

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências Faculdade de Engenharia

Leandro Rangel Corrêa

Análise de recalques a longo prazo no antigo vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu – RJ.

> Rio de Janeiro 2017

Leandro Rangel Corrêa

Análise de recalques a longo prazo no antigo vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu – RJ.

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tratamento e Destino Final de Resíduos Sólidos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Elisabeth Ritter Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk

> Rio de Janeiro 2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C824Corrêa, Leandro Rangel.

Ánálise de recalques a longo prazo no antigo vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu – RJ / Leandro Rangel Corrêa – 2017. 102f.

Orientador: Elisabeth Ritter. Coorientador: Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

Engenharia Ambiental. 2. Resíduos sólidos - Dissertações.
 Compressibilidade - Dissertações. 4.Monitoramento ambiental

 Dissertações. 1. Ritter, Elisabeth. II. Van Elk, Ana Ghislane
 Henriques Pereira. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
 IV. Título.

CDU 628.4

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Leandro Rangel Corrêa

Análise de recalques a longo prazo no antigo vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu – RJ.

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tratamento e Destino Final de Resíduos Sólidos.

Aprovada em: 14 de março de 2017. Banca examinadora:

> Prof.^a Dr.^a Elisabeth Ritter (Orientadora) Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof.^a Dr.^a Ana Ghislane H. Pereira van Elk (Coorientadora) Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Gustavo Ferreira Simões Escola de Engenharia - UFMG

> Rio de Janeiro 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço e dedico o presente estudo, primeiramente a Deus, que me deu o dom da vida e vem me dando muitas graças ao longo dela.

Aos meus pais, Mario e Maria da Conceição, por dedicarem suas vidas à felicidade de todos os que estão ao redor deles, especialmente a mim e minha irmã.

À minha mulher e à minha irmã, Priscila e Lívia, por me amarem incondicionalmente e apoiarem a todo momento.

À professora Elisabeth Ritter, por todo o esforço para a evolução do programa e suporte fornecido aos seus alunos, especialmente a mim, na posição de orientadora.

À professora Ana Ghislane, por coorientar com muita educação, paciência e sabedoria o presente estudo, me proporcionando adquirir os conhecimentos necessários na matéria e na vida acadêmica e profissional como um todo.

Aos meus grandes amigos Lucas Rangel, Vinícius Argento, Wallace Rodrigues, Renan Leite, Pedro Ivo, Renan Carvalho, Guilherme Nacif e Lucca Zennaro, por entenderem que meu afastamento não foi por falta de atenção e companheirismo, mas pela busca do conhecimento.

Aos meus amigos e colegas de profissão Thiago Milagres, Bruno Peixoto, Juliana Pimenta, David Andrade, Carlos Renato, Gabrielle Azancot, Clarissa Rizzini, Clarisse Rangel, Pedro Diniz, Caroline Lopes, Rodrigo Sanguedo, Renato Holetz, Luiz Felipe, Luciano Damasceno e João Pedro Pinheiro, por todo o apoio, amizade e conhecimento concedidos durante a caminhada profissional.

E aos caros colegas Carlos Canejo, Diogo Barbosa e Elis Regina por contribuírem de diversas maneiras na realização do presente estudo, inclusive com a concessão da área do antigo vazadouro de Marambaia.

RESUMO

CORRÊA, Leandro Rangel. Análise de recalques a longo prazo no antigo vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu – RJ. 2017. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

O presente trabalho versa sobre a análise da compressibilidade dos RSU do antigo vazadouro da Marambaia, localizado no município de Nova Iguaçu – RJ, que operou durante o período de 1987 a 2003 como lixão, foi remediado e operou como aterro controlado durante os anos de 2001 a 2004. O estudo foi levado a cabo através de dados de monitoramento de recalque superficial obtidos por meio de marcos superficiais em um período de 2008 a 2015. Estes dados foram analisados à luz dos seguintes modelos de compressibilidade: Sowers (1973), Meruelo (PALMA, 1995), Ling et al. (1998) e Oweis (2006). Com o monitoramento foi possível avaliar a compressibilidade dos RSU e obter parâmetros para calibrar os modelos matemáticos, permitindo observar que os recalques variaram entre 79 e 204 mm, representando deformações na faixa de 0,16 a 0,41%. As velocidades de recalques estavam entre 0,029 e 0,333 mm/dia. O modelo de melhor desempenho foi o Ling et al. (1998), com um desvio médio de 7,93%. Quanto à previsão, tanto o modelo Ling et al. (1998), quanto o Meruelo (PALMA, 1995) indicaram uma futura estabilização do aterro, já os modelos Sowers (1973) e Oweis (2006) mostraram que, mesmo para previsões considerando um tempo muito longo, não existiu tendência de estabilização, fato que se concluiu ser incoerente.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos; Recalque; Compressibilidade; Modelos.

