

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

**ESTUDO DOS RECALQUES DO ATERRO
SANITÁRIO DA CENTRAL DE RESÍDUOS DO
RECREIO – MINAS DO LEÃO/RS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Gabriela Pippi Denardin

**Santa Maria, RS, Brasil
2013**

**ESTUDO DOS RECALQUES DO ATERRO SANITÁRIO DA
CENTRAL DE RESÍDUOS DO RECREIO – MINAS DO
LEÃO/RS**

Gabriela Pippi Denardin

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

**Santa Maria, RS, Brasil
2013**

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

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

**ESTUDO DOS RECALQUES DO ATERRO SANITÁRIO DA CENTRAL
DE RESÍDUOS DO RECREIO – MINAS DO LEÃO/RS**

elaborada por
Gabriela Pippi Denardin

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

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

José Mário Doleys Soares, Dr. (UFSM)

Luiz Antônio Bressani, Dr. (UFRGS)

Santa Maria, 05 de abril de 2013.

*Aos meus queridos e
amados pais, Gilberto e Andréia,
ao meu irmão, João Vicente,
ao meu noivo Rafael, dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por permitir que mais um objetivo fosse atingido em minha vida.

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

Ao Professor Rinaldo pela orientação, paciência e compreensão ao longo do desenvolvimento do trabalho.

À empresa Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos que contribuiu, sempre apoiou e confiou no meu trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade de realizar o mestrado na área de engenharia civil.

RESUMO

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

ESTUDO DOS RECALQUES DO ATERRO SANITÁRIO DA CENTRAL DE RESÍDUOS DO RECREIO – MINAS DO LEÃO/RS

AUTORA: GABRIELA PIPPI DENARDIN

ORIENTADOR: RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 05 de abril de 2013.

A magnitude e o longo tempo de duração dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos são um dos problemas mais importantes nestes tipos de estrutura. Diversos estudos e pesquisas têm sido desenvolvidos nos últimos anos para estimar os recalques futuros, com base em métodos teóricos ou empíricos. Um grande número de modelos de previsão de recalques, apresentados na literatura, são baseados em procedimentos empíricos associados a ajustes de dados experimentais. Os dados experimentais, em geral, são obtidos em monitoramento de campo e, em menor quantidade, através de estudos de compressibilidade em células de grande dimensão em laboratório. O presente trabalho pretende contribuir para o estudo da compressibilidade dos maciços sanitários, por meio da previsão e monitoramento de recalques da Central de Resíduos do Recreio (CRR), em Minas do Leão/RS, por meio da aplicação de modelos de previsão de recalques já existentes e verificando a previsão de comportamento através do monitoramento do comportamento real. Para alcançar este objetivo foi necessário aplicar os modelos de previsão de recalques e compará-los, a fim de verificar qual estava mais adequado à realidade do aterro em questão. Os modelos utilizados nesta pesquisa foram: Modelo de Yen e Scanlon (1975); Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998); Modelo de Creep de Edil et al. (1990); Modelo de Bjarngard e Edgers (1990) e Método Observacional de Asaoka (1978). Para o estudo de compressibilidade dos resíduos sólidos foram utilizados os controles e levantamentos topográficos de 6 marcos superficiais com recalques mais significativos, entre 2007 e 2012 (1800 dias) na Área 1 Central de Resíduos do Recreio. A aplicação do Modelo de Yen e Scanlon (1975), assim como a utilização de funções logarítmicas simples para estimativas de recalques, apresentaram resultados insatisfatórios. Os modelos propostos por Ling et al. (1998) e Bjarngard e Edgers (1990) foram os que se apresentaram com melhor aderência com os dados de monitoramento. 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. Recalque. Modelos de Previsão.

ABSTRACT

Master's Degree Dissertation
Graduate Program in Civil Engineering
Universidade Federal de Santa Maria

STUDIES OF SETTLEMENTS OF THE LANDFILL OF THE *CENTRAL DE RESÍDUOS DO RECREIO - MINAS DO LEÃO/RS*

AUTHOR: GABRIELA PIPPI DENARDIN

ADVISOR: RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO

Date and Place of Presentation: Santa Maria, April 5th, 2013.

The magnitude and long duration of settlements in municipal solid waste landfills are a major problem in these structures. Several studies and surveys have been developed in recent years to estimate future settlements, based on theoretical or empirical methods. A large number of prediction models for settlements, presented in the literature are based on empirical procedures associated with adjustments to experimental data. Experimental data, in general, are obtained in field monitoring and, to a lesser extent, through studies of compressibility in laboratory large cells. This research aims to contribute with the study of the landfills compressibility through the prediction and monitoring of settlements at the Central de Resíduos do Recreio (CRR), Minas do Leão/RS, through the application of predictive models of existing settlements and verifying the prediction through the monitoring of the actual behavior. In order to achieve this goal it was necessary to apply predictive models of settlements and compare them to see which was best suited to the reality of the landfill. The models used in this research were: Yen and Scanlon Model (1975); Hyperbolic Model of Ling et al. (1998); Creep Model of Edil et al. (1990); Bjarngard and Edgers Model (1990) and Observational Method of Asaoka (1978). To study the compressibility of solid waste, topographic surveys of 6 control points with more significant settlements between 2007 and 2012 (1800 days) in Area 1 of Central de Resíduos do Recreio were used. The employment of the Yen and Scanlon Model (1975), as well as the use of simple logarithmic functions for estimating settlements showed unsatisfactory results. The models proposed by Ling et al. (1998) and Bjarngard and Edgers (1990) were those which presented better results with monitoring data. It is noteworthy that the method of Asaoka (1978) is very interesting for the monitoring of settlements and to verify the stabilization and prediction of the final settlement.

Keywords: Municipal Solid Waste. Landfill. Settlement. Prediction Models.

LISTA DE FIGURA

Figura 2.1 – Exemplo do método da trincheira (IPT, 1998).	17
Figura 2.2 – Exemplo do método da rampa (IPT, 1998).	17
Figura 2.3 – Exemplo do método da área (IPT, 1998).	18
Figura 2.4 – Evolução da destinação final dos resíduos no Brasil (JUCÁ, 2001).	19
Figura 2.5 – Destinação final dos resíduos em peso (JUCÁ, 2001).	19
Figura 2.6 – Destinação final dos resíduos por número de municípios(JUCÁ, 2001).	19
Figura 2.7 – Estágios de tempo-recalque típicos para um aterro de resíduos sólidos.	31
Figura 2.8 – Definição da idade média do aterro, t_1 1975 (MARQUES, 2001).	36
Figura 2.9 – Modelo hiperbólico aplicado ao aterro sanitário Meruelo, (MARQUES, 2001).	37
Figura 2.10 – Características dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos (PARK et al., 2002)..	39
Figura 2.11 – Modelo de compressão unidimensional proposto por Bjarngard e Edgers (1990) (MARQUES, 2001).	40
Figura 2.12 – Aplicação do método observacional (MARQUES, 2001).	42
Figura 3.1 – Localização da empresa, mapas do Brasil e do Rio Grande do Sul.	46
Figura 3.2 – Infraestrutura da área.	47
Figura 3.3 – Balança de pesagem.	48
Figura 3.4 – Camadas de impermeabilização e proteção do solo	49
Figura 3.5 – Camadas de proteção, com argila compactada, areia para inspeção e argila compactada.	49
Figura 3.6 – Controle tecnológico das camadas compactadas de argila.	49
Figura 3.7 – Instalação da geomembrana PEAD sobre a camada de argila compactada.	50
Figura 3.8 – Geração de lixiviado e canalização para Estação de tratamento.	50
Figura 3.9 – Banhados construídos.	51
Figura 3.10 – Reservatório de água.	51
Figura 3.11 – Cava de mineração.	52
Figura 3.12 – Drenagem de fundo (espinha de peixe) e início do dreno vertical.	53
Figura 3.13 – Dreno de biogás.	53
Figura 3.14 – Planta de queima do biogás.	54
Figura 4.1 – Planta com a situação dos marcos superficiais e do inclinômetro, em referência às Áreas 1 e 2.	58
Figura 4.2 – Convenções utilizadas.	59
Figura 4.3 – (a) Marco topográfico MT20; (b) Equipamento utilizado na leitura dos marcos; (c) Colaborador da empresa realizando a leitura.	60
Figura 4.4 - Identificação das bermas de aproximadamente 5m no talude.	60
Figura 4.5 – Seções com a topografia de 2010.	61
Figura 4.6 – Seção com a topografia de 2010.	62
Figura 5.1 – Planta do fundo do aterro Área 1.	65
Figura 5.2 – (a) Curva recalque vs. tempo para os marcos analisados; (b) Curva deformação vs. tempo. .	67
Figura 5.3 – Taxas de recalque medidas nos marcos superficiais.	68

Figura 5.4 – (a) Relação taxa de recalque vs. log do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto vs. tempo, com base em funções logarítmicas integradas da solução Yen e Scanlon (1975).....	70
Figura 5.5 – Relação recalque medido e previsto vs. Tempo, com base nas funções logarítmicas simples. 71	71
Figura 5.6 – (a) regressão para determinação da taxa de recalque inicial e recalque final; (b) curvas deformação versus tempo para valores observados e previstos com o modelo Hiperbólico.	73
Figura 5.7 – Relação entre a taxa de deformação inicial (ρ_0), a deformação última esperada (ϵ_{ult}) e a altura do maciço (H) a partir do Modelo Hiperbólico.....	74
Figura 5.8 – Curvas recalque vs. tempo para os valores medidos e previstos a partir de modelos baseados em funções de potência.....	76
Figura 5.9 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade de modelo baseado em funções de potência e a altura do maciço (H).....	77
Figura 5.10 – Curvas de recalque vs. tempo para valores medidos e previstos do Modelo Bjarngard e Edgers (1990).	78
Figura 5.11 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do Modelo de Bjarngard e Edgers (1990) e a altura do maciço (H).....	79
Figura 5.12 – Resultado gráfico da utilização do método Asaoka (dados trimestrais).....	82
Figura 5.13 – Resultado gráfico da utilização do método Asaoka para o MT16. (a) dados até 2008; (b) dados até 2009; (c) dados até 2010; (d) todos os dados.....	82
Figura 5.14 – Aplicação dos modelos analisados. Desvios médios para os recalques dos marcos superficiais.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Peso específico encontrado na literatura (CARVALHO, 2002).....	24
Tabela 2.2 – Peso específico dos resíduos sólidos urbanos (OWEIS, 1993).....	25
Tabela 2.3 – Recalques em maciços sanitários.	28
Tabela 4.1 – Resumo com as cotas, deslocamentos verticais e horizontais, do 1° e último monitoramentos.	59
Tabela 5.1 – Resumo dos parâmetros dos marcos analisados.	64
Tabela 5.2 – Coeficientes a e b obtidos no modelo de Yen e Scanlon (1975).	69
Tabela 5.3 – Aplicação do Modelo Hiperbólico – Marcos superficiais.	72
Tabela 5.4 – Resultado de aplicação do modelo baseado em funções de potência.	75
Tabela 5.5 – Resultado da aplicação de Bjarngard e Edgers.....	78
Tabela 5.6 – Resultados analíticos obtidos com a utilização do métodos Asaoka (1978).	81
Tabela 5.7 – Resultados analíticos obtidos com a utilização do método Asaoka (1978) para o marco MT16.	81

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	13
1.2 Estrutura da dissertação	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Resíduos sólidos urbanos (RSU).....	15
2.2 Aterros sanitários	16
2.2.1 Instalação de um aterro sanitário	21
2.2.2 Operação de aterros sanitários	22
2.3 Propriedades geotécnicas	26
2.3.1 Compressibilidade de resíduos sólidos urbanos.....	27
2.3.2 Mecanismos responsáveis pelos recalques em aterros de resíduos sólido urbanos.....	28
2.4 Modelos de previsão de recalques	32
2.4.1 Modelo de Sowers (1973).....	34
2.4.2 Modelo de Yen e Scanlon (1975)	35
2.4.3 Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998)	36
2.4.4 Modelo Exponencial de Creep (Potência)	38
2.4.5 Modelo de Bjarngard e Edgers (1990).....	38
2.4.6 Modelo Meruelo (1995).....	40
2.4.7 Modelo Observacional – Asaoka (1978)	41
2.4.8 Outros modelos de previsão de recalques	43
2.5 Considerações finais	44
3. ÁREA DE ESTUDO	46
4. METODOLOGIA	56
4.1 Investigação e Monitoramento de Campo	56
4.2 Modelos de previsão de recalques	63
4.3 Análise e comparação dos resultados.....	63
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	64
5.1 Modelo de Yen e Scanlon (1975)	68
5.2 Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998)	71
5.3 Edil et al. (1990)	75
5.4 Modelo de Bjarngard e Edgers (1990)	77
5.5 Método Observacional (Asaoka, 1978)	80
6. CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da indústria e o crescente consumismo levaram ao aumento da geração de resíduos, ocasionando a degradação do meio ambiente. Para minimizar esses efeitos, é necessário que a disposição dos resíduos seja realizada em locais adequados. A contaminação do ar, do solo e de recursos hídricos de regiões próximas aos depósitos de resíduos e conseqüentemente a diminuição da qualidade de vida das circunstantes populações, são alguns exemplos dos problemas gerados.

A reciclagem de alguns elementos, compostagem do material orgânico e a incineração em altas temperaturas são, atualmente, algumas das várias técnicas que buscam eliminar os resíduos sólidos. Porém, mesmo com tecnologias avançadas para eliminar os resíduos, apresentam-se restos não factíveis de serem eliminados, sendo necessário seu confinamento em aterros sanitários.

Portanto, já que essa etapa necessariamente deverá existir para receber aqueles resíduos que não foram reaproveitados, reciclados e/ou eliminados, a disposição passa a desempenhar papel importante.

Porém, o processo de expansão e adensamento urbano, aliado às restrições e preocupações ambientais e à crescente elevação das taxas de geração de resíduos sólidos tem limitado sobremaneira a viabilização de novos aterros sanitários. Apresenta-se então como importante fator o aumento da vida útil e o aproveitamento máximo da capacidade disponível de unidades existentes e/ou projetadas, pela utilização de métodos executivos e técnicas de melhoria que imprimam maiores densidades aos resíduos, dentro de patamares econômicos aceitáveis. Além da necessidade de um melhor entendimento do comportamento a médio e longo prazo destes maciços, assim como a resposta dos mesmos a distintas técnicas construtivas e operacionais, as quais isoladamente ou em conjunto possam gerar um aumento na vida útil e um melhor aproveitamento do espaço físico a eles destinado. A estes aspectos, deve ser acrescentada a importância para a recuperação e reaproveitamento de antigas áreas de disposição, as quais demandam o conhecimento das condições geomecânicas do maciço, assim como a previsão do seu comportamento futuro (MARQUES, 2001).

Os aterros devem possuir o acompanhamento e monitoramento adequados da disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU), para que se configurem como unidades de tratamento de resíduos que não causem danos ao meio ambiente (TAPAHUASCO, 2009). Devido aos mecanismos físicos, químicos e biológicos envolvidos e que influenciam diretamente sobre o comportamento geral do aterro, a disposição de resíduos em aterros requer uma série de critérios operacionais e geotécnicos bastante complexos. Os critérios que podem ser citados são: (a) formas de disposição (número de passadas do equipamento compactador, altura das camadas de resíduos, inclinação das rampas de aterragem); (b) composição dos resíduos; (c) tipo de material empregado e configuração das camadas de cobertura intermediárias e final; (d) tipo de material e configuração dos sistemas de drenagem interna de líquidos e gases e, (e) configuração do sistema de drenagem superficial, etc.

A eficiência da disposição de RSU contribuirá com a garantia de sua segurança, principalmente de sua estabilidade estrutural, por isso é importante conhecer os mecanismos que atuam sobre os aterros sanitários, bem como os parâmetros que os descrevem. Portanto, problemas envolvendo a deformabilidade de aterros sanitários são uma constante, porém de extrema complexidade. Este tema vem sendo abordado através de ensaios de campo e de laboratório, e de monitoramento de aterros sanitários.

Segundo Simões (2000) os resíduos sólidos urbanos apresentam grandes recalques iniciais, associados à aplicação de sobrecargas, seguidos de um processo de deformação lenta sob carga constante, resultante do comportamento viscoso do resíduo e perda de massa devido aos processos de decomposição.

Em resumo a magnitude e o longo tempo de duração dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos são um dos problemas mais importantes nestes tipos de estrutura. Diversos estudos e pesquisas têm sido desenvolvidos nos últimos anos para estimar os recalques futuros, com base em métodos teóricos ou empíricos. Autores como Carvalho (1999), Simões (2000), Marques (2001) entre outros, descrevem que a previsão de recalques mostra-se ainda como o mais importante subsídio para definição e garantia de integridade das camadas de cobertura e para otimização de usos de aterros sanitários.

1.1 Objetivos

O presente trabalho pretende contribuir para o estudo da compressibilidade dos maciços sanitários, por meio da previsão e monitoramento de recalques da Central de Resíduos do Recreio (CRR), em Minas do Leão/RS, aplicando modelos de previsão de recalques já existentes e verificando a previsão de comportamento através do monitoramento do comportamento real.

Para alcançar este objetivo será necessário aplicar alguns modelos de previsão de recalques e compará-los, a fim de verificar qual está mais adequado à realidade do aterro em questão. Os modelos utilizados nesta pesquisa foram:

- Modelo de Yen e Scanlon (1975)
- Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998)
- Modelo de Creep de Edil et al. (1990)
- Modelo de Bjarngard e Edgers (1990)
- Método Observacional (Asaoka, 1978)

1.2 Estrutura da dissertação

A dissertação está distribuída em 6 capítulos. O Capítulo 1, a Introdução, aborda a problemática da disposição de resíduos sólidos urbanos, inserindo-a em um contexto ambiental e geotécnico, apresenta os aspectos operacionais de aterros sanitários, justificando a necessidade do aprofundamento da pesquisa para o assunto e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2, a Revisão Bibliográfica, compreende o tema principal englobando os conceitos básicos, propriedades e estudos relacionados aos 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 de aterros sanitários, como formas de disposição, biodegradação e compressibilidade.

O Capítulo 3, área de estudo, descreve sua localização, seus principais procedimentos operacionais e mão de obra, entre outras características da empresa.

O Capítulo 4 descreve a metodologia apresentada neste trabalho, através de procedimentos e formas utilizadas nas análises dos dados levantados.

A apresentação e análise dos resultados, incluindo a avaliação de desempenho dos diversos modelos discutidos na revisão bibliográfica, e com base nos dados observados ao longo do monitoramento do aterro sanitário são apresentados no Capítulo 5.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões acerca dos aspectos mais importantes abordados na pesquisa, bem como sugestões para pesquisa futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais temas que englobam a gestão de resíduos, definições, a disposição de RSU na forma de aterros sanitários, operação de aterros sanitários, fatores que influenciam na disposição e localização do empreendimento.

2.1 Resíduos sólidos urbanos (RSU)

Os resíduos sólidos urbanos compreendem apenas as parcelas geradas nos domicílios (resíduo sólido domiciliar), nas repartições comerciais públicas e privadas, nas lojas e armazéns em geral, restaurantes, lanchonetes e similares (resíduo sólido comercial) e na limpeza de ruas, avenidas, praças, parques, jardins e demais locais públicos (resíduo sólido de limpeza pública).

Para Dantas (2007), os resíduos sólidos podem ser classificados como materiais heterogêneos (inertes, minerais e orgânicos), resultantes das atividades diárias do ser humano e da natureza, podendo ser parcialmente utilizados gerando economia ambiental e proteção à saúde pública.

De acordo com Cassini (2003), os resíduos sólidos urbanos são constituídos basicamente por matéria orgânica putrescível, papel/papelão, podas de árvores e gramados, plásticos, vidro, material metálico ferroso e não ferroso, ossos e demais tipos de resíduos muitas vezes denominados de material inerte, dependendo dos critérios de caracterização física ou gravimétrica. Ainda segundo Cassini (2003), pode-se afirmar que a origem e as características dos resíduos sólidos urbanos estão condicionadas a fatores climáticos da região de origem e à densidade populacional e suas condições sociais e econômicas.

Segundo Oliveira et al. (1998), os resíduos sólidos são resíduos que resultam de atividades humanas e que são lançados no ambiente. O termo lixo é usado para definir resíduos sólidos, porém a palavra lixo significa coisa imprestável, o que não é o caso dos resíduos sólidos, pois, a maioria, é material reaproveitável, com um potencial econômico agregado respeitável.

Os “3R” – Reduzir, Reutilizar e Reciclar, atualmente, preconizam a gestão integrada de resíduos. O gerenciamento integrado está relacionado ao conceito de uma atuação sistemática, abrangente e integrada 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.

A destinação final é, dentre as dificuldades que se apresentam ao gerenciamento integrado dos RSU, a questão que adquire maior importância. A carência de recursos técnicos, financeiros e humanos é uma realidade no país e os problemas de ordem técnica e operacional decorrentes dificultam sobremaneira a implementação de sistemas de gerenciamento integrado de RSU por parte dos municípios. A questão foi praticamente ignorada pelas administrações municipais durante muitos anos. Quase invariavelmente, os RSU em todo país 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 e das águas superficiais e subterrâneas, além de problemas sociais relacionados a pessoas que passaram a viver em função do resíduo depositado nesses locais.

Os aterros sanitários consolidaram-se como a alternativa mais viável no país, técnica e economicamente, para a destinação final ambientalmente segura dos RSU.

2.2 Aterros sanitários

Segundo NBR 8419 (1992), aterros sanitários constituem uma forma de disposição de resíduos no solo que, fundamentada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite o confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública, minimizando os impactos ambientais.

Segundo D’Almeida e Vilhena (2000), o processo de aterramento do resíduo é executado sob uma das três formas tradicionalmente empregadas: método da trincheira ou vala, método da rampa e método da área.

- método da trincheira ou vala: consiste na abertura de valas, onde o resíduo é disposto, compactado e posteriormente coberto com solo. A operação em vala pode

ser manual (pequena) ou permitindo a entrada de equipamentos maiores em seu interior (grande dimensão) (Figura 2.1);

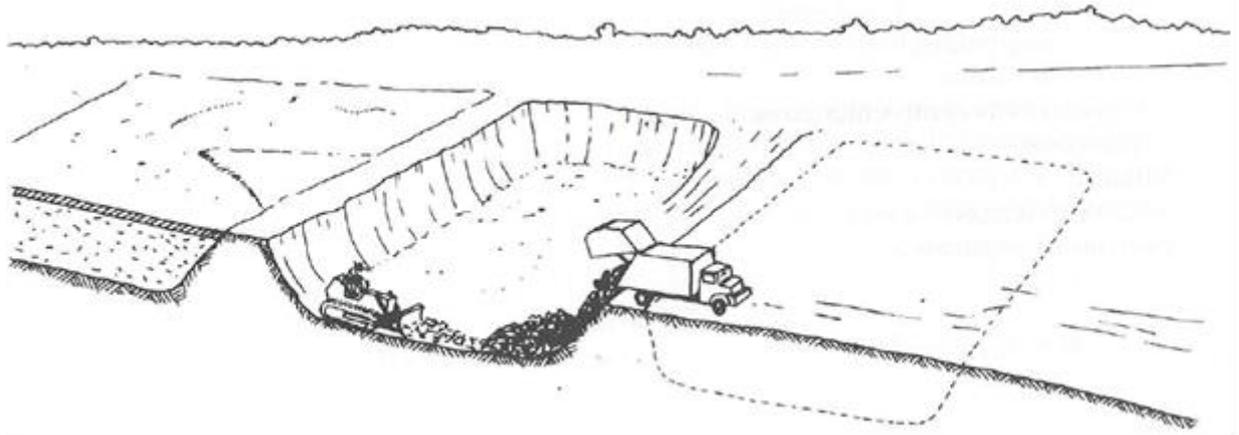


Figura 2.1 – Exemplo do método da trincheira (IPT, 1998).

- método da rampa: esse método também é conhecido como da escavação progressiva e é fundamentado na escavação da rampa, onde o resíduo é disposto e compactado pelo trator e posteriormente coberto com solo. É executado em áreas de meia encosta, onde o solo natural ofereça boas condições para ser escavado e, de preferência, possa ser utilizado como material de cobertura (Figura 2.2);

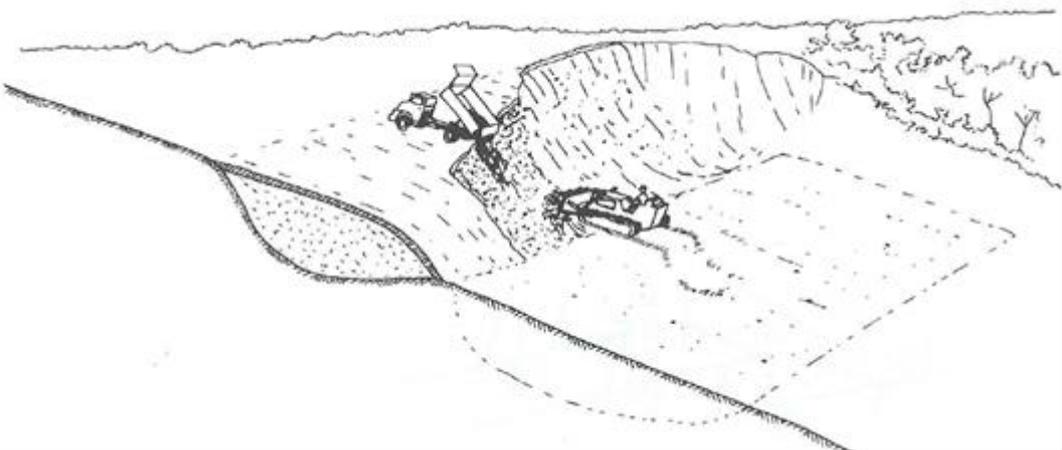


Figura 2.2 – Exemplo do método da rampa (IPT, 1998).

