	-	-
Pb	mg /l	90	8	1020	95.83	50.00	100.00
Cr	mg /l	300	30	1600	322.62	4.00	940.00
Cu	mg /l	80	4	1400	-	-	-
Hg	mg /l	10.0	0.2	50.0	0.87	0.50	5.00
Sólidos suspensos totais ^(*)	mg/l	500	200	2000	221.00	36.00	1300.00
Condutância específica ^(**)	µohms /cm	-	960	16300	13576.25	8340.00	20000.00

(*) TCHOBANOUGLOUS et al., 1993

(**) OWEIS & KHERA, 1990

A comparação com os valores da literatura permite ainda observar que a fase anaeróbia ácida foi rapidamente superada, apresentando praticamente todos os parâmetros monitorados valores e tendências compatíveis com a fase subsequente, ou seja, a fase anaeróbia metanogênica, conforme também descrito no item 4.7.7.2. A redução dos valores de DQO, DBO e condutância específica e os valores mais elevados de pH são algumas das características marcantes desta fase (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

4.8.2 Geração de Líquidos Percolados

Nesta parte do estudo, procurou-se avaliar o efeito da compactação na geração dos líquidos percolados do aterro experimental. A análise baseou-se na comparação dos valores observados com valores obtidos teoricamente por modelos e programas existentes para este fim. Neste sentido, foram utilizados e verificados o método do balanço hídrico, adequado por FENN et al. (1975) para aplicação em aterros sanitários, e o programa HELP da United States Environmental Protection Agency (SCHROEDER et al., 1994a, b), ambos descritos em maior detalhe no item 2.1.2.1.

As vazões dos líquidos percolados no aterro experimental foram registradas diariamente, conforme procedimento descrito no item 3.8.3, ao longo de 22 meses (período entre Outubro/97 e Julho/99). As Tabelas 4.8.3, 4.8.4 e 4.8.5 apresentam as precipitações (P) e as vazões diárias dos líquidos percolados (L), respectivamente, para os anos de 1997 (parcial), 1998 e 1999 (parcial).

Inicialmente foi verificada a relação percentual entre as vazões percoladas (L) e as precipitações observadas (P). Tal valor constitui um importante indicativo sobre a pré-disposição para geração de líquidos nos aterros sanitários. Relações L/P variando entre 25 e 50% (resíduos mal compactados) e entre 15 e 25% (resíduos bem compactados) foram observadas por EHRIG (1983), sendo este índice, segundo os autores, extremamente sensível a densificação dos resíduos. Para o caso presente, foi utilizada uma análise com dados mensais, sendo as precipitações diárias totalizadas para cada mês do estudo. As vazões percoladas mensais foram obtidas a partir do produto da vazão média diária pelo total de dias do mês em questão. Os volumes mensais foram, na seqüência, divididos pela área de contribuição do aterro experimental ($S = 5.870 \text{ m}^2$), para a obtenção das lâminas percoladas.

A Tabela 4.8.6 apresenta a síntese dos resultados obtidos, enquanto que a Figura 4.8.5 ilustra, em termos gráficos, a distribuição das precipitações, dos líquidos percolados e da relação L/P , ao longo do período de 22 meses de monitoração. Conforme pode ser observado, a relação L/P resultante apresenta valores entre 1,5 e 22,0%, ressaltando que o valor máximo observado (22%) foi registrado no mês de Novembro/97, período em que

foram realizados os serviços de cobertura do aterro experimental. Eliminando os meses de Outubro e Novembro/97 (aterro não revestido), Obtém-se um valor médio para a relação L/P da ordem de 8,5%. Tais resultados confirmam, em uma primeira análise, as observações de estudos anteriores e os efeitos benéficos da compactação na minimização dos líquidos percolados em aterros sanitários.

Tabela 4.8.3 – Precipitações e vazões de líquidos percolados diárias (ano 1997, parcial).

DIA	OUTUBRO/97		NOVEMBRO/97		DEZEMBRO/97	
	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)
1	0.00	-	0.00	-	10.20	8744.01
2	27.30	-	0.00	-	0.00	-
3	0.00	-	6.60	3393.48	11.30	6814.91
4	0.00	-	0.00	3201.43	2.80	7985.83
5	0.00	-	0.00	-	28.50	5835.43
6	0.00	-	0.00	-	0.00	-
7	3.70	2374.31	3.30	-	0.00	-
8	0.00	2184.55	0.00	-	0.00	5096.48
9	8.70	-	0.00	-	0.00	8389.71
10	0.00	2461.43	0.00	-	0.00	5665.13
11	0.00	-	0.00	5715.35	0.00	4681.16
12	0.00	-	0.00	6909.79	0.00	4123.28
13	0.00	1936.51	0.00	6589.07	0.00	-
14	0.00	-	25.70	4916.05	48.80	-
15	0.00	2660.65	0.00	-	27.00	-
16	23.20	2735.08	22.10	-	3.40	-
17	3.90	2600.83	18.70	7990.05	0.00	1481.45
18	1.00	-	18.00	9050.10	0.00	1974.85
19	0.00	-	26.60	12066.33	0.00	2170.95
20	0.00	3228.47	2.90	7571.73	0.00	-
21	19.80	4078.69	0.00	6524.90	1.80	-
22	8.00	4096.47	24.80	-	0.00	1356.01
23	0.00	4059.57	0.00	-	0.00	1607.27
24	3.20	4293.68	4.80	6666.76	13.10	-
25	0.00	-	0.00	6917.53	16.50	-
26	0.00	-	0.00	9979.11	18.70	1581.97
27	7.40	3368.61	5.30	13147.34	0.00	-
28	0.00	3883.74	15.60	10494.81	0.00	-
29	0.00	-	4.00	-	11.60	1338.30
30	0.00	4357.69	0.00	-	-	1386.06
31	1.50	-	-	-	-	-
TOTAL (mm)	107.70		178.40		193.70	
MÉDIA (l/dia)	3221.35		7570.87		4131.34	

4.8.2.1 Método do Balanço Hídrico

A avaliação teórica das vazões de líquidos percolados no aterro experimental foi inicialmente realizada através do método do balanço hídrico. Este método foi primeiramente aplicado em aterros sanitários por FENN et al. (1975), estando os parâmetros e procedimentos de cálculo melhor detalhados no item 2.1.2.1. A Tabela 4.8.7 apresenta os resultados da utilização deste método para o período de monitoração, enquanto a Figura 4.8.6 ilustra, em termos gráficos, a distribuição dos parâmetros de interesse ao longo do referido tempo.

Tabela 4.8.4 – Precipitações e vazões de líquidos percolados diárias (ano 1998).

DIA	JANEIRO/98		FEVEREIRO/98		MARÇO/98		ABRIL/98		MAIO/98		JUNHO/98	
	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)
1	1.30	-	0.00	-	10.70	-	0.00	2017.11	0.00	0.00	0.00	746.04
2	0.00	1276.98	0.00	-	0.00	3668.02	0.50	1626.03	0.00	0.00	0.00	824.39
3	0.00	-	0.00	-	6.20	3028.03	0.00	1342.69	0.00	0.00	0.00	798.20
4	0.00	-	3.20	-	4.80	3060.86	0.60	-	55.00	4083.54	0.00	847.86
5	0.00	1241.10	0.00	-	38.60	5718.17	0.00	-	12.80	1375.17	0.00	830.64
6	0.00	-	47.70	-	0.90	4514.80	0.00	1218.77	5.60	1478.90	0.00	-
7	0.00	885.42	0.00	-	4.00	-	0.00	1142.96	0.00	1618.34	0.00	-
8	17.30	-	0.00	-	0.00	-	0.00	958.12	0.00	1574.66	0.00	712.92
9	5.30	923.45	33.40	-	0.50	2370.09	0.00	2504.24	0.00	0.00	0.00	654.67
10	0.00	-	0.00	-	0.00	2166.07	0.00	-	0.00	0.00	-	652.24
11	2.30	-	0.00	-	0.00	1678.64	0.00	-	0.00	1322.94	0.00	-
12	0.00	-	6.60	-	0.00	1402.32	0.00	-	0.00	1119.53	0.00	285.89
13	5.40	-	10.60	-	0.00	1417.98	0.00	1196.71	0.00	910.95	-	-
14	0.00	-	54.00	-	0.00	-	0.00	1057.92	0.00	1014.42	0.00	-
15	0.00	-	36.70	-	33.10	-	0.00	1007.36	0.00	950.12	0.00	389.81
16	14.00	-	65.60	-	0.00	1263.02	6.50	896.09	4.70	-	0.00	587.59
17	4.70	-	8.40	-	0.00	1291.09	0.00	725.62	2.40	-	0.00	541.83
18	0.00	-	0.00	-	0.00	1181.56	7.40	-	0.50	469.25	11.20	316.23
19	0.00	-	0.00	-	15.90	1039.75	0.60	-	0.00	481.18	2.30	624.85
20	19.70	-	0.00	-	0.00	1129.91	0.00	640.51	0.00	634.57	0.00	-
21	5.70	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	599.83	0.00	-
22	6.70	-	0.00	-	0.00	-	0.00	571.03	0.00	527.83	0.00	315.15
23	0.00	-	0.00	-	12.60	1179.37	0.00	713.11	0.00	-	0.00	-
24	0.00	-	3.80	-	0.00	1426.42	0.00	645.90	0.00	-	0.00	-
25	0.00	-	40.60	-	15.50	1639.28	0.00	-	0.00	564.16	2.40	107.93
26	0.00	-	7.40	-	0.00	1730.47	0.00	-	0.00	575.74	0.00	136.51
27	21.00	-	0.00	3980.27	0.00	1676.97	0.00	624.12	13.80	480.06	0.00	-
28	0.00	-	2.10	-	0.00	-	13.80	580.94	0.00	339.17	0.00	-
29	0.00	-	-	-	33.20	-	1.30	501.98	0.00	621.79	0.00	112.77
30	0.00	-	-	-	0.00	2603.16	2.40	598.24	22.70	-	0.00	130.11
31	0.00	-	-	-	2.00	2267.18	-	-	0.00	-	0.00	-
TOTAL (mm)	103.40		320.10		178.00		33.10		117.50		15.90	
MÉDIA (l/dia)	1081.74		3980.27		2156.96		1028.47		1037.11		496.57	