ABSTRACT

CORRÊA, Leandro Rangel. *Long-term* settlement analysis on the Marambaia's exdump-site, Nova Iguaçu - RJ. 2017. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

The present work is about an analysis of the compressibility of MSW on the Marambaia's ex-dump-site, located at Nova Iguaçu city – RJ, that operated from 1987 to 2003 and was remediated and operated as a controlled landfill from 2001 to 2004. The study was carried out through superficial settlement monitoring data, using surface marks, between 2008 and 2015. These data was analyzed in light of the following compressibility models: Sowers (1973), Meruelo (PALMA, 1995), Ling et al. (1998) and Oweis (2006). With the monitoring it was possible to evaluate the compressibility of the MSW and obtain parameters that governed the mathematical models, allowing to observe that the settlements varied between 79 and 204 mm, representing deformations in the range of 0.16 to 0.41%. Velocities varied between 0.029 and 0.333 mm/day. The best performance model was that of Ling et al. (1998), with an average deviation of 7,93%. As for the prediction, both the Ling et al. (1998) and Meruelo (PALMA, 1995) models indicated a future stabilization of the landfill, however the models of Sowers (1973) and Oweis (2006) showed that, even if a great amount of time is considered in the forecast, there is no tendency of future stabilization of the landfill, a fact that was found to be incoherent.

Keywords: Solid Waste; Settlement; Compressibility; Models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ocorrência dos mecanismos de recalque com o tempo	30
Figura 2 – Classificações temporais dos recalques	31
Figura 3 – Classificações temporais dos recalques	32
Figura 4 – Acesso à área de estudo	54
Figura 5 – Vista aérea do vazadouro (maio/2000)	56
Figura 6 – Catadores em atividade no antigo Lixão	56
Figura 7 – Usina de queima de Biogás	58
Figura 8 – Vista aérea do Aterro Controlado da Marambaia em 2000 (a)	, 2002 (b),
2008 (c), 2009 (d), 2010 (e) e 2016 (f)	60
Figura 9 – Execução de sondagem e análise dos resíduos	63
Figura 10 – Marco Superficial 20	64
Figura 11 – Localização dos Marcos Superficiais na área de estudo	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Brasil em
2008
Gráfico 2 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares no Município
do Rio de Janeiro em 201217
Gráfico 3 –Variação do teor de umidade dos RSU com a profundidade19
Gráfico 4 –Variação do teor de umidade dos RSU com a matéria orgânica20
Gráfico 5 – Variação da temperatura em função da profundidade22
Gráfico 6 – Geração de gases a partir dos RSU24
Gráfico 7 – Efeito da recirculação de lixiviado na magnitude de recalques33
Gráfico 8 - Medidas de recalque dos MS que tiveram 5 anos (1775 dias) de
observação70
Gráfico 9 - Medidas de recalque dos MS que tiveram 8 anos(2771) dias de
observação70
Gráfico 10 - Medidas de velocidade dos MS que tiveram 5 anos (1775 dias) de
observação73
Gráfico 11 - Medidas de velocidade dos MS que tiveram 8 anos (2771) dias de
observação73
Gráfico 12 – Calibração do MS-181
Gráfico 13 – Calibração do MS-381
Gráfico 14 – Calibração do MS-482
Gráfico 15 – Calibração do MS-1182
Gráfico 16 – Calibração do MS-1282
Gráfico 17 – Calibração do MS-1383
Gráfico 18 – Calibração do MS-1483
Gráfico 19 – Calibração do MS-1583
Gráfico 20 – Calibração do MS-1684
Gráfico 21 – Calibração do MS-1884
Gráfico 22 – Calibração do MS-19
Gráfico 23 – Calibração do MS-2085
Gráfico 24 – Verificação do desvio médio geral85
Gráfico 25 – Previsão de recalques para MS-186