- método da área: é empregado geralmente nos locais onde a topografia é plana e o lençol freático raso (Figura 2.3).

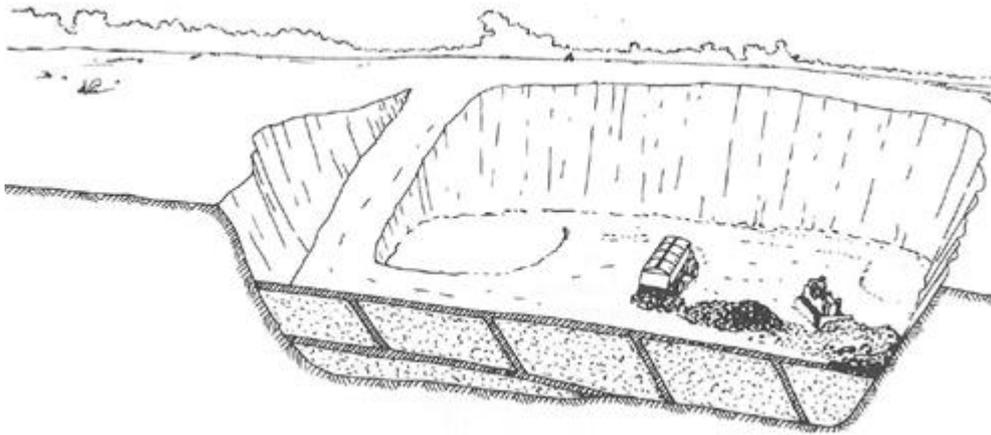


Figura 2.3 – Exemplo do método da área (IPT, 1998).

Os aterros controlados e os lixões ou vazadouros são as outras formas mais comuns de disposição de RSU. Nos aterros controlados os resíduos são cobertos com solo e eventualmente compactados, porém sem impermeabilização, drenagem e tratamento de chorume e gases. Os lixões são descargas a céu aberto, sem quaisquer medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública.

Segundo Jucá (2004), a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB 2000) indicou uma situação exageradamente favorável no que se refere à quantidade de resíduo vazado nas unidades de destinação final, pois aproximadamente 73,2% de todo resíduo coletado no Brasil estaria tendo um destino final adequado, em aterros sanitários ou controlados. Porém, quando se analisam as informações tomando-se por base o número de municípios, o resultado já não é tão favorável, pois 63,1% deles informam que depositam seus resíduos em lixões e apenas 13,7% declaram que possuem aterros sanitários. A Figura 2.4 apresenta a evolução da destinação final dos resíduos no Brasil, enquanto que as Figuras 2.5 e 2.6 apresentam a destinação final dos resíduos sólidos no Brasil, considerando o percentual por quantidade (em peso) dos resíduos e o percentual pelo número de municípios, respectivamente.

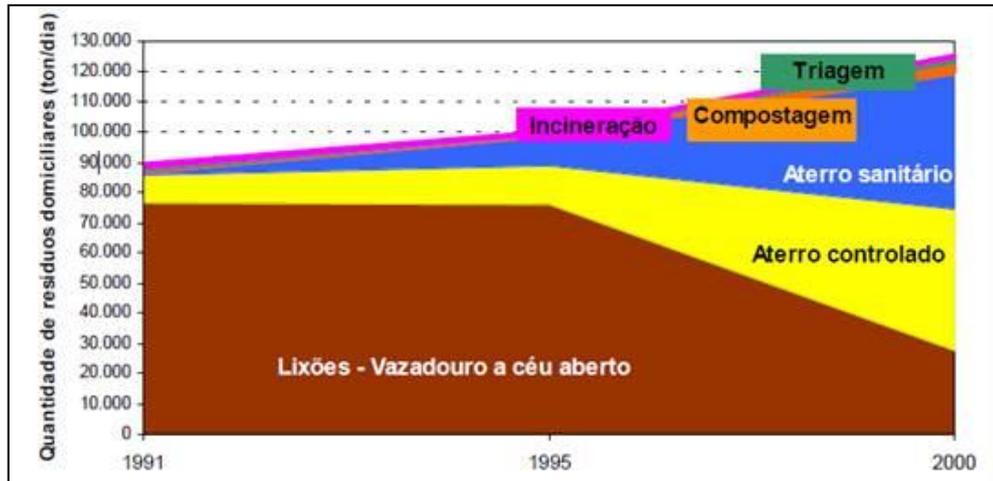


Figura 2.4 – Evolução da destinação final dos resíduos no Brasil (JUCÁ, 2001).



Figura 2.5 – Destinação final dos resíduos em peso (JUCÁ, 2001).

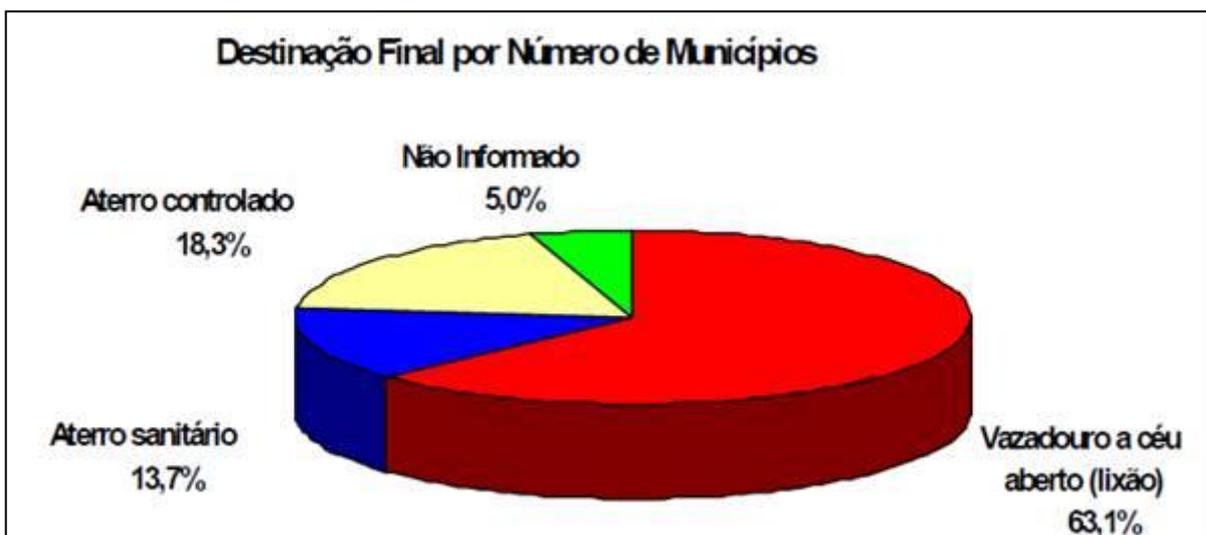


Figura 2.6 – Destinação final dos resíduos por número de municípios (JUCÁ, 2001).

Segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2008), aproximadamente 88% de todos resíduos coletados no país em 1989 eram dispostos em lixões, 10% em aterros controlados e 1% em aterros sanitários. Em 2000, a quantidade de resíduos dispostos em lixões caiu para 72%. No mesmo ano, aproximadamente 22% dos resíduos eram destinados em aterros controlados e 17% em aterros sanitários. Em 2008, os lixões ainda são o destino final de 50% dos resíduos sólidos, mas em contrapartida a disposição em aterros sanitários subiu para 27,7%.

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

Segundo Boscov e Abreu (2000), o conceito de aterro sanitário compreende um sistema devidamente preparado para a disposição dos resíduos sólidos urbanos, englobando, sempre que necessário determinados componentes e práticas operacionais, tais como: divisão de células, compactação dos resíduos, cobertura, sistema de impermeabilização, sistema de drenagem para líquidos e gases, tratamento de chorume, monitoramento geotécnico e ambiental, entre outros. Portanto, o termo aterro de resíduos refere-se à instalação completa e às atividades que nela se processam; ou seja, inclui o local, a massa de resíduos, as estruturas pertinentes e os sistemas de implantação, operação e monitoramento.

Ainda segundo Boscov e Abreu (2000), aterros sanitários são obras recentes no campo de Geotecnia e apresentam uma particularidade: a própria obra constitui o empreendimento. Enquanto nas obras de engenharia convencionais é necessário o término da obra para o desempenho de suas funções, em aterros sanitários o empreendimento e a obra se confundem, e o término da obra corresponde ao término de sua função.

Levando-se em consideração o volume de resíduos produzidos e a necessidade de áreas cada vez maiores para a disposição adequada dos mesmos, o estudo de metodologias para o projeto, implantação, operação e monitoramento de sistemas de disposição de RSU tem uma relevância extraordinária atualmente.

O conhecimento das questões relativas à caracterização, compactação, permeabilidade, resistência ao cisalhamento e compressibilidade dos RSU é de fundamental importância para a previsão do comportamento real dos maciços sanitários, permitindo estimar com precisão a vida útil dos aterros e a estabilidade dos maciços sanitários.

2.2.1 Instalação de um aterro sanitário

Tapahuasco (2009) listou o que considera os componentes básicos de projeto para instalação de um aterro sanitário.

a) sistema de tratamento do fundo da base do aterro: camadas de solo compactado (Compacted Clay Liner ou CCL), geossintéticos (geomembranas – GM, ou geocomposto argiloso para barreira impermeável – GCL) ou, mais usualmente uma combinação destas (BOSCOV, 2008) são usadas com a função 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: geralmente o sistema de drenagem de percolado consiste em uma camada de material granular de alta permeabilidade, como brita, protegida por uma camada de filtração, geralmente de areia ou geotêxtil. Uma tubulação perfurada, de material física e quimicamente resistente ao tipo de resíduo disposto, como por exemplo, PEAD (polietileno de alta resistência), é colocada dentro da camada de material granular. As tubulações conduzem o percolado a um reservatório, de onde é removido por bombeamento para tratamento. A função do sistema de drenos é coletar e conduzir líquidos percolados através de drenos, de tal forma a reduzir as pressões atuantes dos líquidos na massa dos resíduos aterrados.

c) sistema de drenagem de gases: 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: tem como função proteger a superfície dos resíduos dispostos nas células de aterros sanitários e consiste na aplicação de solo fino (preferencialmente material inerte) sobre os resíduos,

minimizando assim os impactos ao meio ambiente, visando a eliminação de vetores contaminadores, a diminuição da taxa de formação de percolados, a redução de odores e permitir o tráfego de veículos coletores sobre o aterro, entre outros. A cobertura diária é realizada com solo inerte de 0,15 a 0,30m ao término de cada jornada ou etapa de operação. Quando terminada a etapa de operação do aterro, deve ser aplicada a cobertura definitiva, que tem como função impedir a infiltração de água de chuvas e evitar a migração dos fluidos dos resíduos ao exterior do aterro. Pode estar constituído por uma série de camadas de solo juntamente com materiais geossintéticos e apresenta espessura entre 0,40 a 0,60m.

2.2.2 Operação de aterros sanitários

A operação de aterros sanitários se dá pela compactação dos resíduos sólidos, espessura das camadas, tipos de equipamentos compactadores e pelas condições do resíduo.

Compactação de resíduos sólidos urbanos

A compactação dos RSU pode se destacar como o principal parâmetro a ser controlado dentre os aspectos operacionais que envolvem a operação dos aterros sanitários, dada a sua importância, tanto no que se refere à otimização da disposição, quanto da melhoria de propriedades geomecânicas de resíduos. A compactação depende de inúmeros fatores, dentre eles: a espessura da camada de resíduos; tipo, peso e número de passadas do equipamento compactador, inclinação da rampa de compactação; sentido de compactação; composição e umidade dos RSU (BOSCOV e ABREU, 2000; SAVAGE et al., 1998; e CATERPILLAR, 2001).

A compactação de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários provoca a redução de volume que a massa de resíduos pode sofrer quando submetida a uma determinada pressão, geralmente aplicada por meio do emprego de equipamentos mecânicos, aumentando a estabilidade dos resíduos. A constante deposição de camadas sobrepostas de resíduos e o processo de decomposição da matéria orgânica ao longo do tempo acabam por promover uma redução volumétrica do aterro e altera o seu comportamento geotécnico, principalmente em relação à sua

estabilidade e aos possíveis recalques. Portanto, uma boa compactação garante, também, aos maciços de um aterro sanitário, condições estruturais e de estabilidade (CATAPRETA et al., 2003).

As vantagens de uma boa compactação são caracterizadas por: aumento da vida útil dos aterros sanitários, redução da migração de gases e líquidos lixiviados, aumento da estabilidade do maciço de resíduos, a possibilidade de tráfego imediato de veículos sobre o maciço e melhorias no aspecto estético da massa de resíduos aterrada.

Marques et al. (2002) realizaram uma avaliação da compactação de resíduos sólidos urbanos, a partir de ensaios *in situ* e monitoração e controle de um aterro experimental. Destacando que a compactação foi realizada com dois equipamentos distintos, fazendo variar parâmetros construtivos relacionados à espessura das camadas, número de passadas e à inclinação do plano de compactação.

Tchobanoglous et al (1993) citam que a densidade inicial dos RSU dispostos em um aterro sanitário varia com o modo de operação e deposição, a facilidade de se compactar cada componente da massa de resíduos e a porcentagem de cada um destes componentes.

O peso específico dos RSU depende principalmente da composição gravimétrica (elevados teores de materiais leves ou putrescíveis acarretam menor peso específico), da distribuição granulométrica (resíduos triturados podem formar arranjos mais densos do que resíduos *in natura*) e do grau de compactação (resíduos compactados são mais densos do que resíduos soltos). A espessura da camada de cobertura diária também influencia a densidade dos RSU, pois se trata da aplicação de uma sobrecarga.

Gomes et al. (1997) relatam que o peso específico médio dos resíduos soltos varia entre 1,0 e 3,0 kN/m³ e que após serem compactados pode variar de 7,0 a 9,0 kN/m³. Em função dos processos físicos e biológicos que ocorrem em um aterro sanitário, pode-se chegar, com o tempo, a valores de 10,0 a 13,0 kN/m³.

Segundo Fakher (2006), a compactação de resíduos não tem sido bem estudada. Devido a sua heterogeneidade, os resíduos podem ser altamente compactados e seu peso específico ser aumentado em até 30%. Segundo o autor, o peso específico dos RSU não compactados varia entre 2,5 kN/m³ e 4,0 kN/m³, e compactado variando entre 4,5 kN/m³ e 8,5 kN/m³.

Na literatura encontram-se valores de peso específico de resíduos tão baixos quanto $1,2 \text{ kN/m}^3$, em aterros mal compactados e com muito plástico, até valores de $17,0 \text{ kN/m}^3$ em aterros muito compactados (CARVALHO, 1999; SANTOS, 1997).

Nas Tabelas 2.1 e 2.2 são apresentados diversos valores de peso específico dos RSU descritos por alguns autores. Deve-se, portanto, levar em consideração que os diferentes pesos específicos encontrados provavelmente se devem à utilização de distintas metodologias e tipos de resíduos.

Tabela 2.1 – Peso específico encontrado na literatura (CARVALHO, 2002).

Autor (ano)	Peso específico (kN/m³)	Observações
Sowers (1968)	8,0 – 12,0	Compactados
Sowers (1973)	1,2 – 3,0	Antes da compactação
	6,0	Após compactação
Rao (1974)	1,5 – 2,0	Sem compactação
	3,5 – 6,0	Fraca compactação
Bratley et al.	1,16	Sem compactação
	7,0 – 13,1	Compactados
Cartier e Balt (1983)	11,0 – 14,5	Compactados
	10,0	Após compactação
Oliden (1987)	7,5 – 8,5	Pré-carregado
	5,51 – 7,1	Antes da decomposição
Oweis e Khera (1990)	6,3	Origem industrial e doméstica
	4,6 – 17,3	Misturado
Oweis e Khera (1990)	2,8 – 3,1	Municipal sem compactação
	4,7 – 6,3	Municipal moderadamente compactado
Arroyo et al. (1990)	10,0	Compactado
Landva e Clark (1990)	7,0 – 14,0	
Van Impe (1993/1994)	10,0	Resíduos sólidos municipais densificados
	9,3	Máximo peso específico seco (w=31%)
Gabr e Valero	8,0	Saturação completa (w=70%)
	12,0	Com volume ar nulo (w=31%)

Espessura da camada de resíduos

Um fator de grande importância para se obter um maior peso específico é a espessura da camada de resíduos. Os resíduos devem ser espalhados em camadas de não mais do que 0,60m. Quanto mais espessa for a camada, menor será a eficiência da compactação (CATAPRETA, 2008). Em trabalho experimental Marques et al. (2002) verificaram que a energia de compactação imposta às camadas compactadas, em termos do número de passadas do equipamento e da espessura das camadas, apresenta uma menor influência no valor do peso específico.

Tabela 2.2 – Peso específico dos resíduos sólidos urbanos (OWEIS, 1993).

Forma dos resíduos sólidos urbanos (RSU)	Peso específico (kN/m³)
RSU – Compactação boa a excelente	4,7 – 6,3
RSU – Compactação moderada a boa	8,6 – 9,4
RSU – Fardo de lixo	8,6 – 14,1
RSU – Aterro com líquido percolado	6,6
RSU – Aterro antigo	9,7
RSU – Ensaio em poço	8,9 – 16,2
RSU – Após recalque e degradação	9,9 – 11,0
Resíduo de incinerador	7,2 – 12,7
Resíduos de incinerador (compactado na $\rho_{dm\acute{a}x}$, W_{ot})	13,5
Resíduos de incinerador recente e antigo (<i>in situ</i>)	14,9 – 16,6
Pedaço de madeira (seca)	2,3
Pedaço de madeira (com 64% de umidade)	3,8
Composto de folha	2,6
Compostagem (40% de umidade)	5,2
Produto final	3,5

Tipo, peso do equipamento compactador e número de passadas

A compactação dos resíduos é influenciada diretamente pelo tipo e peso dos equipamentos empregados. O equipamento mais empregado no Brasil é o trator de esteiras com lâmina, que tem se mostrado adequado. Aterros em países avançados utilizam outros equipamentos compactadores que não tem esteiras, como os de rodas metálicas com gomos.

Segundo Savage et al. (1998), usualmente são realizadas de 4 a 6 passadas com equipamentos pesados de rodas que promovam 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.

Inclinações da rampa e sentido da compactação

Outro aspecto operacional importante é a adequada inclinação das rampas de compactação de RSU. Tem sido indicada pela literatura como adequada a inclinação da rampa na ordem de 1V:3H.

Deve-se trabalhar no sentido ascendente para se conseguir uma boa compactação com os equipamentos normalmente utilizados (tratores de esteiras). Para Luz (1976), essa operação permite impor uma distribuição de cargas na base das esteiras, propiciando uma concentração do peso do equipamento na parte traseira do sistema esteiras, fazendo com que o volume de resíduos seja reduzido

de forma mais eficiente e garantindo desempenho e produção adequados, compatível com a velocidade de descarga de resíduos.

Umidade dos resíduos sólidos urbanos

Segundo a Caterpillar (2001), a umidade ideal para uma melhor compactação é de aproximadamente 10%. Testes de campo mostram que, dependendo da época do ano, dos procedimentos de coleta e da composição dos resíduos, o teor de umidade varia de 10 a 80%.

Para Boscov e Abreu (2000), a compactação em aterros brasileiros é geralmente feita com a utilização de tratores de esteira, em rampas com inclinação 1V:2,5H a 1V:3H, espessura de camadas de 40 a 60 cm e 4 a 6 passadas, 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.

Nos estudos desenvolvidos em um aterro experimental, Marques et al. (2002), concluíram que a relação entre o teor de umidade e o peso específico seco obtido para os resíduos sólidos urbanos caracteriza-se pela redução do peso específico seco com o aumento da umidade.

2.3 Propriedades geotécnicas

Destacam-se entre as propriedades geotécnicas mais relevantes para estudos em aterros sanitários a permeabilidade, resistência ao cisalhamento, compactação e compressibilidade e previsão de recalques.

Segundo Boscov (2008) a permeabilidade dos resíduos sólidos urbanos influencia diretamente a eficiência do sistema de drenagem interna do maciço. Vários autores determinaram esta propriedade em ensaios in situ com diversas técnicas diferentes (LANDVA e CLARK, 1990; MARIANO e JUCÁ, 1998; CARVALHO, 1999).

A resistência ao cisalhamento de maciços de resíduos sólidos urbanos, segundo Boscov (2008), esta associada a um ângulo de atrito interno e uma coesão, definidos a partir da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb. Estes valores são

estimados por dados bibliográficos, retroanálise de rupturas e por ensaios de campo e laboratório. Entre os vários trabalhos apresentados na literatura técnica destacam-se as pesquisas de Landva e Clark (1990), Gabr e Valero (1995), Vilar et al. (2006) e Calle et al. (2009).

A estimativa dos recalques e das velocidades (taxa de deformação) dos maciços de aterros sanitários é muito relevante para determinar a vida útil do aterro, o reaproveitamento das áreas após o encerramento da operação, o projeto e a implantação dos sistemas de drenagem superficial e de efluentes, o monitoramento geotécnico do aterro e o desempenho do sistema de cobertura final (ABREU, 2000; BOSCOV, 2008). Portanto, esta propriedade será melhor detalhada a seguir.

Os mesmos autores apresentam uma discussão sob o ponto de vista de vida útil dos aterros sanitários, estimativas mais realistas devem necessariamente contemplar o volume adicional ganho com os recalques dos resíduos. Com relação aos sistemas de drenagem superficial e percolado, recalques diferenciais podem provocar inversão de declividades e com isso problemas de drenagem de águas de chuva na superfície e de percolado no interior do aterro. Sobre a estabilidade do maciço sanitário, serve como o subsídio à avaliação da estabilidade. Por sua vez, o desempenho do sistema de cobertura final pode ser comprometido por trincas devido a recalques diferenciais. Finalmente, a previsão e monitoramento de recalques podem ser utilizados na avaliação de possibilidades de reaproveitamento das áreas de disposição após o seu encerramento.

2.3.1 Compressibilidade de resíduos sólidos urbanos

Devido ao aumento do número de aterros sanitários e à necessidade de conhecimento do comportamento mecânico dos resíduos, a ocorrência de recalques dessas unidades tem sido bastante investigada (CATAPRETA, 2008).

Porém, ainda observa-se uma ausência significativa de dados sobre o desempenho de aterros sanitários brasileiros, principalmente devido à não realização de um acompanhamento sistemático dessas obras, através de instrumentação adequada.

Segundo Mariano e Jucá (2000), os resíduos dispostos em um aterro sofrem grandes recalques, com os quais seu volume diminui e sua capacidade de

armazenamento aumenta, estando aí uma das principais causas de se quantificar os recalques. Além de definir a fase do processo de estabilização e com isto determinar sobre-alturas de resíduo a serem dispostas, determinando assim, a real capacidade de armazenamento do aterro.

Para Wall e Zeiss (1995), estimativas de recalques totais de aterros sanitários variam de 25 a 50%. Segundo Ling et al. (1998), os recalques finais em um aterro sanitário podem ser 30 a 40% da altura inicial, ao longo da sua vida útil.

Os recalques de maciços sanitários são muito elevados quando comparados com os maciços de solos (BOSCOV, 2008). Alguns valores relatados de recalques em relação à espessura total inicial (deformação) dos aterros sanitários são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – 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.

2.3.2 Mecanismos responsáveis pelos recalques em aterros de resíduos sólido urbanos

Segundo Simões (2000) a identificação dos mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento de recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos é de extrema importância para interpretação do comportamento, proposição de modelos de previsão e realização de simulações.

Os primeiros estudos sobre os mecanismos de recalque e da compressibilidade de resíduos urbanos teve seu início com trabalho de Sowers (1973). Segundo este autor os mecanismos causadores de recalques em aterros sanitários seriam os seguintes: (a) solicitação mecânica; (b) erosão e ravinamento

interno; (c) alterações físico-químicas; (d) biodegradabilidade; (e) interações entre mecanismos; e (f) dissipação de pressões neutras de líquidos e gases.

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 microrganismos, transferindo massa da fase sólida para as fases 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).

Os resíduos sólidos urbanos, assim como os solos, são meios multifásicos constituídos de elementos sólidos, líquidos e gasosos, mas de comportamento e constituição distintos (GRISOLIA e NAPOLEONI, 1996; SIMÕES, 2000). Na fase sólida podem ser identificadas três categorias de materiais: (a) elementos inertes estáveis (metais, vidro, entulho); (b) elementos muito deformáveis (papéis, plásticos e têxteis); (c) elementos biodegradáveis.

