

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**PREVISÃO E MONITORAMENTO DE RECALQUES
EM ATERROS SANITÁRIOS/ ESTUDO DE CASOS:
CENTRAL DE RESÍDUOS DE RECREIO – MINAS
DO LEÃO/RS E SÃO LEOPOLDO/RS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marília Coelho Teixeira

Santa Maria, RS, Brasil

2015

**PREVISÃO E MONITORAMENTO DE RECALQUES EM
ATERROS SANITÁRIOS/ ESTUDO DE CASOS: CENTRAL
DE RESÍDUOS DE RECREIO – MINAS DO LEÃO/RS E
SÃO LEOPOLDO/RS**

Marília Coelho Teixeira

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Ambiental.**

Orientador: Prof. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Teixeira, Marília Coelho

Previsão e monitoramento de recalques em aterros sanitários/ estudo de casos: central de resíduos de recreio - Minas do Leão/RS e São Leopoldo/RS / Marília Coelho Teixeira.-2015.

217 p.; 30cm

Orientador: Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, RS, 2015

1. Resíduos sólidos urbanos 2. Aterro Sanitário 3. Modelos de previsão 4. Recalques I. Pinheiro, Rinaldo José Barbosa II. Título.

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Marília Coelho Teixeira. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: marilia.c.teixeira.2@gmail.com

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

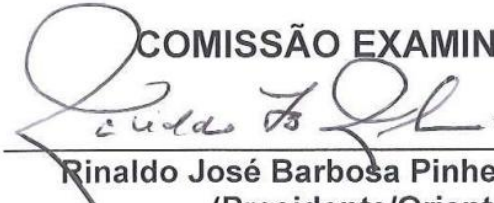
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**PREVISÃO E MONITORAMENTO DE RECALQUES EM ATERROS
SANITÁRIOS/ ESTUDO DE CASOS: CENTRAL DE RESÍDUOS DE
RECREIO – MINAS DO LEÃO/RS E SÃO LEOPOLDO/RS**

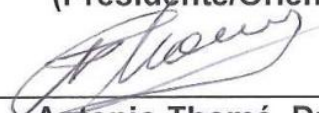
elaborada por
Marília Coelho Teixeira

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Ambiental

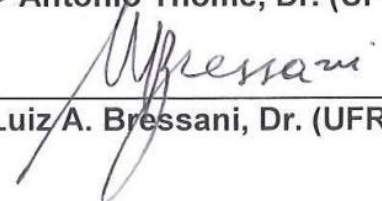
COMISSÃO EXAMINADORA:



Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Antonio Thomé, Dr. (UPF)



Luiz A. Bressani, Dr. (UFRGS)

Santa Maria, 06 de março de 2015.

*Aos meus queridos e
amados pais,
José Cláudio e Lizete,
aos meus irmãos, Cláudia, Laís,
Paula e Bruno, dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio, carinho e paciência neste momento de minha vida.

Ao professor Rinaldo J. B. Pinheiro pelos ensinamentos, apoio e compreensão ao longo do desenvolvimento do trabalho.

À Fundação de Amparo à pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e a CAPES, pela concessão da bolsa de Mestrado.

À empresa Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos que contribuiu no fornecimento dos dados de monitoramento.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria pelos ensinamentos ministrados no curso.

À Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade de realizar o mestrado na área de Engenharia Ambiental.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Universidade Federal de Santa Maria

PREVISÃO E MONITORAMENTO DE RECALQUES EM ATERROS SANITÁRIOS/ ESTUDO DE CASOS: CENTRAL DE RESÍDUOS DE RECREIO – MINAS DO LEÃO/RS E SÃO LEOPOLDO/RS

AUTORA: MARÍLIA COELHO TEIXEIRA

ORIENTADOR: RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 06 de março de 2015.

O resultado do crescimento populacional e seu grande consumo causam o aumento na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) que se tornam um problema ambiental na disposição final destes resíduos, ou seja, podem causar contaminação no solo, nas águas superficiais e subterrâneas, quando dispostos inadequadamente no solo, como nos lixões a céu aberto. Sendo assim, a solução mais adequada técnica, econômica e ambientalmente segura é a disposição em aterros sanitários. Um dos grandes problemas dos aterros sanitários são os valores elevados de deslocamentos verticais (recalques) e horizontais, pois os resíduos são muito compressíveis e sofrem degradação com o tempo e conseqüentemente podem ocasionar danos nos sistemas estruturais dos aterros sanitários (sistemas de cobertura e impermeabilização, drenagem superficial e de efluentes). O presente trabalho tem como objetivo avaliar os recalques de dois aterros sanitários com medidas de deslocamento por meio de marcos superficiais, verificando a eficiência de alguns modelos de previsão de recalques em aterros sanitários de RSU existentes na literatura. A avaliação foi realizada nos aterros sanitários de São Leopoldo e de Minas do Leão, comparando os recalques medidos com os previstos e ajustar os modelos utilizados com base nos dados do monitoramento já realizado nos aterros no período de cinco anos. Os modelos de previsão de recalques que foram utilizados são: modelo de Yen e Scanlon (1975), Exponencial de *creep* (Potência) de Edil et al. (1990), Bjarngard e Edgers (1990), Reológico de Gibson e Lo (1961), Gandolla et al. (1992), Hiperbólico de Ling et al. (1998), Meruelo e o método observacional de Asaoka (1978). Os recalques observados, no aterro de Minas do Leão, variaram entre 0,55 a 4,0m, correspondendo a uma deformação entre 4 e 24% em relação à altura inicial dos resíduos. E, quanto ao aterro de São Leopoldo, os recalques observados, na célula Aterro Remediado, variaram entre 0,1 e 1,03m, correspondendo a uma deformação entre 1 e 5,8% em relação à altura inicial dos resíduos. E na célula Aterro Fase I, os recalques observados variaram entre 0,5 e 2,4m, correspondendo a deformações entre 8 e 16,5% da altura inicial de resíduos. Os valores encontrados estão dentro da faixa de valores encontrada na literatura, exceto os valores de deformação do aterro Remediado que foram abaixo da faixa de valores da literatura. A partir das análises realizadas neste trabalho, foi possível verificar que os modelos mais adequados para a previsão de recalques nos dois aterros sanitários analisados foram os modelos Hiperbólico (1998), Exponencial de *creep* (Potência), Bjarngard e Edgers (1990), Meruelo e o Gibson e Lo (1961), que obtiveram boa aderência entre os valores medidos e previstos. Destaca-se que o método de Asaoka (1978) é muito interessante para o acompanhamento de recalques e verificar a estabilização e previsão do recalque final.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos. Aterro sanitário. Modelos de previsão. Recalques.

ABSTRACT

Master's Degree Dissertation
Environmental Engineering Post Graduate Program
Federal University of Santa Maria

FORECAST AND MONITORING OF SETTLEMENT IN LANDFILLS/ CASES STUDY: CENTRAL OF RECREATION'S WASTE – MINAS DO LEÃO/RS AND SÃO LEOPOLDO/RS

WRITTER: MARÍLIA COELHO TEIXEIRA

LEADER: RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO

Date and local of the defense: Santa Maria, March 06th, 2015.

The population growth's results and their great consumption caused the increase in the generation of municipal solid waste that become an environmental problem in the final disposition of these waste, in other words, they can cause contamination of the soil, of the superficial and underground waters, when disposed improperly in the soil, as in big garbage in the open sky. Therefore, the most adequate technical, economic and environmentally safe solution is the disposal in sanitary embankments. One of the greatest problems of the landfills are the elevated values of the vertical and horizontal shifts (settlements), because the waste are more compressible and suffer time degradation and consequently may cause damage in the structural systems of the sanitary embankments (coverage and waterproofing systems, superficial drainage and effluents). This article has the objective of evaluate the settlements of two landfills with measures of shifts by superficial landmarks, verifying the efficiency of some prevision's models of settlements in landfills of municipal solid waste existing in the literature. The evaluation was made in the São Leopoldo and Minas do Leão's landfills, comparing the settlements measured with the provided and adjust the models used basing in the monitoring data already made in the landfills in a five years period. The prevision's models of settlements that were used are: Yen and Scanlon (1975), Exponential of creep of Edil et al. (1990), Bjarngard and Edgers (1990), Rheological of Gibson and Lo (1961), Gandolla et al. (1992), Hyperbolic of Ling et al. (1998), Meruelo and the observational method of Asaoka's (1978) models. The repressions observed, at Minas do Leão's landfill, varied between 0,55 to 4,0 meters, corresponding a deformation between 4 and 24% related to the initial height of the settlement. And, about the São Leopoldo's landfill, the observed settlement, in the Remedied Landfill cell, varied between 0,1 and 1,03 meters, corresponding with a deformation between 1 and 5,8% related to the initial height of the settlement. And in the Phase I Landfill, the observed settlement varied between 0,5 and 2,4 meters, corresponding with a deformation between 8 and 16,5% of the initial height of the settlement. The values found are inside of the values zone found in the literature, except the values of the deformation of the Remedied landfill which were below of the values zone of the literature. From the analysis made in this article, it was possible to verify that the most adequate models to settlement prevision in both landfills analyzed was the Hyperbolic (1998), Exponential of creep, Bjarngard and Edgers (1990), Meruelo and the Gibson and Lo (1961) models, that obtained good adherence between the values measured and provided. Stands out that the Asaoka's (1978) method is very interesting for the accompaniment of the settlement and to verify the stabilization and the forecast of the final settlement.

Key-words: Municipal solid waste. Landfill. Forecast models. Settlement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxo dos resíduos sólidos.....	33
Figura 2.2 – Métodos de aterramento de resíduos sólidos urbanos.....	35
Figura 2.3 – Destinação final de RSU (t/dia).	37
Figura 2.4 – Aterro sanitário em diversas fases e seus sistemas.....	40
Figura 2.5 - Estágios de tempo-recalque típicos para um aterro de resíduos sólidos.	52
Figura 2.6 – Definição da idade média do aterro (t_1).....	55
Figura 2.7 – Modelo hiperbólico aplicado ao aterro sanitário Meruelo.	57
Figura 2.8 – Características dos recalques em aterros de RSU.	59
Figura 2.9 – Aplicação do método observacional.....	65
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da metodologia realizada no trabalho.	69
Figura 3.2 – Mapa de localização do aterro sanitário do município de Minas do Leão/RS.	71
Figura 3.3 – Infraestrutura da área de estudo em Minas do Leão/RS.....	72
Figura 3.4 – Vista geral da área da Central de Resíduos de Recreio de Minas do Leão/RS.	74
Figura 3.5 – Corte transversal das camadas de impermeabilização e proteção do solo.....	74
Figura 3.6 – Vista geral da instalação da geomembrana PEAD sobre a camada de argila compactada.	75
Figura 3.7 – Mapa de localização do Aterro Sanitário do município de São Leopoldo/RS.	77
Figura 3.8 – Célula do aterro emergencial fase II de São Leopoldo em estágio inicial.	78
Figura 3.9 – Célula do aterro emergencial fase II de São Leopoldo em estágio final.....	79
Figura 3.10 –Vista aérea do aterro sanitário de São Leopoldo – RS.	79
Figura 3.11 –Vista das células do aterro sanitário de São Leopoldo – RS.....	80
Figura 3.12 –Vista aérea do Aterro Sanitário de São Leopoldo.	82
Figura 3.13 –Vista do Aterro Remediado de São Leopoldo encerrado.	83
Figura 3.14 –Vista de cima do Aterro Emergencial Fase II de São Leopoldo encerrado.....	83
Figura 3.15 –Vista lateral do Aterro Emergencial Fase II de São Leopoldo encerrado.....	84
Figura 3.16 –Vista aproximada do Aterro Emergencial Fase I de São Leopoldo encerrado.....	84
Figura 3.17 –Vista de cima do Aterro Emergencial Fase I de São Leopoldo encerrado.....	85
Figura 3.18 –Vista lateral do Aterro E. Fase I de São Leopoldo encerrado.	85

Figura 3.19 –Vista lateral do Aterro E. Fase I de São Leopoldo encerrado com o marco superficial P11.	86
Figura 3.20 –Fluxograma das etapas do monitoramento realizado nos dois aterros sanitários estudados.....	87
Figura 3.21 –Planta com a situação dos marcos superficiais, em referência às Áreas 1 e 2 do aterro CRR de Minas do Leão.	89
Figura 3.22 –Seções com a topografia do ano de 2010 do aterro sanitário CRR de Minas do Leão – RS.	90
Figura 3.23 –(a) Marco topográfico MT20; (b) Equipamento utilizado na leitura dos marcos; (c) Colaborador da empresa realizando a leitura.	91
Figura 3.24 –Planta com a distribuição dos marcos superficiais na área do aterro sanitário de São Leopoldo.	93
Figura 3.25 –Área ampliada do Aterro Remediado de São Leopoldo.....	94
Figura 3.26 –Área ampliada do Aterro Fase I de São Leopoldo.....	95
Figura 4.1 – Planta da topografia de fundo da Área 1 do aterro CRR de Minas do Leão.....	102
Figura 4.2 – Deslocamento horizontal dos marcos MT16 e MT21 do aterro CRR de Minas do Leão.	103
Figura 4.3 – Deslocamento horizontal dos marcos MDM03 e MDM05 da célula do Aterro Remediado de São Leopoldo.....	105
Figura 4.4 – Deslocamento horizontal para os marcos MDM 14, MDM15 e MDM16 da célula do Aterro Fase I de São Leopoldo.	106
Figura 4.5 – Curva recalque medido vs. tempo para os 10 marcos analisados do aterro CRR de Minas do Leão.	108
Figura 4.6 – Curva deformação medida vs. log do tempo para os 10 marcos analisados do aterro CRR de Minas do Leão.	108
Figura 4.7 – Taxas de recalque medidas para os 10 marcos superficiais analisados do aterro CRR de Minas do Leão.	109
Figura 4.8 – Curvas recalque medido versus tempo para os marcos superficiais analisados da célula do Aterro Remediado de São Leopoldo.	110
Figura 4.9 – Curvas deformação medida versus log. do tempo para os marcos analisados da célula do Aterro Remediado de São Leopoldo.	110
Figura 4.10 –Taxas de recalque medidas para os marcos superficiais analisados da célula do Aterro Remediado de São Leopoldo.	111
Figura 4.11 –Curvas recalque medido versus tempo para os marcos analisados na célula do Aterro Fase I de São Leopoldo.....	112
Figura 4.12 –Curvas deformação medida versus log. do tempo para os marcos analisados na célula do Aterro Fase I de São Leopoldo.....	112
Figura 4.13 –Taxas de recalque versus tempo para os marcos analisados na célula do Aterro Fase I de São Leopoldo.....	113
Figura 4.14 –(a) Relação taxa de recalque versus log do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto versus tempo, com base no modelo de Yen e Scanlon (1975) para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.....	116

Figura 4.15 –(a) Relação taxa de recalque versus log do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto versus tempo, com base no modelo de Yen e Scanlon (1975) para marcos do aterro CRR de Minas do Leão.	117
Figura 4.16 –(a) Relação taxa de recalque versus log. do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto versus tempo pelo modelo Yen e Scanlon para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.....	118
Figura 4.17 –(a) Relação taxa de recalque versus log. do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto versus tempo pelo modelo Yen e Scanlon para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.....	119
Figura 4.18 –(a) Relação taxa de recalque versus log. do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto versus tempo pelo modelo Yen e Scanlon para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	120
Figura 4.19 –(a) Relação taxa de recalque versus log. do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto versus tempo pelo modelo Yen e Scanlon para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	121
Figura 4.20 –Relação recalque medido versus tempo, com base em função logarítmica simples para os 10 marcos superficiais do aterro CRR de Minas do Leão.....	123
Figura 4.21 –Relação recalque medido e previsto versus tempo, com base na função logarítmica simples para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.	124
Figura 4.22 –Relação recalque medido e previsto versus tempo, com base na função logarítmica simples para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	125
Figura 4.23 –Correlação entre os valores de recalques medidos e calculados para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão, com base no Modelo Yen e Scanlon (1975).....	126
Figura 4.24 –Correlação entre recalques medidos e previstos para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo, com base no modelo de Yen e Scanlon (1975).....	127
Figura 4.25 –Correlação entre os recalques medidos e previstos para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo, com base no modelo de Yen e Scanlon (1975).....	128
Figura 4.26 –Correlação entre os valores de recalques medidos e calculados para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão, com base na Função Logarítmica Simples.....	129
Figura 4.27 –Correlação entre os recalque medidos e calculados para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo, com base na Função Logarítmica Simples.....	130
Figura 4.28 –Correlação entre os recalques medidos e previstos para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo, com base na Função Logarítmica Simples.	131

Figura 4.29 –(a) Regressão linear para determinação da taxa de deformação inicial e deformação última; (b) Curvas de deformação versus log. do tempo para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão, com base no modelo Hiperbólico.	135
Figura 4.30 –(a) Regressão linear para determinar da taxa de deformação inicial e deformação última; (b) Curvas de deformação versus log. do tempo para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão, com base no modelo Hiperbólico.	136
Figura 4.31 –(a) Regressão linear para determinação da taxa de deformação inicial e deformação última; (b) Curvas de deformação medida e prevista versus log. do tempo pelo modelo Hiperbólico para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.	137
Figura 4.32 –(a) Regressão linear para determinação da taxa de deformação inicial e deformação última; (b) Curvas de deformação medida e prevista versus log. do tempo pelo modelo Hiperbólico para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.	138
Figura 4.33 –(a) Regressão linear para determinação da taxa de deformação inicial e deformação última; (b) Curvas de deformação medida e prevista versus log. do tempo pelo modelo Hiperbólico para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	139
Figura 4.34 –(a) Regressão linear para determinação da taxa de deformação inicial e deformação última; (b) Curvas de deformação medida e prevista versus log. do tempo pelo modelo Hiperbólico para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	140
Figura 4.35 –Comparação entre a deformação medida e calculada para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão, com base no Modelo Hiperbólico.	142
Figura 4.36 –Correlação entre deformação medida e calculada pelo modelo Hiperbólico para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.	143
Figura 4.37 –Correlação entre deformação medida e calculada pelo modelo Hiperbólico para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	144
Figura 4.38 –Curvas deformação versus log. do tempo para os valores medidos e previstos a partir do modelo baseado em função de potência para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.	148
Figura 4.39 –Curvas de deformação versus log. do tempo do modelo de Potência para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.	149
Figura 4.40 –Curvas de deformação versus log. do tempo do modelo de Potência para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	150
Figura 4.41 –Correlação entre os valores de deformação medida e calculada do Modelo de Potência para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.	151
Figura 4.42 –Correlação entre a deformação medida e calculada pelo Modelo de Potência para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo. ...	152

Figura 4.43 –Correlação entre a deformação medida e calculada para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	153
Figura 4.44 –Curvas recalques versus log. do tempo para valores medidos e previstos pelo Modelo Bjargand e Edgers (1990) para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.....	157
Figura 4.45 –Curvas recalque medido e previsto versus log. do tempo pelo modelo Bjarngard e Edgers (1990) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.....	158
Figura 4.46 –Curvas recalque medido e previsto versus log. do tempo pelo modelo Bjarngard e Edgers (1990) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	159
Figura 4.47 –Correlação entre a deformação medida e calculada pelo Modelo Bjarngard e Edgers (1990) para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.	160
Figura 4.48 –Correlação entre a deformação medida e calculada pelo modelo Bjarngard e Edgers (1990) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.	161
Figura 4.49 –Correlação entre a deformação medida e calculada pelo modelo Bjarngard e Edgers (1990) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	162
Figura 4.50 –Curvas recalque versus tempo para os valores medidos e previstos do Modelo de Meruelo para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.	166
Figura 4.51 –Curvas recalque medido e previsto versus tempo pelo Modelo de Meruelo para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.....	167
Figura 4.52 –Curvas recalque medido e previsto versus tempo pelo Modelo de Meruelo para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	168
Figura 4.53 –Correlação entre os valores de recalques medidos e calculados pelo Modelo de Meruelo para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.	169
Figura 4.54 –Correlação entre o recalque medido e calculado pelo modelo de Meruelo para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.....	170
Figura 4.55 –Correlação entre recalque medido e calculado pelo Modelo de Meruelo para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	171
Figura 4.56 –Curvas recalque versus tempo para valores medidos e estimados pelo Modelo de Gibson e Lo para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.....	174
Figura 4.57 –Curvas recalque medido e previsto versus tempo pelo Modelo de Gibson e Lo (1961) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.	175
Figura 4.58 –Curvas recalque medido e previsto versus tempo pelo Modelo Gibson e Lo (1961) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	176

Figura 4.59 –Correlação entre os recalques medidos e calculados para o Modelo de Gibson e Lo para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão. ..	177
Figura 4.60 –Correlação entre recalque medido e calculado pelo Modelo Gibson e Lo (1961) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo...	178
Figura 4.61 –Correlação entre recalque medido e calculado pelo Modelo de Gibson e Lo (1961) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.....	179
Figura 4.62 –Curvas recalque versus log. do tempo pelo Modelo Gandolla et al. (1992) para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.	182
Figura 4.63 –Curvas recalques versus log. do tempo pelo Modelo Gandolla et al.(1992) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo....	183
Figura 4.64 –Curvas recalque versus log. do tempo pelo Modelo Gandolla et al. (1992) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	184
Figura 4.65 –Correlação entre recalque medido e calculado pelo Modelo Gandolla et al. (1992) para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.....	186
Figura 4.66 –Correlação entre os recalques medidos e calculados pelo Modelo Gandolla (1992) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.....	187
Figura 4.67 –Correlação entre recalque medido e calculado pelo Modelo Gandolla (1992) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.	188
Figura 4.68 –Resultados gráficos obtidos pela aplicação do método observacional de Asaoka para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.....	191
Figura 4.69 –Resultado gráfico obtido pela utilização do método Asaoka para o marco MT16 do aterro CRR de Minas do Leão. (a) dados até o ano de 2008; (b) dados até o ano de 2009; (c) dados até o anos de 2010; e (d) dados até o ano de 2012.....	192
Figura 4.70 –Resultados gráficos obtidos pela aplicação do Método Observacional de Asaoka para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.....	194
Figura 4.71 –Resultados gráficos obtidos pela aplicação do Método Observacional Asaoka (1978) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.....	196
Figura 4.72 –Resultados gráficos obtidos pela aplicação do Método Observacional de Asaoka para o marco MDM09 do aterro Fase I de São Leopoldo; (a) Dados até 2006; (b) Dados até 2007; (c) Dados até 2008; (d) Dados até 2009; (e) Dados até 2010; e (f) Dados até 2011.....	197
Figura 4.73 –Resultados gráficos obtidos pela aplicação do Método Observacional de Asaoka para o marco MDM 10 do aterro Fase I de São Leopoldo; (a) Dados até 2006; (b) Dados até 2007; (c) Dados até 2008; (d) Dados até 2009; (e) Dados até 2010; e (f) Dados até 2011.....	198

Figura 4.74 –Resultados gráficos obtidos pela aplicação do Método Observacional de Asaoka para o marco MDM 11do aterro Fase I de São Leopoldo; (a) Dados até 2006; (b) Dados até 2007; (c) Dados até 2008; (d) Dados até 2009; (e) Dados até 2010; e (f) Dados até 2011.	199
Figura 4.75 –Relação entre a taxa de deformação inicial (ρ_0), a deformação última (ϵ_{ult}) e altura do maciço de resíduos a partir do modelo Hiperbólico (Ling et al.,1998).	202
Figura 4.76 –Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo (m e n) baseado em funções de potência (Edil et al.,1990) e a altura do maciço de resíduos.	203
Figura 4.77 –Relação entre os coeficientes de compressão secundária intermediária e de longo prazo ($C_{\alpha 1}, C_{\alpha 2}$) a partir do modelo Bjarngard e Edgers (1990) e a altura do maciço de resíduos.	205
Figura 4.78 –Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo de Gibson e Lo (1961) e a altura do maciço de resíduos.....	206
Figura 4.79 –Relação entre os coeficientes (α e Kh) do modelo de Meruelo e a altura do maciço de resíduos.	208

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Quantidade de RSU Gerado.	36
Tabela 2.2 – Quantidade de Municípios por Tipo de Destinação Adotada no ano de 2012.	37
Tabela 2.3 – Quantidade de Municípios por Tipo de Destinação Adotada no ano de 2013.	38
Tabela 2.4 – Pesos específicos de resíduos sólidos urbanos.	43
Tabela 2.5 – Teor de umidade dos diversos componentes dos RSU.	46
Tabela 2.6 – Recalques em maciços sanitários.	50
Tabela 3.1 – Resumo das cotas, deslocamentos verticais e horizontais dos 10 marcos superficiais.	91
Tabela 3.2 – Recalque dos 9 marcos do Aterro Emergencial Fase I do monitoramento inicial e final.	96
Tabela 3.3 – Recalque dos 8 marcos do Aterro Remediado do monitoramento inicial e final.	96
Tabela 4.1 – Resumos dos parâmetros analisados dos 10 marcos superficiais do aterro CRR de Minas do Leão.	103
Tabela 4.2 – Resumo dos parâmetros analisados para os 8 marcos superficiais da célula do Aterro Remediado de São Leopoldo.	104
Tabela 4.3 – Resumo dos parâmetros analisados para os 9 marcos superficiais da célula do Aterro Fase I de São Leopoldo.	104
Tabela 4.4 – Parâmetros obtidos do modelo logaritmo Yen e Scanlon (1975) e a função logarítmica simples.	115
Tabela 4.5 – Parâmetros obtidos do modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998).	134
Tabela 4.6 – Resultados obtidos do Modelo exponencial de <i>creep</i> (Potência).	146
Tabela 4.7 – Resultados obtidos pela aplicação do Modelo Bjarngard e Edgers (1990).	156
Tabela 4.8 – Resultados obtidos pela estimativa de recalques com o Modelo de Meruelo.	164
Tabela 4.9 – Resultados obtidos pela aplicação do Modelo de Gibson e Lo (1961).	173
Tabela 4.10 – Resultados obtidos dos parâmetros pela aplicação do Modelo de Gandolla et al. (1992).	181
Tabela 4.11 – Resultados analíticos obtidos pela utilização do método observacional Asaoka para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.	190
Tabela 4.12 – Resultados analíticos obtidos pela utilização do método Asoka para o marco MT16 do aterro CRR de Minas do Leão.	190
Tabela 4.13 – Resultados analíticos pela aplicação do Modelo Observacional de Asaoka (1978) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.	193

Tabela 4.14 –Resultados analíticos obtidos pela aplicação do Método Observacional de Asaoka (1978) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.....	195
Tabela 4.15 –Resultados analíticos obtidos pela aplicação do Método Observacional de Asaoka (1978) para os marcos MDM09, MDM10 e MDM11 do Aterro Fase I de São Leopoldo.....	195

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 Objetivo geral	28
1.2 Objetivos específicos	28
1.3 Estrutura da dissertação	29
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1 Resíduos sólidos urbanos (RSU)	31
2.2 Aterros sanitários	34
2.2.1 Instalação de um aterro sanitário.....	38
2.2.2 Operação de um aterro sanitário	41
2.3 Propriedades geotécnicas	46
2.3.1 Permeabilidade	47
2.3.2 Resistência ao cisalhamento	48
2.3.3 Compactação.....	48
2.3.4 Compressibilidade e previsão de recalques	49
2.4 Mecanismos responsáveis pelos recalques em aterros sanitários.....	50
2.5 Modelos de previsão de recalques.....	53
2.5.1 Modelo de Sowers (1973).....	53
2.5.2 Modelo de Yen e Scanlon (1975).....	54
2.5.3 Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998)	56
2.5.4 Modelo exponencial de <i>creep</i> (Potência) de Edil et al. (1990).....	57
2.5.5 Modelo de Bjarngard e Edgers (1990)	58
2.5.6 Modelo de Meruelo	60
2.5.7 Modelo de Gibson e Lo (1961)	62
2.5.8 Modelo de Gandolla et al. (1992).....	63
2.5.9 Modelo Observacional – Asaoka (1978).....	64
2.5.10 Outros modelos de previsão de recalques.....	65
2.6 Considerações finais	67
3 MATERIAL E MÉTODOS	69
3.1 Áreas de estudo	69
3.1.1 Central de Resíduos do Recreio do município de Minas do Leão – RS	70
3.1.2 Aterro sanitário de São Leopoldo (área antiga)	76

3.2 Investigação e monitoramento de campo	86
3.2.1 Área da Central de Resíduos do Recreio do município de Minas do Leão – RS	88
3.2.2 Área do aterro sanitário de São Leopoldo (área antiga).....	92
3.3 Modelos de previsão de recalques	97
3.4 Análise e comparação dos resultados	97
4 ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	101
4.1 Resultados gerais.....	101
4.2 Modelos de previsão de recalques	113
4.2.1 Modelo de Yen e Scanlon (1975).....	113
4.2.2 Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998).....	132
4.2.3 Modelo exponencial de <i>creep</i> (Potência) de Edil et al. (1990)	145
4.2.4 Modelo de Bjarngard e Edgers (1990)	154
4.2.5 Modelo de Meruelo.....	163
4.2.6 Modelo de Gibson e Lo (1961).....	172
4.2.7 Modelo de Gandolla et al. (1992)	180
4.2.8 Modelo Observacional – Asaoka (1978)	189
4.3 Comparação dos resultados obtidos com valores da literatura	200
5 CONCLUSÕES	209
REFERÊNCIAS	212

1 INTRODUÇÃO

A industrialização, o crescimento populacional e seu crescente consumo ocasionam o aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), estes resíduos quando depositados inadequadamente no meio ambiente, se tornam um grande problema ambiental, devido à contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas e até mesmo do ar.

Dentre as formas de eliminarem e/ou minimizarem os resíduos sólidos está a reciclagem de materiais, a compostagem da matéria orgânica e a incineração. Entretanto, grande parte dos resíduos sólidos contém restos que não podem ser eliminados, sendo necessária a disposição em aterro sanitário.

Os aterros sanitários são considerados uma das técnicas de disposição de resíduos em solo mais utilizadas no mundo, por serem tecnicamente confiáveis e seguras, economicamente viáveis e ambientalmente corretas. Porém, um dos grandes problemas dos aterros sanitários são os valores elevados de deslocamentos verticais (recalques) e horizontais, pois os resíduos são muito compressíveis e sofrem degradação com o tempo e conseqüentemente podem ocasionar danos nos sistemas estruturais dos aterros sanitários, como os sistemas de cobertura e impermeabilização, drenagem superficial e de efluentes.

A estimativa dos recalques e seu acompanhamento em aterros sanitários são de fundamental importância, ou seja, o conhecimento dos recalques permite, por exemplo, a determinação da real capacidade de armazenamento do aterro, pois quando ocorre recalque o volume diminui e a capacidade de armazenar aumenta; determinação da vida útil do aterro sanitário, fator importante para a gestão de resíduos sólidos; desenvolvimento de estudos para o reaproveitamento do local após o fechamento do aterro; monitoramento geotécnico pelo acompanhamento do recalque e de sua velocidade, que pode avaliar a estabilidade geotécnica dos taludes; e o desempenho da cobertura final, pois esta pode ser prejudicada por trincas oriundas dos recalques diferenciais, que conseqüentemente aumenta a infiltração da água da chuva, podendo comprometer a estabilidade do aterro.

Os modelos de previsão de recalques são uma das ferramentas utilizadas para a estimativa de recalques futuros em aterros sanitários. A partir destes modelos

e dos dados históricos de recalques pode-se identificar o comportamento dos mesmos e verificar, por exemplo, a real capacidade de armazenamento do aterro, entre outros fatores já mencionados. Muitos pesquisadores, como Sowers (1973), Yen e Scanlon (1975), Ling et al. (1998), entre outros, têm propostos modelos de previsão de recalques em aterros sanitários considerando suas diferentes características. Estes modelos podem ser agrupados em modelos baseados na mecânica dos solos; modelos empíricos; modelos reológicos; e modelos sob influência da biodegradação.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar os recalques de dois aterros sanitários com medidas de marcos superficiais (5 anos de monitoramento), verificando a eficiência de alguns modelos de previsão de recalques em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Realizar uma revisão da literatura técnica nacional e internacional sobre os mecanismos de recalque, a compressibilidade e os modelos de previsão de recalques de resíduos sólidos urbanos (RSU);
- b) Aplicar modelos de previsão de recalques selecionados para a previsão dos recalques nos aterros sanitários, prevendo sua vida útil;
- c) Comparar os recalques reais medidos com as previsões de recalque e ajustar os modelos utilizados com base nos dados do monitoramento.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação está distribuída em 5 capítulos. O capítulo 1, a Introdução, aborda a problemática dos resíduos sólidos urbanos e sua disposição final em aterros sanitários, inserindo-a em um contexto ambiental e geotécnico, e sua justificativa perante a necessidade do aprofundamento da pesquisa e os objetivos do trabalho.

O capítulo 2, a Revisão Bibliográfica, aborda o tema principal do trabalho englobando os conceitos básicos, propriedades e estudos sobre os resíduos sólidos urbanos e seu comportamento em aterros sanitários. Neste sentido, são descritos alguns conceitos e aspectos relacionados à disposição de RSU e ao comportamento dos aterros sanitários, sendo abordados os mecanismos que influenciam os recalques que ocorrem nestes aterros, e as formas de prever estes recalques.

O capítulo 3, Material e Métodos, descreve as características das áreas de estudo, suas localizações, procedimentos operacionais entre outras. E descreve também a metodologia apresentada neste trabalho, por meio de procedimentos e formas utilizadas nas análises dos dados levantados.

O capítulo 4, Análise e Apresentação dos Resultados, estão apresentados os resultados obtidos e analisados a partir dos modelos de previsão propostos pela metodologia do trabalho para a previsão de recalques, com base nos dados do monitoramento realizado nos aterros sanitários estudados. E por fim, no capítulo 5, a Conclusão, são apresentadas as principais conclusões feitas a partir dos resultados obtidos pela pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os principais temas que compreendem a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU), desde as definições, disposição final em aterros sanitários e sua operação e, por fim, os fatores que influenciam na disposição destes resíduos e na previsão de recalques futuros em aterros.

2.1 Resíduos sólidos urbanos (RSU)

Resíduo pode ser definido como qualquer matéria que é descartada ou abandonada ao longo de atividades industriais, comerciais, domésticas ou outras; ou ainda, como produtos secundários para os quais não há demanda econômica e para os quais é necessária disposição.

Segundo a NBR 10004 (2004) resíduos sólidos são todos aqueles resíduos nos estados sólidos e semissólidos proveniente de atividades da comunidade, de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Estes resíduos sólidos são classificados em duas classes: classe I - perigosos; classe II - não perigosos, sendo dividida em classe II A - não inertes, e classe II B – inertes.

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são considerados todos aqueles resíduos provenientes de atividade urbanas, sendo os resíduos sólidos domiciliares, das atividades domésticas; resíduos sólidos comerciais, dos estabelecimentos comerciais público e privados, como bares, restaurantes e similares; e resíduos sólidos de limpeza pública, resíduos provenientes da limpeza de ruas, parques, praças, avenidas, e demais locais públicos (BOSCOV, 2008).

Conforme Machado et al. (2008) definem, os RSU como materiais heterogêneos de diferentes tipos e dimensões, e possuem elementos que se degradam com o tempo.

Portanto, resíduos sólidos urbanos são uma mistura de resíduos de origem, principalmente, comercial e residencial. Normalmente, são compostos de resíduos alimentares e de jardim, produtos de papel, plásticos, borracha, têxteis, madeira,

cinzas e solos (ambos os produtos e materiais utilizados como material de cobertura de resíduos). Possuem uma vasta gama de tamanhos de partículas que variam de local para outro. Mudanças no estilo de vida, na legislação, nos fatores sazonais, pré-tratamento e atividades de reciclagem resultam em um fluxo de resíduos que mudam ao longo do tempo (DIXON; JONES, 2005).

Atualmente, os chamados “3R” – Reduzir, Reutilizar e Reciclar - fazem parte da gestão integrada de resíduos sólidos urbanos. Esta gestão integrada tem sua atuação sistemática e abrangente do poder público e da sociedade civil, a partir do ciclo de vida dos resíduos, desde a geração, segregação, acondicionamento, identificação, coleta, manipulação, transporte, armazenamento e tratamento, até sua destinação final (BOSCOV, 2008; VILHENA, 2010).

O sistema de gestão de RSU de um país tem como um dos principais componentes a garantia de proteção ambiental e preservação de recursos naturais. Esta gestão tem trazido prejuízos ambientais e econômicos para o Brasil, pois ainda é deficitária. O setor ainda carece de estruturação, gerenciamento e recursos, para viabilizar os processos completos para implantação de medidas e procedimentos de gerenciamento ambientalmente adequado de RSU (ABRELPE, 2013). Principalmente, na destinação final dos RSU, devido à carência de recursos técnicos e financeiros, e ainda os problemas de ordem técnica operacional decorrente da dificuldade de implantação dos sistemas de gerenciamento integrado por parte dos municípios.

A disposição de resíduos sólidos faz parte de um contexto mais amplo denominado Gerenciamento de Resíduos Sólidos. A disposição é o término do ciclo em que se busca sequencialmente: (a) a minimização da geração dos resíduos; (b) a reciclagem, (c) coleta e transporte; (d) a redução volumétrica e atenuação de características adversas dos resíduos a ser dispostos e (e) a disposição final em aterros (Figura 2.1).

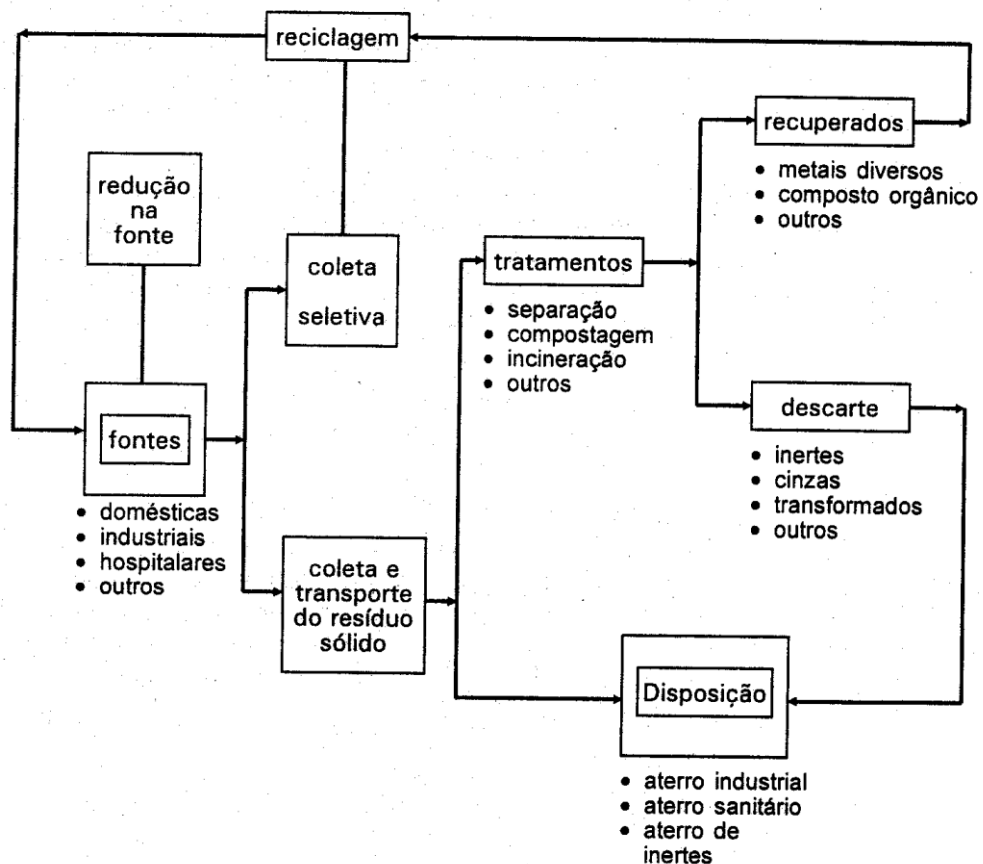


Figura 2.1 – Fluxo dos resíduos sólidos.
Fonte: UNESP modificado de Cunha e Consoni, 1995.

Em todo o país, os RSU eram dispostos em lixões a céu aberto, sem qualquer tipo de controle ou proteção ambiental, causando a proliferação de vetores de doenças, a contaminação dos solos, das águas superficiais e subterrâneas, além de problemas sociais relacionados a pessoas (catadores) que passaram a viver em função do resíduo depositado nesses locais, e que, algumas vezes, residem no próprio local (VILHENA, 2010). Os aterros sanitários, portanto, tornaram-se uma alternativa mais viável no país, técnica, economicamente e ambientalmente segura para a destinação final dos RSU.

2.2 Aterros sanitários

Conforme NBR 8419 (1992), o aterro sanitário é uma técnica de disposição de RSU no solo que não causa danos à saúde pública, reduzindo os impactos ambientais, este método utiliza os princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos em uma área reduzida e em um volume reduzido permissível, sendo coberto por solo a cada jornada de trabalho.

Segundo Vilhena (2010), existem três formas tradicionais de processo de aterramento de resíduos sólidos que são: método da trincheira ou vala, método da rampa e método da área (Figura 2.2).

- a) *Método da trincheira ou vala*: consiste na abertura das valas onde o resíduo é disposto, compactado e posteriormente coberto com solo. As valas podem ser de pequena dimensão, sendo de operação manual, ou grande dimensões, que permitem a entrada de equipamentos maiores em seu interior.
- b) *Método da rampa*: conhecido também como método da escavação progressiva. Este método é fundamentado na escavação da rampa, onde o resíduo é disposto e compactado pelo trator e posteriormente coberto com solo. É empregado em áreas de meia encosta, cujo solo natural ofereça boas condições para ser escavado e, de preferência, possa ser utilizado como material de cobertura.
- c) *Método da área*: é empregado geralmente em locais de topografia plana e lençol freático raso.

Conforme o mesmo autor, a opção por um método depende das características físicas e geográficas de cada local e da quantidade de resíduo que será disposto.

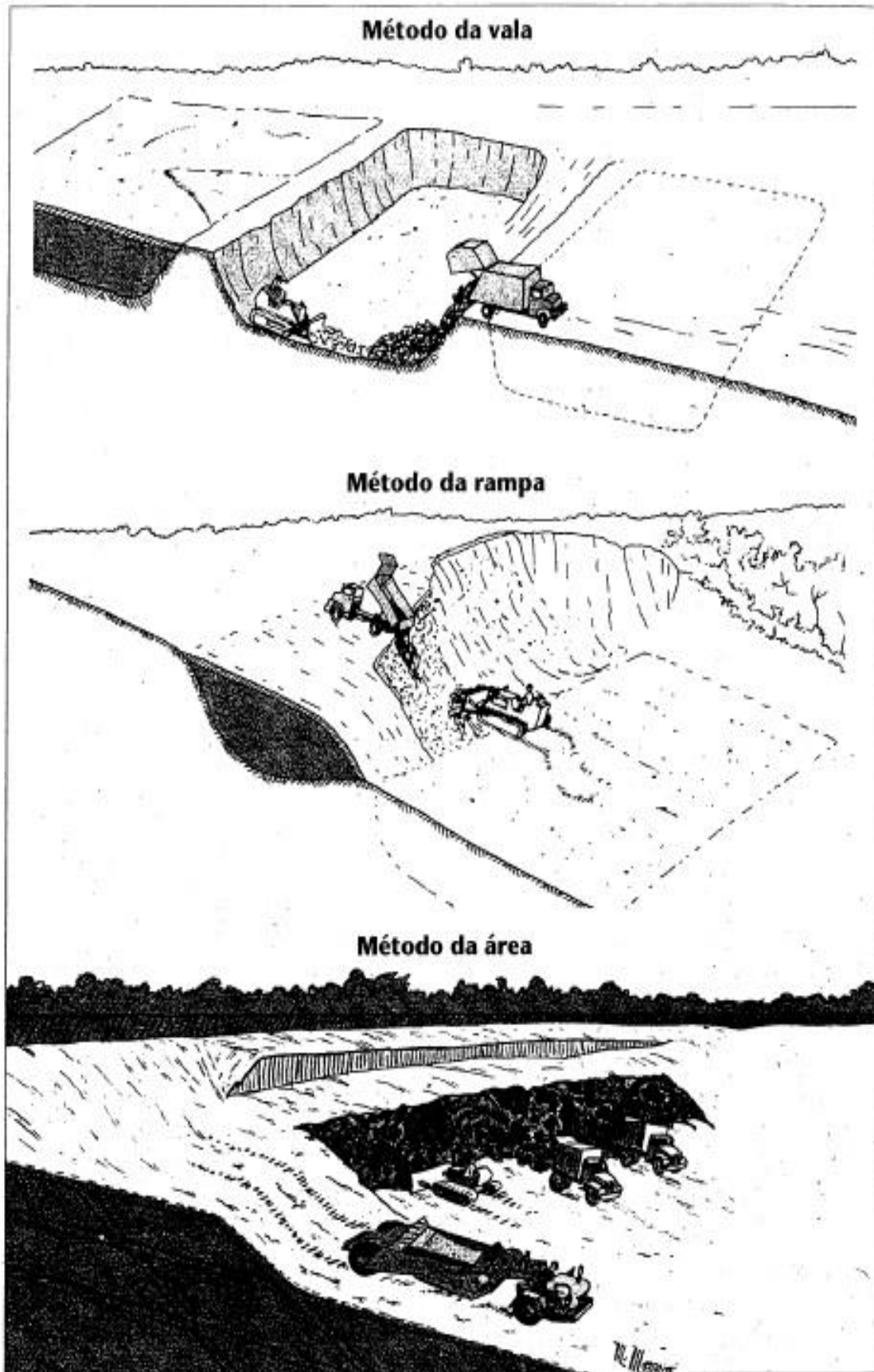


Figura 2.2 – Métodos de aterramento de resíduos sólidos urbanos.
Fonte: VILHENA, 2010.

Outras formas mais comuns de disposição de RSU são os aterros controlados e os lixões ou vazadouros. Nos aterros controlados os resíduos são cobertos com solo e eventualmente compactados, mas sem nenhum tipo de impermeabilização, drenagem e tratamento de chorume e gases. E nos lixões os resíduos são dispostos a céu aberto, sem quaisquer medidas de proteção ao meio ambiente e à saúde pública (VILHENA, 2010).

Quanto à geração de RSU no Brasil, a pesquisa da Abrelpe (2013) traz um panorama de todo o RSU no país, desde sua geração até a sua destinação final. Entre os anos de 2012 e 2013, houve um acréscimo de 4,1% na quantidade total gerada de RSU no Brasil conforme tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Quantidade de RSU Gerado.

Regiões	2012		População total (hab)	2013	
	RSU Gerado (t/dia)	Índice (kg/hab/dia)		RSU Gerado (t/dia)	Índice (kg/hab/dia)
Norte	13.754	0,841	17.013.559	15.169	0,892
Nordeste	51.689	0,959	55.794.707	53.465	0,958
Centro-Oeste	16.055	1,113	14.993.191	16.636	1,110
Sudeste	98.215	1,204	84.465.570	102.088	1,209
Sul	21.345	0,77	28.795.762	21.922	0,761
BRASIL	201.058	1,037	201.062.789	209.280	1,041

Fonte: pesquisa ABRELPE, 2013.

Deste percentual de RSU gerado no Brasil, 58,3% dos resíduos tiveram como destino final os aterros sanitários, 24,3% foram destinados aos aterros controlados e 17,4% aos lixões em 2013. Em comparação ao cenário registrado do ano de 2012, praticamente não teve uma alteração significativa do percentual do destino final dos RSU, conforme figura 2.3 (ABRELPE, 2013).

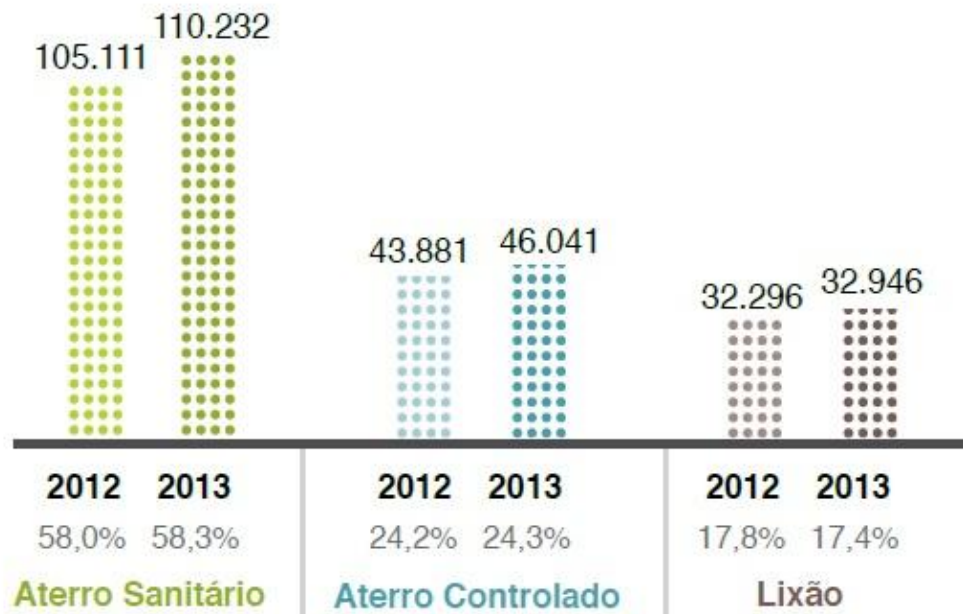


Figura 2.3 – Destinação final de RSU (t/dia).
Fonte: pesquisa ABRELPE, 2013.

Conforme a mesma pesquisa da Abrelpe (2013), destaca-se que ainda em todas as regiões e estados brasileiros e 3.344 municípios, correspondentes a 60,0% do total, pesquisados no ano de 2013, destinam seus RSU em locais inadequados, mesmo com uma legislação mais restritiva e dos esforços empreendidos em todas as esferas governamentais (Tabela 2.2 e 2.3).

Tabela 2.2 – Quantidade de Municípios por Tipo de Destinação Adotada no ano de 2012.

Destinação Final	2012 - Regiões e Brasil					
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	BRASIL
Aterro Sanitário	90	450	157	814	702	2.213
Aterro Controlado	110	505	149	643	366	1.773
Lixão	249	839	160	211	120	1.579
BRASIL	449	1.794	466	1.668	1.188	5.565

Fonte: pesquisa ABRELPE, 2013.

Tabela 2.3 – Quantidade de Municípios por Tipo de Destinação Adotada no ano de 2013.

Destinação Final	2013 - Regiões e Brasil					
	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	BRASIL
Aterro Sanitário	92	453	161	817	703	2.226
Aterro Controlado	111	504	148	645	367	1.775
Lixão	247	837	158	206	121	1.569
BRASIL	450	1.794	467	1.668	1.191	5.570

Fonte: pesquisa ABRELPE, 2013.

Atualmente há maior planejamento dos aterros sanitários, em razão do contínuo desenvolvimento tecnológico e da crescente preocupação da população com o meio ambiente. Segundo Boscov (2008), os impactos ambientais dos aterros sanitários são reduzidos devido à escolha do local, o seu projeto global, os componentes do sistema, os materiais empregados, a operação, o monitoramento e o planejamento para o fechamento e pós-fechamento.

2.2.1 Instalação de um aterro sanitário

Segundo Tapahuasco (2009), os componentes básicos de projeto para instalação de um aterro sanitário são os seguintes:

- a) *Sistema de tratamento do fundo da base do aterro:* Camadas de solo compacto (compacted clay liner ou CCL), geossintéticos (geomembranas – GM, ou geocomposto argiloso para barreira impermeável - GCL) ou, mais usualmente, uma combinação destas (Boscov, 2008), tem a finalidade de proteger e impermeabilizar a fundação do aterro, evitando a contaminação do subsolo e aquíferos adjacentes devido à migração dos lixiviados e gases.
- b) *Sistema de drenagem dos líquidos percolados:* O sistema de drenagem comumente consiste em uma camada de material granular de alta permeabilidade, como brita, protegida por uma camada de filtração,

geralmente de areia ou geotêxtil. Dentro da camada de material granular é colocada uma tubulação perfurada, de material física e quimicamente resistente ao tipo de resíduo disposto, como por exemplo, PEAD (polietileno de alta densidade). As tubulações conduzem o percolado a um reservatório ou trincheira, de onde é removido por bombeamento para tratamento. Este sistema de dreno tem como função coletar e conduzir os líquidos percolados pelos drenos internos, de tal forma a reduzir as pressões atuantes dos líquidos na massa dos resíduos aterrados.

- c) *Sistema de drenagem de gases*: O sistema de drenagem de gases de um aterro sanitário é composto por drenos verticais e camadas horizontais interligados. As camadas horizontais fazem parte da cobertura e podem ser constituídas de areia, geotêxteis espessos, geomalhas e geocompostos para drenagem. Os drenos verticais atravessam todo o perfil do aterro, desde o revestimento de fundo até a superfície do aterro, e são construídos com tubos de concreto verticais perfurados envoltos por materiais granulares (Boscov, 2008).
- d) *Sistemas de camadas de coberturas*: O sistema de cobertura consiste na aplicação de solo de granulometria fina (preferencialmente material inerte) sobre os resíduos dispostos nas células de aterros sanitários. E tem como função proteger a superfície dos resíduos, minimizando os impactos ao meio ambiente, visando à eliminação de vetores contaminadores, à diminuição da taxa de formação de percolados, à redução de odores e permitir o tráfego de veículos coletores sobre o aterro, entre outros. A cobertura diária de 0,15 a 0,30 m de solo inerte é realizada a cada jornada de trabalho. Terminada a etapa de operação do aterro, deve ser aplicado o revestimento impermeável superior (cobertura definitiva), com espessura que varia entre 0,40 a 0,60m, que impedem a infiltração da água de chuvas, e evita à migração dos fluidos dos resíduos ao exterior do aterro.

A figura 2.4 demonstra de forma esquemática os componentes de um aterro sanitário em suas diversas fases e sistemas, sendo as seguintes fases:

- *Setor em preparação*: mostrando a camada impermeabilizante e o sistema de drenagem de chorume;

- *Setor em execução*: mostrando a fase de operação do aterro, onde estão às camadas de resíduos sólidos sendo compactados pelo trator esteira e colocação da cobertura diária;
- *Setor concluído*: mostrando a fase final de operação do aterro, onde as camadas de resíduos sólidos estão na altura final estimada pelo projeto, com a cobertura final de vegetação e os sistemas de drenagem de gás e de águas superficiais.

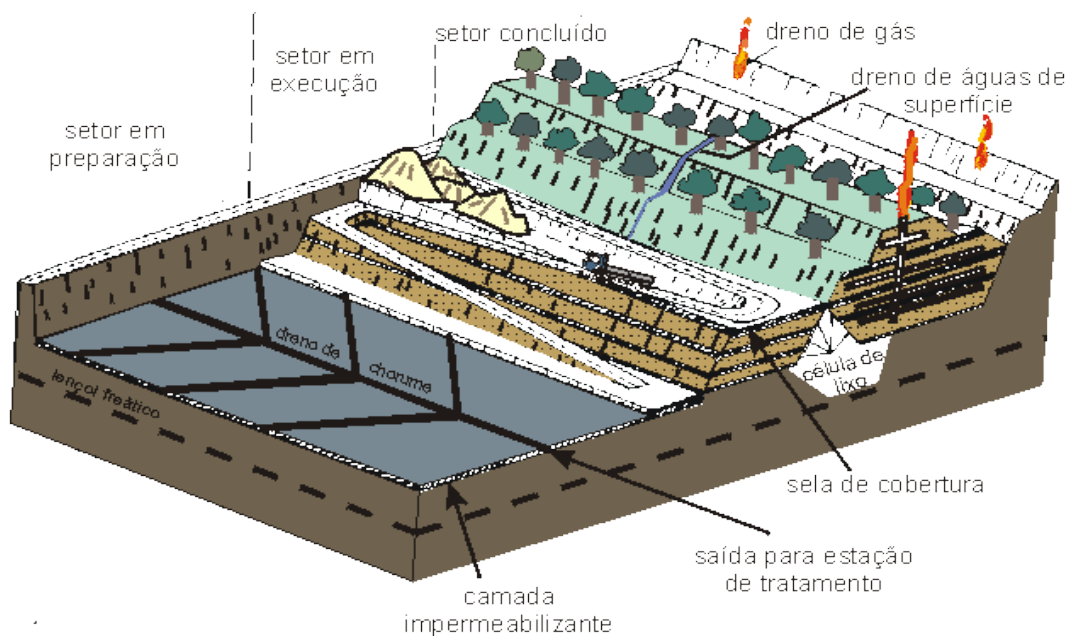


Figura 2.4 – Aterro sanitário em diversas fases e seus sistemas.

Fonte: IPT,2000.

Conforme Boscov (2008), no Brasil um aterro sanitário desenvolve-se nas seguintes operações e sequência construtiva:

- A área de disposição de resíduos sólidos é recoberta com um revestimento inferior ou de base, composto por camadas de drenagem e impermeabilização;
- A construção das camadas de RSU é feita pelo método de aterro em rampa: o lixo é descarregado pelos caminhões basculantes no pé da rampa; o trator de esteiras empurra o lixo de baixo para cima, subindo o talude e

compactando cada camada com três a cinco passadas em toda sua extensão;

- O resíduo depositado e compactado é coberto diariamente com uma camada de solo, inclusive os taludes, em uma espessura de aproximadamente 15 cm;
- O aterro sanitário é construído em células, com altura geralmente entre 2 e 4 m, e são revestidas na base, no topo e na lateral por camadas de solo;
- Na base das células há um sistema de drenagem;
- Para sobreposição com resíduos em uma célula, aguarda-se tempo suficiente para que se processe a decomposição aeróbica do resíduo já depositado no aterro;
- O topo do aterro recebe um sistema de impermeabilização superior ou cobertura final, composto por camadas de drenagem superficial e impermeabilização;
- Um sistema de drenagem superficial é constituído de canaletas e escadas d'água construído sobre a cobertura final e no perímetro do aterro sanitário;
- E um sistema de drenagem vertical constituído de drenos verticais para o escape dos gases gerados pela decomposição anaeróbica do lixo.

2.2.2 Operação de um aterro sanitário

A compactação dos resíduos sólidos, a espessura das camadas, os tipos de equipamentos compactadores, as condições dos RSU, e as inclinações das rampas e o sentido de compactação são aspectos importantes para a operação dos aterros sanitários.

2.2.2.1 Compactação de resíduos sólidos urbanos

Conforme Dixon e Jones (2005), os RSU são compostos constituídos por materiais de diferentes tamanhos de partículas e constituição e uma grande parte destes materiais tem uma relação de vazios elevada e uma elevada

compressibilidade, tornando-se fáceis os processos de compactação. Estes processos reduzem os espaços vazios dentro de um componente individual, bem como os espaços vazios entre vários componentes, ou seja, em aterros sanitários a compactação reduz a massa de resíduos sólidos a partir de uma sobrecarga realizada por equipamentos mecânicos. Esta compactação se destaca como o principal parâmetro a ser controlado dentre os aspectos operacionais que envolvem a operação dos aterros sanitários, devido a sua importância tanto à otimização da disposição de resíduos, quanto da melhoria de propriedades geomecânicas de resíduos (CATAPRETA, 2008).

A compactação depende dos seguintes fatores: espessura da camada de resíduos, peso, tipo e o número de vezes que o equipamento compactador passa sobre os resíduos, inclinação da rampa de compactação, sentido de compactação, composição e umidade dos RSU (CATAPRETA, 2008; DIXON e JONES, 2005).

Uma boa compactação traz inúmeras vantagens, dentre elas estão: aumento da vida útil dos aterros sanitários e da estabilidade do maciço de resíduos, redução da migração de gases e líquidos lixiviados, a possibilidade de tráfego imediato de veículos sobre o maciço e melhorias no aspecto estético da massa de resíduos aterrada (CATAPRETA, 2008).

2.2.2.2 Espessura da camada de resíduos

A espessura da camada de resíduos é um dos fatores que influenciam na compactação dos resíduos e de certa forma afetam os valores de pesos específicos deles. Sendo assim, dependendo das espessuras das camadas dos aterros, podem ou não facilitar a compactação, ou seja, a espessura da camada de 0,5 - 1,0m vai facilitar a realização de uma boa compactação com pesos específicos altos, e espessuras de 2,0 – 3,0m resultam numa compactação fraca a moderada com pesos específicos mais baixos (DIXON; JONES, 2005).

Segundo Catapreta (2008), considera a espessura da camada de RSU um fator de grande importância e afirma que para se ter um maior valor de peso específico, os resíduos devem ser espalhados em camadas de não mais do que

0,60 m, ou seja, quanto mais espessa for a camada, menor será a eficiência da compactação.

Conforme Boscov (2008), quanto ao peso específico à espessura da camada de cobertura diária também influencia a densidade dos RSU, pois se trata da aplicação de uma sobrecarga. O valor do peso específico depende principalmente:

- Da composição gravimétrica, sendo que elevados teores de materiais leves ou putrescíveis acarretam em menor peso específico;
- Da distribuição granulométrica, sendo que os resíduos triturados podem formar arranjos mais densos do que resíduos *in natura*;
- E do grau de compactação, sendo que os resíduos compactados são mais densos do que resíduos soltos.

Alguns valores de peso específico de RSU da literatura especializada nacional estão apresentados na tabela 2.4, no qual se percebe que os valores têm uma ampla faixa de variação. Embora estes valores apresentados pelos autores difiram, pode-se constatar que há um aumento do peso específico dos RSU em virtude da compactação, da degradação e da ocorrência de recalques.

Tabela 2.4 – Pesos específicos de resíduos sólidos urbanos.

FONTE	PESO ESPECÍFICO (kN/m³)
Benvenuto e Cunha (1991)	Condição drenada: 10 Condição saturada: 13
Santos e Presa (1995)	Resíduos recém-lançados: 7 Após ocorrência de recalques: 10
Kaimoto e Cepollina (1996)	Resíduos novos, não decompostos e pouco compactados: 5 a 7 Após compactação e ocorrência de recalques: 9 a 13
Mahler e Iturri (1998)	10,5 (seção com 10 meses de alteamento)
Abreu (200)	Resíduos soltos: 1,5 a 3,5 Resíduos mediamente densos: 3,5 a 6,5 Resíduos densos: 6,5 a 14

Fonte: BOSCOV, 2008.

2.2.2.3 Equipamentos compactadores

O tipo e peso dos equipamentos compactadores influenciam diretamente a compactação dos resíduos sólidos. No Brasil, o equipamento mais utilizado para a compactação dos resíduos é o trator de esteira com lâmina, que tem se mostrado adequado. Em países mais avançados utilizam outros equipamentos compactadores, sendo do tipo com rodas metálicas ao invés de esteiras, para a compactação de resíduos nos aterros sanitários (CATAPRETA, 2008).

Em estudo realizado por Marques (2001), comparou-se dois tipos de equipamentos compactadores, um trator de esteiras tipo *Bulldozer* D6D e um rolo compactador Caterpillar 816F, para verificar se há influência do tipo de equipamento no peso específico do RSU. De acordo com o estudo, foi constatado que, apesar do compactador ter um maior peso operacional, mostrou-se bastante sensível à compactação inicial da camada, implicando pressões transmitidas aos resíduos equivalentes às do trator de esteiras, justificando assim a proximidade dos resultados. De certa forma, este estudo confirma que o trator de esteiras é um bom equipamento para ser utilizado nos aterros sanitários brasileiros (CATAPRETA, 2008).

O número de passadas que um equipamento compactador realiza para compactar os resíduos no aterro sanitário é outro fator que influencia na compactação. Conforme Savage et al. (1998), usualmente são realizadas de 4 a 6 passadas com equipamentos pesados de rodas, promovendo um alto grau de compactação. Embora o número de passadas de 4 a 6 vezes proporcione uma maior compactação, o retorno obtido para este número adicional de passadas diminui substancialmente acima de 6 passadas.

Segundo Catapreta (2008), o peso específico dos resíduos está influenciado pelo grau de compactação aplicado, ou seja, quanto menor for o número de passadas do equipamento compactador, menores são os pesos específicos obtidos. Sendo que para 3 passadas obteve-se um peso específico de $5,8 \text{ kN/m}^3$. Por outro lado, um número excessivo de passadas parece não conferir aumentos significativos das densidades dos RSU, sendo que quando o número de passadas vai de 5 para 7, os valores dos pesos específicos vão de $8,1 \text{ kN/m}^3$ para $8,2 \text{ kN/m}^3$.

2.2.2.4 Inclinações das rampas e o sentido da compactação

Uma adequada inclinação da rampa de compactação de RSU é outro aspecto operacional importante, pois a estabilidade da rampa evitará desmoronamento de resíduos que podem prejudicar na operação do aterro sanitário e ocasionar problemas de segurança e ambientais. A inclinação da rampa adequada, que tem sido indicada pela literatura, é na ordem de 1V:3H (BOSCOV, 2008).

Segundo Luz (1976), o sentido que o equipamento compactador, trator de esteira, deve fazer para se ter uma boa compactação é o ascendente. Esta operação permite impor uma distribuição de cargas na base das esteiras, que proporciona uma concentração do peso do equipamento na parte traseira do sistema esteiras, assim, faz com que o volume de resíduos seja reduzido de forma mais eficiente, que garante o desempenho e produção mais adequados, compatível com a velocidade de descarga de resíduos.

Nos aterros brasileiros, a compactação é geralmente realizada com a utilização de trator de esteiras, em rampas com inclinação de 1(V):3(H), células com altura geralmente entre 2 e 4 metros, e o número de passadas de 3 a 5 vezes, sendo ida e volta do trator. E ainda que essas observações decorrem da prática e experiência dos operadores de aterros sanitários brasileiros, não há, de forma geral, aferição quantitativa do desempenho da compactação de resíduos no dia a dia de campo (BOSCOV, 2008).

2.2.2.5 Condições dos resíduos sólidos urbanos

Em um maciço sanitário, o teor de umidade é muito importante na velocidade de degradação dos materiais putrescíveis e, conseqüentemente, no desenvolvimento de poro pressões e recalques. Por outro lado, no caso dos RSU, o teor de umidade é um parâmetro muito difícil de determinar, pois seus diversos componentes têm diferentes teores de umidade, como pode ser observado na tabela 2.5, de tal forma que a distribuição de umidade no maciço é muito heterogênea.

Além disso, não há ensaio normalizado específico para determinação do teor de umidade dos RSU (BOSCOV, 2008).

Tabela 2.5 – Teor de umidade dos diversos componentes dos RSU.

COMPONENTES	TEOR DE UMIDADE (%)
Metais	19,6
Papel	74,8
Vidro	5,9
Plástico	41,5
Borracha	24,5
Têxteis	55
Pedra	12,6
Madeira	69,8
Matéria putrescível	47

Fonte: BOSCOV, 2008.

Segundo Boscov (2008), o teor de umidade varia com a composição gravimétrica, a profundidade, a pluviometria e as condições de drenagem interna e superficial do maciço sanitário.

2.3 Propriedades geotécnicas

As propriedades geotécnicas mais relevantes para os estudos em aterros sanitários são: a permeabilidade, resistência ao cisalhamento, compactação e compressibilidade e previsão de recalques.

2.3.1 Permeabilidade

Conforme Alcantara (2007), os RSU constituem um meio poroso pelo qual podem ser drenados os líquidos provenientes das precipitações pluviométricas assim como aqueles gerados pelo processo de degradação. Dessa forma, a medida da condutividade hidráulica (k) ou permeabilidade dos RSU pode ser de grande importância para o dimensionamento do sistema de drenagem dos aterros sanitários (ALCANTARA, 2007; MAHLER e AGUIAR, 2001).

Autores como Carvalho (1999), Marques (2001) e Tapahuasco (2009) destacam que a permeabilidade dos RSU é considerada como um importante parâmetro de projeto, especialmente para a concepção e detalhamento dos sistemas de drenagem do biogás e dos líquidos percolados dos aterros sanitários, principalmente, nos casos de problemas de estabilidade e migração não controlada do líquido percolado. Tal parâmetro é geralmente obtido por ensaios laboratoriais e *in situ*, executados em trincheiras e poços escavados de grande diâmetro ou em furos de sondagem (CARVALHO, 1999; MARQUES, 2001; TAPAHUASCO, 2009).

Bosco (2008) considera mais adequado a determinação do coeficiente de permeabilidade *in situ*, devido à dificuldade de obter amostras indeformadas do maciço sanitário. Quanto aos valores do coeficiente de permeabilidade dos RSU são geralmente na faixa de 10^{-6} a 10^{-4} m/s, sendo aproximadamente na mesma faixa de valores de permeabilidade de areias finas e limpas, o que confirma a hipótese usual de que os RSU são materiais drenantes (BOSCOV, 2008; CARVALHO, 1999).

A permeabilidade dos RSU é considerada totalmente dependente dos procedimentos de aterramentos, do grau de compactação inicial dos RSU, da pressão de sobrecarga, dos sistemas de drenagem interna, da temperatura, da composição física e distribuição do tamanho das partículas, idade e decomposição dos RSU (BOSCOV, 2008; MAHLER e AGUIAR, 2001; MARQUES, 2001; TAPAHUASCO, 2009).

2.3.2 Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento de maciços de RSU é associada a um ângulo de atrito interno e uma coesão, definidos a partir da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb (BOSCOV, 2008; TAPAHUASCO, 2009).