Tabela 4.8.4 – Precipitações e vazões de líquidos percolados diárias (ano 1998). (continuação)

DIA	JULHO/98		AGOSTO/98		SETEMBRO/98		OUTUBRO/98		NOVEMBRO/98		DEZEMBRO/98	
	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)
1	0.00	207.16	0.00	-	0.00	-	6.90	122.62	0.00	-	0.00	244.31
2	0.00	163.26	0.00	-	0.00	69.87	0.00	142.73	0.00	-	0.00	194.98
3	0.00	178.83	3.60	89.84	0.00	65.52	0.00	-	0.00	693.24	0.00	197.03
4	0.00	-	0.00	59.48	0.00	59.66	13.80	-	13.40	1015.70	0.00	194.40
5	0.00	-	0.70	69.36	0.00	-	11.50	318.59	0.00	843.99	29.60	-
6	0.00	212.48	2.70	70.45	3.70	-	1.60	320.90	0.00	735.46	45.50	-
7	0.00	167.26	0.00	53.34	8.90	-	0.00	385.58	0.00	-	0.00	617.05
8	0.00	189.47	0.00	-	3.90	53.26	50.90	16082.51	0.00	-	0.00	307.48
9	0.00	-	2.30	-	32.10	1352.95	58.70	10383.50	0.00	539.85	0.00	281.99
10	6.10	-	3.60	121.46	1.30	709.80	0.00	-	0.00	538.51	45.50	8887.63
11	0.00	-	0.00	92.74	0.00	730.68	0.00	-	5.30	536.92	33.60	50274.46
12	0.00	-	0.00	52.74	0.00	-	11.00	-	1.20	385.09	13.50	-
13	0.40	140.19	0.00	933.26	0.00	-	0.00	1327.12	0.00	322.43	13.80	-
14	0.00	177.82	43.20	690.71	2.60	231.61	0.00	1172.14	18.70	-	0.00	3148.92
15	0.00	172.65	1.10	-	0.60	276.02	0.00	1267.91	0.00	-	0.90	2065.00
16	0.00	-	0.00	-	3.50	235.05	0.00	1246.21	0.00	960.33	6.10	1788.16
17	0.00	146.08	0.00	520.58	0.00	291.45	9.00	-	0.00	671.21	0.00	37117.12
18	0.00	-	0.00	521.13	0.00	219.88	8.50	-	0.00	810.65	18.00	1998.30
19	0.00	-	0.00	430.74	4.50	-	2.10	818.27	6.00	564.60	0.00	-
20	2.20	142.42	0.00	187.35	14.20	-	0.00	1031.50	0.00	556.90	0.00	-
21	3.30	145.93	0.00	184.24	5.50	338.62	0.00	973.96	0.00	-	0.00	640.38
22	0.00	99.18	0.00	-	0.00	238.19	0.00	964.49	0.00	-	0.00	447.11
23	0.00	81.75	0.00	-	0.00	183.27	0.00	958.65	0.00	418.92	3.50	393.25
24	0.00	48.18	0.00	232.67	0.00	154.88	0.00	-	0.00	423.91	8.90	-
25	0.00	-	0.00	183.80	0.00	165.81	0.00	-	0.00	338.13	8.50	-
26	0.00	-	0.00	156.02	0.00	-	0.00	570.29	0.00	254.21	0.00	-
27	0.00	64.86	0.00	157.96	0.00	-	17.70	831.27	4.30	218.21	0.00	-
28	0.00	66.70	0.00	145.43	4.80	138.71	0.00	640.60	0.00	-	1.00	672.85
29	0.00	106.17	0.00	-	7.60	131.69	0.00	619.84	0.00	-	0.00	383.45
30	0.00	-	0.00	-	1.90	103.51	0.00	569.20	0.00	286.21	0.00	392.52
31	0.00	102.29	0.00	-	0.00	-	11.30	-	0.00	-	0.00	-
TOTAL (mm)	12.00	-	57.20	-	95.10	-	203.00	-	48.90	-	228.40	-
MÉDIA (l/dia)	137.51	-	247.67	-	287.52	-	1940.38	-	555.72	-	5512.32	-

Tabela 4.8.5 – Precipitações e vazões de líquidos percolados diárias (ano 1999, parcial).

DIA	JANEIRO/99		FEVEREIRO/99		MARÇO/99		ABRIL/99		MAIO/99		JUNHO/99		JULHO/99	
	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)	P (mm/dia)	L (l/dia)
1	0,00	-	3,00	54107,07	0,00	4355,34	0,00	577,56	0,00	-	1,00	-	0,00	-
2	12,60	-	34,70	7387,74	9,70	3753,88	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
3	2,50	-	0,00	6606,14	1,40	3783,08	0,00	-	0,00	61,69	0,00	-	0,00	-
4	0,00	285,39	0,00	5532,41	0,00	3079,78	0,00	-	0,00	93,85	0,00	-	0,00	-
5	2,00	230,41	0,00	5279,22	0,00	2373,70	0,00	628,55	0,00	109,65	0,00	-	0,00	-
6	47,30	48757,78	23,70	-	0,00	-	0,00	628,03	0,00	230,48	0,00	-	18,90	685,78
7	21,60	6355,83	0,00	-	0,00	-	0,00	458,88	34,40	-	10,60	-	0,00	435,62
8	26,70	33767,81	8,70	2097,04	68,00	4045,19	0,00	499,52	0,00	-	0,00	-	0,00	552,09
9	13,60	-	0,00	2112,35	0,00	2777,66	0,40	402,30	0,00	-	0,00	-	0,00	-
10	23,00	-	19,20	6412,17	19,10	3401,14	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
11	0,30	6855,38	15,30	8419,61	0,00	8109,34	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
12	1,20	4235,37	0,00	6329,69	16,00	6050,39	0,00	446,57	0,00	-	0,00	-	0,00	188,06
13	1,40	2989,39	0,00	-	0,00	-	0,00	501,06	0,10	-	0,00	-	0,00	-
14	3,00	3037,10	1,00	-	0,00	-	0,00	471,35	0,40	-	0,00	-	0,00	-
15	46,50	36961,37	1,20	6704,57	0,00	4639,80	4,90	412,70	0,00	-	29,30	-	0,00	-
16	8,30	-	0,00	-	0,00	3186,67	6,70	274,53	0,00	-	0,00	-	0,00	-
17	1,90	-	0,00	1061,43	0,00	2567,26	6,30	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
18	0,00	5570,69	0,00	927,42	0,00	2260,82	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
19	0,00	3783,85	1,00	951,86	0,00	2261,73	0,00	182,26	0,00	-	0,00	-	0,00	-
20	0,00	2996,75	18,30	-	0,00	-	0,00	219,00	0,60	-	14,30	-	0,00	-
21	0,00	2102,90	16,20	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-	30,20	-	0,00	-
22	0,00	2268,03	34,40	2749,52	4,30	931,75	0,00	243,47	0,00	-	0,00	-	0,00	-
23	15,80	-	0,00	5053,28	0,20	1086,97	0,00	241,82	0,00	-	0,00	-	0,00	-
24	11,10	-	0,30	3727,46	11,60	1107,93	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,00	-
25	62,10	-	17,70	3348,06	0,00	1125,95	0,00	-	0,00	-	0,00	-	0,40	-
26	0,00	4159,98	17,70	6876,18	0,00	1045,66	0,00	209,88	0,00	-	0,00	-	0,00	-
27	8,50	-	5,40	-	0,00	-	0,00	145,09	0,00	-	0,00	-	0,00	-
28	9,00	3282,70	0,00	-	0,00	-	0,00	97,78	0,00	-	0,00	-	0,00	-
29	1,60	3898,20	0,00	-	0,00	975,97	0,00	119,12	0,00	-	0,00	-	0,00	-
30	1,70	-	0,00	-	0,00	738,37	0,00	111,39	7,90	-	0,90	-	0,00	-
31	10,60	-	0,00	-	0,00	523,72	0,00	-	0,20	-	0,00	-	0,00	-
TOTAL (mm)	332,30	-	217,80	-	145,30	-	18,30	-	43,60	-	86,30	-	26,40	-
MÉDIA (l/dia)	9529,91	-	7141,22	-	2790,53	-	343,54	-	123,92	-	1282,54	-	465,39	-