A presença e o fluxo dos líquidos modificam as propriedades das partículas sólidas, gerando comportamentos reológicos diferentes. Como os resíduos apresentam componentes de elevada porosidade, que absorvem grandes volumes de fluidos, podem causar mudanças no seu estado físico e nas suas propriedades. Quando atinge o limite da capacidade de absorção, estes elementos se encontram saturados e, a partir daí se observa o início da formação de chorume, os gases presentes durante a disposição inicial dos resíduos e os gases gerados durante o processo de decomposição de matéria orgânica (SIMÕES, 2000). Portanto, conclui-se que são muitos e complexos os mecanismos que governam a evolução dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos.

De acordo com Sowers (1973) e Coumoulos e Koryalos (1997), os principais fatores que afetam estes mecanismos incluem a composição dos resíduos, o pré-tratamento recebido, o peso específico inicial, a compactação, a saturação, o tamanho e o modo de operação do aterro, a velocidade de disposição, a eficiência dos sistemas de drenagem superficial, de gases e de percolado, a oscilação do nível

de percolado no interior do aterro, as condições do meio, como acidez, temperatura e umidade, e as condições biológicas.

Liu et al. (2006), citam que os recalques em aterros podem ser atribuídos à compressão mecânica e decomposição biológica dos sólidos. Segundo Hossain et al. (2003), com o avanço da decomposição dos resíduos, as propriedades de compressibilidade e subsequentemente as taxas e a magnitude dos recalques também mudam.

Simões (2000) e Simões e Catapreta (2010) apresentam que os principais fatores que influenciam as magnitudes de recalques em aterros sanitários são:

- composição dos resíduos e porcentagem de material degradável;
- peso específico e índice de vazios dos resíduos;
- dimensões do aterro;
- técnicas de compactação;
- histórias de tensões, envolvendo todas as etapas de operação e após fechamento;
- pré-tratamento dos resíduos (incineração, compostagem, mistura, fragmentação, etc.);
- nível de chorume e sua flutuação;
- existência de sistemas de extração de gases;
- fatores ambientais, tais como teor de umidade, temperatura e gases (presentes ou gerados no interior da massa).

Pode-se acrescentar aos fatores apresentados, segundo Quian et al. (2002), o método da operação do aterro, com ou sem recirculação de líquidos lixiviados. Nos aterros com recirculação de líquidos lixiviados, a ocorrência de recalques pode ser mais significativa, devido a aceleração da decomposição de alguns resíduos ocasionada pela reintrodução desses líquidos no interior do aterro.

Wall e Zeiss (1995), dentre vários outros autores, caracterizam o recalque dos aterros sanitários como um processo de três fases: (a) compressão inicial, (b) compressão primária e (c) compressão secundária. A compressão inicial corresponde à deformação ocorrida quando um carregamento externo é aplicado ao aterro. Essa deformação está geralmente associada a uma redução dos vazios e dos tamanhos das partículas, ocorrendo instantaneamente, de forma análoga à compressão elástica que ocorre em solos. Esta proposta de subdivisão dos

mecanismos de recalque é comparável com a curva teórica de compressibilidade proposta por Grisolia e Napoleoni (1996), conforme representado na Figura 2.7 (CARVALHO, 1999).

Segundo Sowers (1973), a compressão primária ocorre rapidamente, geralmente após 30 dias da aplicação do carregamento e corresponde ao recalque devido à dissipação de pressões neutras de líquidos percolados e gases. A diferença com relação ao processo de adensamento primário em solos está na saturação do meio. Em aterros sanitários, dificilmente o meio se encontra saturado. Além disso, a literatura estrangeira considera que, devido à permeabilidade relativamente elevada, é improvável o desenvolvimento de pressões neutras em aterros sanitários. Segundo Boscov e Abreu (2000), isso não é necessariamente verdadeiro para resíduos sólidos urbanos nacionais.

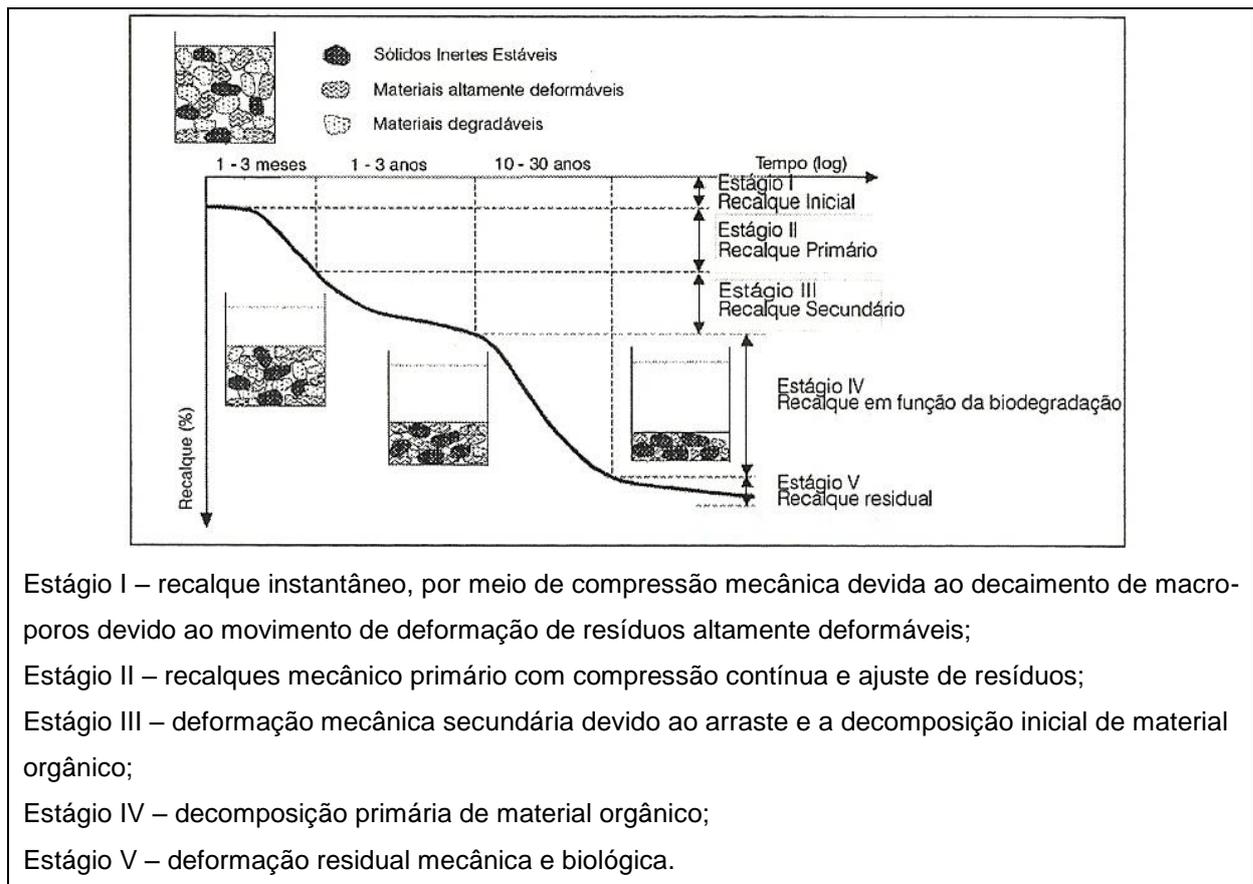


Figura 2.7 – Estágios de tempo-recalque típicos para um aterro de resíduos sólidos.

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 maior parcela dos recalques que ocorrem em aterros de RSU é devido à compressão secundária, podendo atingir 25% da espessura total do maciço. O processo é lento e pode durar décadas.

Vários autores comentam que a caracterização dos recalques em três fases, como ocorre em solos, é questionável pelo fato de que não se pode afirmar que as fases são independentes, pelo contrário, provavelmente elas se sobrepõem.

Segundo Coduto e Huitric (1990), os mecanismos de recalque ocorrem de forma associada ao processo de recalque, de tal maneira que os mecanismos de recalque se confundem com as fases de ocorrência dos recalques. As fases seriam: (a) compactação, correspondente ao mecanismo de sollicitação mecânica; (b) adensamento, correspondente ao mecanismo de dissipação de pressões neutras; e (c) contração, correspondente ao mecanismo de “perda de sólidos” – biodegradação e alterações físico-químicas.

2.4 Modelos de previsão de recalques

Segundo Abreu (2000), não há um modelo aplicável que considere todas as variáveis envolvidas no processo de recalque de resíduos sólidos urbanos. Obviamente, são necessárias algumas simplificações que devem ser incorporadas de alguma forma nos modelos de previsão de recalques. Estes, por sua vez, podem ser empíricos ou teóricos, dependendo da forma de abordagem do problema adotada.

O Comitê Técnico (*Environmental geotechnics*) da International Society for Soil Mechanics and Foundating Engineering (ISSMFE, 1997) recomenda que um bom modelo de previsão de recalques para os maciços sanitários deve, de forma obrigatória: a) ser dimensionalmente correto; b) ser definido a partir de um pequeno número de parâmetros; c) os parâmetros devem possuir significado físico, ou ao menos estarem relacionados a algumas propriedades conhecidas; d) ser capaz de separar a influência dos fatores relevantes na análise; e) fornecer revisões realistas e precisas, tanto quanto possível, em longo prazo.

Existem vários modelos para a previsão de recalques em aterros sanitários, desde modelos puramente teóricos, até aqueles que se resumem ao ajuste de curvas quando já existe algum histórico de recalques. Entretanto, também são vários

os problemas associados à interpretação e a utilização de modelo. Segundo Boscov e Abreu (2000), os principais modelos de previsão de recalques em aterros sanitários disponíveis atualmente são os seguintes:

- Modelo Clássico;
- Modelo de Sowers;
- Modelo Logarítmico de Yen e Scanlon;
- Modelo da Equação de Atenuação (Coumoulos e Koryalos);
- Modelo de Meruelo;
- Modelo Hiperbólico de Ling et al.;
- Modelo Matemático de Zimmerman.
- Modelo das Isotacas (ou Modelo ABC);
- Modelo Reológico de Gibson e Lo;
- Modelo da Lei de Creep;
- Modelos Exponenciais Empíricos.

Os mesmos autores colocam que a previsão de recalques de aterros sanitários pode ser realizada fundamentalmente em dois momentos distintos: durante o projeto ou durante a operação. No primeiro caso não se dispõe de dados de recalque, o que dificulta bastante a previsão. Esta é realizada através de estudos paramétricos a partir de dados dos valores dos parâmetros de interesse disponíveis na bibliografia internacional (KOCKEL et al., 1997) e nacional (KAIMOTO et al., 1999). Estes dados apresentam faixas de variação muito amplas, resultando em estimativas pouco precisas de recalques na situação projeto. No segundo caso, a previsão de recalques baseia-se em dados reais obtidos em campo a partir de instrumentação ou levantamentos topográficos.

As principais vertentes da modelagem de desenvolvimento de recalques em maciços sanitários são: aplicar modelos de previsão de recalques de solos, com as devidas adaptações; elaborar modelos que tentem reproduzir os mecanismos relevantes para os RSU, e formular modelos empíricos, que são ajustes de curvas com equações conhecidas a séries históricas de dados.

Dos modelos teóricos que tentam representar os mecanismos de recalque relevantes para RSU, o Modelo Matemático de Zimmerman et al. (1977) apud Boscov e Abreu (2000) talvez seja o que mais fielmente expressa todos os

mecanismos envolvidos; possui, entretanto, um grande número de parâmetros, alguns de difícil obtenção, o que limita sua aplicação na prática.

Segundo Boscov e Abreu (2000) e Boscov (2008) os modelos logarítmicos de Yen e Scanlon (1975), de Gandolla et al.(1994), das Isotacas ou ABC (Van Meerten et al., 1995), de Atenuação Coumoulos e Koryalos, (1997), Hiperbólico de Ling et al. (1998), entre outros, podem ser citados como modelos empíricos. A principal vantagem dos modelos empíricos é a simplicidade e a principal desvantagem é a impossibilidade de previsão de recalques em projeto, pois é necessária uma boa quantidade inicial de dados de recalque para ajustar o modelo.

2.4.1 Modelo de Sowers (1973)

Segundo Melo (2003) a maioria das investigações sobre a compressibilidade em resíduos sólidos é baseada no modelo proposto por Sowers (1973), que estabelece um paralelismo entre os recalques produzidos por incremento de cargas em aterros de solos e em aterros de resíduos. Este modelo considera a compressão inicial ou imediata; compressão primária e compressão secundária. O recalque final é a soma das parcelas, calculadas com base nas expressões da Teoria Clássica de Adensamento de solos. A Compressão inicial ou imediata tem sido desconsiderada na maioria dos modelos apresentados na literatura, devido a dificuldade de obtenção do parâmetro necessário à sua avaliação (SIMÕES, 2000). A compressão primária devido a drenagem dos fluidos existentes no interior dos aterros após aplicação das cargas pode ser obtido pela Equação 2.1.

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

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.

Em decorrência da degradação física, química e biológica dos resíduos sólidos urbanos, desenvolve-se a compressão secundária, conforme apresentado na Equação 2.2.

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

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.

A partir de dados de monitoramento de aterros de resíduos, Sowers (1973) conclui que se a temperatura, umidade e pH (fatores que influenciam a degradação) permanecem constantes, a relação recalque-tempo (log) é aproximadamente linear. Esta hipótese está apresentada na expressão da Eq. 2.2. Tapahuasco (2009) comenta que o modelo como foi desenvolvido baseado na teoria de Terzaghi, considera válida a lei de Darcy e adota algumas hipóteses simplificadoras, que nem sempre representam satisfatoriamente o comportamento dos resíduos sólidos urbanos.

2.4.2 Modelo de Yen e Scanlon (1975)

Yen e Scanlon (1975), a partir da compilação de resultados obtidos em 9 anos de monitoramento em três aterros, apresentaram um modelo empírico para a determinação da velocidade de recalques. Segundo os autores a taxa de recalques decresce linearmente com o logaritmo do tempo e cresce com a altura do aterro. Além disso, as observações e o modelo aplicam-se somente aos recalques de longo prazo (secundários) (Equação 2.3). A Figura 2.8 apresenta um procedimento gráfico para determinação da idade média do aterro (t_1).

$$m = \frac{\Delta_H}{\Delta_t} \text{ ou } m = a - b \cdot \log t_1 \quad (\text{Eq. 2.3})$$

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

Onde: m = taxa de recalque ou velocidade de recalque; Δ_H = recalques medidos; Δ_t = 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 2.8 – Definição da idade média do aterro, t_1 1975 (MARQUES, 2001).

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

2.4.3 Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998)

Ling et al. (1998) analisando as limitações dos modelos de Yen e Scanlon (1975) e Edil et al (1990) propuseram a utilização de uma função hiperbólica para a estimativa de recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos. O modelo Hiperbólico é descrito pela Equação 2.5.

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

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 através de relações t/S versus t e realizando uma análise de regressão linear.

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

Onde os inversos do intercepto e da inclinação fornecem os parâmetros ρ_0 e S_{ult} . A Figura 2.9 apresenta os resultados da aplicação do modelo para o aterro sanitário de Meruelo.

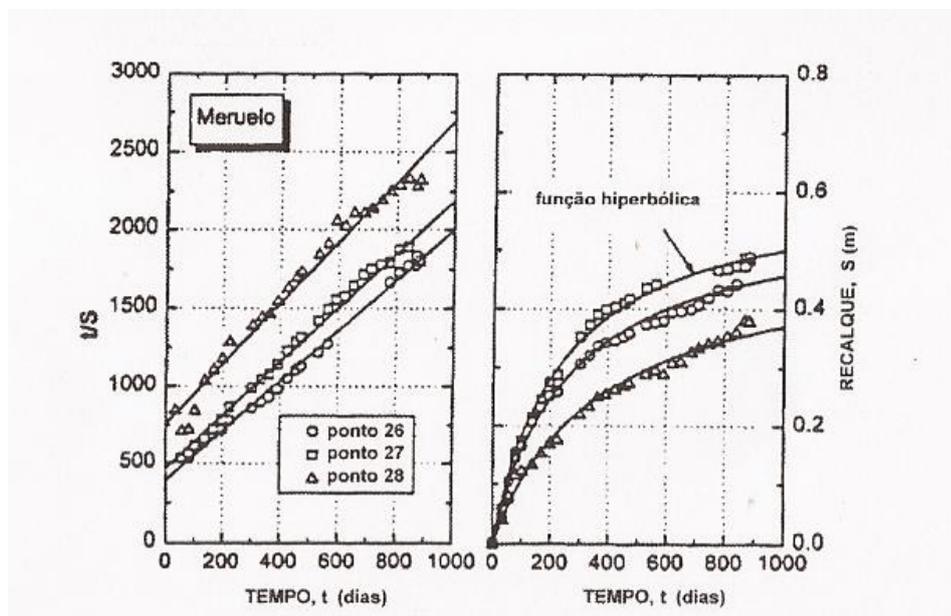


Figura 2.9 – Modelo hiperbólico aplicado ao aterro sanitário Meruelo (MARQUES, 2001).

2.4.4 Modelo Exponencial de Creep (Potência)

Para Sharma e Lewis (1994) apud Simões (2000) o modelo exponencial de *creep* tem sido utilizado para a estimativa do comportamento de *creep* transiente de inúmeros materiais de engenharia, sendo expresso por meio da Equação 2.7.

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

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 = compressibilidade e n = taxa de compressão realizando ajustes de curvas a partir de dados de monitoramento de aterros de resíduos. Os autores mencionam, que apesar do pequeno número de registros, os desvios entre os recalques previstos pelo modelo e os observados situaram-se entre 0 e 14%.

Segundo Simões (2000) e Marques (2001) este modelo apresenta formulação empírica, e os parâmetros do modelo devem ser obtidos a partir da análise de registros históricos. Este fato dificulta a extrapolação para condições que não aquelas para as quais os parâmetros foram obtidos.

2.4.5 Modelo de Bjarngard e Edgers (1990)

Este modelo foi proposto a partir da compilação e análise de 24 casos históricos de monitoração de aterros sanitários (PARK et al. 2002), gerando um procedimento empírico de avaliação de recalques, cuja formulação é apresentada na Equação 2.8. A Figura 2.10a apresenta os dados analisados por Bjarngard e Edgers (1990).

$$\Delta H = C_c \cdot \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} + C_{\alpha 1} \cdot \log \frac{t_2}{t_1} + C_{\alpha 2} \cdot \log \frac{t_3}{t_2} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

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; $C_{\alpha 1}$ = coeficiente de compressão secundária intermediária; $C_{\alpha 2}$ = coeficiente de compressão secundária de longo prazo.

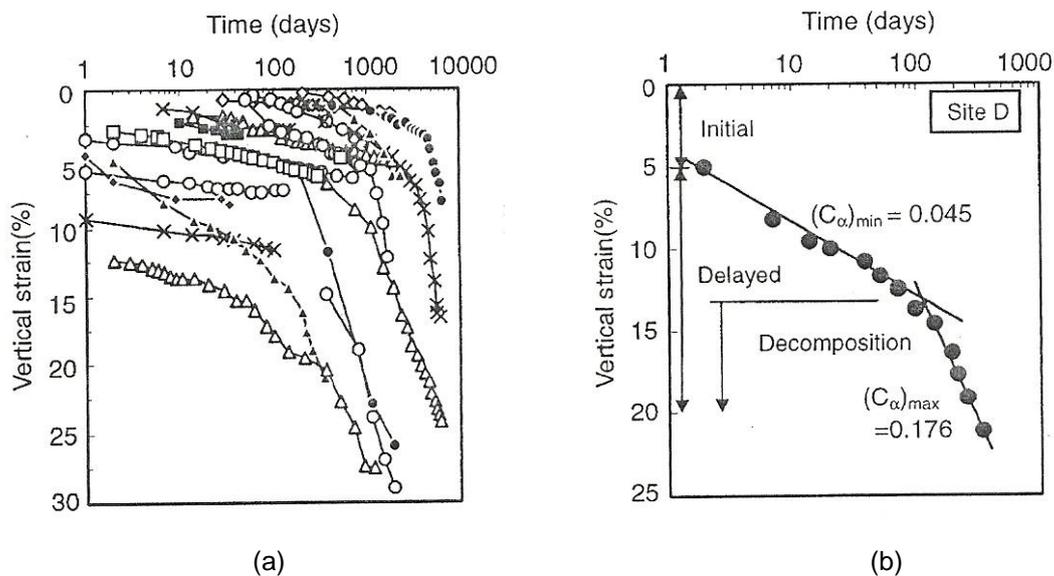


Figura 2.10 – Características dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos (PARK et al., 2002).

Os autores analisaram dados de monitoramento e identificaram dois trechos de compressão secundária: um intermediário e outro de longo prazo (Figura 2.10b). O modelo tem como parâmetros os coeficientes de compressão primária e secundária, o que elimina a necessidade de determinação do índice de vazios inicial, parâmetro de difícil estimativa para os resíduos sólidos urbanos (SIMÕES, 2000). A Figura 2.11 apresenta um esquema do modelo proposto (MARQUES, 2001).

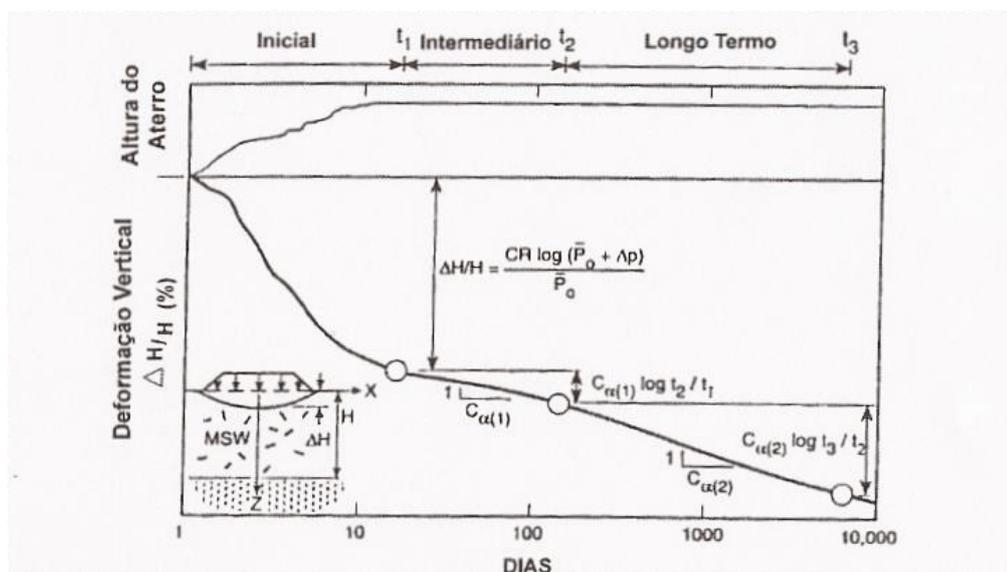


Figura 2.11 – Modelo de compressão unidimensional proposto por Bjarngard e Edgers (1990) (MARQUES, 2001).

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

Tapahuasco (2009) apresenta uma proposta de reformulação do modelo de Bjarngard e Edgers, incluindo uma 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).

2.4.6 Modelo Meruelo (1995)

Este modelo apresenta uma previsão de recalques baseado na degradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos (DIAZ et al., 1995). Pretende prever os recalques que ocorrem num aterro sanitário a partir da formulação que incorpora e relaciona 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 (Equação 2.9).

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

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 principal hipótese adotada refere-se a identificação da hidrólise como principal fator limitante no processo de biodegradação. Esta hipótese é baseada no fato 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. Da mesma forma que a taxa de geração de gases, a constante de hidrólise é um parâmetro, que segundo os próprios autores, pode variar até quatro ordens de grandeza, dependendo principalmente das condições de umidade (SIMÕES, 2000).

2.4.7 Modelo Observacional – Asaoka (1978)

O método Asaoka (1978) foi proposto 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) e Pinto (2001) descrevem o procedimento gráfico para verificar a evolução dos recalques por adensamento ao longo do tempo. Ortigão (2007) destaca que em uma obra importante, muitas vezes é economicamente viável executar uma experiência de campo em verdadeira grandeza, que permita verificar parâmetros do solo, como a resistência e a compressibilidade, e testar algum tipo de solução de engenharia.

Portanto, este método é uma ferramenta muito útil nos casos em que se dispõe de medições de recalque.

Manassero e Pasqualine (1993) utilizaram o método observacional (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 2.10. A Figura 2.12 apresenta a aplicação do método por Marques (2001) em dados do aterro de Bandeirantes em São Paulo.

$$\Delta H_j = \beta_0 + \beta_1 \cdot \Delta H_{j-1} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

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 $\Delta H_{\text{ult}} = \beta_0 / [1 - \beta_1]$.

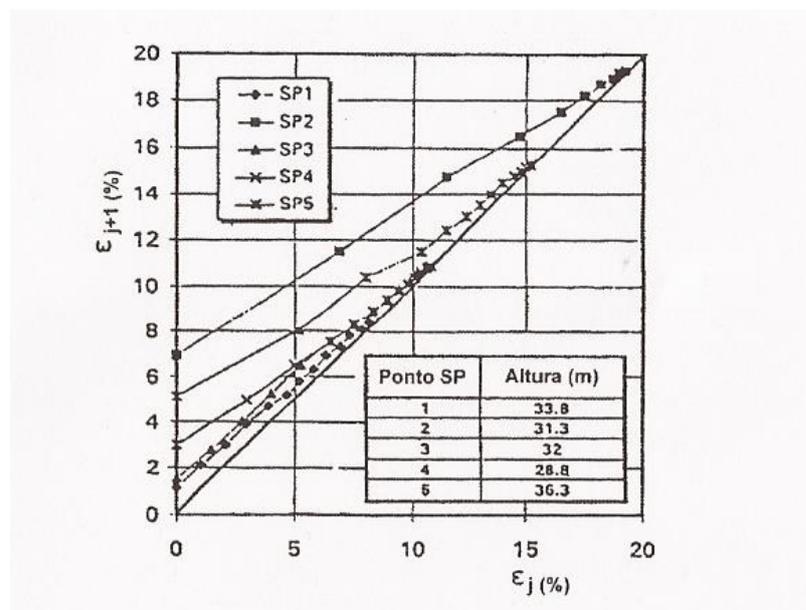


Figura 2.12 – Aplicação do método observacional (MARQUES, 2001).