Segundo Boscov (2008), os RSU podem apresentar elevadas deformações sem atingir um estado de ruptura, com resistência crescente em função da deformação. Logo, a coesão e o ângulo de atrito dos RSU devem ser sempre especificados para um nível de deformação aceitável para o maciço sanitário.

A resistência ao cisalhamento para os RSU é geralmente determinada a partir de ensaios de laboratório, sendo os ensaios de cisalhamento direto e triaxiais, em dispositivos de grande dimensão, ensaios *in situ*, e pela retro-análise de ruptura de aterros sanitários, com base em dados e registros de monitoramento (BOSCOV, 2008; CARVALHO, 1999; MARQUES, 2001;).

Conforme Marques (2001), a resistência ao cisalhamento 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.

2.3.3 Compactação

A compactação, como já mencionada anteriormente no item 2.2.2.1 da revisão bibliográfica deste trabalho, reduz a massa de RSU a partir de uma sobrecarga realizada por equipamentos mecânicos. Ela faz parte das propriedades geotécnicas dos aterros sanitários, sendo um dos importantes fatores que influenciam na resistência ao cisalhamento dos RSU e na permeabilidade no maciço de RSU.

2.3.4 Compressibilidade e previsão de recalques

Conforme Dixon e Jones (2005), a compressibilidade dos RSU tem sido estudada há muitas décadas. Estudos de recalque têm sido realizados para melhorarem a eficiência da disposição dos resíduos, preverem perfis de recalques finais para a rampa, e permitirem a avaliação de interação entre sistemas de barreira de inclinação lateral e recalques do maciço de resíduos.

Catapreta (2008) e Simões e Catapreta (2013) comentam que os aterros sanitários continuam a ser uma parte essencial dos sistemas de gestão de resíduos e, em muitos países, é a única forma econômica de disposição de RSU. Devido a isso e ao aumento do número de aterros sanitários e a necessidade de conhecimento do comportamento mecânico dos resíduos, a investigação sobre a ocorrência de recalques nos aterros tem sido bastante estudada (CATAPRETA, 2008).

Segundo Tapahuasco (2009), são fundamentais o acompanhamento e o entendimento da estimativa de recalques e a velocidade dos recalques dos maciços sanitários devido à importância para a determinação da vida útil do aterro e garantia da integridade do projeto e do bom funcionamento dos sistemas estruturais do aterro, como os sistemas de cobertura e impermeabilização, drenagem superficial e de efluentes. Estas estimativas de recalques possibilitam a avaliação do desempenho desses empreendimentos após o fechamento.

Em virtude dos recalques significativos que devem ser esperados durante longos períodos de tempo e a necessidade de reutilizar aterros após o encerramento, proporcionou um forte incentivo para o desenvolvimento e validação de métodos para a previsão de recalques de longo prazo (SIMÕES; CATAPRETA, 2013).

Conforme Boscov (2008), os recalques de maciços sanitários são muito elevados quando comparados com os dos maciços de solo. Alguns valores de recalques em relação à espessura total inicial dos aterros sanitários são apresentados na tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Recalques em maciços sanitários.

AUTOR	RECALQUE RELATIVO À ESPESSURA INICIAL
Sowers (1973)	Da ordem de 30%
Wall e Zeiss (1995)	Entre 25% e 50%
Van Meerten et al. (1995)	Entre 10% e 25%
Coumoulos e Koryalos (1997)	Entre 20% e 25%
Abreu (2000)	Entre 10% e 30%

Fonte: BOSCOV, 2008.

2.4 Mecanismos responsáveis pelos recalques em aterros sanitários

Identificar os mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento de recalques em aterros sanitários é importante para a interpretação do comportamento geomecânico para propor modelos de previsão e realizar simulações de longo prazo (EDIL et al., 1990; SIMÕES; CAMPOS, 1998; SIMÕES; CATAPRETA, 2013).

Sowers (1973) apresentou os primeiros estudos sobre os mecanismos de recalque e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos. Segundo este autor, os principais mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento de recalques em sistemas de contenção de RSU são: (a) quebra de elementos sólidos que, associada à compressibilidade relativa dos materiais presentes, promove um rearranjo contínuo destes elementos; (b) erosão e ravinamento interno, devido ao carreamento de pequenas partículas para os espaços vazios do maciço; (c) alterações físico-químicas, processadas pela corrosão, oxidação e combustão dos materiais presentes; (d) recalque causado pela decomposição e biodegradação dos componentes orgânicos; (e) recalque de subleito sob carregamento do resíduo aplicado.

A solicitação mecânica engloba a distorção, dobra, esmagamento e quebra e rearranjo dos materiais. O ravinamento se dá pela erosão e migração de materiais finos para os vazios entre as partículas maiores. Estes materiais estão sujeitos a alterações físico-químicas que incluem processo de corrosão, oxidação e combustão. A biodegradação é causada por microorganismos, transferindo massa

da fase sólida para a fase líquida e gasosa. A dissipação das pressões neutras de líquidos e gases é um processo semelhante ao adensamento de solos que ocorre com a expulsão de líquidos e gases do interior do maciço do aterro sanitário e demanda certo tempo. Boscov (2008) ainda inclui as deformações lentas sob carga constante em razão de fenômenos viscosos (*creep*).

Segundo Edil et al. (1990), os fatores que influenciam a magnitude dos recalques, devido o seu peso próprio e à atuação de sobrecargas, são: (a) peso específico e índice de vazios; (b) porcentagem de material degradável; (c) altura do aterro; (d) história de tensões, envolvendo todas as etapas de operação e pós fechamento; (e) nível e flutuação dos líquidos percolados no interior do maciço de RSU; (f) fatores ambientais, tais como teor de umidade, temperatura e gases, presentes ou gerados no interior do maciço.

Conforme Simões e Catapreta (2013), existem três etapas dos recalques em aterros sanitários: a compressão inicial, primária e secundária. Na compressão inicial, os recalques ocorrem instantaneamente quando cargas externas são aplicadas e é normalmente associada à compressão imediata de espaços vazios e partículas devido às cargas sobrepostas.

Segundo Sowers (1973), a compressão primária ocorre em uma maior velocidade, sendo normalmente após 30 dias da aplicação do carregamento e corresponde ao recalque devido à drenagem de fluidos (líquidos e gases). O recalque em um aterro sanitário continua após esta compressão primária devido à deformação mecânica e a perda de massa no interior do mesmo, como resultado da decomposição físico-química e bioquímica que continuam até que os resíduos são totalmente estabilizados (SIMÕES; CATAPRETA, 2013).

A compressão secundária corresponde ao recalque devido ao *creep*, por processos de deformação lenta dos componentes dos resíduos e por degradação biológica da matéria orgânica. A maioria dos recalques que ocorrem em aterros sanitários é devido à compressão secundária, podendo atingir 25% da espessura total do maciço, sendo um processo lento e que podem durar décadas (BOSCOV, 2008).

Segundo Li et al. (2013), os RSU são materiais altamente compressíveis, e o deslocamento vertical dos aterros resultantes da compressão dos RSU pode ser tão grande quanto 25-50% da altura inicial de enchimento (LING et al., 1998).

Conforme Simões e Catapreta (2013), a previsão de recalques em aterro sanitário é considerada difícil devido à grande variedade de fatores que a influenciam. Estes fatores incluem: a composição dos resíduos; unidade de peso inicial, índice de vazios e teor de umidade; dimensões do aterro; métodos de compactação; sequência de enchimento; resíduos de pré-tratamento (incineração, compostagem, e outros); níveis de percolado, flutuações e recirculação; temperatura; existência de coleta de gás e extração de sistemas; características da cobertura final e clima (MCDUGALL, 2011).

A partir da proposta da curva teórica de compressibilidade de Grisolia e Napoleoni (1996), Liu et al. (2006) descreveram que os recalques em aterros sanitários podem ocorrer em 5 estágios conforme figura 2.5.

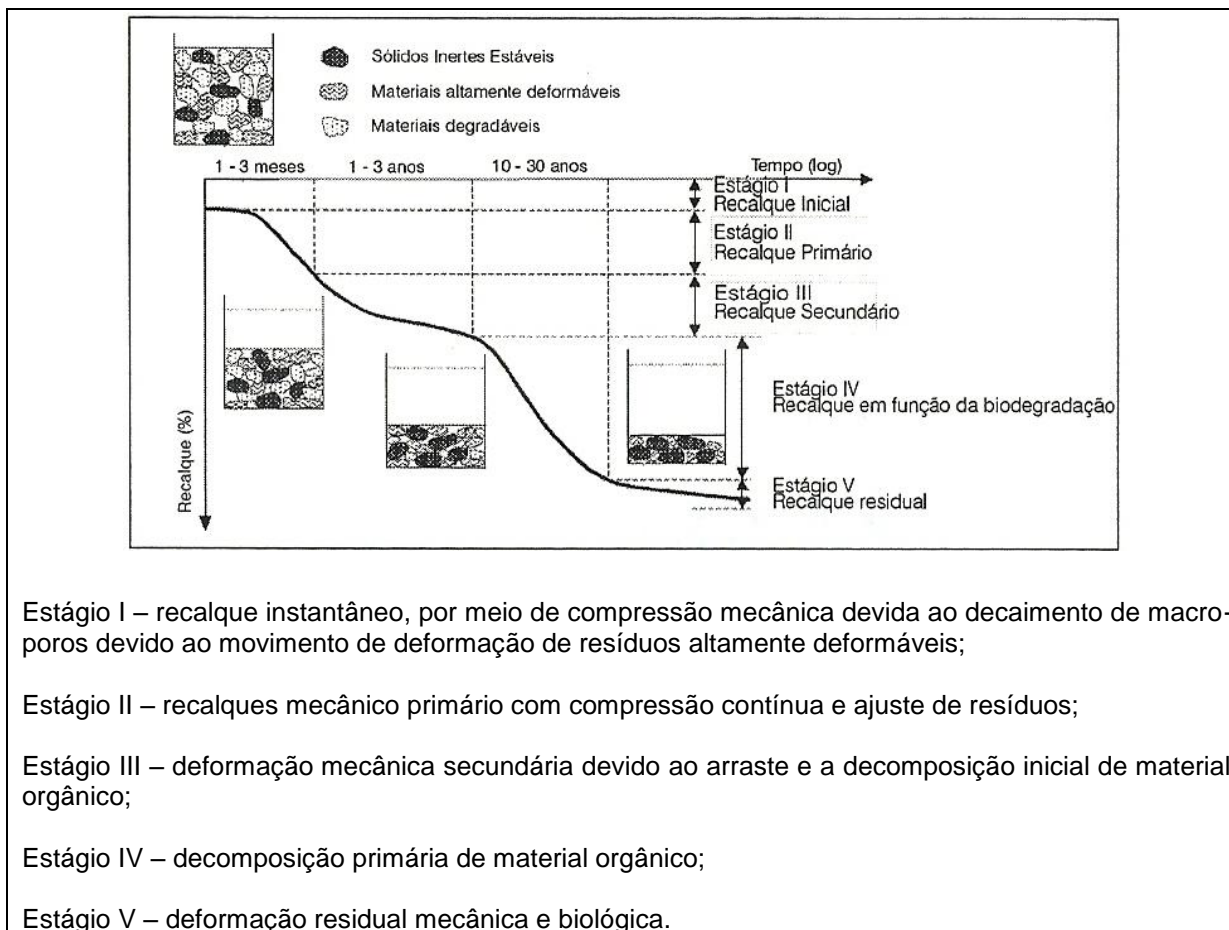


Figura 2.5 – Estágios de tempo-recalque típicos para um aterro de resíduos sólidos.
Fonte: Adaptado de Liu et al., 2006.

2.5 Modelos de previsão de recalques

Segundo Babu et al. (2010), vários pesquisadores têm proposto modelos para prever recalques de RSU considerando diferentes combinações de condições de aterros sanitários. Muitos destes modelos são baseados em mecânica dos solos e de consolidação com base nos processos de compressão secundários e/ou formulações empíricas. A importância dos modelos de recalque baseado no comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos sob carregamento foi reconhecida recentemente e estão sendo feitos esforços para desenvolver modelos gerais para descrever a resposta de RSU sob pressão com o tempo.

Conforme Babu et al. (2010), existem vários modelos que estão descritos na literatura para prever os recalques de RSU em aterros sanitários. Estes modelos podem ser agrupados como: (1) modelos baseados em mecânica dos solos; (2) modelos empíricos; (3) modelos reológicos e (4) modelos sob influência da biodegradação. Os modelos publicados na literatura são: Modelo de Gibson e Lo (1961); Modelo de Sowers (1973); Modelo de Yen e Scanlon (1975); Modelo de Bjardngard e Edgers (1990); Modelo de Edil et al. (1990); Modelo de Park e Lee (1997); Modelo de Coumoulos e Koryalos (1997); Modelo de Ling et al. (1998); Modelo de Marques (2001); Modelo de Oweis (2006); Modelo de Liu et al. (2006); Modelo de Hettiarachchi et al. (2009).

2.5.1 Modelo de Sowers (1973)

O modelo de Sowers (1973) foi a primeira proposta para previsão de recalques em aterros sanitários. Este modelo é baseado na teoria de adensamento da mecânica dos solos para estimar o recalque de RSU, sendo os recalques primários relacionados aos incrementos de carga que ocorrem de forma rápida, em menos de 1 mês e com pequeno ou nenhum acréscimo de pressão neutra. E, quanto aos recalques de longo prazo, estão associados aos fenômenos de fluência e biodegradação (BABU et al., 2010).

Conforme Marques (2001), os índices de compressibilidade primária e secundária são proporcionais ao índice de vazios iniciais do material e variam em função da quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos e das condições ambientais do local. A compressão primária pode ser definida pela equação 2.1, e a compressão secundária pela equação 2.2.

$$S_p = C'_c \cdot H_0 \cdot \log \frac{(\sigma_{v0} + \Delta\sigma_{v0})}{\sigma_{v0}} \quad (2.1)$$

Onde: S_p = recalque ao final da compressão primária; C'_c = coeficiente de compressão primária; H_0 = espessura inicial da camada; σ_{v0} = pressão vertical inicial; $\Delta\sigma_{v0}$ = acréscimo de pressão vertical.

$$S_s = C'_\alpha \cdot H_0 \cdot \log \frac{t_2}{t_1} \quad (2.2)$$

Onde: S_s = recalque devido à compressão secundária; C'_α = coeficiente de compressão secundária; H_0 = espessura inicial da camada; t_1 = tempo inicial da compressão secundária; t_2 = tempo de estimativa dos recalques.

2.5.2 Modelo de Yen e Scanlon (1975)

Yen e Scanlon (1975) partiram de resultados de monitoramento de três aterros sanitários em um período de 9 anos, apresentaram um modelo empírico para determinação da velocidade de recalques, observaram que a taxa de recalques decresce linearmente com o logaritmo do tempo e cresce com altura do aterro. Estas observações e o modelo somente são aplicados aos recalques de longo prazo, ou seja, recalques secundários (MARQUES, 2001). O modelo é definido pela equação

2.3, e a idade média (t_1) do aterro é determinada pela equação 2.4 e podendo ser representada pelo modelo gráfico da figura 2.6.

$$m = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad \text{ou} \quad m = a - b \cdot \log t_1 \quad (2.3)$$

$$t_1 = t - \frac{t_0}{2} \quad (2.4)$$

Onde: m = taxa de recalque ou velocidade de recalque; ΔH = recalques medidos; Δt = intervalo de tempo entre as medidas; t = tempo de início da construção; t_0 = tempo da construção do aterro; a e b = parâmetros que variam com a espessura do aterro e com o tempo de construção podendo ser adotado como $a = 0,00095H_f + 0,0985$, e $b = 0,00035H_f + 0,0509$, sendo H_f (espessura final) em metros.



Figura 2.6 – Definição da idade média do aterro (t_1).
Fonte: MARQUES, 2001.

Segundo Simões (2000), este modelo empírico deve ser ajustado a partir de dados de campo e quando o tempo for maior o modelo se torna inconsistente. Neste caso, os recalques poderiam tornar-se negativos dependendo da combinação das constantes empíricas.

2.5.3 Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998)

Ling et al. (1998) analisaram as limitações dos modelos de Yen e Scanlon (1975) e o utilizado por Edil et al. (1990), a partir destas análises propuseram a utilização de uma função hiperbólica para estimativa de recalques em aterros sanitários. Este modelo Hiperbólico é representado pela equação 2.5:

$$S = \frac{t}{\frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{S_{ult}}} \quad (2.5)$$

Onde: t = diferença entre o instante considerado e o início das medidas ($t = t_i - t_0$); S = diferença entre o recalque no instante considerado e o recalque inicial ($S = S_i - S_0$); ρ_0 = taxa ou velocidade inicial de recalques; S_{ult} = recalque final. Os parâmetros ρ_0 e S_{ult} devem ser determinados pela transformação da equação 2.6 a partir de relações t/S versus t e realizando uma análise de regressão linear:

$$\frac{t}{S} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{S_{ult}} \quad (2.6)$$

Logo, os inversos do intercepto e da inclinação fornecem os parâmetros ρ_0 e S_{ult} . A figura 2.7 apresenta os resultados da aplicação do modelo para o aterro sanitário de Meruelo.

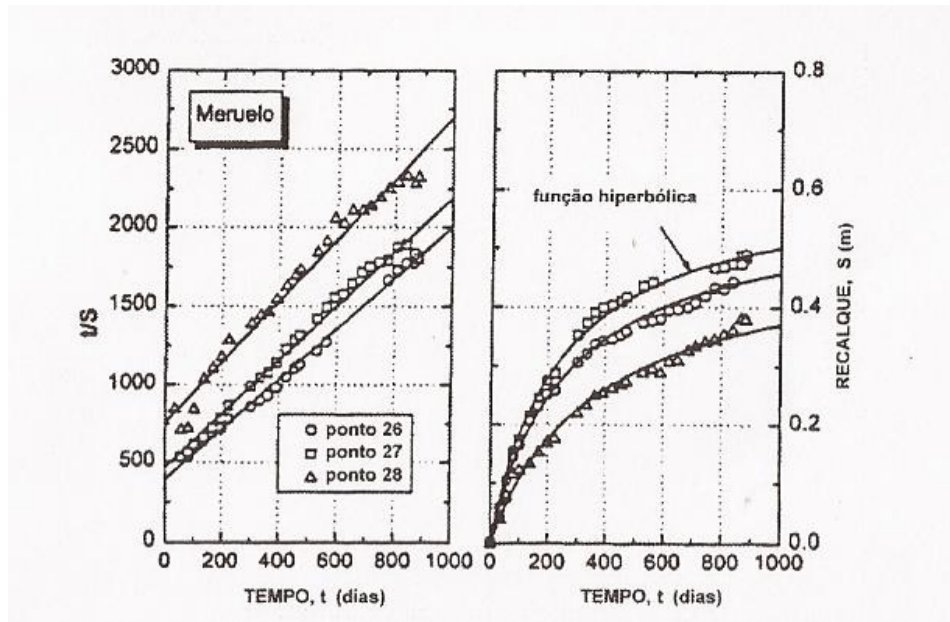


Figura 2.7 – Modelo hiperbólico aplicado ao aterro sanitário Meruelo.
Fonte: MARQUES, 2001.

2.5.4 Modelo exponencial de *creep* (Potência) de Edil et al. (1990)

Segundo Edil et al. (1990), propuseram a utilização de uma função de potência para reproduzir os fenômenos de compressão secundária dos RSU. O modelo exponencial de *creep* tem sido utilizado para a estimativa do comportamento de *creep* transiente de inúmeros materiais de engenharia (SHARMA; LEWIS, 1994). Este modelo é definido pela equação 2.7:

$$S(t) = H \cdot \Delta\sigma \cdot m \cdot \left(\frac{t}{t_r}\right)^n \quad (2.7)$$

Onde: $S(t)$ = recalque no tempo; H = altura inicial do resíduo; $\Delta\sigma$ = acréscimo de pressão; m = compressibilidade de referência; n = taxa de compressão; t_r = tempo de referência utilizado para normalizar o tempo; t = tempo após a aplicação da carga.

Edil et al. (1990) estimaram valores para os parâmetros m e n , compressibilidade e taxa de compressão, respectivamente, ajustando as curvas a partir de dados de monitoramento de aterros sanitários. Além disso, afirmam que, apesar do pequeno número de registros, os desvios entre os recalques previstos pelo modelo e os observados foram de 0 e 14%.

Conforme Simões (2000), por este modelo apresentar formulações empíricas, os parâmetros do mesmo devem ser obtidos a partir da análise de registros históricos. Este fato dificulta a extrapolação para condições diferentes do que aquelas para os quais os parâmetros foram obtidos.

2.5.5 Modelo de Bjarngard e Edgers (1990)

O modelo de Bjarngard e Edgers (1990) foi proposto a partir das informações e análise de 24 casos históricos de monitoramento de aterros sanitários (PARK et al. 2002), sendo gerado um procedimento empírico de previsão de recalques. O modelo é expresso pela formulação apresentada na equação 2.8. Os dados analisados por Bjarngard e Edgers (1990) estão representados na figura 2.8a.

$$\Delta H = \frac{\frac{C_c \cdot \log(\sigma_0 + \Delta\sigma) + C_{\alpha_1} \cdot \log t_2}{\sigma_0} + C_{\alpha_2} \cdot \log t_3}{t_2} \quad (2.8)$$

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_{α_1} = coeficiente de compressão secundária intermediária; C_{α_2} = coeficiente de compressão secundária de longo prazo.

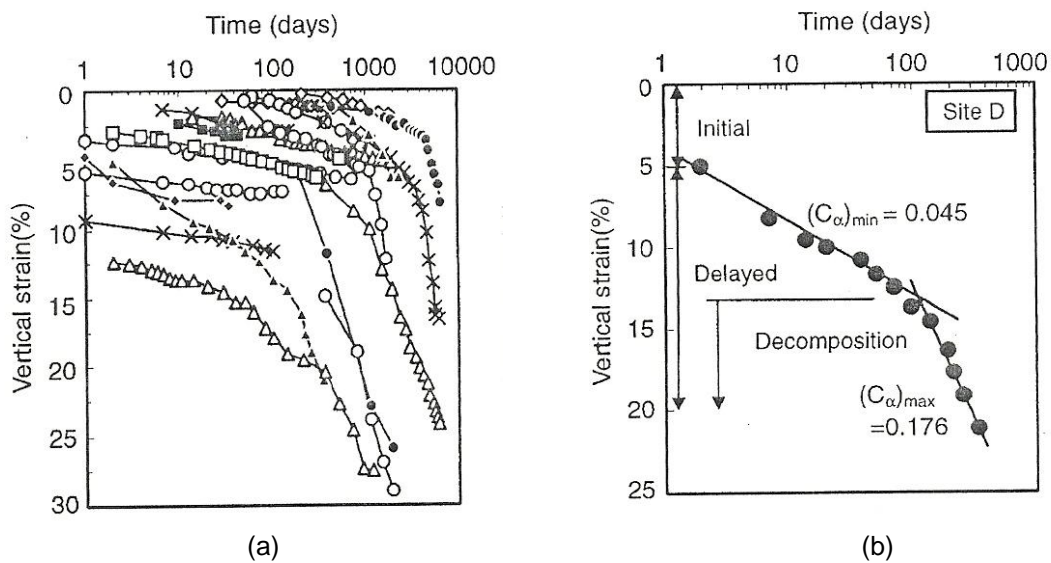


Figura 2.8 – Características dos recalques em aterros de RSU.
Fonte: PARK et al., 2002.

Bjarngard e Edgers (1990) identificaram, a partir das análises dos dados de monitoramento, dois trechos de compressão secundária, sendo um trecho intermediário e outro de longo prazo (Figura 2.8b). Com a aplicação do modelo determinaram que o parâmetro $C_{\alpha 1}$ varia entre 0,003 e 0,038, e o parâmetro $C_{\alpha 2}$ entre 0,017 e 0,51.

Conforme Tapahuasco (2005, 2009), o modelo Bjarngard e Edgers (1990) tem a evolução de recalques em três fases, sendo: (1) Fase inicial ou compressão primária, onde os recalques ocorrem de forma rápida pela compressão mecânica dos resíduos e redução dos vazios existentes; (2) Fase dois ou compressão secundária intermediária, onde os recalques são dominados essencialmente por interações mecânicas; e (3) Fase três ou compressão secundária de longo prazo, onde os efeitos da biodegradação dos resíduos são acrescidos aos mecanismos da fase anterior, implicando taxas de recalques mais elevadas.

Tapahuasco (2005) afirma que este modelo de Bjarngard e Edgers (1990) apresenta um melhor comportamento para estimar os recalques do que o modelo de Sowers (1971), mas destaca que o modelo carece de consistência devido a ser baseado na teoria de consolidação dos solos e por considerar que os fatores de degradação que influenciam os recalques, tem um comportamento homogêneo representado pela constante $C_{\alpha 2}$.

Tapahuasco (2009) sugere uma melhoria e uma nova proposta de reformulação do modelo de Bjarngard e Edgers com a finalidade de dar uma maior consistência ao modelo que, por sua vez, tem em sua formulação três parcelas de recalques, as duas primeiras estão baseadas na teoria de consolidação primária e secundária de solos. E a terceira parcela, denominada de recalques secundários ao longo do tempo devido aos processos de biodegradação. A proposta de reformulação por Tapahuasco (2009) foi realizada na terceira parcela de recalque sob influência absoluta da biodegradação. Após certo tempo, inicia a bioconversão da massa orgânica biodegradável em gás natural (fase metanogênica de decomposição).

2.5.6 Modelo de Meruelo

Diaz et al. (1995) propuseram um modelo de previsão de recalques a partir de estudos realizados no aterro sanitário de Meruelo, este modelo foi denominado de Modelo de Meruelo e apresenta uma estimativa de recalques baseado na degradação da matéria orgânica presente nos RSU. Este modelo tem a finalidade de prever os recalques a partir da formulação que incorpora e relacionam os parâmetros fundamentais que determinam os processos de degradação, como o tempo, o teor de matéria orgânica nos resíduos, a umidade, o ritmo de desenvolvimento dos processos de degradação, entre outros. O modelo da estimativa de recalques é expresso pela equação 2.9.

$$\Delta H = \alpha \cdot H \cdot COD \left[1 - \frac{1}{K_h \cdot t_c} \cdot e^{-K_h \cdot t - t_c} - e^{-K_h \cdot t} \right] \quad (2.9)$$

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 hidrólise (dia^{-1}); t = tempo para o qual se deseja prever recalques.

A equação 2.9 considera que a degradação da massa de resíduos é contínua e que ocorrem acréscimos de massa durante um tempo definido (T_c) e em um ritmo constante. O material degradado é demonstrado como uma fração do total de material contido no aterro. E quando há uma relação correspondente e direta entre o volume de recalques produzidos e a massa perdida por degradação, o coeficiente (α) é considerado constante e característico do tipo de aterro e dos resíduos depositados (MELO, 2003).

Esta equação permite esboçar em conseqüência as previsões de recalques em longo prazo em aterros sanitários. De acordo com Melo (2003), afirma que em todos os casos existem dificuldades para determinar-se a cota superficial no início do processo de degradação no momento que ainda estão sendo depositados os RSU na célula do aterro. Dessa forma, a determinação de um tempo deve ser imposta, sendo obtido quando atinge um primeiro nivelamento levado ao término em um momento $t_0 > T_c$. Deste modo, chega-se na equação 2.10 que expressa o recalque produzido:

$$S_s = \frac{\alpha.H.COD}{K_h.T_c} \cdot (1 - e^{-K_h.T_c}) \cdot (e^{-K_h.t} - e^{-K_h.t_0}) \quad (2.10)$$

Onde: S_s = recalques ocorridos entre t_0 e t ; t_0 = idade do aterro no início do nivelamento; t = idade do aterro no último nivelamento; 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 hidrólise (dia^{-1}).

Segundo Simões (2000), a principal hipótese adotada no modelo é referente à identificação da hidrólise como principal fator limitante no processo de biodegradação. Esta hipótese é baseada no fato de que a hidrólise é o mecanismo mais frequentemente utilizado pelos microrganismos para transformar compostos orgânicos complexos em compostos simples, possibilitando a obtenção de condições favoráveis à completa decomposição dos resíduos em estágios sucessivos.

Em estudo realizado por Melo (2003), utilizou o Modelo de Meruelo para comparar os recalques experimentais e teóricos que, por sua vez, obteve um bom ajuste de curvas em ambos. No entanto, nos ajustes de curvas, foi observado pelo autor que os parâmetros coeficiente de perda de massa transformada em recalque e o coeficiente de hidrólise diferem para cada ponto da célula estudada no aterro da Muribeca. Estas variações estão intimamente associadas às características dos resíduos depositados e a idade do resíduo aterrado.

2.5.7 Modelo de Gibson e Lo (1961)

O modelo de Gibson e Lo (1961) consiste em um modelo reológico muito utilizado para avaliação da compressão secundária em solos turfosos e orgânicos. Este modelo associa em série um elemento de Hooke (mola com constante a), que simula a compressão primária de 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 λ/b) e que simula a compressão secundária do elemento (MARQUES, 2001). O recalque pode ser estimado pela equação 2.11.

$$\Delta H = H \cdot \sigma_v \left[a + b \left(1 - e^{-\lambda/b \cdot t} \right) \right] \quad (2.11)$$

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.

Segundo Marques (2001) este modelo foi aplicado em 4 aterros sanitários com diferentes condições de contorno, sendo elas: altura total; estado de tensão; idade do aterro; operação do aterro e tempo de observação dos recalques. Os valores obtidos para os parâmetros de compressibilidade foram de $5,11 \times 10^{-7}$ e $3,80 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$ para o parâmetro a ; $1,0 \times 10^{-4}$ e $5,80 \times 10^{-3} \text{ kPa}^{-1}$ para o parâmetro b ; e

$9,2 \times 10^{-5}$ e $4,3 \times 10^{-3} \text{dia}^{-1}$ para o parâmetro λ/b . Foram observadas as seguintes tendências:

- Redução do parâmetro de compressibilidade primária (a) com o aumento de tensões;
- Redução do parâmetro de compressibilidade secundária (b) com o aumento de tensões;
- Aumento da taxa de compressão secundária (λ/b) com o aumento da taxa de deformações.

2.5.8 Modelo de Gandolla et al. (1992)

O modelo de Gandolla et al. (1992) foi desenvolvido a partir de ensaios de consolidação em lisímetros de diâmetro de 1,0m e altura de 3,0m. Os autores verificaram boa concordância dos resultados com equações exponenciais decrescentes, propondo para a previsão de recalques a seguinte formulação que está expressa pela equação 2.12.

$$\Delta H = H \cdot a \cdot (e^{-kt} - 1) \quad (2.12)$$

Onde: ΔH = recalques; a e k = são constantes do modelo, tendo sido determinadas pelos autores com valor iguais a 44,161 e 0,0077, respectivamente; e H = corresponde à altura do maciço.

Neste modelo a constante “a” corresponde ao recalque unitário final, e o parâmetro “k” rege o ritmo da degradação, decrescente com o tempo, semelhante às leis que regem os processos de reações químicas ou biológicas (GANDOLLA et al., 1992).

Segundo Simões (2000), considera que a principal característica do Modelo Gandolla é a simplicidade dos parâmetros necessários: massa, umidade, classes de biodegradabilidade e porcentagem de matéria biodegradável, volume e densidade iniciais e finais.

Destaca-se que a formulação proposta mostrou boa aderência com a compressão de RSU triturados submetidos somente a peso próprio (compressão secundária). Outra sugestão do autor foi a aplicação do conceito de superposição de efeitos para cálculo do recalque total de aterros sanitários. Sendo assim, o recalque de cada camada é calculado de forma individual, tendo por base o tempo decorrido desde sua deposição, portanto, o recalque final é o resultado da soma das contribuições individuais de cada camada (MARQUES, 2001).

2.5.9 Modelo Observacional – Asaoka (1978)

O método Asaoka (1978) foi desenvolvido para a estimativa de recalques totais e do coeficiente de consolidação *in situ*, sendo utilizado para a análise de observações de recalque de um carregamento sobre fundação em solos mole. Massad (1982) descreve o procedimento gráfico do método Asaoka de uma forma mais simples, para verificar a evolução dos recalques por adensamento ao longo do tempo. Além disso, o autor afirma que este método é bastante atraente devido a sua simplicidade e por não precisar de cálculos mais elaborados na determinação do coeficiente de adensamento, quando o carregamento é variável com o tempo.

Manassero e Pasqualine (1993) utilizaram o método observacional de Asaoka (1978) para previsão de recalques em aterros sanitários. Segundo Marques (2001), faz-se necessário que uma série 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 gráficos, 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 à formulação básica do método na equação 2.13. A figura 2.9 apresenta a aplicação do método por Marques (2001) em dados do aterro de Bandeirantes em São Paulo.

$$\Delta H_j = \beta_0 + \beta_1 \cdot \Delta H_{j-1} \quad (2.13)$$

Onde: ΔH_j = recalque no tempo t_j ($t_j = j \cdot \Delta t$, $j = 1, 2, \dots, n$). 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 $\Delta H_{ult} = \beta_0/[1-\beta_1]$.

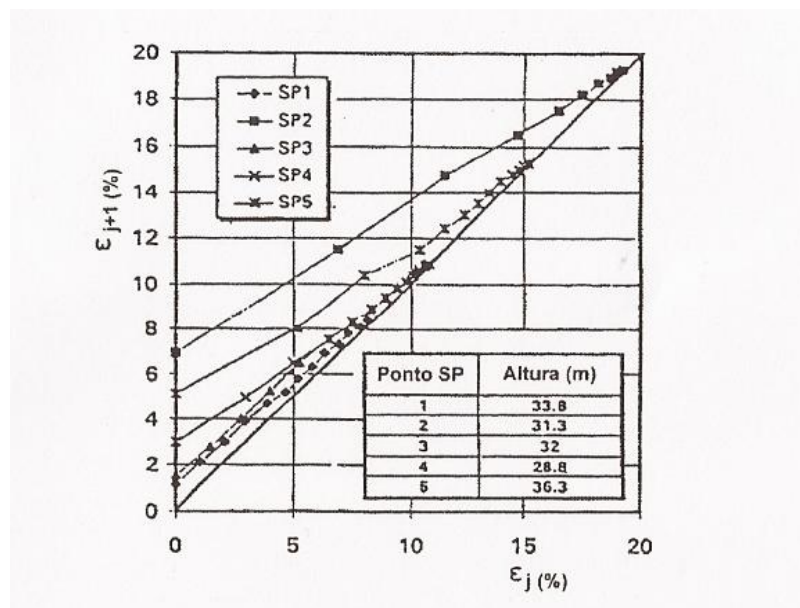


Figura 2.9 – Aplicação do método observacional.
Fonte: MARQUES, 2001.

2.5.10 Outros modelos de previsão de recalques

Simões (2000) desenvolveu um modelo de previsão de recalques em aterros sanitários simples e passível de ser utilizado como ferramenta de engenharia. O modelo semiempírico é baseado na combinação dos efeitos provocados pela ação mecânica das cargas com o efeito da perda devido à geração de gases provenientes da decomposição da matéria orgânica presente nos RSU.

Machado et al. (2002) desenvolveram um modelo constitutivo para modelar o comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos, com base em ensaios de laboratório triaxiais e compressão confinada de grandes dimensões.

Hossain e Gabr (2005) desenvolveram um modelo de previsão de recalque baseado em ensaios de laboratório e comparado com recalques observados em

vários aterros sanitários nos EUA. Este modelo quantifica a mudança das características dos materiais em função da taxa de degradação do resíduo e devido à biodegradação, a massa sólida orgânica é convertida em gás e ocorre um decréscimo do índice de vazios com um subsequente incremento de recalques dos resíduos.

Liu et al. (2006) propõem um modelo de previsão de recalque de longo prazo baseado na teoria de consolidação não saturada, levando em consideração os processos de biodegradação. E na formulação do modelo levam em conta equações de pressão de gás para solução do problema. A validação do modelo proposto foi realizado no estudo de 6 células de teste do Spadra Landfill e Mission Canyon Landfill.

Machado et al. (2008) propuseram algumas melhorias para o Modelo Constitutivo de Machado et al. (2002). Estas melhorias incluem no modelo a influência da biodegradação da matéria orgânica no comportamento mecânico de RSU, levando em conta as mudanças nas propriedades das fibras e perda de massa devido ao esgotamento de matéria orgânica ao longo do tempo. Criando assim um novo modelo Constitutivo para o comportamento mecânico de RSU em longo prazo.

Babu et al. (2010) propõem um modelo constitutivo simples, baseado em estrutura mecânica dos solos no estado crítico estendido para incorporar deformação mecânica e compressão induzida por biodegradação. Este modelo pode ser incorporado em modelos numéricos para prever as variações de recalque sob carga com o tempo em função das condições específicas do local.

Chen et al. (2010) apresentam os resultados de um estudo sobre comportamento da biodegradação na compressão de RSU. Foram realizados experimentos com sistemas de controle de temperatura, recirculação de percolado, carregamento e sistemas de coleta de líquido e gás. Os autores propuseram um modelo unidimensional que estima a capacidade e os recalques de aterro para condições ótimas de biodegradação.

Recentemente Wei (2012) apresentou um novo modelo matemático que leva em conta a teoria de consolidação de solos e a ação química e biológica no processo de deformação. Segundo este autor, o modelo pode ser útil para o projeto, manutenção e reutilização de área de aterros de resíduos sólidos urbanos. A fim de verificar a compatibilidade desta proposta, foram analisados dois aterros de resíduos sólidos na China.

2.6 Considerações finais

Devido à grande demanda de RSU no Brasil, a disposição final destes resíduos se tornou um desafio para o poder público, pois arrumar locais adequados de disposição requer áreas apropriadas, recursos financeiros e projeto de execução. Uma das soluções mais utilizada no Brasil e no mundo é o aterro sanitário, também chamado de aterro de resíduos sólidos urbanos, por ser considerado um dos projetos mais econômicos e ambientalmente seguro para esta finalidade.

Os aterros sanitários são projetados para evitar todo e qualquer tipo de problema ambiental, por isso, são monitorados em todas as etapas, desde sua instalação, operação, fechamento e pós-fechamento. Para manter suas estruturas intactas, como os sistemas de cobertura e impermeabilização, drenagem superficial e de efluentes, o monitoramento geotécnico é realizado, sendo utilizado marcos superficiais para monitorar a estabilidade do maciço de resíduos. Esta estabilidade está relacionada aos recalques que ocorrem nos aterros sanitários, estes recalques são influenciados pelos processos de degradação dos resíduos ali depositados entre outros mecanismos. E sua magnitude depende de fatores, como o peso específico dos RSU, índice de vazios, espessura da camada do maciço e entre outros fatores.

A estimativa de recalques é estudada por vários autores e sua importância está na determinação da vida útil do aterro sanitário e na garantia da integridade do projeto e do bom funcionamento dos sistemas estruturais do aterro. O desenvolvimento e validação de métodos para previsão de recalques de longo prazo teve grande incentivo de estudo por muitos autores, devido ao aumento do número de aterros sanitários e a necessidade de reutilizar estes aterros após o encerramento.

Dos inúmeros modelos de previsão de recalques encontrados na literatura foram escolhidos oito modelos, pois cada modelo necessita de determinados parâmetros, como medidas de gases e de chorume, quantidade de matéria orgânica nos RSU, sequência construtiva das células dos aterros, entre outros. Devido a indisponibilidade dos dados históricos dos aterros sanitários estudados neste trabalho foram utilizados os modelos de previsão de recalques mais adequados aos dados disponíveis.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa realizada teve como base a análise de dados do monitoramento realizado em dois aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos (RSUs), um da Central de Resíduos de Recreio no município de Minas do Leão e o outro do Aterro Sanitário de São Leopoldo, ambos no estado do Rio Grande do Sul. E, a partir de dados históricos de recalques de células de RSU, foi avaliada uma série de modelos de previsão de recalques (calibração). A figura 3.1 apresenta todas as etapas realizadas na metodologia do trabalho.

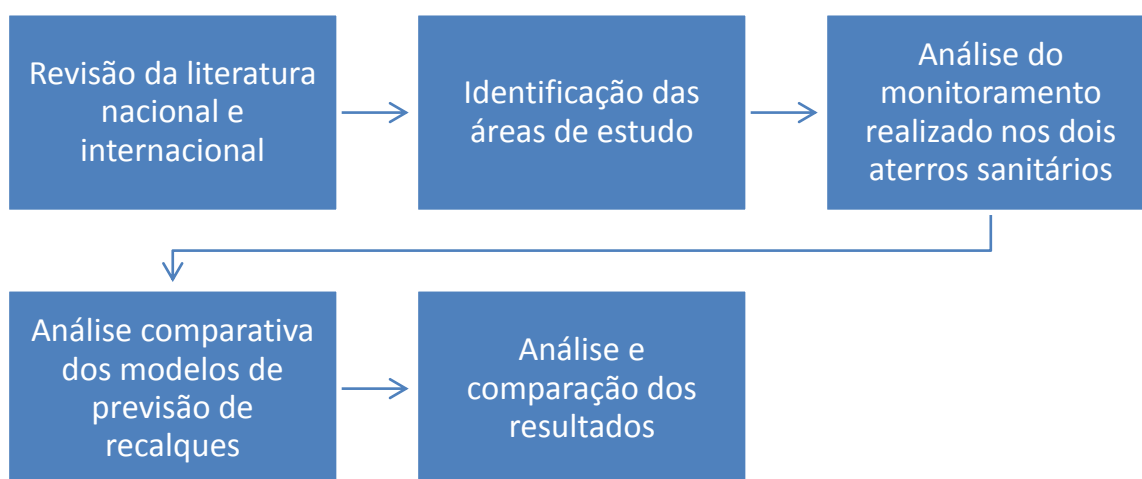


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da metodologia realizada no trabalho.

3.1 Áreas de estudo

Este trabalho contemplou duas áreas de estudo, sendo uma localizada no município de Minas do Leão e a outra no município de São Leopoldo, ambos no estado do Rio Grande do Sul.

3.1.1 Central de Resíduos do Recreio do município de Minas do Leão – RS

As células de RSU analisadas fazem parte da Área 1 do aterro sanitário da Central de Resíduos do Recreio (CRR) pertencente à Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR). O aterro sanitário está localizado no município de Minas do Leão (RS), no Km 18 da BR 290 - Bairro Coreia, a 80 km de Porto Alegre/RS (Figura 3.2). A Central de Resíduos do Recreio (CRR) possui uma área total de 500 hectares, dos quais 73 hectares são utilizados para receber resíduos (Figura 3.3).

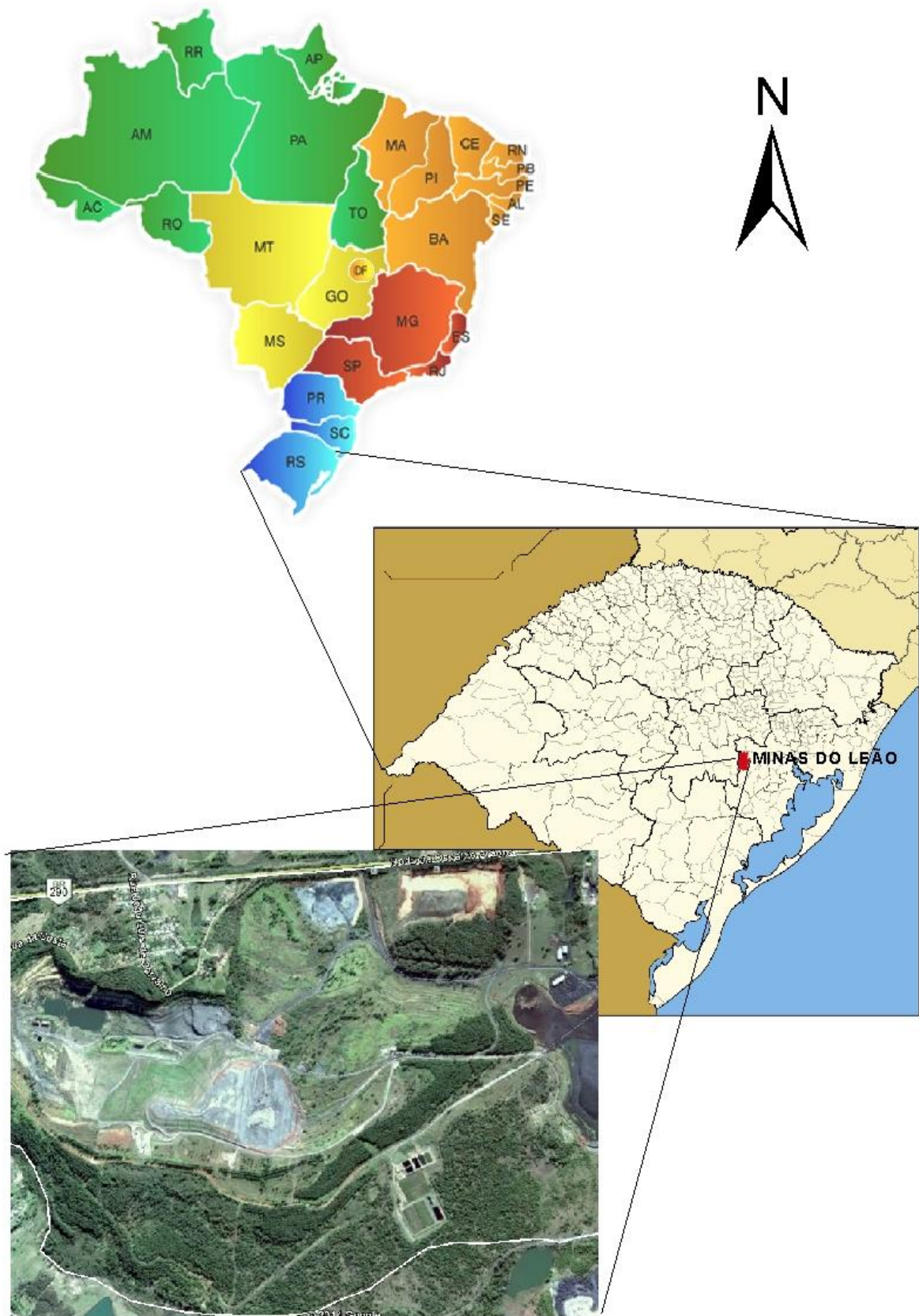


Figura 3.2 – Mapa de localização do aterro sanitário do município de Minas do Leão/RS.

Fonte: do autor.

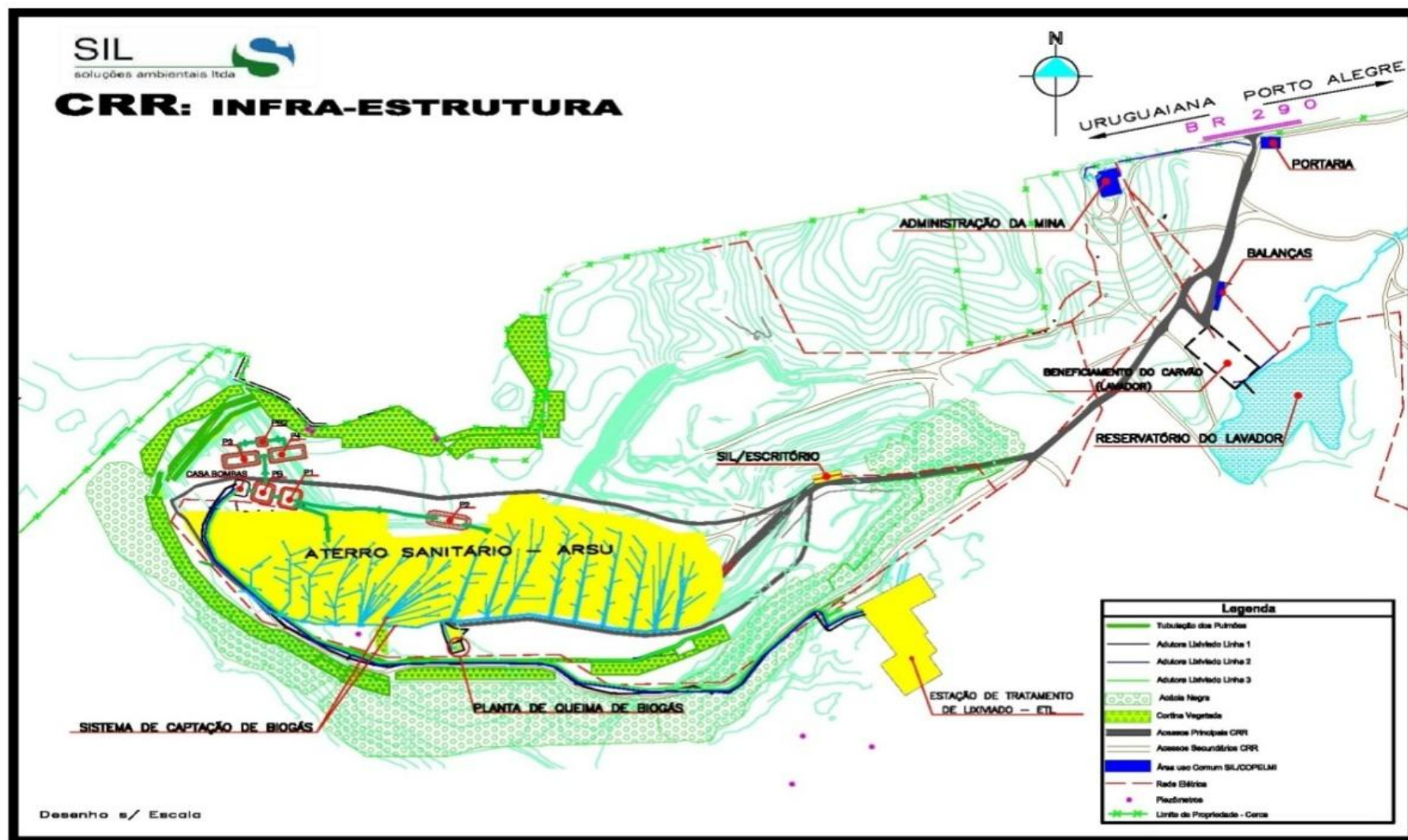


Figura 3.3 – Infraestrutura da área de estudo em Minas do Leão/RS.
 Fonte: arquivo da empresa Sil Soluções Ltda., 2013.

O aterro sanitário tem uma capacidade total para abrigar cerca de 25,0 milhões de toneladas de resíduos, obtendo, portanto, um prazo de operação estimado em 23 anos, segundo a licença de operação N° 4268/2012-DL da Fundação Estadual de Proteção Ambiental - FEPAM.

Atualmente, a empresa opera com um número de clientes entre 140 e 150, sendo o Município de Porto Alegre o maior gerador de resíduo entre os clientes, com uma média de 50.000 toneladas/mês. A empresa atende cerca de 40% da população do estado.

A empresa Sil Soluções Ltda., do Grupo Copelmi de Mineração, foi fundada em 2001, ano que começou sua operação. Possui um planejamento integrado que aproveita as condições hidrogeológicas naturais da área minerada permitindo uma solução econômica e ambientalmente correta para disposição de RSUs. Incentiva a educação ambiental, a coleta seletiva e a criação de usinas de triagem e compostagem nos municípios aos quais atende, pois entende que um bom planejamento e a execução da triagem do resíduo significam criação de renda da cidade ou município, inserção social, economia de recursos naturais e qualidade de vida. A Central de Resíduos do Recreio (CRR) possui uma área devidamente cercada, privada e com total controle de acesso. Todos os veículos transportadores são pesados ao entrar e sair, durante um período de 24 horas por dia e 6 dias por semana.

O aterro sanitário está localizado em uma cava gerado pela mineração de carvão a céu aberto, sendo uma área impermeabilizada naturalmente e sem a presença de lençol freático (Figura 3.4). Mesmo assim, para que o aterro seja eficiente é preciso que o terreno passe por um processo de impermeabilização com a seguinte ordem (Figuras 3.5 e 3.6):

- Argila compactada, para impermeabilização;
- Areia, visando monitorar eventuais vazamentos;
- Argila compactada, para impermeabilização;
- Geomembrana de polietileno (PEAD), para reforçar a impermeabilização;
- Argila, para proteção da geomembrana PEAD.



Figura 3.4 – Vista geral da área da Central de Resíduos de Recreio de Minas do Leão/RS.

Fonte: Sil Soluções Ambientais, 2008.



Figura 3.5 – Corte transversal das camadas de impermeabilização e proteção do solo.

Fonte: DENARDIN, 2013.



Figura 3.6 – Vista geral da instalação da geomembrana PEAD sobre a camada de argila compactada.

Fonte: CRVR, 2013.

A operação se dá com maquinário, com tratores de esteira, retroescavadeiras, frota de caminhão basculante, veículos de apoio, motoniveladora e caminhões pipa. Além disso, tem parceria com a Universidade Federal de Santa Maria, cujos profissionais monitoram periodicamente um conjunto de indicadores que garantem um processo seguro e ambientalmente confiável, minimizando os impactos ambientais. Futuramente, outras cavas de mineração poderão ser utilizadas como aterros sanitários, enquanto esse for desativado passará a receber cuidados de fechamento, sendo devolvido à natureza. Durante esse período, a empresa executará o monitoramento e a manutenção da área.

No final de 2011, foi realizada uma fusão da empresa Sil Soluções Ambientais Ltda. com os aterros da empresa Revita Engenharia S.A., no estado do Rio Grande do Sul, que por sua vez tornou-se uma nova empresa denominada de Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR). A Companhia tem por objetivo a prestação de serviços nas áreas de aterros industriais, aterros sanitários, coleta, disposição, processamento e transporte rodoviário de resíduos industriais e urbanos, bem como toda e qualquer atividade correlata, podendo ainda participar de

consórcios e outras sociedades, como sócia ou acionista, no país ou no exterior. Esta Companhia tem sede em Minas do Leão/RS e possui as seguintes filiais:

- Município de Porto Alegre, Estado do Rio Grande do Sul, onde opera um escritório administrativo;
- Município de Giruá, Estado do Rio Grande do Sul, onde desenvolve atividade em um Aterro Sanitário;
- Município de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, onde desenvolve atividade em um Aterro Sanitário e uma Usina de Triagem/Compostagem;
- Município de São Leopoldo, Estado do Rio Grande do Sul, onde desenvolve atividade em Aterro Sanitário (área nova).

3.1.2 Aterro sanitário de São Leopoldo (área antiga)

As células de RSU analisadas compreendem o Aterro Remediado e Aterro Emergencial Fase I, do aterro sanitário Central de Resíduos de São Leopoldo que se localiza na Estrada do Socorro, nº1550, Bairro Arroio da Manteiga, no município de São Leopoldo – RS (Figura 3.7).

Neste local, o descarte de RSU do município de São Leopoldo foi realizado sem projeto de engenharia e atividades de manutenção (lixão) pela Prefeitura Municipal de São Leopoldo.

A empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda. desenvolveu diversos trabalhos técnicos para as empresas do grupo SOLVÍ ao longo dos anos, entre eles está o caso do tratamento dos resíduos no município de São Leopoldo - RS. Em 2001, foi realizado o Diagnóstico Ambiental da Área da Usina de Reciclagem e do Aterro Sanitário do município de São Leopoldo, seguido da elaboração do seu projeto de remediação e ampliação, quando a VEGA Engenharia Ambiental S.A assumiu o tratamento dos resíduos do município.

Nos anos de 2002 e 2003, foi desenvolvido o Projeto Final de Engenharia do Aterro Sanitário e de Readequação da Usina de Triagem e Compostagem do município de São Leopoldo e de toda a infraestrutura associada.

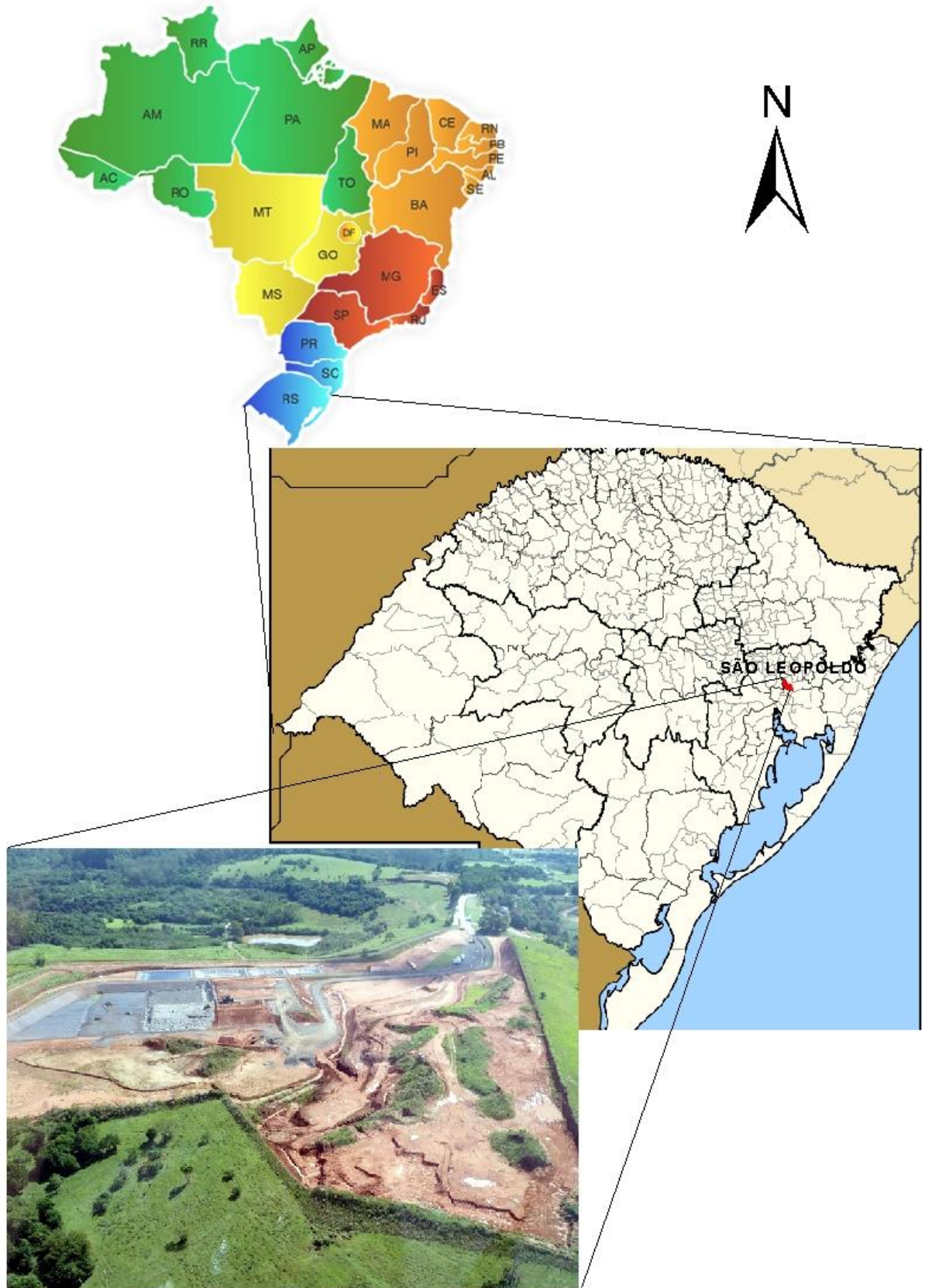


Figura 3.7 – Mapa de localização do Aterro Sanitário do município de São Leopoldo/RS.
Fonte: do autor.

Conforme relatório da empresa SL Ambiental do grupo SOLVÍ, no ano de 2006 foi elaborado o Projeto Executivo dos ajustes operacionais, no qual foi aberta uma nova célula ao lado do aterro antigo, como forma de prolongar a vida útil desta área e assegurar a disposição dos resíduos na atual área em operação. Esta nova área ficou denominada Aterro Emergencial Fase II. A primeira célula implantada possuía uma capacidade de 69.710 m³ perfazendo uma vida útil de 2 anos. A disposição de resíduos na segunda célula, com capacidade aproximada de 71.030 m³, teve início no mês de Outubro de 2008, e o encerramento no mês de Outubro de 2011. Nas figuras 3.8 e 3.9 podem ser observados os estágios, inicial e final, das células do aterro emergencial Fase II. E nas figuras 3.10 e 3.11 são observadas as vistas aéreas de toda área do aterro.



Figura 3.8 – Célula do aterro emergencial fase II de São Leopoldo em estágio inicial.
Fonte: SCHOENELL, 2013.



Figura 3.9 – Célula do aterro emergencial fase II de São Leopoldo em estágio final.
Fonte: SCHOENELL, 2013.



Figura 3.10 – Vista aérea do aterro sanitário de São Leopoldo – RS.
Fonte: Azambuja Engenharia e Geotecnia, 2011.



Figura 3.11 – Vista das células do aterro sanitário de São Leopoldo – RS.
Fonte: Azambuja Engenharia e Geotecnia, 2011.

O aterro sanitário de São Leopoldo possui uma área total de 16,40 ha e atendia uma população de 215.000,00 habitantes conforme a Licença de Operação Nº 4814/2011-DL da Fundação Estadual de Proteção Ambiental - FEPAM. O empreendimento é composto de células para disposição final dos resíduos, central de triagem, sistema de tratamento de lixiviado composto por lagoas e equipamento evaporador e tratamento de resíduos de serviços de saúde através de autoclave.

A área do aterro sanitário constitui de um aterro encerrado ou remediado, um aterro emergencial Fase I, e um aterro emergencial Fase II, ambos também estão encerrados para monitoramento geotécnico (Figura 3.12).

A área de todo o empreendimento é devidamente identificada e cercada, com controle de acesso. A empresa possui um maquinário com escavadeira hidráulica, trator esteira, retroescavadeira e caminhões caçamba para sua operação na destinação de RSU. E, quanto ao manejo dos resíduos, o aterro recebia os RSUs do município de São Leopoldo e de terceiros (comércio), e similares aos RSUs na capacidade máxima de recebimento de 500 toneladas/mês. Além disso, também recebia resíduos dos serviços de saúde para tratamento em autoclave dos municípios de Canoas, Novo Hamburgo e São Leopoldo e de geradores privados

considerando como capacidade máxima para destino ao aterro sanitário (após tratamento) de 50 toneladas/mês.

Atualmente, as células de disposição de RSU, denominada aterro remediado, e aterro emergencial Fase I e Fase II, estão encerradas e monitoradas pela empresa SL Ambiental. Estas células se encontram bastante estabilizadas, devido ao pouco chorume produzido, e pouca produção de gás metano e conseqüentemente a estabilização dos recalques (Figuras 3.13 a 3.19). Conforme a Licença de Operação Nº 5964/2013 – DL da Fundação Estadual de Proteção Ambiental – FEPAM, este aterro sanitário promove a operação relativa à atividade de destinação de resíduos sólidos urbanos através da central de triagem e transbordo, e tratamento de resíduos sólidos dos serviços de saúde, grupo A (exceto A3 e A5) e grupo E, com risco biológico (perfurocortantes), através de autoclave e monitoramento das células de disposição de resíduos sólidos urbanos encerradas.



Figura 3.12 – Vista aérea do Aterro Sanitário de São Leopoldo.
Fonte: Google Earth, 2014.



Figura 3.13 – Vista do Aterro Remediado de São Leopoldo encerrado.
Fonte: do autor.



Figura 3.14 – Vista de cima do Aterro Emergencial Fase II de São Leopoldo encerrado.
Fonte: do autor.



Figura 3.15 – Vista lateral do Aterro Emergencial Fase II de São Leopoldo encerrado.
Fonte: do autor.



Figura 3.16 – Vista aproximada do Aterro Emergencial Fase I de São Leopoldo encerrado.
Fonte: do autor.



Figura 3.17 – Vista de cima do Aterro Emergencial Fase I de São Leopoldo encerrado.
Fonte: do autor.



Figura 3.18– Vista lateral do Aterro E. Fase I de São Leopoldo encerrado.
Fonte: do autor.



Figura 3.19 – Vista lateral do Aterro E. Fase I de São Leopoldo encerrado com o marco superficial P11.

Fonte: do autor.

3.2 Investigação e monitoramento de campo

As etapas realizadas no monitoramento realizado pelas empresas nos dois aterros sanitários estudados, Aterro Central de Resíduos de Recreio (CRR) em Minas do Leão – RS e Aterro de São Leopoldo, estão apresentadas na figura 3.20.

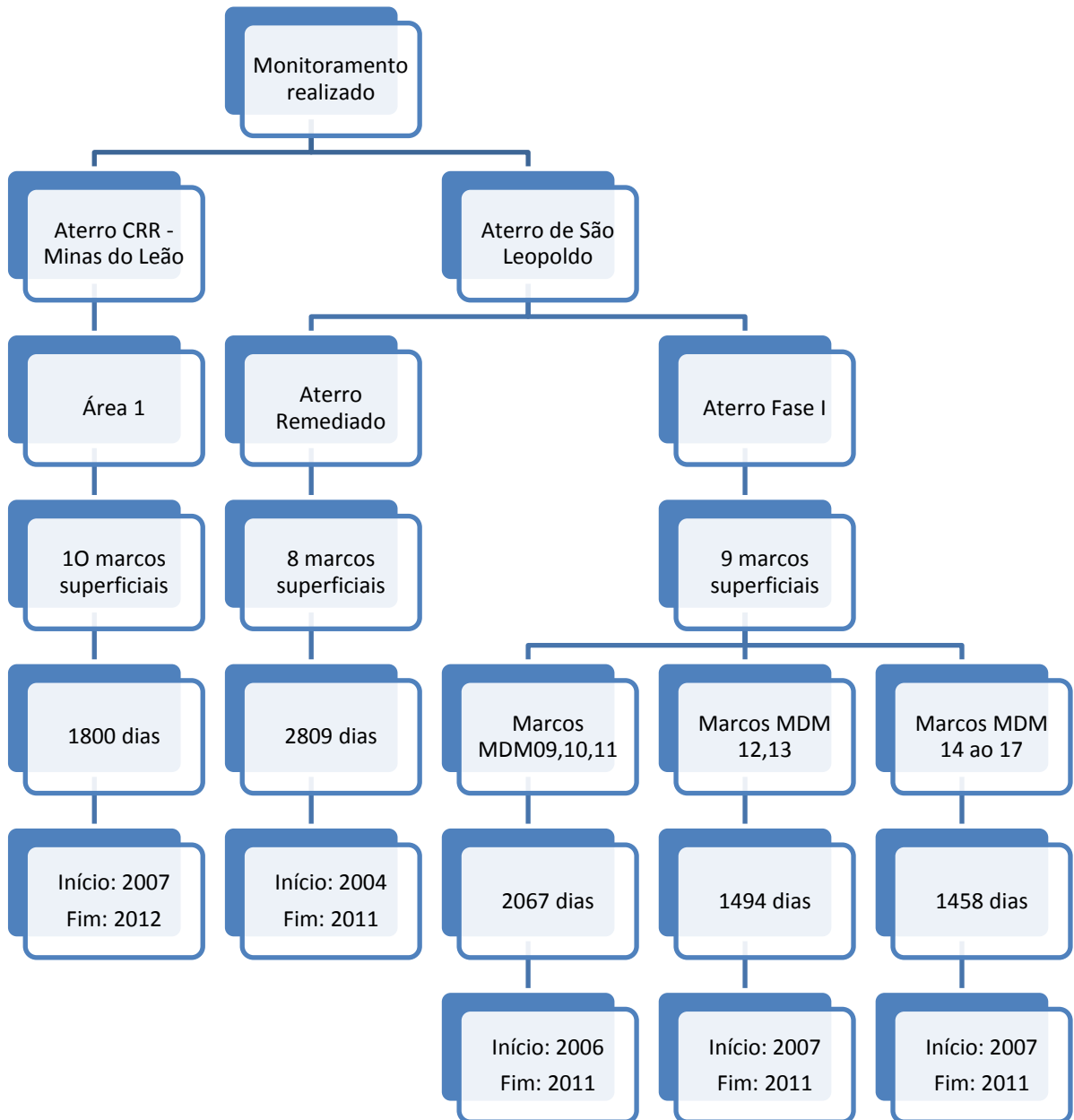


Figura 3.20 – Fluxograma das etapas do monitoramento realizado nos dois aterros sanitários estudados.

3.2.1 Área da Central de Resíduos do Recreio do município de Minas do Leão – RS

As informações sobre o projeto executivo da Central de Resíduos do Recreio foram levantadas e analisadas de forma a identificar as fases de implantação e operação do aterro, os equipamentos e procedimentos operacionais utilizados, os sistemas de drenagem de gases, percolado e cobertura final implantados, dentre outros aspectos, visando verificar a implicação destes aspectos na compressibilidade do maciço sanitário, na previsão de recalques (métodos mais adequados) e na implantação do monitoramento.

O monitoramento geotécnico realizado na Central de Resíduos de Recreio utiliza os seguintes equipamentos: 20 marcos superficiais, sendo 16 marcos instalados na Área 1 e os outros 4 marcos superficiais instalados na Área 2 (Figura 3.21). Para este trabalho, foram analisados os deslocamentos verticais dos 10 marcos superficiais instalados na Área 1, em um monitoramento de 1800 dias, com início no ano de 2007 e término no ano de 2012 (Tabela 3.1). Na figura 3.21 estão identificados os 10 marcos superficiais utilizados neste trabalho e os cortes R-R' e S-S' que estão apresentados na figura 3.22, sendo o corte R-R' dos marcos superficiais MT7R e MT12, o corte S-S' dos marcos MT9R, MT15 e MT13, estas seções são representativas do ano de 2010.