Tabela 4.8.6 – Precipitações e volumes percolados mensais médios no aterro experimental.

MÊS	1997			1998			1999		
	P(m ³)	L(m ³)	L/P (%)	P(m ³)	L(m ³)	L/P (%)	P(m ³)	L(m ³)	L/P (%)
JAN	-	-	-	597,65	33,53	5,6	1920,69	295,43	15,4
FEV	-	-	-	1850,18	111,45	6,0	1258,88	199,95	15,9
MAR	-	-	-	1028,84	66,87	6,5	839,83	86,51	10,3
ABR	-	-	-	191,32	30,85	16,1	105,77	10,31	9,7
MAI	-	-	-	679,15	32,15	4,7	252,01	3,84	1,5
JUN	-	-	-	91,90	14,90	16,2	498,81	38,48	7,7
JUL	-	-	-	69,36	4,26	6,1	152,59	14,43	9,5
AGO	-	-	-	330,62	7,68	2,3	-	-	-
SET	-	-	-	549,68	8,63	1,6	-	-	-
OUT	622,51	99,86	16,0	1173,34	60,15	5,1	-	-	-
NOV	1031,15	227,13	22,0	282,64	16,67	5,9	-	-	-
DEZ	1119,59	128,07	11,4	1320,15	170,88	12,9	-	-	-

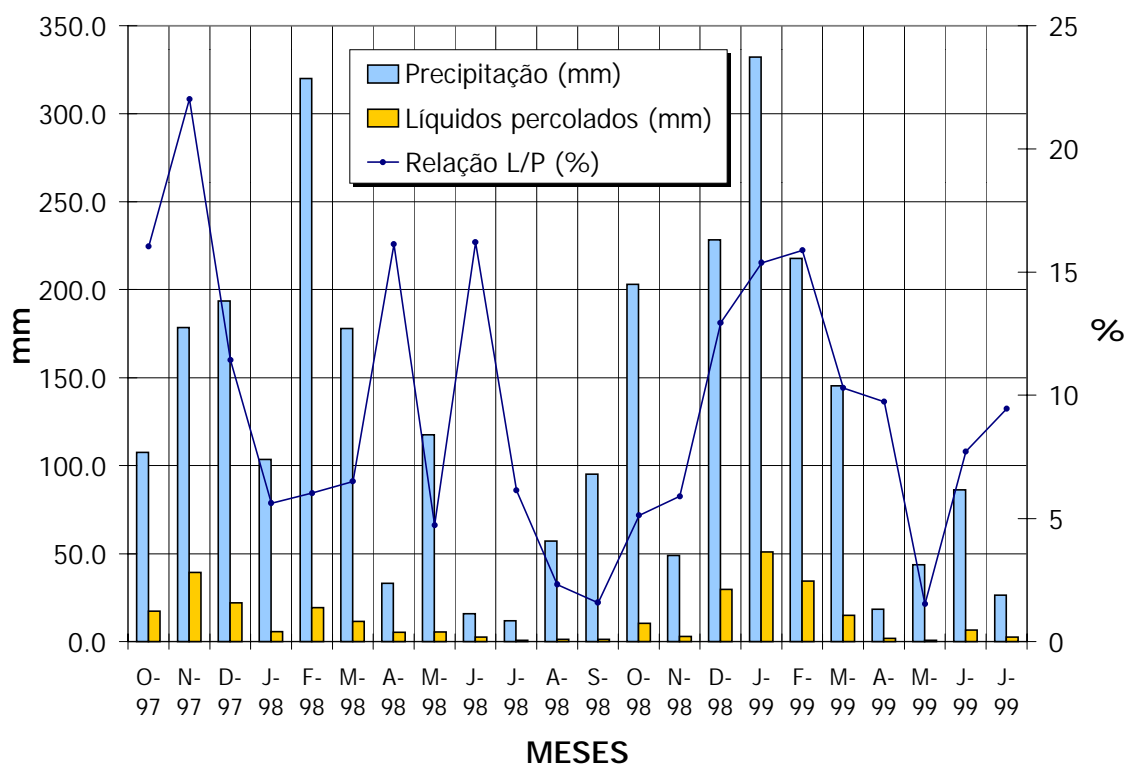


Figura 4.8.5 – Distribuição da precipitação (P), líquidos percolados (L) e relação L/P ao longo do tempo.

Os valores de evaporação (*PET*) utilizados correspondem às médias mensais registradas na estação Mirante de Santana (código 2346117 – INMET). Tal posto foi selecionado, face às suas características e localização, para fornecimento dos dados hidrometeorológicos necessários à avaliação teórica dos líquidos percolados no aterro experimental. Para os valores de precipitação (*P*) foram utilizados os dados do pluviômetro existente no Aterro

Sanitário Bandeirantes. O coeficiente de escoamento superficial (C) foi definido a partir dos valores empíricos recomendados pelo método, os quais dependem do tipo de superfície, vegetação e declividade. Considerou-se assim, a presença de solos argilosos em superfícies planas e inclinadas (taludes laterais do aterro experimental), tendo sido obtido o valor 0,21 como média ponderada das áreas de contribuição. A umidade inicial armazenada no solo de cobertura (ST) foi determinada, por sua vez, assumido uma profundidade do sistema radicular igual a 0,75m e uma quantidade de água disponível no solo, na sua capacidade de campo, igual a 200mm/m, valor este recomendado pelo método para o tipo de solo empregado no experimento. O valor inicial resultante para ST foi, portanto, de 150mm. Os valores de ST para os meses subsequentes foram definidos a partir de tabelas normalizadas, tendo por base o resultado inicial de 150mm. Para a conversão das lâminas em volumes percolados foi utilizada a área de contribuição total do aterro, igual a 5.780m².

A análise da Figura 4.8.6 permite verificar que os volumes de líquidos percolados, calculados pelo método do balanço hídrico, são superiores aos valores observados em praticamente todos os meses da análise. A figura indica ainda os períodos onde ocorrem a percolação e a utilização e recarga da umidade dos solos de cobertura. Apesar do caráter geral do método e das hipóteses simplificadoras assumidas, os resultados acabam sendo um importante indicativo do efeito positivo da compactação na geração dos líquidos percolados no aterro experimental.

4.8.2.2 Programa *HELP* – *USEPA*

O programa *HELP*, descrito no item 2.1.2.1, foi também empregado para avaliação dos volumes de líquidos percolados no aterro experimental. Para sua aplicação foram utilizadas informações climatológicas e às relativas aos materiais envolvidos e ao projeto implantado, conforme se descreve a seguir.

a) dados climatológicos:

- evapotranspiração: para a geração dos dados de evapotranspiração diária foram fornecidos os seguintes dados de entrada:
 - localização do experimento (Latitude = -23,5°)
 - data de início e término do crescimento da vegetação de recobrimento (assumido crescimento ao longo de todo ano, 365 dias).

Tabela 4.8.7 – Método do balanço hídrico. Síntese dos resultados para o período Out/97 a Jul/99.