2.4.8 Outros modelos de previsão de recalques

Simões (2000), Marques (2001), Marques et al. (2003) e Tapahuasco (2009) desenvolveram modelos, visando modelar o comportamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil levando em conta os efeitos da decomposição biológica.

Machado et al. (2002) propõem a utilização de um modelo constitutivo para resíduos sólidos urbanos, baseado em ensaios de laboratório triaxiais e compressão confinada de grandes dimensões. Dellabianca et al. (1999) apresentaram análises numéricas utilizando programa de elementos finitos e adotando um modelo do tipo *soft soil creep* para representar o resíduo sólido urbano em uma célula do aterro sanitário de Brasília.

Hossain e Gabr (2005) apresentaram um modelo de previsão de recalque, que quantifica a mudança das características dos materiais em função taxa de degradação do resíduo. Devido a 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. O modelo foi desenvolvido baseado em ensaios de laboratório e comparado com recalques observados em vários aterros sanitários nos EUA.

A teoria de consolidação não saturada e considerando os processos de biodegradação foram utilizados para previsão de recalques em longo prazo de aterros sanitários por Liu et al. (2006). Os autores na formulação do modelo levam em conta equações de pressão de gás para solução do problema. A validação do modelo proposto foi realizada no estudo de 6 células de teste do Spadra Landfill e Mission Canyon Landfill.

Babu et al. (2010) propuseram um modelo constitutivo baseado em conceitos de estado crítico e incorporando os efeitos do creep e biodegradação, para prever a compressão total de aterros sanitários sob carregamento incremental e o tempo. Os parâmetros do modelo foram calculados baseados em ensaios de compressão unidimensional e triaxial em laboratório, e dados disponíveis publicados na literatura. Os resultados obtidos quando comparados com 14 diferentes modelos registrados na literatura foram da mesma ordem de grandeza dos modelos que consideram os três componentes (mecânico, creep, e biodegradação) de recalques.

Pauzi et al. (2010) reviram vários modelos constitutivos apresentados na literatura para recalques em aterros sanitários e descrevem um modelo aplicado a

locais de deposição de resíduo na Malásia (open dump). Estes autores discorrem que o futuro dos modelos de previsão de recalques devem utilizar modelos probabilísticos acoplados com modelagem numérica.

Chen et al. (2010) apresentam os resultados de um estudo sobre comportamento da biodegradação na compressão de resíduos sólidos urbanos. 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. Para verificar a compatibilidade desta proposta foram analisados dois aterros de resíduos sólidos na China.

2.5 Considerações finais

Vários autores têm estudado os resíduos sólidos urbanos como um novo material geotécnico, pois eles apresentam um comportamento bastante diferenciado dos materiais geotécnicos tradicionais. Os resíduos são constituídos por materiais diversos, como metais, plásticos, papéis, vidros, madeiras, alimentos, entulho, etc.; que quando colocados em um aterro sanitário resultam em um material altamente heterogêneo e anisotrópico. As principais propriedades mecânicas (resistência e compressibilidade) e hidráulicas são variáveis com o tempo e são dependentes do índice de vazios do maciço, bem como da atuação dos agentes ambientais.

O estudo da compressibilidade de resíduos sólidos urbanos é bastante complexo, como salientado por diversos autores. O tema vem sendo abordado através de ensaios de laboratório e ensaios de campo (células experimentais), e de monitoramento de aterros sanitários.

Se por um lado os ensaios de laboratório apresentam um maior controle das variáveis envolvidas, tem como limitação a amostragem e/ou reconstituição do resíduo e a dificuldade de incorporar os efeitos da degradação biológica, pois a escala de tempo e as condições ambientais normalmente dificultam tal

consideração. Sob este aspecto, os ensaios e monitoramentos in situ são mais adequados, pois incorporam as condições reais dos resíduos sólidos urbanos. Como desvantagem, pode ser citada a dificuldade de obtenção de parâmetros para diferentes idades do resíduo, uma vez que os resultados levam em consideração o comportamento médio do maciço como um todo (SIMÕES, 2000).

Um grande número de modelos de previsão de recalques, apresentados na literatura, são baseados em procedimentos empíricos associados a ajustes de dados experimentais. Os dados experimentais, em geral, são obtidos em monitoramento de campo e, em menor quantidade, através de estudos de compressibilidade em células de grande dimensão em laboratório.

Modelos que apresentam um desenvolvimento analítico consistente sob o ponto de vista físico, em geral são muito complexos e necessitam obter parâmetros que muitas vezes são de difícil obtenção.

Os modelos que incorporam a parcela biológica, que é um dos principais mecanismos responsáveis pelos recalques de longo prazo observados nos aterros sanitários, ainda são restritos. Estes modelos incorporam estudos desde a hidrólise dos compostos orgânicos, crescimento de bactérias e geração de gases.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a Área 1 do aterro sanitário da Central de Resíduos do Recreio (CRR) pertencente a Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR). Localiza-se no município de Minas do Leão (RS), no Km 18 da BR 290 - Bairro Coreia, a 80 km de Porto Alegre/RS (Figura 3.1). A Central de Resíduos do Recreio (CRR) possui uma área total de 500 hectares, dos quais cerca de 73 hectares são utilizados para receber resíduos (Figura 3.2).

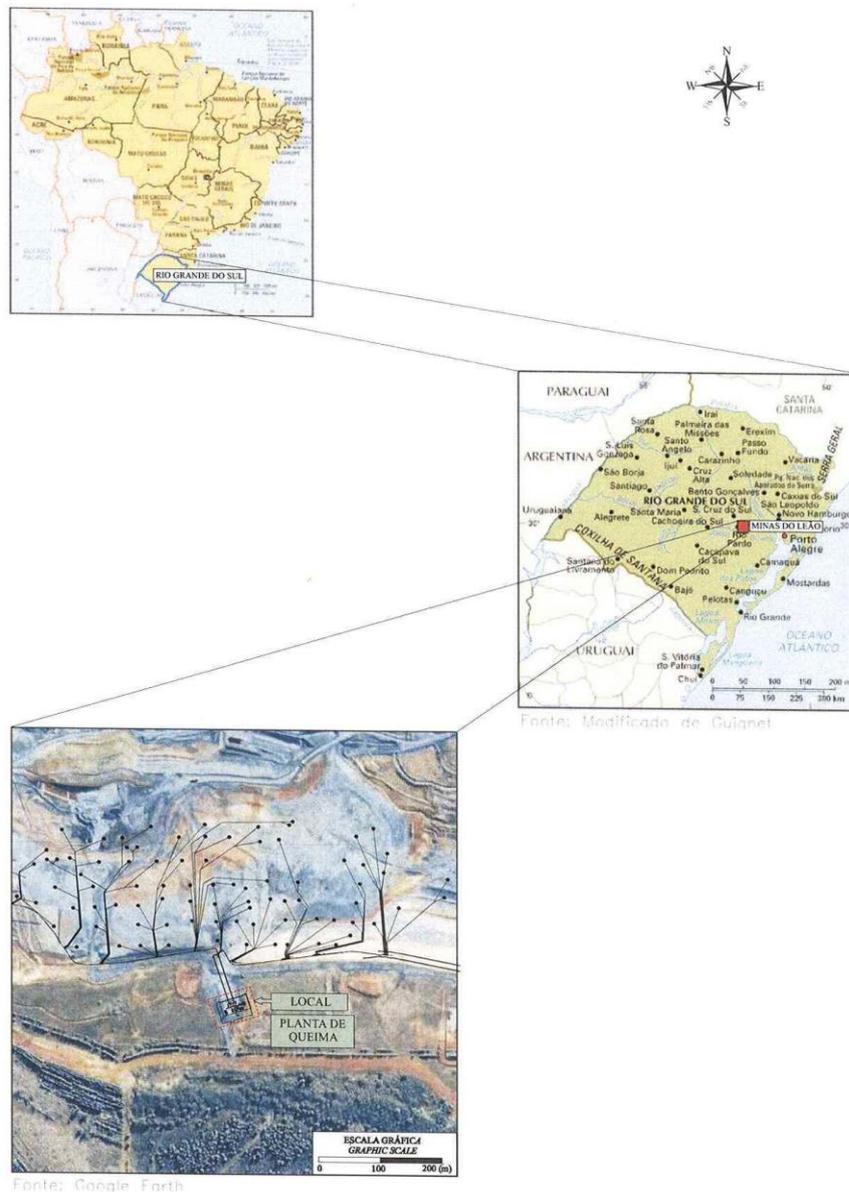


Figura 3.1 – Localização da empresa, mapas do Brasil e do Rio Grande do Sul.

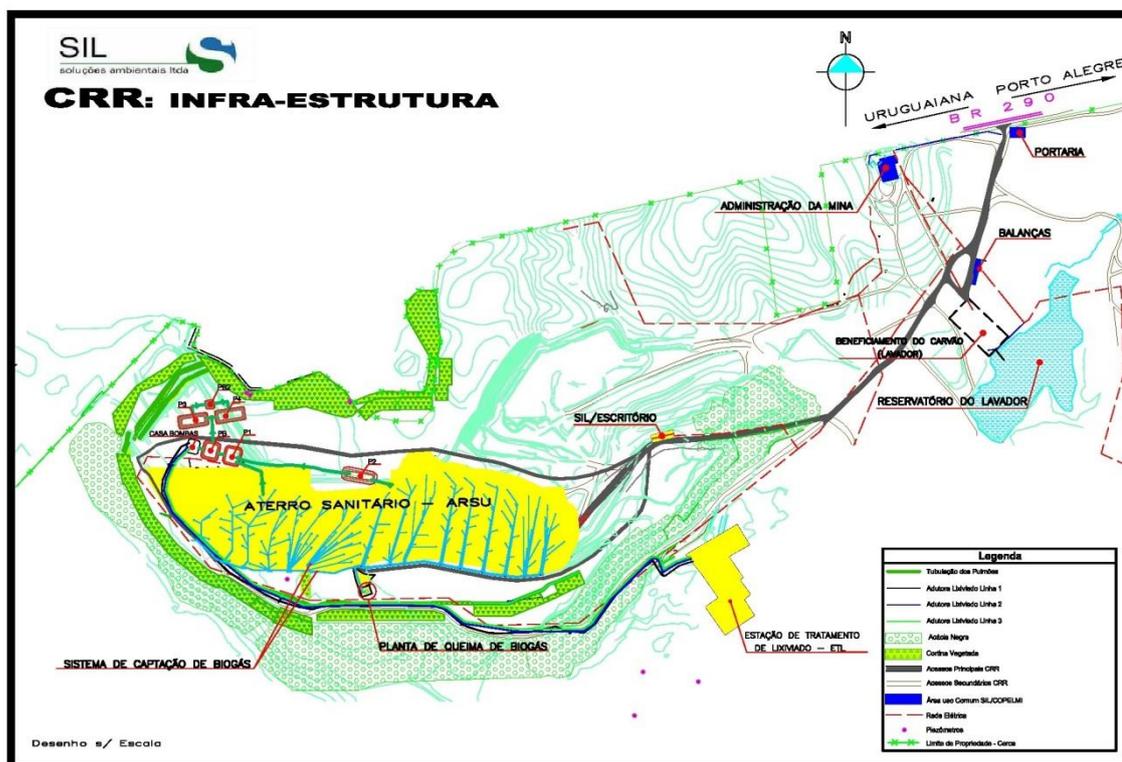


Figura 3.2 – Infraestrutura da área.

Com uma capacidade total para abrigar cerca de 25,0 milhões de toneladas de resíduos, a Central tem um prazo de operação estimado em 23 anos, segundo a licença de operação N° 4268/2012-DL.

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

A operação da empresa teve início em 2001, quando foi fundada a Sil Soluções Ambientais Ltda., uma empresa do Grupo Copelmi de Mineração. A empresa é resultado de um planejamento integrado que aproveita as condições hidrogeológicas naturais da área minerada permitindo uma solução econômica e ambientalmente correta para disposição de resíduos. A empresa 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) é um diferencial na questão do armazenamento de resíduos sólidos urbanos, a área é cercada, privada e com total

controle de acesso. Todos os veículos transportadores são pesados ao entrar e sair, durante 24 horas por dia, 6 dias por semana (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Balança de pesagem.

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

- Argila compactada, para impermeabilização;
- Areia, visando monitorar eventuais vazamentos;
- Argila compactada, para impermeabilização (Figura 3.6);
- Geomembrana de polietileno (PEAD), para reforçar a impermeabilização (Figura 3.7);
- Argila, para proteção da geomembrana PEAD.



Figura 3.4 – Camadas de impermeabilização e proteção do solo

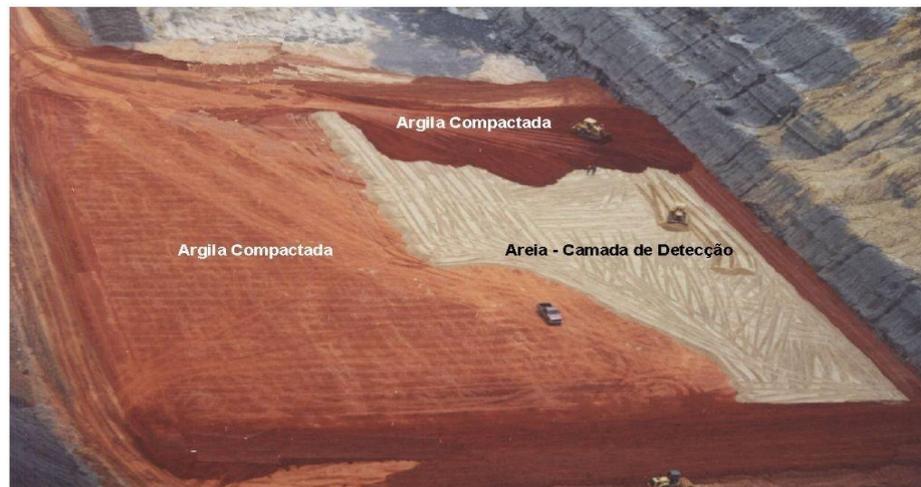


Figura 3.5 – Camadas de proteção, com argila compactada, areia para inspeção e argila compactada.



Figura 3.6 – Controle tecnológico das camadas compactadas de argila.



Figura 3.7 – Instalação da geomembrana PEAD sobre a camada de argila compactada.

O lixiviado recebe especial atenção, é canalizado para uma bacia e posteriormente é transferido para uma Estação de Tratamento (Figura 3.8). Com uma área total de 40.000m² a Estação de Tratamento é composta por filtros anaeróbios, lagoa aerada, lagoas facultativas e banhados construídos (Figura 3.9).

Após este processo o líquido tratado é conduzido para o reservatório de água (Figura 3.10), que abastece o lavador de carvão em operação na mina.

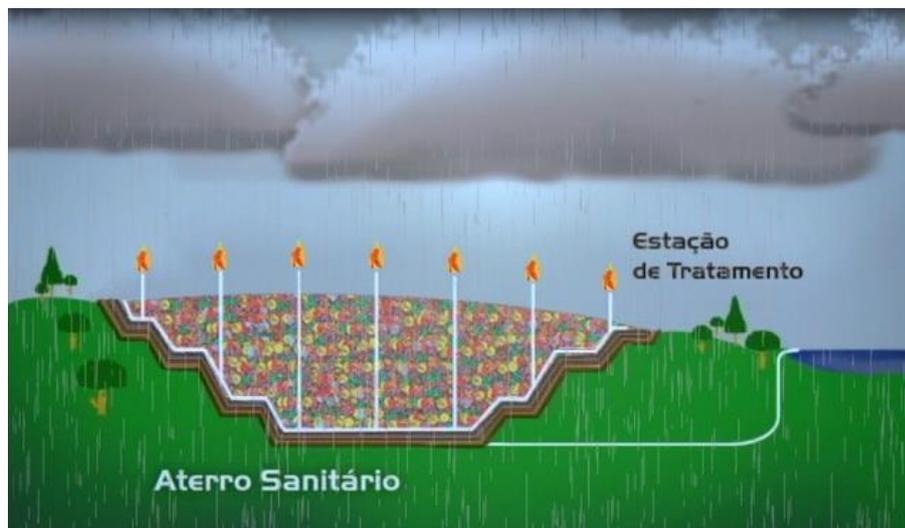


Figura 3.8 – Geração de lixiviado e canalização para Estação de tratamento.



Figura 3.9 – Banhados construídos.



Figura 3.10 – Reservatório de água.

A empresa conta para sua operação 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 (Figura 3.11) poderão ser utilizadas como aterros sanitários, enquanto esse desativado passará a receber cuidados de fechamento, sendo devolvido à natureza. Durante esse período a empresa executará o monitoramento e a manutenção da área.



Figura 3.11 – Cava de mineração.

A empresa um novo sistema de coleta e oxidação térmica do biogás gerado no aterro. Em 2006, a empresa recebeu da ONU (Organização das Nações Unidas) a autorização para implementação do projeto. Assim a empresa passa a operar agora no âmbito do MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) do Protocolo de Kyoto. Esta iniciativa que é pioneira no sul do país representa uma redução anual de 150 mil toneladas de CO₂, causadores do aquecimento global. O novo processo consiste num sistema de captura forçada do biogás do aterro e sua destruição. A captura do biogás é realizada por tubulações e válvulas que interligam os drenos verticais de biogás (Figuras 3.12, 3.13 e 3.14) instalados no aterro. Um sistema que utiliza sopradores, analisadores de biogás, desumidificador e controladores inteligentes que enviam o gás para o queimador enclausurado, no qual é realizada a queima a uma temperatura de 950°C.



Figura 3.12 – Drenagem de fundo (espinha de peixe) e início do dreno vertical.



Figura 3.13 – Dreno de biogás.

A empresa deve manter procedimentos periódicos de inspeção e manutenção às estruturas implantadas, de modo a prevenir/corrigir eventuais ocorrências de danos ou falhas operacionais, objetivando condições operacionais adequadas, de forma a garantir o bom funcionamento do empreendimento e a preservação do ambiente no entorno do mesmo, assim como deverão ser adotadas medidas de controle dos processos erosivos.



Figura 3.14 – Planta de queima do biogás.

A cortina vegetal deverá ser mantida visando amenizar visualmente o local e criar condições para sua proteção e isolamento.

Quanto ao monitoramento, a empresa deve manter: planilha de recebimento de resíduos, condições de operação da ETE, relatório das inspeções realizadas (volume de lixiviado gerado, percentual de ocupação da célula em operação, inspeções para verificar drenagens, poços de monitoramento, integridade da geomembrana, ocorrências e serviços efetuados no período, bem como acidentes verificados e os procedimentos adotados apresentando as reais condições de operação do empreendimento), laudos de análise do efluente (lixiviado), águas superficiais e águas subterrâneas.

No final de 2011, foi realizada uma fusão da empresa Sil Soluções Ambientais Ltda. com os aterros próprios da empresa Revita Engenharia S.A. no estado do Rio Grande do Sul.

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. A 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;

4. METODOLOGIA

A pesquisa realizada teve como base a análise do monitoramento de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos (RSU) – Central de Resíduos de Recreio. A partir de dados de recalques de células de RSU, foi avaliada uma série de modelos de previsão de recalques (calibração).

4.1 Investigação e Monitoramento de Campo

Foram obtidas informações sobre o projeto executivo da Central de Resíduos do Recreio, os quais foram analisados de forma a identificar as fases de implantação e operação do aterro, os equipamentos e procedimentos operacionais que foram empregados, os sistemas de drenagem de gases, percolado e cobertura final que foram implantados, dentre outros aspectos. O objetivo era o de verificar a implicação destes aspectos na compressibilidade do maciço sanitário, na previsão de recalques (métodos mais adequados) e na implantação do monitoramento.

A Central de Resíduos do Recreio conta com o monitoramento geotécnico por meio de 20 marcos superficiais e 1 inclinômetro, sendo 16 marcos e o inclinômetro instaladas na Área 1 e os outros 5 marcos superficiais instalados na Área 2 (Figura 4.1). Para este trabalho foram analisadas as deformações verticais dos 6 marcos superficiais com recalque mais significativo quando comparados com os demais (Tabela 4.1). Na Figura 4.2 são apresentadas as convenções utilizadas para recalque e deslocamento horizontal.

As leituras dos marcos 7R, 9R, 12, 15 e 21, foram realizadas semanalmente no período de 22/10/2007 a 26/01/2008, mensalmente de 26/01/2008 a 04/03/2009 e trimestralmente de 04/03/2009 a 25/09/2012. Enquanto que no marco 16 foi realizada semanalmente no período de 22/10/2007 a 18/12/2008, mensalmente de 18/12/2009 a 26/12/2011 e trimestralmente de 26/12/2011 a 25/09/2012.

A Figura 4.3 ilustra detalhes de um marco superficial e os procedimentos adotados para o levantamento com estação total. Para a leitura das coordenadas dos marcos foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Estação total marca Topcon

Modelo – GTS-239W

Precisão angular = 9" Precisão linear = $\pm 3\text{mm} + 3\text{ppm}$

- Estação total marca Leica

Modelo – TS 06 ULTRA

Precisão angular = 5" Precisão linear = $\pm 1.5\text{mm} + 2\text{ppm}$

As células foram construídas com alturas de 5m e cobertas com solo compactado, até que fosse 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 removido, fazendo com que as camadas de resíduos entrem em contato umas com as outras. Na Figura 4.4 é possível identificar as bermas de 5m no talude principal, o que após alguns anos já não é mais percebido devido aos recalques (Figuras 4.5 e 4.6).

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.

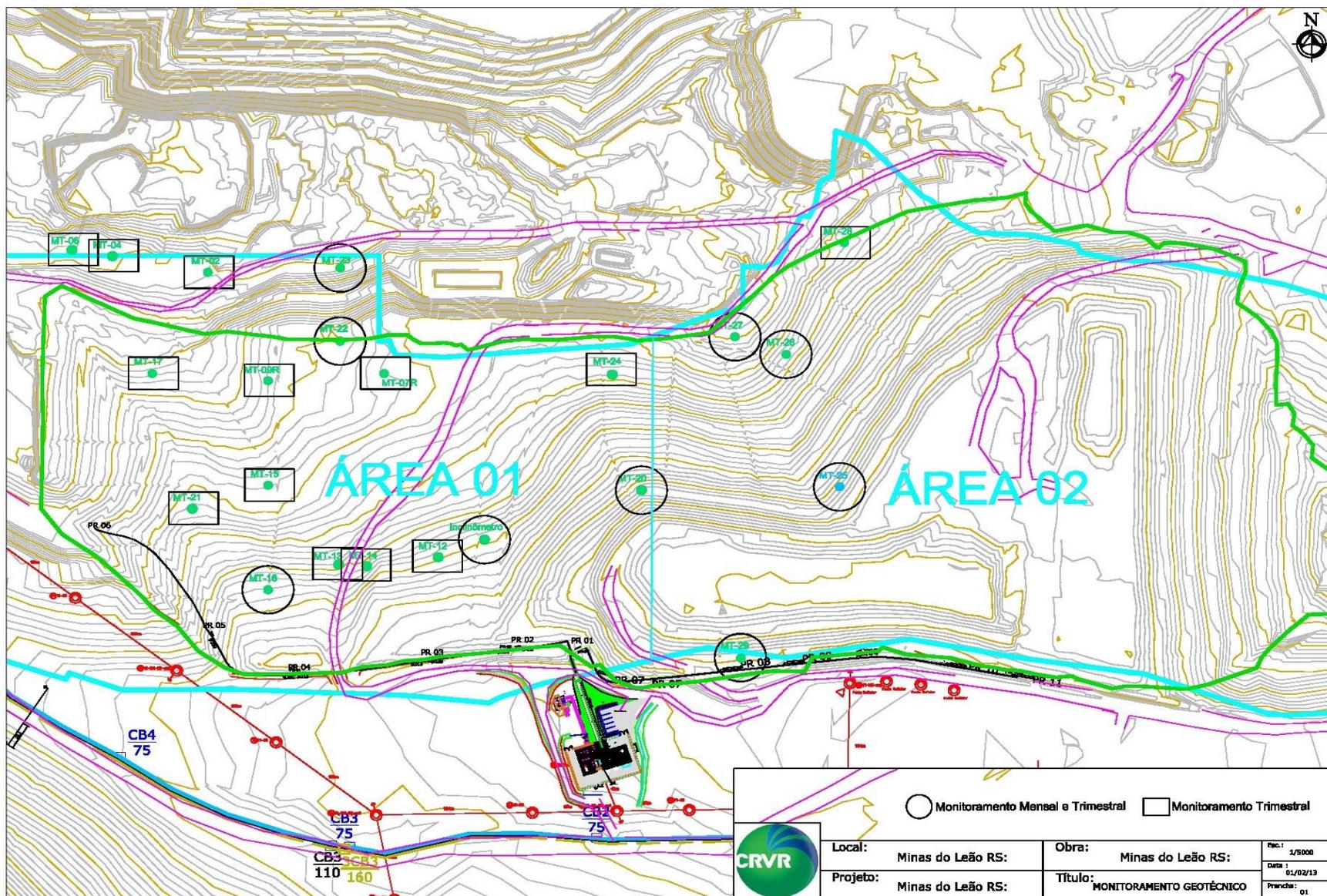


Figura 4.1 – Planta com a situação dos marcos superficiais e do inclinômetro, em referência às Áreas 1 e 2.