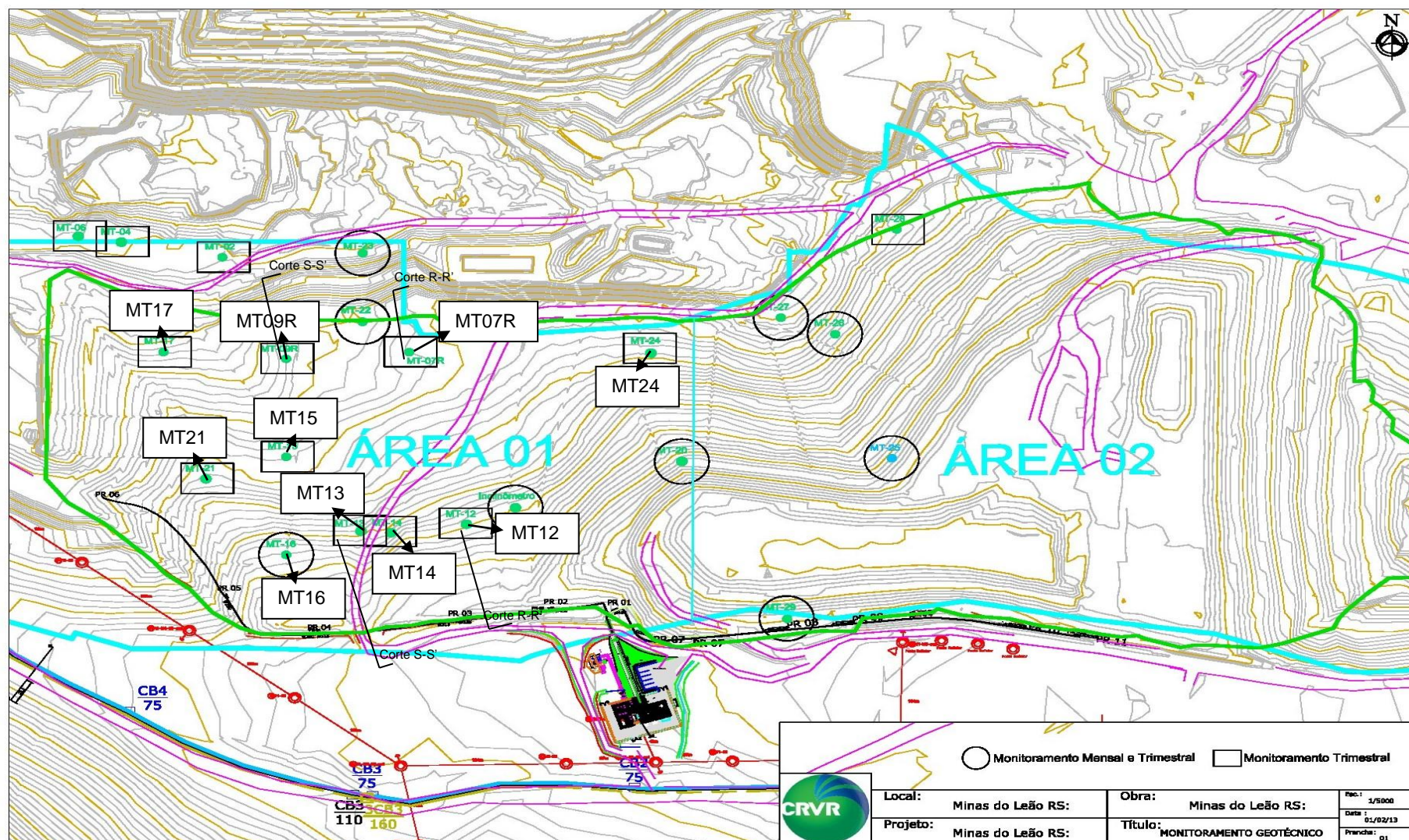


Figura 3.21 – Planta com a situação dos marcos superficiais, em referência às Áreas 1 e 2 do aterro CRR de Minas do Leão.
Fonte: Arquivo da empresa CRVR, 2013.

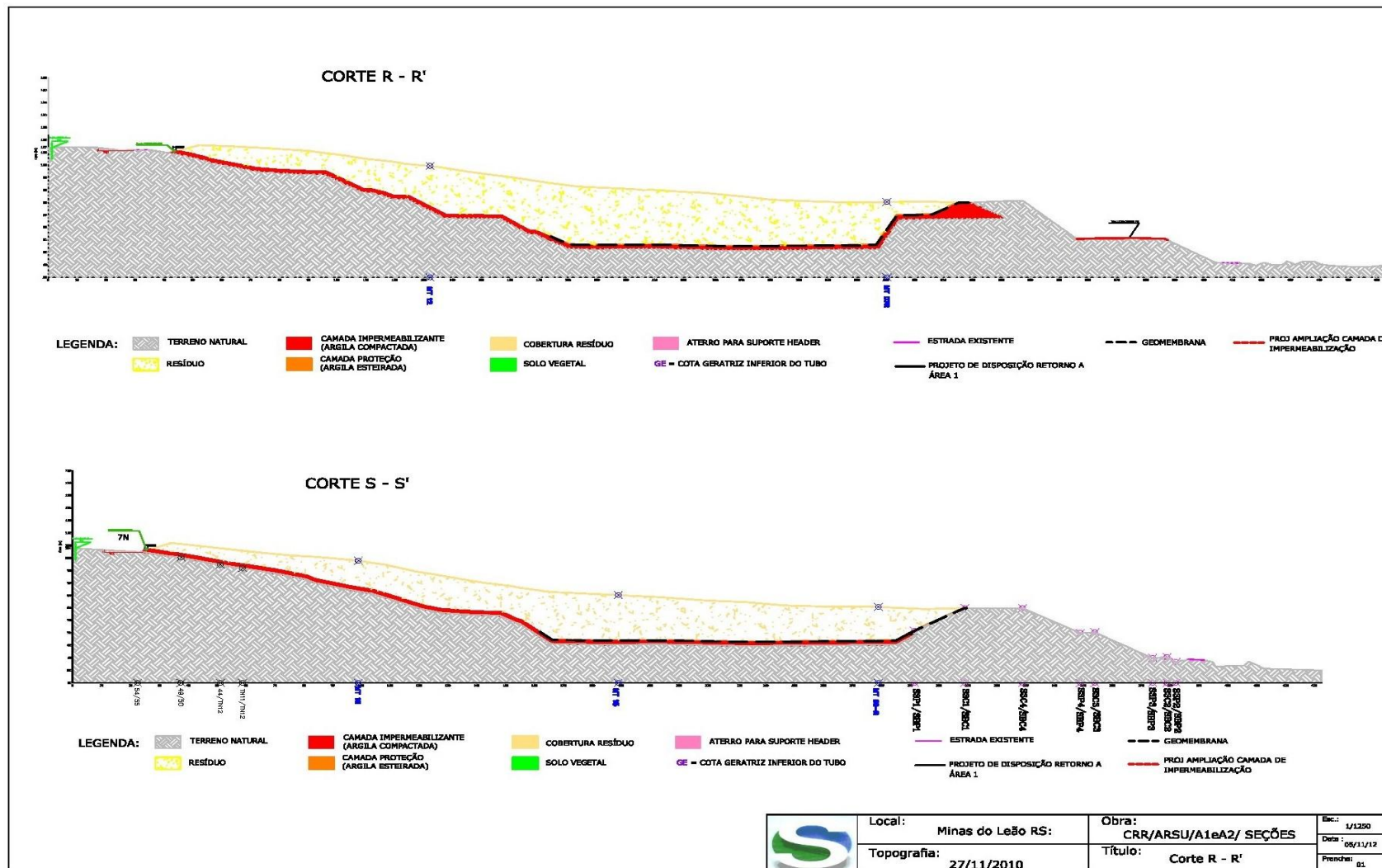


Figura 3.22 – Seções com a topografia do ano de 2010 do aterro sanitário CRR de Minas do Leão – RS.
 Fonte: Arquivo da empresa CRVR, 2010.

Tabela 3.1 – Resumo das cotas, deslocamentos verticais e horizontais dos 10 marcos superficiais.

Marco	Levantamento nesta data: 25/09/2012			Diferença acumulada desde 22/10/2007			
	Coordenadas UTM		Cota (m)	Desloc. Horiz. (m)	Desloc.		Recalque (m)
	E (m)	N (m)			E	N	
MT7R	401.079,16	6.664.398,17	84,011	0,411	-0,27	-0,31	2,9
MT9R	400.986,29	6.664.392,25	78,076	0,329	-0,32	-0,08	2,3
MT12	401.122,04	6.664.242,02	99,593	0,787	-0,21	0,76	1,72
MT13	401.042,47	6.664.236,16	93,337	0,736	-0,11	0,73	1,73
MT14	401.064,83	6.664.234,59	95,976	0,772	-0,23	0,74	1,61
MT15	400.984,46	6.664.303,55	83,775	0,484	-0,19	0,44	2,52
MT16	400.983,08	6.664.215,66	97,742	1,796	-0,28	1,77	3,27
MT17	400.894,14	6.664.398,59	71,404	0,07	-0,01	0,07	0,55
MT21	400.925,65	6.664.283,38	86,172	1,102	-0,51	0,98	3,95
MT24	401.261,99	6.664.398,05	88,454	0,769	-0,15	0,75	1,57

A figura 3.23 ilustra os detalhes de um marco superficial e os procedimentos adotados para o levantamento com estação total utilizados no monitoramento geotécnico realizado pelos técnicos do aterro sanitário.

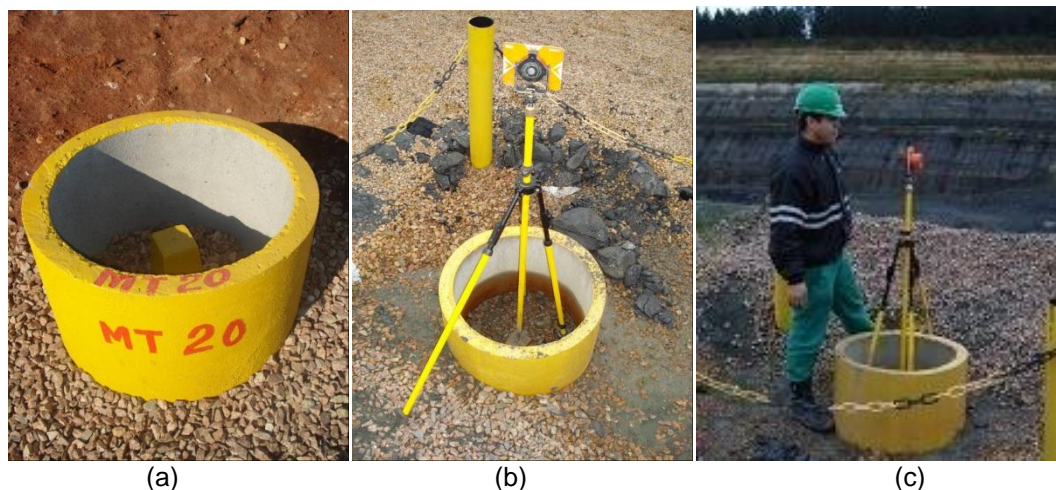


Figura 3.23 – (a) Marco topográfico MT20; (b) Equipamento utilizado na leitura dos marcos; (c) Colaborador da empresa realizando a leitura.
Fonte: DENARDIN, 2013.

As células do aterro foram construídas com alturas de 5m e cobertas com solo compactado, até que seja ocupada toda a base da área impermeabilizada para

disposição dos resíduos. Finalizado este processo, as camadas de 5m são sobrepostas e o material utilizado para cobertura é removido, fazendo com que as camadas de resíduos entrem em contato umas com as outras.

O sistema de drenagem de fundo é projetado de forma que a base do aterro esteja sempre seca, ou seja, sem lixiviado armazenado dentro do maciço de resíduos.

3.2.2 Área do aterro sanitário de São Leopoldo (área antiga)

As informações sobre o projeto executivo do Aterro Sanitário de São Leopoldo – RS foram levantadas e analisadas de forma a identificar as fases de implantação e operação do aterro, os equipamentos e procedimentos operacionais utilizados, os sistemas de drenagem de gases, percolado e cobertura final implantados, dentre outros aspectos, visando verificar a implicação destes aspectos na compressibilidade do maciço sanitário, na previsão de recalques (métodos mais adequados) e na implantação do monitoramento.

O monitoramento geotécnico foi realizado por meio de marcos superficiais instalados na área do aterro sanitário para medição dos recalques, estes marcos foram distribuídos ao longo da área da seguinte forma (Figura 3.24): 8 marcos superficiais (MDM01 a MDM08) para o monitoramento de recalques no Aterro Remediado, sendo monitorado no período de fevereiro de 2004 a março de 2011 (Figura 3.25), e 9 marcos superficiais (MDM09 a MDM17) no Aterro Emergencial Fase I com monitoramento de novembro de 2007 a março de 2011 (Figura 3.26). Para este trabalho foram estudados os 17 marcos superficiais na previsão de recalques das áreas do aterro remediado e do aterro emergencial Fase I.

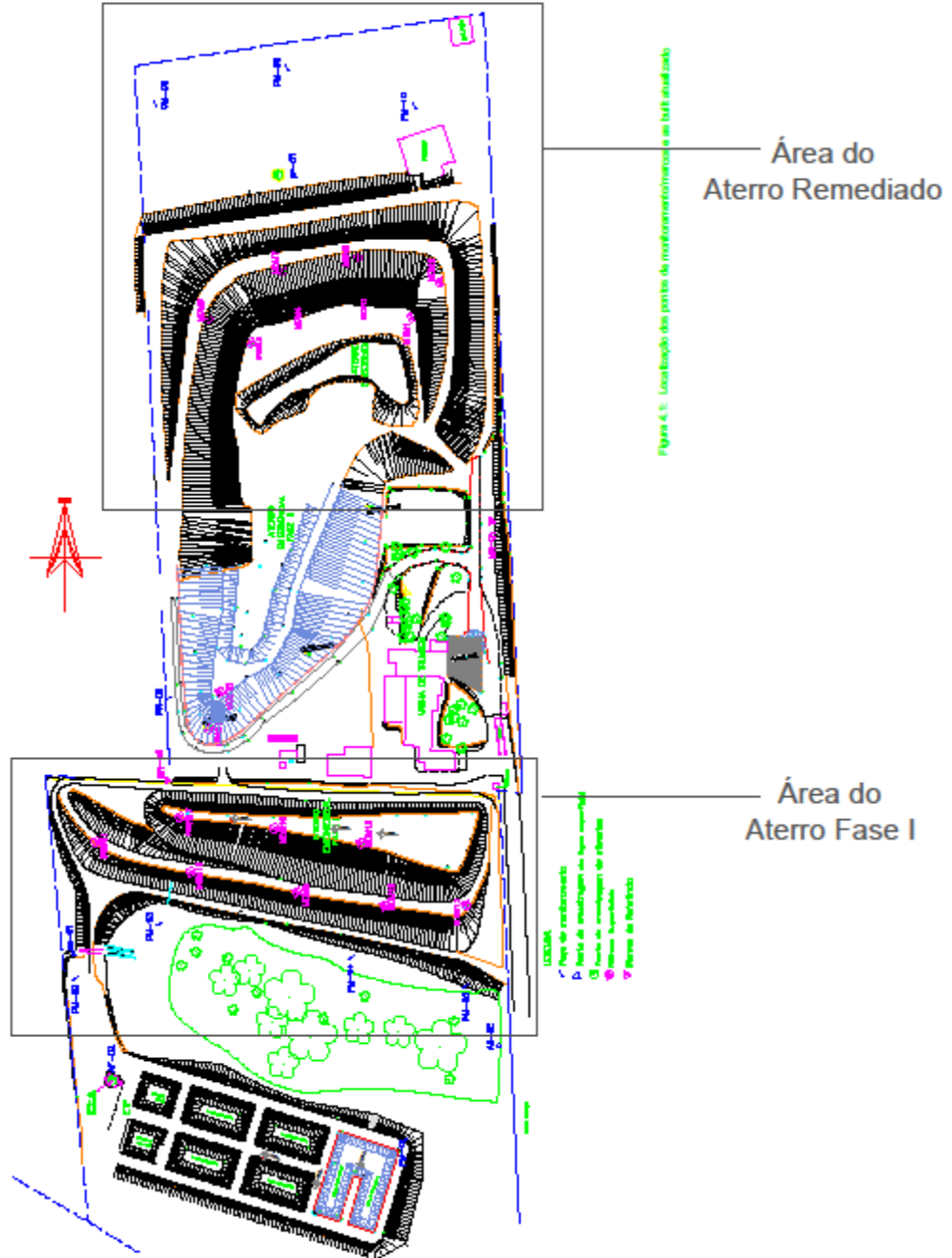


Figura 3.24 – Planta com a distribuição dos marcos superficiais na área do aterro sanitário de São Leopoldo.
 Fonte: arquivo da empresa SL Ambiental.

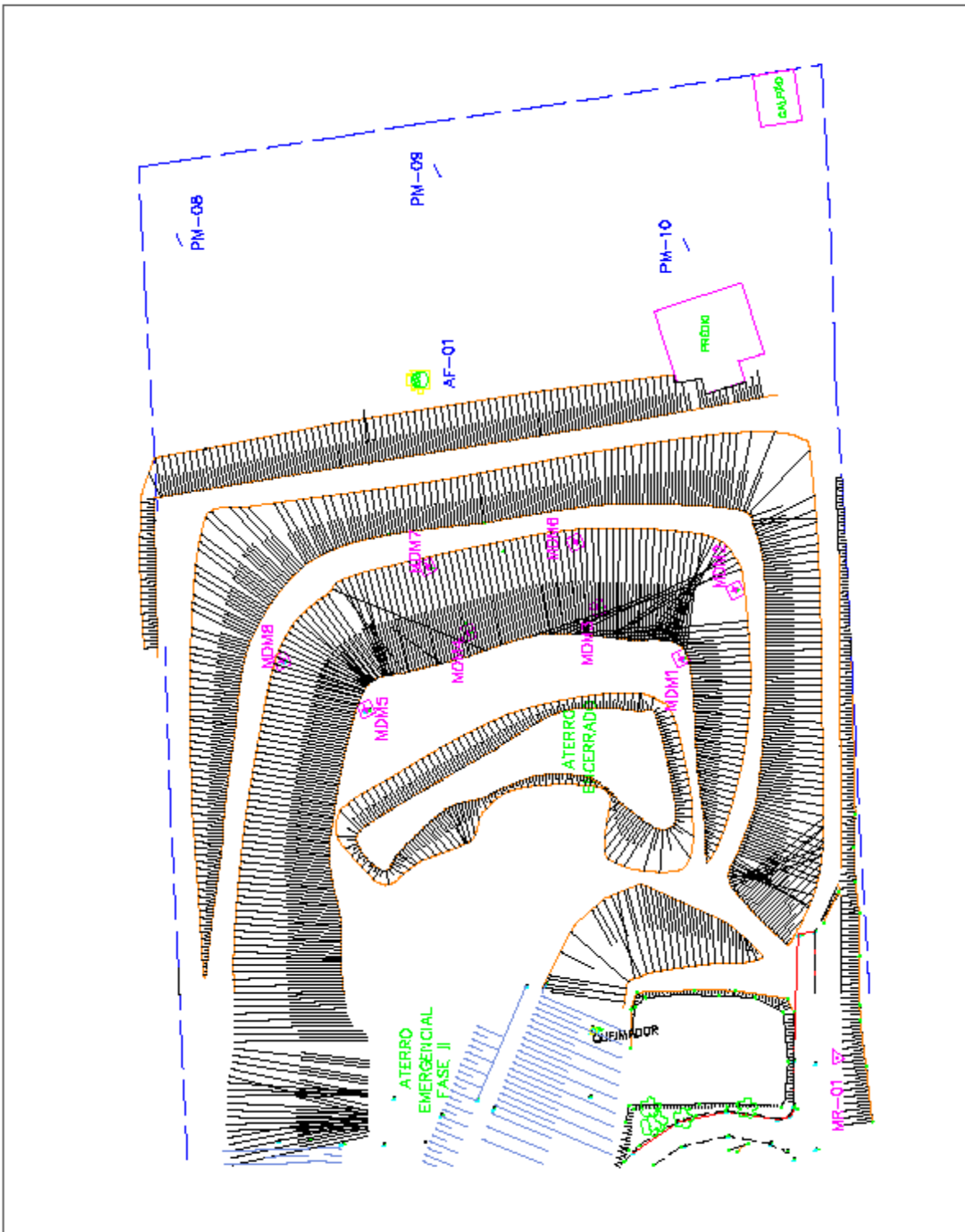


Figura 3.25 – Área ampliada do Aterro Remediado de São Leopoldo.
 Fonte: Arquivo da empresa SL Ambiental.

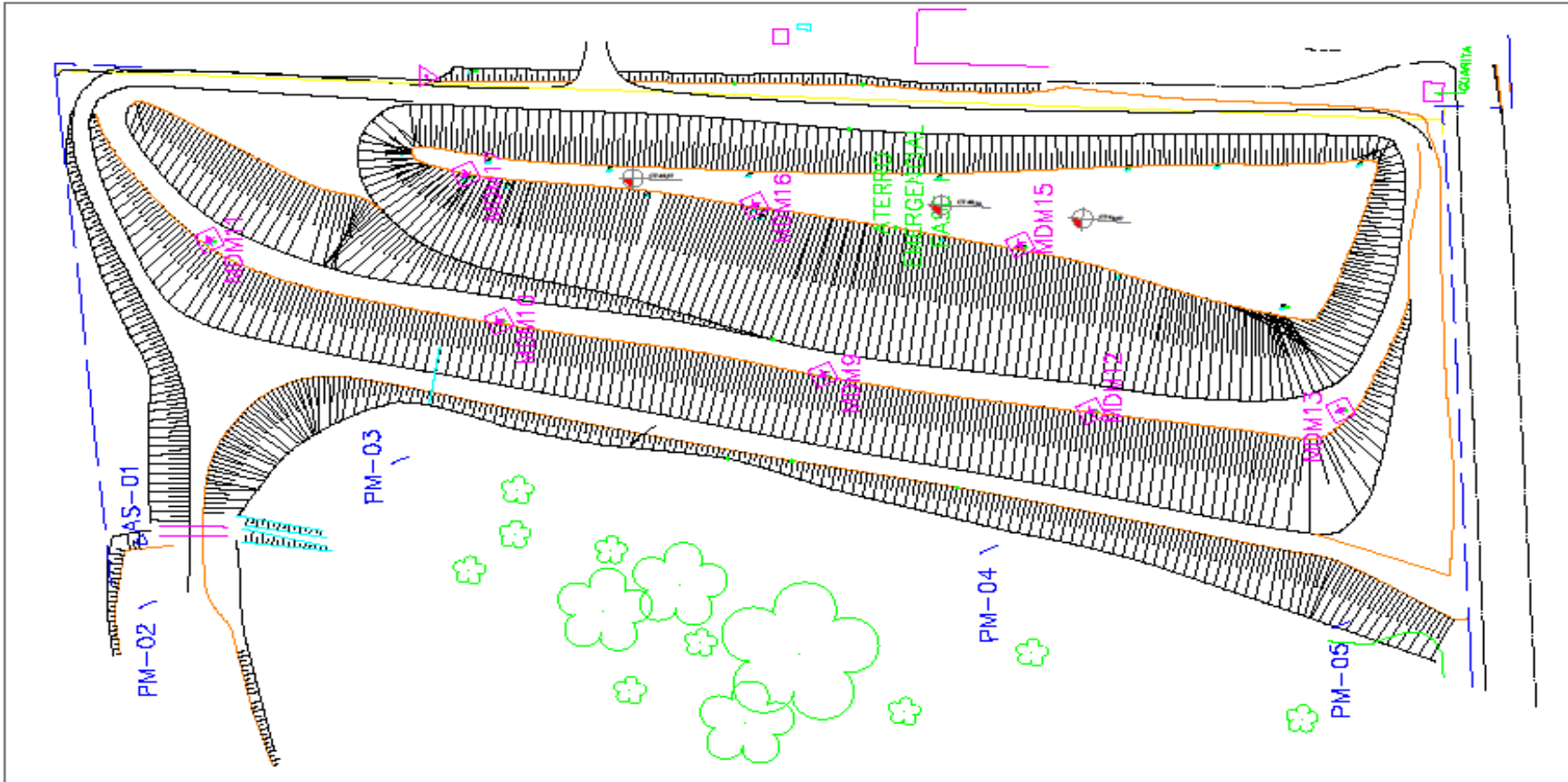


Figura 3.26 – Área ampliada do Aterro Fase I de São Leopoldo.
Fonte: Arquivo da empresa SL Ambiental.

Nas tabelas 3.2 e 3.3 estão apresentados os recalques dos 9 marcos do Aterro Emergencial Fase I no levantamento do dia 05 de novembro de 2007 e do dia 01 de março de 2011, e dos 8 marcos do Aterro Remediado no levantamento do dia 23 de fevereiro de 2004 e do dia 01 de março de 2011, respectivamente.

Tabela 3.2 – Recalque dos 9 marcos do Aterro Emergencial Fase I do monitoramento inicial e final.

Levantamento nesta data: 05/11/2007					Levantamento nesta data: 01/03/2011			
Marco	Coordenadas		Cota (m)	Recalque (m)	Coordenadas		Cota (m)	Recalque (m)
	Y (m)	X (m)			Y (m)	X (m)		
MDM09	4.922,50	4.840,23	88,024	0,329	4922,358	4840,104	87,754	0,599
MDM10	4.961,15	4.792,89	87,782	0,300	4960,997	4792,743	87,440	0,642
MDM11	5.001,71	4.753,67	87,676	0,253	5001,593	4753,533	87,475	0,454
MDM12	4.891,95	4.880,18	88,784	0,002	4891,791	4880,057	88,296	0,486
MDM13	4.870,04	4.921,10	90,729	0,008	4869,983	4920,807	90,124	0,597
MDM14	4.895,22	4.922,26	96,216	0,000	4894,419	4921,886	94,026	2,190
MDM15	4.929,34	4.885,57	98,167	0,000	4928,742	4885,013	96,110	2,057
MDM16	4.960,22	4.846,20	98,878	0,000	4959,527	4845,747	96,981	1,897
MDM17	4.991,41	4.802,24	96,959	0,000	4990,882	4801,800	95,262	1,697

Tabela 3.3 – Recalque dos 8 marcos do Aterro Remediado do monitoramento inicial e final.

Levantamento nesta data: 23/02/2004					Levantamento nesta data: 01/03/2011			
Marco	Coordenadas		Cota (m)	Recalque (m)	Coordenadas		Cota (m)	Recalque (m)
	Y (m)	X (m)			Y (m)	X (m)		
MDM01	5.176,61	5.052,75	103,665	0,000	5176,648	5052,691	102,981	0,684
MDM02	5.186,47	5.075,63	96,496	0,000	5186,514	5075,709	96,401	0,095
MDM03	5.200,64	5.038,00	100,426	0,000	5200,963	5038,088	99,439	0,987
MDM04	5.212,38	5.001,77	99,677	0,000	5212,621	5001,800	98,908	0,769
MDM05	5.206,69	4.964,99	100,574	0,000	5207,007	4964,984	99,562	1,012
MDM06	5.220,75	5.041,74	92,691	0,000	5220,796	5041,774	92,460	0,231
MDM07	5.234,41	5.000,66	92,613	0,000	5234,424	5000,647	92,306	0,307
MDM08	5.230,94	4.950,70	91,003	0,000	5230,990	4950,748	90,824	0,179

3.3 Modelos de previsão de recalques

Foi realizada uma análise comparativa dos métodos de previsão de recalques, existentes na literatura nacional e internacional, mais utilizados no meio geotécnico. Os métodos foram comparados a fim de subsidiar a escolha dos que podem ser utilizados nos casos da Central de Resíduos de Recreio do município de Minas do Leão – RS e do Aterro Sanitário de São Leopoldo – RS.

Foram avaliadas as premissas de cada método, o número e natureza dos parâmetros utilizados, a forma de obtenção dos parâmetros e a precisão dos métodos na estimativa de recalques, com base em resultados de aplicação dos métodos em aterros existentes. Foram escolhidos oito modelos de previsão de recalques para serem analisados nesta pesquisa, Modelo de Yen e Scanlon (1975), Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998), Modelo exponencial de *creep* (Potência) de Edil et al. (1990), Modelo de Bjarngard e Edgers (1990), Modelo de Meruelo, Modelo de Gibson e Lo (1961), Modelo de Gandolla et al. (1992) e o Modelo Observacional Asaoka (1978). Estes modelos estão descritos no item 2.4 da revisão bibliográfica.

Devido à indisponibilidade de alguns parâmetros de cálculo necessários (medidas de gases, chorume, biodegradação dos resíduos, entre outros) e pela dificuldade de saber a sequência construtiva dos dois aterros sanitários estudados foram escolhidos estes oito modelos de previsão de recalques, pois se encaixam nos dados históricos disponibilizados pelos aterros.

3.4 Análise e comparação dos resultados

Foi realizada uma análise e comparação dos resultados das previsões de recalques com os recalques reais dos dois aterros sanitários a fim de avaliar o comportamento e a sensibilidade dos modelos, ou seja, a calibração dos modelos a partir de dados reais de recalques. Com os parâmetros obtidos nos diversos modelos utilizados foram comparados com os dados da literatura de outros aterros sanitários.

Na calibração dos quatro modelos de previsão de recalques, Modelo exponencial de *creep* (Potência) Edil et al. (1990), Modelo de Gibson e Lo (1961), Modelo de Meruelo e o Modelo de Gandolla et al. (1992), foi utilizado o método dos mínimos quadrados que objetiva o ajuste de curvas entre o recalque estimado pelo modelo e o recalque medido. Para aplicação deste método foi utilizado o programa *Microsoft Excel* que dispõe da ferramenta Solver, esta ferramenta estima automaticamente os parâmetros requeridos para cada modelo buscando a melhor aproximação entre as curvas teóricas e experimentais.

O Solver faz parte de um conjunto de programas algumas vezes chamado de ferramentas de análise hipotética. Com o Solver pode ser localizado o valor ideal para uma fórmula em uma célula, denominada célula de destino, em uma planilha. O Solver trabalha com um grupo de células relacionadas direta ou indiretamente com a fórmula na célula de destino. Ele ajusta os valores nas células variáveis que for especificada, denominadas células ajustáveis, para produzir o resultado especificado na fórmula da célula de destino. E ainda podem ser aplicadas restrições para restringir os valores que o Solver poderá usar no modelo e as restrições podem se referir a outras células que afetem a fórmula da célula de destino.

Neste trabalho, foi utilizado a ferramenta Solver para aplicar o método dos mínimos quadrados a fim de ajustar as curvas de recalques medidos e recalques estimados pelos modelos de previsão de recalques, ou seja, calibrar os modelos.

No Solver, a célula de destino foi definida com o valor da soma dos mínimos quadrados, sendo considerada a mínima possível e nas células variáveis foram definidas pelos parâmetros das equações dos modelos de previsão que se deseja encontrar. Para o Modelo exponencial de *creep* (Potência) Edil et al. (1990), os parâmetros das células variáveis que se desejam estimar são compressibilidade de referência “m” e taxa de compressão “n” e para o Modelo de Gibson e Lo (1961), os parâmetros são compressibilidade primária do resíduo “a”, compressibilidade secundária do resíduo “b” e taxa de compressão secundária “ λ/b ” e para o Modelo de Meruelo, os parâmetros são coeficiente de perda de massa “ α ” e coeficiente de hidrólise “Kh” e para o Modelo de Gandolla et al. (1992), os parâmetros são “a” e “k” constantes do modelo.

Foi utilizada a proposta de Marques (2001), que compara o recalque medido com o previsto, verificando o desvio (D) obtido entre os valores calculados e observados, conforme equação 3.1. Esta proposta tem como objetivo verificar a

aderência dos modelos e comparar os modelos entre si. Para este trabalho foram calculados os desvios do recalque final.

$$D_{i,j} = \frac{\Delta H_{calc.(i,j)} - \Delta H_{obs,j}}{\Delta H_{obs,j}} \times 100 \quad (3.1)$$

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 .

Por fim, foi utilizado o gráfico de correlação entre os dados medidos e previstos, em termos de recalques ou de deformações, para demonstrar e verificar a aderência dos modelos de previsão de recalques estudados neste trabalho e compará-los entre si.

4 ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos por diversos métodos de previsão apresentados na literatura e análises realizadas para os dois aterros sanitários em estudo, Central de Resíduos do Recreio do município de Minas do Leão – RS e Aterro Sanitário de São Leopoldo – RS.

4.1 Resultados gerais

Os estudos de compressibilidade de resíduos sólidos foram realizados com base nos controles e levantamentos topográficos realizados pelas empresas Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), e SL Ambiental, após o fechamento da célula da Área 1 do aterro em Minas do Leão, e após o fechamento das células do Aterro Remediado e Fase I, do aterro sanitário de São Leopoldo, respectivamente. Estes estudos envolveram a análise e verificação de desempenho dos modelos de compressibilidade propostos por Yen e Scanlon (1975), Ling et al. (1998), Edil et al. (1990), Bjarngard e Edgers (1990), Diaz et al. (1995), Gibson e Lo (1961), Gandolla et al. (1992) e por último o método observacional de Asaoka (1978). Na sequência, estão descritas as diversas análises e resultados destes estudos.

Na Área 1 do aterro sanitário Central de Resíduos de Recreio (CRR), a disposição de resíduos teve seu início no ano de 2001 e seu término no ano de 2007, após seu fechamento, foram instalados 16 marcos superficiais para o monitoramento geotécnico do aterro sanitário, sendo que neste estudo foram utilizados 10 marcos para verificar o desempenho dos modelos de previsão de recalques existentes na literatura, distribuídos ao longo da área como representada na figura 4.1 que apresenta a topografia de fundo da área do aterro. A tabela 4.1 apresenta os parâmetros, espessura de resíduos (H), frequência de leituras, deslocamentos verticais finais (recalques), deformações e os deslocamentos horizontais dos marcos superficiais estudados. Na figura 4.2, estão apresentados os

deslocamentos horizontais dos marcos MT16 e MT21 que tiveram os maiores valores. O deslocamento horizontal variou de 0,07 a 1,80m e o deslocamento vertical (recalques) variou de 0,55 a 3,95m, observa-se que para os marcos MT12, MT13, MT14, MT16 e MT24 obtiveram em média 48% de deslocamento horizontal em relação aos recalques, ou seja, para estes marcos superficiais os deslocamentos horizontais foram bastante significativos, pois estão localizados nas encostas das células do aterro, enquanto que para os outros marcos MT7R, MT9R, MT15, MT17 e MT21 os deslocamentos horizontais foram menores em relação aos recalques, sendo em média de 17,4%.

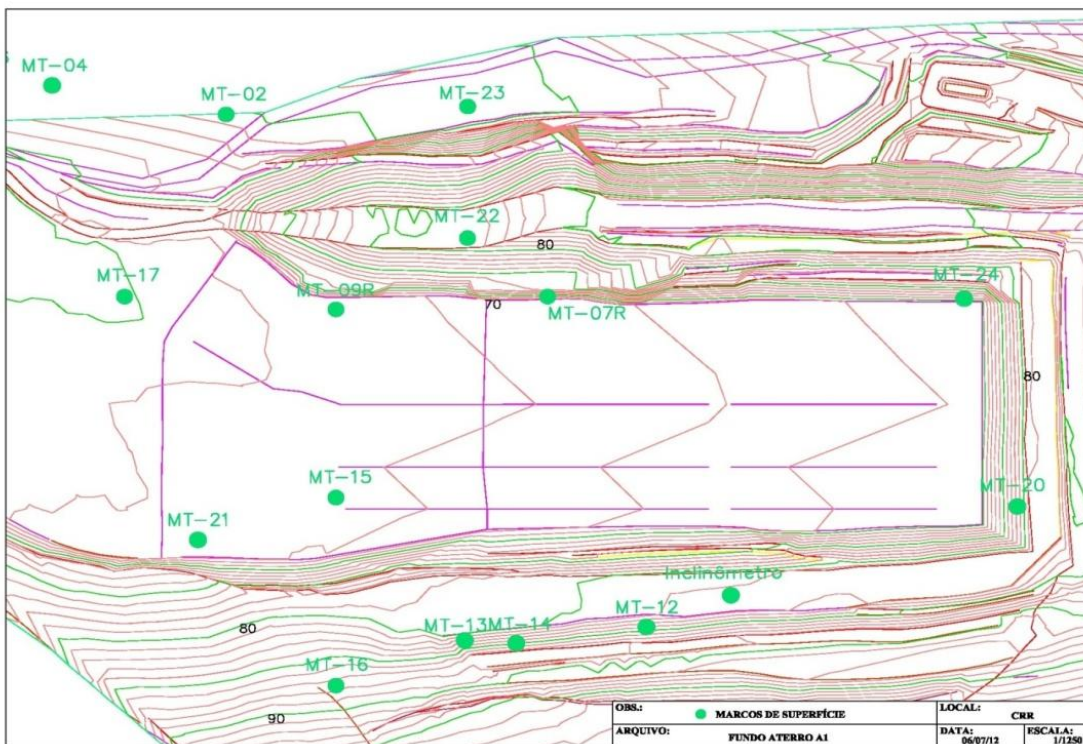


Figura 4.1 – Planta da topografia de fundo da Área 1 do aterro CRR de Minas do Leão.

Fonte: arquivo da empresa CRVR, 2012.

Tabela 4.1 – Resumos dos parâmetros analisados dos 10 marcos superficiais do aterro CRR de Minas do Leão.

Marco	H (m)	Frequência das leituras	Desl.Vertical ρ (m)	Def. (%)	Desl.Horizontal (m)
MT7R	20	* semanal: 22/10/2007 a 26/01/2008 * mensal: 26/01/2008 a 04/03/2009 * trimestral: 04/03/2009 a 25/09/2012	2,90	14,50	0,41
MT9R	14	Idem MT7R	2,30	16,43	0,33
MT12	15	Idem MT7R	1,72	11,47	0,79
MT13	13	Idem MT7R	1,73	13,31	0,74
MT14	13	Idem MT7R	1,61	12,38	0,77
MT15	20	Idem MT7R	2,52	12,60	0,48
MT16	13,5	* semanal: 22/10/2007 a 18/12/2008 * mensal: 18/12/2008 a 26/12/2011 * trimestral: 26/12/2011 a 25/09/2012	3,27	24,22	1,80
MT17	13	Idem MT7R	0,55	4,23	0,07
MT21	24	Idem MT7R	3,95	16,46	1,10
MT24	20	Idem MT7R	1,57	7,85	0,77

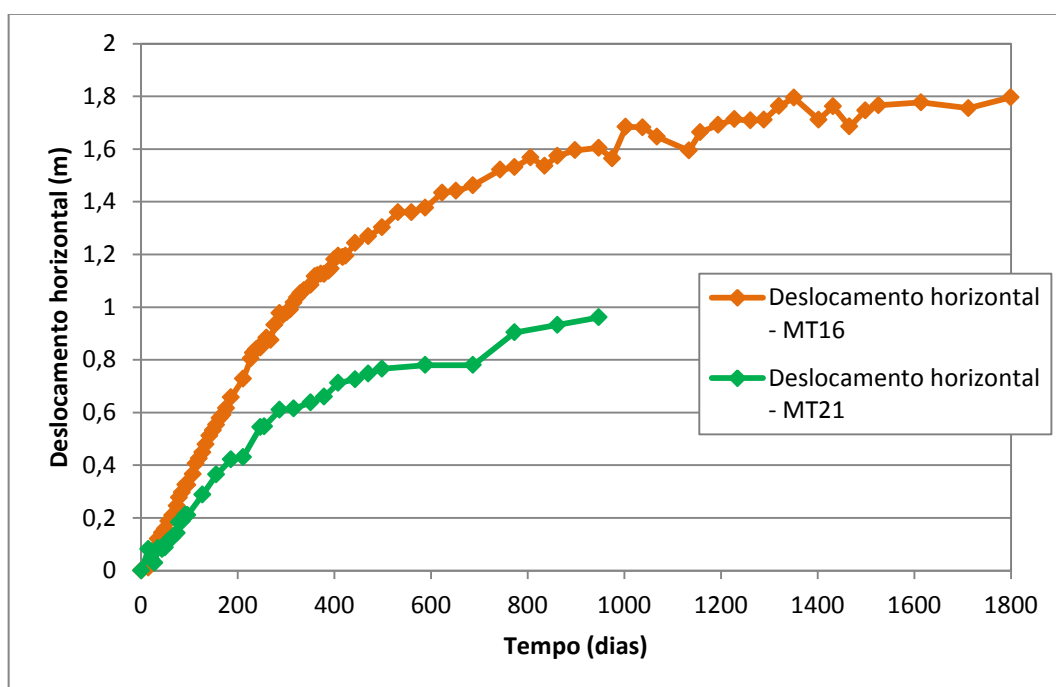


Figura 4.2 – Deslocamento horizontal dos marcos MT16 e MT21 do aterro CRR de Minas do Leão.

Quanto ao aterro sanitário de São Leopoldo, foram analisados no total 17 marcos superficiais em duas áreas distintas do mesmo, sendo que 8 marcos

superficiais (MDM01 a MDM08) na área do Aterro Remediado, com leituras de campo entre fevereiro de 2004 e novembro de 2011 (Tabela 4.2); e 9 marcos superficiais (MDM09 a MDM17) na área do Aterro Emergencial Fase I, com leituras de campo entre março de 2006 e novembro de 2011 para os marcos MDM09, MDM10 e MDM11, de setembro de 2007 a novembro de 2011, para os marcos MDM12 e MDM13, e de novembro de 2007 a novembro de 2011, para os marcos MDM14, MDM15, MDM16 e MDM17 (Tabela 4.3).

Tabela 4.2 – Resumo dos parâmetros analisados para os 8 marcos superficiais da célula do Aterro Remediado de São Leopoldo.

Marco	H (m)	Frequência das leituras	Desl. Vertical ρ (m)	Def. (%)	Desl. Horizontal (m)
MDM01	16		0,71	4,46	0,11
MDM02	8		0,10	1,25	0,05
MDM03	16	*Trimestral: 23/02/2004 a	1,00	6,26	0,38
MDM04	16	06/07/2005	0,77	4,82	0,25
MDM05	16	*Mensal: 06/07/2005 a	1,03	6,41	0,37
MDM06	8	02/11/2011	0,24	2,99	0,07
MDM07	8		0,32	4,04	0,08
MDM08	8		0,21	2,59	0,14

Tabela 4.3 – Resumo dos parâmetros analisados para os 9 marcos superficiais da célula do Aterro Fase I de São Leopoldo.

Marco	H (m)	Frequência das leituras	Desl. Vertical ρ (m)	Def. (%)	Desl. Horizontal (m)
MDM09	6,4	*Mensal: 06/03/2006 a 02/11/2011	0,63	9,88	0,34
MDM10	6,1	Idem MDM09	0,68	11,08	0,40
MDM11	5,9	Idem MDM10	0,49	8,22	0,27
MDM12	6,8	*Mensal: 30/09/2007 a 02/11/2011	0,51	7,43	0,27
MDM13	8,7	Idem MDM12	0,67	7,67	0,38
MDM14	14,2	*Semanal: 05/11/2007 a 13/12/2007 *Mensal: 13/12/2007 a 02/11/2011	2,36	16,61	0,96
MDM15	16,2	Idem MDM14	2,20	13,57	0,89
MDM16	16,9	Idem MDM15	2,07	12,22	0,90
MDM17	15,0	Idem MDM16	1,80	12,03	0,72

As figuras 4.3 e 4.4 demonstram as curvas dos deslocamentos horizontais versus tempo dos marcos superficiais que apresentaram maiores valores. Na célula do Aterro Remediado os marcos que obtiveram maiores deslocamentos foram MDM03 e MDM05. Pode ser observado que os pequenos recalques medidos deve-se aos resíduos serem muito antigo, pois esta área do aterro foi um antigo lixão, portanto, grande parte dos recalques não foram medidos (Tabela 4.2). O deslocamento horizontal variou de 0,05 a 0,38m e o deslocamento vertical (recalques) variou de 0,10 a 1,03m, observa-se que para os marcos MDM08, MDM05, MDM04, MDM03 e MDM02 obtiveram em média 44,6% de deslocamento horizontal em relação aos recalques, já para os marcos MDM01, MDM06 e MDM07 obtiveram em média 23,2% de deslocamento horizontal em relação aos recalques.

Na célula do Aterro Emergencial Fase I, os marcos que obtiveram maiores deslocamentos foram MDM14, MDM15 e MDM16 (Tabela 4.3). O deslocamento horizontal variou de 0,27 a 0,96m e o deslocamento vertical (recalques) variou de 0,49 a 2,36m, observa-se que para todos os marcos superficiais obtiveram em média 49,2% de deslocamento horizontal em relação aos recalques.

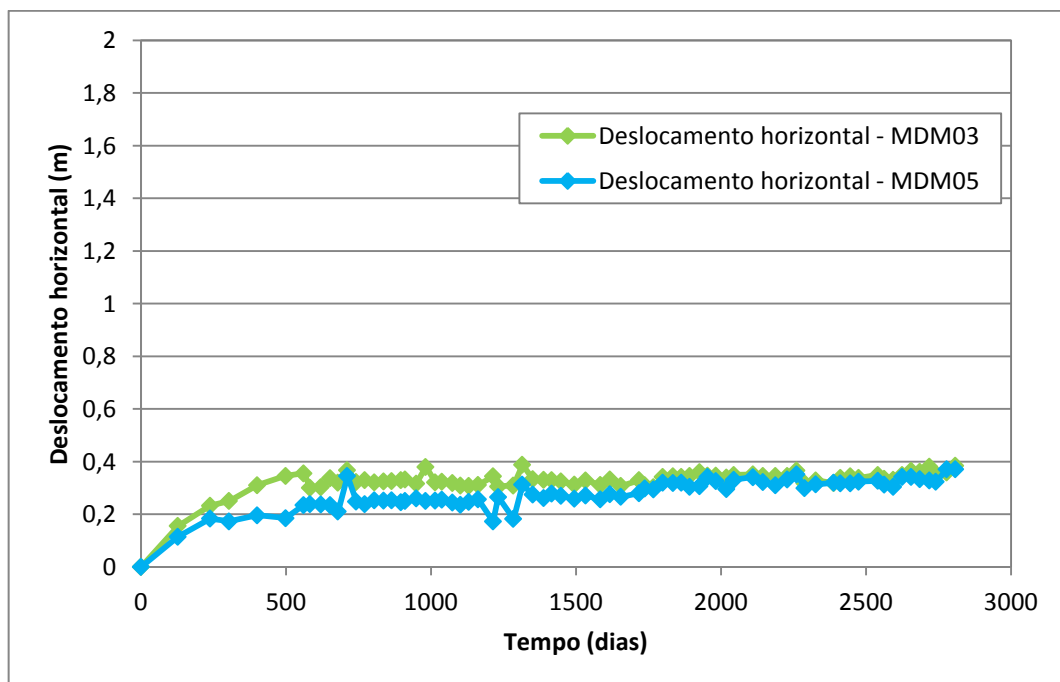


Figura 4.3 – Deslocamento horizontal dos marcos MDM03 e MDM05 da célula do Aterro Remediado de São Leopoldo.

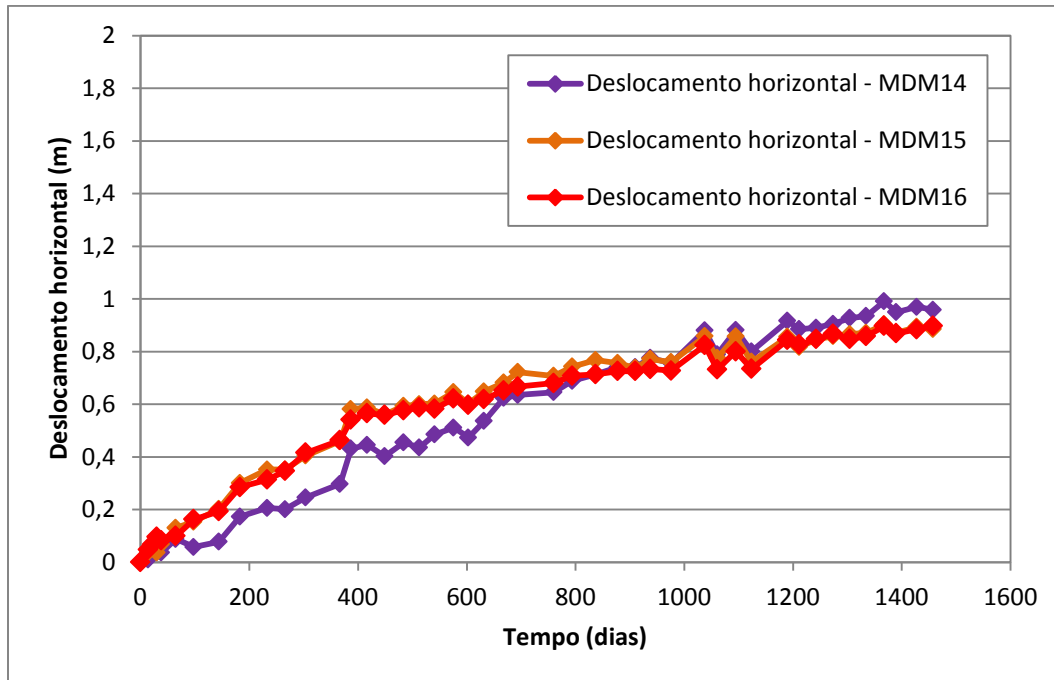


Figura 4.4 – Deslocamento horizontal para os marcos MDM 14, MDM15 e MDM16 da célula do Aterro Fase I de São Leopoldo.

Para a verificação de desempenho dos modelos utilizados neste trabalho com os dados dos 10 marcos superficiais analisados no aterro CRR em Minas do Leão, e com os dados dos 17 marcos no aterro de São Leopoldo, foi utilizada a proposta de Marques (2001), descrita no item 3.4 da metodologia deste trabalho, que compara os recalques medidos com os previstos, verificando o desvio (D) obtido entre os valores calculados e observados.

Uma limitação da análise realizada neste trabalho foi o não conhecimento da sequência construtiva das diversas células que constituem a Área 1 do aterro CRR em Minas do Leão, e das células do aterro de São Leopoldo, assim como, a composição inicial dos resíduos e a sua posterior degradação. Para realização das análises, algumas características e hipóteses de cálculo tiveram que ser inicialmente estabelecidas, incluindo:

- (a) Sequência construtiva: o histórico da construção do aterro CRR da Área 1 não foi obtido de maneira satisfatória, ou seja, sabe-se que o início da disposição de resíduo começou no ano de 2001 e o monitoramento em 2007. Também se desconhece o início e o término de cada célula de resíduo. Isso também ocorre nas células do aterro de São Leopoldo, ou seja, sabe-se que

a célula Aterro Remediado foi um antigo lixão do município, que começou a ser monitorado no ano de 2004 após seu fechamento. Já a célula Aterro Fase I teve seu início da disposição de resíduos sólidos no ano de 2002 e seu monitoramento no ano de 2006 após seu encerramento.

- (b) Altura da coluna de resíduos (H) foi obtida a partir das cotas do fundo do aterro e das cotas dos marcos no início do monitoramento.
- (c) Tensões verticais efetivas sob cada marco superficial e atuantes a meia altura do maciço de resíduos ($H/2$), foram avaliadas, de maneira simplificada adotando como peso específico dos resíduos igual a 10 kN/m^3 .
- (d) Não foram consideradas as tensões verticais devido ao efeito das sobrecargas, pois não havia disponibilidade dos dados necessários.
- (e) O parâmetro tempo inicial aplicado nos modelos foi estabelecido como sendo o tempo do início das leituras após o fechamento da Área 1 do aterro CRR em Minas do Leão, e das células Aterro Remediado, e Fase I, do aterro de São Leopoldo.

No aterro CRR em Minas do Leão, os recalques observados variam aproximadamente de 0,55 a 4,0m, correspondendo a uma deformação entre 4 e 24% em relação a altura inicial dos resíduos, estes valores estão dentro da faixa de valores encontrada na literatura, conforme tabela 2.6 do item 2.3.4 da Revisão Bibliográfica deste trabalho. A figura 4.5 apresenta a curva de recalque medido versus tempo e a figura 4.6 apresenta a curva de deformação medida versus logaritmo do tempo, ambas para os 10 marcos superficiais analisados neste trabalho.

As taxas de deformação nos meses iniciais situaram-se entre 1 e 7mm/dia, onde os valores mais elevados foram verificados nos marcos MT16 e MT21 que apresentaram os maiores recalques. No período de monitoramento (1800 dias), as taxas de deformação apresentaram uma redução média da ordem 3 vezes (taxas atuais entre 0,3 e 2mm/dia) com tendência de estabilização, conforme apresentado na figura 4.7.

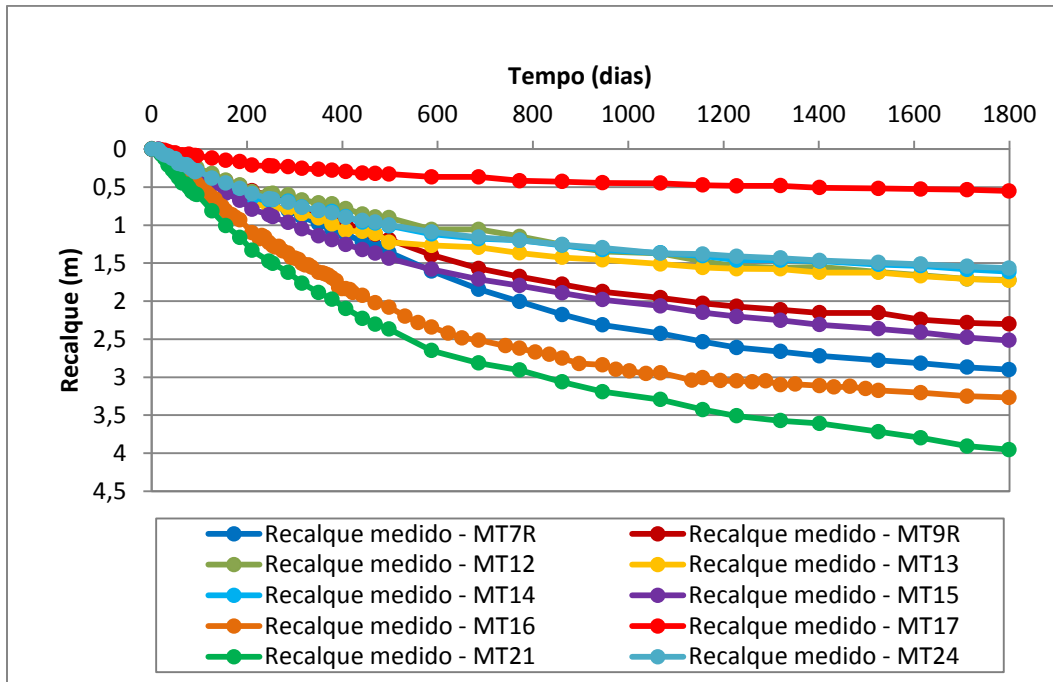


Figura 4.5 – Curva recalque medido vs. tempo para os 10 marcros analisados do aterro CRR de Minas do Leão.

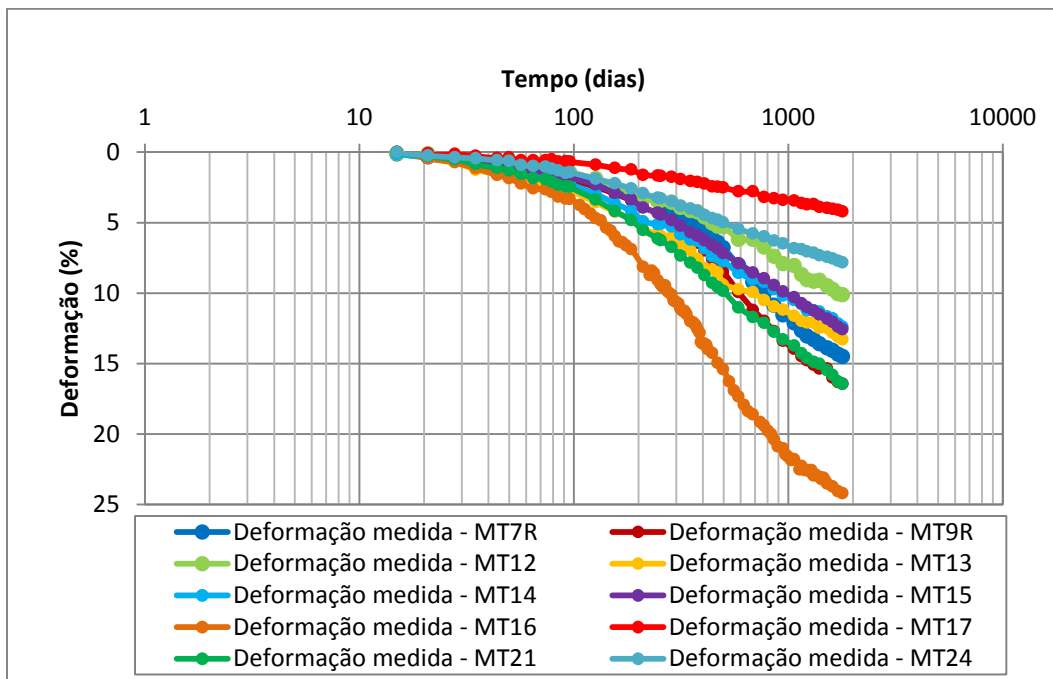


Figura 4.6 – Curva deformação medida vs. log do tempo para os 10 marcros analisados do aterro CRR de Minas do Leão.

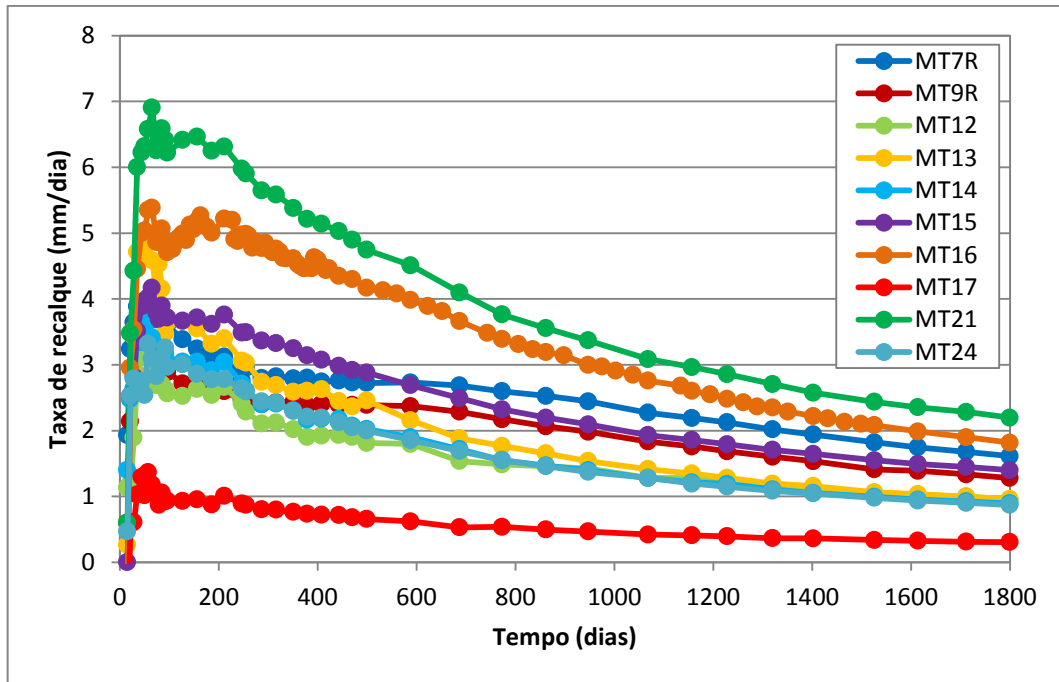


Figura 4.7 – Taxas de recalque medidas para os 10 marcos superficiais analisados do aterro CRR de Minas do Leão.

No aterro sanitário de São Leopoldo, os recalques observados na célula do Aterro Remediado variam aproximadamente entre 0,1 a 1,03m, correspondendo a uma deformação entre 1 a 5,8% em relação à altura inicial dos resíduos, estes valores estão abaixo da faixa de valores encontrada na literatura, conforme tabela 2.6 do item 2.3.4 da Revisão Bibliográfica deste trabalho. A figura 4.8 apresenta a curva de recalque medido versus tempo e a figura 4.9 mostra a curva de deformação medida versus logaritmo do tempo, ambas para os 8 marcos superficiais analisados na célula do Aterro Remediado.

As taxas de deformação nos meses iniciais situaram-se entre 0,008 e 2,2mm/dia, sendo que os valores mais elevados foram verificados nos marcos MDM03 e MDM05 que apresentaram os maiores recalques. No período de monitoramento (2809 dias), as taxas de deformação apresentaram uma redução média da ordem 4 vezes (taxas atuais entre 0,07 e 0,4mm/dia) com tendência de estabilização.

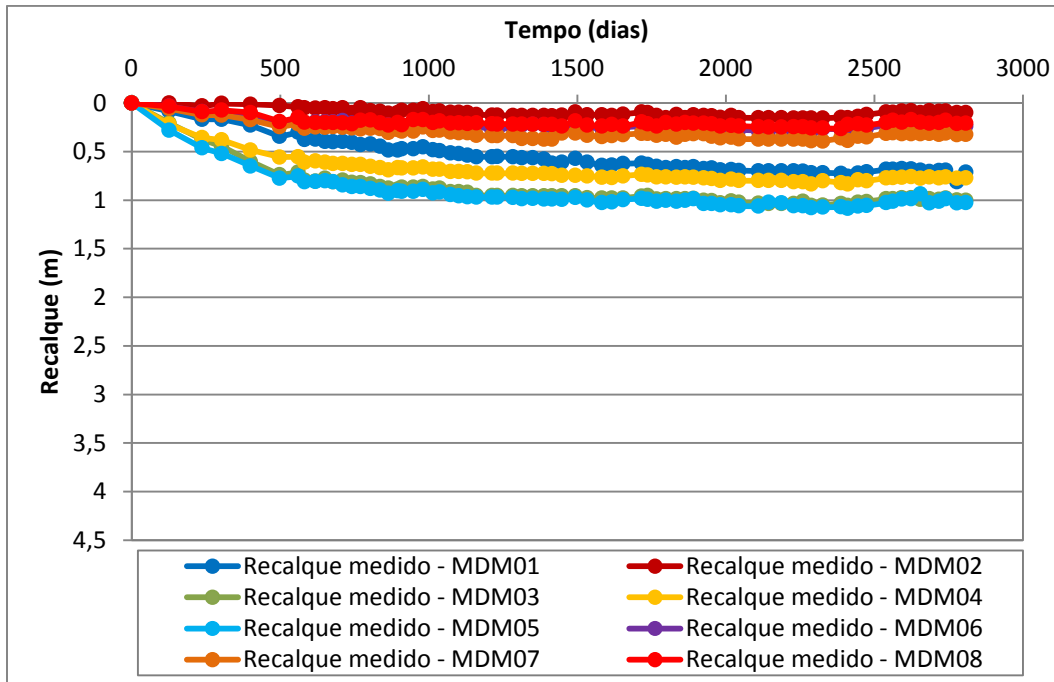


Figura 4.8 – Curvas recalque medido versus tempo para os marcos superficiais analisados da célula do Aterro Remediado de São Leopoldo.

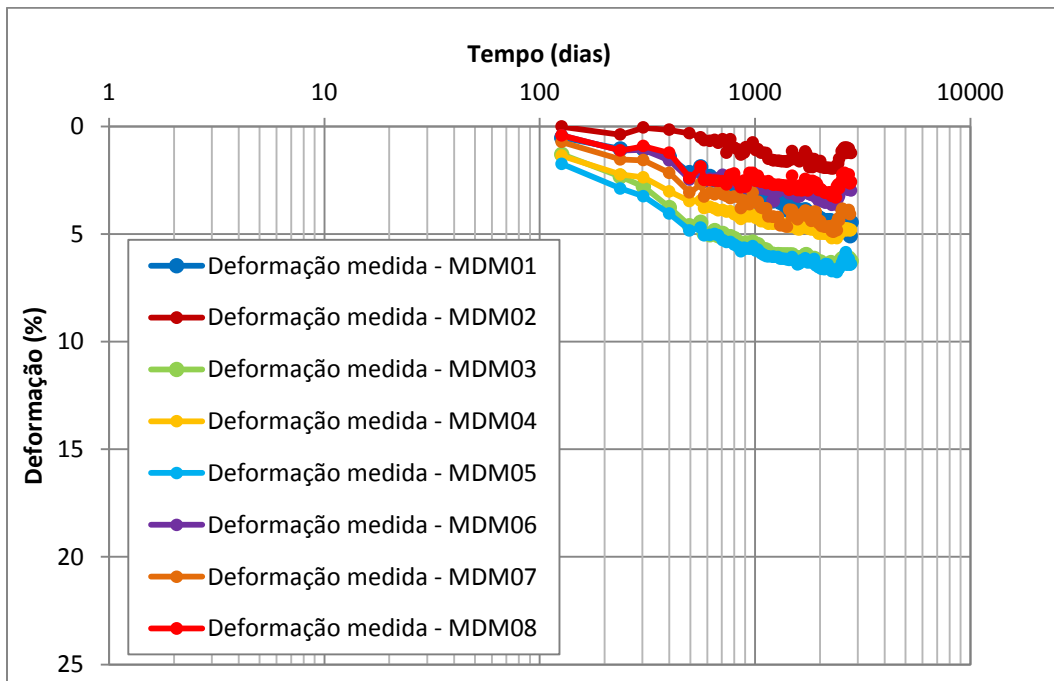


Figura 4.9 – Curvas deformação medida versus log. do tempo para os marcos analisados da célula do Aterro Remediado de São Leopoldo.

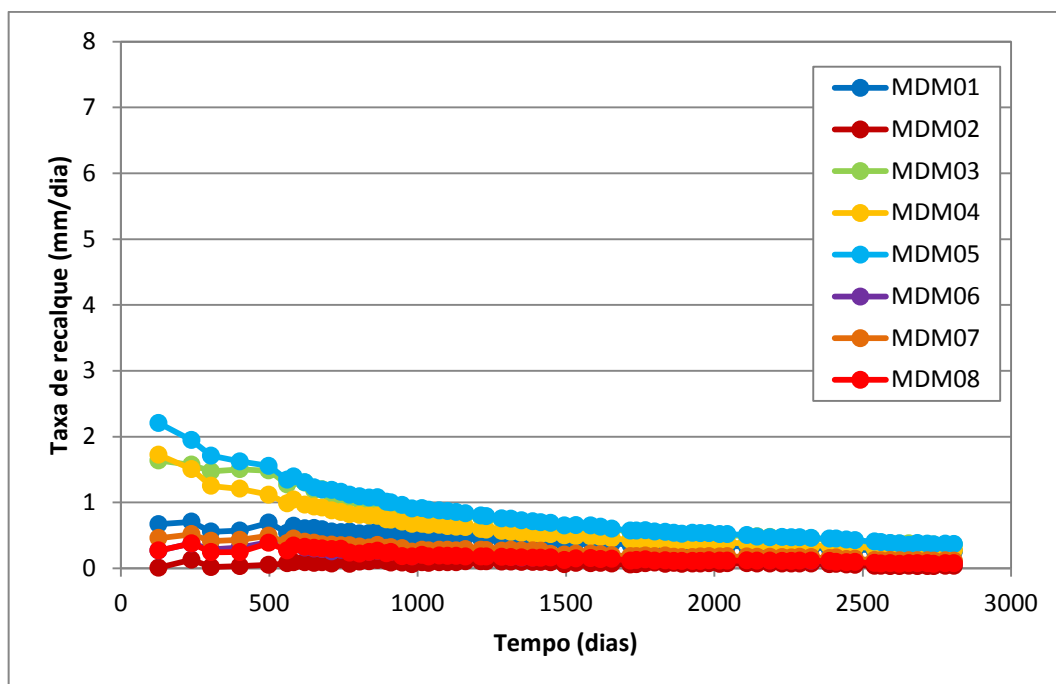


Figura 4.10 – Taxas de recalque medidas para os marcos superficiais analisados da célula do Aterro Remediado de São Leopoldo.

Os recalques observados na célula do Aterro Emergencial Fase I variam aproximadamente entre 0,5 e 2,4m, correspondendo a deformações entre 8 a 16,5% da altura inicial de resíduos, estes valores estão dentro da faixa de valores encontrada na literatura, conforme tabela 2.6 do item 2.3.4 da Revisão Bibliográfica deste trabalho. A figura 4.11 apresenta as curvas recalque medido versus tempo para os marcos superficiais analisados na célula do Aterro Emergencial Fase I. E a figura 4.12 mostra as curvas deformação medida versus logaritmo do tempo para os mesmos marcos analisados.

As taxas de deformação medidas variam aproximadamente entre 0,7 a 3,1mm/dia nos meses iniciais do monitoramento, sendo os valores mais elevados dos marcos superficiais MDM14 e MDM15 que apresentaram os maiores recalques. No período entre 1458 a 2067 dias, as taxas de deformação medidas obtiveram uma redução média da ordem de 3 vezes (taxas atuais 0,2 a 1,6mm/dia) com tendência a estabilização. A figura 4.13 apresenta as taxas de deformação versus o tempo para os 9 marcos superficiais da célula do aterro emergencial Fase I.