PARÂMETRO	1997.00					1998.00					
	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO
VALORES CALCULADOS											
FET (mm)	89.10	103.90	127.60	133.50	111.70	109.20	83.60	57.60	46.00	52.30	74.40
P (mm)	107.70	178.40	193.70	103.40	320.10	178.00	33.10	117.50	15.90	12.00	57.20
C	0.00	0.00	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
EO (mm)	0.00	0.00	40.68	21.71	67.22	37.38	6.95	24.68	3.34	2.52	12.01
I	107.70	178.40	153.02	81.69	252.88	140.62	26.15	92.83	12.56	9.48	45.19
I - PET	18.60	74.50	25.42	-51.81	141.18	31.42	-57.45	35.23	-33.44	-42.82	-29.21
NEG (I-PET)	0.00	0.00	0.00	-51.81	0.00	0.00	-57.45	-13.50	-46.94	-89.76	-118.97
St			150.00	106.00	150.00	150.00	101.50	136.73	109.00	82.00	67.00
DSc			0.00	-44.00	44.00	0.00	-48.50	35.23	-27.73	-27.00	-15.00
AET (mm)	89.10	103.90	127.60	125.69	111.70	109.20	74.65	57.60	40.29	36.48	60.19
PERC (mm)	18.60	74.50	25.42	0.00	97.18	31.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Volume (litros)	107508.00	430610.00	146944.94	0.00	561694.62	181607.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VALORES OBSERVADOS											
Volume médio observado (litros/dia)	3221.40	7570.90	4131.30	1081.74	3980.27	2156.96	1028.47	1037.11	496.57	137.51	247.67
Volume mensal observado (litros)	99863.40	227127.00	128070.30	33533.94	111447.56	66865.76	30854.10	32150.41	14897.10	4262.81	7677.77
PERC (mm) (observada)	17.28	39.30	22.16	5.80	19.28	11.57	5.34	5.56	2.58	0.74	1.33
1998.00											
VALORES CALCULADOS											
FET (mm)	70.10	78.50	89.10	116.60	124.30	108.20	108.30	69.10	56.40	48.80	55.30
P (mm)	95.10	203.00	48.90	228.40	332.30	217.80	145.30	18.30	43.60	86.30	26.40
C	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
EO (mm)	19.97	42.63	10.27	47.96	69.78	45.74	30.51	3.84	9.16	18.12	5.54
I	75.13	160.37	38.63	180.44	262.52	172.06	114.79	14.46	34.44	68.18	20.86
I - PET	5.03	81.87	-50.47	63.84	138.22	63.86	6.49	-54.64	-21.96	19.38	-34.44
NEG (I-PET)	0.00	0.00	-50.47	0.00	0.00	0.00	0.00	-54.64	-76.60	-48.50	-82.94
St	72.03	150.00	106.50	150.00	150.00	150.00	150.00	103.50	89.00	108.38	85.00
DSc	5.03	77.97	-43.50	43.50	0.00	0.00	0.00	-46.50	-14.50	19.38	-23.38
AET (mm)	70.10	78.50	82.13	116.60	124.30	108.20	108.30	60.96	48.94	48.80	44.23
PERC (mm)	0.00	3.90	0.00	20.34	138.22	63.86	6.49	0.00	0.00	0.00	0.00
Volume (litros)	0.00	22536.22	0.00	117542.08	798894.26	369122.36	37494.86	0.00	0.00	0.00	0.00
VALORES OBSERVADOS											
Volume médio observado (litros/dia)	287.52	1940.38	555.72	5512.32	9529.91	7141.22	2790.53	343.54	123.92	1282.54	465.39
Volume mensal observado (litros)	8625.60	60151.78	16671.60	170881.92	295427.21	199954.16	86506.43	10306.20	3841.52	38476.20	14427.09
PERC (mm) (observada)	1.49	10.41	2.88	29.56	51.11	34.59	14.97	1.78	0.66	6.66	2.50

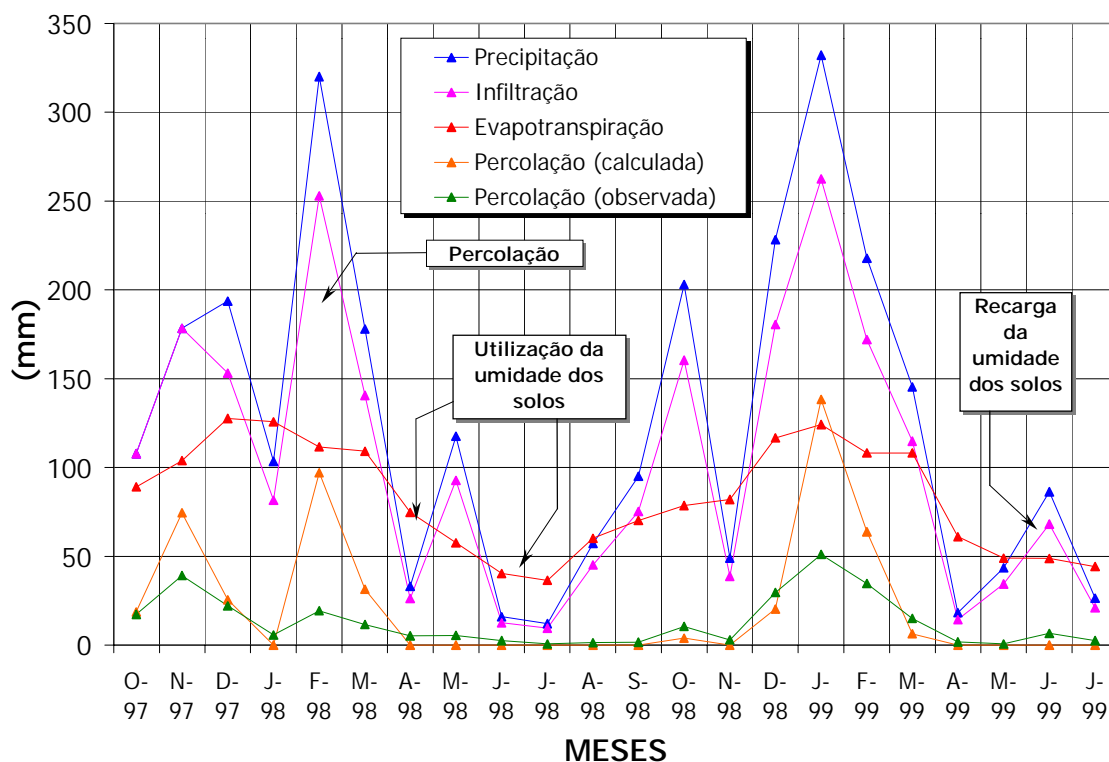


Figura 4.8.6 – Produção de líquidos percolados no aterro experimental. Valores observados e calculados pelo método do balanço hídrico (período Out/97 a Jul/99).

- velocidade média anual dos ventos = 24,73 km/h (vide Apêndice III)
 - umidade relativa média trimestral (vide Apêndice III)
 - profundidade da zona evaporativa = 0,2 ou 0,6m, dependendo da espessura da camada de cobertura (“top soil”)
 - índice de cobertura vegetativa (“maximum leaf area index”) = 3,5 (assumido bom padrão de cobertura vegetal).
- precipitação (P): dados diários registrados no pluviômetro do Aterro Sanitário Bandeirantes no período entre 01/10/97 e 31/07/99 (vide Apêndice III).
- temperatura (T): dados diários registrados na estação Mirante de Santana (INMET) no período entre 01/10/97 e 31/07/99 (vide Apêndice III).
- radiação solar (S): tal parâmetro foi calculado a partir dos dados de insolação diária registrados na estação Mirante de Santana, tendo por base a formulação a seguir descrita (BRUTSAERT, 1982 e DUFFIE & BECKMAN, 1980). No Apêndice III são apresentados os cálculos e valores finais para este parâmetro.

$$S = S_t (1 - \alpha)$$

onde:

α = coeficiente de Albedo (assumido igual a 0,23, valor recomendado para gramíneas e vegetação rasteira).