Gráfico 26 – Previsão de recalques para MS-3	87
Gráfico 27 – Previsão de recalques para MS-4	87
Gráfico 28 – Previsão de recalques para MS-11	88
Gráfico 29 – Previsão de recalques para MS-12	88
Gráfico 30 – Previsão de recalques para MS-13	89
Gráfico 31 – Previsão de recalques para MS-14	89
Gráfico 32 – Previsão de recalques para MS-15	90
Gráfico 33 – Previsão de recalques para MS-16	90
Gráfico 34 – Previsão de recalques para MS-18	91
Gráfico 35 – Previsão de recalques para MS-19	91
Gráfico 36 – Previsão de recalques para MS-20	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de peso específico reportados na literatura técnica	21
Tabela 2 – Recalques em maciços sanitários relativos a espessura inicial	27
Tabela 3 – Período de leitura dos MS	65
Tabela 4 – Resumo dos dados dos MS monitorados.	71
Tabela 5 – Calibração do modelo de Sowers (1973)	75
Tabela 6 – Calibração do modelo de Meruelo (PALMA, 1995)	77
Tabela 7 – Calibração do modelo de Ling et al. (1998)	78
Tabela 8 – Calibração da equação do <i>creep</i> secundário de Oweis (2006)	80
Tabela 9 – Calibração da equação de decomposição biológica de Oweis (2006)	80
Tabela 10 – Resultado da previsão para 50 anos de cada MS, recalque	е
deformação	92

SUMÁRIO

INTRO	DUÇÃO	12		
1. OBJ	BJETIVOS14			
1.1 Ob	jetivo Geral	14		
1.2 Ob	jetivos Específicos	14		
2. REV	ISÃO BIBLIOGRÁFICA	15		
2.1 Pro	priedades Físicas Dos Resíduos Sólidos Urbanos	15		
<u>2.1.1</u>	Composição dos RSU	15		
<u>2.1.2</u>	Distribuição granulométrica	17		
<u>2.1.3</u>	Teor de umidade	18		
<u>2.1.4</u>	Peso específico in situ	20		
<u>2.1.5</u>	Temperatura	21		
2.2 Dec	composição da Matéria Orgânica	23		
2.3 Co	mpressibilidade dos RSU	25		
<u>2.3.1</u>	Mecanismos de compressão	27		
<u>2.3.2</u>	Fatores que afetam os mecanismos de recalque	31		
2.4 Mo	delos de Previsão de Recalques	33		
<u>2.4.1</u>	Modelos baseados em fundamentos da mecânica dos solos	34		
2.4.1.1	Modelo de Sowers (1973)	34		
2.4.1.2	Modelo de Bjarngard & Edgers (1990)	36		
2.4.1.3	Modelo de Hossain & Gabr (2005)	37		
<u>2.4.2</u>	Modelos empíricos	38		
2.4.2.1	Modelo de Yen & Scanlon (1975)	38		
2.4.2.2	Modelo de Edil et al. (1990)	39		
2.4.2.3	Modelo de Gandola et. al (1994)	40		
2.4.2.4	Modelo de Coumoulos & Koryalos (1997)	41		
2.4.2.5	Modelo de Ling et al. (1998)	41		
<u>2.4.3</u>	Modelos reológicos	42		
2.4.3.1	Modelo de Gibson & Lo (1961)	43		
2.4.3.2	Modelo de Marques (2001)	43		
<u>2.4.4</u>	Modelos incorporando biodegradação	44		
2.4.4.1	Modelo Park & Lee (1997)	44		