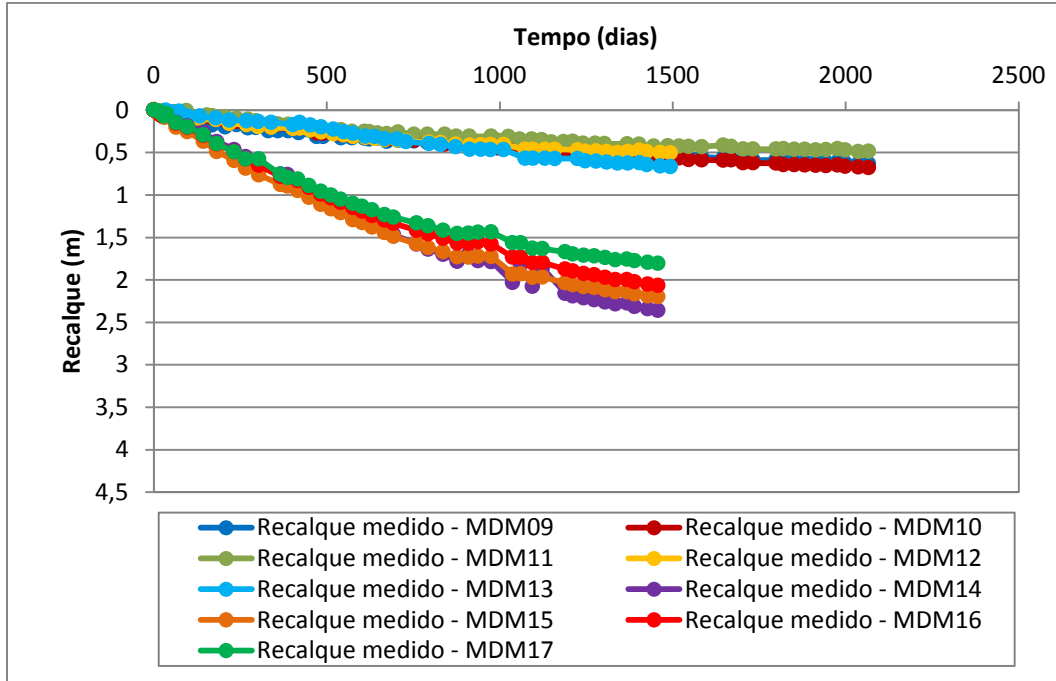


Figura 4.11 – Curvas recalque medido versus tempo para os marcos analisados na célula do Aterro Fase I de São Leopoldo.

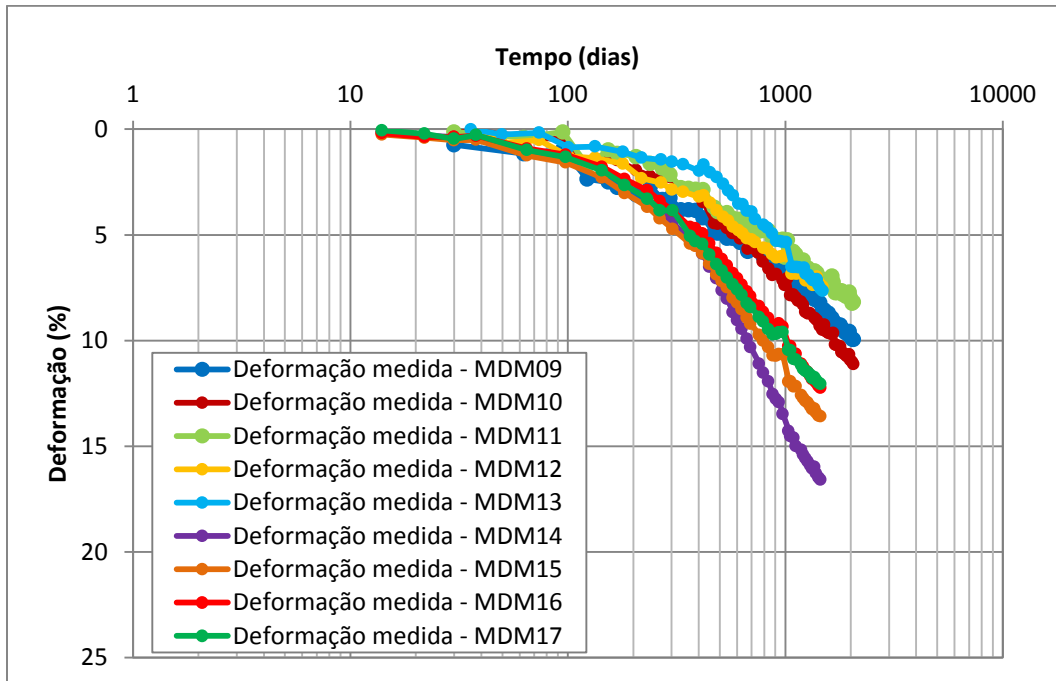


Figura 4.12 – Curvas deformação medida versus log. do tempo para os marcos analisados na célula do Aterro Fase I de São Leopoldo.

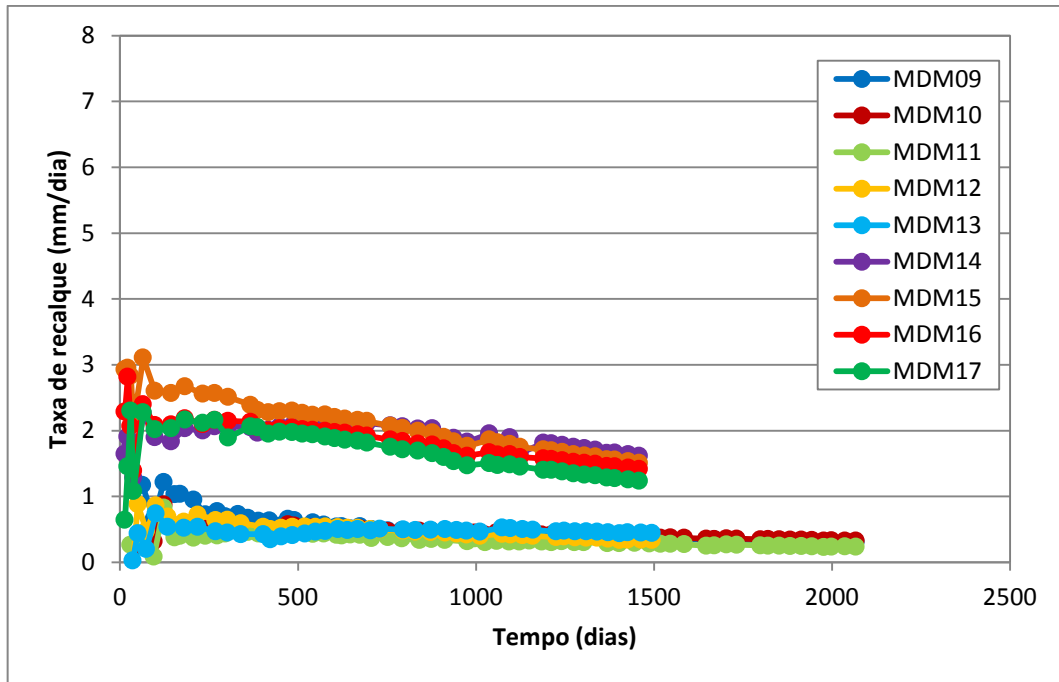


Figura 4.13 – Taxas de recalque versus tempo para os marcos analisados na célula do Aterro Fase I de São Leopoldo.

4.2 Modelos de previsão de recalques

4.2.1 Modelo de Yen e Scanlon (1975)

Este modelo, como descrito no item 2.5.2 da Revisão Bibliográfica deste trabalho, utiliza o conceito da idade média do aterro como base de definição do parâmetro tempo. Marques (2001) destaca que este modelo é válido para uma relação linear decrescente entre as taxas de recalque e o logaritmo de tempo. Na tabela 4.4 estão apresentados os parâmetros do modelo logaritmo Yen e Scanlon (1975) e a função logarítmica simples para os 10 marcos superficiais analisados do aterro CRR em Minas do Leão, e para os marcos do aterro de São Leopoldo, 8 marcos da célula aterro Remediado, e 9 marcos da célula aterro Fase I.

A figura 4.14 apresenta os resultados obtidos da estimativa de recalques, no aterro CRR em Minas do Leão, pelo modelo Yen e Scanlon (1975) para os marcos MT7R, MT9R, MT12, MT13 e MT14. A figura 4.14a mostra a relação taxa de

recalque versus logaritmo do tempo, e a figura 4.14b mostra a relação recalque medido e previsto versus tempo. A taxa de recalque foi calculada em mm/dia, e o tempo inicial foi considerado igual ao tempo de início do monitoramento. E a figura 4.15 apresenta os resultados obtidos da estimativa de recalques pelo modelo Yen e Scanlon (1975) para os marcos MT15, MT16, MT17, MT21 e MT24. A figura 4.15a mostra a relação taxa de recalque versus logaritmo do tempo, e a figura 4.15b mostra a relação recalque medido e previsto versus tempo.

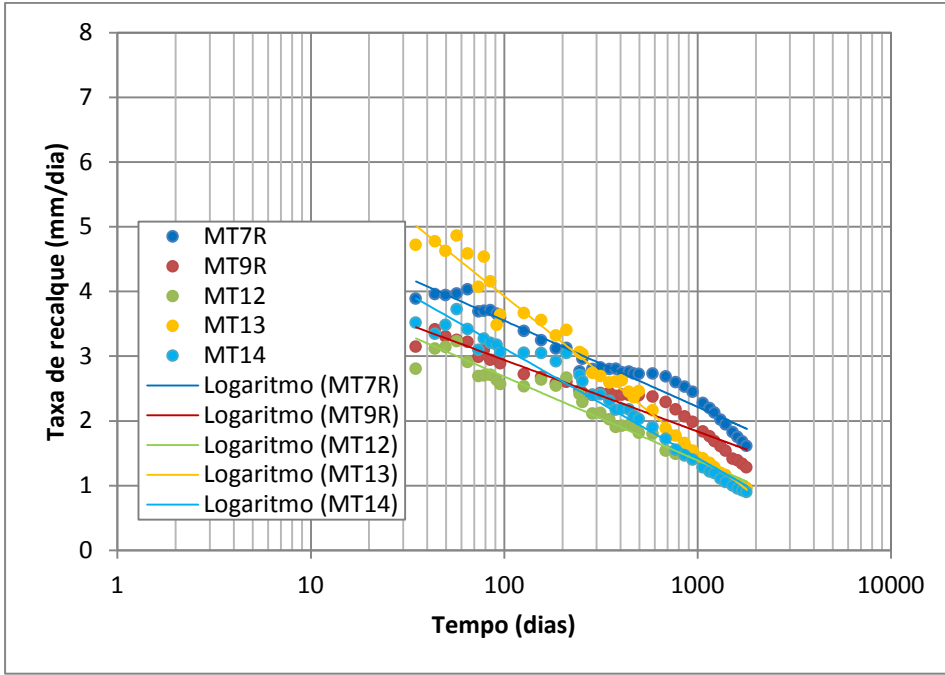
A figura 4.16 apresenta os resultados obtidos pela aplicação do modelo Yen e Scanlon (1975) para os marcos MDM01, MDM02, MDM03 e MDM04 da célula aterro Remediado de São Leopoldo, a figura 4.16a mostra a relação taxa de recalque versus logaritmo do tempo, e a figura 4.16b mostra a relação recalque medido e previsto versus tempo pelo modelo. E a figura 4.17 apresenta os resultados obtidos pela aplicação do modelo em estudo para os marcos MDM05, MDM06, MDM07 e MDM08 da célula aterro Remediado, a figura 4.17a mostra a relação taxa de recalque versus logaritmo do tempo, e a figura 4.17b mostra a relação recalque medido e previsto versus tempo.

A figura 4.18 apresenta os resultados obtidos pela aplicação do modelo Yen e Scanlon (1975) para os marcos MDM 09, MDM10, MDM11, MDM12 e MDM13 da célula aterro Fase I de São Leopoldo, a figura 4.18a mostra a relação taxa de recalque versus logaritmo do tempo, e a figura 4.18b mostra a relação recalque medido e previsto versus tempo pelo modelo em estudo. E na figura 4.19 estão apresentados os resultados obtidos pela aplicação do modelo para os marcos MDM14, MDM15, MDM16 e MDM17 da célula aterro Fase I, a figura 4.19a mostra a relação taxa de recalque versus logaritmo do tempo e a figura 4.19b mostra a relação recalque medido e previsto versus tempo pelo modelo.

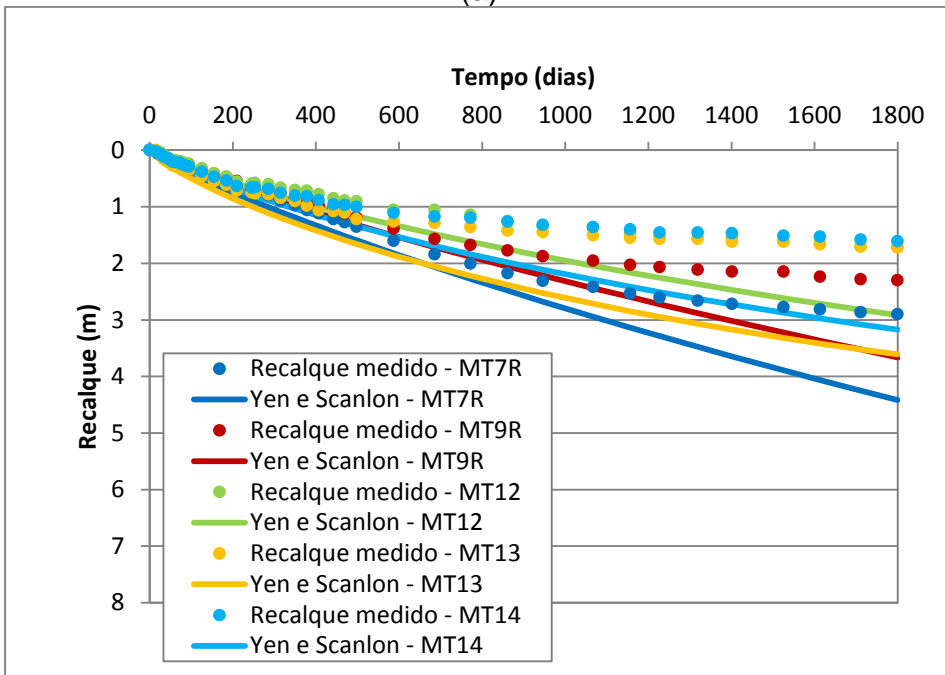
Tabela 4.4 – Parâmetros obtidos do modelo logaritmo Yen e Scanlon (1975) e a função logarítmica simples.

Aterros Sanitários	Marco	Yen e Scanlon (1975)				Função logarítmica simples			
		a	b	R ²	D(%)	a	b	R ²	D(%)
CRR Minas do Leão	MT7R	6,21	0,58	0,96	52,35	1,80	0,55	0,77	-20,61
	MT9R	5,15	0,48	0,94	59,07	1,44	0,44	0,79	-18,65
	MT12	5,27	0,56	0,96	69,46	1,00	0,32	0,82	-18,60
	MT13	8,70	1,03	0,98	108,79	0,95	0,33	0,87	-10,73
	MT14	6,51	0,73	0,96	96,77	0,90	0,31	0,86	-13,38
	MT15	6,93	0,69	0,88	74,36	1,50	0,48	0,83	-16,88
	MT16	9,68	0,95	0,77	93,71	2,58	0,75	0,85	-7,70
	MT17	2,07	0,23	0,91	89,48	0,32	0,10	0,86	-15,69
	MT21	11,83	1,20	0,86	82,71	2,35	0,76	0,84	-14,84
	MT24	5,61	0,60	0,86	96,96	0,91	0,31	0,86	-12,05
	MÉDIA	6,80	0,71	0,91	82,37	1,38	0,44	0,84	-14,91
	D.P	2,72	0,29	0,07	18,17	0,71	0,21	0,03	4,01
Aterro Remediado São Leopoldo	MDM01	2,08	0,22	0,98	117,89	0,24	1,15	0,97	4,46
	MDM02	0,63	0,07	0,80	316,18	0,24	0,05	0,57	37,21
	MDM03	4,17	0,48	0,99	134,23	0,69	0,22	0,87	7,17
	MDM04	3,13	0,36	0,99	129,67	0,48	0,16	0,91	7,81
	MDM05	4,32	0,50	0,99	132,63	0,55	0,21	0,86	6,70
	MDM06	1,07	0,12	0,93	172,83	0,21	0,06	0,69	13,15
	MDM07	1,59	0,18	0,91	191,94	0,31	0,08	0,75	13,92
	MDM08	1,02	0,12	0,89	159,36	0,12	0,04	0,51	11,78
		MÉDIA	2,25	0,26	0,94	169,34	0,36	0,25	0,77
	D.P	1,45	0,17	0,07	64,35	0,20	0,37	0,17	10,43
Aterro Fase I São Leopoldo	MDM09	2,24	0,25	0,91	89,54	0,69	0,17	0,93	-8,51
	MDM10	1,49	0,15	0,97	49,80	0,94	0,20	0,92	-9,81
	MDM11	1,30	0,13	0,95	84,37	0,64	0,14	0,93	-8,45
	MDM12	1,62	0,17	0,95	63,14	0,64	0,15	0,94	-5,68
	MDM13	1,60	0,20	0,86	-25,15	0,94	0,20	0,83	-16,43
	MDM14	5,93	0,58	0,89	41,03	2,30	0,59	0,83	-15,43
	MDM15	7,36	0,79	0,98	58,60	2,05	0,55	0,88	-11,18
	MDM16	6,06	0,63	0,98	48,31	1,94	0,51	0,87	-13,42
	MDM17	6,70	0,74	0,99	65,94	1,71	0,46	0,90	-10,06
	MÉDIA	3,81	0,40	0,94	52,84	1,32	0,33	0,89	-11,00
	D.P	2,61	0,27	0,05	33,36	0,67	0,19	0,04	3,51
MÉDIA TOTAL		4,29	0,46	0,93	101,52	1,02	0,34	0,83	-4,38
D.P TOTAL		0,70	0,06	0,01	23,53	0,29	0,10	0,07	3,86

a e b = coeficientes obtidos no ajuste matemático; D.P = desvio padrão; D(%) = desvio de recalque.

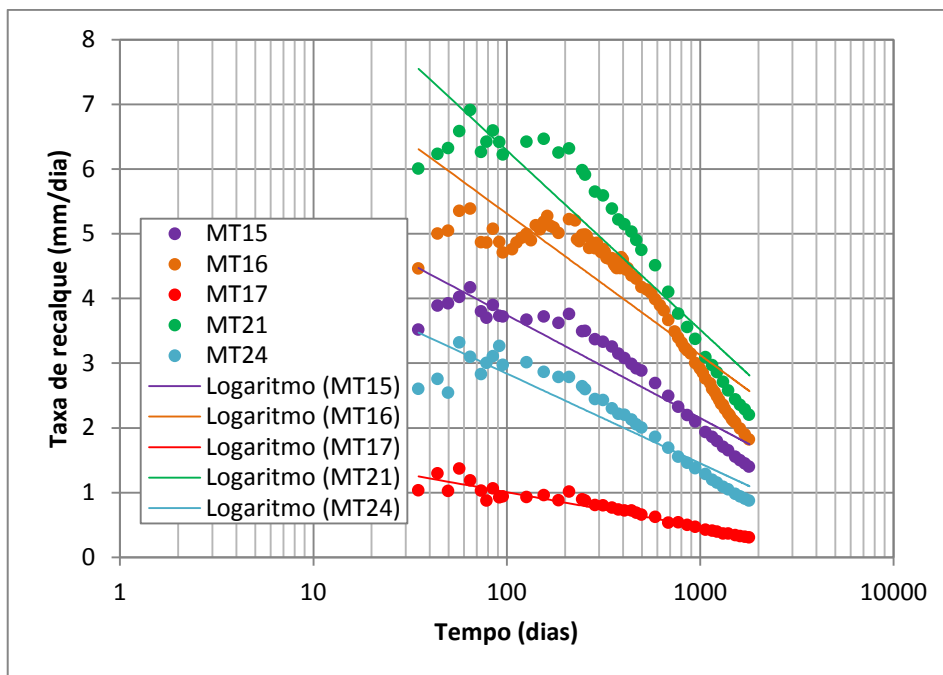


(a)

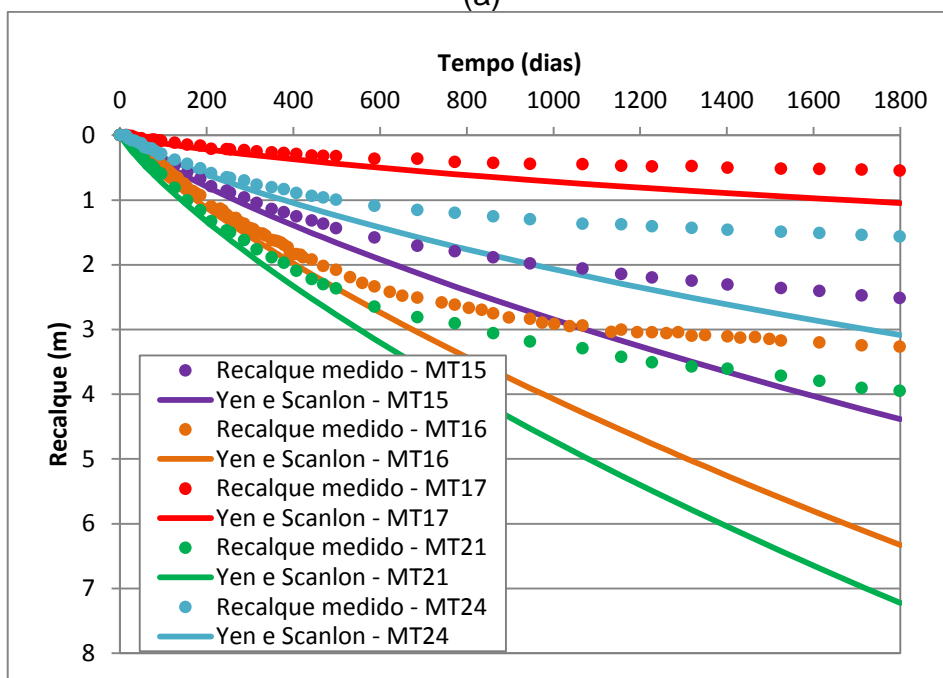


(b)

Figura 4.14 – (a) Relação taxa de recalque versus log do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto versus tempo, com base no modelo de Yen e Scanlon (1975) para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.

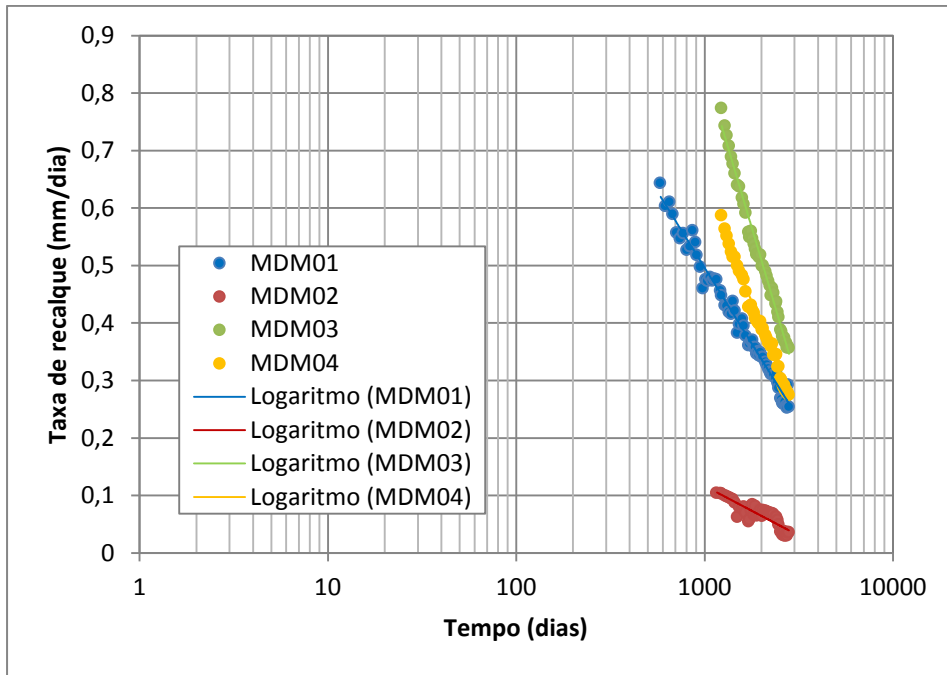


(a)

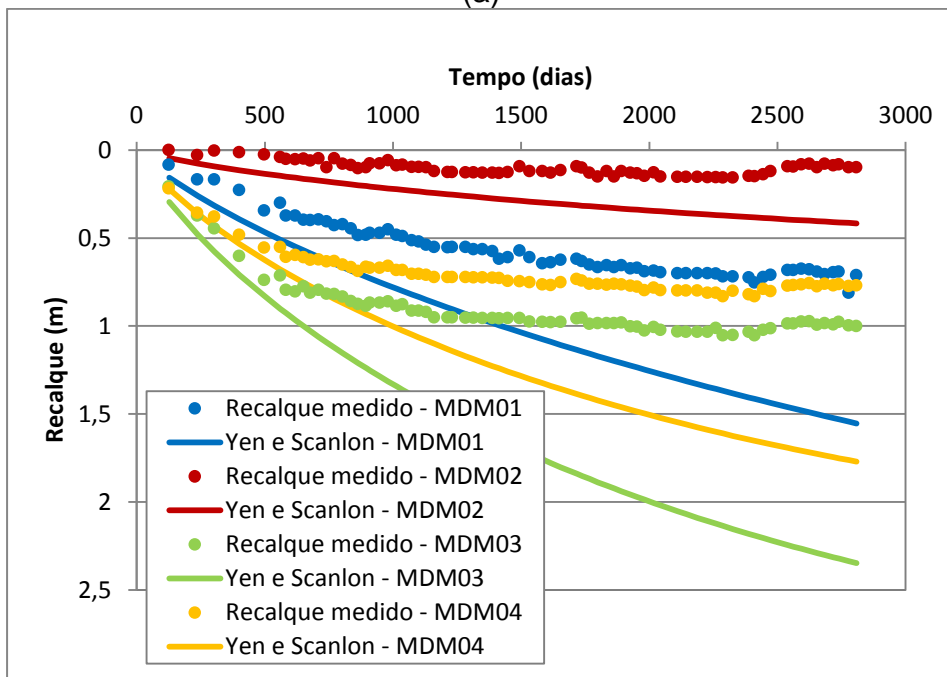


(b)

Figura 4.15 – (a) Relação taxa de recalque versus log do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto versus tempo, com base no modelo de Yen e Scanlon (1975) para marcos do aterro CRR de Minas do Leão.

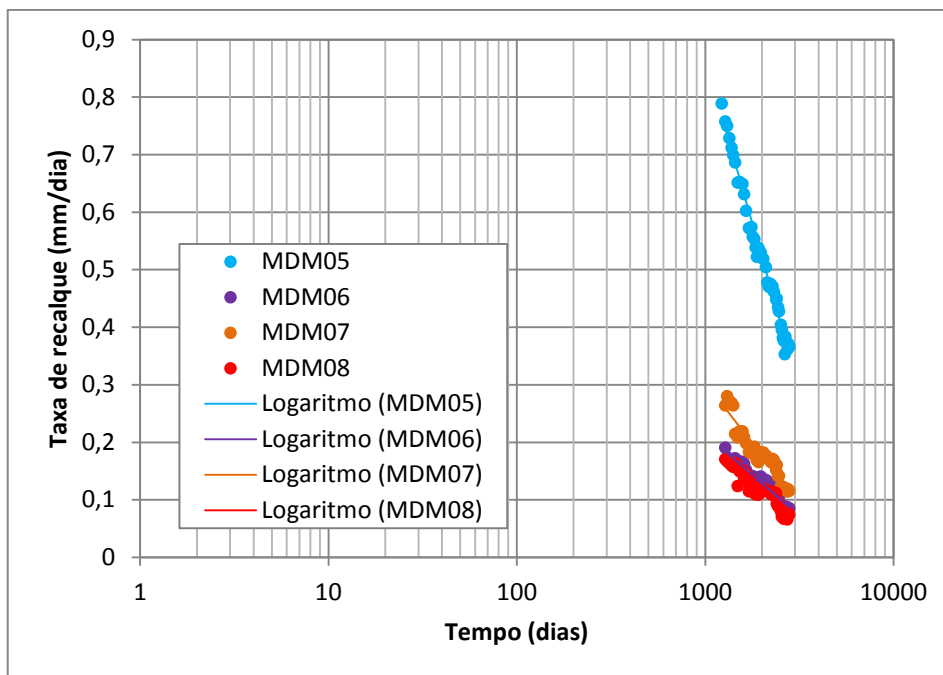


(a)

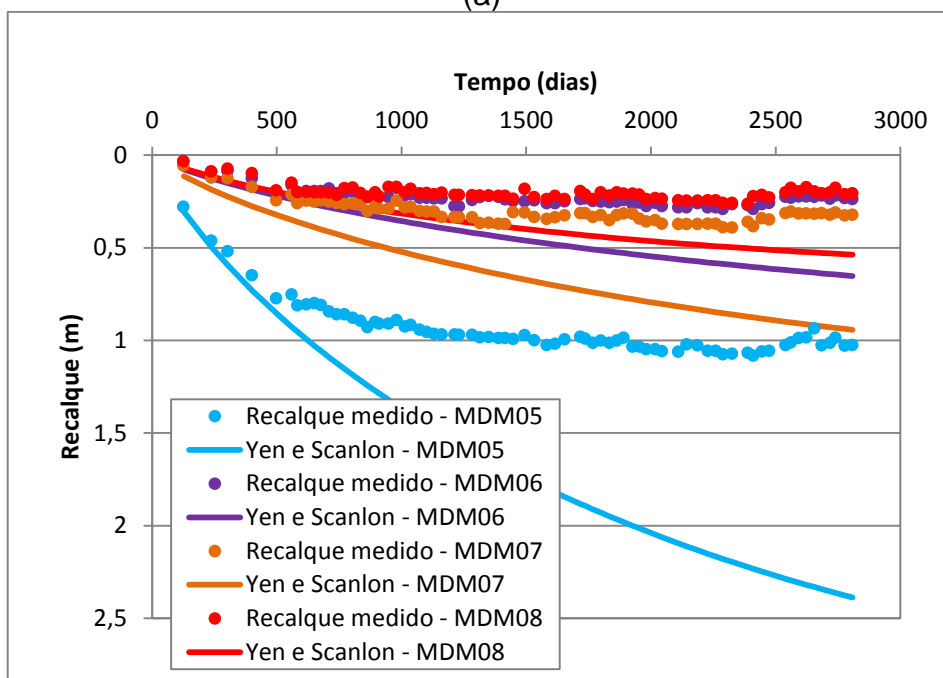


(b)

Figura 4.16 – (a) Relação taxa de recalque versus log. do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto versus tempo pelo modelo Yen e Scanlon para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

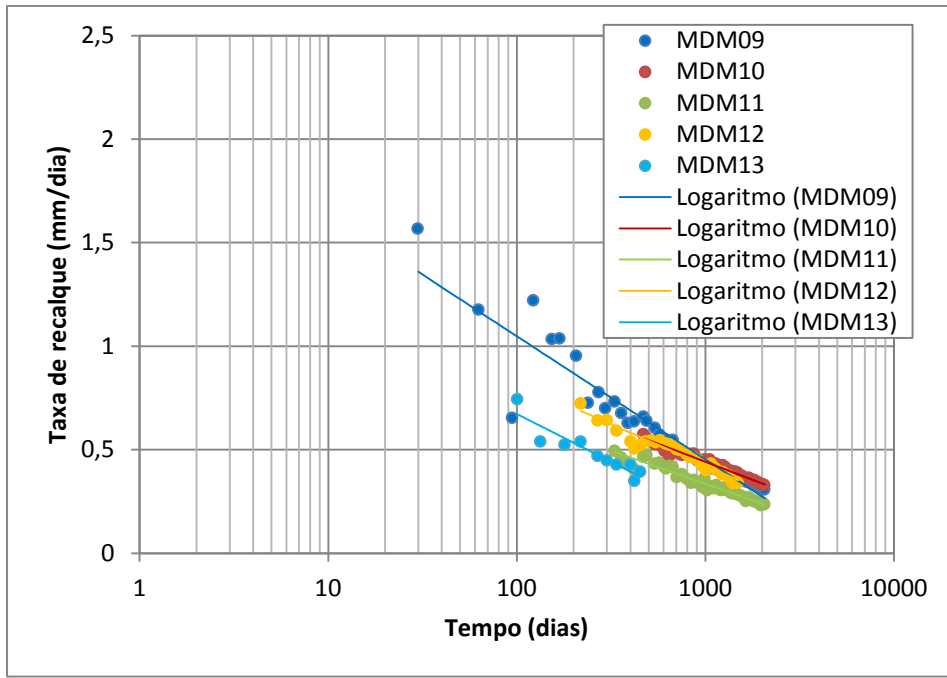


(a)

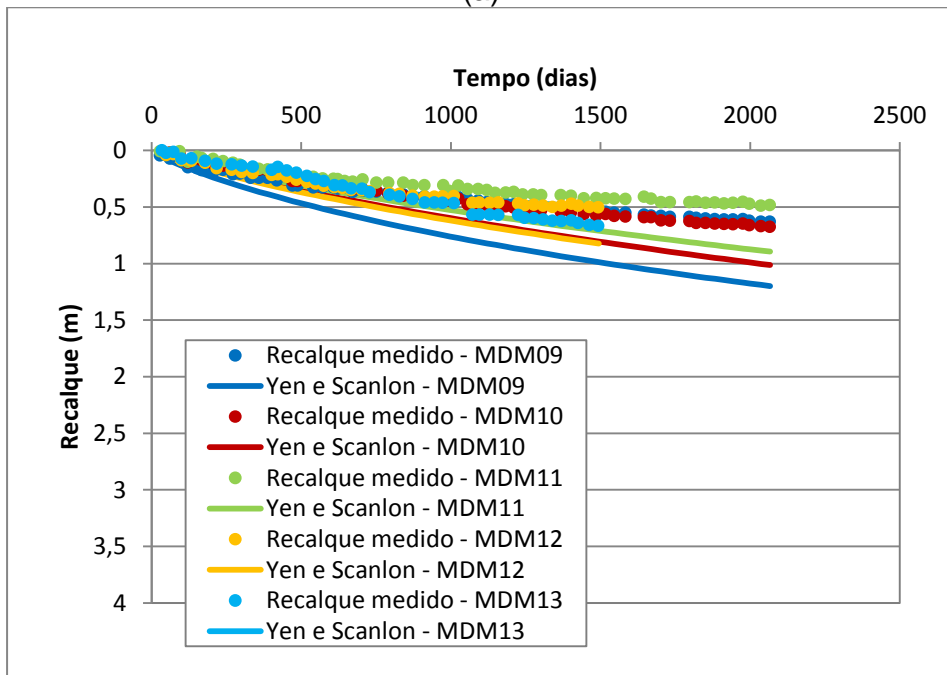


(b)

Figura 4.17 – (a) Relação taxa de recalque versus log. do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto versus tempo pelo modelo Yen e Scanlon para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

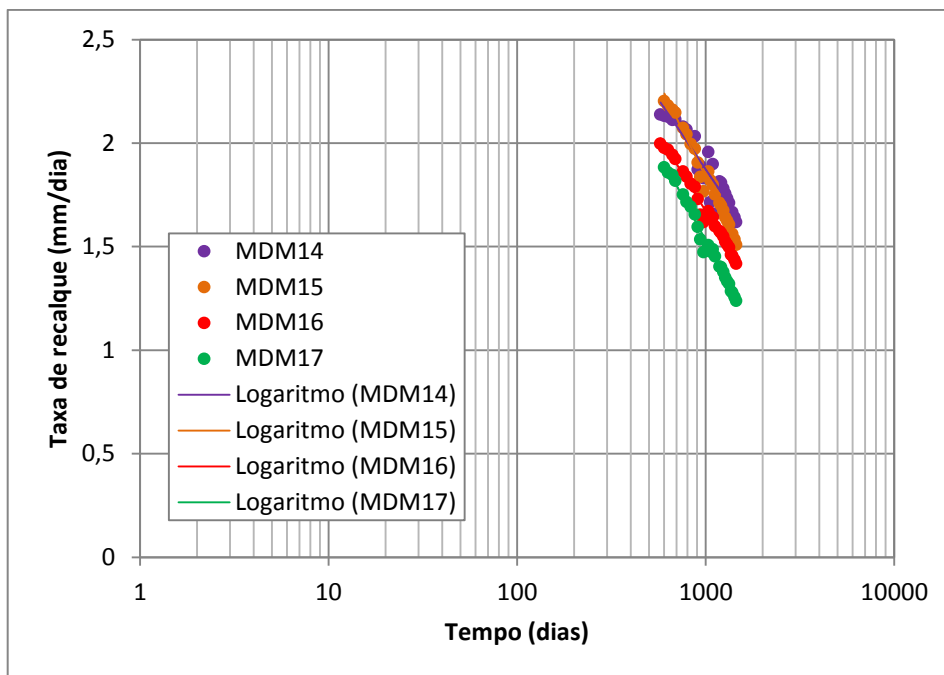


(a)

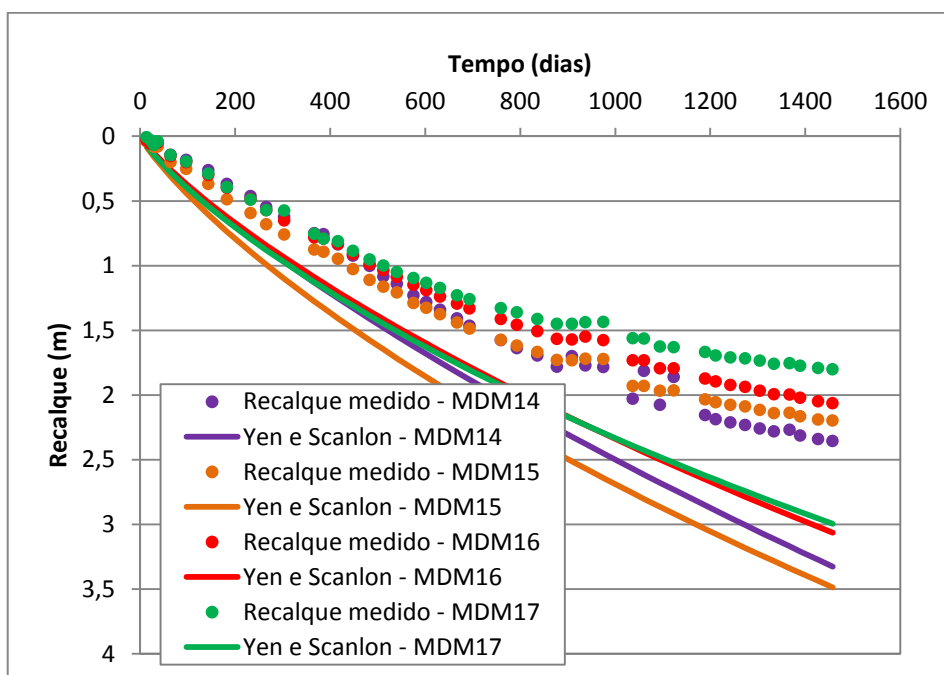


(b)

Figura 4.18 – (a) Relação taxa de recalque versus log. do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto versus tempo pelo modelo Yen e Scanlon para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.



(a)



(b)

Figura 4.19 – (a) Relação taxa de recalque versus log. do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto versus tempo pelo modelo Yen e Scanlon para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

Do mesmo modo que para Marques (2001), a aplicação deste modelo na estimativa de recalques, tanto para o aterro Central de Resíduos do Recreio (CRR), como para o aterro de São Leopoldo, células Aterro Remediado e Fase I, foram inconsistentes. Pode-se observar uma fraca concordância entre os dados medidos e os previstos com a aplicação deste método para os pontos verificados, notadamente para os recalques em longo prazo. No caso do aterro CRR em Minas do Leão, os desvios de recalque (D) apresentaram um valor médio de cerca de 82%, considerando os marcos utilizados neste estudo (Tabela 4.4). E para o aterro de São Leopoldo, observa-se também uma fraca concordância entre os valores medidos e previstos, tanto para os marcos da célula Aterro Remediado, como para os marcos da célula Aterro Fase I. Os desvios de recalque (D) apresentaram valores médios de cerca de 170% para os marcos do Aterro Remediado e de 50% para os marcos do Aterro Fase I.

Baseado nas análises realizadas neste estudo foi possível concluir que este método não é adequado para a estimativa de recalques, tanto do aterro da Central de Resíduos do Recreio (CRR), como do aterro de São Leopoldo. Marques (2001) também chegou à mesma conclusão para o aterro experimental de Bandeirantes e justifica que o método original foi proposto para aterros construídos em menores tempos e localizados em regiões de clima seco.

Nas figuras 4.20, 4.21 e 4.22 estão apresentados os resultados obtidos dos recalques estimados pela função logarítmica simples para os 10 marcos analisados do aterro CRR de Minas do Leão, para os 8 marcos da célula do Aterro Remediado de São Leopoldo e para os 9 marcos da célula do Aterro Fase I de São Leopoldo, respectivamente.

A partir dos resultados desta função foi possível verificar que os desvios de recalque, após o período entre 1458 e 2809 dias 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 -15% do aterro CRR de Minas do Leão, de 12,8% para os marcos do Aterro Remediado e de -11% para os marcos do Aterro Fase I. Os recalques previstos ao final do período apresentaram-se menores do que os valores observados em campo para os marcos do aterro CRR e da célula do Aterro Fase I. Já para os marcos da célula do Aterro Remediado apresentaram recalques previstos ao final do período maiores do que os observados (Tabela 4.4). Devido aos altos valores de desvios de recalque esta

função logarítmica simples não é recomendada para ser utilizada na previsão de recalques no caso em estudo.

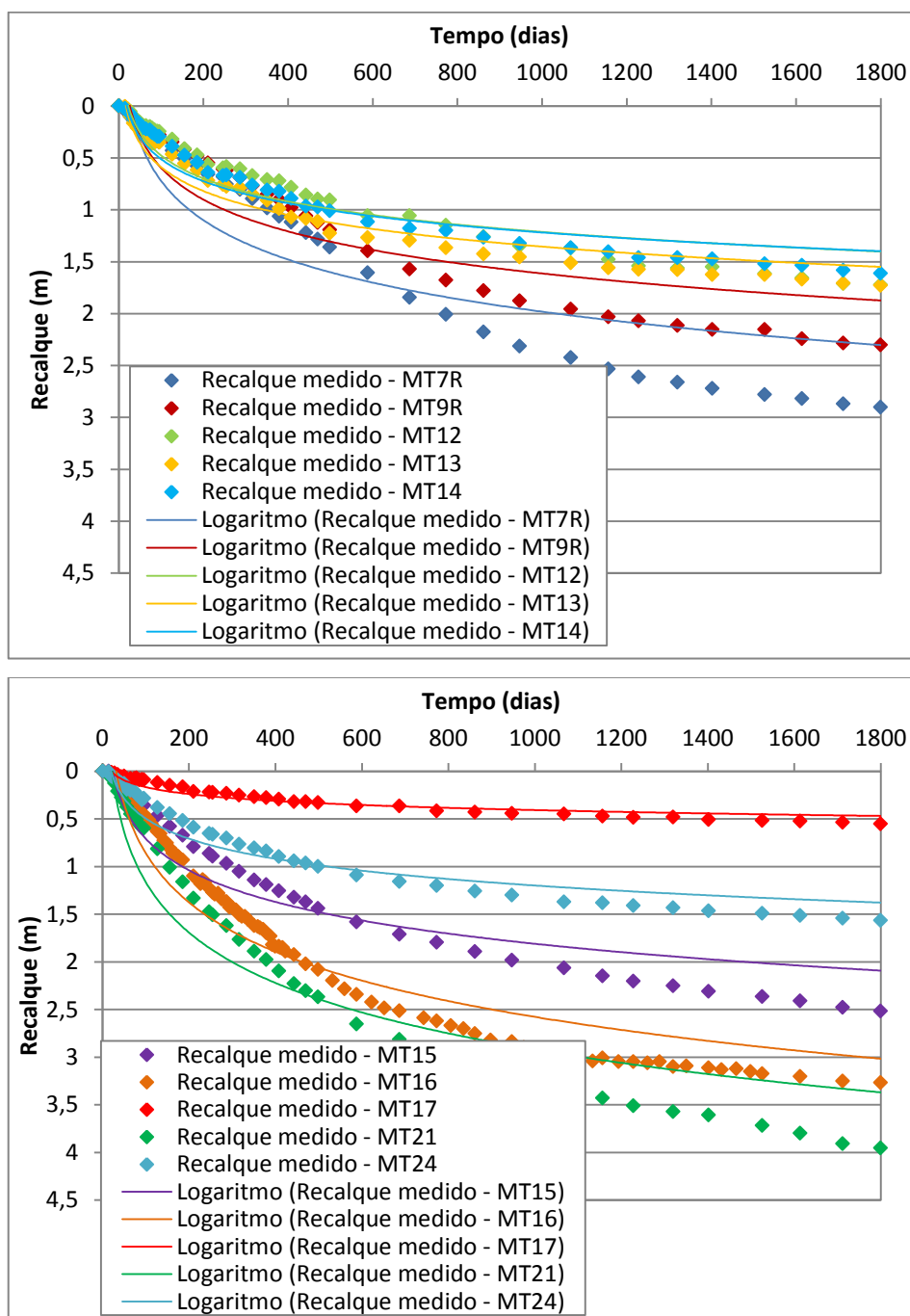


Figura 4.20 – Relação recalque medido versus tempo, com base em função logarítmica simples para os 10 marcros superficiais do aterro CRR de Minas do Leão.

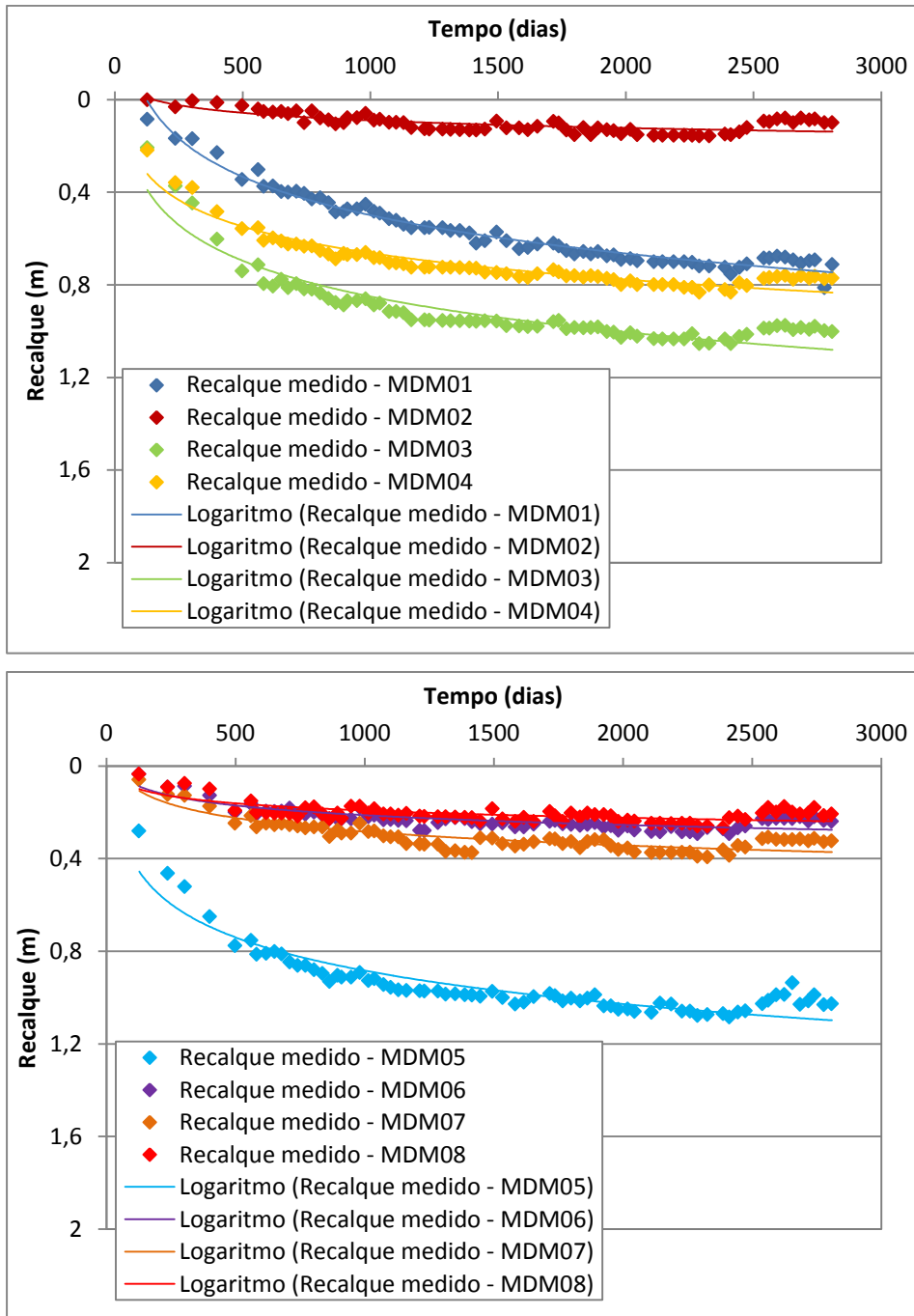


Figura 4.21 – Relação recalque medido e previsto versus tempo, com base na função logarítmica simples para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

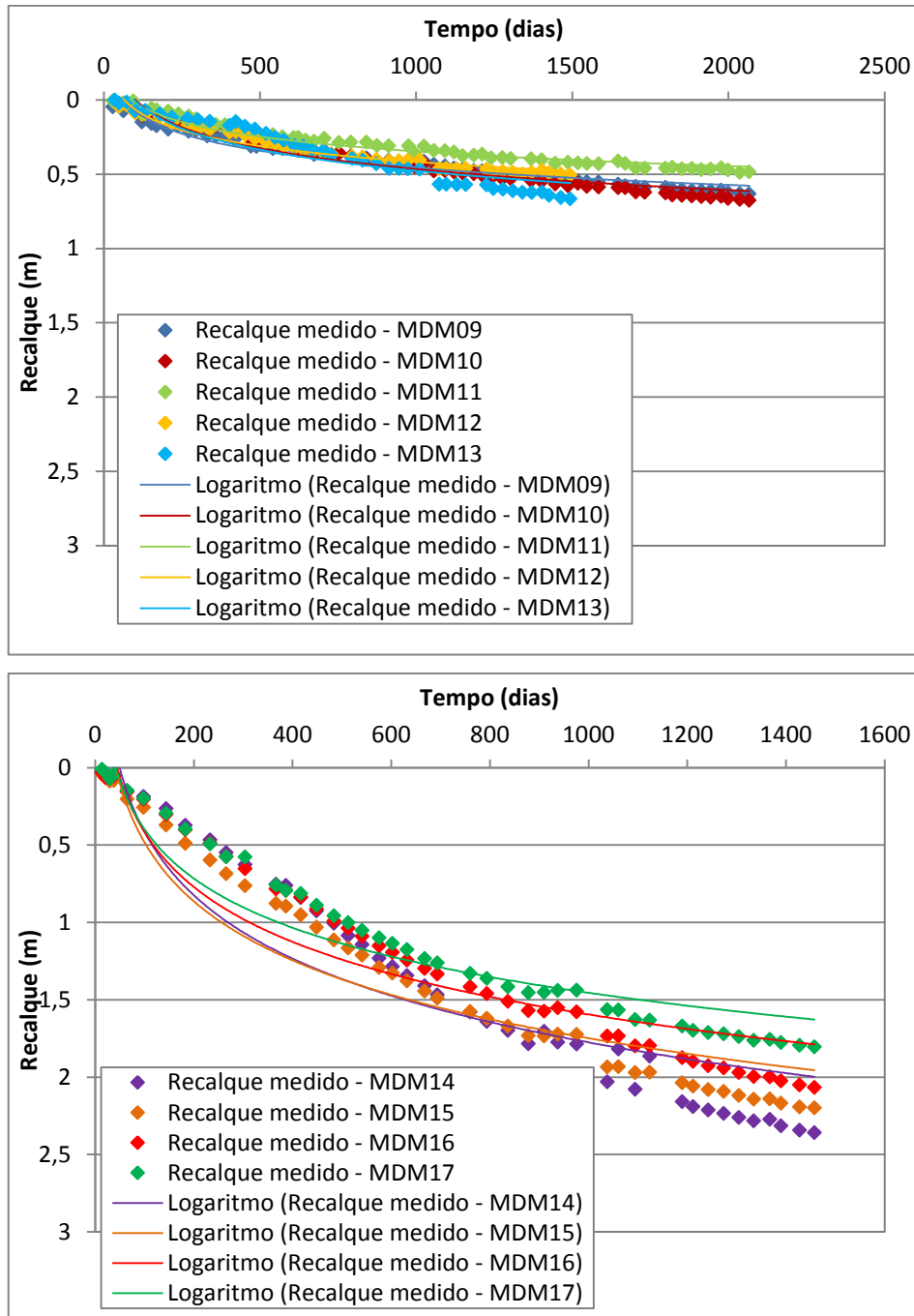


Figura 4.22 – Relação recalque medido e previsto versus tempo, com base na função logarítmica simples para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

As figuras 4.23, 4.24 e 4.25 mostram outra maneira de observar os resultados obtidos pela aplicação do Modelo de Yen e Scanlon (1975), sendo a correlação entre os valores de recalques medidos e calculados. Na figura 4.23, observa-se que a partir de 1 metro os valores de recalques calculados começam a ser maiores que

os valores de recalques medidos para os marcos analisados no aterro CRR de Minas do Leão, com exceção do marco MT17, que a partir de 0,4 metros os recalques calculados começam a ser maiores que os recalques medidos.

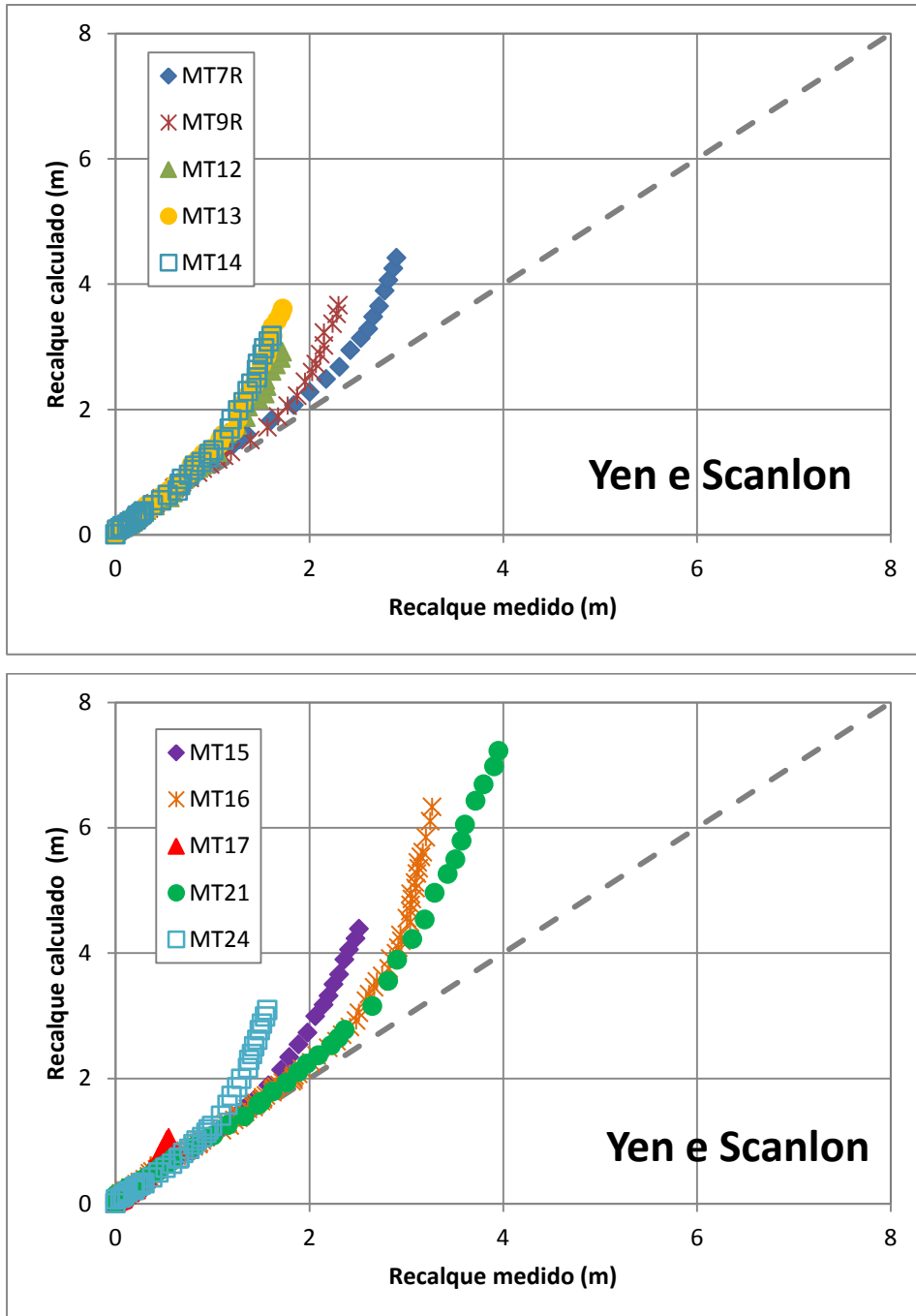


Figura 4.23 – Correlação entre os valores de recalques medidos e calculados para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão, com base no Modelo Yen e Scanlon (1975).

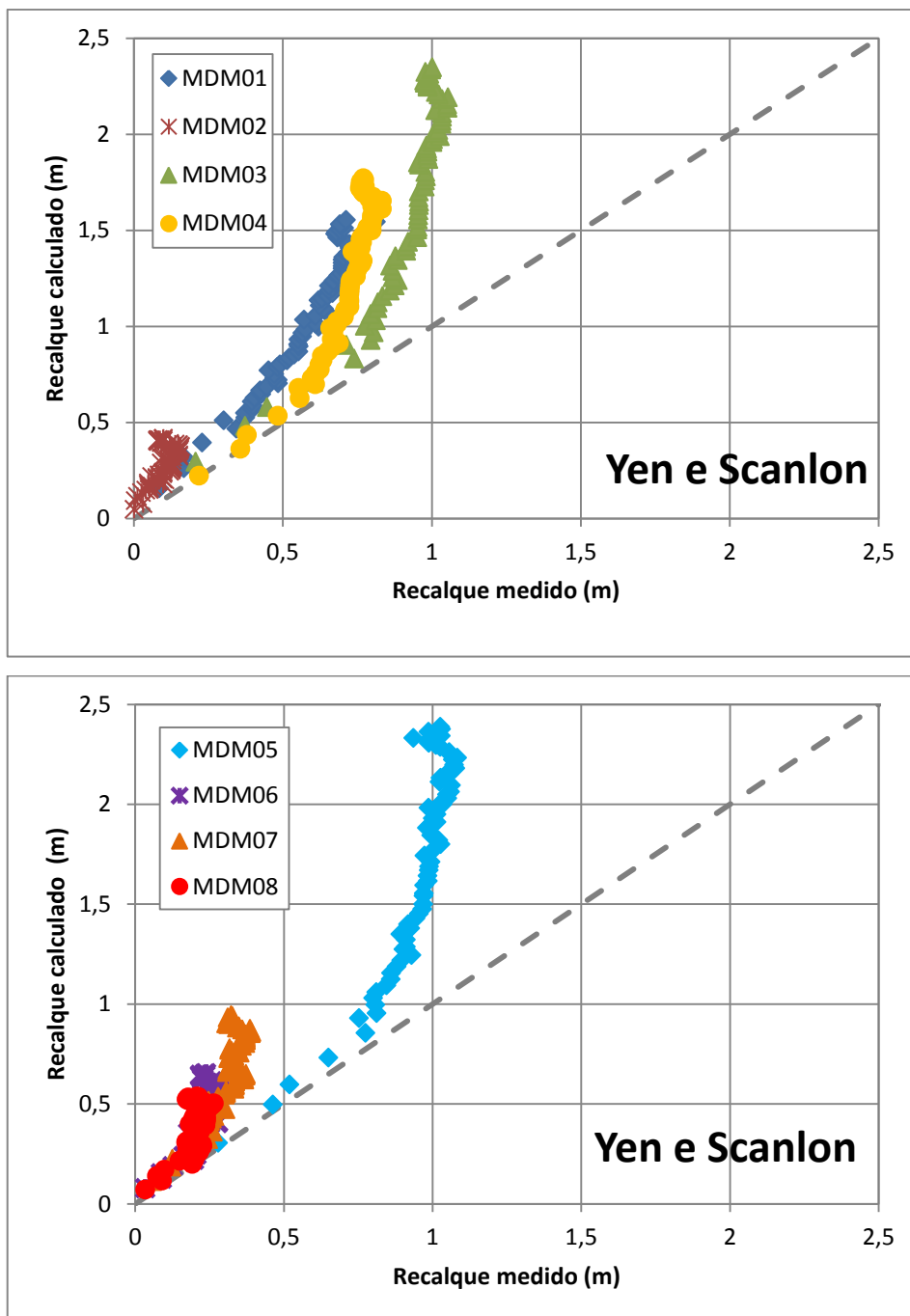


Figura 4.24 – Correlação entre recalques medidos e previstos para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo, com base no modelo de Yen e Scanlon (1975).

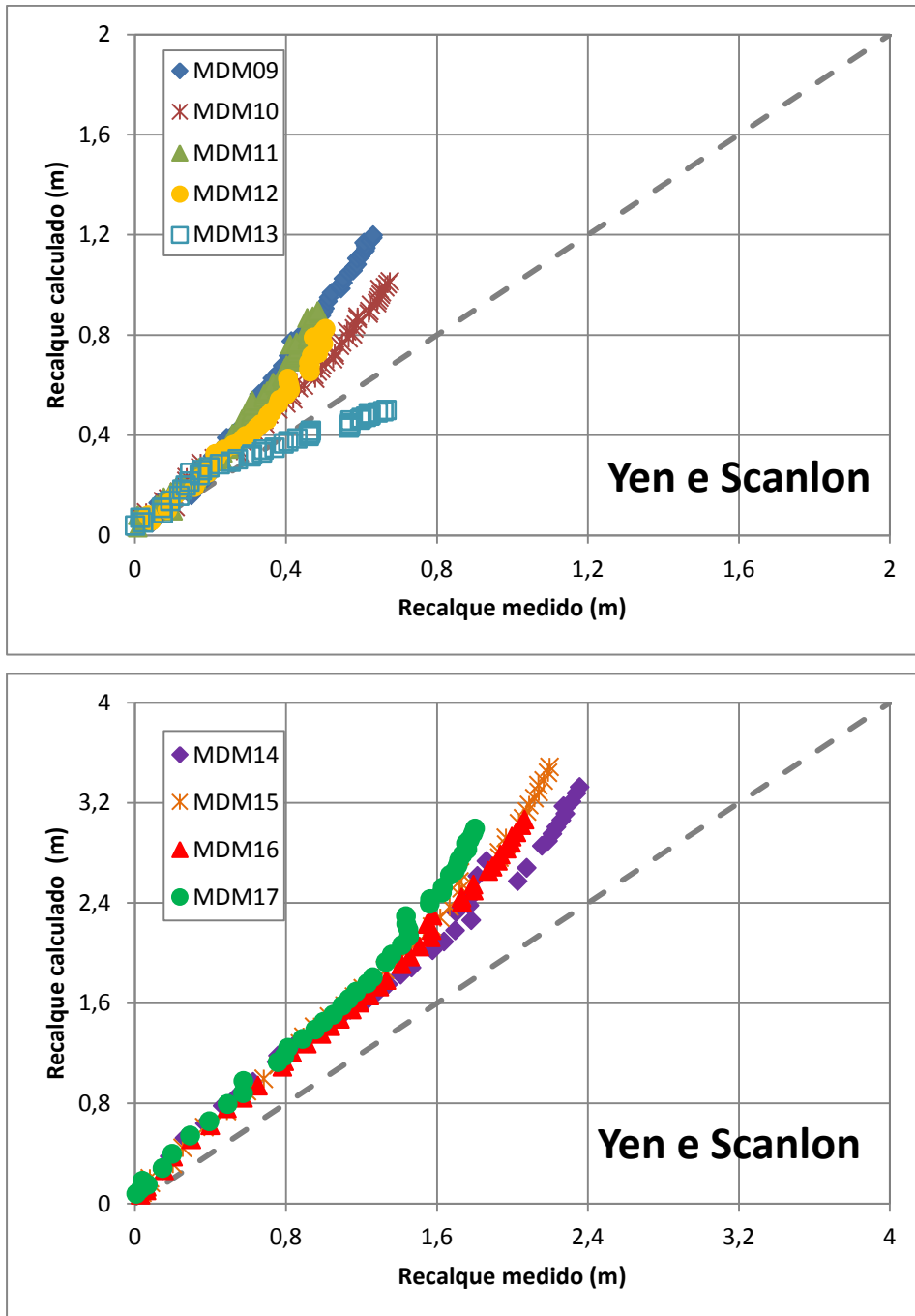


Figura 4.25 – Correlação entre os recalques medidos e previstos para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo, com base no modelo de Yen e Scanlon (1975).

As figuras 4.26, 4.27, e 4.28 apresentam outra maneira de observar os resultados obtidos da estimativa de recalques com base nas funções logarítmicas simples. A figura 4.26 mostra a correlação entre os valores de recalques medidos e calculados para os marcos do aterro CRR em Minas do Leão. E as figuras 4.27 e

4.28 mostram as correlações entre os recalques medidos e calculados para os marcos das células do aterro Remediado e Fase I de São Leopoldo, respectivamente.

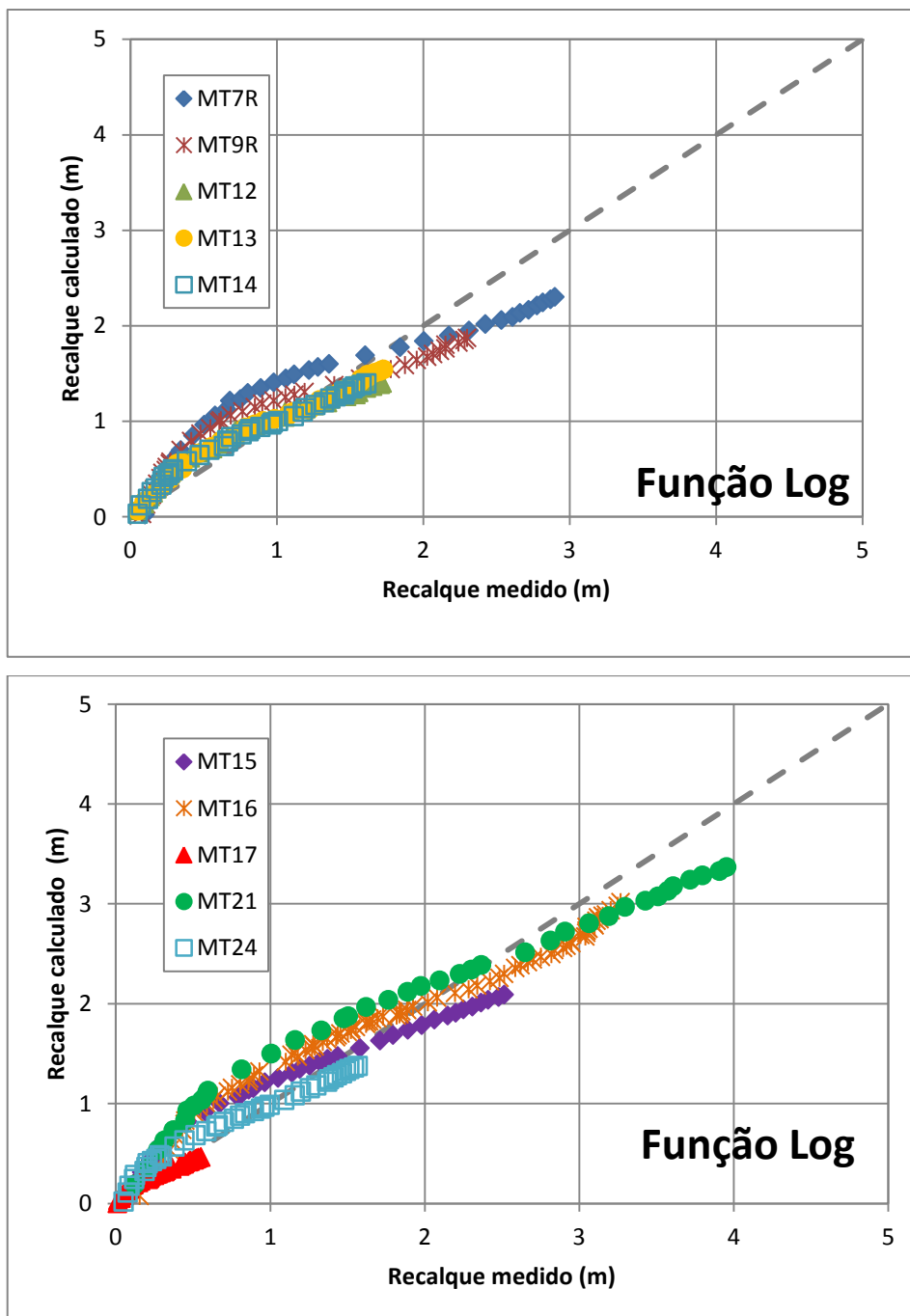


Figura 4.26 – Correlação entre os valores de recalques medidos e calculados para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão, com base na Função Logarítmica Simples.