S_t = radiação solar global, definida por: $S_t = (a_s + b_s n/N) S_0$

a_s e b_s = constantes de cálculo, iguais a 0,25 e 0,50, respectivamente.

n = horas de insolação diária (valor registrado na estação Mirante de Santana)

N = número máximo possível de horas de insolação, definido por: $N = (24/\pi) w_s$

w_s = ângulo do pôr do sol, definido por: $w_s = \arccos \{ -\tan \phi \tan r_0 \}$

ϕ = latitude (valores negativos no hemisfério Sul)

r_0 = declinação do sol, definida por $r_0 = 0,4093 \text{ sen } \{ 2\pi J / 365 - 1,405 \}$ (em radianos)

J = dia juliano

S_0 = radiação extraterrestre diária, definida por:

$$S_0 = 37,21 d_r (w_s \text{ sen } \phi \text{ sen } r_0 + \cos \phi \cos r_0 \text{ sen } w_s) \text{ (em MJ/m}^2\text{)}$$

d_r = distância relativa entre a terra e o sol, definida por: $d_r = 1 + 0,033 \cos \{ 2\pi 365 / J \}$

b) propriedades dos materiais e características do projeto:

- seção transversal: a seção transversal típica do aterro experimental considerou a presença de 6 camadas, caracterizadas como se segue:
 - camada 1: camada superior de solo (“topsoil”), considerada como tipo I, ou seja, camada com percolação vertical; espessura e tipo do material variável em função da simulação realizada.
 - camada 2: cobertura de solo propriamente dita, considerada como tipo III, ou seja, barreira de solo; espessura igual a 0,6m e material tipo 23 (solo ML, de acordo com o sistema USCS – Unified Soil Classification System).
 - camada 3: resíduos sólidos urbanos, considerada como tipo I; espessura igual a 1,75m e material tipo 18 (resíduos municipais)
 - camada 4: camada de drenagem, considerada como tipo II, ou seja, camada com drenagem lateral; espessura igual a 0,6m e material tipo 23.
 - camada 5: geomembrana, considerada como tipo IV, ou seja, revestimentos (barreiras) sintéticas; espessura igual a 0,1cm e material tipo 35 (geomembrana de HDPE).
 - camada 6: solo de base, considerada como tipo III; espessura igual a 0,6m e material tipo 16 (barreira de solo compactado)

- sistema de drenagem:
 - área de contribuição = 5.780m²
 - percentagem da área passível de escoamento: 42,9%
 - distância entre drenos = 30m
 - declividade do sistema de drenagem = 0,5%

Foram realizadas 5 (cinco) distintas simulações, fazendo variar alguns dos parâmetros descritos, para verificar o impacto nos resultados finais. É importante também observar que as simulações foram realizadas considerando que o aterro experimental não se apresentava coberto nos dois primeiros meses monitorados (Outubro e Novembro/97). Tal consideração implicou algumas adequações na seção transversal anteriormente descrita. As simulações realizadas tiveram as seguintes características diferenciais:

- ✓ simulação 1:
 - resíduos sólidos urbanos (parâmetros do programa): porosidade igual a 0,671; capacidade de campo igual a 0,292; condutividade hidráulica saturada igual a 10⁻³ cm/s.
 - camada 1: espessura igual a 0,2m e material tipo 9 (solo ML, de acordo com o sistema USCS, pouco compactado).
 - camada 4: espessura igual a 0,6m e material tipo 23 (solo ML, de acordo com o sistema USCS, bem compactado).
- ✓ simulação 2:
 - resíduos sólidos urbanos: porosidade igual a 0,6; capacidade de campo igual a 0,37; condutividade hidráulica saturada igual a 10⁻⁴ cm/s (CANZIANI & COSSU, 1989).
 - camada 1: idem simulação 1.
 - camada 4: idem simulação 1.
- ✓ simulação 3:
 - resíduos sólidos urbanos (parâmetros do programa): idem simulação 1
 - camada 1: espessura igual a 0,6m e material tipo 9 (solo ML, de acordo com o sistema USCS, pouco compactado).
 - camada 4: idem simulação 1
- ✓ simulação 4:
 - resíduos sólidos urbanos (parâmetros do programa): idem simulação 1
 - camada 1: espessura igual a 0,2m e material tipo 23 (solo ML, de acordo com o sistema USCS, bem compactado).

- camada 4: idem simulação 1
- ✓ simulação 5:
 - resíduos sólidos urbanos (parâmetros do programa): idem simulação 1
 - camada 1: idem simulação 1.
 - camada 4: espessura igual a 0,6m e material tipo 16 (barreira de solo compactado).

As Figuras 4.8.7 a 4.8.9 apresentam, em termos gráficos, os resultados do programa para as distintas simulações descritas. Nos gráficos são comparados os valores observados com os valores calculados teoricamente pelo programa. Indicam-se ainda os valores de precipitação, infiltração e evapotranspiração para o período de monitoração.

A análise dos resultados permite observar que para todas as simulações e para praticamente todos os meses monitorados, os valores teóricos são superiores aos observados no aterro experimental. Comparando as simulações realizadas, nota-se que alterações na camada de recobrimento superior (aumento da espessura, emprego de materiais menos permeáveis, etc) são responsáveis por maiores reduções nos volumes percolados. Apesar das peculiaridades do programa e da dificuldade de reprodução exata das condições de contorno do experimento, pode-se dizer que também este estudo revelou importantes indícios acerca do efeito benéfico da compactação na geração dos líquidos percolados. Estudos complementares, no entanto, deverão ser realizados para plena confirmação das tendências aqui obtidas.

4.9 Síntese do Estudo de Compactação

As principais análises do estudo de compactação são sintetizadas a seguir, destacando os aspectos julgados mais relevantes e importantes do mesmo:

- a) influência das técnicas construtivas sobre o peso específico: baseado no controle de execução de aterro experimental de resíduos sólidos urbanos e na execução de ensaios *in situ* no mesmo, avaliou-se a influência de distintos parâmetros e técnicas construtivas no peso específico dos resíduos. As variáveis analisadas (teor de umidade, espessura das camadas e número de passadas) mostraram-se todas significantes, sendo que a variação do teor de umidade resultou em maior impacto no peso específico seco dos materiais. As demais variáveis controladas (espessura das camadas, número de passadas e tipo do equipamento e inclinação do plano de compactação) mostraram possuir menor efeito no processo. Um modelo estatístico, baseado em funções logarítmicas e tendo em conta os

parâmetros mencionados, foi desenvolvido e apresentado para estimativa do peso específico dos resíduos sólidos urbanos quando submetidos à compactação.

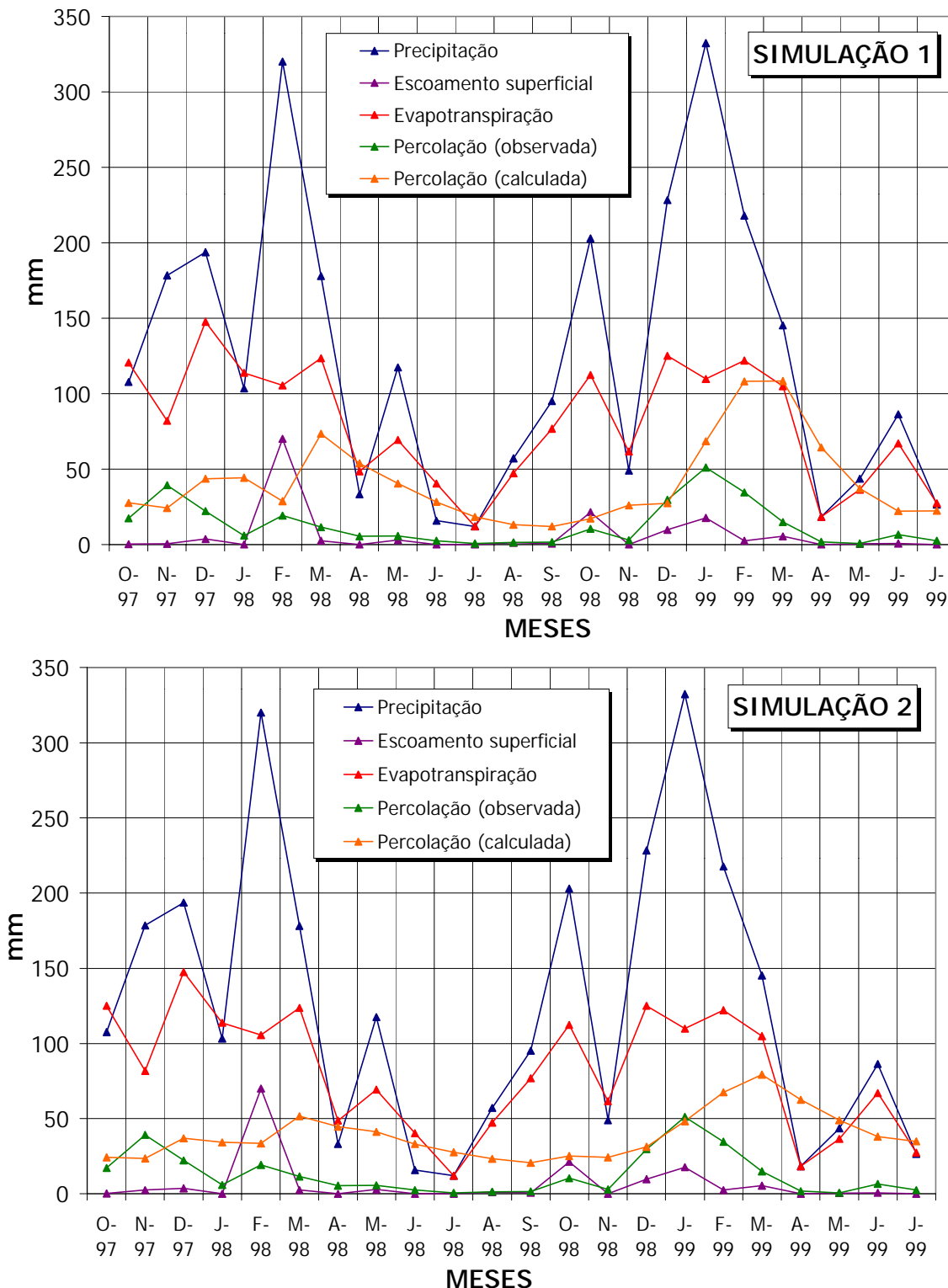


Figura 4.8.7 - Líquidos percolados no aterro experimental (Simulações 1 e 2). Valores observados e calculados pelo programa HELP (período Out/97 a Jul/99).