2.4.4.2	Modelo de Hettiarachchi et al. (2009)	45
2.4.4.3	Modelo de Marques et al. (2003)	46
2.4.4.4	Modelo de Oweis (2006)	48
2.4.4.5	Modelo de Liu et al. (2006)	50
2.4.4.6	Modelo de Meruelo (PALMA, 1995)	51
3. MET	ODOLOGIA	54
3.1 Esc	colha da Área de Estudo	54
3.2 His	tórico e Descrição da Área de Estudo	54
3.3 Car	acterísticas Climáticas da Região da Marambaia	61
3.4 Ens	saio de Reconhecimento dos Resíduos no Aterro da Marambaia	62
3.5 Mo	nitoramento de Recalques no Aterro da Marambaia	63
3.6 Pre	visão de Recalques	67
4. RES	ULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1 Mo	nitoramento	69
4.2 Ana	álises Através da Modelagem de Recalques	74
<u>4.2.1</u>	Calibração do modelo Sowers (1973)	75
<u>4.2.2</u>	Calibração do modelo Meruelo (PALMA, 1995)	76
<u>4.2.3</u>	Calibração do modelo de Ling et al. (1998)	77
4.2.4	Calibração do modelo de Oweis (2006)	79
4.2.5	Análise Geral das Calibrações	81
4.2.6	Análise da previsão de recalques	86
CONCL	_USÃO	94
REFER	ÊNCIAS	96
APÊND	DICE – Monitoramento de Recalques no Aterro da Marambaia	102

INTRODUÇÃO

O maior desafio da gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil ainda é a disposição final.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2016), a geração total de RSU no país foi de, aproximadamente, 79,8 milhões de toneladas no ano de 2015, sendo coletados 90,8% dos resíduos gerados. Do total de resíduos coletados, 41,3% foram destinados para lixões e aterros controlados. É importante frisar que esses dados são baseados em municípios com mais de 100.000 habitantes, não representando a grande maioria dos municípios brasileiros.

Segundo Canejo (2016), em se tratando do estado do Rio de Janeiro, 6% do quantitativo de RSU coletado foram dispostos em vazadouros e aterros controlados no ano de 2014.

Embora o futuro aponte para a minimização desse tipo de disposição, aterrar resíduos sólidos ainda é uma das formas mais empregadas em países em desenvolvimento, devido ao seu relativo baixo custo e a sua capacidade de conseguir um controle eficiente e seguro sobre os resíduos (PEREIRA, 2000). De acordo com Tchobanoglous et al. (1994), a utilização de aterros sanitários é uma das técnicas mais comuns para que se alcance uma disposição final de RSU segura.

Devido a grande quantidade de RSU gerados no Brasil e a dificuldade de encontrar áreas para aterros sanitários no entorno das grandes cidades, os aterros existentes são cada vez mais elevados, podendo atingir até 160,00 metros de altura, caso do aterro São João em São Paulo. De acordo com Pereira (2000), esta carência de áreas evidencia a necessidade de se investigar a compressibilidade da massa de resíduos, bem como da fundação, com vistas a preservar a estabilidade dos taludes e garantir a segurança do empreendimento.

Investigar a ocorrência de recalques em maciços de aterros sanitários é importante, devido a repercussão negativa para o empreendimento em casos de acidentes, incluindo contaminação ambiental, perda de vidas humanas e prejuízos financeiros, uma vez que estes maciços estão sujeitos a movimentações verticais e horizontais.

Além disto, também existe a preocupação de se aproveitar a área após o encerramento das atividades de recebimento de resíduos. Atualmente, as cidades estão se expandindo para além dos limite planificados por suas respectivas ordenações urbanísticas, deste forma, de acordo com Pereira (2000), surge o interesse em se utilizar estes locais como áreas de ocupação, mediante a construção de parques recreativos, abertura de vias de acesso, edificações de pequeno porte etc.

Autores como Simões & Catapreta (2009) e Babu et al. (2010), afirmam que estimar a ocorrência dos recalques em aterros sanitários é necessário para que se possa avaliar a estabilidade de seus próprios equipamentos estruturais como sistemas de captação de gás e lixiviados, bem como sistemas de drenagem de águas pluviais, avaliar a capacidade total de armazenamento dos resíduos e os custos gerais de operação de um aterro sanitário. Recalques em excesso podem causar fissuras significativas nas camadas de cobertura e comprometer a integridade dos maciços de resíduos sólidos.

Outra questão interessante sobre o estudo do comportamento geomecânico dos resíduos é que suas características mudam com o tempo, devido fundamentalmente aos processos de degradação dos materiais que os constituem e ao fato de que estas variações são distintas em função da sua composição, do clima e da disponibilidade de umidade (PEREIRA, 2000).