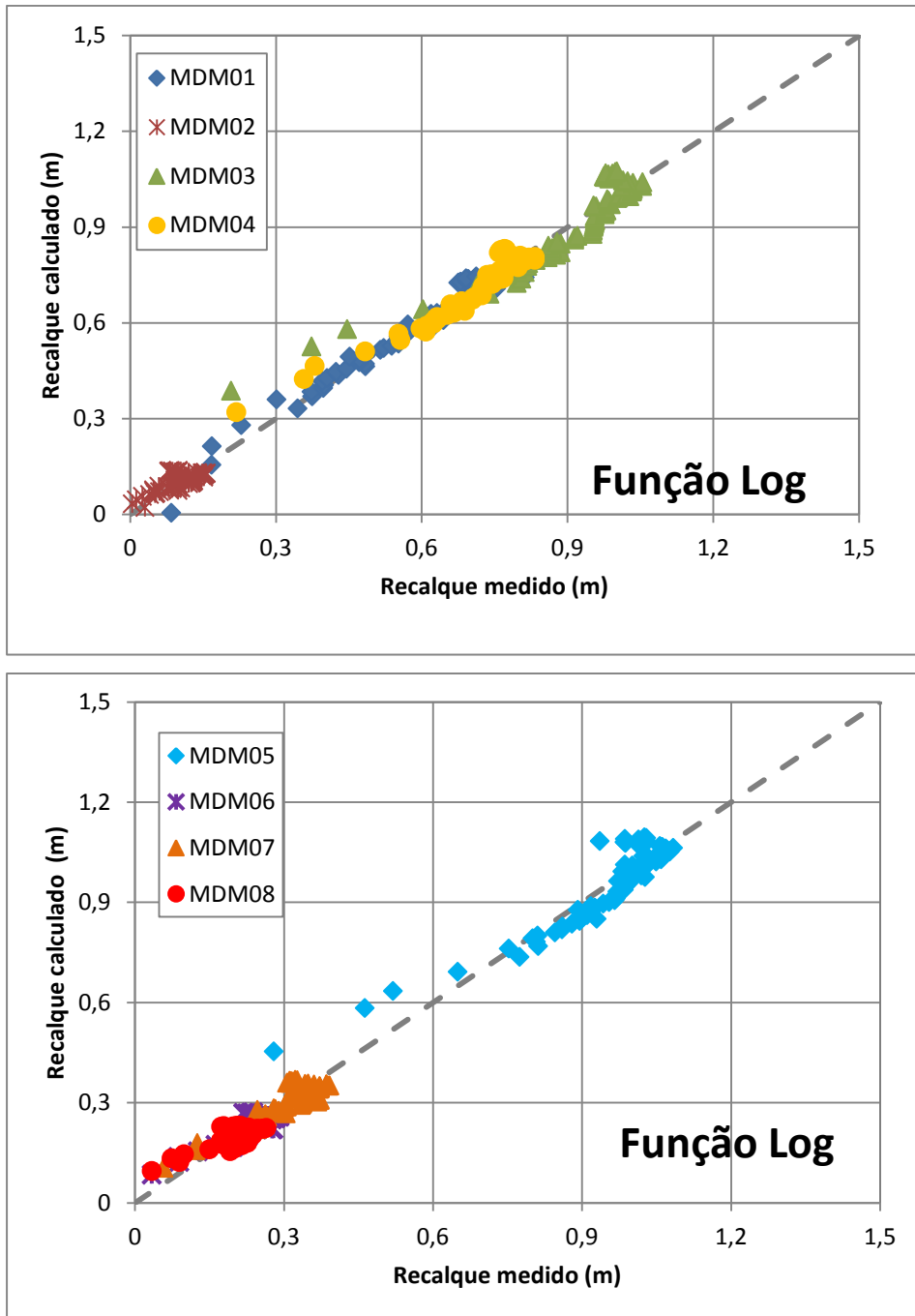


Figura 4.27 – Correlação entre os recalque medidos e calculados para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo, com base na Função Logarítmica Simples.

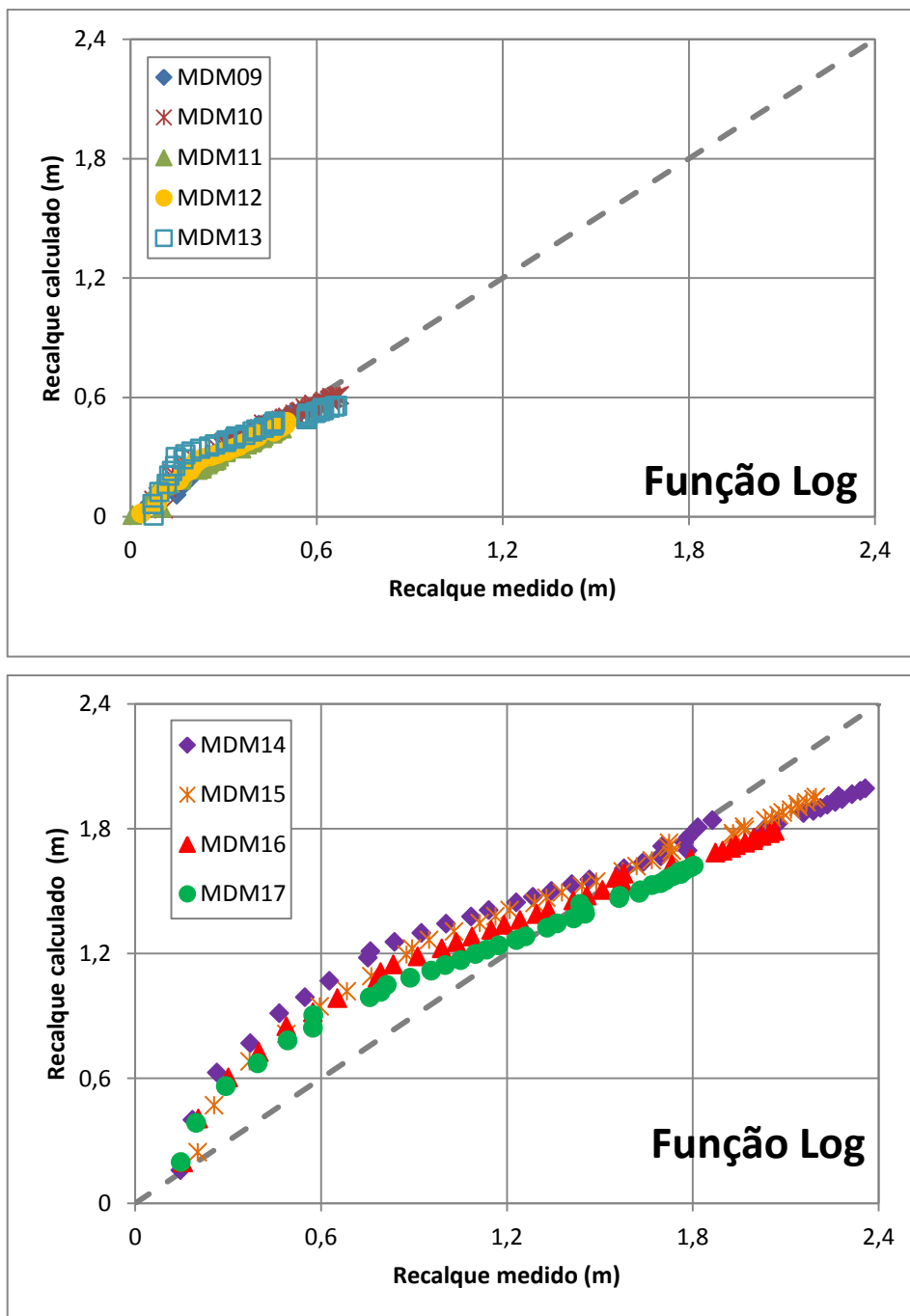


Figura 4.28 – Correlação entre os recalques medidos e previstos para os marcros do Aterro Fase I de São Leopoldo, com base na Função Logarítmica Simples.

4.2.2 Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998)

Ling et al. (1998), conforme descrito no item 2.5.3 da Revisão Bibliográfica deste trabalho, propuseram a utilização de funções hiperbólicas para a previsão de recalques. Para este trabalho, a formulação adotada foi em termos de deformações, sendo recalque dividido pela altura inicial dos resíduos (ρ/H) e o tempo zero foi considerado o tempo de início das leituras de campo. A tabela 4.5 apresenta os resultados dos parâmetros obtidos pelo Modelo Hiperbólico para a estimativa de recalques dos 10 marcos superficiais analisados do aterro CRR em Minas do Leão, e dos marcos analisados do aterro de São Leopoldo, 8 marcos superficiais na célula Aterro Remediado e 9 marcos superficiais da célula Aterro Fase I.

As figuras 4.29 e 4.30 apresentam os resultados obtidos pela aplicação do modelo estudado para os marcos do aterro CRR em Minas do Leão. A figura 4.29a mostra a regressão linear para a determinação da taxa de deformação inicial e a deformação última, e a figura 4.29b mostra as curvas de deformação versus logaritmo do tempo dos dados medidos e estimados pelo modelo Hiperbólico dos marcos superficiais MT7R, MT9R, MT12, MT13 e MT14. E na figura 4.30a estão apresentados a regressão linear para a determinação da taxa de deformação inicial e a deformação última e na figura 4.30b estão apresentadas as curvas de deformação versus logaritmo do tempo dos dados medidos e estimados pelo modelo Hiperbólico dos marcos MT15, MT16, MT17, MT21 e MT24.

Os resultados obtidos pela aplicação do modelo Hiperbólico para os marcos superficiais analisados do aterro de São Leopoldo estão apresentados nas figuras 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34. A aplicação deste modelo consiste, primeiramente, em determinar a taxa de deformação inicial e deformação última pela regressão linear, e após a utilização da formulação do modelo em estudo. Na figura 4.31 estão apresentados os resultados dos marcos superficiais (MDM01 a MDM04) do Aterro Remediado, sendo a regressão linear do modelo (Figura 4.31a) e as curvas de deformação medida e prevista versus logaritmo do tempo (Figura 4.31b). E, na figura 4.32, estão apresentados os resultados dos marcos (MDM05 a MDM08) do Aterro Remediado, sendo a regressão linear do modelo (Figura 4.32a) e as curvas de deformação medida e prevista versus logaritmo do tempo (Figura 4.32b).

Da mesma forma, estão apresentados os resultados da célula do Aterro Fase I, que foram divididos da seguinte maneira: os marcos MDM09 a MDM13, na figura 4.33, mostram a regressão linear (Figura 4.33a) e as curvas de deformação medida e prevista versus logaritmo do tempo (Figura 4.33b) e os marcos MDM14 a MDM17, na figura 4.34, mostra a regressão linear (Figura 4.34a) e as curvas de deformação medida e prevista versus logaritmo do tempo (Figura 4.34b).

Tabela 4.5 – Parâmetros obtidos do modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998).

Aterros	Marco	H (m)	a	b	ϵ_{ult} (%)	ρ_0 (%/dia)	Desvio (%)
Sanitários							
CRR Minas do Leão	MT7R	20	53,53	0,04	2,78E-01	1,87E-02	4,56
	MT9R	14	44,05	0,03	2,99E-01	2,27E-02	4,85
	MT12	17	58,38	0,07	1,51E-01	1,71E-02	-0,17
	MT13	13	27,04	0,06	1,65E-01	3,70E-02	-0,71
	MT14	13	34,86	0,06	1,62E-01	2,87E-02	-0,84
	MT15	20	47,19	0,05	1,92E-01	2,12E-02	1,47
	MT16	13,5	21,87	0,03	3,85E-01	4,57E-02	7,75
	MT17	13	109,06	0,18	5,57E-02	9,17E-03	-1,69
	MT21	24	33,03	0,04	2,42E-01	3,03E-02	1,71
	MT24	20	57,67	0,09	1,06E-01	1,73E-02	1,15
MÉDIA			48,67	0,07	2,04E-01	2,48E-02	1,81
D.P			24,70	0,04	9,81E-02	1,08E-02	3,02
Aterro Remediado São Leopoldo	MDM01	16	176,50	0,15	6,62E-01	5,67E-03	4,54
	MDM02	8	559,40	0,96	1,04E-01	1,79E-03	-31,13
	MDM03	16	16,98	0,15	6,58E-01	5,89E-02	1,06
	MDM04	16	30,39	0,19	5,24E-01	3,29E-02	2,59
	MDM05	16	10,77	0,15	6,62E-01	9,28E-02	0,56
	MDM06	8	46,56	0,34	2,92E-01	2,15E-02	-6,96
	MDM07	8	33,65	0,25	3,98E-01	2,97E-02	-6,09
	MDM08	8	106,30	0,42	2,39E-01	9,41E-03	-15,56
	MÉDIA			122,57	0,33	4,42E-01	3,16E-02
D.P			185,10	0,27	2,17E-01	3,08E-02	11,96
Aterro Fase I São Leopoldo	MDM09	6,4	66,45	0,07	1,39E-01	1,50E-02	-4,11
	MDM10	6,1	99,85	0,04	2,50E-01	1,00E-02	1,96
	MDM11	5,9	104,50	0,07	1,39E-01	9,57E-03	-0,37
	MDM12	6,8	92,03	0,06	1,56E-02	1,09E-02	6,90
	MDM13	8,7	93,49	0,07	1,43E-01	1,07E-02	-1,85
	MDM14	14,2	60,78	0,02	6,25E-01	1,65E-02	4,64
	MDM15	16,2	50,39	0,04	2,70E-01	1,98E-02	1,83
	MDM16	16,9	62,70	0,04	2,63E-01	1,59E-02	0,88
	MDM17	15	50,90	0,05	2,13E-01	1,96E-02	1,08
MÉDIA			75,68	0,05	2,29E-01	1,42E-02	1,22
D.P			21,59	0,02	1,69E-01	4,05E-03	3,27
MÉDIA TOTAL			82,30	0,15	2,91E-01	2,35E-02	-1,12
D.P TOTAL			93,52	0,14	6,00E-02	1,39E-02	5,09

a e b = valores obtidos na regressão linear; ρ_0 = taxa de recalque inicial; ϵ_{ult} = deformação última; D.P = desvio padrão.

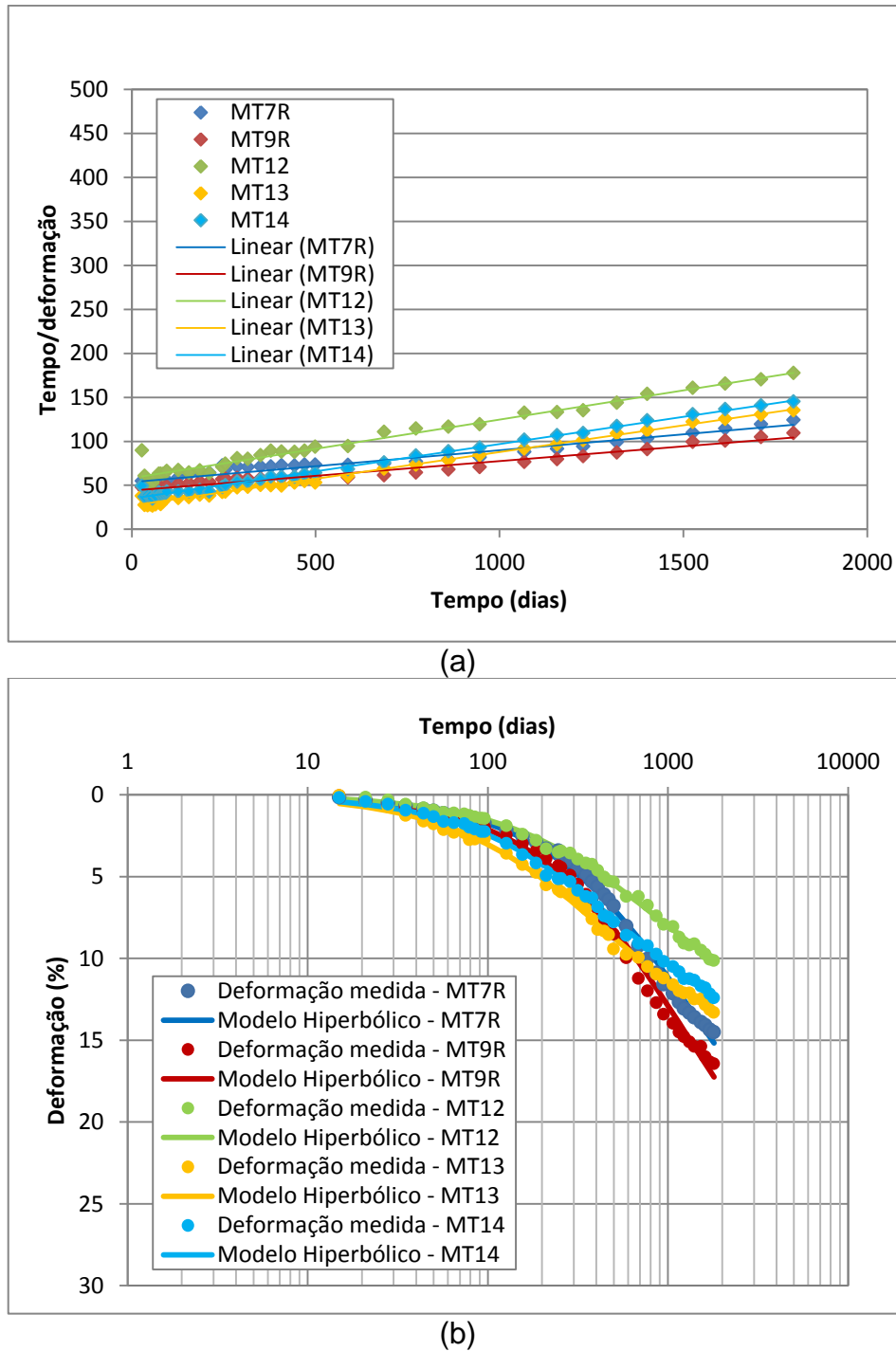
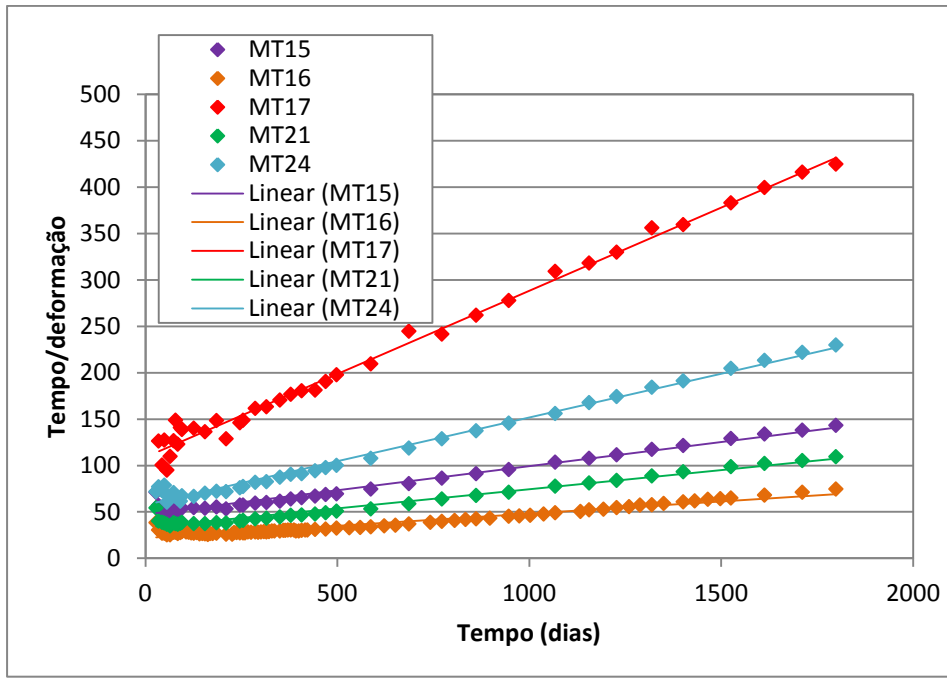
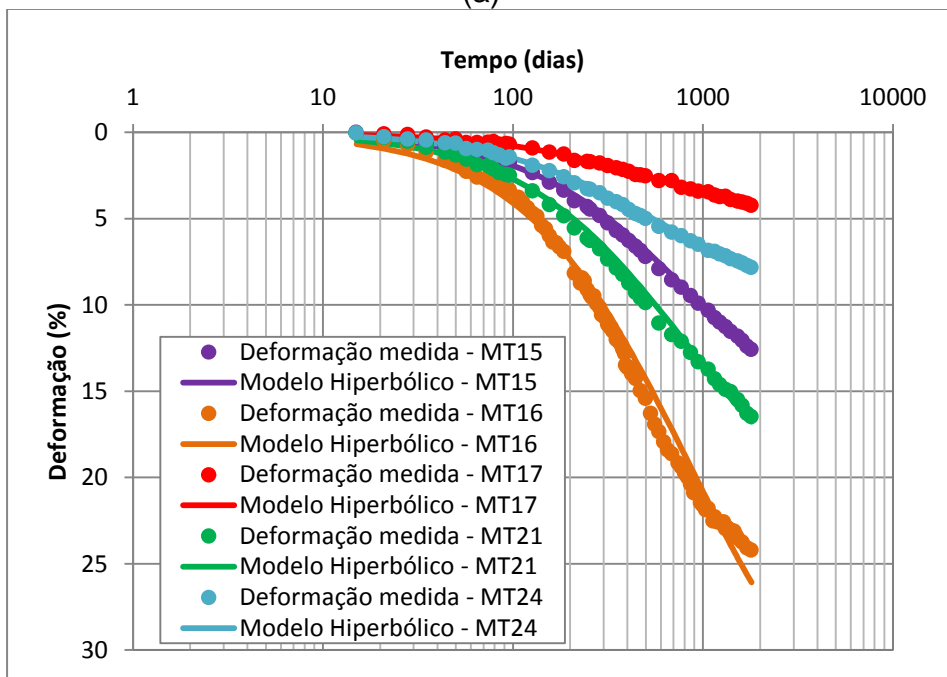


Figura 4.29 – (a) Regressão linear para determinação da taxa de deformação inicial e deformação última; (b) Curvas de deformação versus log. do tempo para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão, com base no modelo Hiperbólico.

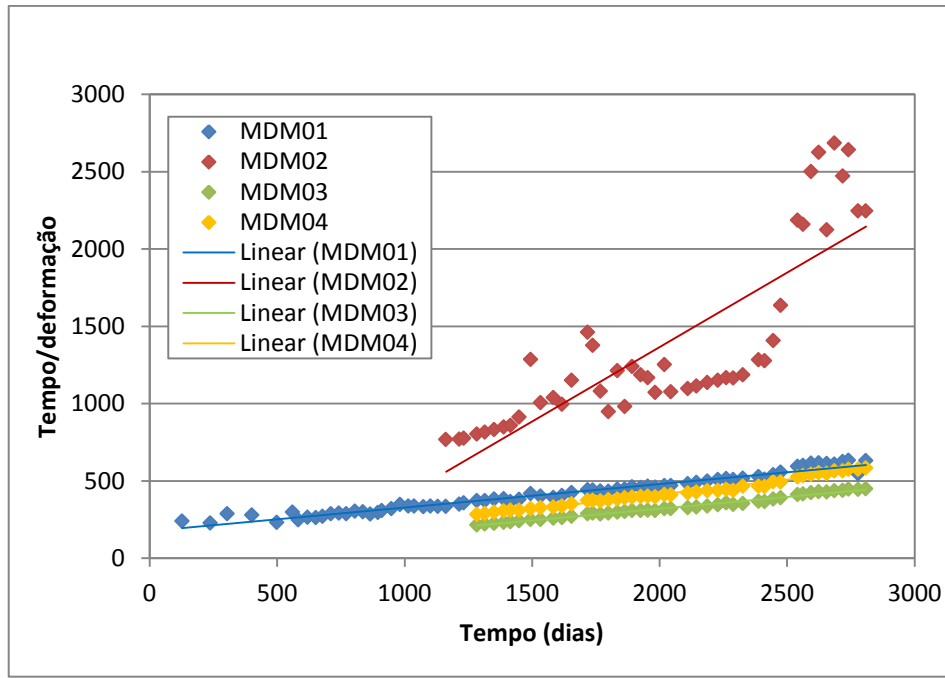


(a)

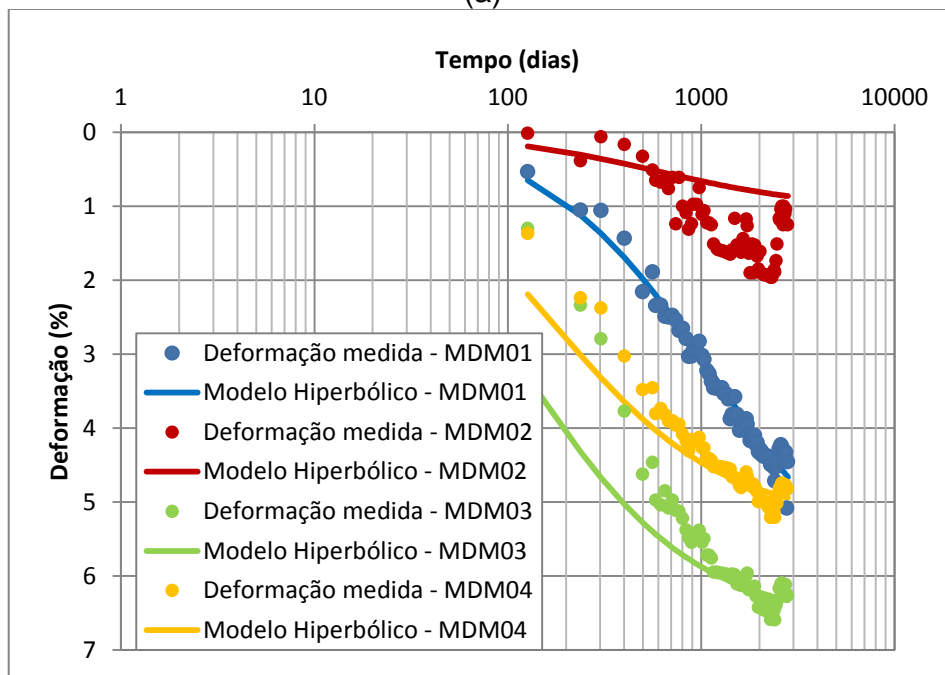


(b)

Figura 4.30 – (a) Regressão linear para determinar da taxa de deformação inicial e deformação última; (b) Curvas de deformação versus log. do tempo para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão, com base no modelo Hiperbólico.

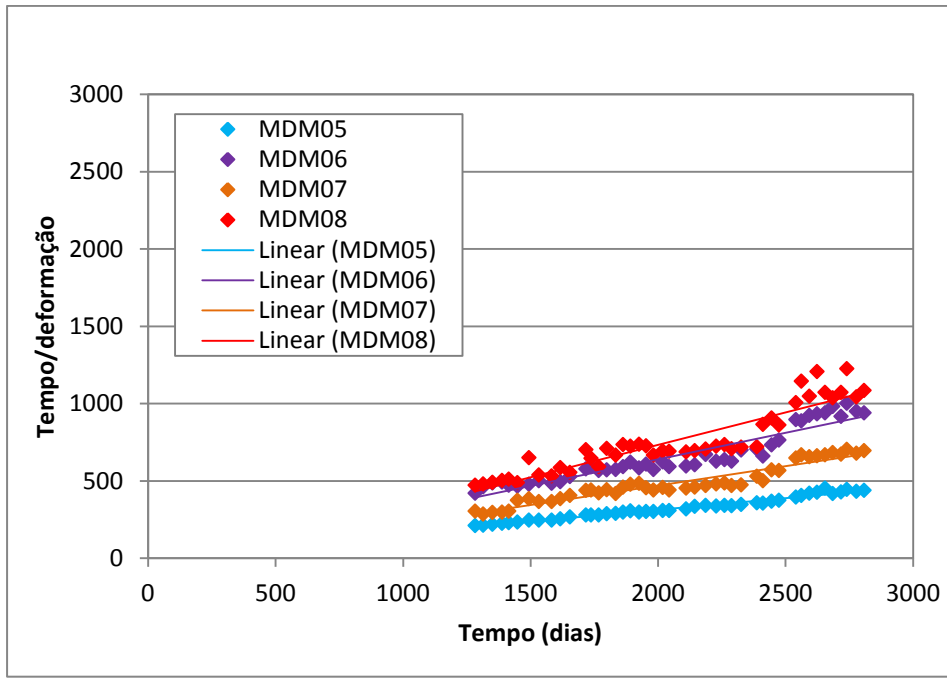


(a)

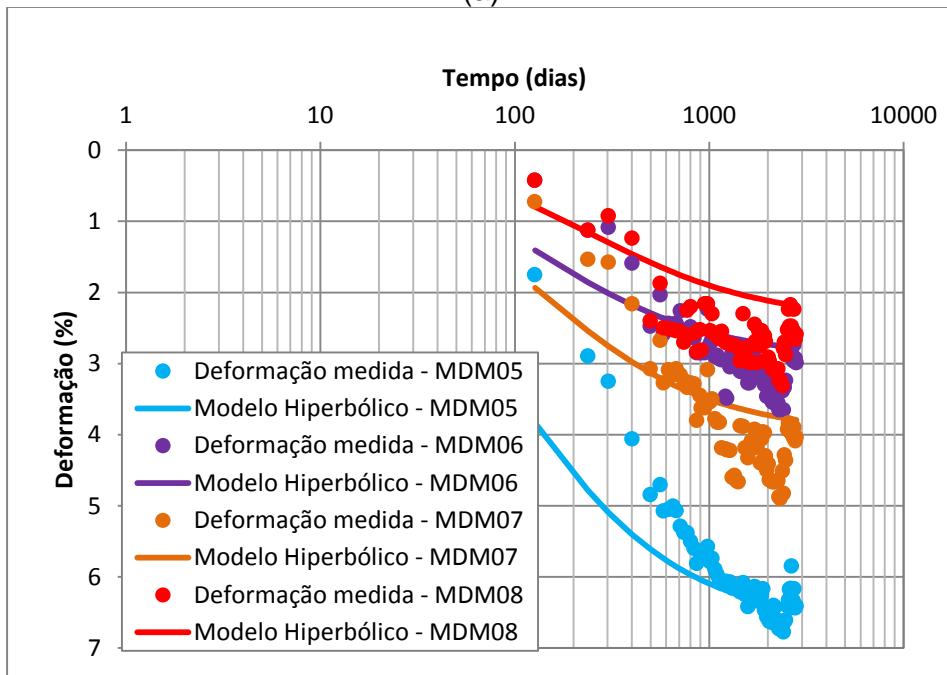


(b)

Figura 4.31 – (a) Regressão linear para determinação da taxa de deformação inicial e deformação última; (b) Curvas de deformação medida e prevista versus log. do tempo pelo modelo Hiperbólico para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

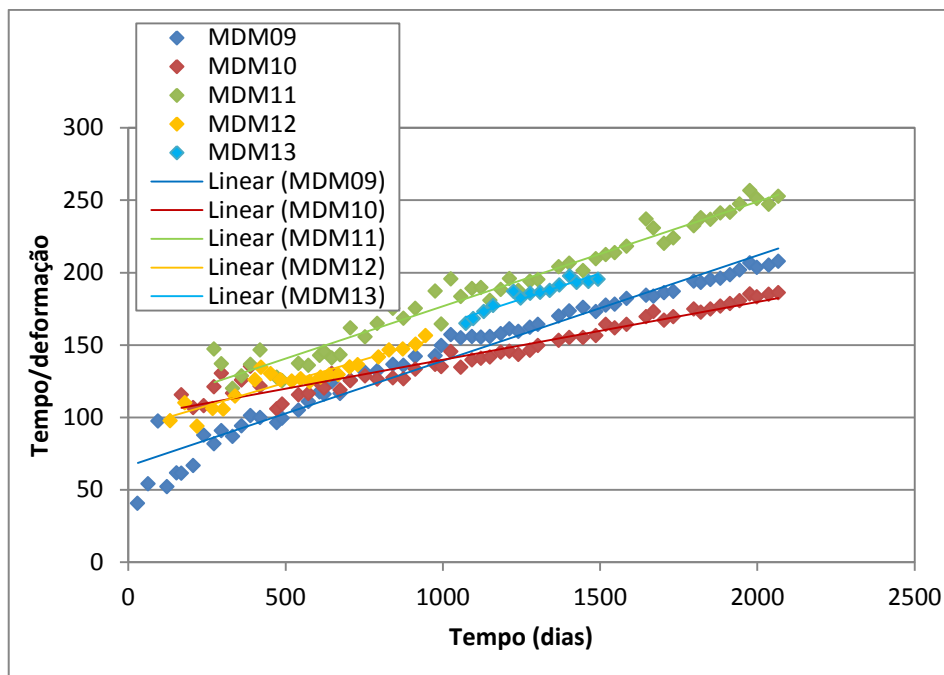


(a)

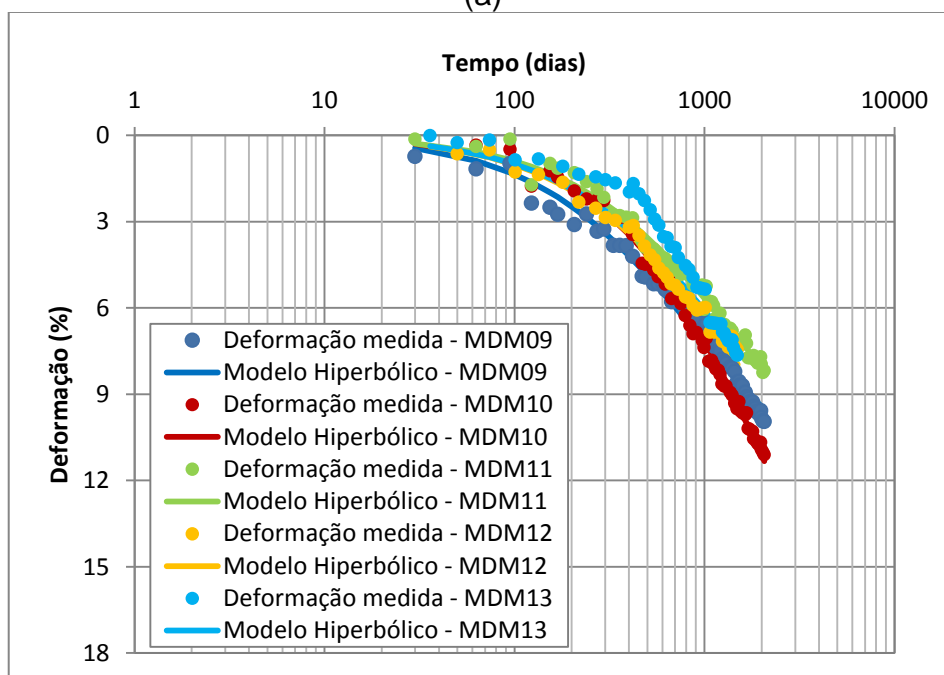


(b)

Figura 4.32 – (a) Regressão linear para determinação da taxa de deformação inicial e deformação última; (b) Curvas de deformação medida e prevista versus log. do tempo pelo modelo Hiperbólico para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

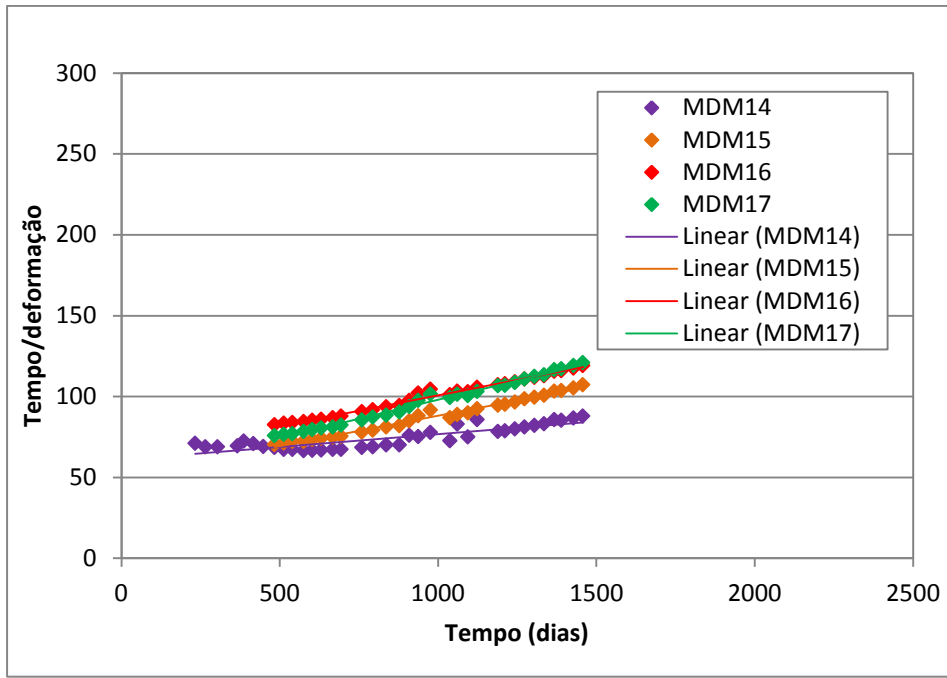


(a)

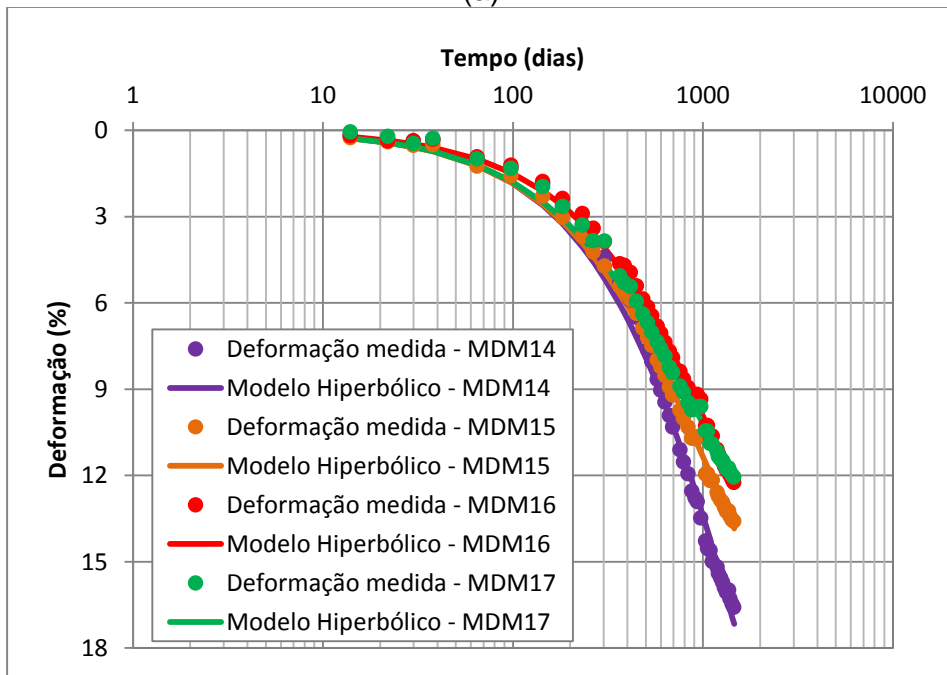


(b)

Figura 4.33 – (a) Regressão linear para determinação da taxa de deformação inicial e deformação última; (b) Curvas de deformação medida e prevista versus log. do tempo pelo modelo Hiperbólico para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.



(a)



(b)

Figura 4.34 – (a) Regressão linear para determinação da taxa de deformação inicial e deformação última; (b) Curvas de deformação medida e prevista versus log. do tempo pelo modelo Hiperbólico para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

O Modelo Hiperbólico apresentou boa concordância entre os valores observados e estimados para os marcos analisados neste trabalho, tanto para os marcos do aterro CRR em Minas do Leão, como para os marcos do aterro de São Leopoldo. Com base nos resultados obtidos a utilização desta proposta, com alguns ajustes, poderia ser recomendada para a previsão de recalques do presente trabalho.

As figuras 4.35, 4.36 e 4.37 apresentam outra maneira de observar os resultados obtidos pela aplicação deste modelo na estimativa de recalques para os aterros CRR e de São Leopoldo, sendo a partir da correlação entre as deformações medidas e as deformações calculadas. Na figura 4.35, a correlação mostra o comportamento do modelo Hiperbólico para os 10 marcos analisados do aterro CRR, sendo que para se ter uma boa aderência os valores devem ser o mais próximo possível da linha a 45°, ou seja, da linha tracejada do gráfico da figura 4.35. Pode ser observado como, por exemplo, o marco MT16, que entre 13 e 23% de deformação os valores medidos são menores que os calculados e, após os 23%, os valores medidos são maiores que os calculados.

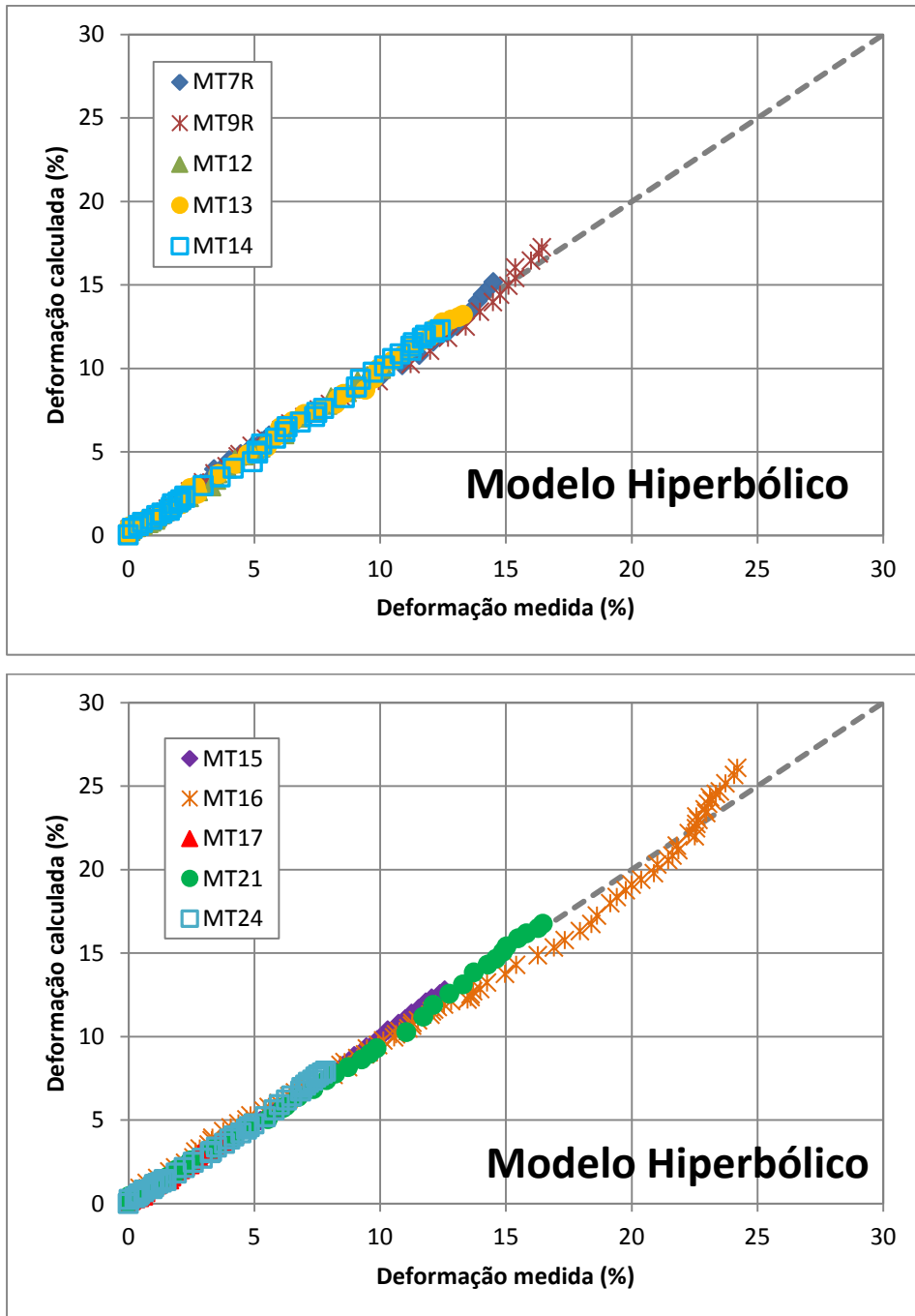


Figura 4.35 – Comparação entre a deformação medida e calculada para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão, com base no Modelo Hiperbólico.

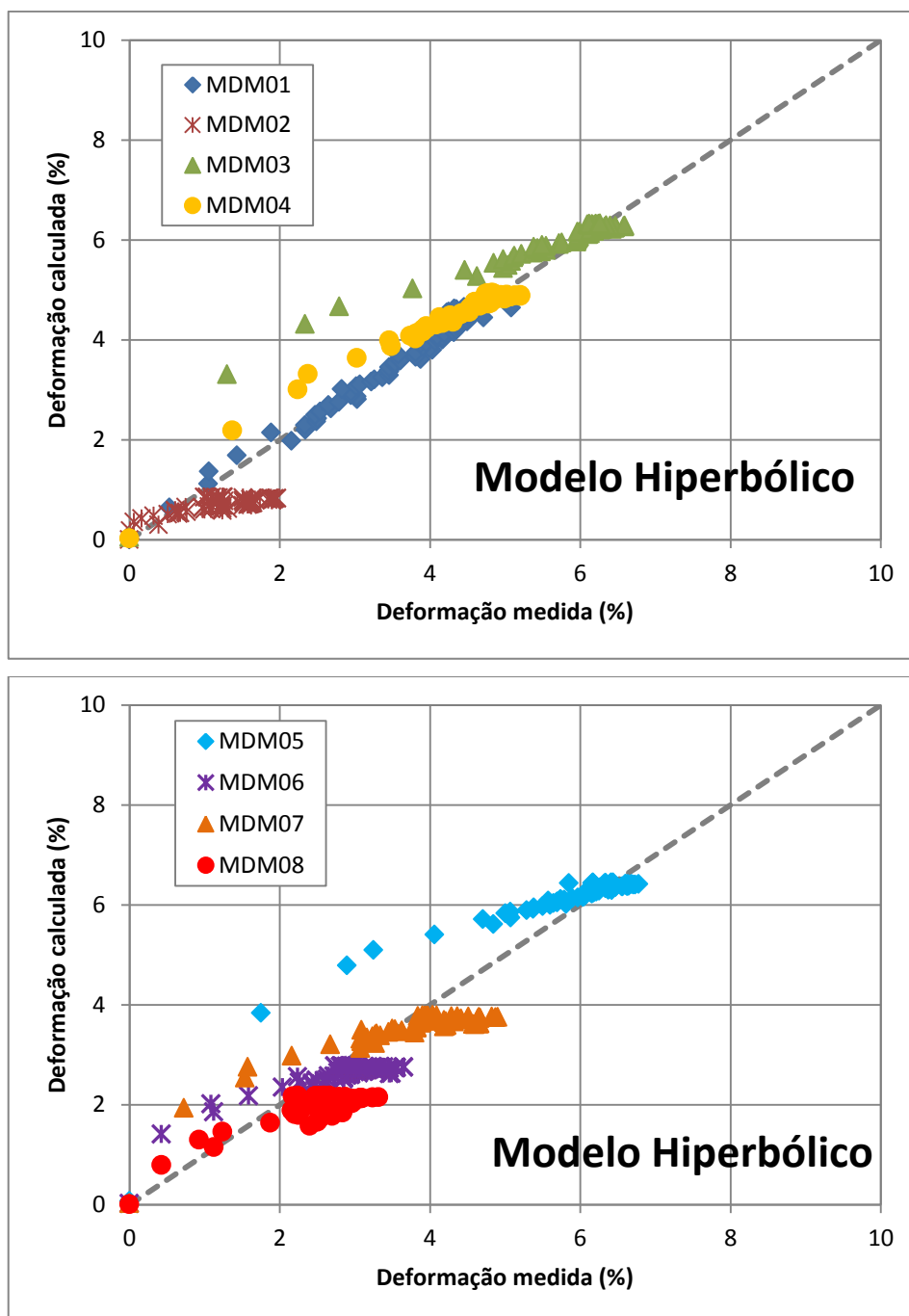


Figura 4.36 – Correlação entre deformação medida e calculada pelo modelo Hiperbólico para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

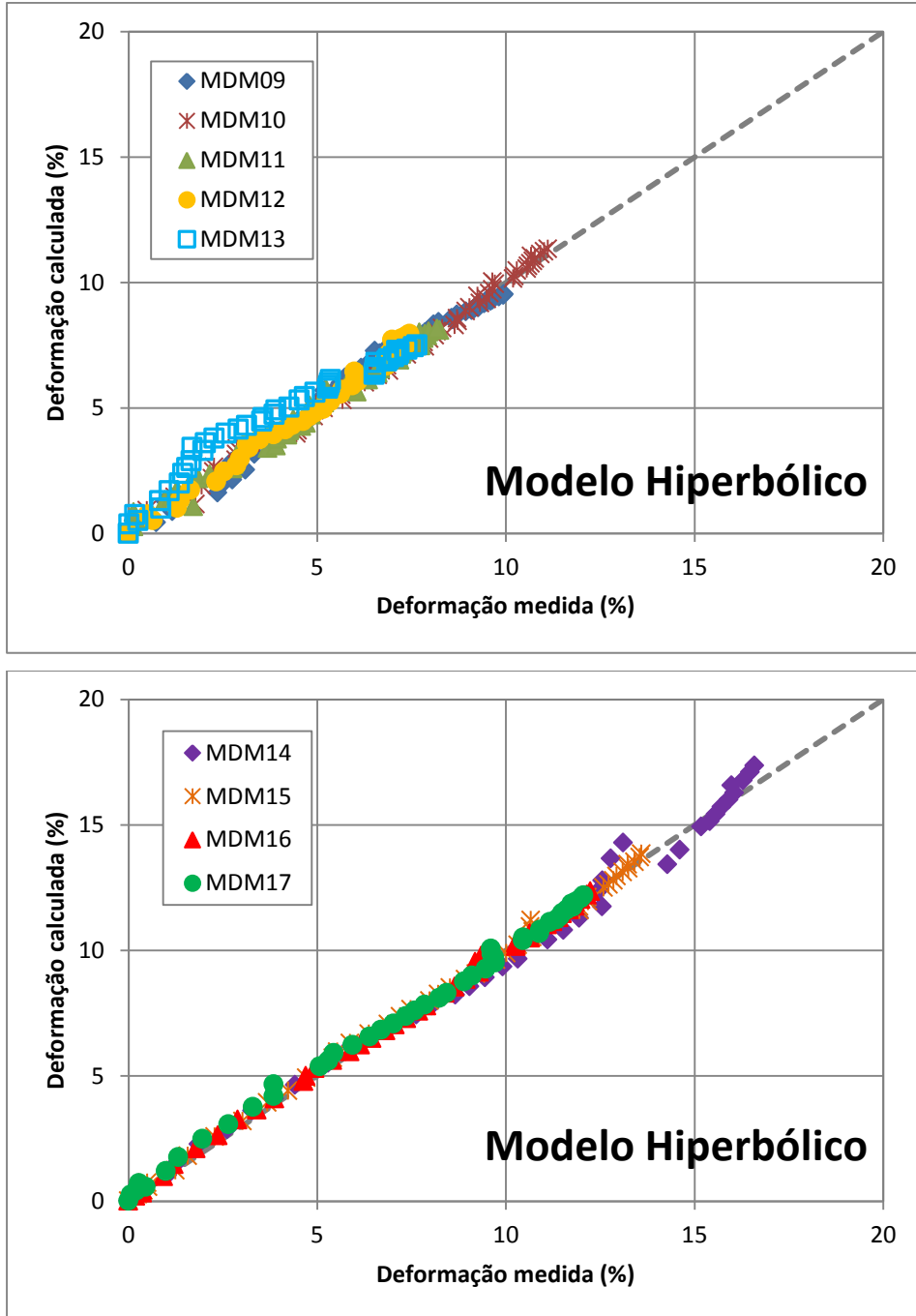


Figura 4.37 – Correlação entre deformação medida e calculada pelo modelo Hiperbólico para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

4.2.3 Modelo exponencial de *creep* (Potência) de Edil et al. (1990)

O modelo proposto por Edil et al. (1990) utiliza funções de potência para previsão de recalques em aterros sanitários, como descrito no item 2.5.4 da Revisão Bibliográfica deste trabalho. O tempo de início para verificação do desempenho do modelo foi definido como sendo o tempo de início das leituras dos marcos superficiais. O tempo de referência (t_r) foi considerado igual a 1 dia conforme formulação original e também adotado por Marques (2001). A compressibilidade de referência (m) e a taxa de compressão (n) foram estimadas pelo método dos mínimos quadrados que, por sua vez, foi aplicado com a utilização da ferramenta Solver do programa *Microsoft Excel Office*.

Na tabela 4.6 estão apresentados os resultados dos parâmetros obtidos pela aplicação do Modelo exponencial de *creep* (Potência) para os marcos superficiais analisados do aterro CRR em Minas do Leão e do aterro de São Leopoldo, nas células aterro Remediado e Fase I. A figura 4.38 mostra as curvas de deformação versus logaritmo do tempo para os valores medidos e previstos a partir do modelo baseado em função de potência na previsão de recalques para os marcos do aterro CRR em Minas do Leão.

A figura 4.39 apresenta as curvas de deformação versus logaritmo do tempo para os valores medidos e previstos a partir do modelo baseado em função de potência na previsão de recalques para os marcos superficiais analisados (MDM01 a MDM08) da célula do Aterro Remediado. Da mesma forma, a figura 4.40 apresenta para os marcos superficiais (MDM09 a MDM17) da célula do Aterro Fase I.

Tabela 4.6 – Resultados obtidos do Modelo exponencial de *creep* (Potência).

Aterros Sanitários	Marco	H (m)	m (kPa-1)	n (tr = 1dia)	Desvio (%) t = 1068dias	Desvio (%) t = 1800dias
	MT7R	20	2,14E-06	0,90	-9,25	21,05
	MT9R	14	3,18E-06	0,91	-9,48	23,73
	MT12	17	2,56E-06	0,84	-2,72	20,25
CRR	MT13	13	4,12E-06	0,84	-4,23	30,03
Minas do Leão	MT14	13	3,74E-06	0,84	-4,00	26,31
	MT15	20	3,52E-06	0,81	-3,66	20,52
	MT16	13,5	2,76E-05	0,68	-1,88	26,06
	MT17	13	1,25E-06	0,84	-2,09	23,96
	MT21	24	5,48E-06	0,76	-2,69	20,75
	MT24	20	1,24E-06	0,90	-6,94	29,83
	MÉDIA		5,48E-06	0,83	-4,69	24,25
	D.P		7,88E-06	0,07	2,85	3,72
					Desvio (%) t = 583dias	Desvio (%) t = 2809dias
Aterro	MDM01	16	1,16E-05	0,50	-4,36	10,41
Remediado	MDM02	8	8,44E-06	0,49	25,12	42,72
São Leopoldo	MDM03	16	1,18E-04	0,25	-7,47	8,60
	MDM04	16	9,74E-05	0,24	-5,41	9,02
	MDM05	16	1,48E-04	0,22	-3,99	7,78
	MDM06	8	1,04E-04	0,27	-12,04	15,85
	MDM07	8	1,27E-04	0,28	-7,78	16,16
	MDM08	8	3,53E-06	0,70	-51,20	41,73
	MÉDIA		7,72E-05	0,37	-8,39	19,03
	D.P		5,95E-05	0,17	20,75	14,66
					Desvio (%) t = 790dias	Desvio (%) t = 1458 a 2067 dias
Aterro Fase I	MDM09	6,4	3,87E-05	0,58	-2,42	2,47
	MDM10	6,1	8,84E-06	0,80	-10,59	8,55
São Leopoldo	MDM11	5,9	2,37E-05	0,63	-2,83	4,40
	MDM12	6,8	7,38E-06	0,80	-9,59	12,55
	MDM13	8,7	2,58E-06	0,90	-1,79	2,19
	MDM14	14,2	3,60E-06	0,90	-9,50	8,70
	MDM15	16,2	5,65E-06	0,80	-7,81	10,17
	MDM16	16,9	4,74E-06	0,80	-6,42	7,16
	MDM17	15	5,47E-06	0,80	-9,03	11,37
	MÉDIA		1,12E-05	0,78	-6,66	7,51
	D.P		1,21E-05	0,11	3,45	3,76
MÉDIA TOTAL			3,13E-05	0,66	-6,58	16,93
D.P TOTAL			2,86E-05	0,05	10,17	6,30

m = compressibilidade de referência; n = taxa de compressão; D.P = desvio padrão.

Este modelo obteve uma boa aderência na estimativa de recalques para os marcos analisados do aterro CRR de Minas do Leão até o tempo de 1068 dias, sendo a média de desvios (D) de -4,69%, ou seja, as deformações estimadas foram menores que as medidas. Após o tempo de 1068 dias a curva de deformações se afasta com o tempo chegando a uma média de desvios de 24,25% no tempo de 1800 dias, ou seja, as deformações calculadas foram maiores que as observadas (Tabela 4.4). Verifica-se, portanto, que a partir do tempo de 1068 dias a curva de deformação estimada pelo modelo de Potência não ajusta adequadamente aos dados medidos em campo (Figura 4.38).

Para as células do aterro de São Leopoldo, este modelo também obteve uma boa aderência entre os valores medidos e previstos, sendo que para a célula aterro Remediado a curva do modelo estimou adequadamente entre os tempos de 583 dias e 2809 dias com média de desvios (D) de -8,39% e 19,03%, respectivamente. Verifica-se que a partir do tempo de 2809 dias a curva estimada pelo modelo estudado não ajusta adequadamente os dados medidos em campo (Figura 4.39). E, para a célula aterro Fase I, obteve média de desvios de -6,66% no tempo de 790 dias, e de 7,51% no período de 1458 dias a 2067 dias, verificando que o ajuste da curva foi adequado para os dados medidos (Figura 4.40).

As figuras 4.41, 4.42 e 4.43 apresentam outra maneira de demonstrar os resultados obtidos pela aplicação baseado em função de potência para os marcos analisados dos aterros CRR de Minas do Leão e de São Leopoldo, células aterro Remediado e Fase I, sendo a partir de correlação entre as deformações medidas e calculadas, observando que para se ter a boa aderência entre os valores medidos e calculados os mesmos devem estar o mais próximo possível da linha de 45° (linha tracejada). Verifica-se que na figura 4.41 a partir de 7% de deformação os valores da deformação calculada são maiores que a medida, ou seja, a partir deste ponto os desvios de recalque são maiores. E, na figura 4.43, observa-se que as deformações medidas e calculadas estão em cima da linha de 45° obtendo um ótimo ajuste até os 10% de deformação.

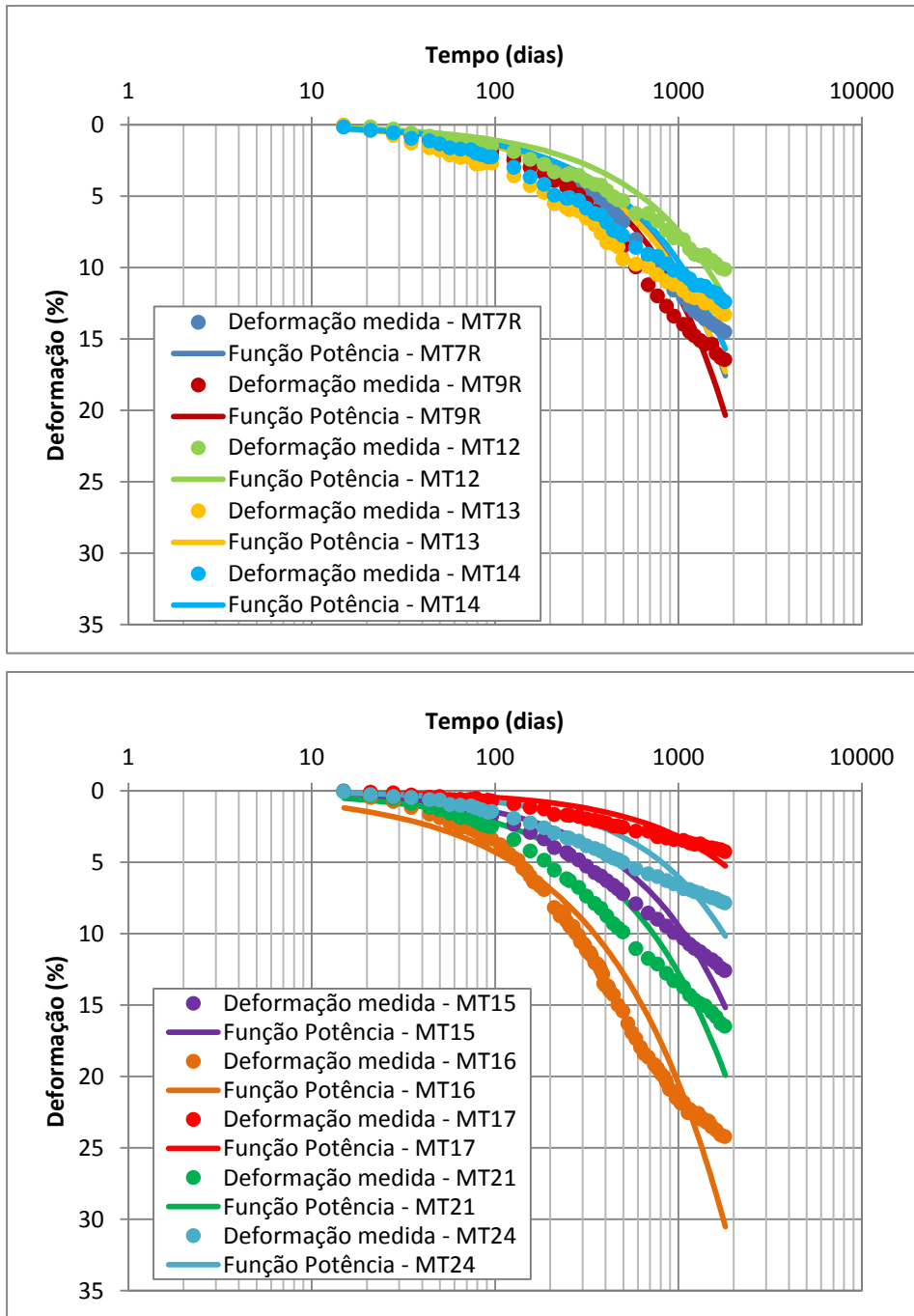


Figura 4.38 – Curvas deformação versus log. do tempo para os valores medidos e previstos a partir do modelo baseado em função de potência para os marcros do aterro CRR de Minas do Leão.

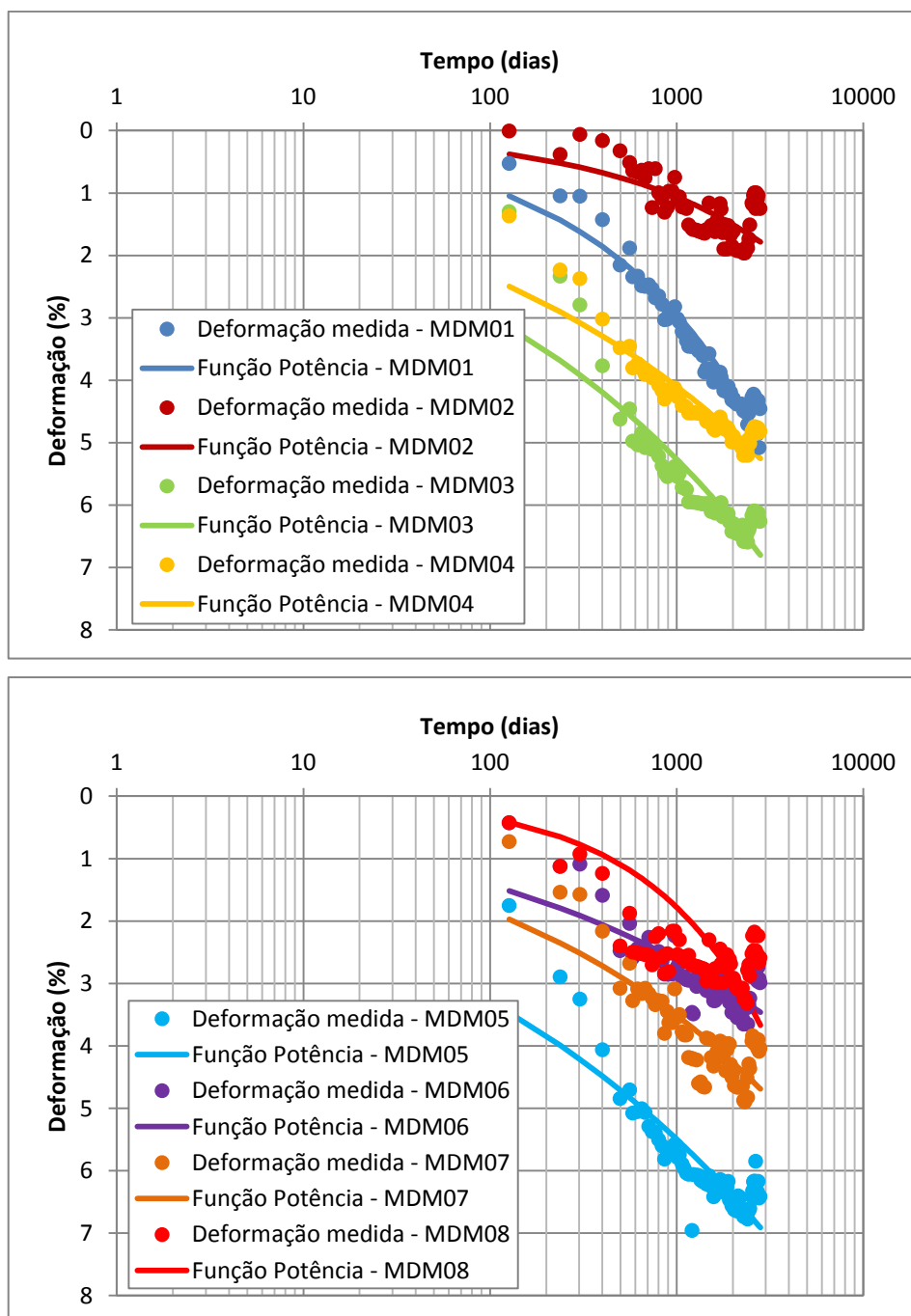


Figura 4.39 – Curvas de deformação versus log. do tempo do modelo de Potência para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

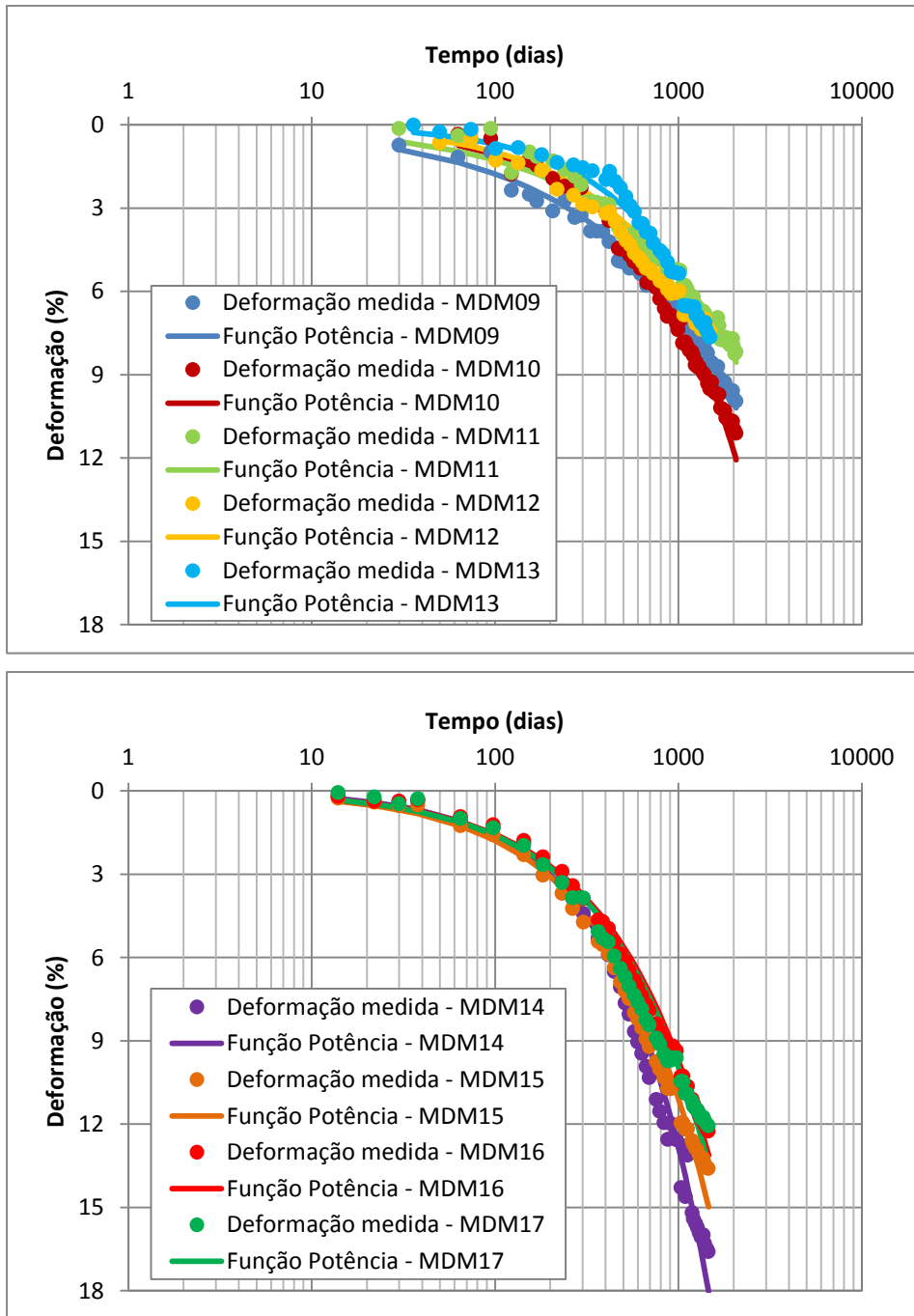


Figura 4.40 – Curvas de deformação versus log. do tempo do modelo de Potência para os marcros do Aterro Fase I de São Leopoldo.