Tabela 4.1 – Resumo com as cotas, deslocamentos verticais e horizontais, do 1º e último monitoramentos.

Marco	Obs.	Levantamento nesta data: 25/09/2012			Diferença acumulada desde 22/10/2007			Rec.
		Coordenadas UTM		Cota	Desloc. Horiz.	Desloc.		
		E (m)	N (m)			E	N	
MT02	1	400.938,568	6.664.485,773	61,210	0,042	0,03	0,03	-0,04
MT04	1	400.862,273	6.664.499,781	60,038	0,037	0,02	0,03	-0,04
MT06	1	400.829,843	6.664.505,156	59,412	0,036	0,04	0,00	-0,03
MT7R	1	401.079,159	6.664.398,172	84,011	0,411	-0,27	-0,31	-2,90
MT9R	1	400.986,291	6.664.392,250	78,076	0,329	-0,32	-0,08	-2,30
MT12	1	401.122,043	6.664.242,024	99,593	0,787	-0,21	0,76	-1,72
MT13	1	401.042,473	6.664.236,156	93,337	0,736	-0,11	0,73	-1,73
MT14	1	401.064,828	6.664.234,594	95,976	0,772	-0,23	0,74	-1,61
MT15	1	400.984,457	6.664.303,545	83,775	0,484	-0,19	0,44	-2,52
MT16	2	400.983,080	6.664.215,660	97,742	1,796	-0,28	1,77	-3,27
MT17	1	400.894,140	6.664.398,589	71,404	0,070	-0,01	0,07	-0,55
MT20		Marco Topográfico temporariamente sem leitura						
MT21	1	400.925,649	6.664.283,375	86,172	1,102	-0,51	0,98	-3,95
MT22	2	401.044,295	6.664.426,399	80,019	0,144	-0,09	0,11	-0,29
MT23	2	401.044,410	6.664.489,455	61,112	0,026	0,00	0,03	-0,02
MT24	1	401.261,990	6.664.398,049	88,454	0,769	-0,15	0,75	-1,57
MT25		Marco Topográfico temporariamente sem leitura						
MT26	2;3	401.400,243	6.664.415,678	88,082	0,824	-0,70	0,44	-1,65
MT27	2;4	401.360,251	6.664.430,227	79,936	0,105	-0,04	-0,09	-0,38
MT28	2;5	401.452,490	6.664.506,557	87,018	0,01	0,01	0,01	0,00
INCLI NOM	2	401.158,931	6.664.256,875	100,248	0,839	-0,43	0,72	-1,76
MT29	1	401.364,636	6.664.153,935	115,307	0,038	-0,04	-0,01	-0,15

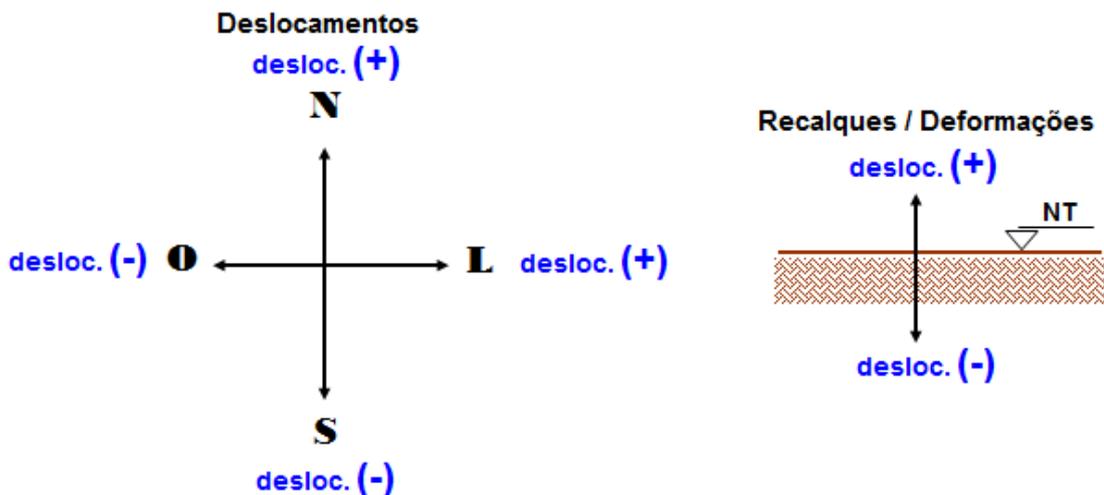


Figura 4.2 – Convenções utilizadas.

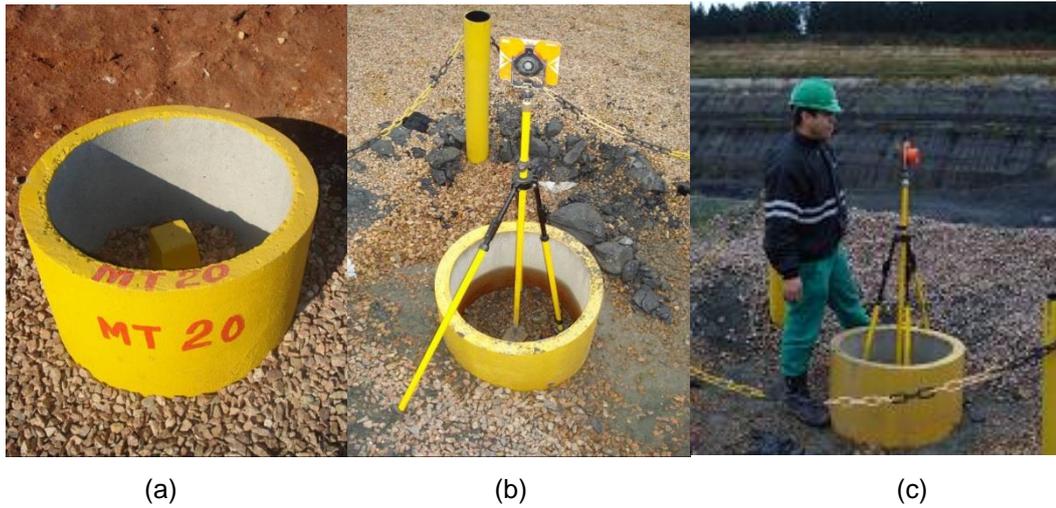


Figura 4.3 – (a) Marco topográfico MT20; (b) Equipamento utilizado na leitura dos marcos; (c) Colaborador da empresa realizando a leitura.



Figura 4.4 - Identificação das bermas de aproximadamente 5m no talude.

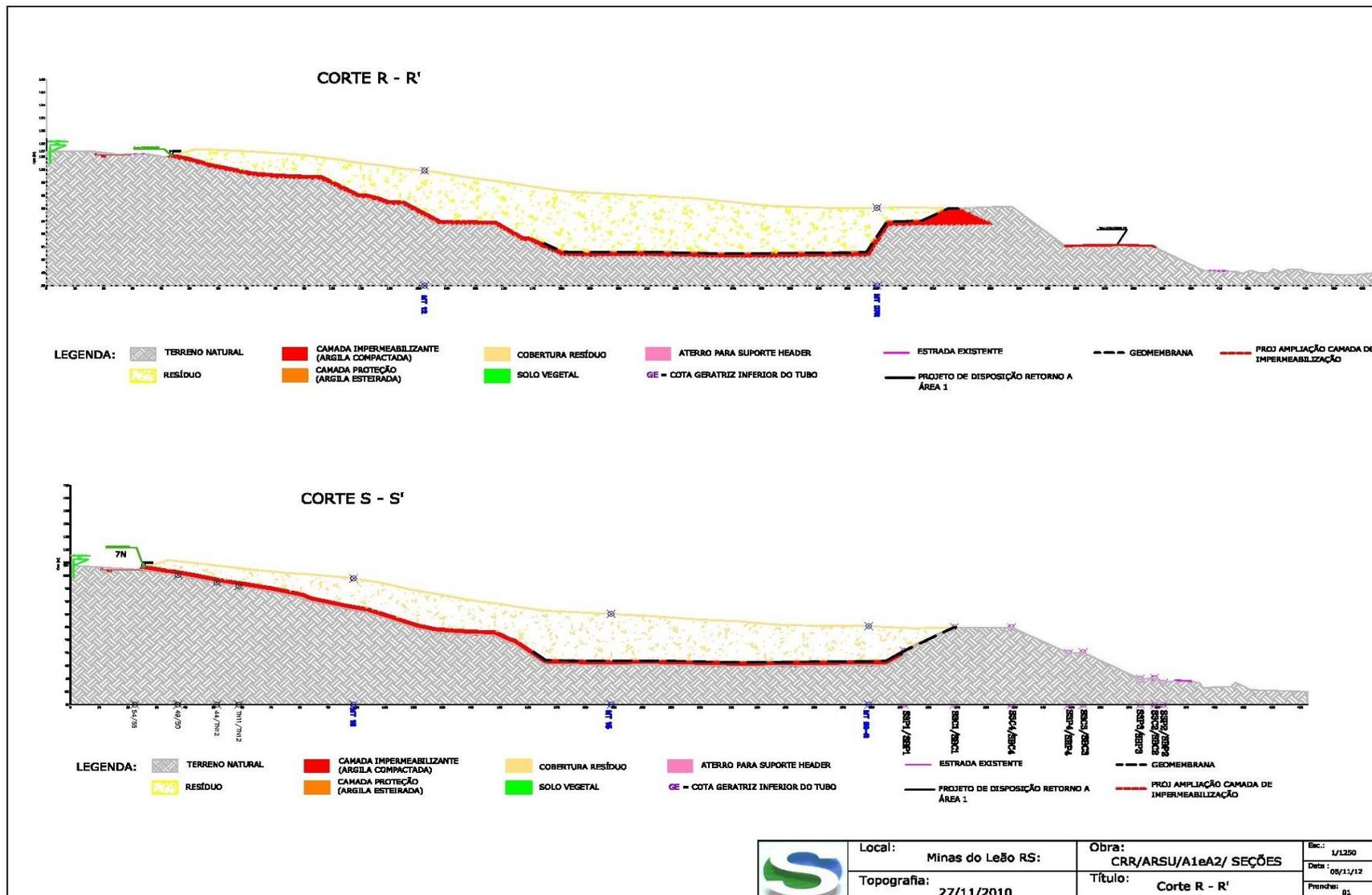


Figura 4.5 – Seções com a topografia de 2010.

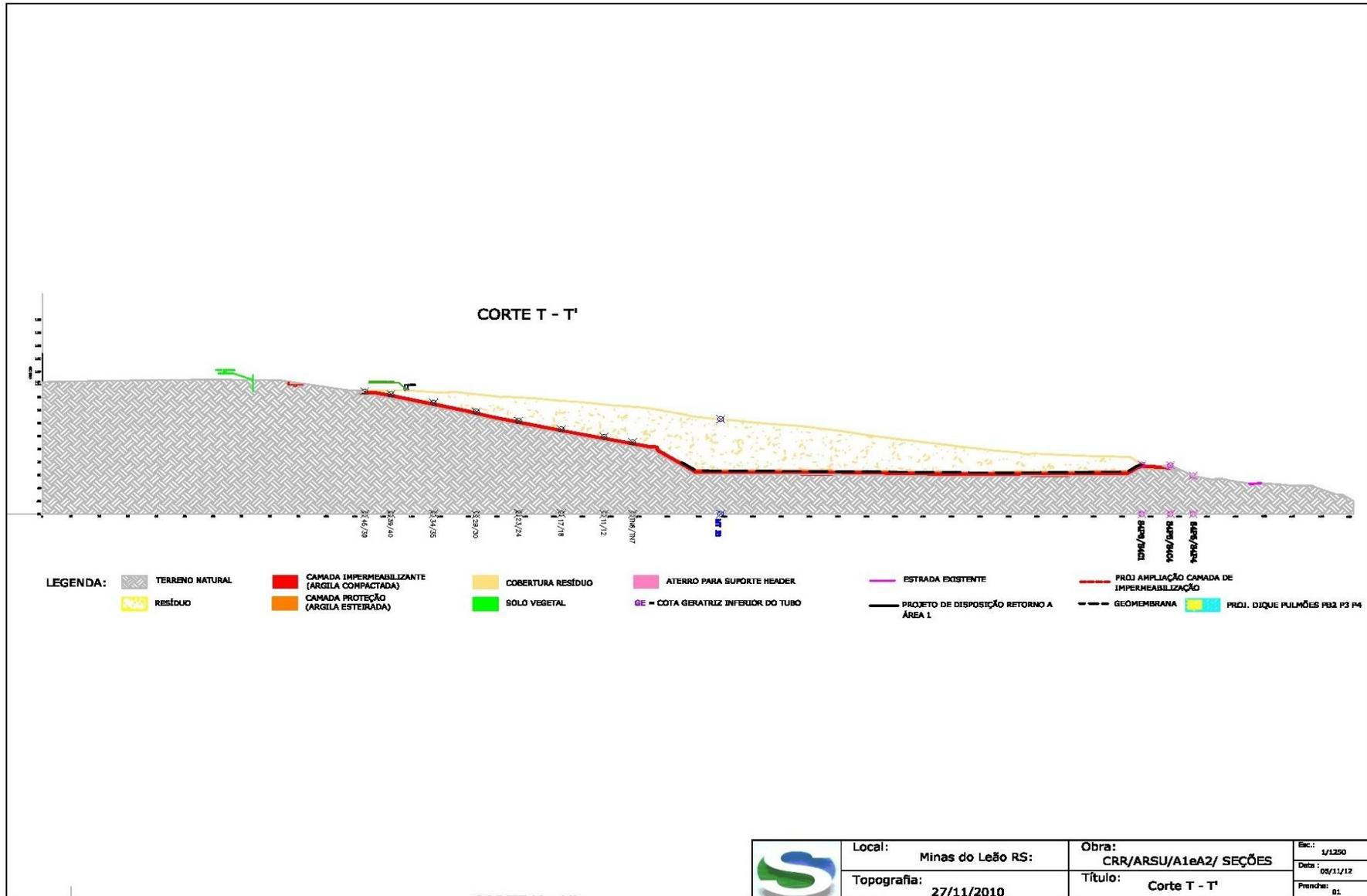


Figura 4.6 – Seção com a topografia de 2010.

4.2 Modelos de previsão de recalques

Foi realizada uma análise comparativa dos métodos de previsão de recalques mais utilizados no meio geotécnico. Os métodos de previsão de recalques existentes na literatura nacional e internacional foram comparados para fins de subsidiar a escolha dos que seriam utilizados no caso da Central de Resíduos do Recreio. 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 a aterros existentes. Os modelos de previsão estão descritos no item 2.4 da revisão bibliográfica.

Com base nas análises realizadas nas atividades descritas acima, foram definidos os métodos de previsão de recalques que foram empregados na pesquisa, de acordo com os dados disponíveis do aterro Fase I da Central de Resíduos de Recreio.

4.3 Análise e comparação dos resultados

A previsão de recalques da Central de Resíduos do Recreio consistiu na aplicação dos métodos de previsão de recalques selecionados para estimar os recalques do aterro sanitário.

A comparação das previsões com os recalques reais medidos serviu para avaliar o comportamento e a sensibilidade do modelo, ou seja, a calibração do modelo através de dados reais de recalque. Os parâmetros obtidos nos diversos modelos foram comparados com os dados da literatura de outros aterros sanitários.

A conclusão final foi realizada pelo cálculo do desvio relativo entre os valores calculados e observados, verificando a aderência do modelo e comparando os modelos entre si.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O estudo de compressibilidade de resíduos sólidos foi baseado nos controles e levantamentos topográficos realizados pela Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), após o fechamento da célula da Área 1.

Tais 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) e por último o método observacional de Asaoka (1978). Descrevem-se na sequência as diversas análises e resultados destes estudos.

A Figura 5.1 apresenta a topografia do Fundo do Aterro da Área 1, cujo início da disposição de resíduo foi no ano de 2001 e o término em 2007. Nesta Fase do aterro foram instalados 16 marcos superficiais, sendo que neste estudo foram utilizados 6 marcos para verificar o desempenho dos modelos existentes. A Tabela 5.1 apresenta o resumo dos parâmetros encontrados nestes marcos, tais como, espessura do resíduo (H), frequência das leituras e deslocamentos finais (setembro de 2012).

Tabela 5.1 – Resumo dos parâmetros dos marcos analisados.

Ponto	H (m)	Frequência das leituras	Deslocamento vertical ρ (m)	Deslocamento horizontal (m)
MT7R	20,0	-semanal: 22/10/2007 a 26/01/2008	2,90	0,41
		- mensal: 26/01/2008 a 04/03/2009		
		- trimestral: 04/03/2009 a 25/09/2012		
MT9R	14,0	Idem MT7R	2,30	0,33
MT12	15,0	Idem MT7R	1,72	0,79
MT15	20,0	Idem MT7R	2,52	0,48
MT 16	13,5	- semanal: 22/10/2007 a 18/12/2008	3,27	1,80
		- mensal: 18/12/2009 a 26/12/2011		
		- trimestral: 26/12/2011 a 25/09/2012		
MT21	24,0	Idem MT7R	3,95	1,10

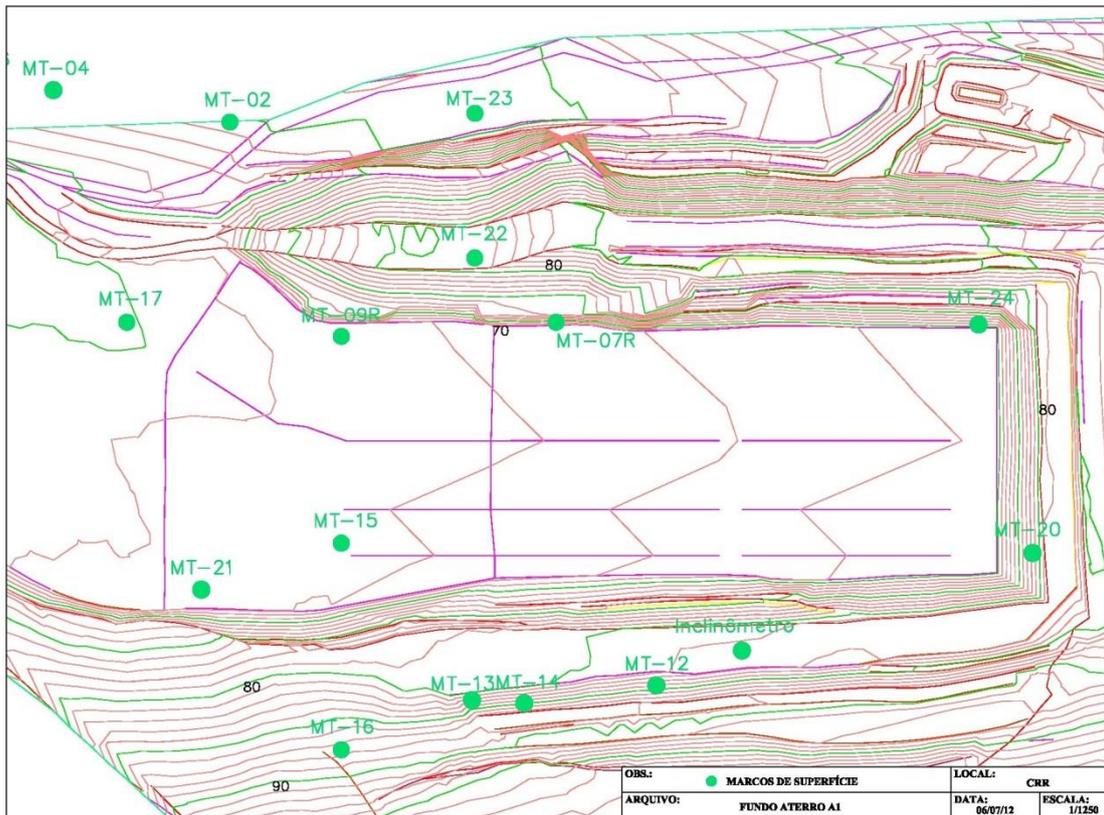


Figura 5.1 – Planta do fundo do aterro Área 1.

Para verificação de desempenho dos modelos utilizados neste trabalho com os dados dos 6 marcos superficiais será utilizada a proposta de Marques (2011), que compara o recalque medido com o previsto, verificando o desvio (D) obtido entre os valores calculados e observados, conforme a Equação 5.1.

$$D_{i,j} = \left(\frac{\Delta H_{calc(i,j)} - \Delta H_{obs,j}}{\Delta H_{obs,j}} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 5.1})$$

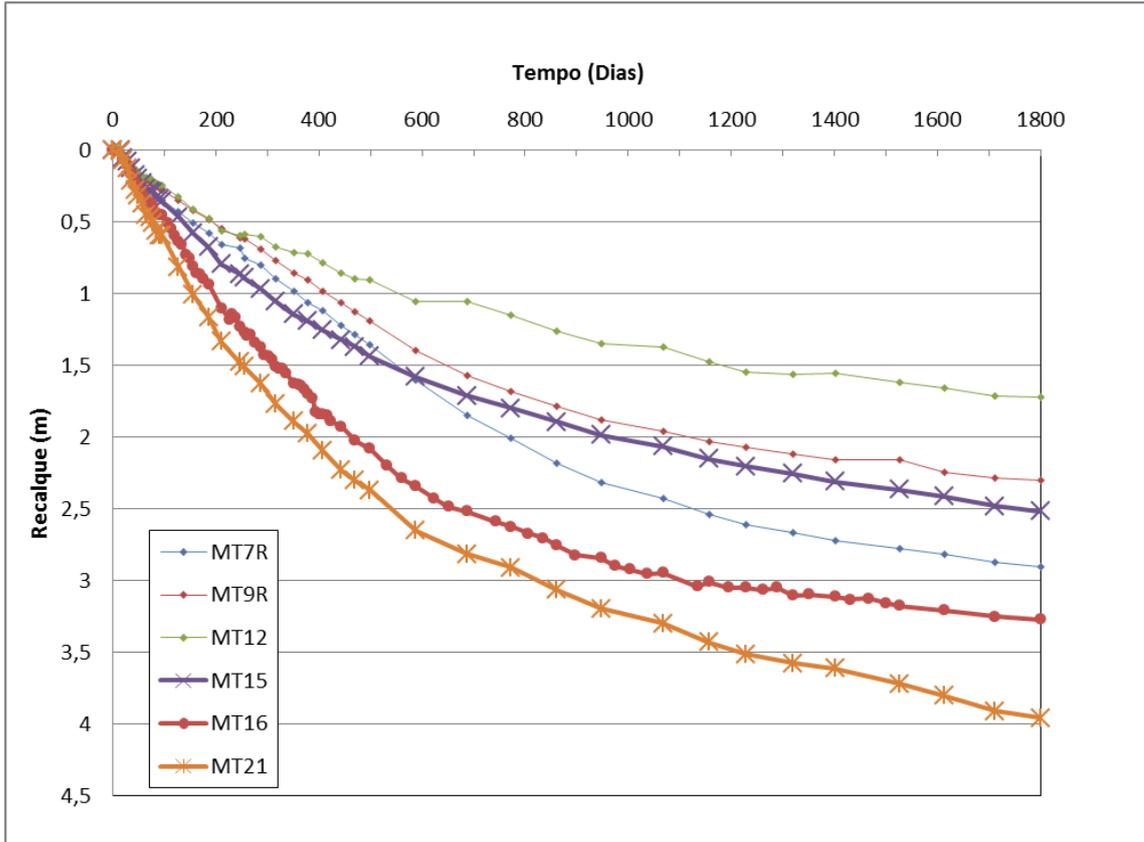
Onde: $D_{i,j}$ = desvio de recalque no tempo j, baseado nas leituras do período i, em %; $\Delta H_{calc(i,j)}$ = recalque calculado no tempo j, baseado nas leituras do período i; $\Delta H_{obs,j}$ = recalque observado no tempo j.