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é analisar a compressibilidade dos resíduos sólidos do antigo vazadouro de Marambaia, localizado no município de Nova Iguaçu, no estado do Rio de Janeiro, por meio de dados de monitoramento dos recalques superficiais, realizado em um período de 7 anos e meio. Com base nestes dados serão calculados os recalques a longo prazo que sofrerá o maciço de resíduos, utilizando modelos matemáticos.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo, por meio de fontes secundárias e visitas de campo, sobre o vazadouro da Marambaia, área selecionada para a realização deste trabalho;
- Analisar os resultados do monitoramento dos recalques, fazendo uma comparação com dados de monitoramentos de outras áreas;
- Realizar uma previsão de recalques a longo prazo, empregando modelos matemáticos propostos por Sowers (1973), Ling et al. (1998), Oweis (2006) e Meruelo (PALMA, 1995).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Propriedades Físicas Dos Resíduos Sólidos Urbanos

De acordo com Pereira (2000), a quantificação das propriedades geotécnicas, geralmente, é muito difícil devido a uma variedade de fatores, como por exemplo, a grande heterogeneidade dos resíduos e sua variação em relação as condições climáticas de cada região, dificuldade na obtenção de amostras representativas de condições dos RSU *in situ*, a ausência de procedimentos de amostragem e ensaio geralmente aceitos e verificados pela comunidade científica em larga escala e pelo fato de que as propriedades geotécnicas de RSU podem mudar de acordo com o tempo, como um resultado da decomposição.

Conhecer estas propriedades é essencial no momento de se projetar um sistema de disposição final na gestão de resíduos sólidos, no sentido de análise de estabilidade e de comportamento de longo prazo de aterros sanitários. Neste item serão abordadas as propriedades tomadas na literatura técnica como imprescindíveis para análise de recalques em aterros de RSU.

2.1.1 Composição dos RSU

O conhecimento da composição física dos resíduos é importante, umas vez que condiciona o comportamento do aterro como um todo. Os RSU são admitidos como material heterogêneo, multifásico, constituído pelas fases sólida, líquida e gasosa. Existe uma variação do percentual das fases com o tempo, como dito anteriormente, devido a processos de biodegradação que estão relacionados com teor de umidade, conteúdo de matéria orgânica e condições climáticas.

Segundo Carvalho (1999), verifica-se que o ponto básico para a compreensão do comportamento dos maciços de RSU é o conhecimento das interações existentes entre as três fases e as alterações destas com o tempo, o que se apresenta como ação muito difícil. De acordo com Grisolia & Napoleoni (1996), existem algumas diferenças entre solos e RSU como por exemplo, a fase sólida dos RSU, que pode ser subdividida em três novas categorias, sendo elas, materiais inertes estáveis, materiais altamente deformáveis e materiais orgânicos biodegradáveis.

A primeira categoria, que é representada por vidros, cerâmicas, solos e semelhantes, apresenta comportamento parecido ao dos solos granulares muito heterogêneos, desenvolvendo forças de atrito entre as partículas. Cabe ressaltar que esta categoria muito se assemelha aos resíduos da construção e demolição (RCD), podendo estar presentes nos RSU dispostos em lixões ou aterros controlados, nos quais é sabida a ocorrência de disposição descontrolada de resíduos.

A segunda categoria, englobando materiais como plásticos, papéis, têxteis e borracha, possui, além da deformabilidade, comportamento anisotrópico e a possibilidade de absorver ou incorporar fluidos no interior de sua estrutura. Quando submetidos a carregamentos, esses materiais sofrem deformações iniciais com mudança de sua forma original, além da possibilidade de deformações de natureza viscosa.

A terceira categoria, materiais orgânicos biodegradáveis, passa por transformações físico-químicas que vem a gerar os subprodutos lixiviado e biogás. É importante ressaltar que a composição física varia de uma localidade para a outra, estando relacionada principalmente com os níveis de desenvolvimento econômico, tecnológico, sanitário e cultural das diferentes populações.

Nesse sentido, torna-se interessante contextualizar a composição gravimétrica dos RSU no Brasil e, especificamente, no município do Rio de Janeiro, de acordo com os Gráficos 1 e 2. Em ambos os casos, percebe-se que o maior percentual é referente a matéria orgânica, materiais da terceira categoria de Grisolia & Napoleoni (1996).



Gráfico 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Brasil em 2008

Gráfico 2 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares no Município do Rio de Janeiro em 2012



Fonte: Adaptado de COMLURB (2012).

2.1.2 Distribuição granulométrica

A determinação da dimensão e distribuição das partículas de RSU é limitada, face a grande heterogeneidade e variedade de materiais que podem estar presentes no maciço.