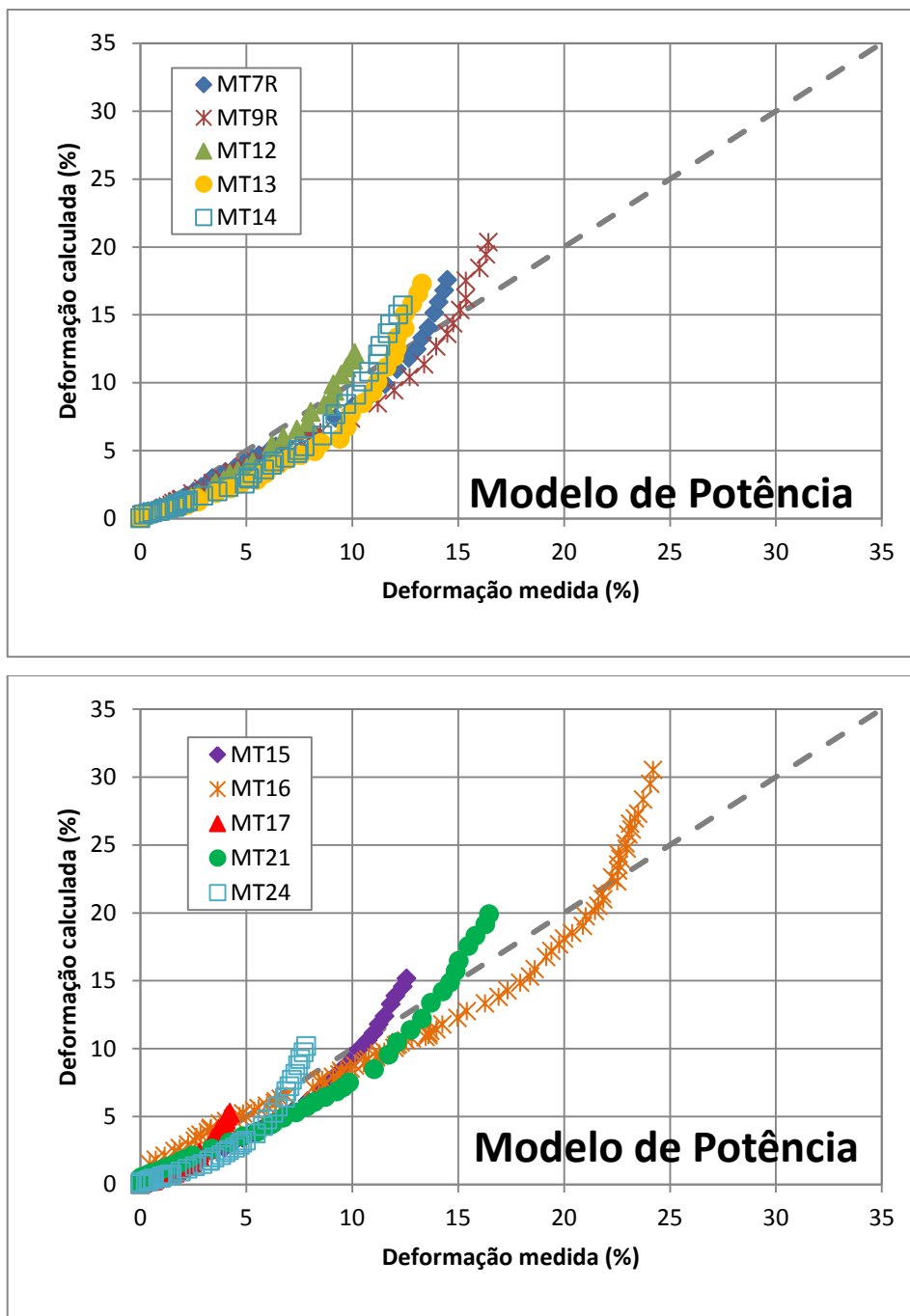


Figura 4.41 – Correlação entre os valores de deformação medida e calculada do Modelo de Potência para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.

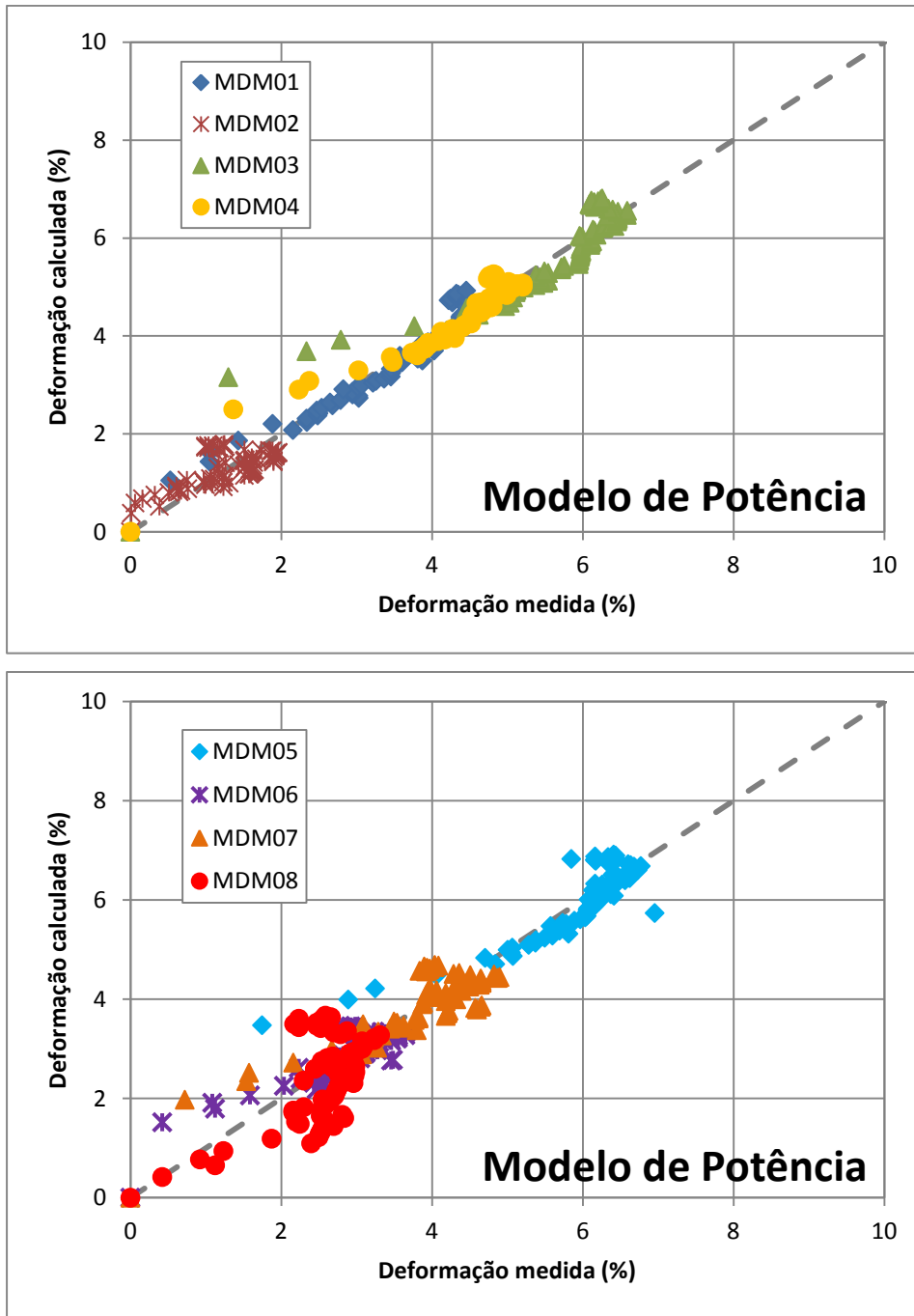


Figura 4.42 – Correlação entre a deformação medida e calculada pelo Modelo de Potência para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

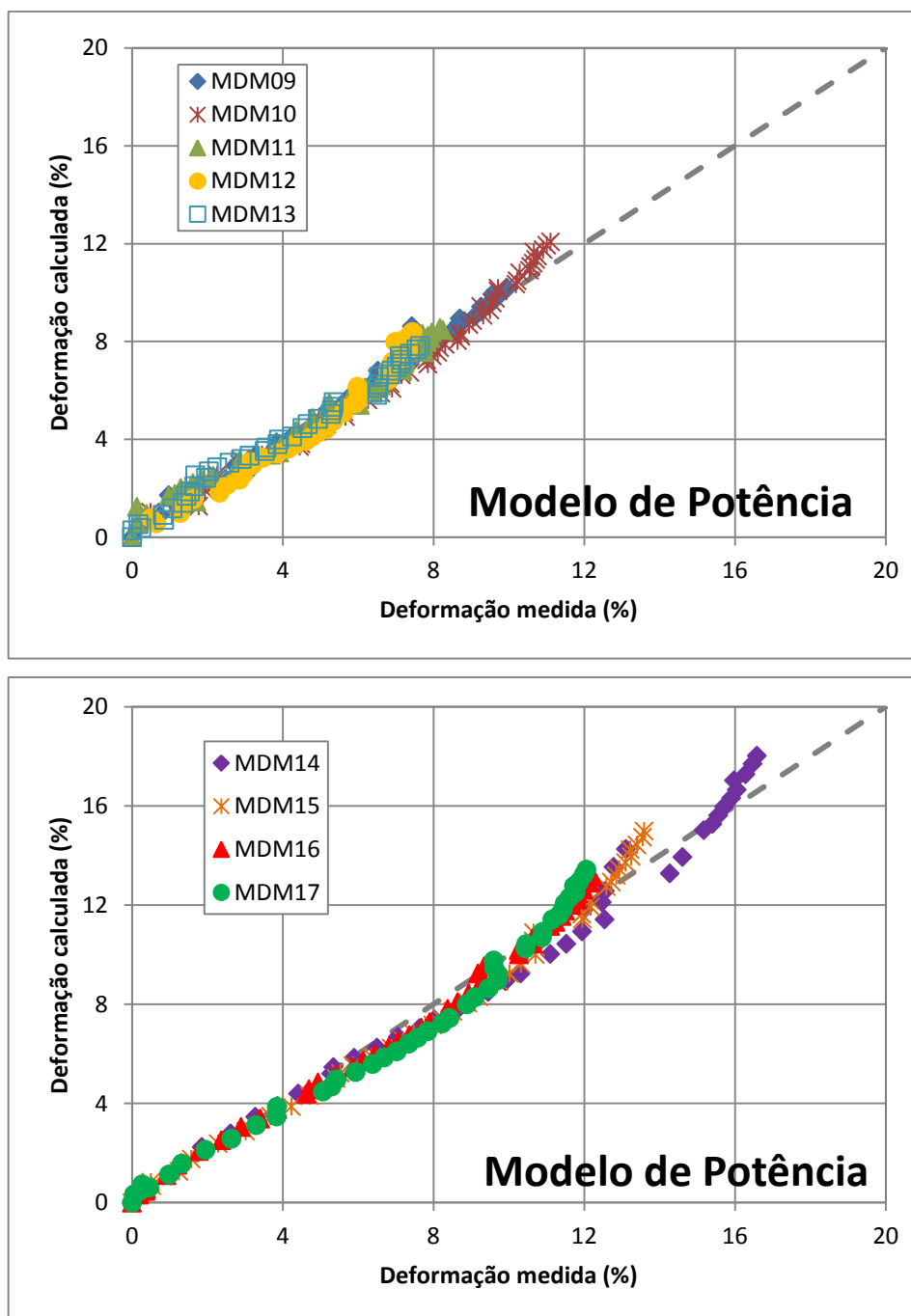


Figura 4.43 – Correlação entre a deformação medida e calculada para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

4.2.4 Modelo de Bjarngard e Edgers (1990)

Este modelo propõe a determinação de dois coeficientes para reproduzir a fase da compressão secundária em aterros sanitários, como descrito no item 2.5.5 da Revisão Bibliográfica deste trabalho. O tempo inicial foi definido como a data inicial das leituras dos marcos superficiais. A partir de ajustes matemáticos foi determinado o coeficiente de compressão secundária intermediária ($C_{\alpha 1}$) e o coeficiente de compressão secundária de longo prazo ($C_{\alpha 2}$) e para a determinação do tempo de transição entre as fases de compressão secundária (t_k) foi utilizado procedimentos gráficos.

A tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos para a estimativa de recalques dos marcos superficiais analisados, no aterro CRR em Minas do Leão e no aterro de São Leopoldo, nas células Aterro Remediado e Fase I, a partir do modelo de Bjarngard e Edgers. A figura 4.44 apresenta as curvas recalque em termos de deformação versus logaritmo do tempo para os valores medidos e previstos para os 10 marcos superficiais analisados do aterro CRR pelo Modelo de Bjarngard e Edgers.

A figura 4.45 mostra as curvas recalque em termos de deformação versus logaritmo do tempo para os valores medidos e previstos para os 8 marcos superficiais analisados (MDM01 a MDM08) do Aterro Remediado. Da mesma forma, na figura 4.46 estão apresentados as curvas de deformação versus logaritmo do tempo para os 9 marcos analisados (MDM09 a MDM17) do Aterro Fase I.

O Modelo de Bjarngard e Edgers apresentou uma boa concordância para a estimativa de recalques nos marcos analisados, tanto para o aterro CRR em Minas do Leão, como para as células Aterro Remediado e Fase I do aterro de São Leopoldo.

Os resultados determinados para o aterro CRR em Minas do Leão foram: a média de desvio (D) de recalques foi de -0,56%, os valores obtidos dos coeficientes de compressão secundária intermediária e de longo prazo variaram entre 0,0042 a 0,0202 e 0,0127 a 0,0796, respectivamente e o tempo de transição entre as fases de compressão secundária variou de 100 a 242 dias.

Os marcos superficiais analisados na célula Aterro Remediado obtiveram os seguintes resultados: média de desvio de recalque (D) de 12,71%; o coeficiente de

compressão secundária intermediária ($C_{\alpha 1}$) não foi calculado, devido as medições terem seu início em 127 dias, ou seja, os recalques primários não foram considerados nesta medição, pois estes recalques não foram medidos em campo; o coeficiente de compressão secundária de longo prazo ($C_{\alpha 2}$) variou de 0,0056 a 0,0162, e o tempo de transição entre as fases de compressão secundária (t_k) variou de 15 a 160 dias (Tabela 4.7).

Os marcos superficiais analisados na célula Aterro Fase I obtiveram os seguintes resultados: média de desvio de recalque (D) de 0,03%; o coeficiente de compressão secundária intermediária variou de 0,0068 a 0,0164, o coeficiente de compressão de longo prazo variou de 0,0304 a 0,0791, e o tempo de transição variou de 205 a 609 dias (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Resultados obtidos pela aplicação do Modelo Bjarngard e Edgers (1990).

Aterros		Parâmetros				
Sanitários	Marco	H (m)	C α 1	C α 2	tk (dias)	Desvio (%)
CRR Minas do Leão	MT7R	20	0,0087	0,0577	242	-1,01
	MT9R	14	0,0110	0,0643	186	3,63
	MT12	17	0,0087	0,0343	185	-3,03
	MT13	13	0,0157	0,0376	186	-1,27
	MT14	13	0,0124	0,0366	186	-2,82
	MT15	20	0,0104	0,0403	138	-0,88
	MT16	13,5	0,0202	0,0796	144	2,54
	MT17	13	0,0042	0,0127	186	-3,91
	MT21	24	0,0151	0,0516	127	-0,09
	MT24	20	0,0081	0,0232	100	1,26
MÉDIA			0,0115	0,0438	168	-0,56
D.P			0,0046	0,0198	41	2,45
Aterro Remediado São Leopoldo	MDM01	16	-	0,0162	160	4,23
	MDM02	8	-	0,0059	140	40,59
	MDM03	16	-	0,0139	25	4,95
	MDM04	16	-	0,0103	20	6,00
	MDM05	16	-	0,0129	15	5,51
	MDM06	8	-	0,0063	15	10,87
	MDM07	8	-	0,0107	35	16,11
	MDM08	8	-	0,0056	15	13,45
	MÉDIA				0,0102	53
D.P				0,0040	48	12,08
Aterro Fase I São Leopoldo	MDM09	6,4	0,0164	0,0401	609	-1,13
	MDM10	6,1	0,0133	0,0482	404	0,08
	MDM11	5,9	0,0068	0,0304	210	-0,14
	MDM12	6,8	0,0133	0,0327	400	0,50
	MDM13	8,7	0,0080	0,0475	450	1,26
	MDM14	14,2	0,0090	0,0791	230	-3,60
	MDM15	16,2	0,0087	0,0566	205	0,96
	MDM16	16,9	0,0081	0,0540	230	0,55
	MDM17	15,0	0,0096	0,0508	266	1,82
MÉDIA			0,0104	0,0488	334	0,03
D.P			0,0032	0,0145	140	1,61
MÉDIA TOTAL			0,0109	0,0343	185	4,06
D.P TOTAL			0,0010	0,0081	55	5,82

C α 1= coeficiente de compressão secundária intermediária; C α 2 = coeficiente de compressão secundária de longo prazo; t $_k$ = tempo de transição entre as fases de compressão secundária; D.P= desvio padrão.

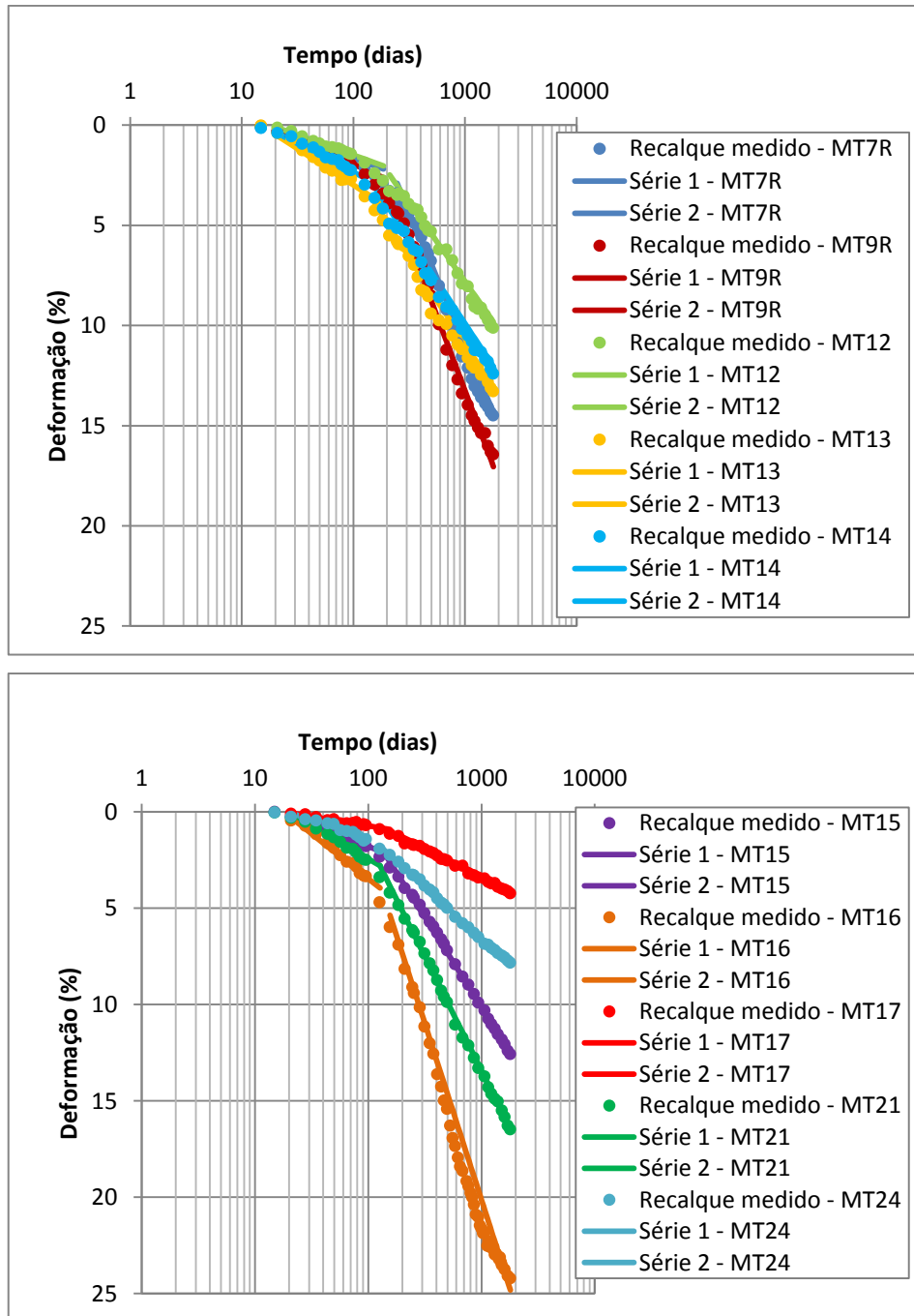


Figura 4.44 – Curvas recalques versus log. do tempo para valores medidos e previstos pelo Modelo Bjargand e Edgers (1990) para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.

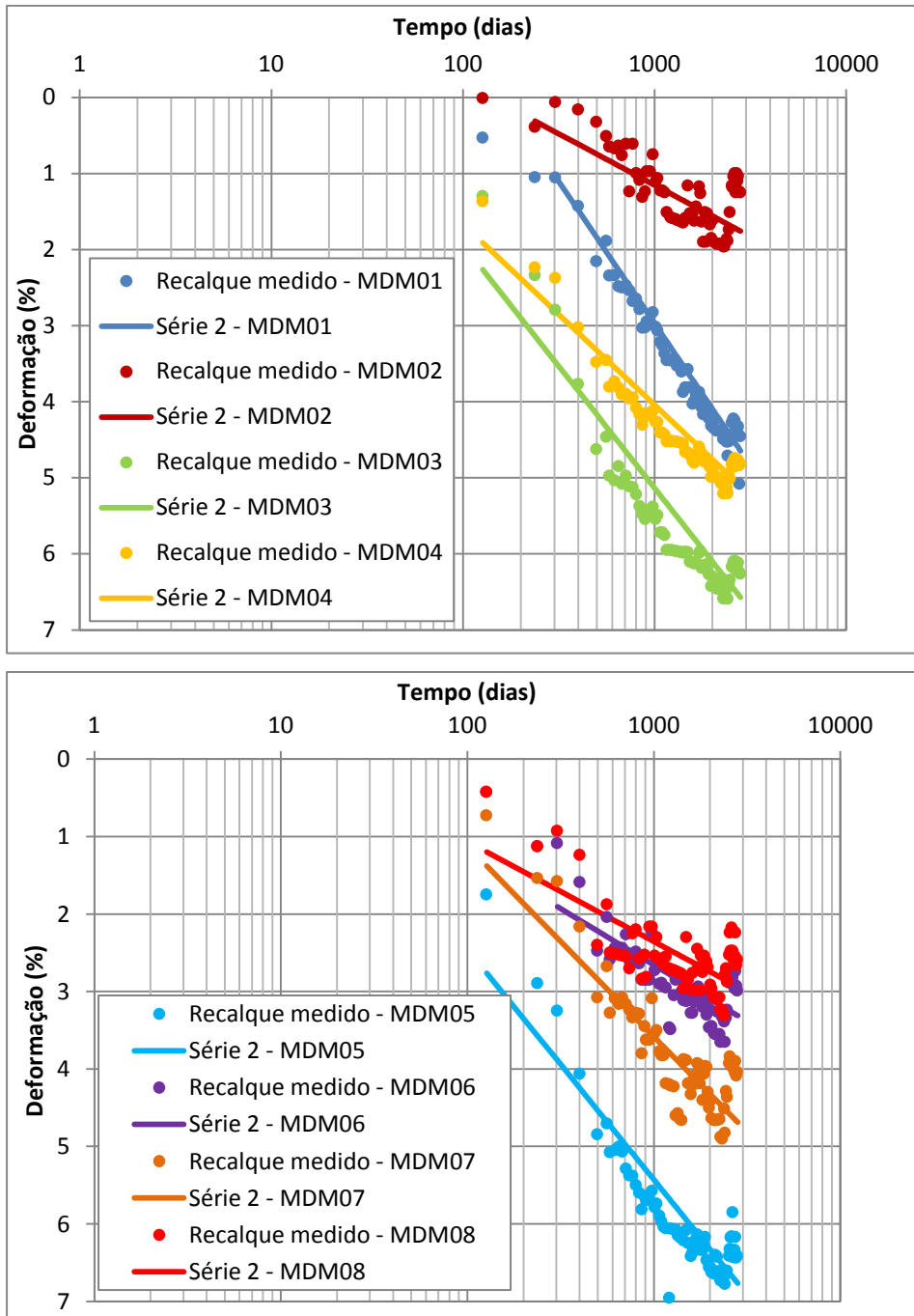


Figura 4.45 – Curvas recalque medido e previsto versus log. do tempo pelo modelo Bjarngard e Edgers (1990) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

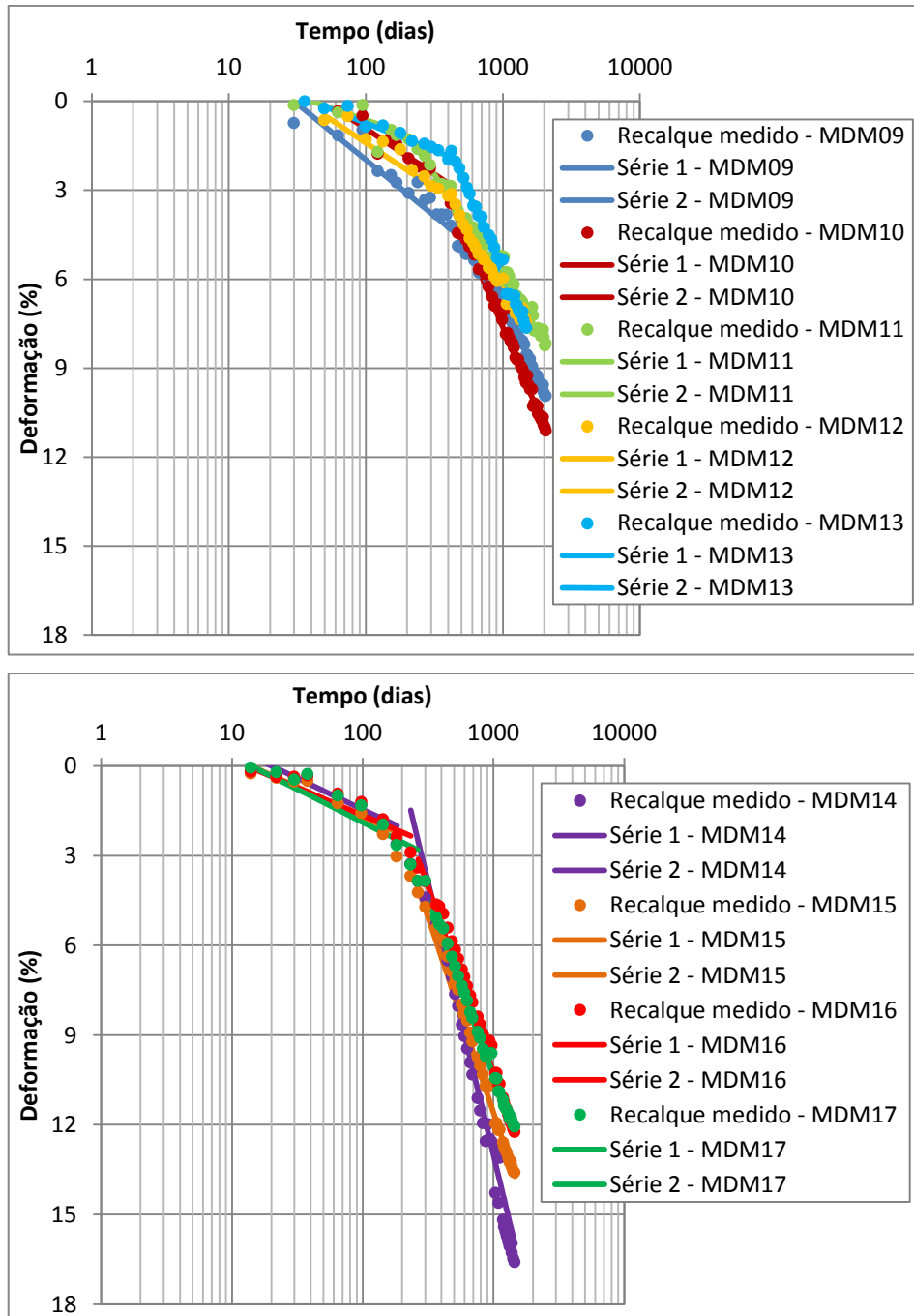


Figura 4.46 – Curvas recalque medido e previsto versus log. do tempo pelo modelo Bjarngard e Edgers (1990) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

As figuras 4.47, 4.48 e 4.49 apresentam a correlação entre a deformação medida e calculada para os 10 marcos analisados no aterro CRR de Minas do Leão, para os 8 marcos da célula Aterro Remediado e para os 9 marcos da célula Aterro Fase I, respectivamente. Esta correlação é outra forma de demonstrar os resultados

obtidos pela aplicação do modelo estudado. Observa-se que os valores de deformação medida e calculada estão próximos à linha tracejada, confirmando assim, a boa aderência do modelo estudado para os aterros analisados.

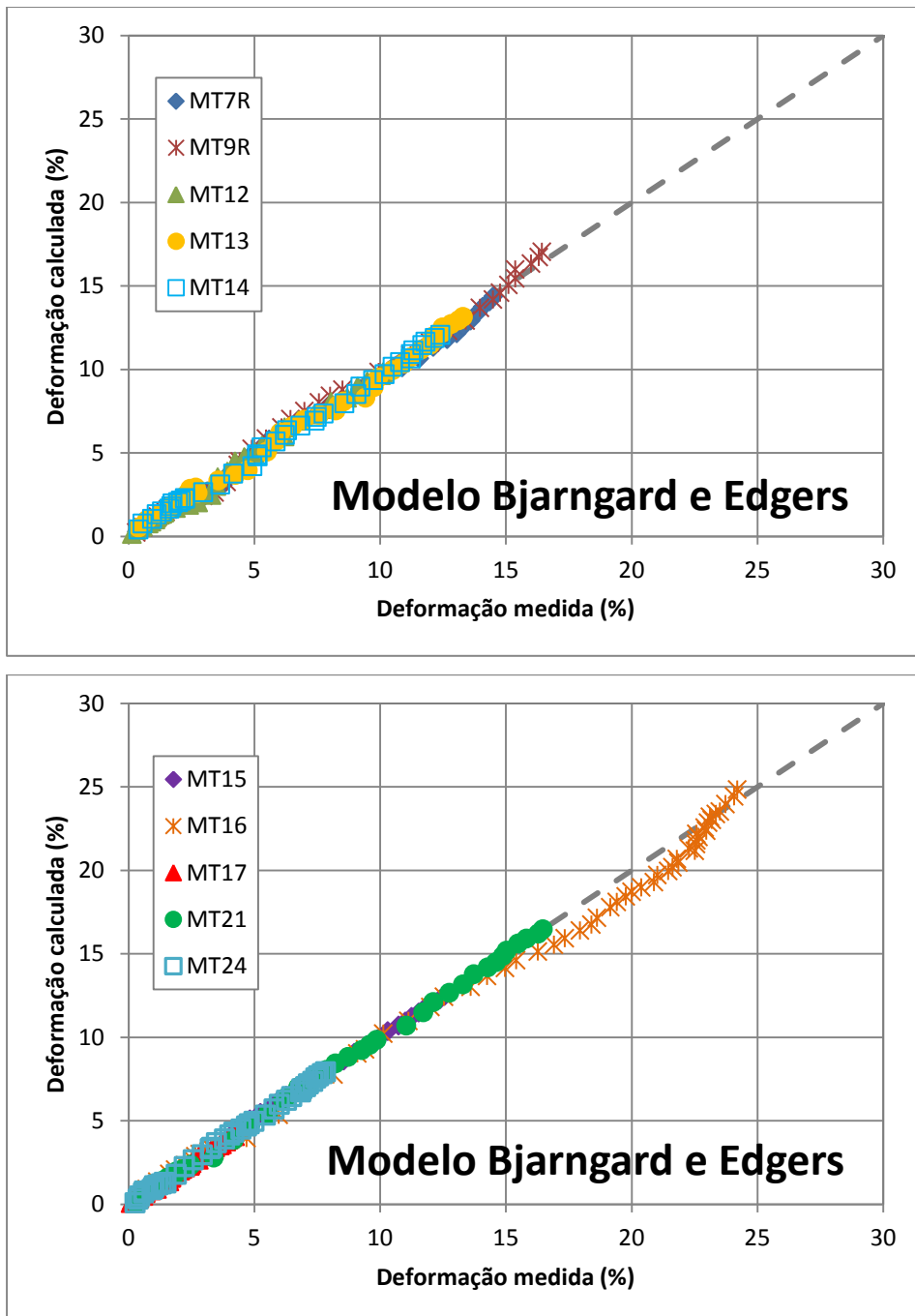


Figura 4.47 – Correlação entre a deformação medida e calculada pelo Modelo Bjarngard e Edgers (1990) para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.

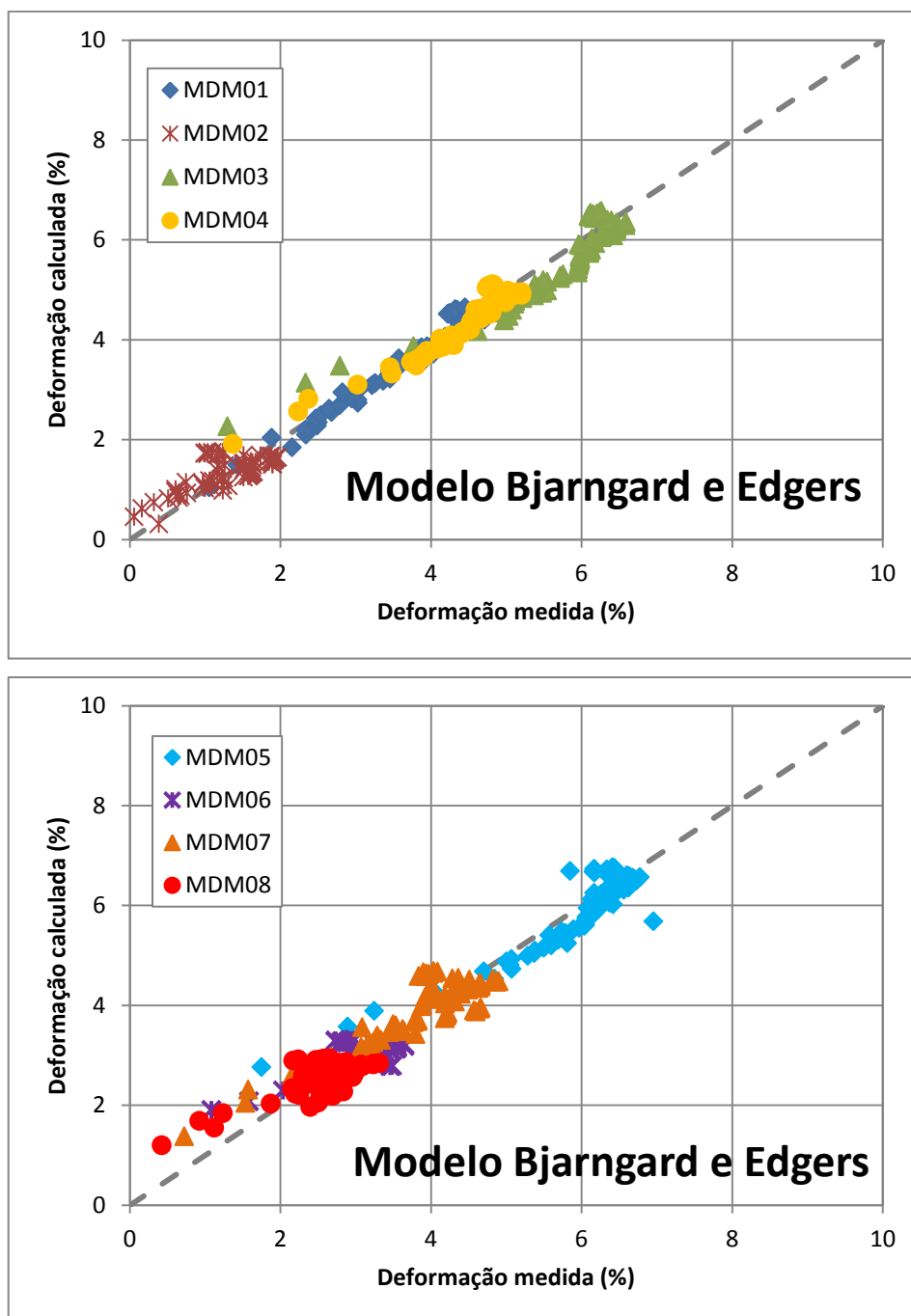


Figura 4.48 – Correlação entre a deformação medida e calculada pelo modelo Bjarngard e Edgers (1990) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

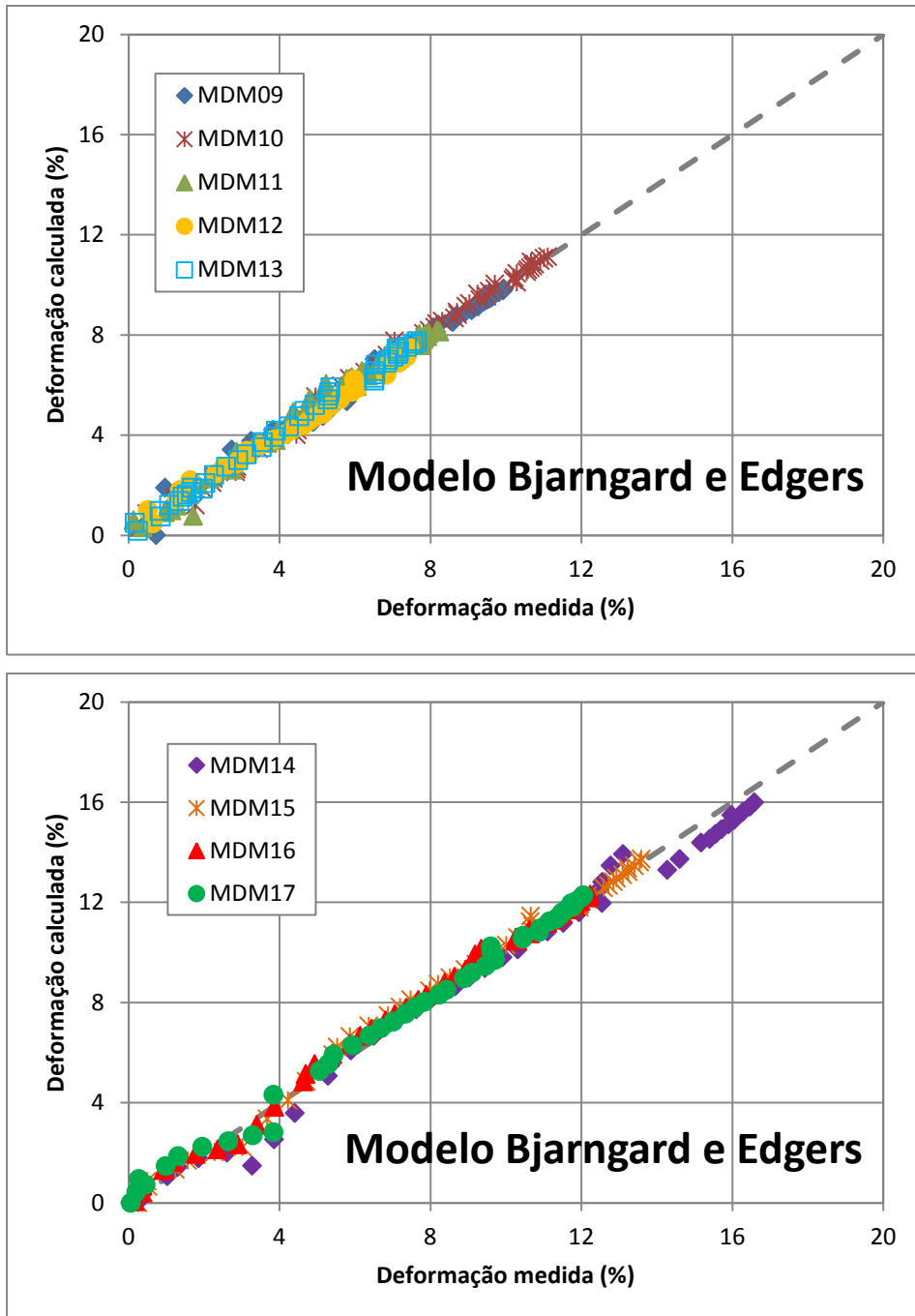


Figura 4.49 – Correlação entre a deformação medida e calculada pelo modelo Bjarngard e Edgers (1990) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

4.2.5 Modelo de Meruelo

O Modelo de Meruelo, conforme descrito do item 2.5.6 da Revisão Bibliográfica deste trabalho, estima os recalques com base na degradação da matéria orgânica presente nos RSU nos aterros sanitários. A tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos pela estimativa de recalques com o Modelo de Meruelo para os 10 marcos superficiais analisados do aterro CRR em Minas do Leão, para os 8 marcos superficiais da célula Aterro Remediado e para os 9 marcos analisados da célula Aterro Fase I do aterro de São Leopoldo.

Conforme Bridi et al.(2009) os RSU do município de Porto Alegre no Rio Grande do Sul contêm 52,10% de matéria orgânica facilmente biodegradável em sua composição, os aterros sanitários estudados foram os principais destinos finais dos RSU deste município, sendo considerado o maior gerador de resíduos. Desta forma, para a previsão dos recalques foi adotado 50% de matéria orgânica nos RSU dos aterros, que corresponde 0,25 do COD (conteúdo orgânico degradável), este valor equivale à metade da fração total orgânica, conforme Melo (2003), do total da matéria orgânica dos resíduos, somente metade dará lugar aos recalques.

A idade do aterro ao início das medições (t_0) foi adotada igual a 1 dia. E os valores do coeficiente de perda de massa (α) e do coeficiente de hidrólise (K_h) foram determinados por ajuste de curvas pelo método dos mínimos quadrados. Este método foi calculado pela ferramenta Solver do programa *Microsoft Excel Office*, que determina os valores de “ α ” e “ K_h ” a partir do melhor ajuste entre as curvas teóricas e experimentais. Conforme Melo (2003), estes parâmetros variam de acordo com o local de disposição do resíduo e são dependentes da idade da massa do resíduo aterrado e do grau de decomposição da matéria orgânica.

Tabela 4.8 – Resultados obtidos pela estimativa de recalques com o Modelo de Meruelo.

Aterros Sanitários	Marco	H (m)	α	COD	Tc (dias)	Kh (dias⁻¹)	Desvio (%)
CRR Minas do Leão	MT7R	20	0,2623	0,25	1800	0,0010	3,47
	MT9R	17	0,1839	0,25	1800	0,0012	2,25
	MT12	17	0,0920	0,25	1800	0,0014	-2,16
	MT13	13	0,0298	0,25	1800	0,0024	-4,53
	MT14	13	0,0431	0,25	1800	0,0021	-4,75
	MT15	20	0,0890	0,25	1800	0,0016	-2,83
	MT16	13,5	0,1286	0,25	1800	0,0018	0,87
	MT17	13	0,1794	0,25	1800	0,0020	-5,22
	MT21	24	0,0861	0,25	1800	0,0018	-3,34
	MT24	20	0,0272	0,25	1800	0,0021	-3,62
MÉDIA			0,1121	0,25	1800	0,0017	-1,99
D.P			0,0766	0	0	0,0004	3,09
Aterro Remediado São Leopoldo	MDM01	16	0,0330	0,25	2809	0,0010	2,37
	MDM02	8	0,0089	0,25	2809	0,0012	30,61
	MDM03	16	0,0034	0,25	2809	0,0022	1,06
	MDM04	16	0,0025	0,25	2809	0,0022	1,64
	MDM05	16	0,0023	0,25	2809	0,0024	0,64
	MDM06	8	0,0022	0,25	2809	0,0021	7,36
	MDM07	8	0,0044	0,25	2809	0,0019	8,01
	MDM08	8	0,0007	0,25	2809	0,0025	7,51
	MÉDIA			0,0072	0,25	2809	0,0019
D.P			0,0107	0	0	0,0005	9,88
Aterro Fase I São Leopoldo	MDM09	6,4	0,1079	0,25	2067	0,0011	-3,98
	MDM10	6,1	0,2666	0,25	2067	0,0007	0,02
	MDM11	5,9	0,1263	0,25	2067	0,0009	-1,51
	MDM12	6,8	0,1283	0,25	1494	0,0012	0,85
	MDM13	8,7	1,1855	0,25	1494	0,0002	2,15
	MDM14	14,2	0,7624	0,25	1458	0,0006	2,43
	MDM15	16,2	0,3146	0,25	1458	0,0010	1,45
	MDM16	16,9	0,3590	0,25	1458	0,0008	0,96
	MDM17	15	0,2375	0,25	1458	0,0011	1,05
MÉDIA			0,3876	0,25	1669	0,0009	0,38
D.P			0,3596	0	298,9	0,0003	2,01
MÉDIA TOTAL			0,1690	0,25	2092,7	0,0015	1,93
D.P TOTAL			0,1853	0	172,5	0,0001	4,26929

α = coeficiente de perda de massa; Kh = coeficiente de hidrólise; COD = conteúdo orgânico degradável; Tc = tempo de construção do aterro sanitário; D.P = desvio padrão.

A figura 4.50 apresenta as curvas dos recalques versus tempo para os valores medidos e previstos do Modelo de Meruelo para os 10 marcos superficiais analisados do aterro CRR. Conforme os resultados obtidos pelo modelo, pode-se concluir que o mesmo obteve uma boa aderência, com uma média de desvio de recalque (D) de -2,0%. Os valores dos coeficientes obtidos variaram entre 0,0272 a 0,2623 para o coeficiente de perda de massa (α), e 0,0010 a 0,0024 para o coeficiente de hidrólise (Kh).

As figuras 4.51 e 4.52 apresentam as curvas dos recalques versus tempo para os valores medidos e previstos pelo modelo de Meruelo (1995) para os marcos analisados das células Aterro Remediado e Fase I, respectivamente. Conforme os resultados obtidos pela aplicação deste modelo, pode-se concluir que o mesmo obteve uma boa aderência para ambas as células analisadas do aterro sanitário, com médias de desvios de recalques (D) de 7,4%, marcos do Aterro Remediado e de 0,4%, marcos do Aterro Fase I. Os resultados dos parâmetros obtidos pela aplicação do modelo foram: para os marcos do Aterro Remediado, o coeficiente de perda de massa (α) variou de 0,0007 a 0,033, o coeficiente de hidrólise (Kh) variou de 0,001 a 0,0025 (Tabela 4.8); e para os marcos do Aterro Fase I, o coeficiente de perda de massa (α) variou entre 0,1079 a 1,1855 e o coeficiente de hidrólise (Kh) variou entre 0,0002 a 0,0012 (Tabela 4.8).

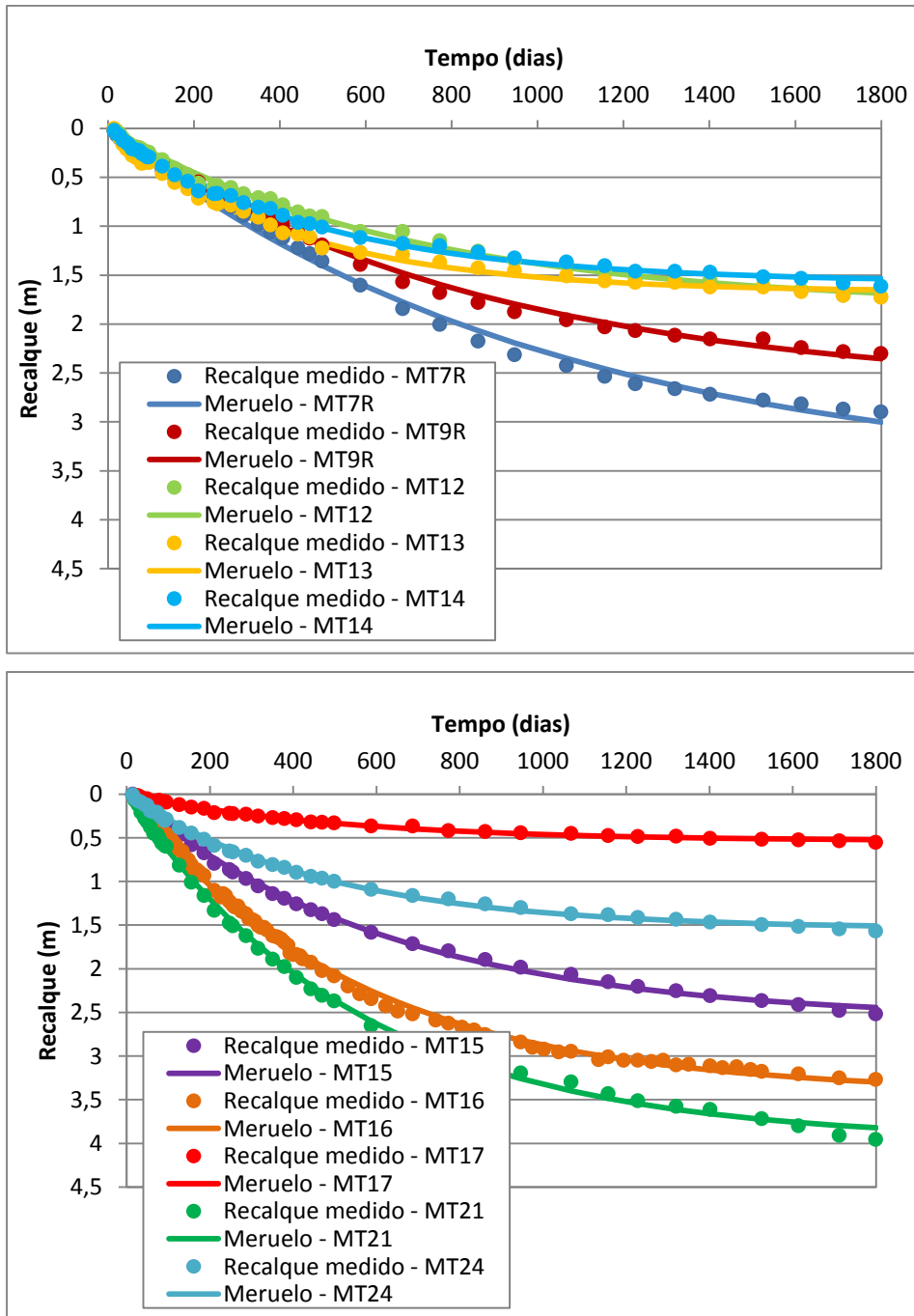


Figura 4.50 – Curvas recalque versus tempo para os valores medidos e previstos do Modelo de Meruelo para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.

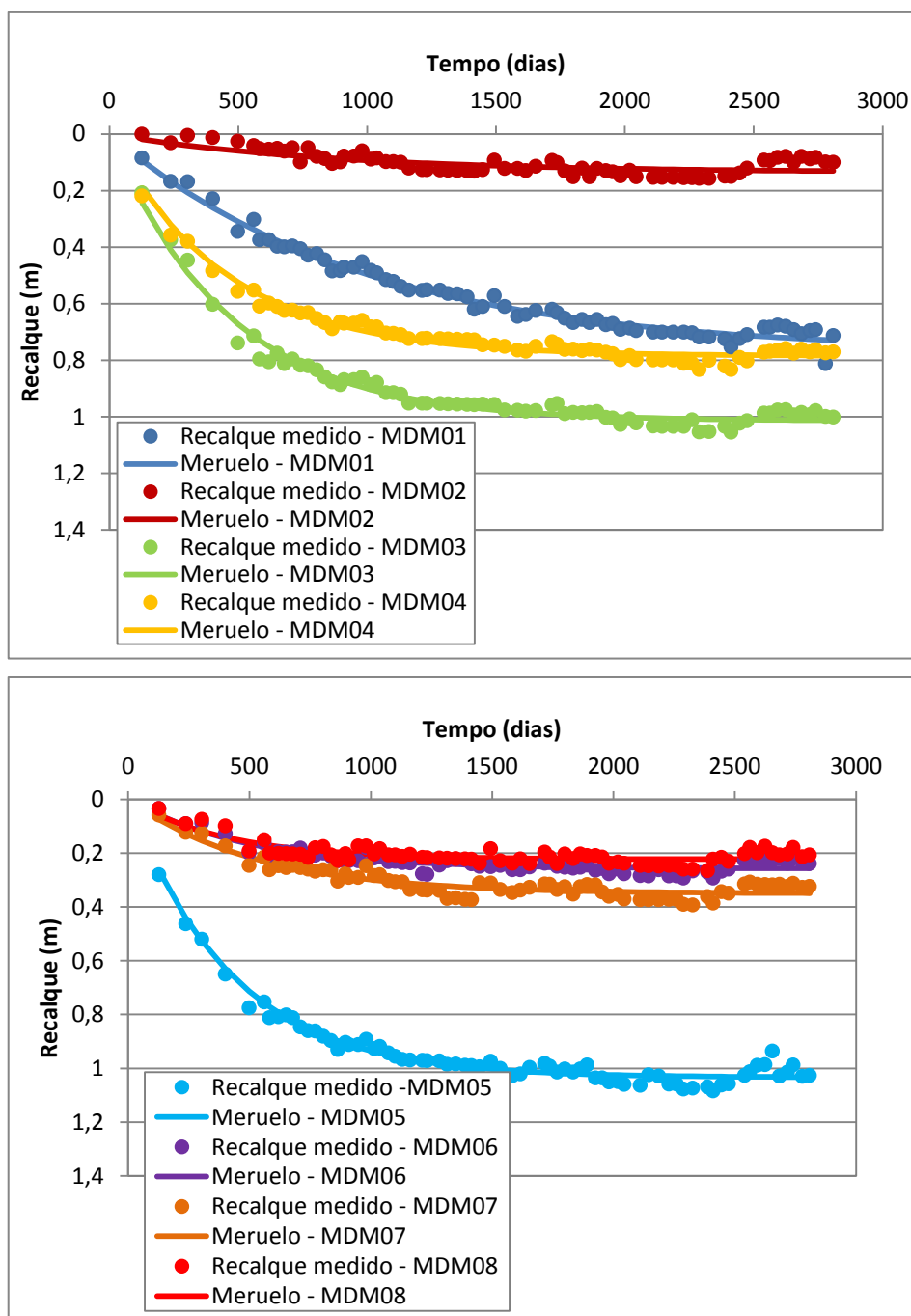


Figura 4.51 – Curvas recalque medido e previsto versus tempo pelo Modelo de Meruelo para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

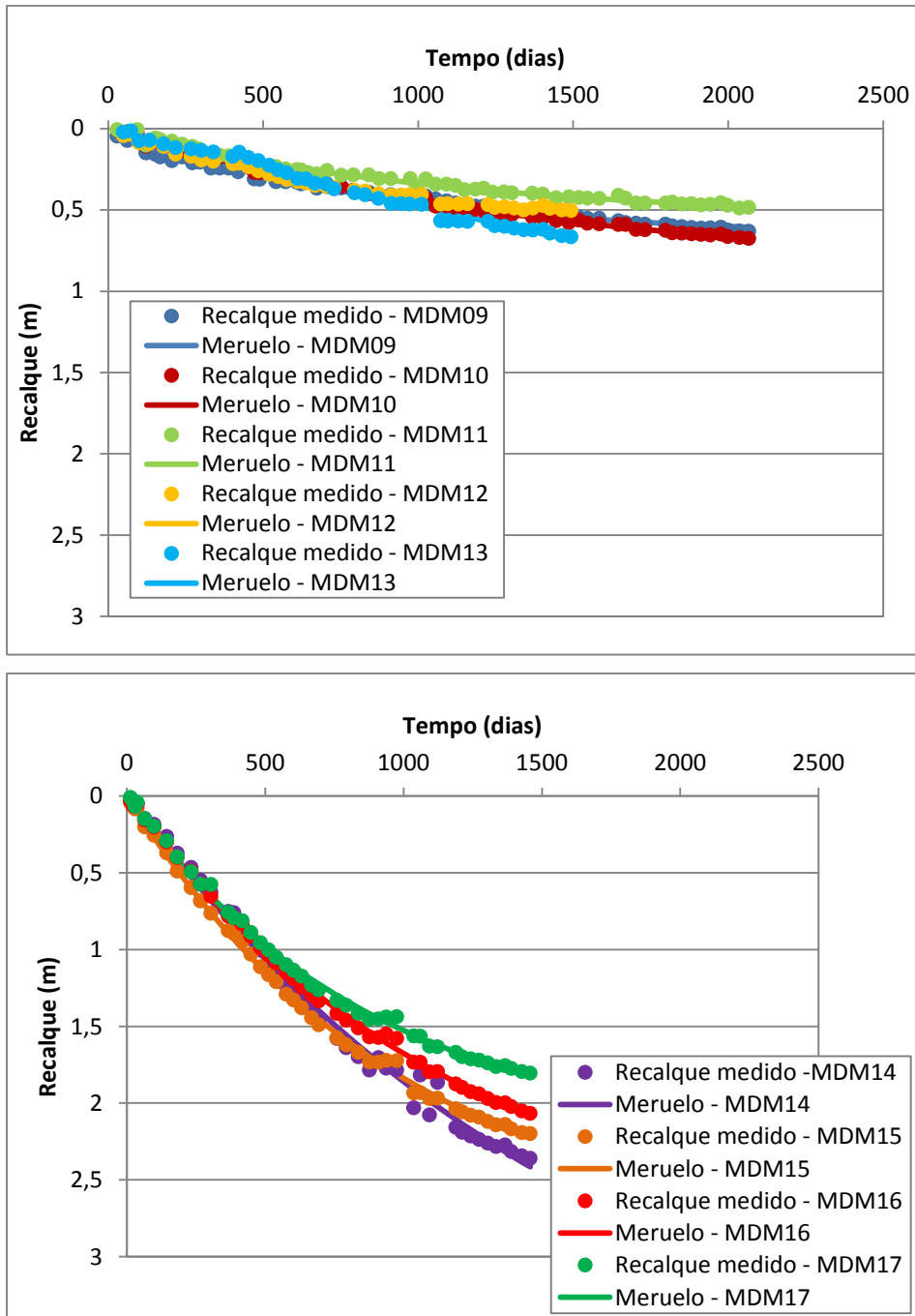


Figura 4.52 – Curvas recalque medido e previsto versus tempo pelo Modelo de Meruelo para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

As figuras 4.53, 4.54 e 4.55 demonstram outra maneira de observar a boa aderência dos resultados obtidos pela estimativa de recalques, sendo a partir dos gráficos de correlações entre os recalques medidos e calculados, onde se pode observar que praticamente todos os valores de recalques dos marcos analisados do

aterro CRR, do aterro Remediado e do aterro Fase I, estão próximos a linha de 45°, ou seja, a linha tracejada das figuras 4.53, 4.54 e 4.55.

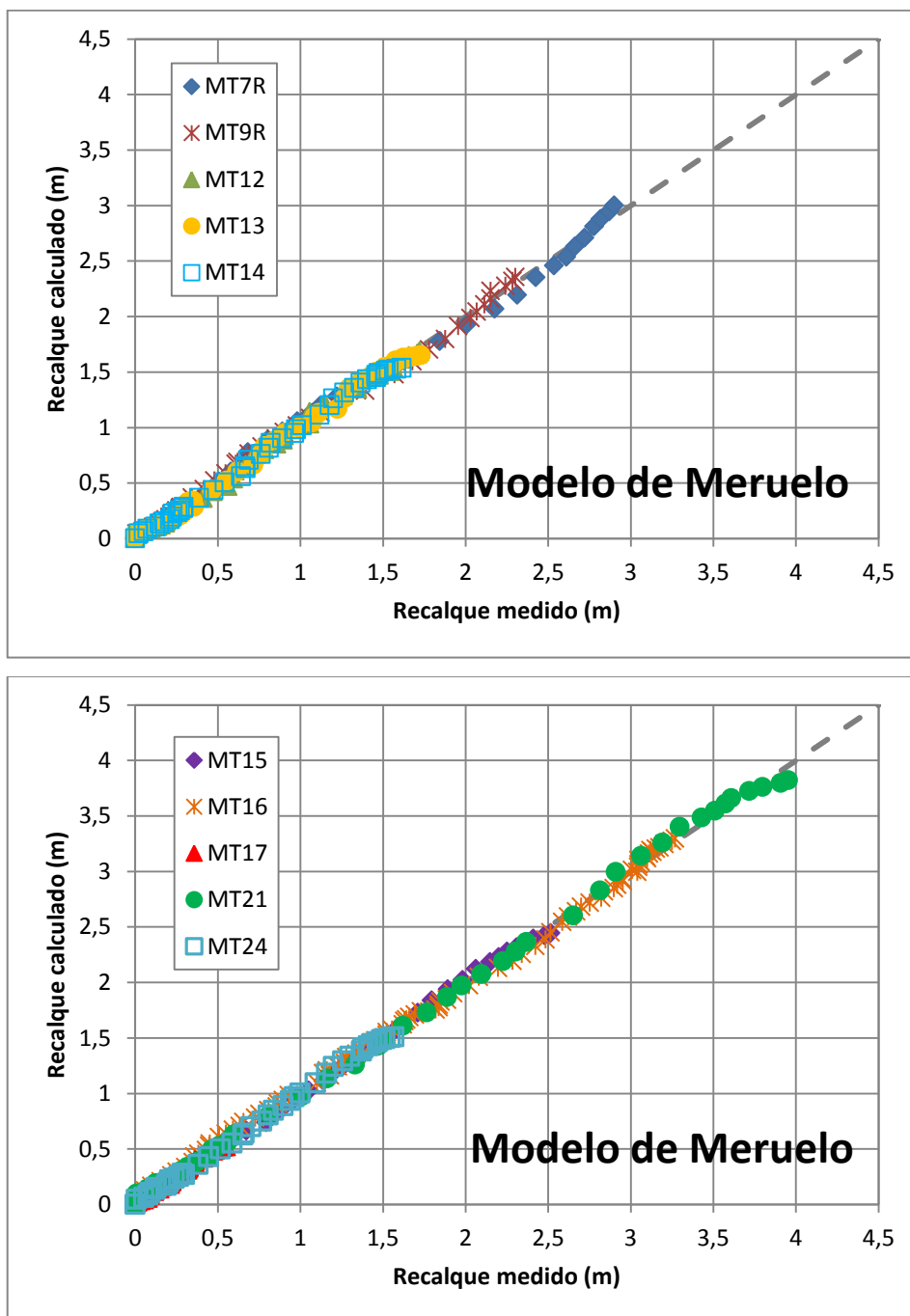


Figura 4.53 – Correlação entre os valores de recalques medidos e calculados pelo Modelo de Meruelo para os marcros do aterro CRR de Minas do Leão.

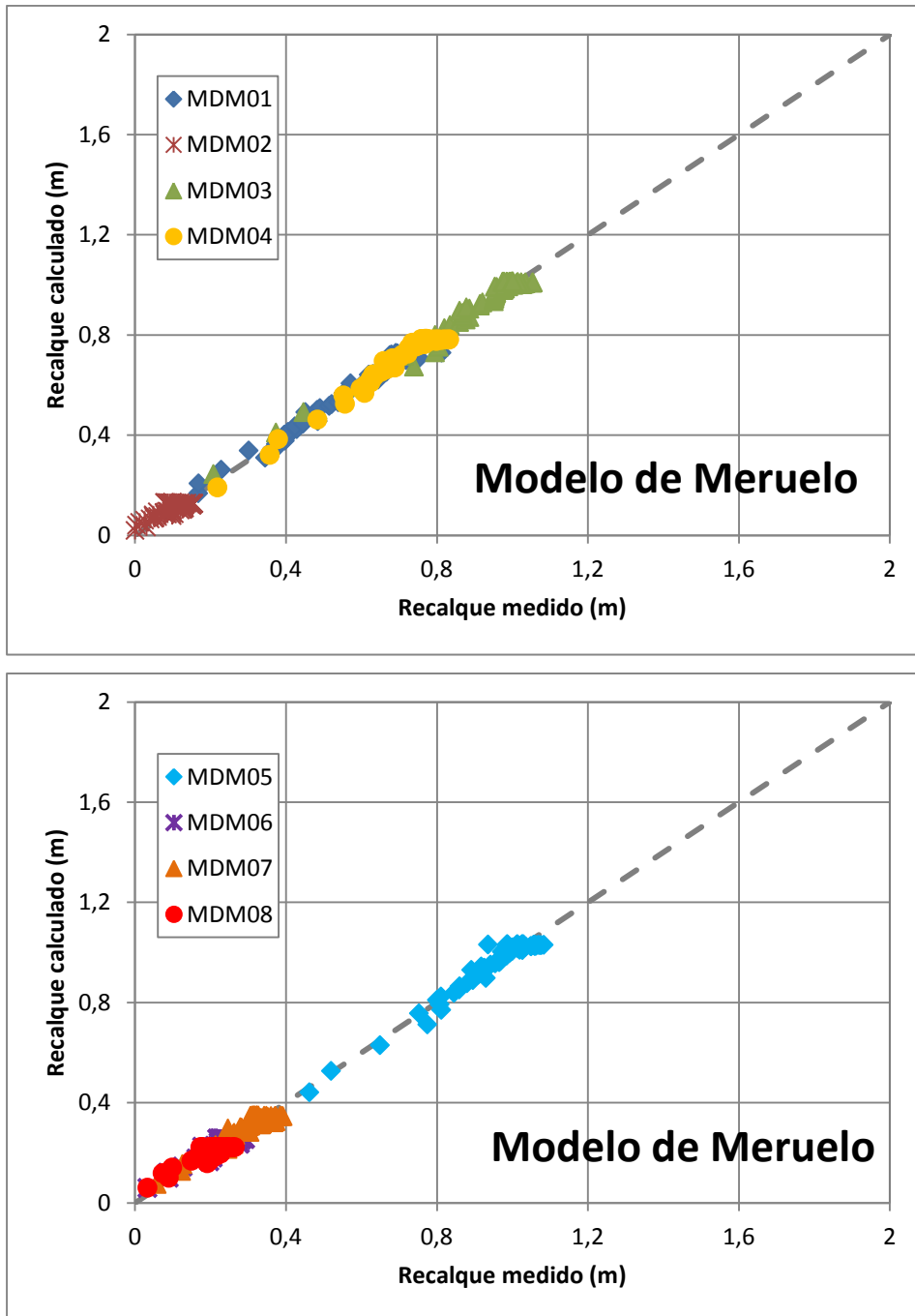


Figura 4.54 – Correlação entre o recalque medido e calculado pelo modelo de Meruelo para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

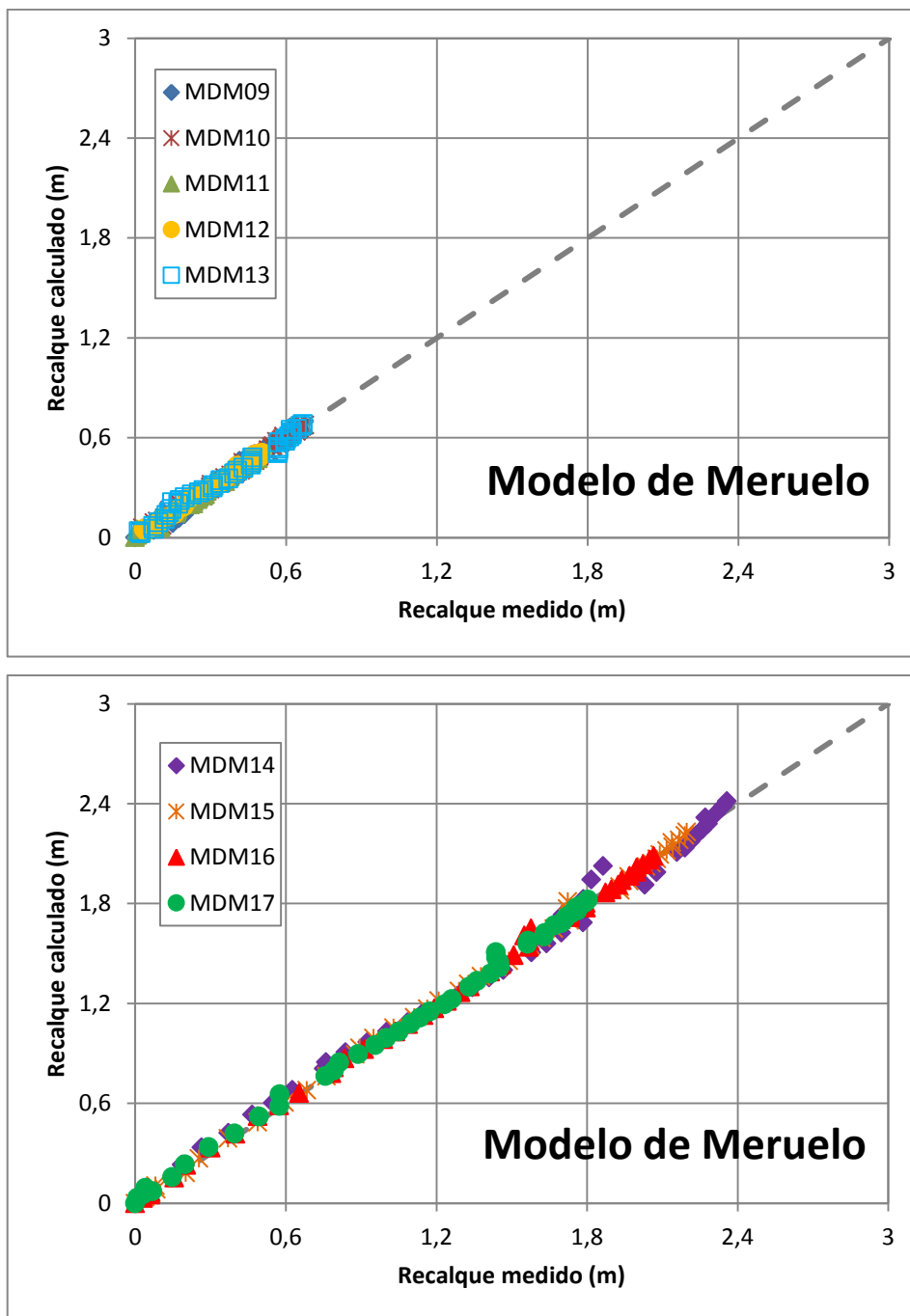


Figura 4.55 – Correlação entre recalque medido e calculado pelo Modelo de Meruelo para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

4.2.6 Modelo de Gibson e Lo (1961)

Este modelo reológico foi proposto para avaliar a compressão secundária em solos turfosos e orgânicos, conforme descrito no item 2.5.7 da Revisão Bibliográfica deste trabalho. A tabela 4.9 apresenta os resultados obtidos pela aplicação do Modelo de Gibson e Lo (1961) para os marcos analisados dos aterros CRR em Minas do Leão, e de São Leopoldo, células aterro Remediado e Fase I. Os parâmetros a , b e λ/b foram determinados pelo método dos mínimos quadrados com o auxílio do programa *Microsoft Excel Office* que dispõe da ferramenta Solver para realização deste método, ou seja, determina os valores a partir de um melhor ajuste entre a curva teórica e experimental.