Uma limitação da análise realizada neste trabalho foi o não conhecimento da sequência construtiva das diversas células que constituem a Área 1 do aterro, bem 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:

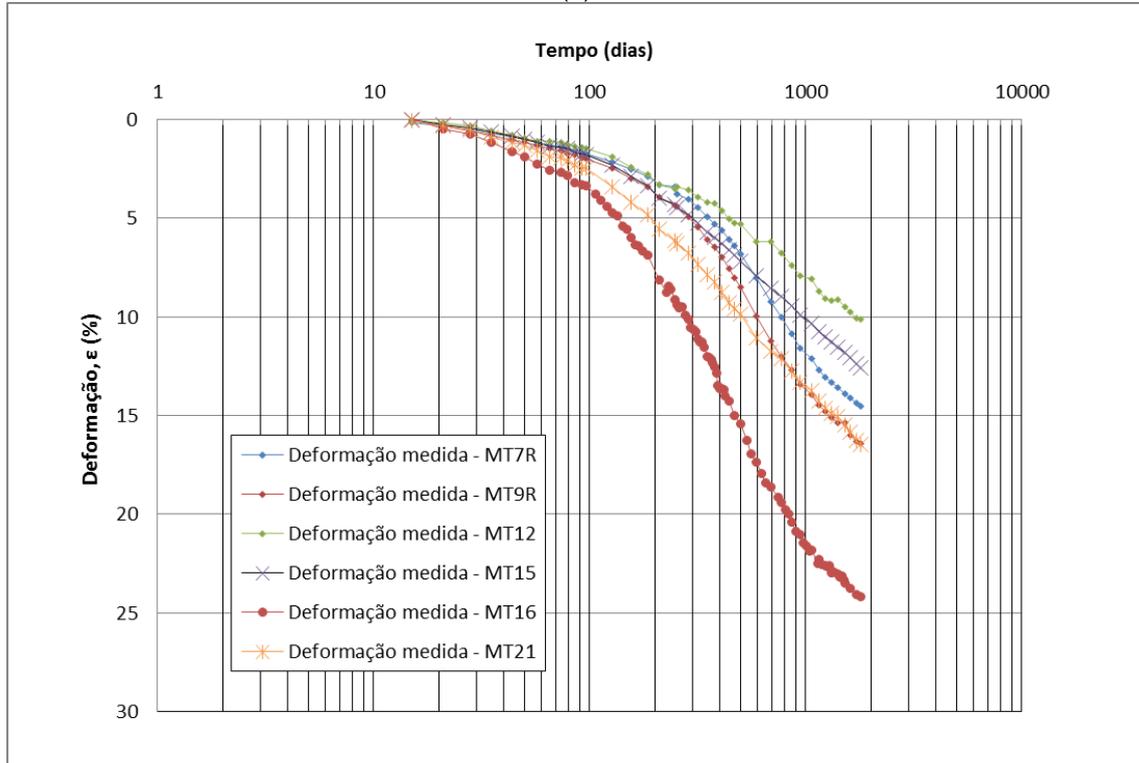
- (a) Sequência construtiva: o histórico da construção do aterro da Área 1 não foi obtido de maneira satisfatória, ou seja, sabe-se que o início da disposição de resíduo começou no ano de 2001 e o monitoramento em 2007. Também se desconhece o início e o término de cada célula de resíduo.
- (b) Altura da coluna de resíduos (H) foi obtida a partir das cotas do fundo do aterro (Figura 5.1) e das cotas dos marcos no início do monitoramento (outubro de 2007).
- (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.

A Figura 5.2 apresenta as curvas recalque versus tempo para os marcos analisados neste trabalho. Os recalques observados variaram aproximadamente entre 1,70 e 4,0m, correspondendo a uma deformação entre 11,5 e 24,2% em relação à altura inicial dos resíduos. Valores estes dentro de faixas descritas na literatura.

A velocidade dos recalques medidos para o marcos superficiais está apresentada na Figura 5.3. As taxas de deformação nos meses iniciais situaram-se entre 3 e 7mm/dia, onde os valores mais elevados foram verificados nos marcos MT16 e MT21 que apresentaram os maiores recalques. Para o período de monitoramento (1800 dias) as taxas de deformação apresentaram uma redução média da ordem 3 vezes (taxas atuais entre 1 e 2mm/dia) com clara tendência de estabilização.



(a)



(b)

Figura 5.2 – (a) Curva recalque vs. tempo para os marcos analisados; (b) Curva deformação vs. tempo.

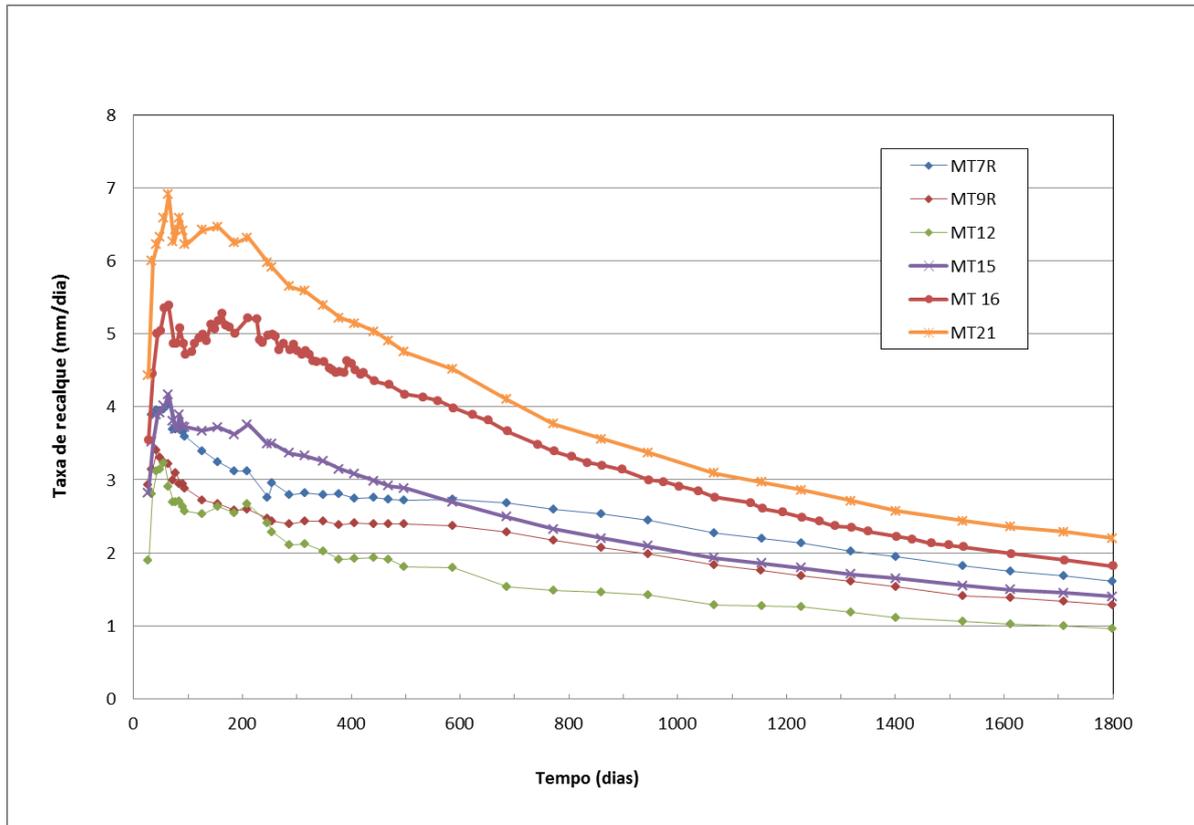


Figura 5.3 – Taxas de recalque medidas nos marcos superficiais.

5.1 Modelo de Yen e Scanlon (1975)

Este modelo, conforme descrito no item 2.4.2, utiliza o conceito de idade média do aterro como base de definição do parâmetro tempo. Marques (2001) destaca que o modelo é válido para uma relação linear decrescente entre as taxas de recalque e o logaritmo do tempo.

Da mesma maneira que para Marques (2001), a aplicação de tal modelo para os marcos superficiais do aterro da Área 1 da Central de Resíduos do Recreio foram inconsistentes. Ling et al. (1998) propuseram a integração da equação básica de Yen e Scanlon (1975) que foi adotada neste trabalho. A Figura 5.4 apresenta os resultados obtidos tendo por base as funções logarítmicas integradas para os marcos MT7R e MT16. As taxas de recalque foram calculadas em mm/dia (Figura 5.4a) e o tempo inicial foi adotado igual ao tempo do início do monitoramento. Na Figura 5.4b é apresentada a relação recalque medido e previsto vs. tempo, com base em funções logarítmicas integradas da solução Yen e Scanlon (1975).

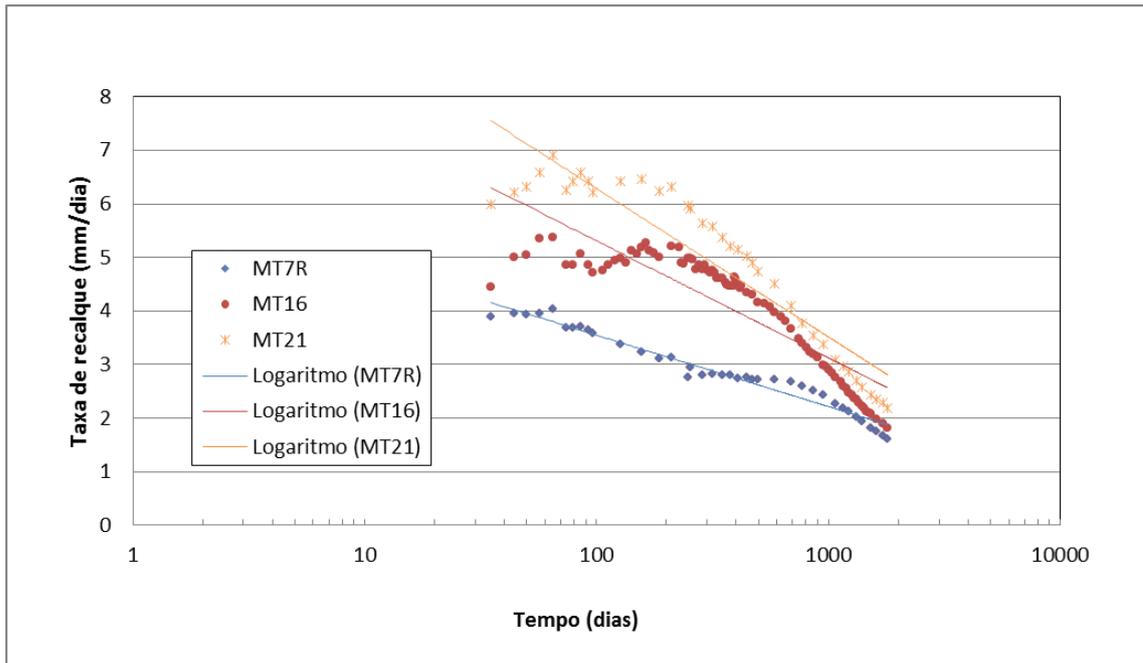
Os resultados para todos os marcos analisados estão apresentados na Tabela 5.2. Pode-se observar uma fraca concordância entre os dados medidos e os previstos com a aplicação deste método para os pontos verificados, notadamente para os recalques em longo prazo. Os desvios de recalque (D), neste caso, apresentaram um valor médio de cerca de 72%, considerando os marcos utilizados neste estudo.

Tabela 5.2 – Coeficientes a e b obtidos no modelo de Yen e Scanlon (1975).

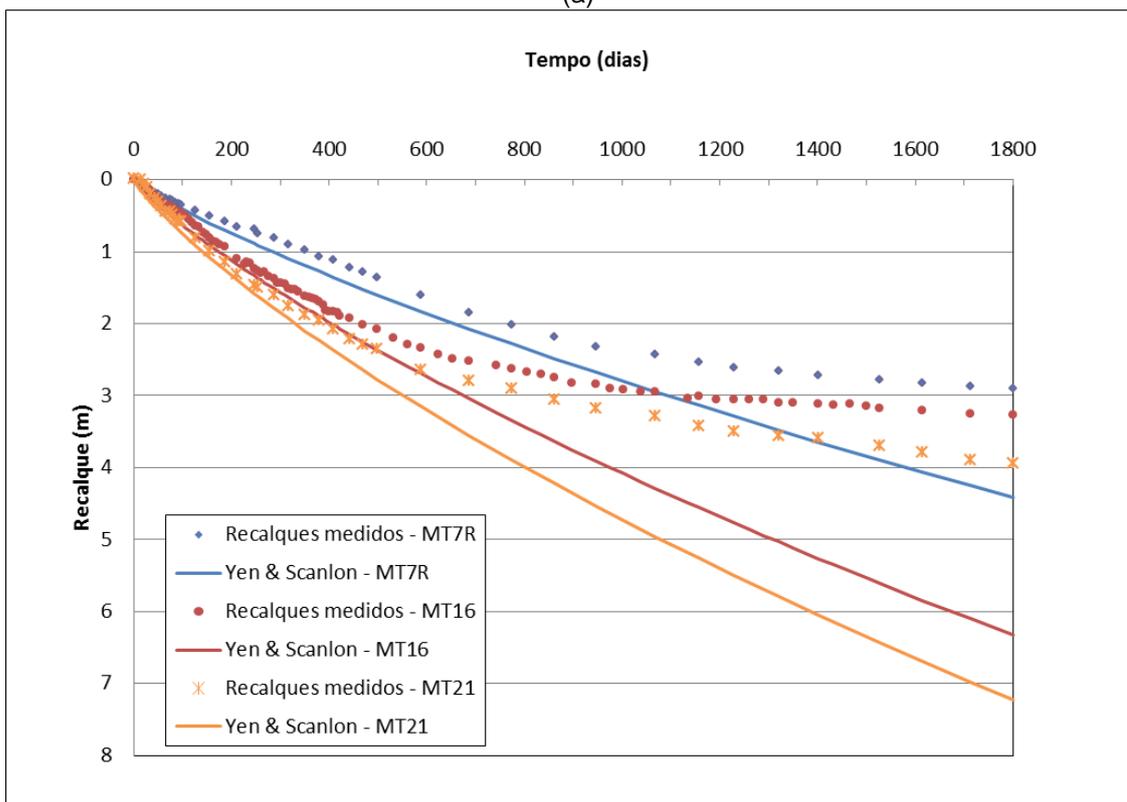
Ponto	Yen e Scanlon (1975)			Função log
	a	b	Desvio (%)	Desvio (%)
MT7R	6,21	0,57	52,35	- 20,61
MT9R	5,15	0,48	59,07	-18,65
MT12	5,27	0,56	69,49	-18,60
MT15	6,92	0,69	74,36	-16,85
MT16	9,68	0,95	93,71	-7,70
MT21	11,82	1,20	82,71	-14,79

Baseado nas análises realizadas neste trabalho pode-se concluir pela não adequabilidade deste método para o aterro da Central de Resíduos de Recreio. Marques (2001) chegou a 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.

Ling et al. (1998) propuseram a utilização de funções logarítmicas simples para estimativas de recalques. Na proposta o tempo inicial coincide com o tempo de início das leituras e controles de campo. Na Figura 5.5 são apresentados os resultados da análise de regressão a partir de funções logarítmicas simples, com a consequente previsão de recalques, juntamente com os valores de recalque observados para os marcos MT7R, MT16 e MT21 respectivamente. Os coeficientes de determinação (R^2), neste caso, apresentaram valores da ordem de 0,908.



(a)



(b)

Figura 5.4 – (a) Relação taxa de recalque vs. log do tempo; (b) Relação recalque medido e previsto vs. tempo, com base em funções logarítmicas integradas da solução Yen e Scanlon (1975).

Os desvios de recalque, após cerca de 1800 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 -16,2%

(Tabela 5.2). Os recalques previstos ao final do período, nesta solução, apresentaram-se menores do que os valores observados em campo.

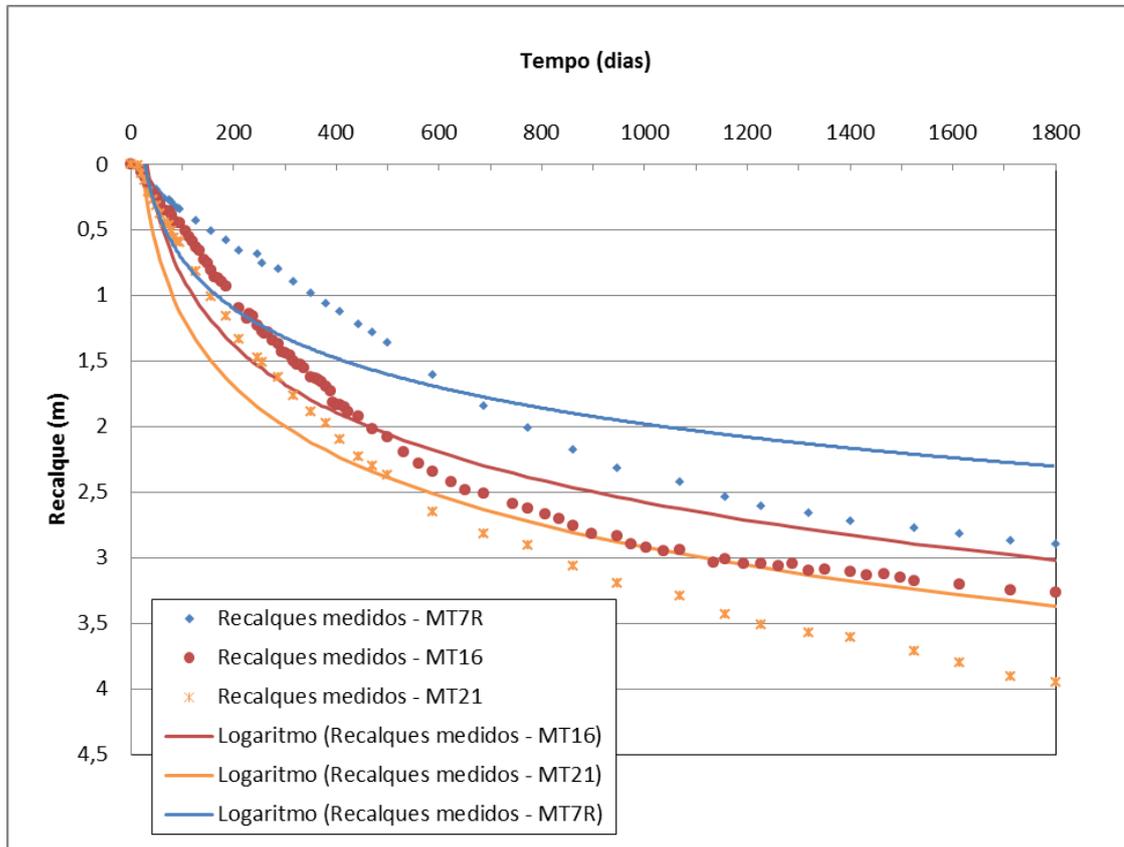


Figura 5.5 – Relação recalque medido e previsto vs. Tempo, com base nas funções logarítmicas simples.

Em geral a utilização de funções logarítmicas apresentaram elevados desvios de recalque quando comparados os valores observados e previstos, não sendo recomendada a sua utilização para previsão de recalques tomando como base o presente caso de estudo.

5.2 Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998)

Conforme descrito no item 2.4.3, Ling et al. (1998) propuseram a utilização de funções hiperbólicas para previsão de recalques. Neste trabalho a formulação adotada foi em termos de deformações (p/H - recalque/altura inicial dos resíduos). O tempo zero foi definido com sendo o tempo de início das leituras de campo.

A Tabela 5.3 apresenta os parâmetros obtidos do modelo hiperbólico e o desvio entre as deformações estimadas e as observadas dos pontos de monitoramento. A Figura 5.6a apresenta as regressões para os marcos 7R, 16 e 21 com a determinação da taxa de recalque inicial ($\rho_0 = 1/a$) e recalque final ($S_{ult} = 1/b$). A partir destes valores transformados para deformações pode-se aplicar o modelo hiperbólico apresentado graficamente na Figura 5.6b.

Tabela 5.3 – Aplicação do Modelo Hiperbólico – Marcos superficiais.

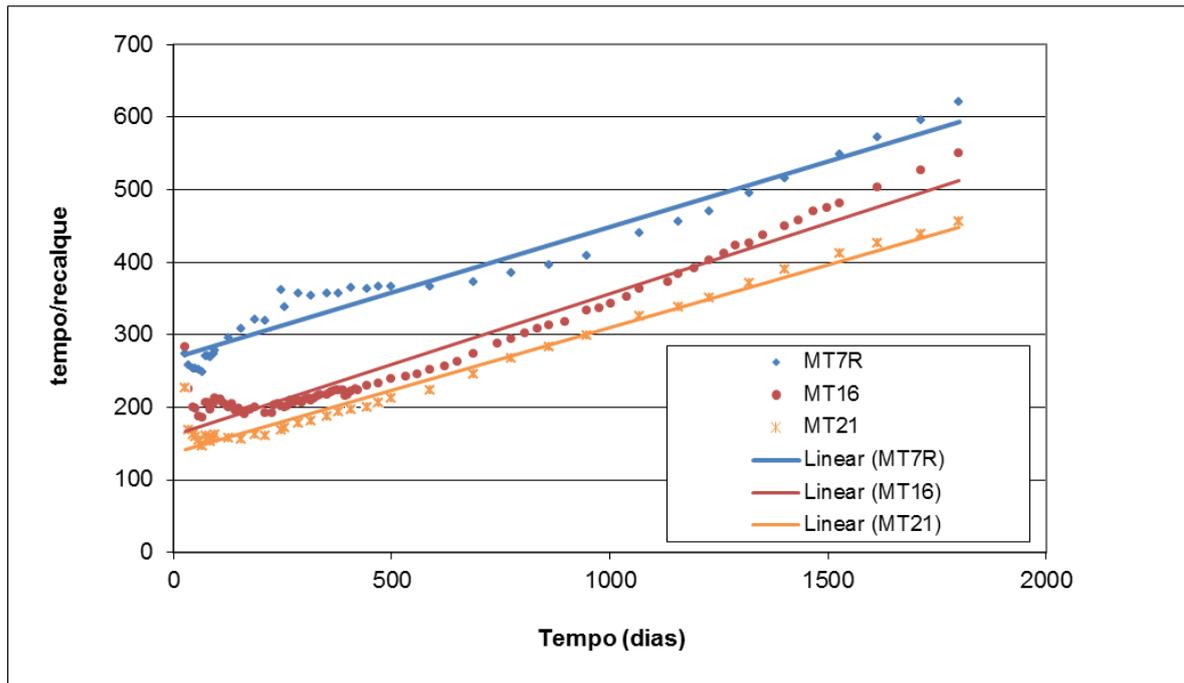
Ponto	H (m)	1/a	1/b	ϵ_{ult} (%)	ρ_0 (% /dia)	Desvio (%)
MT7R	20,0	6,21	0,57	2,75E-01	1,85E-02	4,42
MT9R	14,0	5,15	0,48	2,99E-01	2,27E-02	4,85
MT12	15,0	5,27	0,56	1,51E-01	1,71E-02	-0,17
MT15	20,0	6,92	0,69	1,92E-01	2,12E-02	1,47
MT16	13,5	9,68	0,95	3,80E-01	4,57E-02	7,56
MT21	24,0	11,82	1,20	2,42E-01	3,03E-02	1,71

Obs.: a e b = valores obtidos na regressão linear

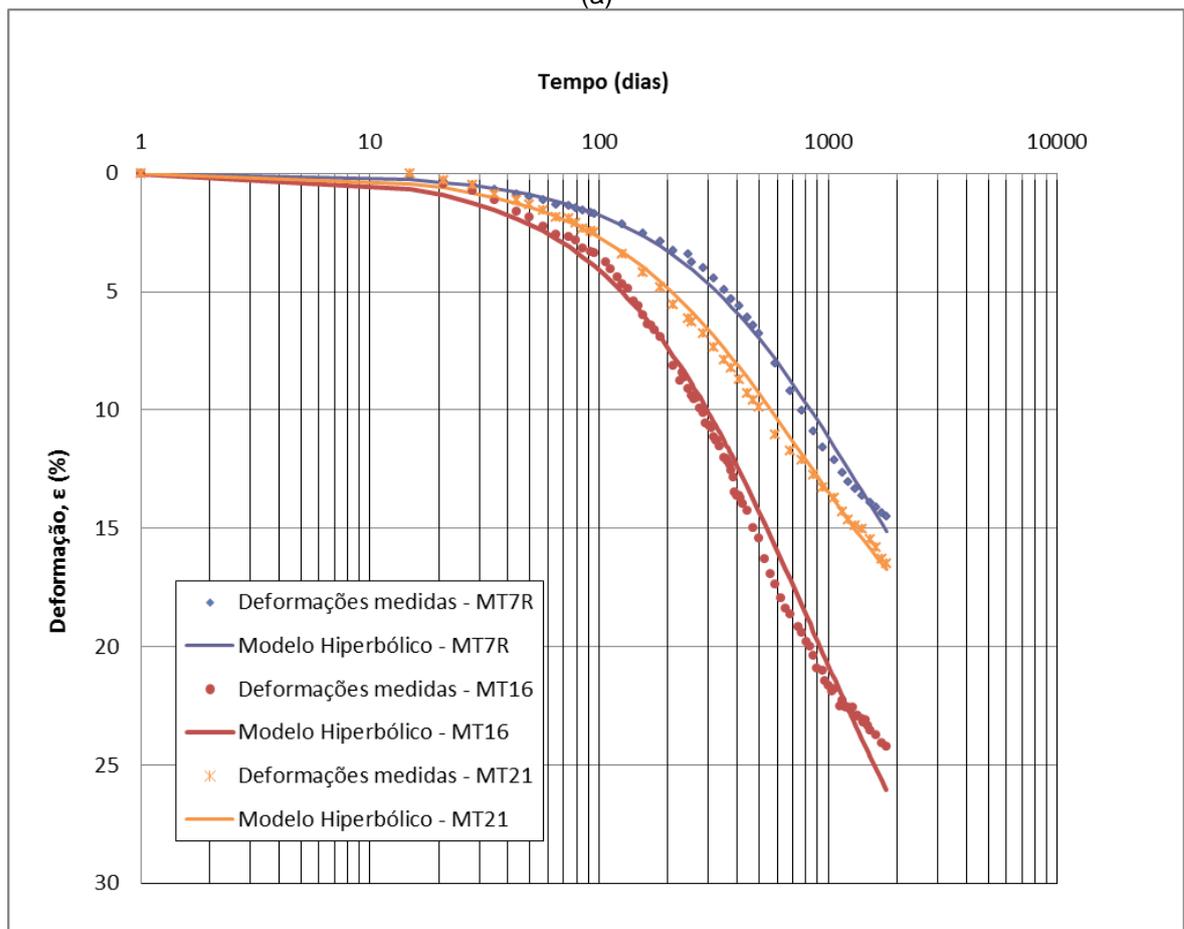
ρ_0 = taxa de recalque inicial

ϵ_{ult} = deformação última

A Figura 5.7 procura comparar os resultados obtidos, em termos das deformações últimas (ϵ_{ult}) e das taxas de deformações iniciais (ρ_0), com os dados dos aterros sanitários de Meruelo, Wisconsin e Bandeirantes.