Fonte: Adaptado do PNRS (2011).

A análise da distribuição do tamanho das partículas é comumente realizada por meio da análise granulométrica clássica da mecânica dos solos. Análises granulométricas realizadas por GABR & VALERO (1995) indicaram que a análise via úmida apresentou melhores resultados que a via seca devido a natureza coesiva dos RSU. Como resultado da grande variabilidade, os tamanhos das partículas analisadas pelos autores revelaram uma grande faixa, englobando partículas de tamanho similar a pedregulhos até partículas menores do que 0,075 mm (grãos finos), sendo esta fração inferior a 20% do total em peso.

Farias (2014), trabalhando com um biorretator cilíndrico de pequeno porte (3,50 m de altura por 2,00 m de diâmetro) e por meio do método do peneiramento da amostra inicial dos RSU de Campina Grande, na Paraíba, obteve um teor de grãos finos de 66,94%, o que representou um percentual considerável em termos de condições favoráveis para degradação dos resíduos e desenvolvimento de recalques, já que Alcântara (2007) afirma que quanto menor o tamanho das partículas dos resíduos sólidos, maior a área superficial específica e maior o contato entre os microrganismos, podendo acelerar o processo de biodegradação.

Cabe ressaltar que o fato de se obter um percentual elevado de finos em amostras de RSU não implica que haverá realmente o favorecimento de uma boa degradação, pois esse fator também dependerá do tipo de componente a ser degradado.

Segundo Pereira (2000), devido à dificuldade de se realizar este ensaio com amostras de RSU, uma prática comum é separar os diferentes componentes dos resíduos e medir a variabilidade de tamanhos que se apresentam.

2.1.3 <u>Teor de umidade</u>

O teor de umidade em aterros de resíduos sólidos varia em função de muitos fatores, que por sua vez estão inter-relacionados, sendo eles a composição inicial dos RSU, as condições climáticas da região do aterro, a forma de construção do aterro, e presença e a eficiência dos sistemas de drenagem de lixiviados, o material de cobertura, a quantidade de umidade gerada por processos biológicos e a

quantidade de umidade removida por gases gerados no interior do maciço (PEREIRA, 2000).

Devido a grande heterogeneidade, o teor de umidade em um aterro pode variar significativamente de uma zona do aterro para outra. A determinação do teor de umidade está diretamente relacionada ao fluxo/percolação de líquidos (balanço hídrico do aterro) e, consequentemente, ao momento em que é realizada. A propriedade pode ser determinada pelos métodos usuais da geotecnia com base no peso seco da amostra. No entanto alguns autores propõem a determinação do teor de umidade dos resíduos sólidos urbanos com base no peso úmido da amostra, no qual o parâmetro se expressa como uma porcentagem do peso do material úmido, de acordo com Pereira (2000), este é o método mais utilizado na gestão de RSU.

A referida autora, ao analisar amostras colhidas de uma sondagem destinada a instalação de novos equipamentos de seu experimento, encontrou os resultados do Gráfico 3 para valores de teor de umidade, de acordo com a profundidade da perfuração no aterro de Valdemingómez em Madri, Espanha.



Gráfico 3 – Variação do teor de umidade dos RSU com a profundidade.

Fonte: Adaptado de Pereira (2000).

Segundo LANDVA & CLARK (1990) o teor de umidade em um instante inicial tende, em geral, a aumentar com o aumento do teor de matéria orgânica, conforme o Gráfico 4.



Gráfico 4 – Variação do teor de umidade dos RSU com a matéria orgânica.

Fonte: Landva & Clark (1990).

2.1.4 Peso específico in situ

O fato de existirem condições como o volume das camadas de cobertura diária dos resíduos, a eficiência da compactação das camadas obtida durante a operação, a composição heterogênea do material e a variabilidade de tamanho dos componentes tornam difícil o conhecimento exato do parâmetro.