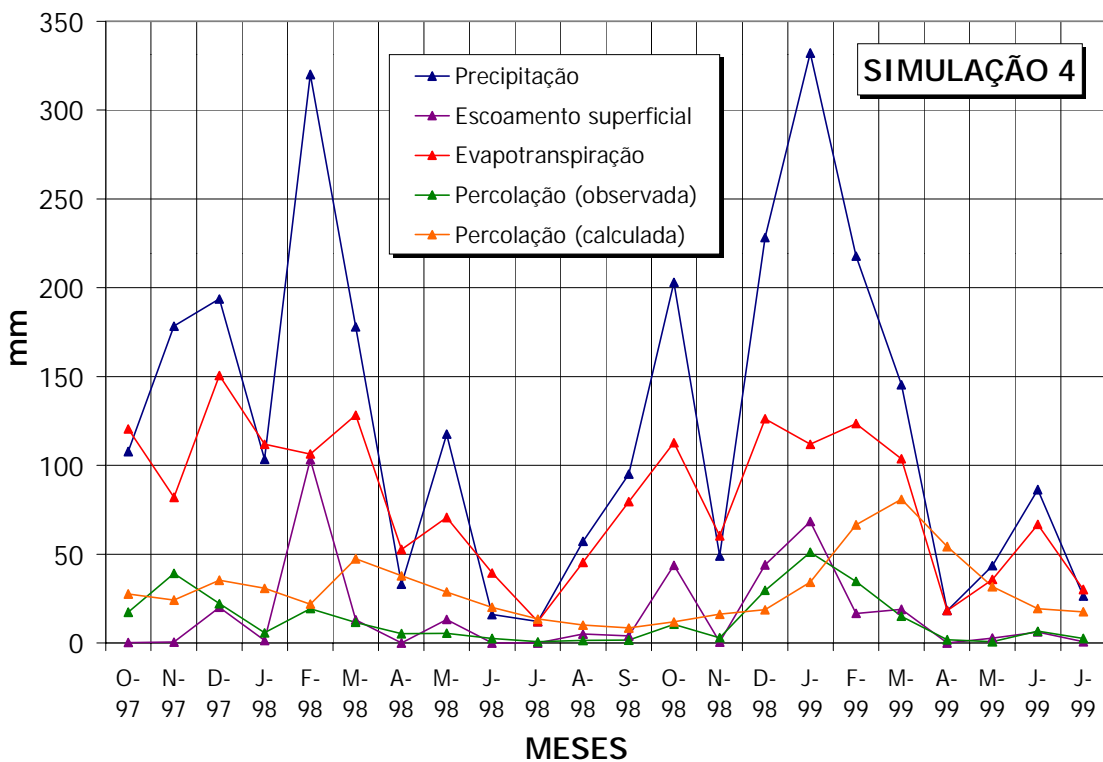
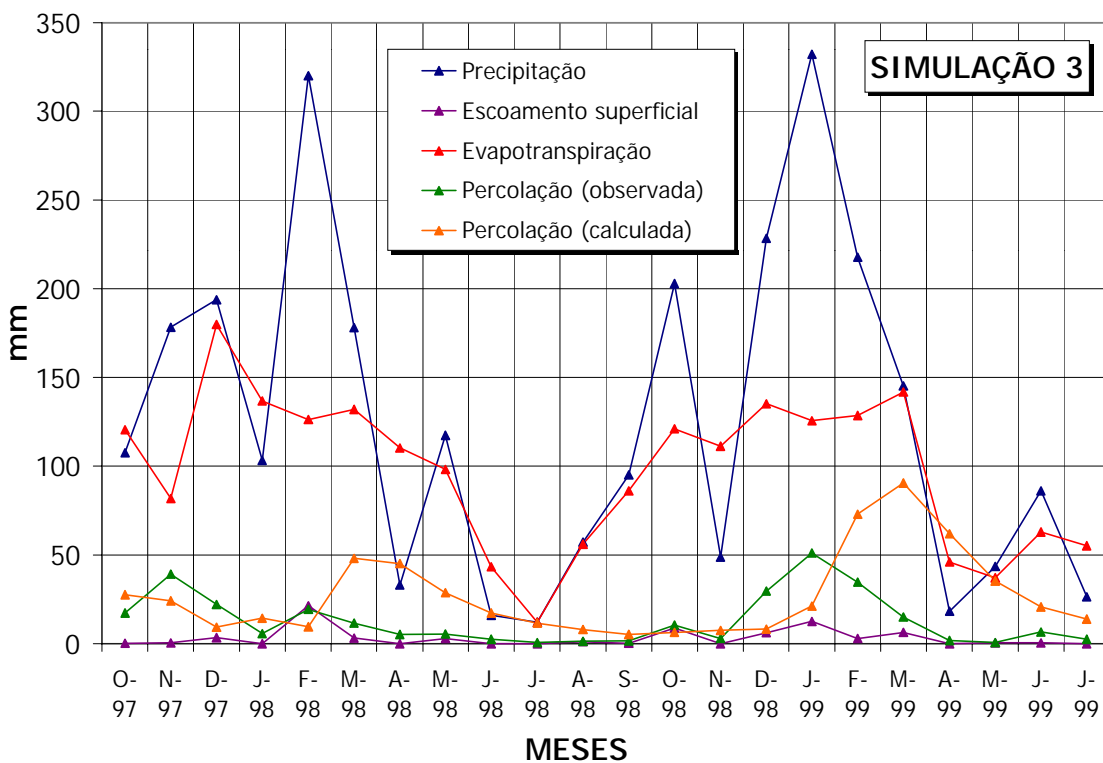


Figura 4.8.8 - Líquidos percolados no aterro experimental (Simulações 3 e 4). Valores observados e calculados pelo programa HELP (período Out/97 a Jul/99).