(a)



(b)

Figura 5.6 – (a) regressão para determinação da taxa de recalque inicial e recalque final; (b) curvas deformação versus tempo para valores observados e previstos com o modelo Hiperbólico.

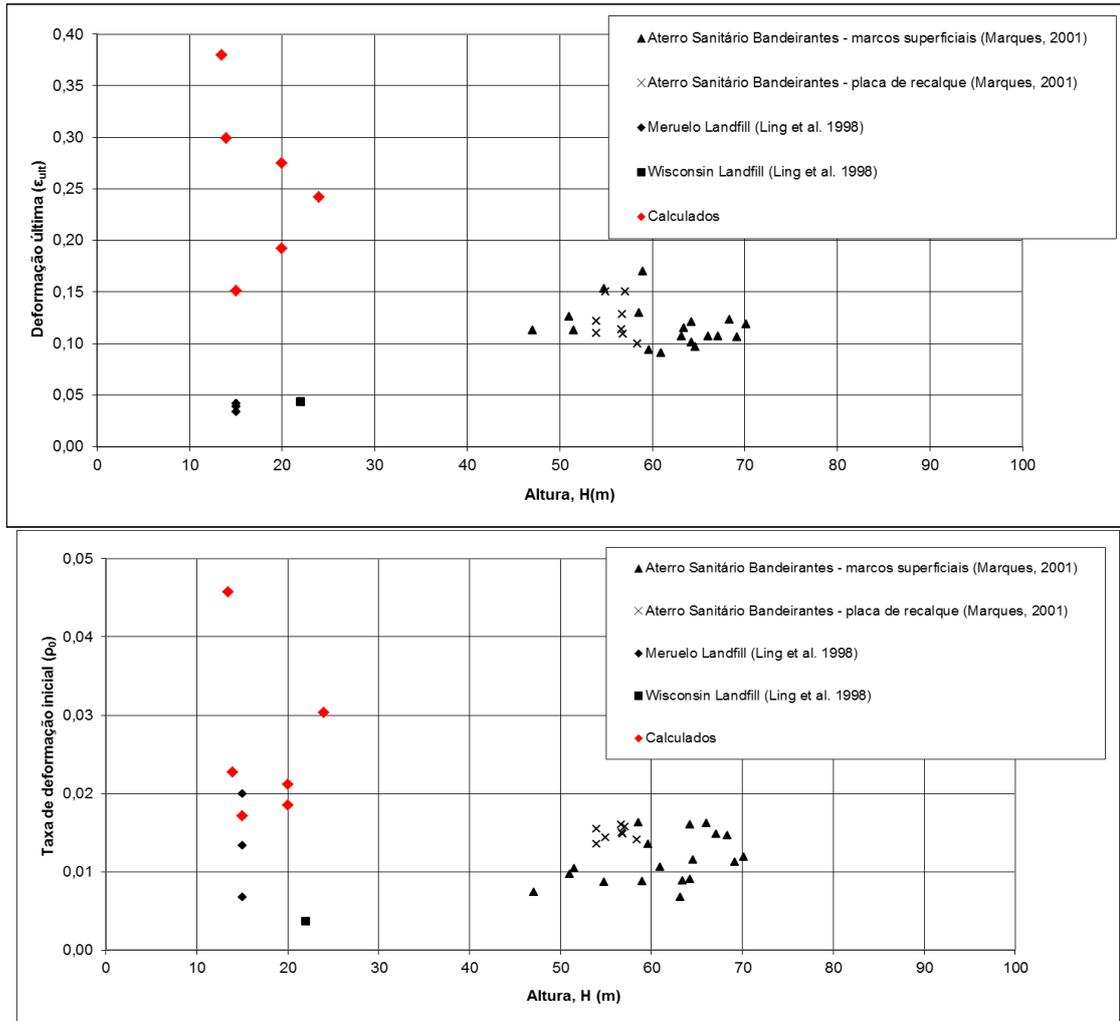


Figura 5.7 – Relação entre a taxa de deformação inicial (ρ_0), a deformação última esperada (ϵ_{ult}) e a altura do maciço (H) a partir do Modelo Hiperbólico.

As alturas dos maciços de resíduo neste estudo estão mais próximas das apresentadas na literatura internacional por Marques (2001). Quando comparado com os resultados do Aterro Bandeirantes, que apresentam alturas bem mais elevadas de resíduos, os resultados das taxas de deformação e deformação última foram superiores.

O uso do Modelo Hiperbólico apresentou boa concordância entre os valores observados e os previstos para os marcos superficiais analisados. A utilização desta proposta, com alguns ajustes, poderia assim, ser recomendada para previsão de recalques do presente estudo, baseada nos resultados obtidos. Segundo Marques (2001) a comparação com os poucos relatos de aplicação na literatura deste modelo mostra resultados consistentes, apesar das significativas diferenças de altura dos maciços de resíduos.

5.3 Edil et al. (1990)

O modelo proposto por Edil et al. (1990) utiliza funções de potência para previsão de recalques em aterros sanitários (modelo descrito no item 2.4.4). O tempo inicial utilizado para verificação do desempenho do modelo foi definido como o tempo do início das leituras dos marcos superficiais. O tempo de referência (t_r) foi assumido igual a 1 dia, conforme proposta da formulação original e adotado também por Marques (2001).

A Figura 5.8 apresenta as curvas recalque vs. tempo medidas e previstas para os marcos superficiais 7R, 16 e 21. A Tabela 5.4 sumariza os desvios de recalque e os parâmetros do modelo obtidos para o conjunto de pontos de controle testados.

Tabela 5.4 – Resultado de aplicação do modelo baseado em funções de potência.

Ponto	H (m)	Desvio (%)				m (1/kPa)	n ($t_r=1$ dia)
		D ₁ (%) t=588dias	D ₂ (%) t=773dias	D ₃ (%) t=1157dias	D ₄ (%) t=1800dias		
MT7R	20,0	0,69	3,00	17,23	52,48	2,60E-06	0,90
MT9R	14,0	-5,69	0,71	20,53	59,87	3,80E-06	0,92
MT12	15,0	-10,35	3,97	13,87	42,30	2,90E-06	0,85
MT15	20,0	-7,94	1,41	17,98	44,78	3,90E-06	0,82
MT16	13,5	1,64	13,66	37,81	82,31	1,40E-06	0,82
MT21	24,0	5,43	19,30	39,19	71,14	6,30E-06	0,79

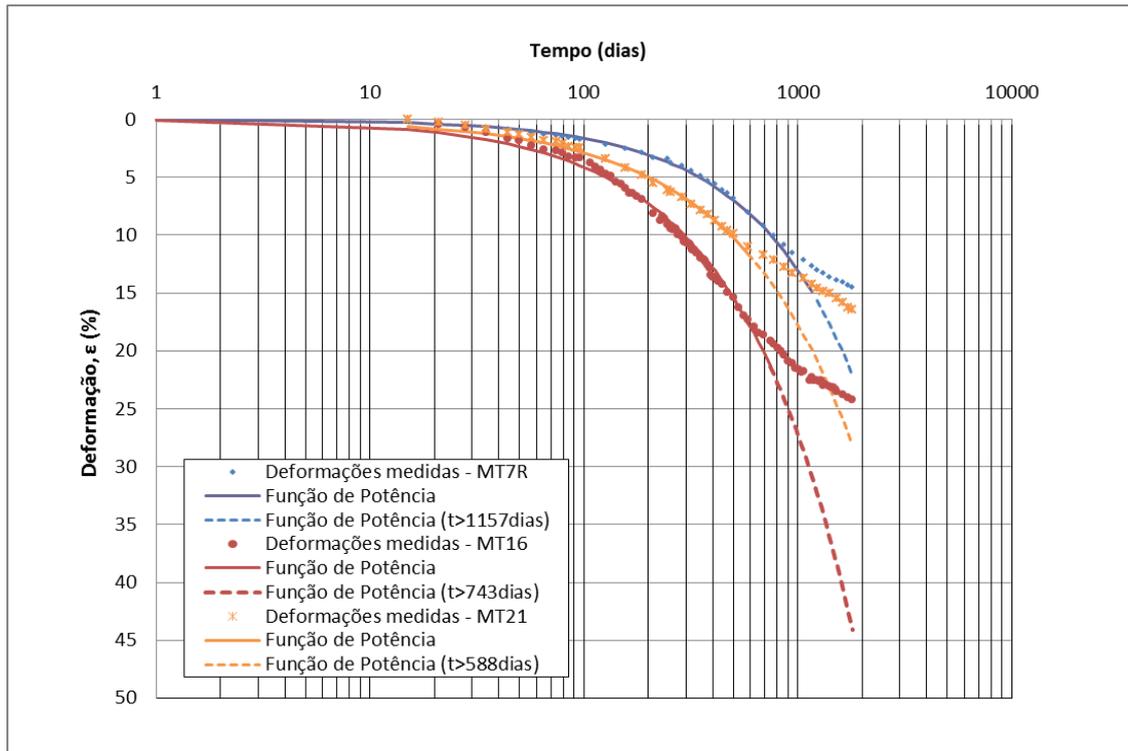


Figura 5.8 – Curvas recalque vs. tempo para os valores medidos e previstos a partir de modelos baseados em funções de potência.

A Figura 5.9, por sua vez, compara os parâmetros obtidos para o modelo com os reportados na literatura para outros aterros sanitários.

A aplicação desta proposta mostrou uma maior concordância entre os dados medidos e os previstos para o tempo até 588 dias, com um desvio de recalque (D) na faixa de 5,29%. Porém, a concordância é menor para os períodos de 773, 1157 e 1800 dias, com desvios de recalques (D) na faixa de 7,01%, 24,44% e 58,81%, respectivamente, quando comparada com o desempenho dos Modelos Hiperbólico e de Yen e Scanlon. Os parâmetros de compressibilidade do modelo não se mostraram sensíveis à altura do maciço, tendo sido observadas taxas de compressão (n) e parâmetros de compressibilidade (m) superiores às reportadas por Marques (2001).

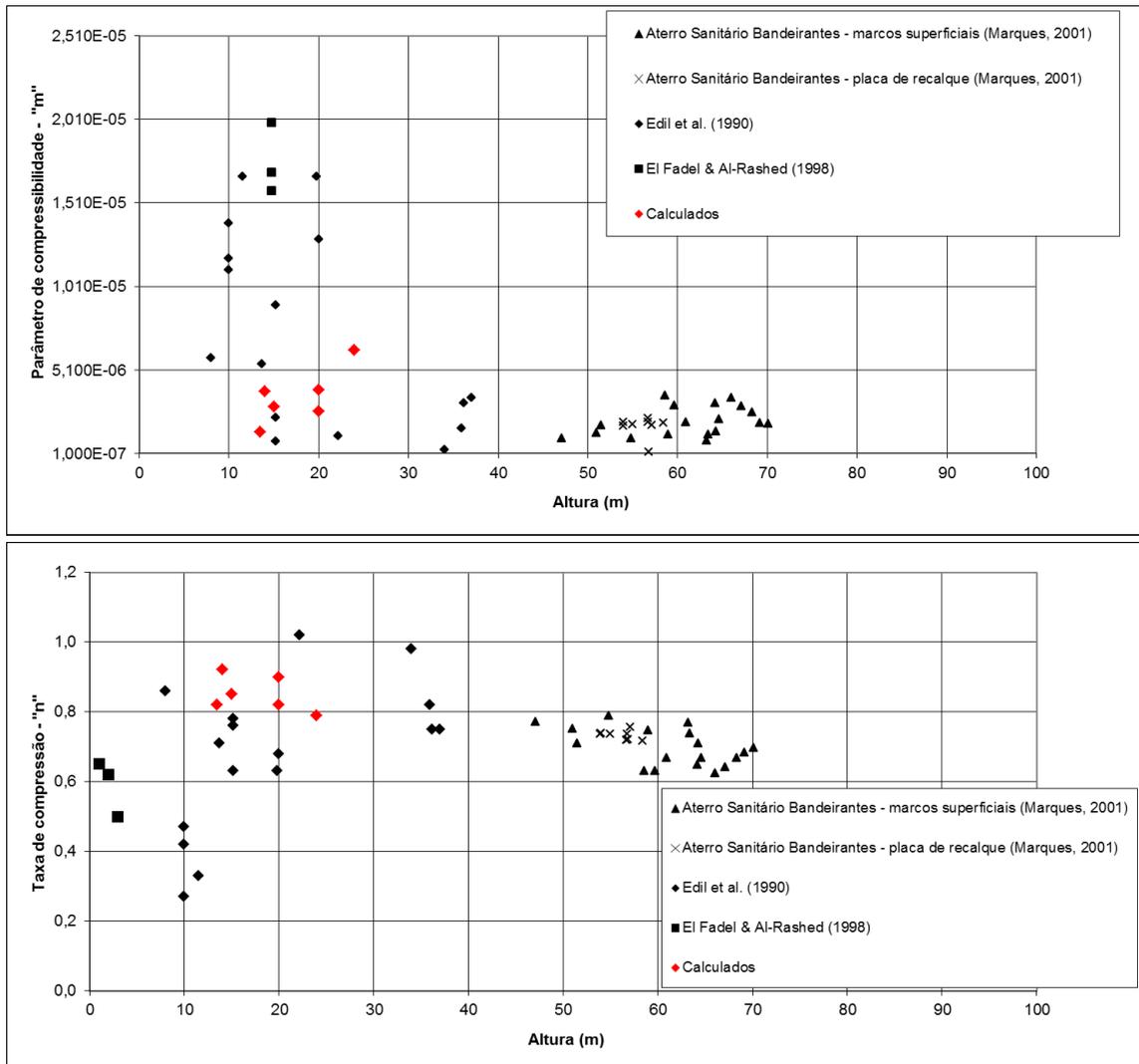


Figura 5.9 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade de modelo baseado em funções de potência e a altura do maciço (H).

5.4 Modelo de Bjarngard e Edgers (1990)

O modelo propõe a determinação de 2 coeficientes, utilizados para reproduzir as fases de compressão secundária dos aterros de resíduos sólidos, conforme descrito no item 2.4.5. O tempo inicial foi assumido como a data inicial das leituras dos marcos superficiais, contudo Marques (2001) salienta que a definição deste tempo influencia muito os resultados. Utilizou-se ajustes matemáticos (planilha eletrônica) para definição dos coeficientes de compressão secundária $C_{\alpha 1}$ e $C_{\alpha 2}$ e procedimento gráfico para determinação do tempo de transição entre as fases de compressão secundária (t_k).

A Tabela 5.5 apresenta o resumo dos desvios de recalque e os coeficientes obtidos para os marcos superficiais analisados neste trabalho. A Figura 5.10 apresenta as curvas de recalques (em termos de deformação) vs. tempo observadas e previstas pelo modelo.

Tabela 5.5 – Resultado da aplicação de Bjarngard e Edgers.

Ponto	H (m)	Parâmetros			Desvio (%)
		$C_{\alpha 1}$	$C_{\alpha 2}$	t_k (dias)	
MT7R	20,0	0,0087	0,0570	242	-1,01
MT9R	14,0	0,0109	0,0640	186	3,63
MT12	15,0	0,0087	0,0347	185	-2,01
MT15	20,0	0,0104	0,0402	138	-0,88
MT16	13,5	0,0202	0,0796	130	2,54
MT21	24,0	0,0151	0,0515	127	-0,09

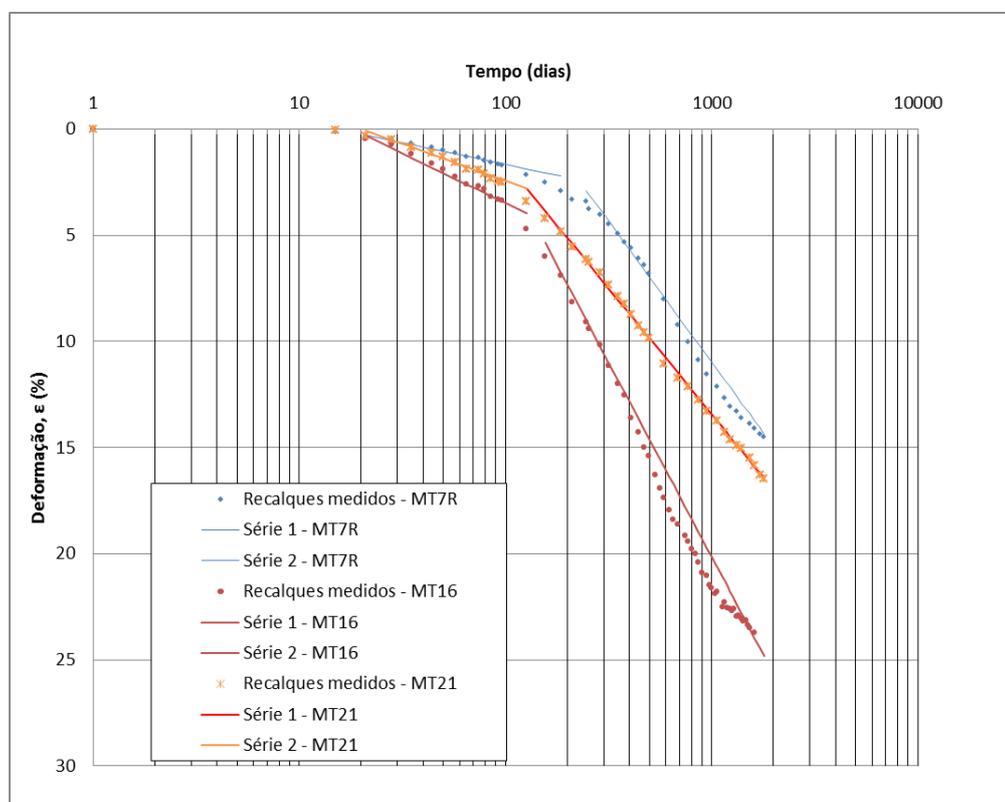


Figura 5.10 – Curvas de recalque vs. tempo para valores medidos e previstos do Modelo Bjarngard e Edgers (1990).

A Figura 5.11 compara os coeficientes obtidos no presente estudo com os obtidos por Marques (2001), Carvalho (1999), El-Fadel (1998) e Bjarngard e Edgers (1990).

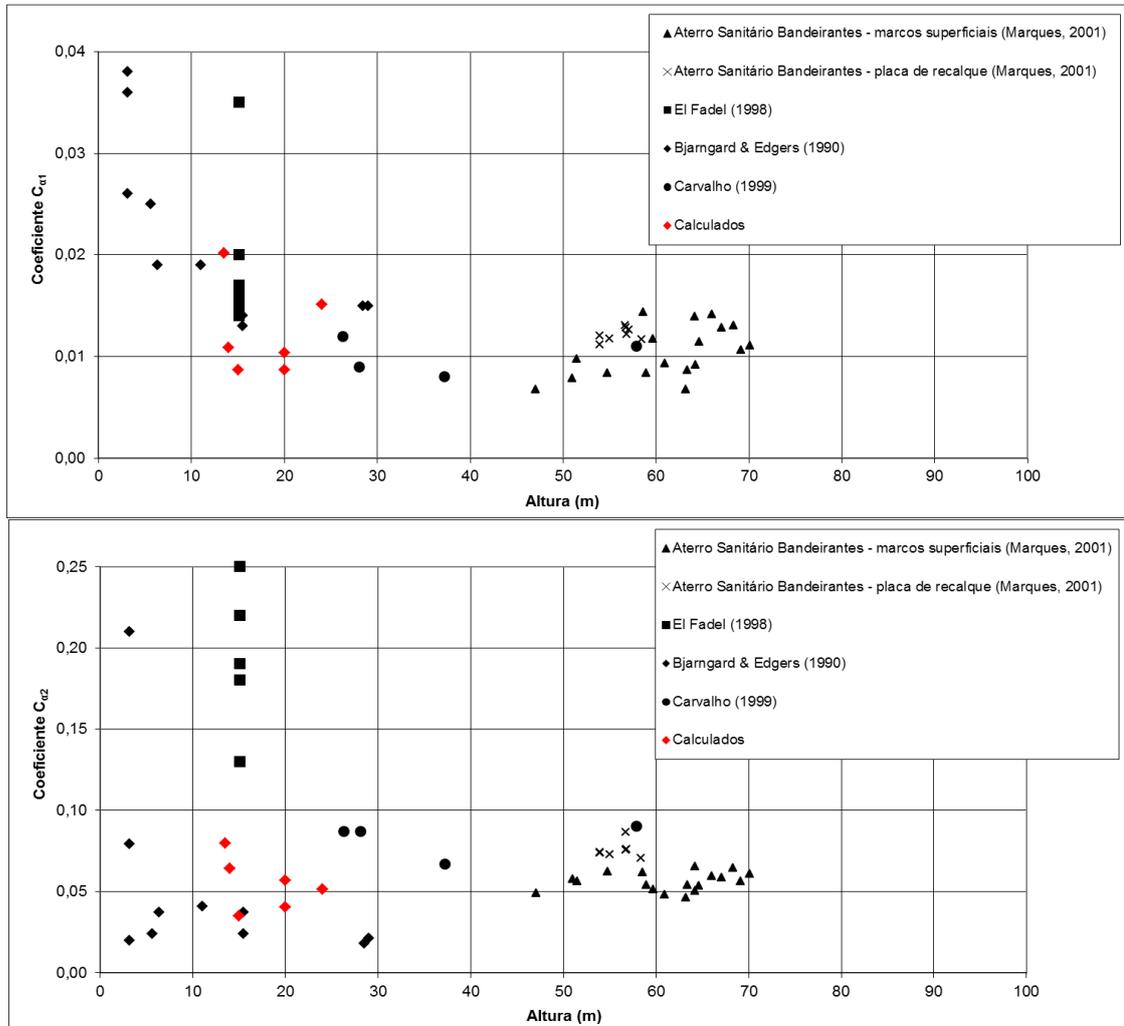


Figura 5.11 – Relação entre os parâmetros de compressibilidade do Modelo de Bjarngard e Edgers (1990) e a altura do maciço (H).

A aplicação deste modelo apresentou uma boa concordância com os dados observados nos marcos superficiais. Os valores médios obtidos para os coeficientes $C_{\alpha 1}$ e $C_{\alpha 2}$ foram 0,0123 e 0,0545, respectivamente. Valores estes da mesma ordem de grandeza dos valores citados na literatura para outros aterros sanitários. Em relação ao tempo de transição entre as fases de compressão (t_k), foram obtidos valores entre 100 e 200 dias, os quais estão na faixa de variação apresentada pelos autores da proposta e por Marques (2001).

5.5 Método Observacional (Asaoka, 1978)

Marques (2001) relata que Manassero e Pasqualine (1993) adotaram o método observacional para previsão de recalques em aterros sanitários com sucesso. Para tanto 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. A proposta está descrita no item 2.4.7.

O recalque final pode ser calculado graficamente ou analiticamente através da equação $\Delta H_{ult} = \beta_0 / [1 - \beta_1]$. A Tabela 5.6 apresenta os resultados analíticos da utilização deste método para os marcos analisados, sendo os intervalos de tempo iguais a 30 dias (mensais) e 90 dias (trimestrais). A Tabela 5.7 apresenta os resultados para o marco 16 em separado, pois para este marco tinha-se leituras mensais até o final do ano de 2011. Para verificar a influência do número de leituras na previsão do recalque último foram simulados com este modelo considerando dados até os anos de 2008, 2009 e 2010.

Com os dados apresentados na Tabela 5.6 e um período de monitoramento de 17 meses (dados mensais até 04/03/2009) os resultados para alguns marcos apresentaram desvios bem elevados, superiores a 70%, como os marcos MT7R e MT9R. Para os outros marcos os desvios entre os recalques estimados e observados situaram-se na faixa entre -30% e 15%. Ao analisar-se com um período de tempo maior (dados trimestrais) os resultados foram bem melhores, sendo os valores estimados de recalques situando-se entre 82% e 97% dos recalques obtidos, indicando uma possível estabilização das deformações. A Figura 5.12 apresenta os resultados gráficos da utilização deste método para os marcos analisados, verificando-se uma tendência de estabilização das deformações.

Para verificar a sensibilidade deste método na estimativa do recalque último, foram considerados 4 séries de dados: (a) dados até o ano de 2008, (b) dados até o ano de 2009; (c) dados até o ano de 2010; e (d) todos os dados (Tabela. 5.7 e Figura 5.13). 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 5.6 – Resultados analíticos obtidos com a utilização do método Asaoka (1978).