Existem algumas técnicas que podem ser usadas para a determinação do peso específico *in situ*, dentre elas, poços ou trincheiras e utilização de percâmetro. Os ensaios em poços consistem na pesagem do material e determinação do volume a partir do preenchimento da cava (em geral com água) devidamente impermeabilizada com geomembrana, conforme feito por Silveira (2004) nos aterros de Gramacho e Paracambi no estado do Rio de Janeiro. Já Carvalho (2002) se utilizou do instrumento denominado percâmetro, que consiste em um equipamento de corpo cilíndrico e volume conhecido, capaz de retirar amostras indeformadas dos RSU e assim aferir o peso específico, conforme trabalho do referido autor no aterro sanitário de Santo André, São Paulo. O resultado obtido com estes métodos é muito localizado e muitas vezes não representa toda a massa de resíduos presente em um aterro.

Vários autores como Watts & Charles (1990), Landa & Clark (1990), Gabr & Valero (1995), Catapreta (2008), entre outros, comentam sobre a relação entre profundidade e peso específico dos RSU. Pereira (2000), argumenta que com o aumento da profundidade, há também um aumento no peso específico, sendo este considerado como resultado da consolidação e compressão do maciço de resíduos que sofre ação de cargas (o peso próprio das camadas de sobrejacentes, máquinas e equipamentos de compactação). Carvalho (1999) indica que RSU em maior profundidade, aterrados a mais tempo, tem seu peso específico aumentado devido à bioconsolidação.

São encontrados na literatura técnica valores de peso específico de RSU, reportados pelos autores conforme Tabela 1, na faixa de 1,2 kN/m³ a 15 kN/m³.

Autor (Ano)	Peso Específico (kN/m ³)	Observações
Sowers (1973)	1,2 - 3,0	RSU Não compactado
	6,0	RSU Compactado
Yen & Scanlon (1975)	6,5	Compactação fraca
Watts & Charles (1990)	5,9	Somente resíduos
	6,3	Incluindo material de cobertura
Landa & Clark (1990)	10,0 - 15,0	Segundo a compactação
Gabr & Valero (1995)	9,3	Com peso específico seco máximo (umidade = 31%)
	12,0	Com volume de ar nulo (umidade = 31%)
Pereira (2000)	5,0	Não compactado

Tabela 1 – Valores de peso específico reportados na literatura técnica.

Fonte: Adaptado de Pereira (2000).

2.1.5 <u>Temperatura</u>

A temperatura do interior de maciços sanitários pode ser medida com a utilização de termômetros eletrônicos digitais instalados em uma sonda.

Segundo Boscov (2008), apresentando os resultados de Mariano (1999) e Coumoulos & Koryalos (1997), a temperatura no interior dos maciços pode atingir valores elevados, de até 60 °C, devido às reações de biodegradação da parcela orgânica dos RSU ali dispostos. Essas altas temperaturas ocorrem em profundidade, justamente onde se processam essas reações exotérmicas. Coumoulos & Koryalos (1997) comentam que não existe influência da temperatura externa, ambiente, nos registros deste parâmetro em RSU aterrados. Já Pereira (2000) constatou em seus experimentos no aterro sanitário de Valdemingómez em Madri, Espanha, que, nas camadas superficiais, a temperatura ambiente teria influência mais direta sobre a massa de resíduos, ou seja, estas se assemelhariam, conforme Gráfico 5, cabendo aqui ressaltar que para tais constatações é necessária a observação de condições específicas de cada aterro, por exemplo, a qualidade do material da camada de cobertura final.



Gráfico 5 – Variação da temperatura em função da profundidade.

É possível observar que as medidas registradas em julho e dezembro de 1998, verão e inverno da Espanha respectivamente, apontam que o maciço sofre influência da temperatura externa, a qual varia no verão entre 27 e 41 °C e no inverno entre 2 e 20 °C, até aproximadamente 10,00 m de profundidade. Ainda segundo a referida autora, os altos valores do parâmetro em profundidade indicam que os resíduos estariam sofrendo um processo de decomposição muito ativo, o que seria esperado, já que estes eram frescos, ou seja, com 4 anos de aterramento.

Fonte: Pereira (2000).

2.2 Decomposição da Matéria Orgânica

A importância do efeito da degradação da matéria orgânica presente nos RSU está, principalmente, na alteração do comportamento dos maciços sanitários, do ponto de vista geotécnico.

A decomposição da matéria orgânica é a principal causa de redução de volume de RSU em aterros sanitários em longo prazo. De acordo com Watts & Charles (1990)apud Pereira (2000), recalques a longo prazo resultantes dos processos de biodegradação representam a maior proporção de recalque total que pode ocorrer em um aterro sanitário.