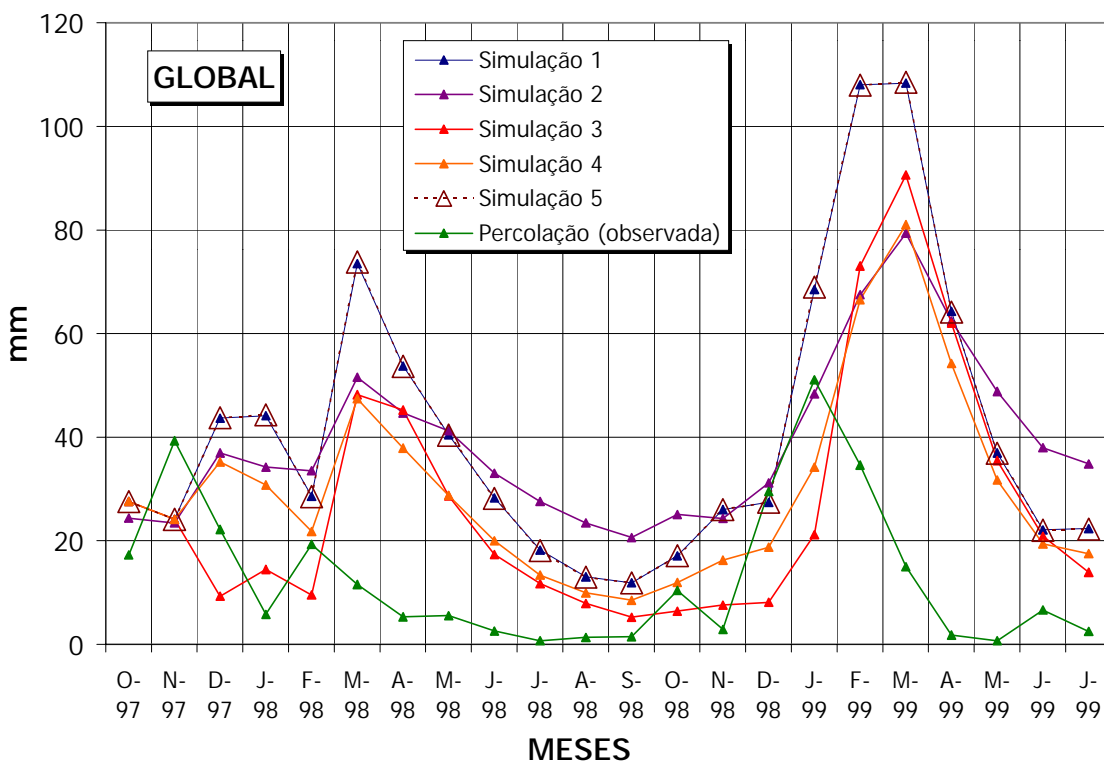
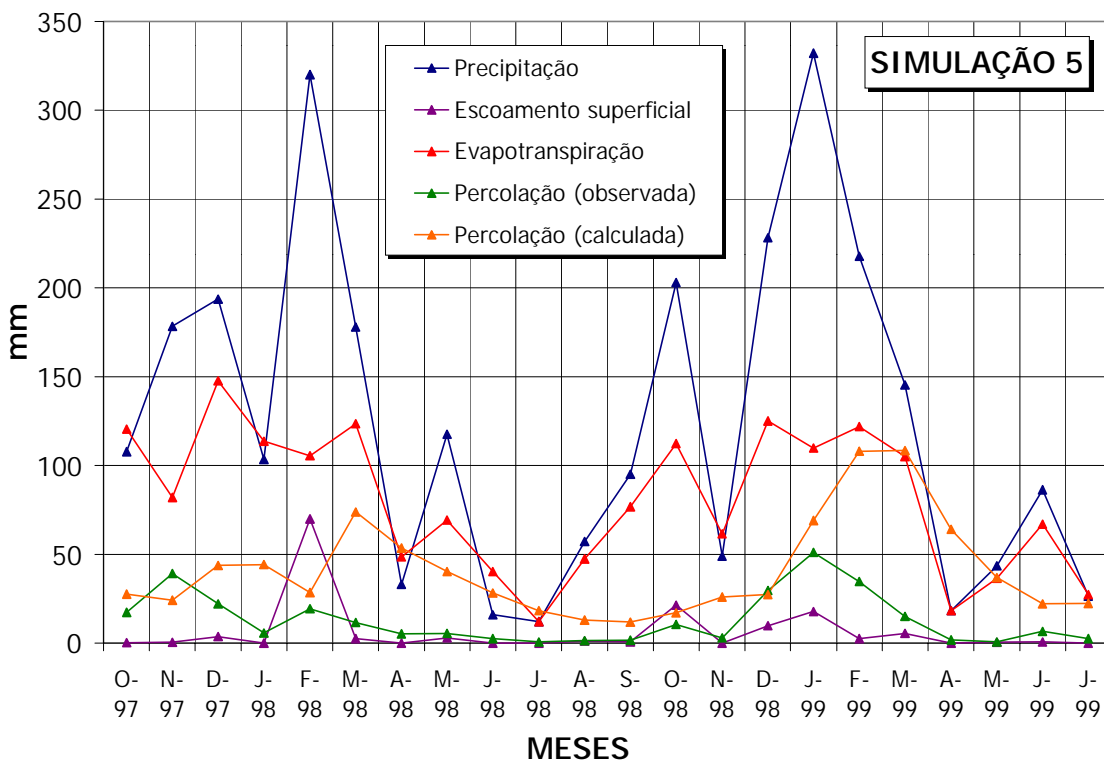


Figura 4.8.9 - Líquidos percolados no aterro experimental (Simulação 5 e global). Valores observados e calculados pelo programa HELP (período Out/97 a Jul/99).

- b) evolução do peso específico com a profundidade: também baseado nos resultados dos ensaios e controles de execução do aterro experimental foi realizada análise estatística para avaliação da relação peso específico vs. profundidade. Apesar de elevada dispersão dos dados e baixos coeficientes de determinação R^2 , procurou-se conceber modelos fisicamente consistentes para reprodução da relação citada. Neste caso, os modelos tiveram por base funções do tipo hiperbólica, tendo sido verificadas distintas respostas do material quando variados os procedimentos construtivos do maciço.

As curvas reproduzidas pelo modelo estatístico desenvolvido devem ser, no entanto, analisadas e utilizadas com cuidado, já que os dados observados não mostraram, de forma patente, uma relação de crescimento do peso específico com a profundidade. Ressalte-se que do ponto de vista metodológico, procurou-se verificar a aderência dos valores medidos com funções matemáticas que reproduzissem fisicamente o conceito de densificação dos resíduos em profundidade. Apesar da inspeção visual no campo, ao longo da execução do experimento, ter indicado certa densificação das camadas subjacentes, os resultados obtidos no trabalho não permitem afirmar que tal tendência de comportamento tenha sido verificada no aterro experimental.

- c) relações tensão vs. deformação para os resíduos compactados: a partir dos registros de compressão e variação das espessuras das camadas ao longo da construção do aterro experimental foi possível estabelecer relações tensão vs. deformação para os materiais. Tais relações incorporam a parcela e o efeito da compressão mecânica primária, assim como aqueles devidos a densificação dos resíduos pelos equipamentos de compactação. À semelhança do estudo anterior, distintas respostas foram observadas para os materiais quando as técnicas construtivas eram modificadas. A partir destas relações foram igualmente avaliadas as relações entre o coeficiente de compressão primária e as tensões verticais atuantes e o coeficiente de compressibilidade volumétrica e as tensões verticais. O conceito de fator de energia, definido pela razão entre o número de passadas do equipamento e a espessura das camadas, foi introduzido, tendo sido observado, para as condições do experimento, deformações diretamente proporcionais ao fator de energia aplicado. No tocante à compressão de longo prazo, observou-se uma relação decrescente entre o coeficiente de compressão secundária e o fator de energia, para os materiais compactados pelo equipamento 816F. Tal coeficiente, por outro lado, mostrou-se insensível à energia aplicada para os materiais compactados pelo trator de esteiras tipo D6. Apesar dos poucos pontos testados, pôde-se antever um efeito benéfico da compactação intensiva, no tocante a antecipação dos recalques futuros do maciço.

d) geração de líquidos percolados: a influência da compactação na qualidade e quantidade dos líquidos percolados foi avaliada, tendo por base os resultados de análises físico-químicas e os registros de vazão dos líquidos percolados no aterro experimental. Os parâmetros físico-químicos apresentaram-se dentro das faixas reportadas na literatura para a fase metanogênica do processo de biodegradação dos resíduos, sendo difícil precisar a influência da compactação na antecipação desta fase. Quanto à geração dos líquidos percolados, constatou-se, através da aplicação do método do balanço hídrico e do programa HELP da USEPA, redução dos volumes produzidos, para todas as simulações e condições de contorno analisadas. Neste caso, apesar das limitações dos métodos citados e da dificuldade de reprodução das condições presentes no experimento, os resultados obtidos constituem forte indicativo do efeito benéfico da compactação no tocante à redução dos líquidos percolados em maciços sanitários.

O efeito do processo de compactação no aumento da vida útil das unidades de disposição, assim como no custo unitário do resíduo aterrado pode ser mostrado de forma simplificada na simulação a seguir descrita, a qual teve por base os resultados obtidos no estudo de compactação. A simulação admitiu as seguintes condições de entrada:

- capacidade total de armazenamento de 1.500.000 m³;
- alturas médias de 14,0m;
- material de cobertura representando 15% do material total aterrado;
- número de dias de operação igual a 300 dias por ano;
- custo total estimado para a unidade: R\$ 24.000.000,00

A Tabela 4.9.1 apresenta os resultados da simulação, em termos da vida útil do aterro sanitário e do custo unitário do resíduo aterrado, para distintos equipamentos de compactação, espessura das camadas lançadas e número de passadas do equipamento, admitindo em todos os casos a compactação em planos horizontais. A situação não compactada corresponde ao resíduo solto, submetido ao simples tráfego dos equipamentos.

A Figura 4.9.1 apresenta a relação entre o número de passadas e a vida útil do maciço para distintas demandas de resíduo e equipamentos de compactação, assumindo espessuras lançadas de 0,3m. A Figura 4.9.2, por sua vez, apresenta a relação entre o número de passadas e o custo unitário do resíduo aterrado, para o compactador 816F e para o trator de esteiras tipo D6D. A análise destas figuras permite observar a influência da densificação dos resíduos, face às distintas técnicas de compactação, no prolongamento da vida útil do aterro. Admitindo uma demanda de 600 toneladas/dia a vida útil da unidade é aumentada de cerca

de 100 para 150 meses, quando o número de passadas é incrementado de 4 para 8, ou seja, um acréscimo da ordem de 50%.