Os valores dos parâmetros determinados para os marcos do aterro CRR foram: parâmetro (a), coeficiente de compressão primária, variou de 0 a $4,22 \times 10^{-06} \text{kPa}^{-1}$; o parâmetro (b), coeficiente de compressão secundária, variou de $7,18 \times 10^{-05}$ a $5,31 \times 10^{-04} \text{kPa}^{-1}$; e o parâmetro (λ/b), taxa de compressão secundária, variou de $8,90 \times 10^{-04}$ a $2,30 \times 10^{-03} \text{dia}^{-1}$.

Os valores dos parâmetros determinados para os marcos do aterro de São Leopoldo foram: parâmetro (a), coeficiente de compressão primária, variou de $3,46 \times 10^{-07}$ a $1,66 \times 10^{-06} \text{kPa}^{-1}$; o parâmetro (b), coeficiente de compressão secundária, variou de $2,78 \times 10^{-05}$ a $1,25 \times 10^{-04} \text{kPa}^{-1}$; e o parâmetro (λ/b), taxa de compressão secundária, variou de $9,51 \times 10^{-04}$ a $2,79 \times 10^{-03} \text{dia}^{-1}$ para os marcos do Aterro Remediado; parâmetro (a) variou de $5,94 \times 10^{-07}$ a $4,15 \times 10^{-05} \text{kPa}^{-1}$, parâmetro (b) variou de $1,83 \times 10^{-04}$ a $1,65 \times 10^{-03} \text{kPa}^{-1}$, e parâmetro (λ/b) variou de $6,79 \times 10^{-05}$ a $1,16 \times 10^{-03} \text{dia}^{-1}$ para os marcos do Aterro Fase I.

As figuras 4.56, 4.57 e 4.58 apresentam as curvas de recalque versus tempo para os valores medidos e estimados pela aplicação do Modelo de Gibson e Lo (1961) para os marcos superficiais analisados dos aterros CRR em Minas do Leão e de São Leopoldo, nas células aterro Remediado e Fase I, respectivamente. Com base nestes resultados, pode-se concluir que o modelo de Gibson e Lo teve uma boa aderência entre os recalques medidos e previstos na estimativa de recalques para os aterros sanitários estudados.

Tabela 4.9 – Resultados obtidos pela aplicação do Modelo de Gibson e Lo (1961).

Aterros Sanitários	Marco	H (m)	a (kPa-1)	b (kPa-1)	λ/b (dia-1)	Desvio (%)
CRR Minas do Leão	MT7R	20	1,36E-06	3,80E-04	8,90E-04	5,05
	MT9R	14	0,00E+00	3,83E-04	1,17E-03	2,24
	MT12	17	2,99E-06	2,16E-04	1,35E-03	-1,59
	MT13	13	4,22E-06	2,21E-04	2,30E-03	-4,03
	MT14	13	2,99E-06	2,09E-04	2,00E-03	-4,14
	MT15	20	8,01E-07	2,63E-04	1,52E-03	-1,08
	MT16	13,5	1,23E-06	5,31E-04	1,64E-03	4,07
	MT17	13	2,17E-07	7,18E-05	1,93E-03	-5,05
	MT21	24	0,00E+00	3,31E-04	1,81E-03	-3,31
	MT24	20	4,14E-08	1,55E-04	2,10E-03	-3,60
MÉDIA			1,38E-06	2,76E-04	1,67E-03	-1,14
D.P			1,51E-06	1,32E-04	4,42E-04	3,66
Aterro Remediado São Leopoldo	MDM01	16	7,99E-07	9,83E-05	9,51E-04	3,59
	MDM02	8	4,39E-07	2,78E-05	2,00E-03	12,45
	MDM03	16	1,66E-06	1,22E-04	2,57E-03	-1,39
	MDM04	16	4,71E-07	9,40E-05	2,61E-03	-2,03
	MDM05	16	4,02E-07	1,25E-04	2,79E-03	-2,46
	MDM06	8	4,36E-07	6,11E-05	2,50E-03	2,84
	MDM07	8	3,46E-07	8,28E-05	2,00E-03	2,57
	MDM08	8	6,53E-07	5,51E-05	2,51E-03	7,64
	MÉDIA			6,51E-07	8,33E-05	2,24E-03
D.P			4,34E-07	3,37E-05	5,93E-04	5,15
Aterro Fase I São Leopoldo	MDM09	6,4	4,15E-05	1,13E-03	7,93E-05	7,05
	MDM10	6,1	8,06E-07	3,14E-04	6,06E-04	1,41
	MDM11	5,9	1,45E-06	1,97E-04	8,35E-04	-0,21
	MDM12	6,8	5,94E-07	1,83E-04	1,16E-03	1,29
	MDM13	8,7	6,69E-07	1,65E-03	6,79E-05	4,30
	MDM14	14,2	6,53E-07	6,09E-04	5,59E-04	2,48
	MDM15	16,2	2,97E-06	3,87E-04	8,65E-04	2,97
	MDM16	16,9	1,69E-06	3,89E-04	7,01E-04	2,53
	MDM17	15	8,62E-07	3,39E-04	9,12E-04	3,62
MÉDIA			5,69E-06	5,78E-04	6,43E-04	2,83
D.P			1,35E-05	4,94E-04	3,68E-04	2,08
MÉDIA TOTAL			2,57E-06	3,12E-04	1,52E-03	1,53
D.P TOTAL			7,22E-06	2,43E-04	1,15E-04	1,54

a = coeficiente de compressibilidade primária; b = parâmetro de compressibilidade secundária; λ/b = taxa de compressão secundária; D.P = desvio padrão.

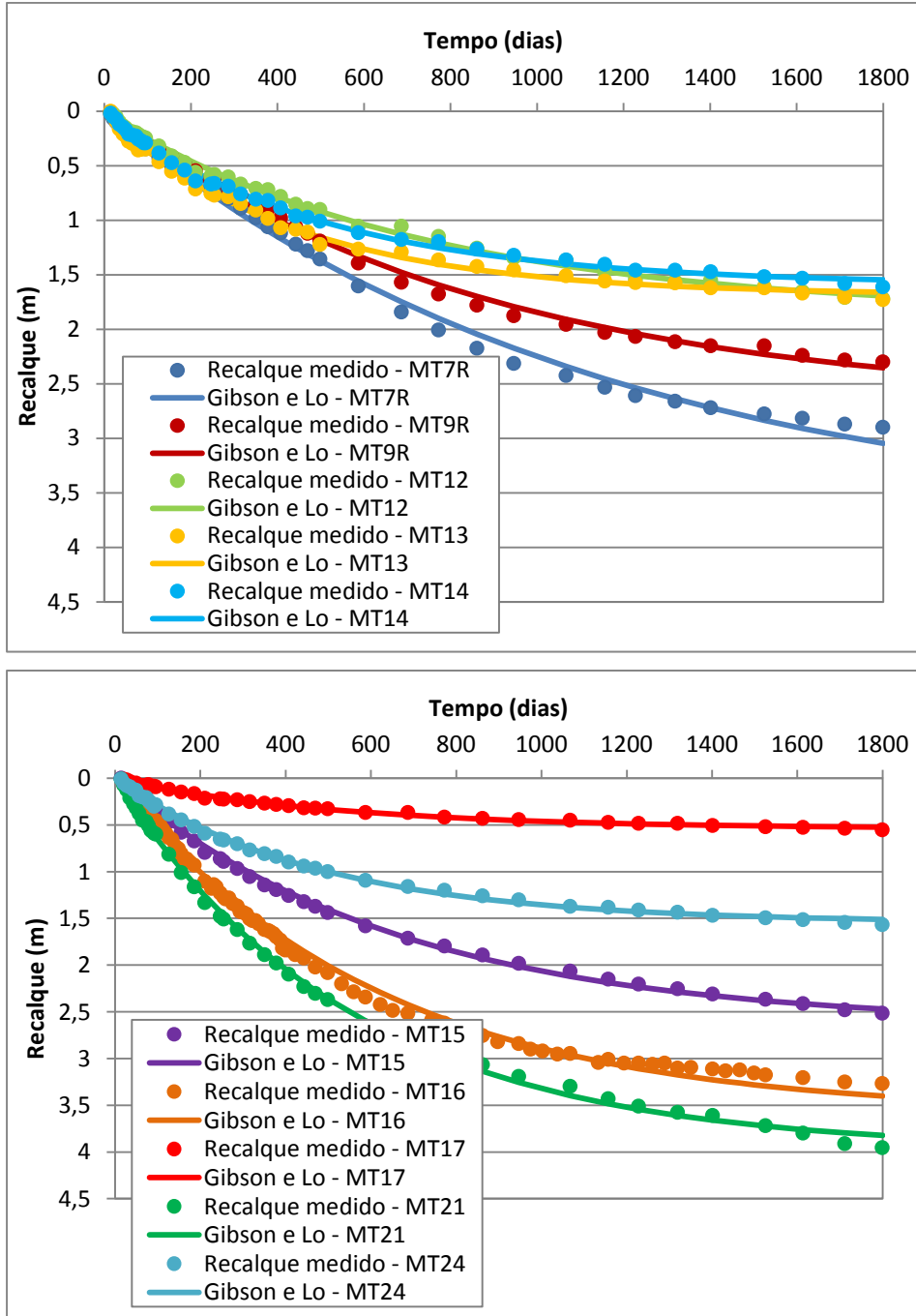


Figura 4.56 – Curvas recalque versus tempo para valores medidos e estimados pelo Modelo de Gibson e Lo para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.

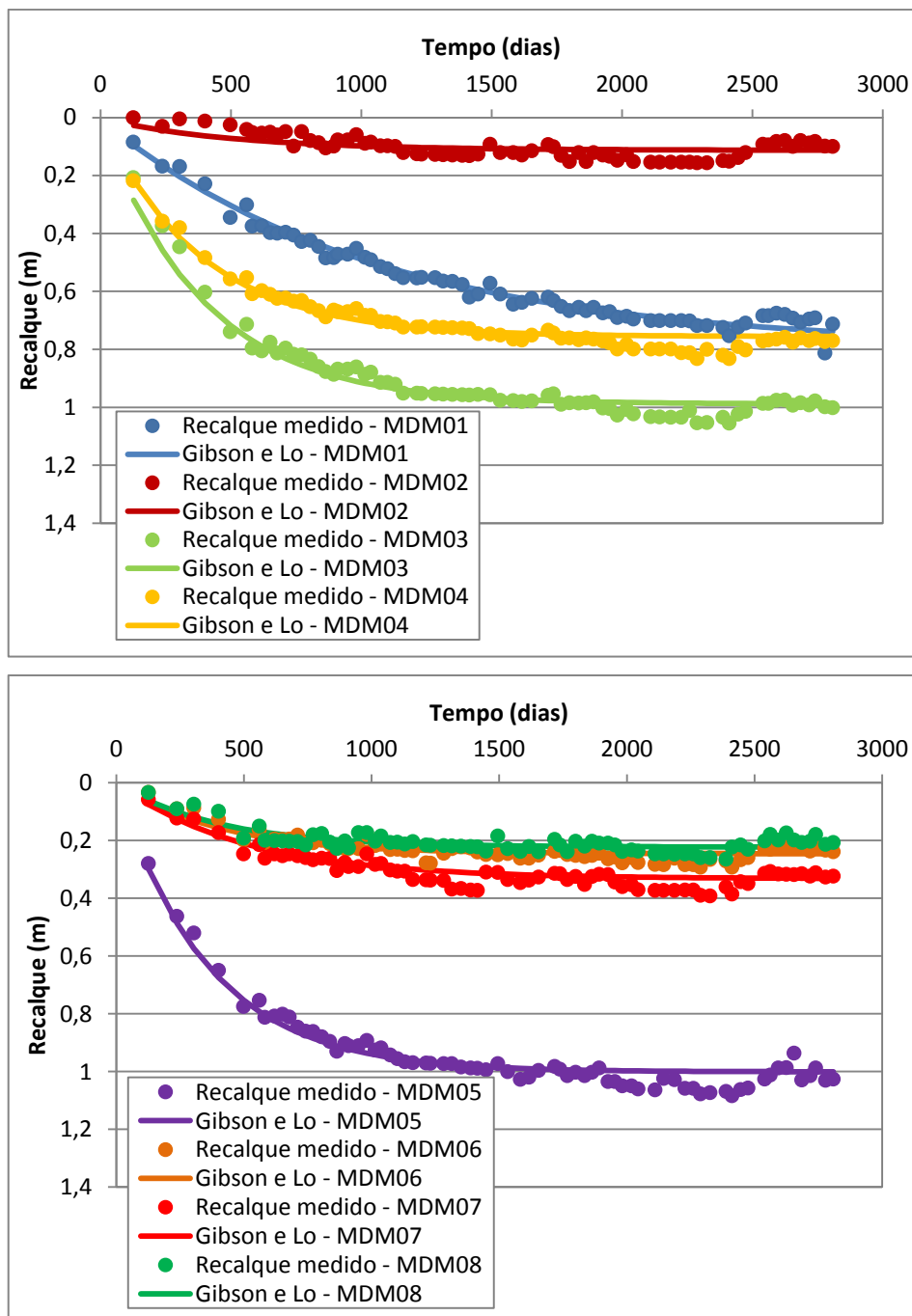


Figura 4.57 – Curvas recalque medido e previsto versus tempo pelo Modelo de Gibson e Lo (1961) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

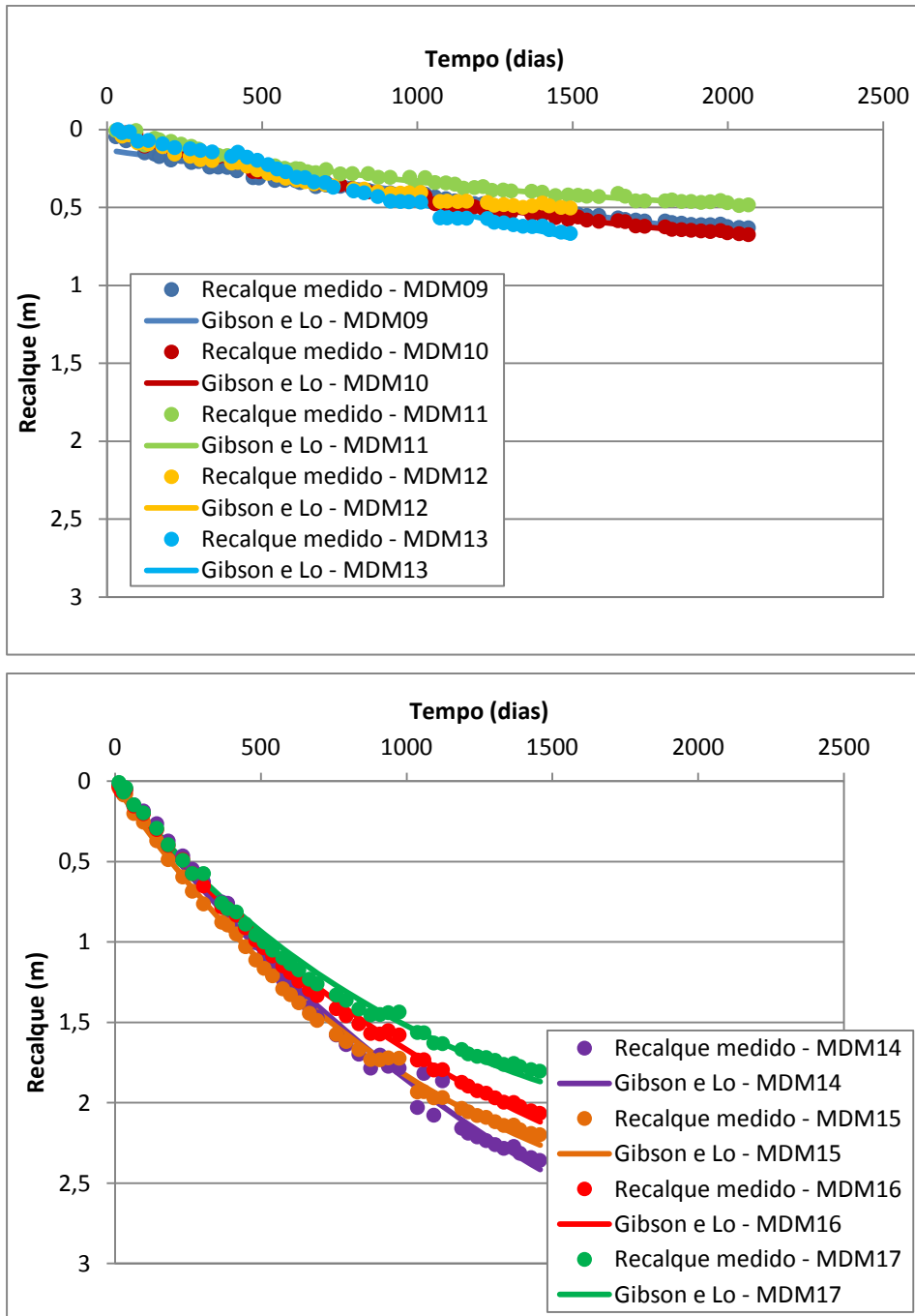


Figura 4.58 – Curvas recalque medido e previsto versus tempo pelo Modelo Gibson e Lo (1961) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

As figuras 4.59, 4.60 e 4.61 mostram outra maneira de observar os resultados obtidos pelo modelo, sendo a correlação entre os recalques medidos e calculados. A correlação mostra a proximidade dos valores de recalques com a linha de 45° que

confirma a boa aderência deste modelo para a previsão de recalques para os aterros sanitários em estudo.

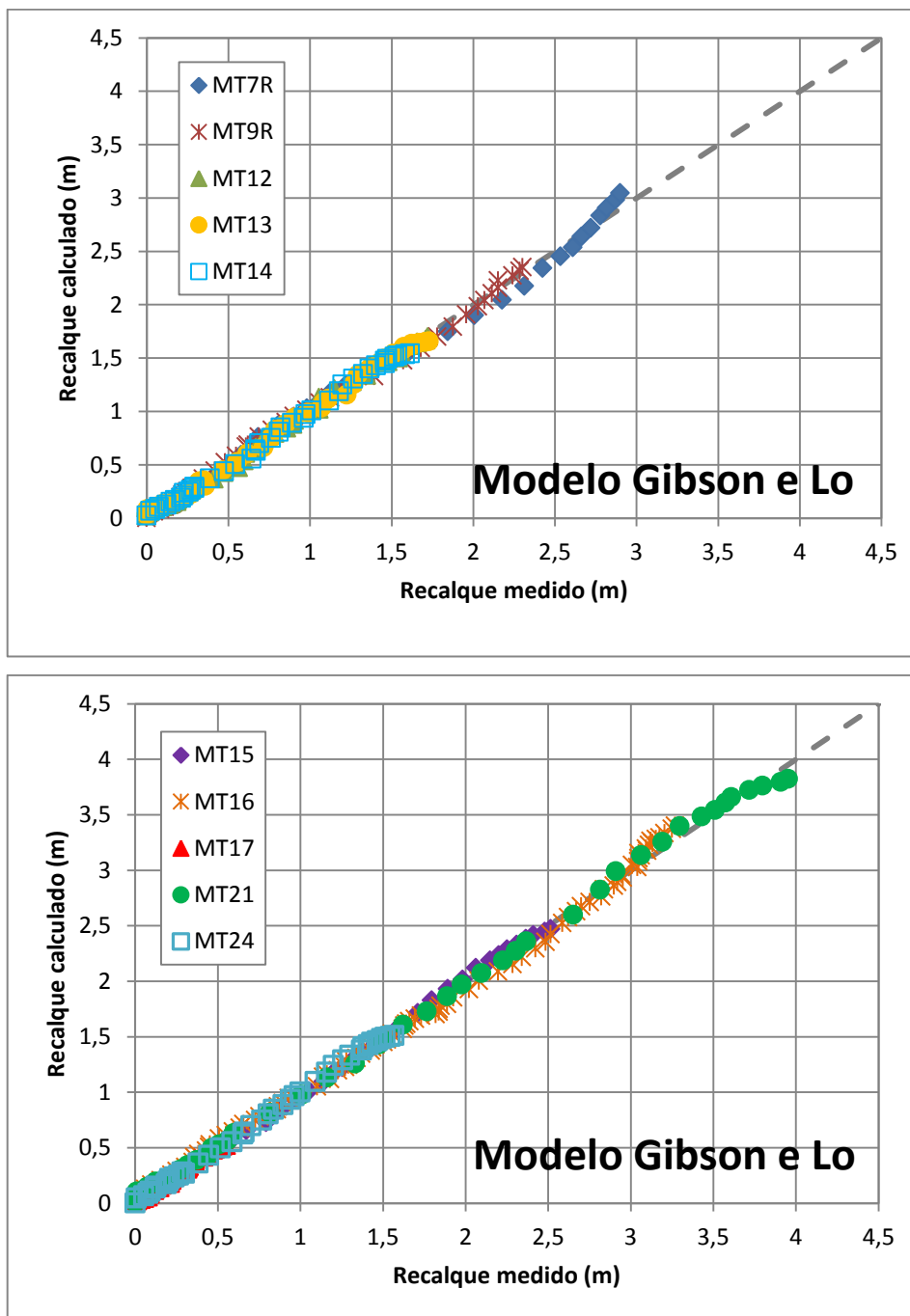


Figura 4.59 – Correlação entre os recalques medidos e calculados para o Modelo de Gibson e Lo para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.

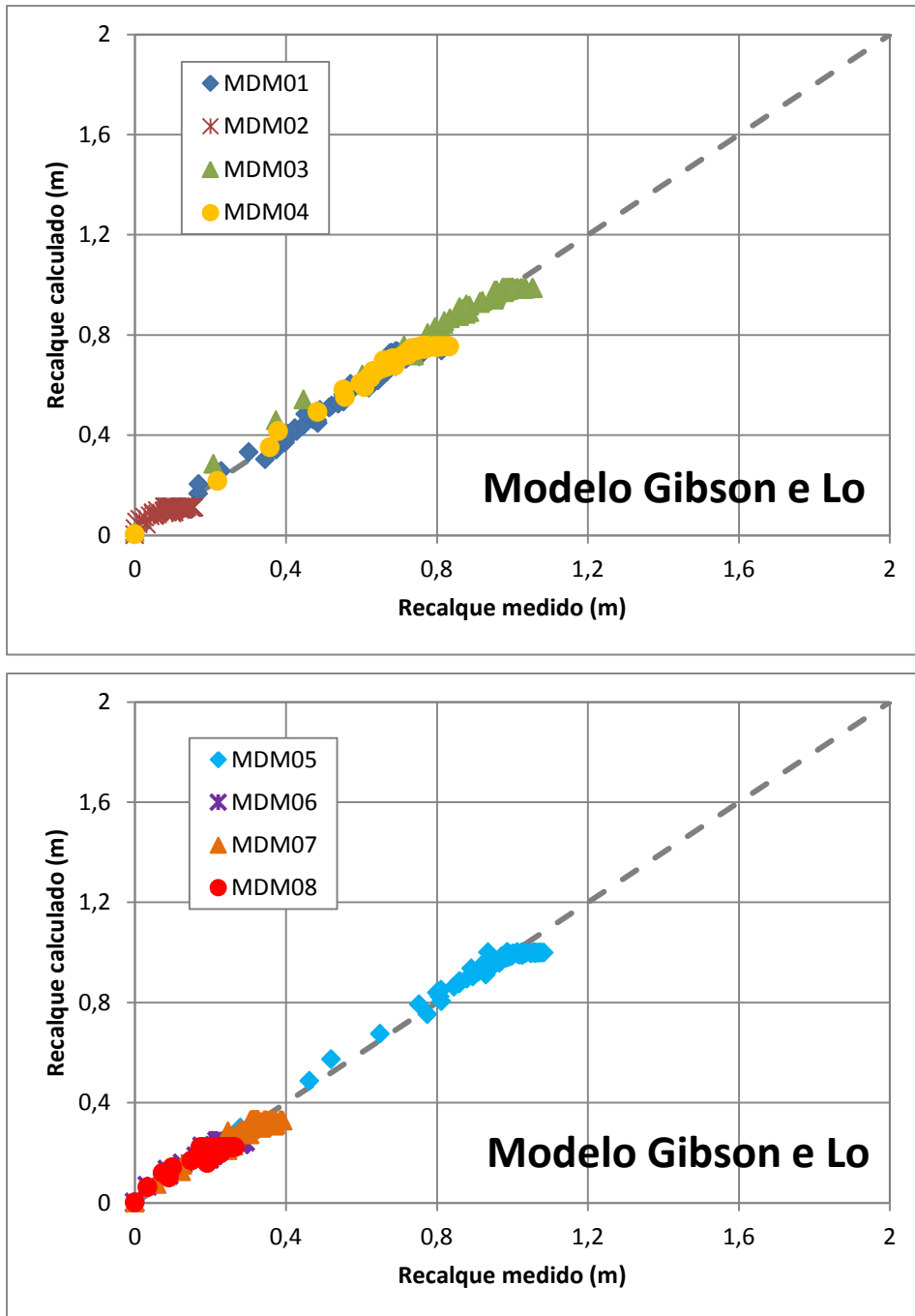


Figura 4.60 – Correlação entre recalque medido e calculado pelo Modelo Gibson e Lo (1961) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

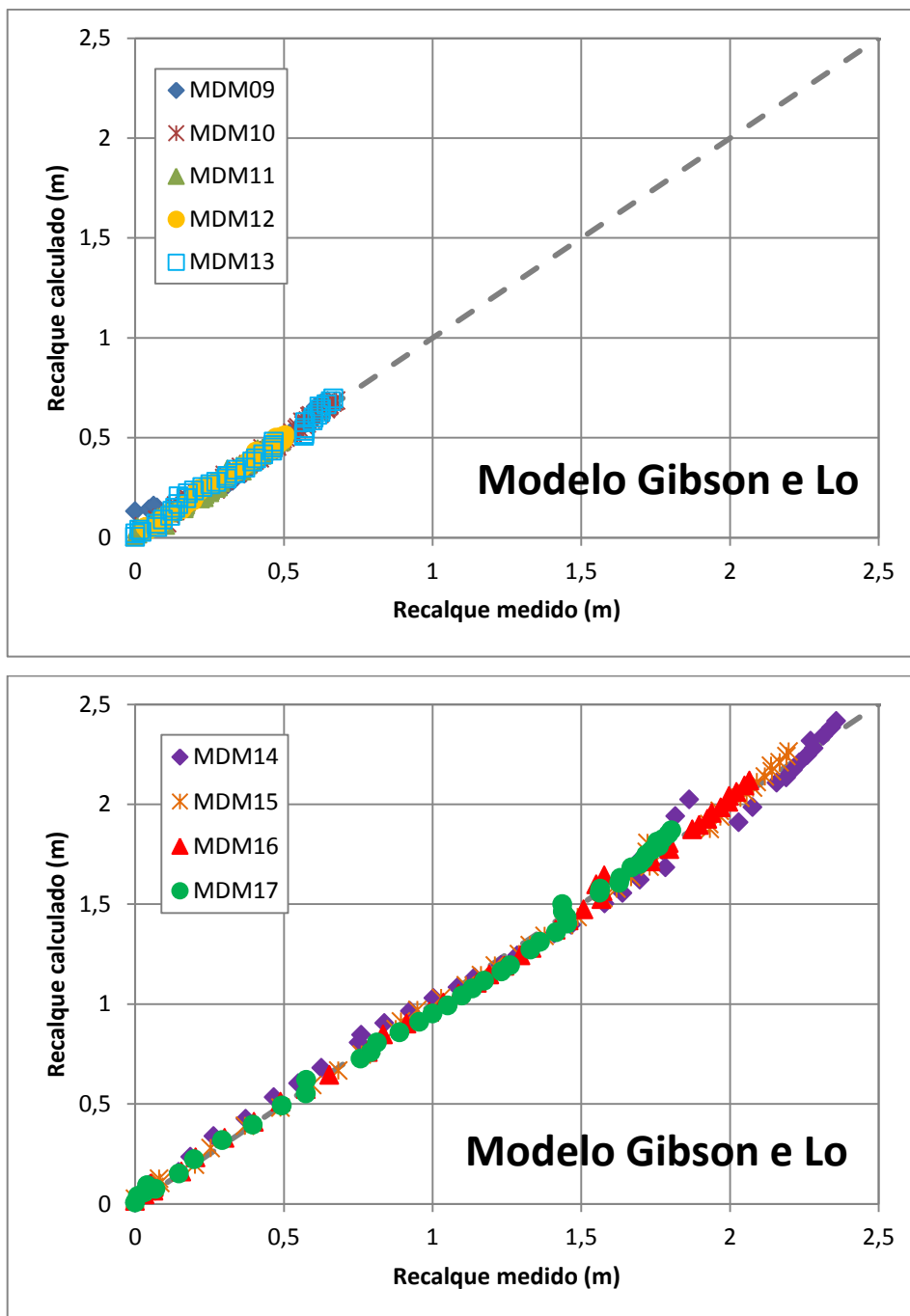


Figura 4.61 – Correlação entre recalque medido e calculado pelo Modelo de Gibson e Lo (1961) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

4.2.7 Modelo de Gandolla et al. (1992)

Este modelo estima os recalques com base em uma função exponencial decrescente, conforme descrito no item 2.5.8 da Revisão Bibliográfica deste trabalho. A tabela 4.10 apresenta os resultados dos parâmetros do modelo em estudo para os marcos superficiais analisados dos aterros CRR em Minas do Leão e de São Leopoldo, sendo as células aterro Remediado e Fase I.

As constantes (a) e (k) do modelo foram determinadas a partir do ajuste de curvas pelo método mínimos quadrados, com o auxílio da ferramenta Solver do programa *Microsoft Excel Office*, que aplica este método, ou seja, determina as constantes pelo melhor ajuste entre curvas teóricas e experimentais.

Os resultados obtidos das constantes para o aterro CRR em Minas do Leão tiveram a seguinte variação, constante (a), variou de 44,457 a 46,145; e a constante (k), variou de $-4,20 \times 10^{-06}$ a $-6,80 \times 10^{-07}$. A figura 4.62 apresenta as curvas recalque versus logaritmo do tempo para valores medidos e previstos pelo modelo estudado para os 10 marcos superficiais analisados do aterro CRR.

Os resultados obtidos das constantes para o aterro de São Leopoldo tiveram a seguinte variação, constante (a), variou de 37,971 a 45,547; e a constante (k), variou de $-7,60 \times 10^{-07}$ a $-1,70 \times 10^{-07}$, para os marcos da célula do Aterro Remediado e para os marcos do Aterro Fase I os valores da constante (a) variou de 42,477 a 48,660, constante (k) variou de $-2,70 \times 10^{-06}$ a $-1,10 \times 10^{-06}$.

As figuras 4.63 e 4.64 apresentam as curvas recalque versus logaritmo do tempo para valores medidos e previstos pelo Modelo Gandolla et al. (1992) para os marcos analisados das células Aterro Remediado e Fase I, respectivamente.

Tabela 4.10 – Resultados obtidos dos parâmetros pela aplicação do Modelo de Gandolla et al. (1992).

Aterros Sanitários	Marco	H (m)	a	k	Desvio (%)
	MT7R	20	44,467	-2,30E-06	25,24
	MT9R	17	44,457	-2,60E-06	54,48
CRR	MT12	17	44,491	-1,60E-06	26,18
Minas do Leão	MT13	13	44,477	-2,20E-06	35,32
	MT14	13	44,481	-2,00E-06	31,77
	MT15	20	44,478	-2,00E-06	27,88
	MT16	13,5	46,145	-4,20E-06	45,81
	MT17	13	44,517	-6,80E-07	29,47
	MT21	24	44,460	-2,70E-06	30,14
	MT24	20	44,499	-1,30E-06	33,36
	MÉDIA		44,647	-2,16E-06	33,97
	D.P		0,527	9,41E-07	9,29
	MDM01	16	37,971	-5,50E-07	31,19
	MDM02	8	42,977	-1,70E-07	68,41
Aterro	MDM03	16	42,898	-7,40E-07	42,52
Remediado	MDM04	16	42,921	-5,70E-07	43,75
São Leopoldo	MDM05	16	42,895	-7,60E-07	42,30
	MDM06	8	42,974	-3,70E-07	49,97
	MDM07	8	42,965	-5,00E-07	49,54
	MDM08	8	45,547	-3,10E-07	51,88
	MÉDIA		42,643	-4,96E-07	47,45
	D.P		2,097	2,05E-07	10,68
	MDM09	6,4	42,482	-1,30E-06	18,74
	MDM10	6,1	42,477	-1,50E-06	15,61
Aterro Fase I	MDM11	5,9	42,479	-1,10E-06	18,39
São Leopoldo	MDM12	6,8	48,660	-1,20E-06	19,48
	MDM13	8,7	47,606	-1,10E-06	5,73
	MDM14	14,2	47,839	-2,70E-06	12,04
	MDM15	16,2	47,840	-2,30E-06	17,18
	MDM16	16,9	47,839	-2,00E-06	14,14
	MDM17	15	47,839	-2,00E-06	18,35
	MÉDIA		46,118	-1,69E-06	15,52
	D.P		2,744	5,82E-07	4,40
	MÉDIA TOTAL		44,470	-1,45E-06	32,31
	D.P TOTAL		1,140	3,68E-07	3,30

a e k = são constantes do modelo; D.P = desvio padrão.

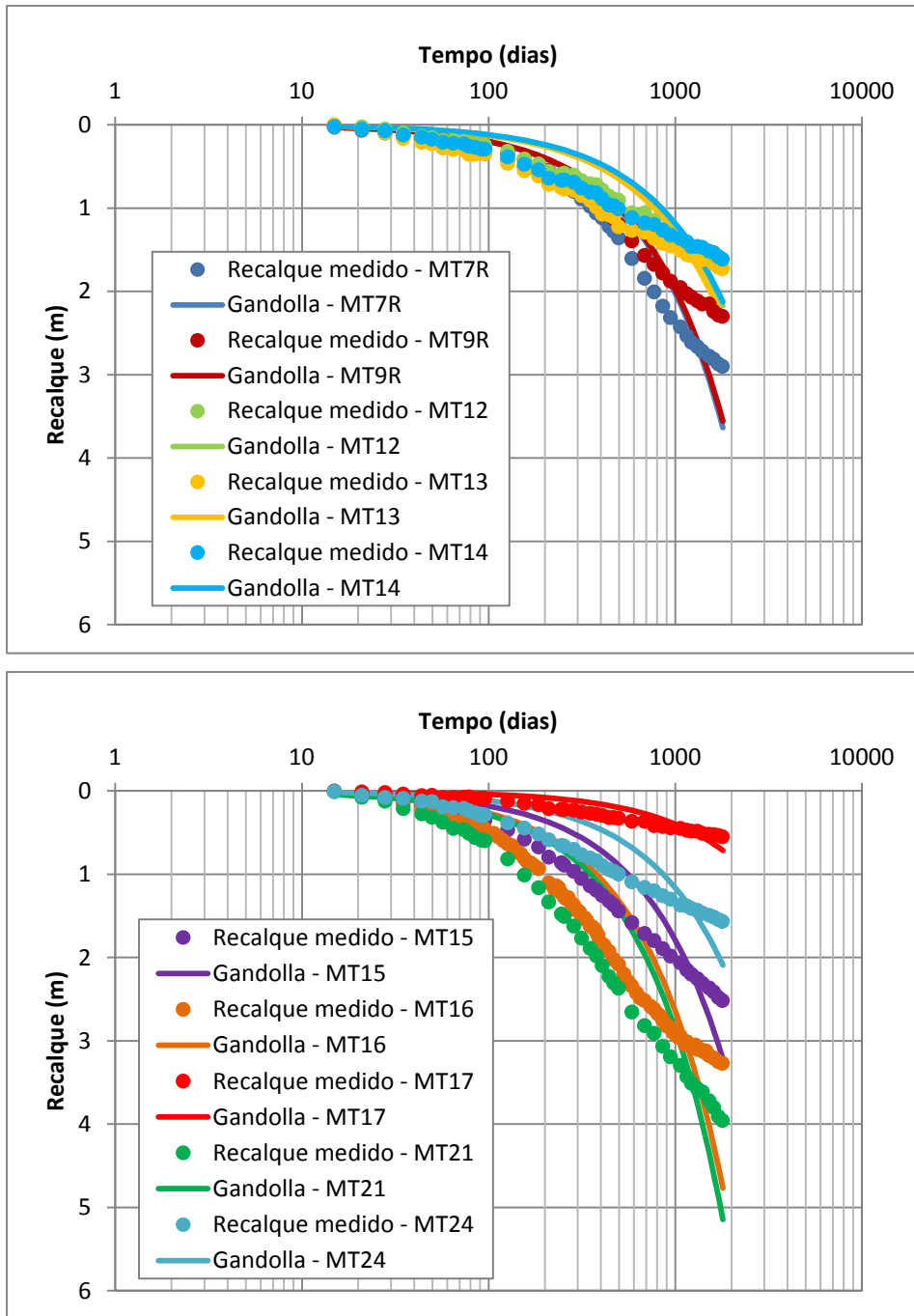


Figura 4.62 – Curvas recalque versus log. do tempo pelo Modelo Gandolla et al. (1992) para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.

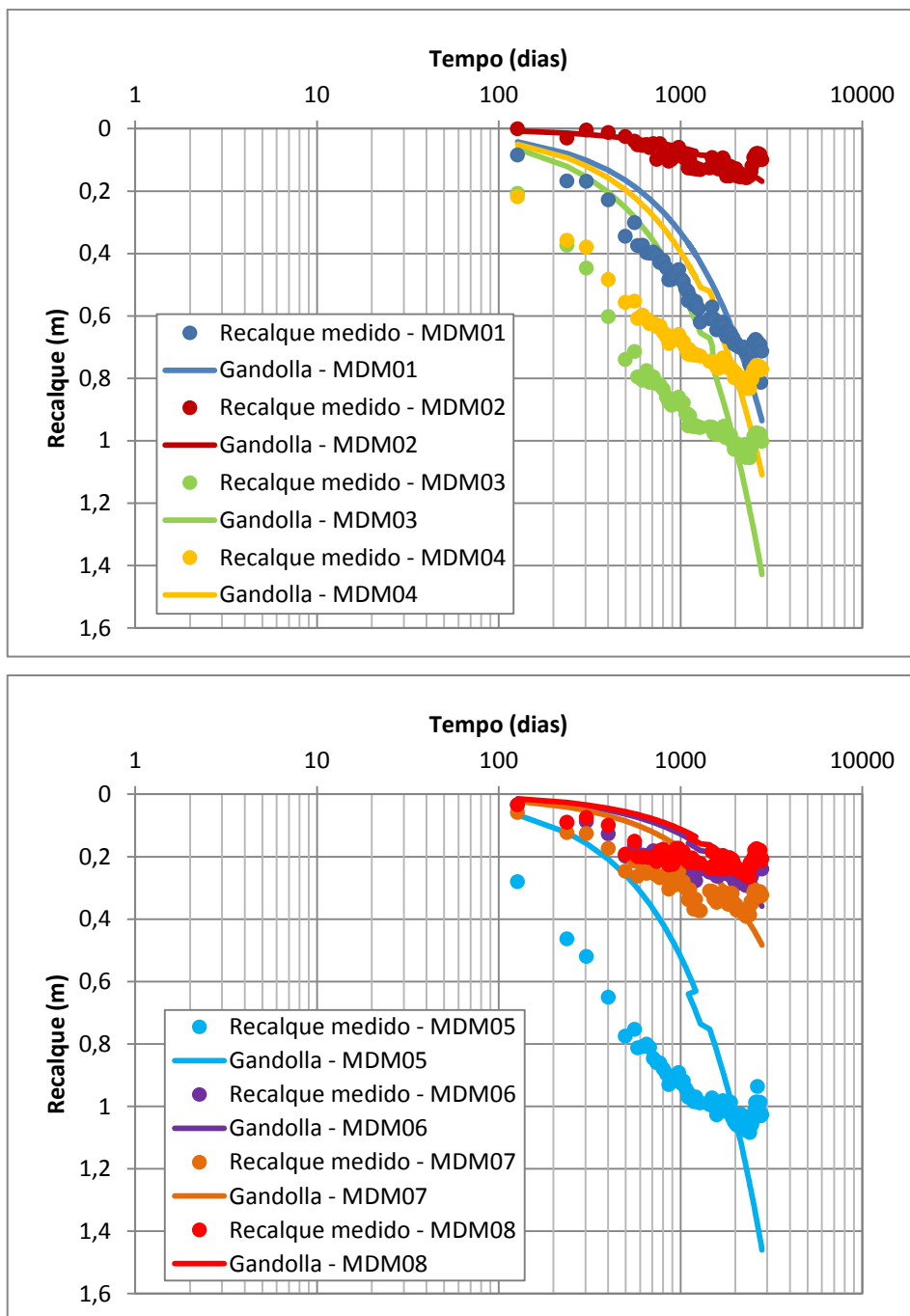


Figura 4.63 – Curvas recalques versus log. do tempo pelo Modelo Gandolla et al.(1992) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

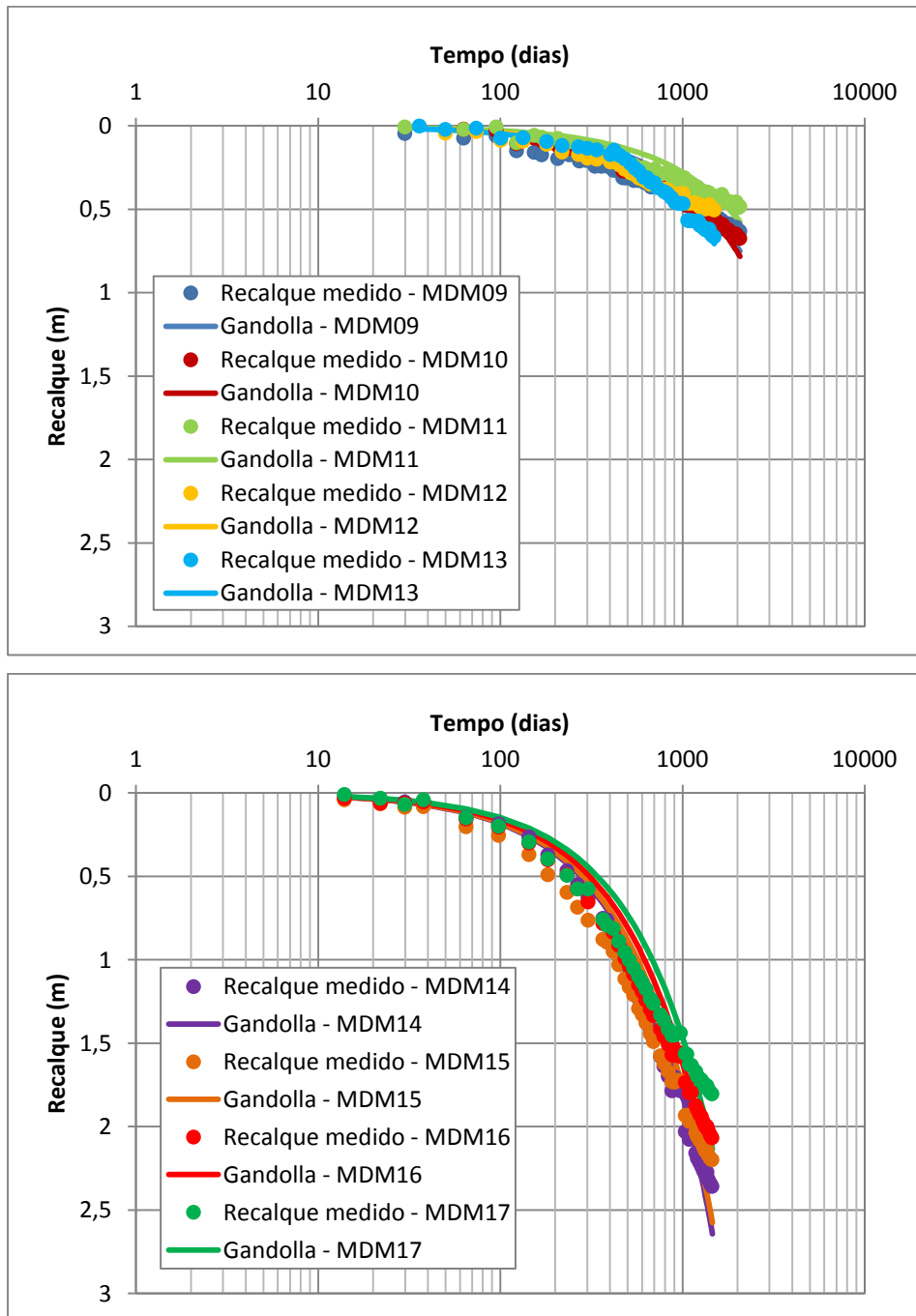


Figura 4.64 – Curvas recalque versus log. do tempo pelo Modelo Gandolla et al. (1992) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

Com base nos resultados obtidos pelo Modelo de Gandolla, este modelo não obteve uma boa aderência entre os valores de recalque medido e estimado para os marcos do aterro CRR e da célula aterro Remediado do aterro de São Leopoldo. Já

para os marcos da célula aterro Fase I do aterro de São Leopoldo obteve uma boa aderência entre os valores observados e previstos.

As figuras 4.65, 4.66 e 4.67 apresentam outra maneira de observar os resultados obtidos, a partir da correlação entre os recalques medidos e calculados, que mostra de forma mais visual o comportamento das curvas, sendo que para se ter uma boa aderência do modelo os valores medidos e calculados devem ser o mais próximo possível da linha de 45° (linha tracejada) do gráfico das figuras 4.65, 4.66 e 4.67. Observa-se, portanto, que isto ocorre na previsão de recalques dos marcos superficiais analisados da célula do Aterro Fase I (Figura 4.67).

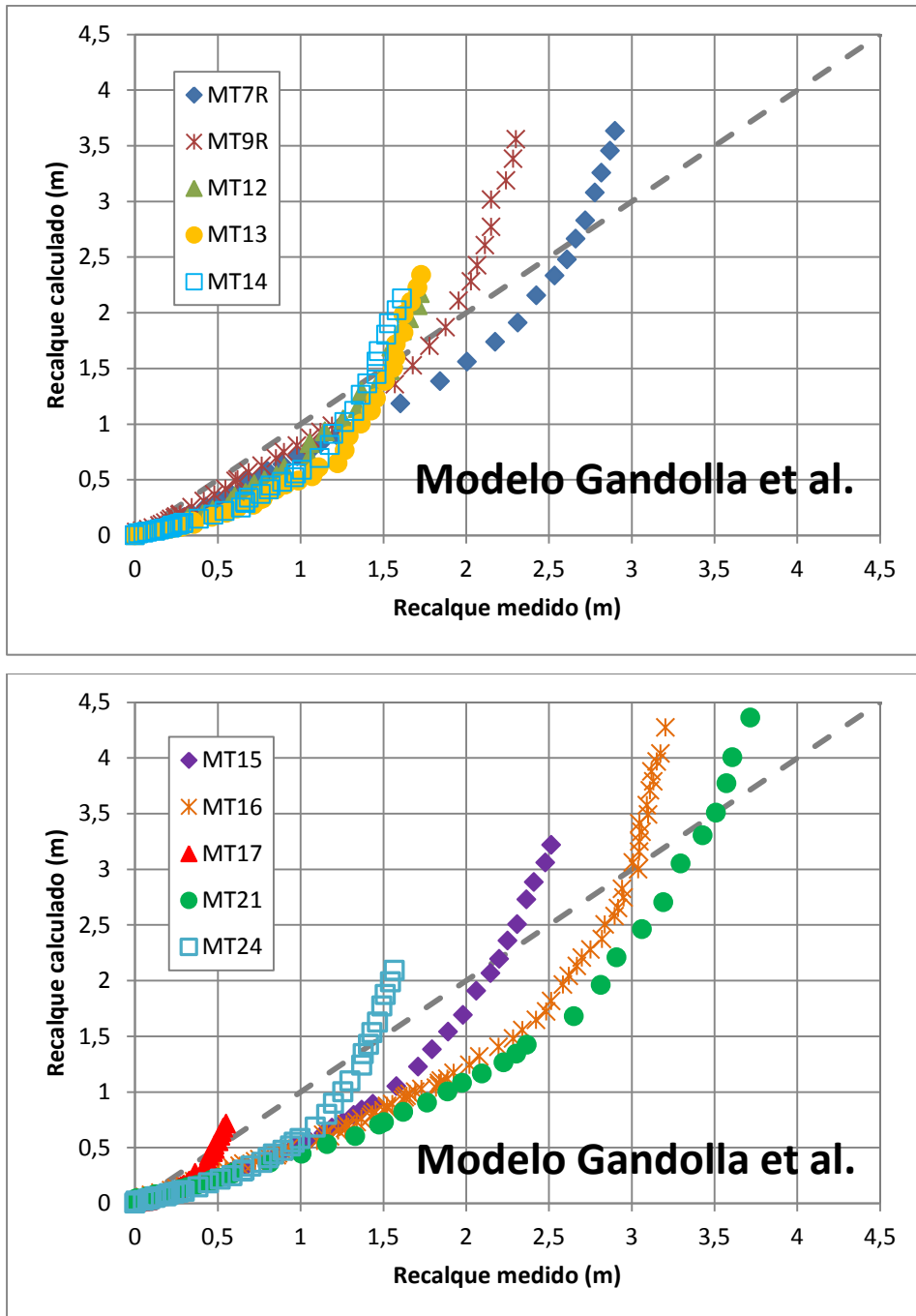


Figura 4.65 – Correlação entre recalque medido e calculado pelo Modelo Gandolla et al. (1992) para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.

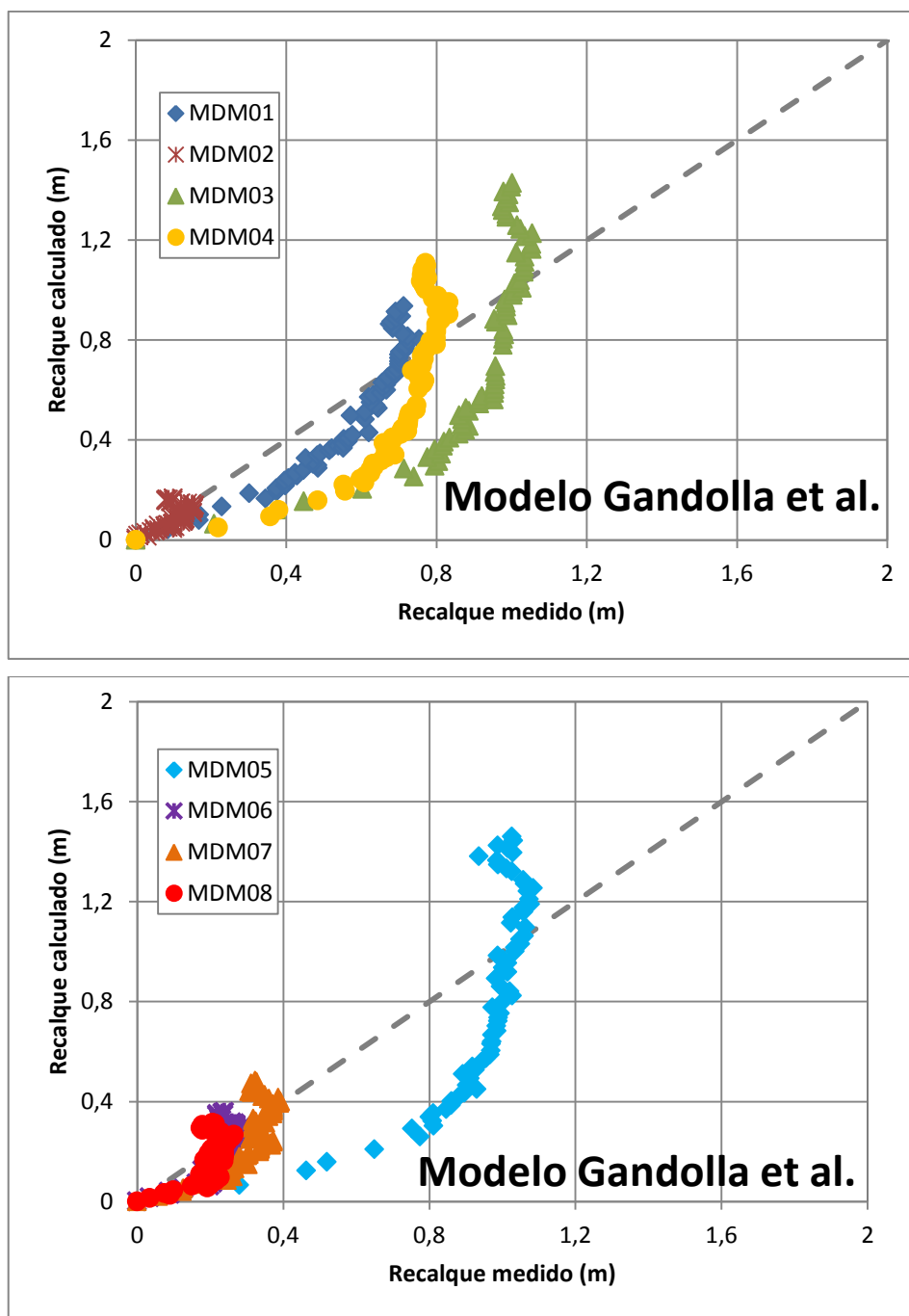


Figura 4.66 – Correlação entre os recalques medidos e calculados pelo Modelo Gandolla (1992) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

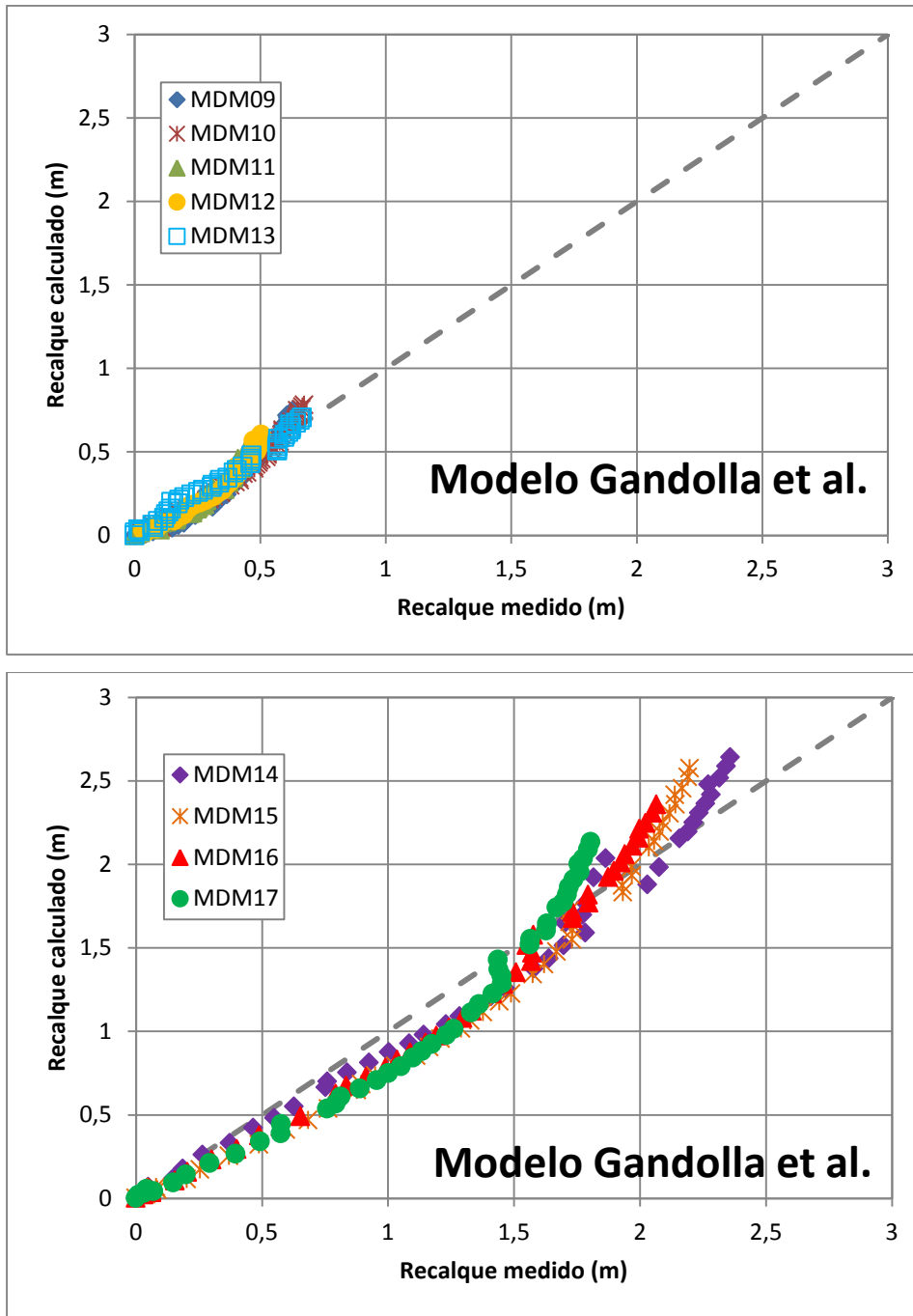


Figura 4.67 – Correlação entre recalque medido e calculado pelo Modelo Gandolla (1992) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

4.2.8 Modelo Observacional – Asaoka (1978)

O Modelo Observacional de Asaoka (1978), conforme descrito no item 2.5.9 da Revisão Bibliográfica deste trabalho, foi adotado com sucesso por Manassero e Pasqualine (1993) para previsão de recalques em aterros sanitários, como relatado por Marques (2001). Para realização do modelo faz-se necessário que uma série de (n+1) leitura de recalques (ΔH), obtidos sob carga constante e para intervalos de tempo (Δt) constantes, esteja disponível. O recalque final pode ser calculado graficamente ou analiticamente pela equação $\Delta H_{ult} = \beta_0 / [1 - \beta_1]$.

A tabela 4.11 apresenta os resultados analíticos obtidos pela utilização do método observacional de Asaoka (1978) para os marcos analisados do aterro CRR em Minas do Leão, sendo o intervalo de tempo foi considerado de 30 dias (mensais) e 90 dias (trimestrais). A tabela 4.12 apresenta os resultados analíticos obtidos por este método para o marco MT16 em separado, devido ao número de leituras serem maiores que aos outros marcos analisados. As leituras de campo foram mensais até o final do ano de 2011. Para verificar a influência do número de leituras na previsão de recalque último, foram simulados com este método considerando os dados até os anos de 2008, 2009 e 2010.

Com base nos resultados obtidos pela aplicação deste método, os recalques últimos apresentaram desvios bastante elevados para o intervalo de tempo de 30 dias (mensal), como pode ser observado na tabela 4.11, sendo os marcos MT7R e MT9R, que apresentaram os valores de desvios mais elevados, acima de 70%. Os outros marcos obtiveram desvios na faixa de -30% a 9%. E, para o intervalo de tempo de 90 dias (trimestral), os desvios de recalque foram consideravelmente menores em relação aos obtidos pelo intervalo de tempo de 30 dias, sendo para os marcos MT7R e MT9R, os desvios foram de 23% e 15%, respectivamente. Enquanto que os outros marcos situaram-se na faixa de -1% a 10%.

Tabela 4.11 – Resultados analíticos obtidos pela utilização do método observacional Asaoka para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.

Marco	ΔH (m)	Parâmetros do modelo	Mensais (até 04/03/2009)	D1 (%)	Trimestrais	D2 (%)
MT7R	2,90	β_0	0,089	74	0,292	23
		β_1	0,982		0,918	
		$\Delta H_{ult.}(m)$	5,051		3,579	
MT9R	2,30	β_0	0,072	291	0,259	15
		β_1	0,992		0,902	
		$\Delta H_{ult.}(m)$	9,0		2,643	
MT12	1,72	β_0	0,090	-30	0,199	10
		β_1	0,925		0,895	
		$\Delta H_{ult.}(m)$	1,20		1,895	
MT13	1,73	β_0	0,106	9	0,302	-1
		β_1	0,944		0,823	
		$\Delta H_{ult.}(m)$	1,893		1,706	
MT14	1,61	β_0	0,104	-19	0,243	0,43
		β_1	0,920		0,850	
		$\Delta H_{ult.}(m)$	1,30		1,62	
MT15	2,52	β_0	0,129	-10	0,324	6
		β_1	0,943		0,878	
		$\Delta H_{ult.}(m)$	2,263		2,656	
MT17	0,55	β_0	0,036	-26	0,08	1
		β_1	0,912		0,856	
		$\Delta H_{ult.}(m)$	0,409		0,556	
MT21	3,95	β_0	0,227	-13	0,564	3
		β_1	0,934		0,861	
		$\Delta H_{ult.}(m)$	3,439		4,058	
MT24	1,57	β_0	0,107	-18	0,235	2
		β_1	0,917		0,853	
		$\Delta H_{ult.}(m)$	1,289		1,599	

ΔH = recalque; $\Delta H_{ult.}$ = recalque último; D1 = desvio de recalque dos dados mensais; D2 = desvio de recalque dos dados trimestrais.

Tabela 4.12 – Resultados analíticos obtidos pela utilização do método Asoka para o marco MT16 do aterro CRR de Minas do Leão.

Marco	ΔH (m)	Parâmetros do modelo	Dados até 2008	Dados até 2009	Dados até 2010	Dados até 2012
MT16	3,27	β_0	0,204	0,202	0,202	0,202
		β_1	0,938	0,941	0,90	0,940
		$\Delta H_{ult.}(m)$	3,29	3,40	3,42	3,40
DESVIO (%)			1	5	5	3

A figura 4.68 apresenta os resultados gráficos obtidos pela aplicação do método observacional de Asaoka para os marcos analisados neste estudo, observando uma tendência de estabilização das deformações. E a fim de verificar a sensibilidade deste método na estimativa do recalque último, foram analisadas 4 séries de dados, sendo: (a) dados até o ano de 2008, (b) dados até o ano de 2009; (c) dados até o ano de 2010; e (d) dados até o ano de 2012, ou seja, todos os dados (Figura 4.69). Os desvios entre o recalque calculado e medido situaram-se entre 1 e 5%, demonstrando um bom comportamento do modelo aplicado na estimativa dos recalques (Tabela 4.12).

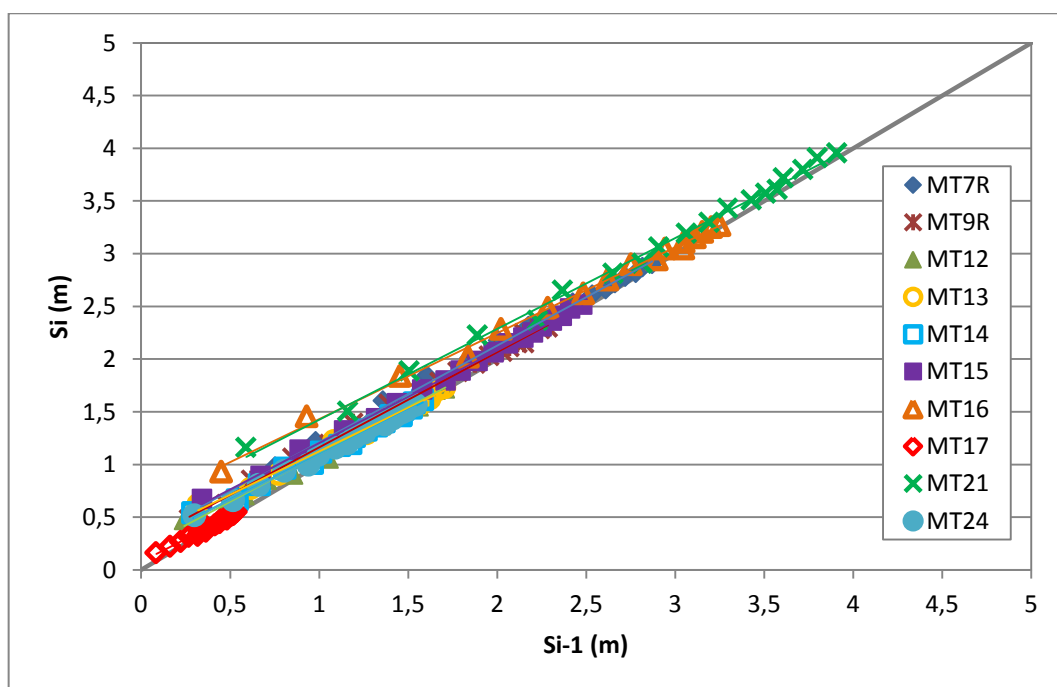


Figura 4.68 – Resultados gráficos obtidos pela aplicação do método observacional de Asaoka para os marcos do aterro CRR de Minas do Leão.