Marcos	Parâmetros do modelo	Mensais (até 04/03/2009)	Trimestrais
MT7R $\Delta H = 2,90\text{m}$	β_0	0,089	0,293
	β_1	0,982	0,918
	$\Delta H_{ult} (m)$	5,06	3,52
MT9R $\Delta H = 2,30\text{m}$	β_0	0,072	0,259
	β_1	0,993	0,902
	$\Delta H_{ult} (m)$	9,89	2,66
MT12 $\Delta H = 1,72\text{m}$	β_0	0,091	0,199
	β_1	0,926	0,895
	$\Delta H_{ult} (m)$	1,22	1,91
MT15 $\Delta H = 2,52\text{m}$	β_0	0,129	0,325
	β_1	0,943	0,879
	$\Delta H_{ult} (m)$	2,28	2,68
MT21 $\Delta H = 3,95\text{m}$	β_0	0,227	0,565
	β_1	0,934	0,862
	$\Delta H_{ult} (m)$	3,46	4,08

Tabela 5.7 – Resultados analíticos obtidos com a utilização do método Asaoka (1978) para o marco MT16.

	Parâmetros do modelo	Dados até 2008	Dados até 2009	Dados até 2010	Todos os dados
MT 16 $\Delta H = 3,27\text{m}$	β_0	0,204	0,202	0,206	0,205
	β_1	0,938	0,941	0,941	0,939
	$\Delta H_{ult} (m)$	3,30	3,44	3,44	3,37

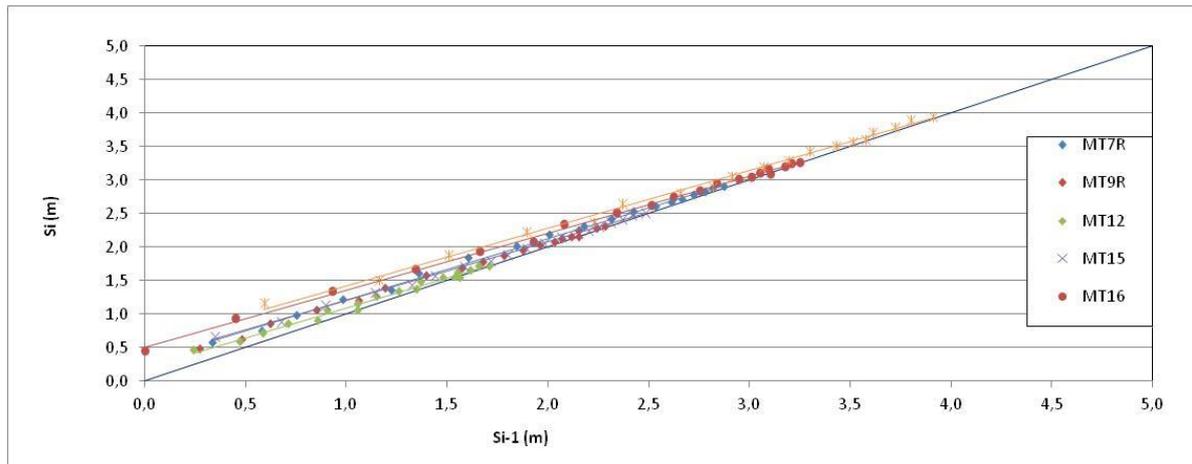


Figura 5.12 – Resultado gráfico da utilização do método Asaoka (dados trimestrais).

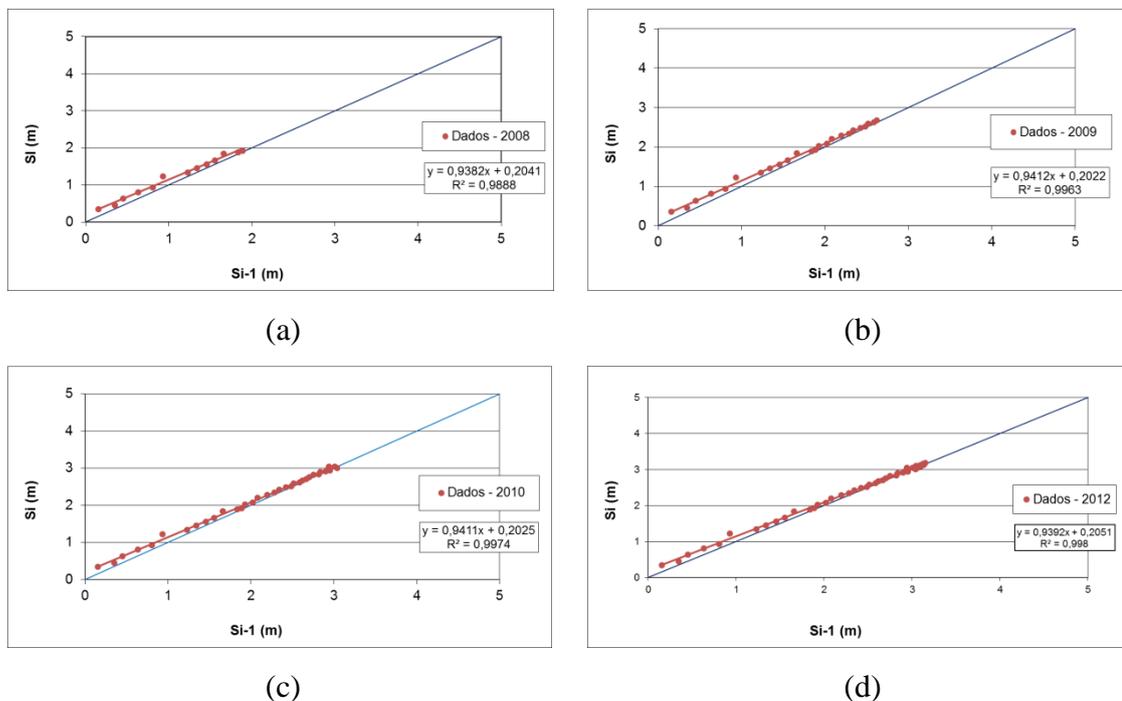


Figura 5.13 – Resultado gráfico da utilização do método Asaoka para o MT16. (a) dados até 2008; (b) dados até 2009; (c) dados até 2010; (d) todos os dados.

O estudo de modelos de compressibilidade aplicados a resíduos sólidos neste trabalho mostrou que algumas propostas apresentaram um comportamento satisfatório, com os valores estimados/calculados da mesma ordem de grandeza que os observados (Figura 5.14). Enquanto outros modelos não foram capazes de estimar satisfatoriamente os recalques observados, portanto, não apresentando uma boa aderência.

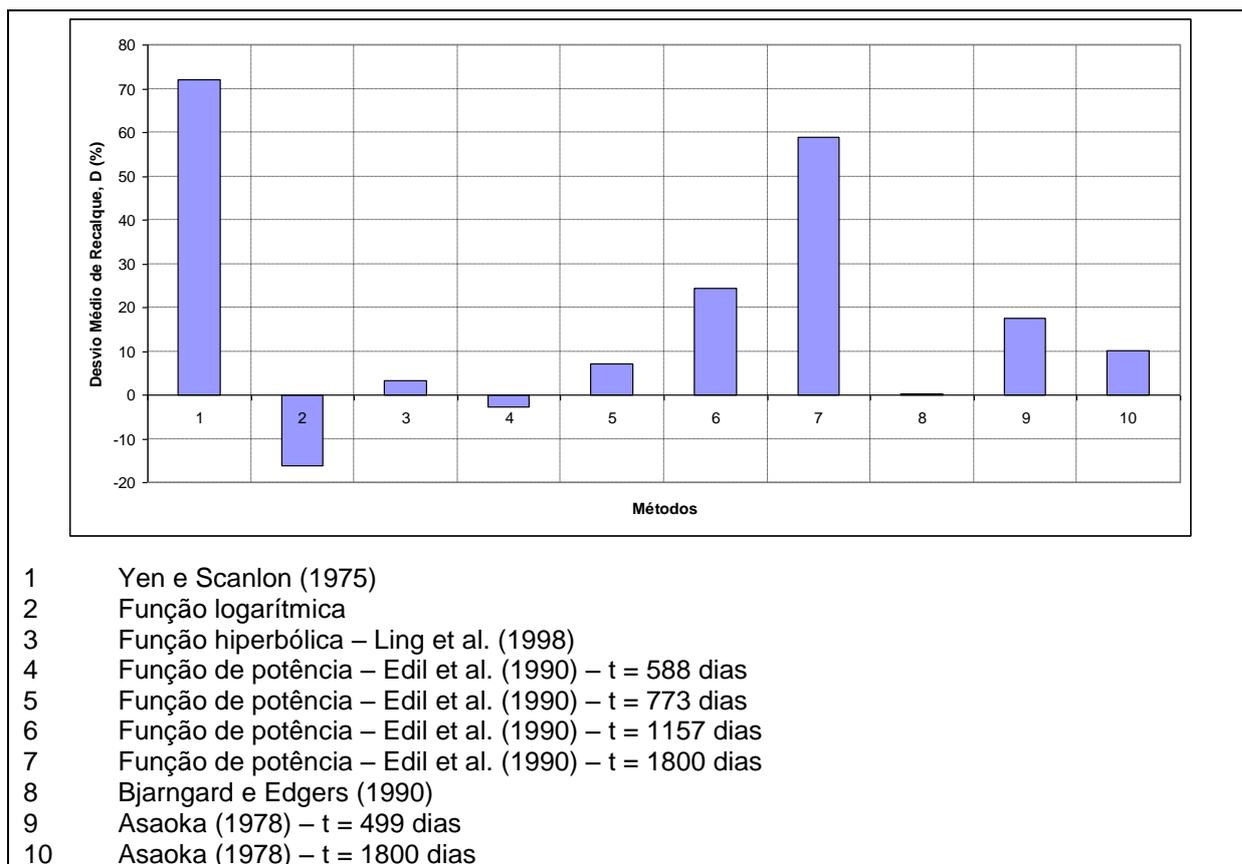


Figura 5.14 – Aplicação dos modelos analisados. Desvios médios para os recalques dos marcos superficiais.

Entre os métodos que não apresentaram boa aderência com os valores observados de recalque destacam-se o modelo de Yen e Scanlon (1975), as propostas baseadas em funções logarítmicas e de potência (para tempo superior a 1000 dias).

O método de Bjarngard e Edgers (1990), o modelo hiperbólico de Ling et al. (1998) e a função de potência de Edil et al (1990) para tempos inferiores a 773 dias apresentaram uma aderência satisfatória entre os valores observados e calculados. Salienta-se que a utilização de modelos baseados em simples formulações matemáticas, com parâmetros e coeficientes muitas vezes sem significado físico, e que visam simplesmente ajustar uma curva, devem ser evitados ou utilizados com ressalvas (MARQUES, 2001; TAPAHUASCO, 2009).

O método observacional de Asaoka (1978), não simula o ajuste da curva, mas sim o recalque final, apresentou resultados satisfatórios. Na análise dos resultados verificou-se que os marcos MT15, MT16 e MT21 já estão estabilizando as

deformações, ou seja com recalque medidos superiores a 90% dos recalques finais estimados.

Vários autores tendo por base a análise de desempenho dos modelos existentes de estimativa de recalques e os mecanismos de compressão atuantes tem concebido modelos reológicos compósitos para representar o comportamento dos resíduos sólidos urbanos sob o ponto de vista de sua compressibilidade. Destacam-se na literatura nacional os modelos propostos por Marques (2001), Simões (2000) e Tapahuasco (2009). Em geral estes métodos necessitam da sequência de construção do aterro e permitem que defina-se a compressão atuante em camada aterrada (célula).

Conclui-se que para o caso em estudo o modelo hiperbólico de Ling et al. (1998) e Bjarngard e Edgers (1990) foram os que se apresentaram com melhor aderência com os dados de monitoramento. 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.

6. CONCLUSÕES

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

A análise dos cinco modelos de compressibilidade adotados neste trabalho, tendo por base os dados de monitoração da Central de Resíduos do Recreio, constituíram a base de estudo para o desenvolvimento desta pesquisa.

Devem ser destacadas as seguintes limitações destes modelos: a utilização, por algumas propostas, de equações matemáticas, tendo por objetivo o simples ajuste das curvas de recalque; a definição do parâmetro tempo, especificamente do tempo de início do processo de compressão dos resíduos, o qual na maioria das propostas é fixado ao início do período de monitoração ou ao encerramento do aterro; o desprezo as parcelas de recalque ocorridas no período construtivo, não considerando o histórico de construção do aterro sanitário; a consideração do maciço como um corpo único, não sendo considerado que diversas fases (camadas), com características distintas, foram dispostas no aterro em tempos igualmente distintos.

A aplicação do Modelo de Yen e Scanlon (1975) para os marcos superficiais do aterro da Central de Resíduos do Recreio não apresentou resultados consistentes, da mesma maneira que para Marques (2001), com desvios de recalques na faixa de 71,9%. Com a utilização de funções logarítmicas simples para estimativas de recalques, propostas por Ling et al. (1998), os desvios de recalque apresentaram valores menores, na faixa de -16,2%, porém igualmente elevados. Durante os primeiros 400 dias o modelo apresentou valores próximos aos reais, mas não se manteve ao longo dos 1800 dias de monitoração.

O Modelo Hiperbólico de Ling et al. (1998) apresentou desvios na ordem de 3,4%, observa-se que até os 1500 dias de monitoramento o modelo apresentou boa concordância entre os valores observados e os medidos. Porém, não acompanhou a estabilização do aterro. Com alguns ajustes, poderia ser utilizado para previsão de recalques do presente estudo.

Os valores de deformação última (ϵ_{ult}) situaram-se entre $1,51 \times 10^{-1}$ e $3,80 \times 10^{-1}$, e os valores de taxa de deformação inicial (ρ_0) ficaram entre $1,71 \times 10^{-2}$ e $4,57 \times 10^{-2}$ %/dia. Os valores de deformação última indicam deformação entre 15 e 38% em

relação a altura inicial dos resíduos. As taxas de deformação inicial ficaram próximos aos apresentados por Ling et al. (1998) para o Meruelo Landfill.

Na proposta de Edil et al. (1990), os desvios ficaram na faixa de 5,3% para os primeiros 600 dias de monitoração, porém foram aumentando com o decorrer do tempo, chegando a 58,8% ao fim dos 1800 dias de monitoração.

Os valores para o parâmetro de compressibilidade (m) variaram entre $1,40 \times 10^{-6}$ e $3,90 \times 10^{-6}$, valores estes semelhantes aos apresentados por Edil et al. (1990) e Marques (2001). Os valores de taxa de compressão (n) situaram entre 0,79 e 0,92, localizando na parte superior dos valores encontrados na literatura.

O Modelo de Bjarngard e Edgers (1990) apresentou desvios na ordem de 1,7%, porém foram necessários ajustes matemáticos para definição dos coeficientes de compressão secundária $C_{\alpha 1}$ e $C_{\alpha 2}$ e procedimento gráfico para determinação do tempo de transição entre as fases de compressão secundária (t_k).

Os coeficientes $C_{\alpha 1}$ e $C_{\alpha 2}$ apresentaram valores semelhantes aos apresentados por Marques (2001), entre 0,0087 e 0,0202 e 0,0347 e 0,0796, respectivamente.

O Método Observacional (Asaoka, 1978) apresentou resultados satisfatórios principalmente para os marcos MT15, MT16 e MT21, que com os dados até 03/2008 utilizados na extrapolação dos recalques apresentaram valores razoáveis de estimativa. Por este método conclui-se que os marcos MT7R, MT9R e MT12 apesar da taxa de deformação estar diminuindo com o tempo, estes marcos ainda apresentaram recalques entre 0,20 e 0,60m.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. **NBR 10.004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

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.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

ABREU, R. C. **Compressibilidade de maciços sanitários**. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de São Paulo.

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.

BABU, G. L. S.; REDDY, K. R.; CHOUSKEY, S. K.; KULFARNI, H. S. **Prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement using constitutive model**. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, ASCE, p.139-150, 2010.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. São Paulo, 2008. Oficina de textos.

BOSCOV, M. E. G., ABREU, R. C. **Aterros sanitários: previsão de desempenho x comportamento real**. São Paulo, 2000. ABMS.

CALLE, J. A. C.; EHRLICH, M.; MAHLER, C. F. **Caracterização e comportamento mecânico de resíduos sólidos pré-tratados**. Geotecnia, 116, p. 99-112, 2009.

CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico dos resíduos sólidos**. São Carlos: EESC-USP, 1999, 306 p. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CARVALHO, A. R. **Percâmetro: Um novo equipamento para medidas de parâmetros geotécnicos de resíduos sólidos. Desenvolvimento e Aplicação no Aterro Sanitário de santo André**. Viçosa: UFV, 2002. 114p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

CASSINI, S. T.; **Digestão de Resíduos Sólidos Urbanos e aproveitamento de Biogás**. São Carlos: Rima Editora ABES-Finep-Prosab, 2003. v 01. 210 pg.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F.; BATISTA, H. P.; MARTINS, H. L. **Avaliação da Compactação dos Resíduos Sólidos Urbanos Dispostos no Aterro Sanitário da BR-040 em Belo Horizonte – MG.** [CD ROM]. In: 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - REGEO'2003. Porto Alegre/RS: ABMS, 2003.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação.** Belo Horizonte: UFMG, 2008, 316 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CHEN, Y.; KE, H.; FREDLUND, D. G.; ZHAN, L.; XIE, Y. **Secondary compression of municipal solid wastes and a compression model for predicting settlement of municipal solid waste landfills.** J. Geoenviron. Eng., ASCE, v. 136, p. 706-717, 2010.

CATERPILLAR. **Manual de gerenciamento de resíduos** (ref. APDS0227). Washington: Caterpillar, 2001.

CODUTO, D. P.; HUITRIC, R. **Monitoring landfill movements using precise instruments.** Geotechnics of waste fills-theory and practice, STP 1070, Landva and Knowles (eds), ASTM, West Conshocken, Pa., 1990, pp. 358-369.

COUMOULOS, D. G., KORYALOS, T. P. **Prediction of attenuation of landfill settlement rates with time.** In: fourteenth international conference on soil mechanics and foundation engineering. Hamburg, 1997.

D'ALMEIDA, M. L. O., VILHENA, A. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado.** 1. Ed. São Paulo, 1998. IPT Publicação.

D'ALMEIDA, M. L. O., VILHENA, A. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado.** 2. Ed. São Paulo, 2000. IPT Publicação.

DANTAS, L. J.; **Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.** Campina Grande: ABES/PB, 2007. 267 pg.

DIAZ, J. G. L.; NAREA, M. S.; SANCHEZ-ALCITURRI, J. M.; IBARRA, A. A.; MONZON, L. T.; GONZALES, J. P.; LAMIA, M. F. **Estimating material losses in sanitary landfills through biological degradation.** Proc. 5th International Landfill Symposium – Sardinia 95, Cagliari, Italy, p. 203-208, 1995.

DELLABIANCA, L. M. A; DELLABIANCA, S. M. A; OLIVEIRA, D. R.; GARCIA, H. A. G. **Análise numérica do recarregamento de uma célula de resíduos sólidos urbanos.** In: REGEO, Porto Alegre, 1999.

ESPINACE, R.; PALMA, G. H., SANCHEZ-ALCITURRI, J. M. **Experiencias de aplicación de modelos para la determinación de los asentamientos de rellenos**

sanitários. In: panamerican conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Foz do Iguaçu, 1999.

FAKHER, A. **Experimental study on the compaction of waste.** In: International Congress on Environmental Geotechnics, 5, 2006, Cardiff, England. Proceeding... Cardiff, 2006.

GABR, M. A.; VALERO, S. N. **Geotechnical properties of municipal solid waste.** Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, v. 18, no.2, p. 241-251, 1995.

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.

GOMES, L. P.; CONCEIÇÃO, D. C.; FLECK, A. **Avaliação dos recalques em sistemas piloto de aterramento de resíduos sólidos urbanos.** In: Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. 19,1997, Foz do Iguaçu, PR. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 1997.

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

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

HOSSAIN, M. S.; GABR, M. A.; BARLAZ, M. A. **Relationship of compressibility parameters to municipal solid waste decomposition.** In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 129, n. 12, pp.1251-1158, 2003.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Pesquisa Nacional de saneamento Básico (PNSB) de 2008.** Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 30 de julho de 2011.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING. Report of the ISSMGE Technical committee TC-5 on environmental geotechnics. 1997.

JUCÁ, J. F. T. Destinação final dos resíduos sólidos no Brasil: situação atual e perspectivas. RESID'2004, Seminário sobre resíduos sólidos, 2004.

KAIMOTO, L. S. A., ABREU, R. C. **Alguns aspectos sobre recalques e deslocamentos horizontais em aterros sanitários.** In: REGEO'99 – Congresso brasileiro de geotecnia ambiental. São José dos Campos, 1999. ABMS.

KOCKEL, R., KONIG, D., SYLLWASSCHY, O. **Three basic topics on waste mechanics**. In: fourteenth international conference on soil mechanics and foundation engineering. Hamburg, 1997.

LEITE, H. E. A. S. **Estudo do comportamento de aterros de RSU em biorreator em escala experimental na cidade de Campina Grande-PB**. Dissertação, Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

LING, H. I. et al. **Estimation of municipal solid waste landfill settlement**. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 1998.

LIU, C. N.; CHEN, R. H.; CHEN, K. S. **Unsaturated consolidation theory for the prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement**. In: Waste Management & Research, v.24, n. 1, pp.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**. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2002, v.128, p. 940-951.

MARIANO, M. O. H.; JUCÁ, J. F. T. **Recalques superficiais no aterro da Muribeca – valores medidos e previstos**. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 9, 2000, Porto Seguro, BA. Anais... Rio de Janeiro, ABES, 2000.

MARQUES, A. C. M. Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos em Geotecnia, Tese de Doutorado, Dep. Geotecnia EESC/Universidade de São Paulo, São Carlos, 408p. 2001.

MARQUES, A. C. M.; FITZ, G. M.; VILAR, O. M. **Composite compressibility model for municipal solid waste**. J. Geotech. Geoenviron. Eng., v.129, p. 372-378.2003

MARQUES, A. C. M.; VILAR, O. M.; KAIMOTO, L. S. Compactação de resíduos sólidos urbanos. Solos e Rochas, São Paulo, 25 (1), p. 37-50, 2002.

MASSAD, F. **Método gráfico para o acompanhamento da evolução dos recalques com o tempo**. In: VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Olinda/Recife – PE, Anais... São Paulo, ABMS, 1982, p. 321-331.

MELO, M. C. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 127p. 2003.

MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D.; JUCÁ, J. F. T. **Recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos associados às condições climáticas, aspectos mecânicos e biológicos**. Solos e Rochas, São Paulo, 29, (3), p. 311-321, 2006.

OLIVEIRA, S. et al. **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em Comunidades de médio porte. Artigo.** Botucatu/SP: FCA/UNESP. Disponível em < <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/resisoli/peru/brares033.pdf> >. Acesso em 10 de agosto de 2008.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos estados críticos.** Terratek, 3ª Edição, 2007.

PARK, H. I.; LEE, S. R.; DO, N. Y. **Evaluation of decomposition effect on long-term settlement prediction for fresh municipal solid waste landfills.** J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2002, v.128, p. 107-118.

PAUZI, N. I. M; OMAR, H.; HUAT, B. K.; MISRAN, H. **Settlement model of waste soil for dumping area in Malaysia.** EJGE, 2010. v. 15, p.1918-1929, 2010.

PINTO, C. S. **Considerações sobre o método de Asaoka.** Solos e Rochas, v. 24, no. 1, 2001, p.95-100.

QUIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. **Geotechnical aspects of landfill design and construction.** New Jersey: Prentice Hall, 2001, 768 p.

SANTOS, S. M. **Propriedades geotécnicas de um aterro de resíduos sólidos.** Recife: UFPE, 1997, 98 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1997.

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.

SHARMA, H. D.; E LEWIS, S. P. **Waste containment Systems, Waste Stabilization and Landfills – Design and Evaluation.** New York: John Willey and Sons, 1994, 608 p.

SIMÕES, G. F. **Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2000. 136 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A. **Assessment of long-term settlement prediction models for municipal solid wastes disposed in an experimental landfill.** Soils and Rocks, São Paulo, 33 (2), p. 55-67, 2010.

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

TAPAHUASCO, W. F. C. **Avaliação de modelos de previsão dos recalques dos resíduos sólidos do aterro Jockey Clube de Brasília.** Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, 2005.

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 de Doutorado – Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil, UnB. 2009.

TCHOBANOGLIOUS, G., THIESEN, H., VIGIL, S. A. **Integrated Solid Waste Management - Engineering Principles and Management Issues.** McGraw-Hill International Editions. ISBN 0-07-063237-5.978p. 1993.

VAN MEERTEN, J. J., SELLMEIJER, J. B., PEREBOOM, D. **Predictions of landfill settlements.** In: international landfill symposium. Cagliari, 1995.

WALL, D. K., ZEISS, C. **Municipal landfill biodegradation and settlement.** Journal of environmental engineering. Asce, 1995.

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

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

ZIMMERMAN, R. E., CHEN, W. H., FRANCKIN, A. G. **Mathematical model for solid waste settlement.** In: geotechnical practice for disposal of solid waste materials. Asce, 1977.