Tabela 4.9.1 – Avaliação do efeito da compactação na vida útil do aterro sanitário e no custo unitário do resíduo aterrado.

Equipamento	Espessura lançada (m)	Passadas	Peso específico (kN/m ³)	Massa (t)	Demandas (t/dia)				Custo unitário (R\$/t)	
					300.0	600.0	1000.0	1200.0		
Compactador 816F	não compactado	0.1	4.900	6.25E+05	83.30	41.65	24.99	20.83	38.42	
		4	13.088	1.67E+06	222.50	111.25	66.75	55.62	14.38	
	0.3	6	14.097	1.80E+06	239.65	119.83	71.90	59.91	13.35	
		8	15.259	1.95E+06	259.40	129.70	77.82	64.85	12.34	
	0.5	4	12.363	1.58E+06	210.17	105.09	63.05	52.54	15.23	
		6	12.901	1.64E+06	219.31	109.66	65.79	54.83	14.59	
	0.7	4	13.476	1.72E+06	229.10	114.55	68.73	57.27	13.97	
		6	12.071	1.54E+06	205.20	102.60	61.56	51.30	15.59	
	Trator de esteiras tipo D6D	não compactado	0.1	4.900	6.25E+05	83.30	41.65	24.99	20.83	38.42
			4	14.027	1.79E+06	238.45	119.23	71.54	59.61	13.42
		0.3	6	14.782	1.88E+06	251.30	125.65	75.39	62.82	12.73
			8	15.563	1.98E+06	264.56	132.28	79.37	66.14	12.10
0.5		4	13.439	1.71E+06	228.46	114.23	68.54	57.11	14.01	
		6	13.878	1.77E+06	235.93	117.97	70.78	58.98	13.56	
0.7		4	14.326	1.83E+06	243.54	121.77	73.06	60.89	13.14	
		6	13.190	1.68E+06	224.24	112.12	67.27	56.06	14.27	
0.7		6	13.501	1.72E+06	229.52	114.76	68.85	57.38	13.94	
		8	13.815	1.76E+06	234.86	117.43	70.46	58.71	13.63	

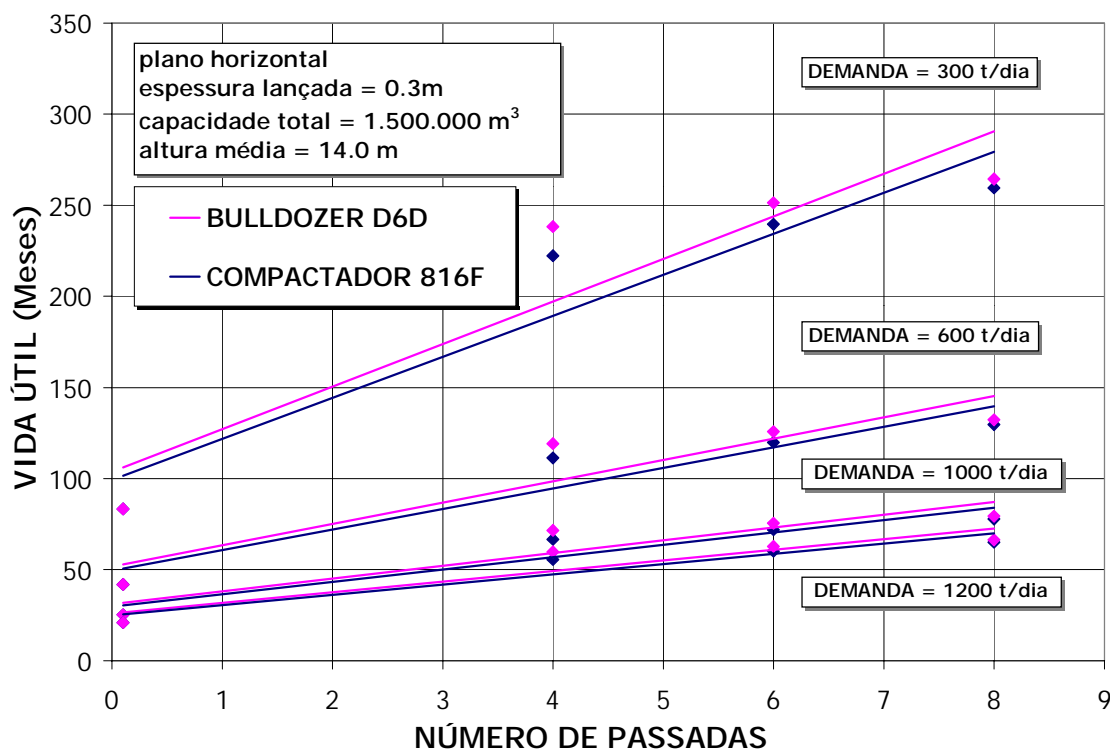


Figura 4.9.1 – Relação entre o tipo e número de passadas do equipamento de compactação e a vida útil do aterro sanitário, para distintas demandas de resíduos.

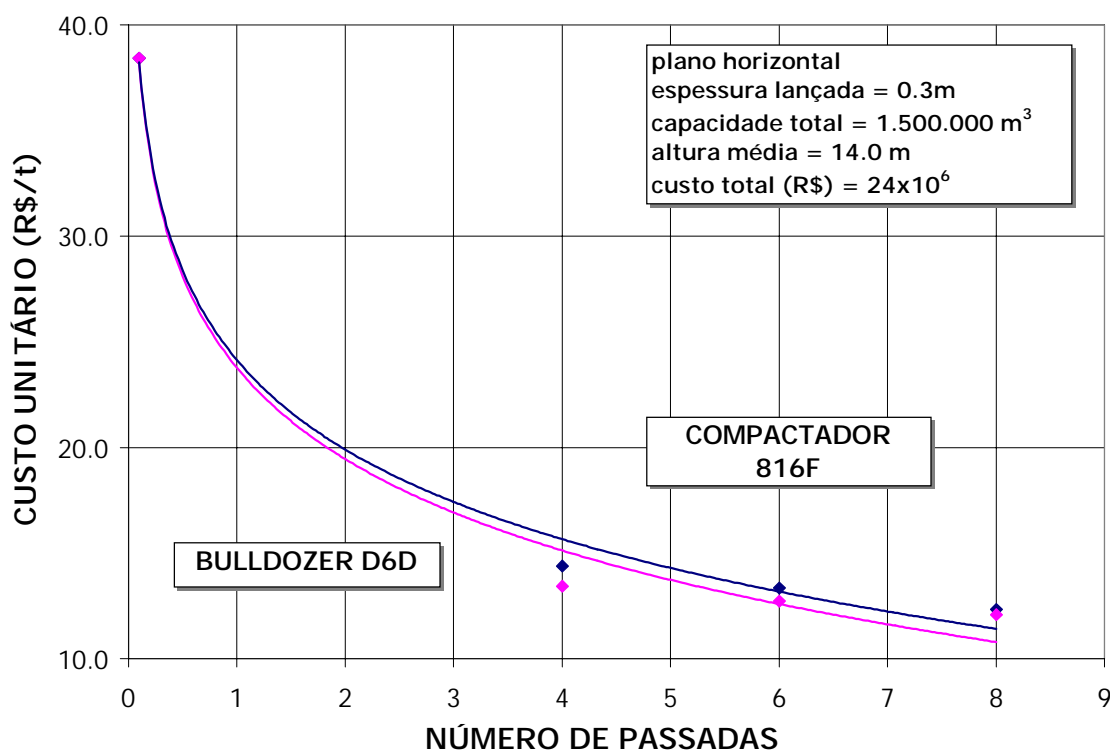


Figura 4.9.2 – Relação entre o tipo e número de passadas do equipamento de compactação e o custo unitário do resíduo aterrado.

Tal efeito é mais pronunciado para pequenas demandas, sendo reduzida a diferença de respostas para os equipamentos analisados. Quanto ao custo unitário a redução é significativa, quando comparadas às situações compactada e não compactada. O aumento de 4 para 8 passadas do equipamento resulta em menor impacto, ou seja, uma redução de cerca de 15% no referido custo. Novamente o efeito obtido para os equipamentos analisados é praticamente semelhante. Apesar das hipóteses simplificadoras adotadas nesta análise, pode-se antever o efeito benéfico que a compactação exerce no custo e operação das atividades de disposição. Tal efeito, aliado a redução dos líquidos percolados, coloca o processo de compactação como um dos elementos de fundamental importância no gerenciamento das questões de disposição e tratamento dos resíduos sólidos urbanos.