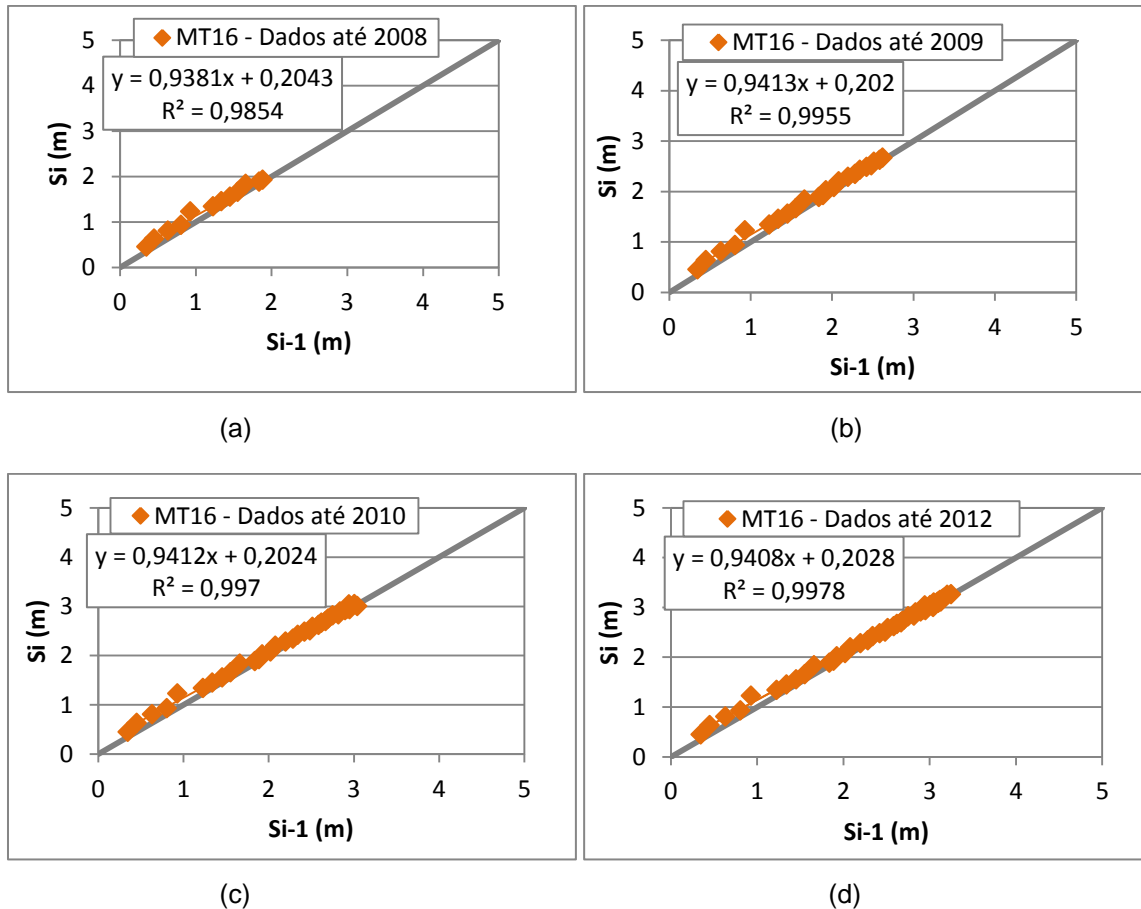


Figura 4.69 – Resultado gráfico obtido pela utilização do método Asaoka para o marco MT16 do aterro CRR de Minas do Leão. (a) dados até o ano de 2008; (b) dados até o ano de 2009; (c) dados até o anos de 2010; e (d) dados até o ano de 2012.

A tabela 4.13 apresenta os resultados analíticos obtidos pela utilização do método observacional de Asaoka (1978) para os marcos analisados da célula do Aterro Remediado, sendo o intervalo de tempo foi considerado de 30 dias (mensais) e 90 dias (trimestrais).

Com base nos resultados obtidos pela aplicação deste método, os recalques últimos apresentaram desvios relativamente baixos para o intervalo de tempo de 30 dias (mensal), como pode ser observado na tabela 4.13, exceto o marco MDM02 que obteve um desvio mais elevado de 12% em relação aos outros marcos estudados, que situam-se na faixa de -5% a 2%. E, para o intervalo de tempo de 90 dias (trimestral), os desvios de recalque um pouco maiores em relação aos obtidos

pelo intervalo de tempo de 30 dias, situando-se na faixa de -1% a 3%, exceto o marco MDM12 que obteve o mesmo desvio de 12%.

A figura 4.70 apresenta os resultados gráficos obtidos pela aplicação do Método Observacional de Asaoka (1978) para os marcos analisados da célula do Aterro Remediado.

Tabela 4.13 – Resultados analíticos pela aplicação do Modelo Observacional de Asaoka (1978) para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

Marco	ΔH (m)	Parâmetros do modelo	Mensais	D1 (%)	Trimestrais	D2 (%)
MDM01	0,71	β_0	0,062		0,096	
		β_1	0,908	-5	0,864	-1
		$\Delta H_{ult.}(m)$	0,674		0,706	
MDM02	0,10	β_0	0,018		0,025	
		β_1	0,839	12	0,776	12
		$\Delta H_{ult.}(m)$	0,112		0,112	
MDM03	0,1002	β_0	0,186		0,266	
		β_1	0,809	-3	0,732	-1
		$\Delta H_{ult.}(m)$	0,974		0,993	
MDM04	0,771	β_0	0,133		0,194	
		β_1	0,823	-3	0,747	-1
		$\Delta H_{ult.}(m)$	0,751		0,767	
MDM05	1,026	β_0	0,208		0,294	
		β_1	0,791	-3	0,711	-1
		$\Delta H_{ult.}(m)$	1,00		1,017	
MDM06	0,239	β_0	0,055		0,082	
		β_1	0,772	1	0,664	2
		$\Delta H_{ult.}(m)$	0,241		0,244	
MDM07	0,323	β_0	0,062		0,09	
		β_1	0,81	1	0,73	3
		$\Delta H_{ult.}(m)$	0,326		0,333	
MDM08	0,207	β_0	0,069		0,081	
		β_1	0,673	2	0,619	3
		$\Delta H_{ult.}(m)$	0,211		0,213	

ΔH = recalque; $\Delta H_{ult.}$ = recalque último; D1= desvio de recalque dos dados mensais; D2= desvio de recalque dos dados trimestrais.

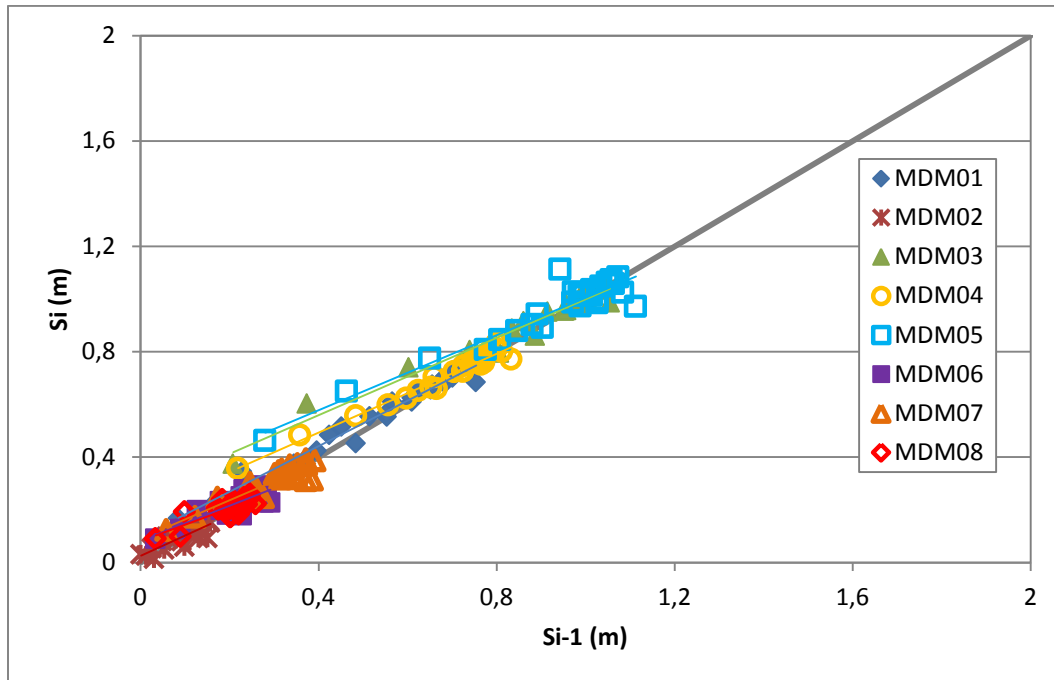


Figura 4.70 - Resultados gráficos obtidos pela aplicação do Método Observacional de Asaoka para os marcos do Aterro Remediado de São Leopoldo.

A tabela 4.14 apresenta os resultados analíticos obtidos pela aplicação do Método Observacional Asaoka (1978) para os marcos do Aterro Fase I. A partir dos resultados encontrados, observa-se que os desvios de recalque último para os intervalos de tempo estudados, 30 e 90 dias, foram consideravelmente elevados, principalmente, no marco MDM13 que obteve 146% (mensal) e 213% (trimestral), e o valor mais baixo de desvio foi no marco MDM12 que obteve 10% (mensal) e 14% (trimestral). A figura 4.71 mostra os resultados gráficos dos resultados encontrados para os marcos analisados da célula do Aterro Fase I.

A tabela 4.15 apresenta os resultados analíticos obtidos por este método para os marcos MDM09, MDM10 e MDM11 em separado, devido ao número de leituras serem maiores que aos outros marcos analisados. As leituras de campo foram mensais até o final do ano de 2011. Para verificar a influência do número de leituras na previsão de recalque último, foram simulados com este método considerando os dados até os anos de 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 e 2011.

Tabela 4.14 – Resultados analíticos obtidos pela aplicação do Método Observacional de Asaoka (1978) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

Marco	ΔH (m)	Parâmetros do modelo	Mensais	D1 (%)	Trimestrais	D2 (%)
MDM12	0,51	β_0	0,034	10	0,07	14
		β_1	0,939			
		$\Delta H_{ult.}(m)$	0,557			
MDM13	0,67	β_0	0,023	146	0,048	213
		β_1	0,986			
		$\Delta H_{ult.}(m)$	1,6			
MDM14	2,358	β_0	0,119	36	0,267	36
		β_1	0,963			
		$\Delta H_{ult.}(m)$	3,22			
MDM15	2,198	β_0	0,124	25	0,284	23
		β_1	0,955			
		$\Delta H_{ult.}(m)$	2,756			
MDM16	2,066	β_0	0,106	35	0,244	33
		β_1	0,962			
		$\Delta H_{ult.}(m)$	2,79			
MDM17	1,804	β_0	0,105	24	0,245	20
		β_1	0,953			
		$\Delta H_{ult.}(m)$	2,234			

ΔH = recalque; $\Delta H_{ult.}$ = recalque último; D1= desvio de recalque dos dados mensais; D2= desvio de recalque dos dados trimestrais.

Tabela 4.15 – Resultados analíticos obtidos pela aplicação do Método Observacional de Asaoka (1978) para os marcos MDM09, MDM10 e MDM11 do Aterro Fase I de São Leopoldo.

Marco	ΔH (m)	Parâmetros do modelo	Dados até 2006	Dados até 2007	Dados até 2008	Dados até 2009	Dados até 2010	Dados até 2011
MDM09	0,632	β_0	0,045	0,037	0,036	0,031	0,028	0,028
		β_1	0,845	0,915	0,92	0,945	0,957	0,960
		$\Delta H_{ult.}(m)$	0,29	0,40	0,47	0,56	0,65	0,70
DESVIO (%)			-54	-31	-26	-11	3	11
MDM10	0,676	β_0	0,084	0,038	0,031	0,030	0,029	0,029
		β_1	0,393	0,909	0,951	0,957	0,961	0,963
		$\Delta H_{ult.}(m)$	0,14	0,42	0,63	0,7	0,74	0,78
DESVIO (%)			-80	-38	-6	3	10	16
MDM11	0,485	β_0	0,036	0,026	0,025	0,023	0,022	0,022
		β_1	0,722	0,929	0,934	0,95	0,957	0,957
		$\Delta H_{ult.}(m)$	0,13	0,37	0,38	0,46	0,51	0,51
DESVIO (%)			-73	-24	-22	-5	5	5

ΔH = recalque; $\Delta H_{ult.}$ = recalque último.

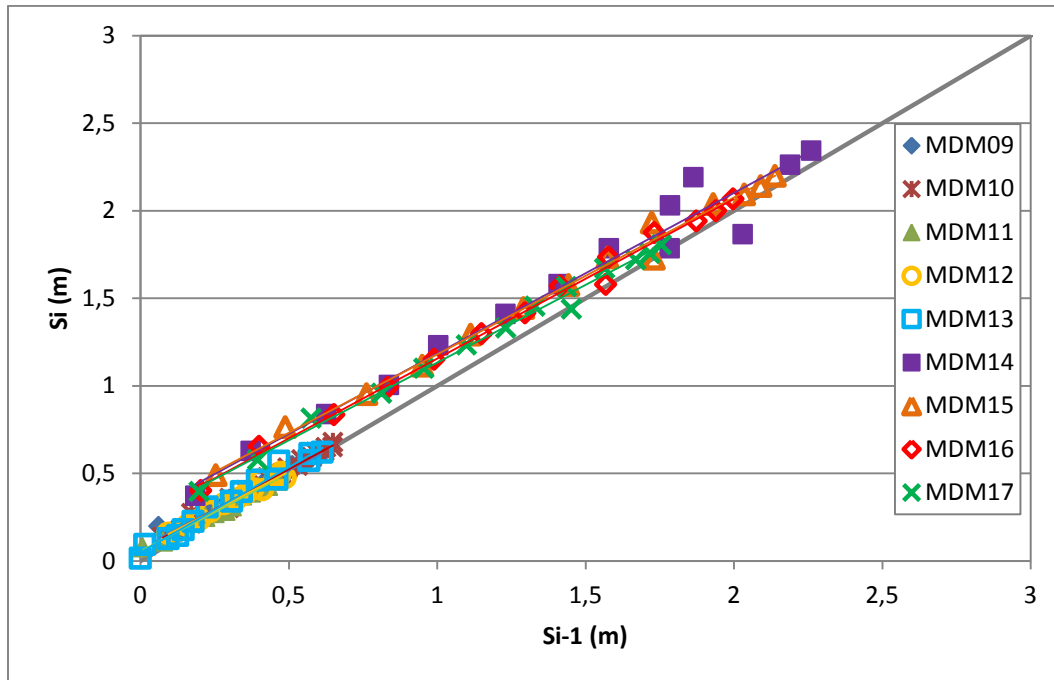


Figura 4.71 – Resultados gráficos obtidos pela aplicação do Método Observacional Asaoka (1978) para os marcos do Aterro Fase I de São Leopoldo.

A fim de verificar a sensibilidade deste método na estimativa do recalque último, foram analisadas 6 séries de dados, sendo: (a) Dados até o ano de 2006; (b) Dados até o ano de 2007; (c) Dados até o ano de 2008; (d) Dados até o ano de 2009; (e) Dados até o ano de 2010; e (f) Dados até o ano de 2011, ou seja, todos os dados (Figuras 4.72, 4.73 e 4.74).

Com base nos resultados obtidos pela aplicação deste método, observa-se que os desvios de recalques últimos foram bastante elevados, quando utilizados dados de 1 ano (até o ano 2006) para estimar o recalque último, sendo os valores dos desvios de -54%, para o marco MDM09, de -80%, para o marco MDM10, e de -73%, para o marco MDM11, ou seja, os valores de recalques calculados foram menores que os medidos em campo. E quando utilizados dados de 3 anos para estimar o recalque últimos os valores de desvios foram mais satisfatório, ou seja, para o marco MDM09 obteve 3% considerando dados de até o ano de 2010, para o marco MDM10 obteve 3% considerando dados de até o ano de 2009, e para o marco MDM11 obteve desvios a faixa de -5% a 5% considerando dados entre 2009 a 2011.

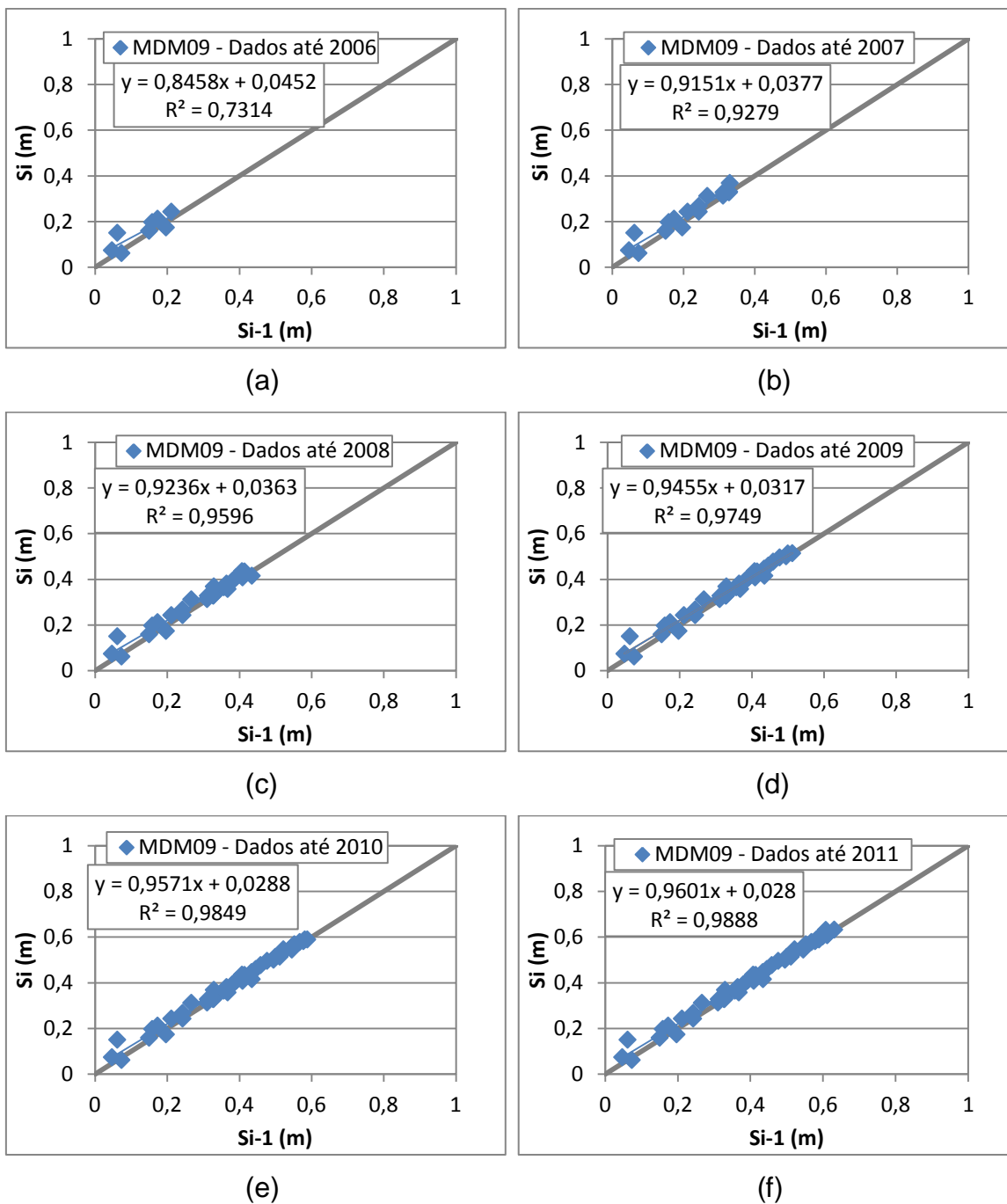


Figura 4.72 – Resultados gráficos obtidos pela aplicação do Método Observacional de Asaoka para o marco MDM09 do aterro Fase I de São Leopoldo; (a) Dados até 2006; (b) Dados até 2007; (c) Dados até 2008; (d) Dados até 2009; (e) Dados até 2010; e (f) Dados até 2011.

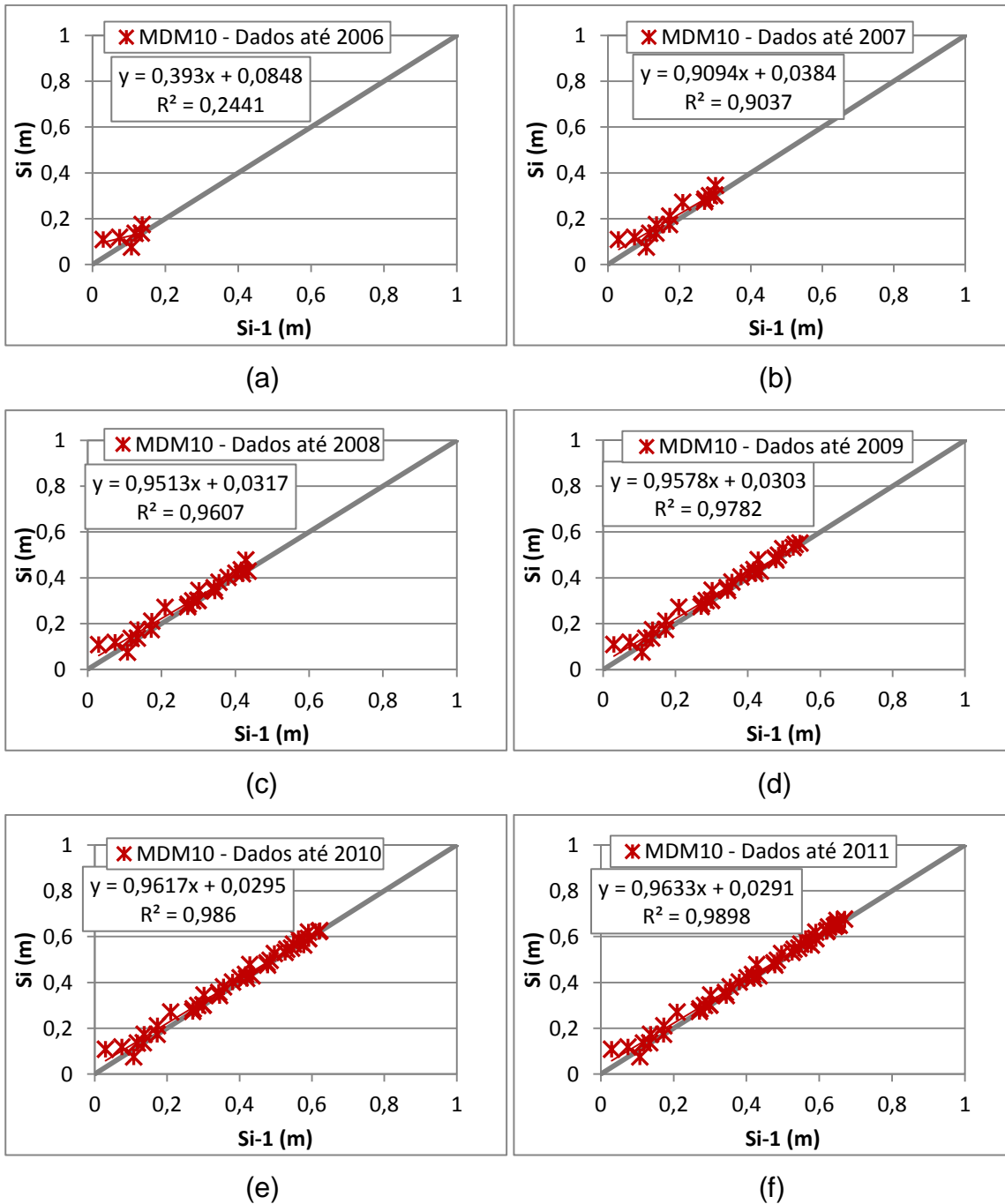


Figura 4.73 – Resultados gráficos obtidos pela aplicação do Método Observacional de Asaoka para o marco MDM 10 do aterro Fase I de São Leopoldo; (a) Dados até 2006; (b) Dados até 2007; (c) Dados até 2008; (d) Dados até 2009; (e) Dados até 2010; e (f) Dados até 2011.

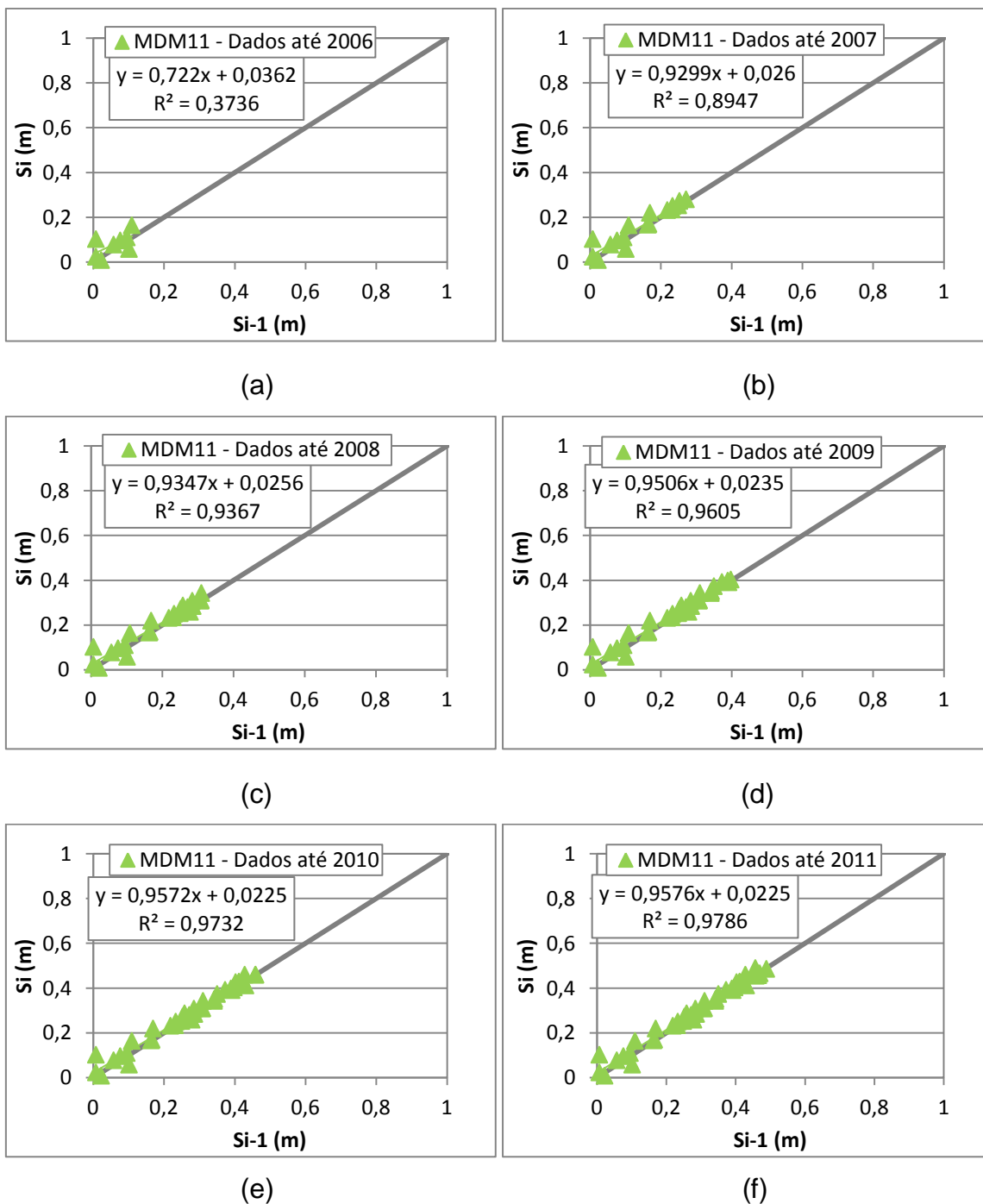


Figura 4.74 – Resultados gráficos obtidos pela aplicação do Método Observacional de Asaoka para o marco MDM 11 do aterro Fase I de São Leopoldo; (a) Dados até 2006; (b) Dados até 2007; (c) Dados até 2008; (d) Dados até 2009; (e) Dados até 2010; e (f) Dados até 2011.

Com base nos resultados obtidos e analisados na estimativa de recalques para os dados dos aterros CRR em Minas do Leão e de São Leopoldo, observa-se que, o modelo de Yen e Scanlon (1975) obteve uma fraca aderência entre os

recalques medidos e previstos, confirmando que este modelo não é adequado para a previsão de recalques para os aterros em estudo. E, a estimativa de recalques com base em funções logarítmicas simples também não obtiveram boa aderência entre os valores observados e previstos.

Os modelos Hiperbólico de Ling et al. (1998), Exponencial de *creep* (Potência) de Edil et al. (1990), de Bjarngard e Edgers (1990), de Meruelo (1995) e de Gibson e Lo (1961) obtiveram, a partir dos resultados, uma boa aderência na estimativa de recalques para os aterros estudados.

E o modelo de Gandolla et al. (1992) não obteve uma boa aderência entre os valores observados e previstos para a estimativa de recalques nos marcos superficiais analisados no aterro CRR em Minas do Leão e na célula aterro Remediado de São Leopoldo. Já para a célula aterro Fase I obteve uma boa aderência entre os valores observados e previstos.

O método Observacional de Asaoka (1978) não simula o ajuste de curva, mas estima o recalque final, que apresentou resultados satisfatórios para os aterros sanitários em estudo.

4.3 Comparação dos resultados obtidos com valores da literatura

Neste item, será apresentada a comparação dos resultados obtidos de cada modelo estudado neste trabalho com os valores encontrados na literatura para outros aterros sanitários.

A figura 4.75 procura comparar os resultados obtidos dos aterros Central de Resíduos de Recreio - Minas do Leão e de São Leopoldo, em termos de deformação última (ϵ_{ult}) e taxa de deformação inicial (ρ_0), com os dados dos aterros sanitários de Meruelo, Wisconsin e Bandeirantes. Os valores de deformação última para o aterro Central de Resíduos de Recreio (CRR) indicam deformação entre 5,5 e 38,5% em relação à altura inicial de resíduos, valores estes em média superiores aos aterros Meruelo, Wisconsin e Bandeirantes. Já os valores de deformação última para o Aterro de São Leopoldo, indicam deformação entre 14,3 e 66,2%, célula do aterro Remediado e entre 1,5 e 62,5%, célula do aterro Fase I, em relação à altura inicial

de resíduos, valores estes em média superiores aos aterros Meruelo, Wisconsin e Bandeirantes.

As taxas de deformação inicial situaram-se entre $9,17 \times 10^{-03}$ e $4,57 \times 10^{-02}$ %/dia para o aterro Minas do Leão, valores estes em média superiores aos aterros Wisconsin e Bandeirantes. E as taxas de deformação inicial para o aterro de São Leopoldo situaram-se entre $1,79 \times 10^{-03}$ e $9,28 \times 10^{-02}$ %/dia para célula do aterro Remediado, entre $3,68 \times 10^{-03}$ e $1,98 \times 10^{-02}$ %/dia para célula do aterro Fase I, valores estes em média superiores aos aterros Wisconsin e Bandeirantes e próximos aos valores dos aterros Meruelo e Minas do Leão.

A figura 4.76 procura comparar os resultados obtidos dos aterros Minas do Leão e de São Leopoldo, com os dados do aterro Bandeirantes e dados de El Fadel e Al-Rashed (1998) e Edil et al. (1990). Os valores do parâmetro de compressibilidade (m) situaram-se entre $1,3 \times 10^{-06}$ e $2,8 \times 10^{-05}$ kPa^{-1} para o aterro CRR de Minas do Leão, valores estes em média superiores ao aterro Bandeirantes. E para o aterro de São Leopoldo, os valores do parâmetro de compressibilidade (m) situaram-se entre $3,5 \times 10^{-06}$ e $1,5 \times 10^{-04}$ kPa^{-1} para a célula do aterro Remediado e entre $2,6 \times 10^{-06}$ e $3,9 \times 10^{-05}$ kPa^{-1} para a célula do aterro Fase I, valores estes também em média superiores ao aterro Bandeirantes.

Os valores da taxa de compressão (n) situaram-se entre 0,68 e 0,90 para o aterro CRR de Minas do Leão, valores estes em média superiores ao aterro de Bandeirantes. E para o aterro de São Leopoldo, os valores da taxa de compressão (n) situaram-se entre 0,22 e 0,70 para a célula do aterro Remediado, entre 0,58 e 0,90 para a célula do aterro Fase I, valores estes em média superiores ao aterro de Bandeirantes.

A partir dos resultados obtidos neste estudo, observa-se que os valores situaram-se mais próximos dos valores de El Fadel e Al-Rashed (1998) e Edil et al. (1990).

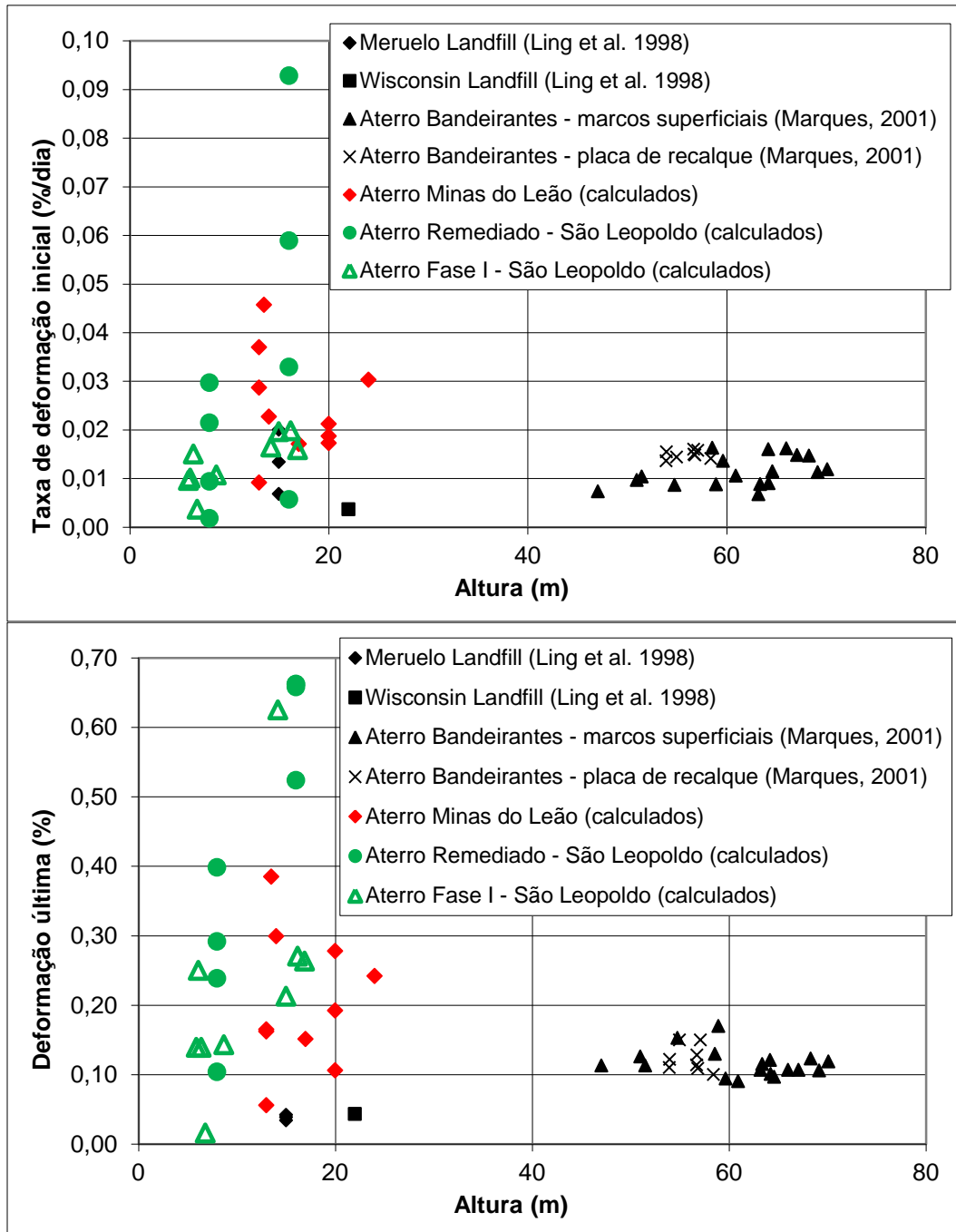


Figura 4.75 – Relação entre a taxa de deformação inicial (ρ_0), a deformação última (ϵ_{ult}) e altura do maciço de resíduos a partir do modelo Hiperbólico (Ling et al., 1998).

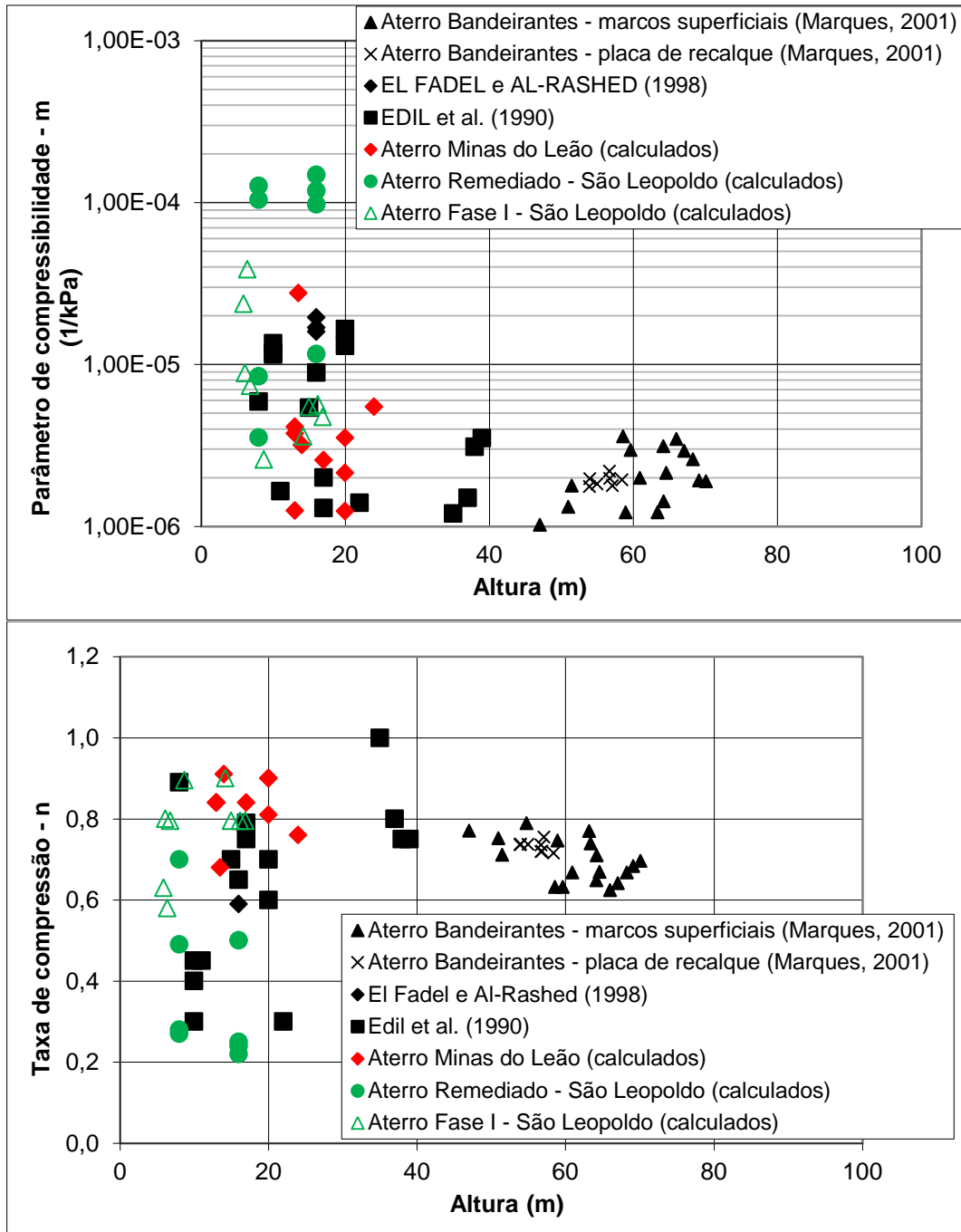


Figura 4.76 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo (m e n) baseado em funções de potência (Edil et al., 1990) e a altura do maciço de resíduos.

A figura 4.77 procura comparar os resultados obtidos pelo estudo dos aterros de Minas do Leão e de São Leopoldo com os valores do aterro Bandeirantes e os valores de Bjarngard e Edgers (1990), El Fadel (1998) e Carvalho (1999). Os valores do coeficiente de compressão secundária intermediária ($C_{\alpha 1}$) situaram-se entre

0,0042 e 0,02, e o do coeficiente de compressão secundária de longo prazo ($C_{\alpha 2}$) situaram-se entre 0,013 e 0,08 para o aterro CRR de Minas do Leão. E para o aterro de São Leopoldo, os valores do coeficiente compressão secundária de longo prazo ($C_{\alpha 2}$) situaram-se entre 0,006 e 0,016 para a célula do aterro Remediado e os valores do coeficiente de compressão secundária intermediária ($C_{\alpha 1}$) situaram-se entre 0,007 e 0,016 e os valores do coeficiente compressão secundária de longo prazo ($C_{\alpha 2}$) situaram-se entre 0,03 e 0,08 para a célula do aterro Fase I. Conforme as comparações com outros valores da literatura, pode-se observar que os resultados obtidos para ambos os aterros estudados tiveram valores em média inferiores dos demais.

A figura 4.78 procura comparar os resultados obtidos dos aterros em estudo, aterro de Minas do Leão e de São Leopoldo, com os dados da literatura. Os valores do coeficiente de compressibilidade primária (a) situaram-se entre 0,0 e $4,2 \times 10^{-06}$ kPa^{-1} , do parâmetro de compressibilidade secundária (b) situaram-se entre $7,2 \times 10^{-05}$ e $5,3 \times 10^{-04}$ kPa^{-1} e da taxa de compressão secundária (λ/b) situaram-se entre $8,9 \times 10^{-04}$ e $2,3 \times 10^{-03}$ dia^{-1} para o aterro CRR de Minas do Leão. E, para o aterro de São Leopoldo os valores do coeficiente de compressibilidade primária (a) situaram-se entre $3,5 \times 10^{-07}$ e $1,7 \times 10^{-06}$ kPa^{-1} , do parâmetro de compressibilidade secundária (b) situaram-se entre $2,78 \times 10^{-05}$ e $1,3 \times 10^{-04}$ kPa^{-1} e da taxa de compressão secundária (λ/b) situaram-se entre $9,5 \times 10^{-04}$ e $2,8 \times 10^{-03}$ dia^{-1} para a célula do aterro Remediado e os valores do coeficiente de compressibilidade primária (a) situaram-se entre $5,9 \times 10^{-07}$ e $4,2 \times 10^{-05}$ kPa^{-1} , do parâmetro de compressibilidade secundária (b) situaram-se entre $1,8 \times 10^{-04}$ e $1,7 \times 10^{-03}$ kPa^{-1} e da taxa de compressão secundária (λ/b) situaram-se entre $6,8 \times 10^{-05}$ e $1,2 \times 10^{-03}$ dia^{-1} para a célula do aterro Fase I.

A partir dos resultados obtidos observa-se que os valores dos coeficientes de compressibilidade primária, dos parâmetros de compressibilidade secundária e das taxas de compressão secundária situaram-se próximos aos valores encontrados na literatura.

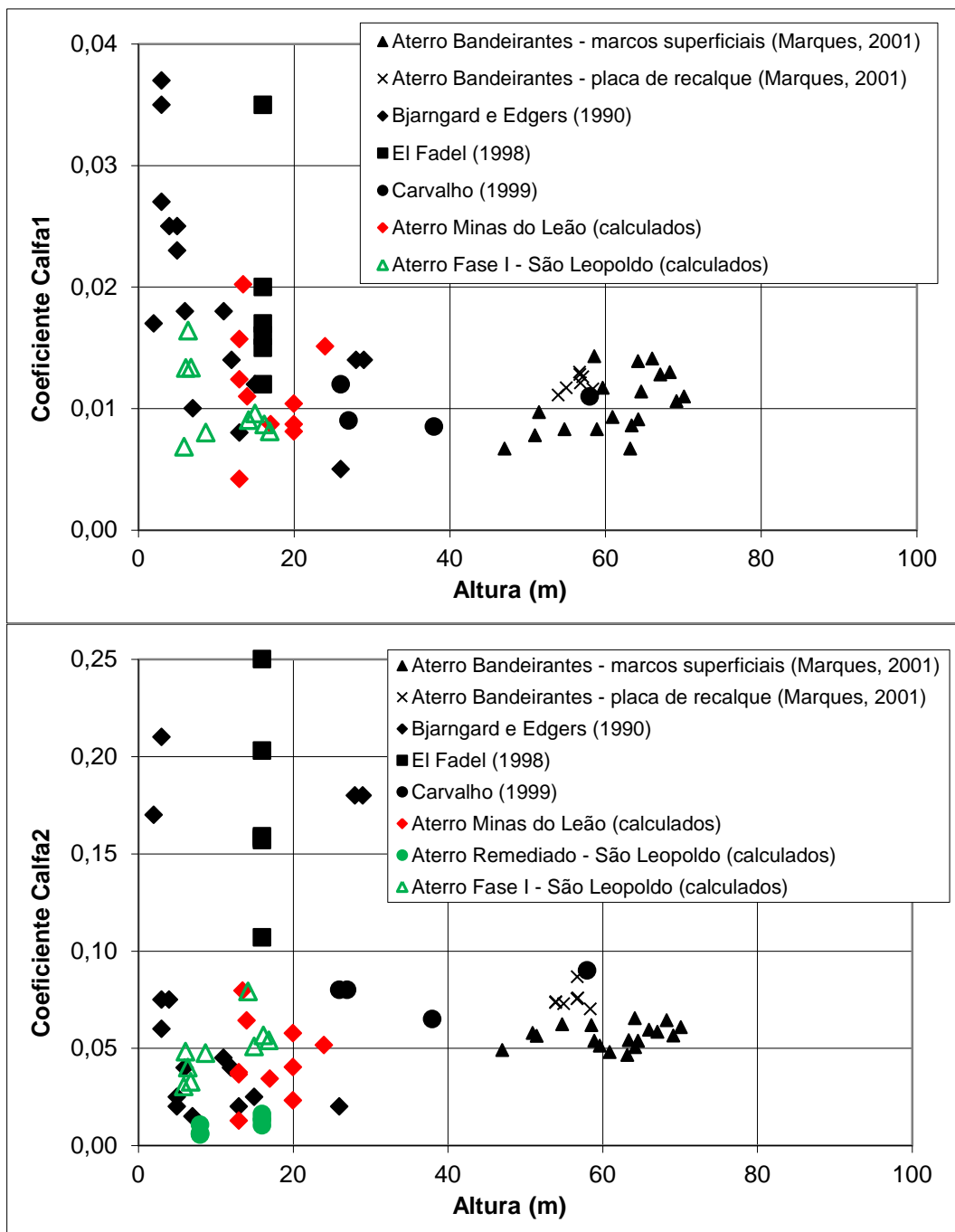


Figura 4.77 – Relação entre os coeficientes de compressão secundária intermediária e de longo prazo ($C_{\alpha1}$, $C_{\alpha2}$) a partir do modelo Bjarngard e Edgers (1990) e a altura do maciço de resíduos.

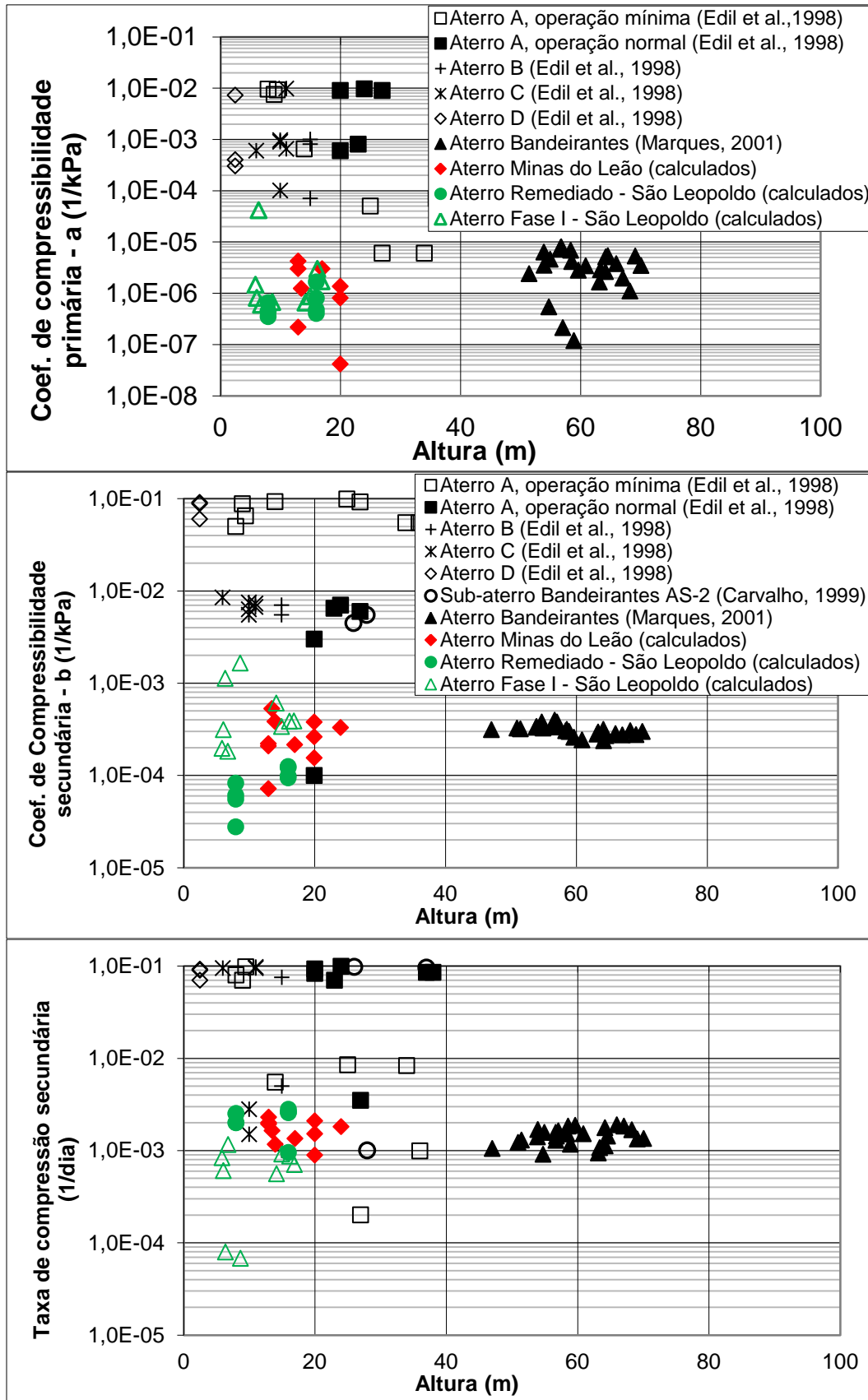


Figura 4.78 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do modelo de Gibson e Lo (1961) e a altura do maciço de resíduos.

A figura 4.79 procura comparar os resultados obtidos pelos aterros em estudo, aterro de Minas do Leão e de São Leopoldo, com os valores dos aterros Muribeca e de Belo Horizonte. Os valores do coeficiente de perda de massa (α) situaram-se entre 0,03 e 0,3 e os valores do coeficiente de hidrólise (K_h) situaram-se entre 0,0009 e 0,002 dia^{-1} para o aterro de Minas do Leão e, para o aterro de São Leopoldo, os valores do coeficiente de perda de massa (α) situaram-se entre 0,009 e 0,03 e os valores do coeficiente de hidrólise (K_h) situaram-se entre 0,001 e 0,003 dia^{-1} para a célula do aterro Remediado e os valores do coeficiente de perda de massa (α) situaram-se entre 0,1 e 1,2 e os valores do coeficiente de hidrólise (K_h) situaram-se entre 0,0002 e 0,001 dia^{-1} para a célula do aterro Fase I.

A partir destes resultados pode ser observado que os valores do coeficiente de perda de massa se mantiveram próximo aos valores do aterro de Muribeca e do aterro experimental de Belo Horizonte. Já para os valores do coeficiente de hidrólise se manteve próximo aos valores do aterro de Muribeca e inferiores aos valores do aterro experimental de Belo Horizonte.

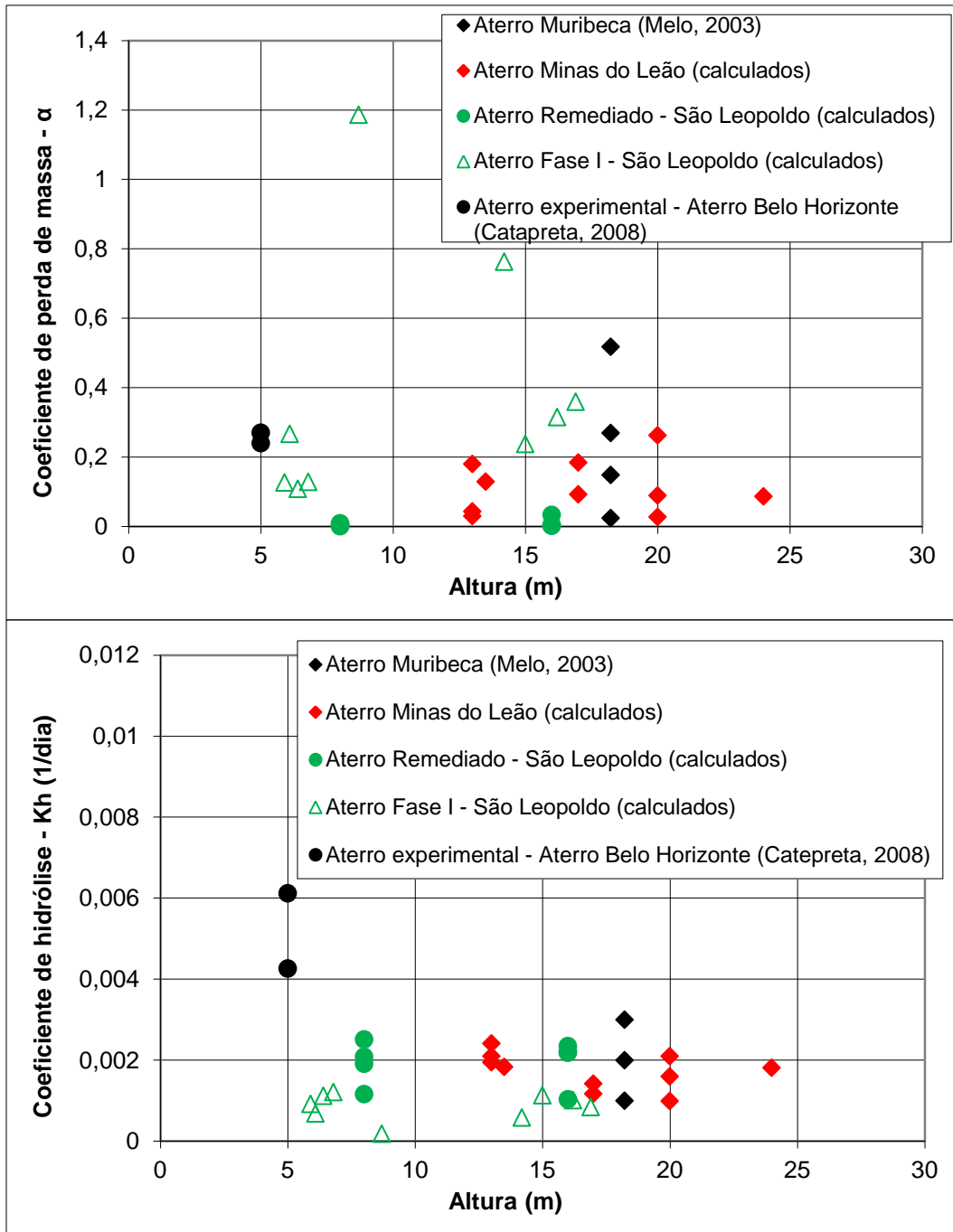


Figura 4.79 – Relação entre os coeficientes (α e K_h) do modelo de Meruelo e a altura do maciço de resíduos.

5 CONCLUSÕES

A análise crítica dos 8 modelos de previsão de recalques existentes na literatura, tendo por base os dados de monitoração de dois aterros sanitários, Central de Resíduos de Recreio (CRR) do município de Minas do Leão e do Aterro Sanitário de São Leopoldo, constituíram a base de estudo para avaliar os recalques dos aterros em estudo com medidas de marcos superficiais, verificando a eficiência dos modelos de previsão de recalques em aterros sanitários.

Os modelos de previsão de recalques que obtiveram uma boa aderência entre os recalques medidos e previstos para os dois aterros sanitários analisados foram: Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998), Modelo Exponencial de *creep* (Potência) de Edil et al. (1990), Modelo de Bjarngard e Edgers (1990), Modelo de Meruelo e o Modelo de Gibson e Lo (1961). Modelos estes adequados para a previsão de recalques nos dois aterros analisados.

O modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998) obteve desvios de recalques (D) na faixa de 1,81% para o aterro CRR de Minas do Leão, de -6,37% para o aterro Remediado de São Leopoldo e de 1,22% para o aterro Fase I de São Leopoldo. A média da deformação última foi de 20,4%; 44,2% e de 22,9%, respectivamente. A média da taxa de deformação inicial foi de $2,5 \times 10^{-2}$ %/dia; $3,2 \times 10^{-2}$ %/dia e de $1,4 \times 10^{-2}$ %/dia, respectivamente. Os valores da taxa de deformação inicial são próximos aos valores encontrados por Ling et al. (1998) no aterro Meruelo Landfill.

O modelo exponencial de *creep* (Potência) obteve as seguintes médias de desvios de recalques (D): -4,69% no tempo de 1068 dias e 24,25% no tempo de 1800 dias para o aterro CRR de Minas do Leão, -8,39% no tempo de 583 dias e 19,03% no tempo de 2809 dias para o aterro Remediado de São Leopoldo e de -6,66% no tempo de 790 dias e de 7,51% no período entre 1458 a 2067 dias para o aterro Fase I de São Leopoldo. A média da compressibilidade de referência (m) foi de $5,5 \times 10^{-6}$ KPa⁻¹ (aterro CRR de Minas do Leão), de $7,7 \times 10^{-5}$ KPa⁻¹ (aterro Remediado de São Leopoldo) e de $1,1 \times 10^{-5}$ KPa⁻¹ (aterro Fase de São Leopoldo). E a média da taxa de compressão (n) foi de 0,83 (aterro CRR de Minas do Leão), de 0,37 (aterro Remediado de São Leopoldo) e de 0,78 (aterro Fase I de São

Leopoldo). Estes valores foram próximos aos valores encontrados por El Fadel e Al-Rashed (1998) e por Edil et al. (1990).

O modelo de Bjarngard e Edgers (1990) obteve desvios de recalques (D) na faixa de -0,56% para o aterro CRR de Minas do Leão, de 12,71% para o aterro Remediado de São Leopoldo e de 0,03% para o aterro Fase I de São Leopoldo. A média do coeficiente de compressão secundária intermediária (α_1) foi de 0,0115 (aterro CRR de Minas do Leão) e de 0,0104 (aterro Fase I de São Leopoldo). E a média do coeficiente de compressão secundária de longo prazo (α_2) foi de 0,0438 (aterro CRR de Minas do Leão), de 0,0102 (aterro Remediado de São Leopoldo) e de 0,0488 (aterro Fase I de São Leopoldo).

O modelo de Meruelo obteve desvios de recalques (D) na faixa de -1,99% para o aterro CRR de Minas do Leão, de 7,40% para o aterro Remediado de São Leopoldo e de 0,38% para o aterro Fase I de São Leopoldo. A média do coeficiente de perda de massa (α) foi de 0,1121; 0,0072 e 0,3876, respectivamente. E, a média do coeficiente de hidrólise (Kh) foi de 0,0017; 0,0019 e de 0,0009, respectivamente. Os valores de (α) foram próximos aos encontrados por Melo (2003) e Catapreta (2008) e os valores de (Kh) foram próximos aos encontrados por Melo (2003).

O modelo de Gibson e Lo (1961) obteve desvios de recalques (D) na faixa de -1,14% para o aterro CRR de Minas do Leão, de 2,9% para o aterro Remediado de São Leopoldo e de 2,83% para o aterro Fase I de São Leopoldo. A média do coeficiente de compressibilidade primária (a) foi de $1,4 \times 10^{-6} \text{KPa}^{-1}$; $6,5 \times 10^{-7} \text{KPa}^{-1}$ e $5,7 \times 10^{-6} \text{KPa}^{-1}$, respectivamente. A média do parâmetro de compressibilidade secundária (b) foi de $2,8 \times 10^{-4} \text{KPa}^{-1}$; $8,3 \times 10^{-5} \text{KPa}^{-1}$ e $5,8 \times 10^{-4} \text{KPa}^{-1}$, respectivamente. E, a média da taxa de compressão secundária (λ/b) foi de $1,7 \times 10^{-3} \text{dia}^{-1}$; $2,2 \times 10^{-3} \text{dia}^{-1}$ e $6,4 \times 10^{-4} \text{dia}^{-1}$, respectivamente.

O modelo de Yen e Scanlon (1975) e a função logarítmica simples obtiveram uma fraca concordância entre os recalques observados e estimados para a previsão de recalques nos dois aterros sanitários analisados, sendo assim, estes modelos não são adequados para a previsão de recalques nestes aterros.

O modelo de Gandolla et al. (1992) não obteve uma boa aderência entre os recalques observados e previstos para a previsão de recalques no aterro Central de Resíduos de Recreio (CRR) de Minas do Leão e na célula aterro Remediado de São Leopoldo. Já na célula aterro Fase I de São Leopoldo, este modelo obteve uma boa aderência entre os valores observados e previstos.

O modelo Observacional de Asaoka (1978) obteve resultados satisfatórios para a estimativa de recalque final do aterro Central de Resíduos de Recreio do município de Minas do Leão, e do aterro de São Leopoldo. Este modelo é muito interessante para o acompanhamento de recalques e verificar a estabilização e previsão do recalque final.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2013**. São Paulo, 2013.

ALCANTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ASAOKA, A. **Observational procedure of settlement prediction**. Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. v. 18, n. 4, p. 87-101, 1978.

AZAMBUJA ENGENHARIA E GEOTECNIA. **Projetos Executados**. São Leopoldo, 2011. Disponível em: <http://www.azambuja.com.br/php/index.php?link=projetos_executados&sub=projetos_ambientais&id=12>. Acesso em: 04 nov. 2014.

BABU, G. L. S. et al. **Prediction of Long-Term Municipal Solid Waste Landfill Settlement Using Constitutive Model**. Pract. Period. Hazard. Toxic Radioact. Waste Manage, ASCE, n. 14, p. 139-150, 2010.

BJARNGARD, A. B.; EDGERS, L. **Settlements of municipal solid waste landfills**. Proc. 13th Annual Madison Waste Conference, Madison, Wisconsin, v. 1, p. 195-205, 1990.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo. Oficina de Textos, 2008.

BRIDI, E.; GOMES, T. L.; GEHLING, G. **Otimização na Coleta Domiciliar de Resíduos Sólidos Urbanos pela Implantação de uma Segunda Estação de Transbordo em Porto Alegre – RS**. In: FORUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2. Porto Alegre, 2009.

CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos: Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação.** 2008. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CHEN, Y. et al. **Secondary compression of municipal solid wastes and a compression model for predicting settlement of municipal solid waste landfills.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. n. 136, p. 706-717, 2010.

COUMOULOS, D. G.; KORYALOS, T. P. **Prediction of attenuation of landfill settlement rates with time.** In: Proc. 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ISSMFE, Hamburg, Germany, v. 3, p. 1807–1811, 1997.

CRVR - COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS. **Central de Resíduos do Recreio.** Minas do Leão, 2013. Disponível em: <<http://www.crvr.com.br/UnidadeMinasLeao.html>>. Acesso em: 03 nov. 2014.

DENARDIN, G. P. **Estudo dos recalques do aterro sanitário da Central de Resíduos do Recreio – Minas do Leão/RS.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

DIAZ, J. G. L. et al. **Estimating material losses in sanitary landfills through biological degradation.** In: Proc. 5th International Landfill Symposium – Sardinia 95, Cagliari, Italy, p. 203-208, 1995.

DIXON, N.; JONES, D. R. V. **Engineering properties of municipal solid waste.** Geotextiles and Geomembranes, n. 23, p. 205–233, 2005.

EDIL, T. B.; RANGUETTE, V. J.; WUELLNER, W. W. **Settlement of municipal refuse.** In: Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice: ASTM STP 1070. American Society of Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, p. 225–239, 1990.

EL-FADEL, M.; AL-RASHED, H. **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, 1998.

FEPAM. FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL. **LO N°4268/2012-DL:** Licença de Operação. Porto Alegre, 2012.

FEPAM. FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL. **LO N°5964/2013-DL:** Licença de Operação. Porto Alegre, 2013.

FEPAM. FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL. **LO N°4814/2011-DL**: Licença de Operação. Porto Alegre, 2011.

GANDOLLA, M. et al. **A determinação dos efeitos do recalque sobre os depósitos de lixo sólido municipal**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE DESTINAÇÃO DO LIXO. Salvador, 1994.

GIBSON, R. E.; LO, K. Y. **A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression**. Acta Polytechnica Scandinavica, c. 10, n. 296, p. 1-16, 1961.

GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; TANCREDI, G. **Contribution to a technical classification of MSW**. In: International Landfill Symposium, 5. 1995, Cagliari, Italy. Proc., p. 761-768. 1995.

HETTIARACHCHI, C. H.; MEEGODA, J.; HETTIARACHCHI, P. **Effects of gas and moisture on modeling of bioreactor landfill settlement**. Waste Manage, n. 29, p. 1018–1025, 2009.

HOSSAIN, M. S.; GABR, M. A. **Prediction of municipal solid waste landfill settlement with leachate recirculation**. Waste Containment and Remediation, GSP 142, ASCE, 2005.

IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Lixo Municipal**: manual de gerenciamento integrado. São Paulo. IPT/CEMPRE, 2000.

LI, Y. C. et al. **Influences of operational practices on municipal solid waste landfill storage capacity**. Waste Management & Research, n. 31, p. 273–282, 2013.

LING, H. I. et al. **Estimation of municipal solid waste landfill settlement**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. n. 124, p. 21-28, 1998.

LIU, C. N.; CHEN, R. H.; CHEN, K. S. **Unsaturated consolidation theory for the prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement**. Waste Management & Research, n. 24, p. 80-91, 2006.

LUZ, F. X. R. **Aterro Sanitário**. São Paulo: CETESB, 1976, 13 p.

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; VILAR, O. M. **Constitutive Model for Municipal Solid Waste**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, n. 128, p. 940-951, 2002.

MACHADO, S. L.; VILAR, O. M.; CARVALHO, M. F. **Constitutive model for long term municipal solid waste mechanical behavior**. Computers and Geotechnics. n. 35, p. 775–790, 2008.

MAHLER, C. F.; AGUIAR, A. B. **Determinação da permeabilidade in situ em aterros de resíduos sólidos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21. ABES. Trabalhos Técnicos, 2001.

MANASSERO, M.; PASQUALINI, E. **Surveying and construction in urban, suburban and polluted areas-construction**. Proc., International Conference the Environment and Geotechnics, Paris, Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, 1993.

MARQUES, A. C. M. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos**. Tese. (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

MASSAD, F. **Método gráfico para o acompanhamento da evolução dos recalques com o tempo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 7., 1982, Olinda/Recife. **Anais...** São Paulo: ABMS, 1982. p. 321-331.

MCDUGALL, J. **Settlements: the long and the short of it**. Geotechnical Characterization, Field Measurement and Laboratory Testing of Municipal Solid Waste, ASCE Geotechnical Special Publication, n. 209, p. 76-11, 2011.

MELO, M. C. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muibeca**. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.

OWEIS, I. S. **Estimate of landfill settlements due to mechanical and decompositional process**. J. Geotech. Geoenviron. Eng., n. 132, p. 644–650, 2006.

PARK, H. I.; LEE, S. R. **Long-term settlement behavior of landfills with refuse decomposition**. J. Resour. Manage. Technol., n. 24, p. 159–165, 1997.

PARK, H.; LEE, S. R.; DO, N. Y. **Evaluation of Decomposition Effect on Long-Term Settlement Prediction for Fresh Municipal Solid Waste Landfills**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. n. 128, p. 107-118, 2002.

SAVAGE, G. M.; DIAZ, L. F.; GOLUEKE, C. G.; MARTONE, C.; HAM, R. K. **Guidance for landfilling waste in economically developing countries**. Washington: USEPA, (Report EPA/600/R-98-040), 1998.

SCHOENELL, E. K. **Aplicação de ozônio e ozônio + peróxido de hidrogênio para remoção de compostos recalcitrantes em lixiviados de aterros sanitários.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

SIL SOLUÇÕES AMBIENTAIS. **Aterro Sanitário.** Minas do Leão. Disponível em: <<http://www.nova.art.br/sil/principal/Aterro.asp>>. Acesso em: 03 nov. 2014.

SIMÕES, G. F. **Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos.** Tese. (Doutorado em Engenharia Civil: Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000.

SIMÕES, G. F.; CAMPOS, T. M. P. **Modelos de previsão de recalques em aterros sanitários.** In: COBRAMSEG, 1998.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A. **Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil.** Waste Management, n. 33, p. 420–430, 2013.

SOWERS, G. F. **Settlement of waste disposal fills.** In: eighth international conference on soil mechanics and foundation engineering. Moscow, 1973.

TAPAHUASCO, W. F. C. **Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de um novo modelo de previsão de recalques considerando a parcela de biodegradação.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

TAPAHUASCO, W. F. C. **Avaliação de modelos de previsão de recalques dos resíduos sólidos urbanos do aterro Jockey Club de Brasília.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

UNESP. Gerenciamento de resíduos. **Ciclo de Gerenciamento de Resíduos:** da Geração à Disposição. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/residuos/res10.html>>. Acesso em: 22 fev. 2015.

VILHENA, A. (Coord.) **Lixo Municipal:** manual de gerenciamento integrado. São Paulo. E. CEMPRE, 2010.

WEI, W. **A new model for settlement process of closed municipal solid waste landfill.** EJGE, 2012. v. 17, p. 948-957, 2012.

YEN, B. C.; SCANLON, B. **Sanitary landfill settlement rates.** Journal of engineering division, 1975.