Os RSU são compostos por frações orgânica e inorgânica. A primeira é formada, basicamente, por restos de alimentos, dejetos sanitários, couro, papel, papelão, têxteis e madeira. Já a parte inorgânica é formada, basicamente, por metais, vidros etc. Em geral, principalmente em países em desenvolvimento, uma parcela significativa da composição dos RSU é biodegradável. Os inorgânicos permanecem inertes, contudo, sofrem os processos de oxidação e corrosão.

Os aterros sanitários podem ser entendidos como reatores biológicos, tendo os resíduos sólidos e a água como principais componentes de entrada e os lixiviados e o biogás como principais elementos de saída. A decomposição dos RSU em um aterro sanitário se dá por processos digestão da parcela de matéria orgânica presente.

Os principais fatores que influenciam nos processos de biodegradação são composição física do resíduos, idade, umidade e temperatura, bem como aspectos quantitativos e qualitativos de nutrientes para atividade bacteriana presente no maciço, pH (potencial hidrogeniônico) do lixiviado, condições climáticas da região do aterro, peso específico *in situ* e eficiência obtida na compactação das camadas dos resíduos. Farquhar & Rovers (1973) definiram que a biodegradação dos RSU pode ser dividida em quatro fases, sendo elas aeróbia, anaeróbia ácida, anaeróbia metanogênica não estabilizada e anaeróbia metanogênica estabilizada.

A fase aeróbia é geralmente curta. O oxigênio (O₂) e o nitrogênio (N₂) presentes nos resíduos frescos são consumidos, gerando gás carbônico (CO₂), água e calor, ocorrendo, nessa fase, degradação da matéria biodegradável.

Uma vez que não se tem mais O₂ livre, o processo passa para a fase anaeróbia. A decomposição da matéria orgânica biodegradável resulta na geração de lixiviado com pH inferior a 5, com elevados valores de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO). Essa fase é denominada anaeróbia ácida. Nela há um aumento na produção de CO₂ e também ocorre a degradação da matéria biodegradável.

Durando de três meses a três anos, a fase metanogênica não estabilizada tem como produtos simultâneos metano (CH₄), em maior quantidade, e ácidos. Esta produção irá aumentar o pH, atingindo uma faixa entre 6,8 e 8, enquanto as concentrações de DBO e DQO sofrerão sensíveis reduções. Nestas condições se pode ainda observar a redução da solubilidade de compostos inorgânicos, implicando uma menor quantidade de metais pesados contidos nos lixiviados. Cabe ressaltar que uma parcela adicional da matéria sólida é degradada e convertida nesta fase.

Já na fase metanogênica estabilizada, após a conversão de grande parte da matéria orgânica biodegradável em CH₄ e CO₂, a velocidade de geração de gases diminui substancialmente. Os referidos produtos são os principais gerados, contudo, tem-se também a geração de pequenas quantias de N₂ e O₂. O Gráfico 6 indica a geração de gases a partir da decomposição biológica dos RSU com o tempo.



Gráfico 6 – Geração de gases a partir dos RSU.

Fonte: Farquhar & Rovers (1973).

2.3 Compressibilidade dos RSU

A questão dos efeitos da compressibilidade dos RSU em aterros sanitários tem sido bem estudada nos últimos anos, inclusive em aterros brasileiros, devido ao aumento no número dessas unidades de destino final e a necessidade de conhecimento do comportamento mecânico dos resíduos, principalmente quando estes podem oferecer riscos e comprometer a qualidade do meio ambiente e da comunidade ao redor dos empreendimentos.

Os elementos sólidos presentes nos RSU podem variar em forma e volume, devido à sua deformabilidade associada aos processos de degradação e decomposição.

A resultante perda desta massa dos resíduos aterrados implica na geração de novos vazios no interior do maciço sanitário e, consequentemente, na ocorrência de recalques, que podem ser definidos como movimentações verticais e horizontais da superfície de um aterro sanitário. O ritmo de produção de recalques em um aterro sanitário é variável com a idade, apresentando velocidades que diminuem com o tempo, mas que, em todo caso, se mantêm perceptíveis durante anos (ESPINACE et al., 1999).

Segundo Machado et al. (2008), as condições "agressivas" no interior dos maciços também são responsáveis por modificar as propriedades de outros componentes dos RSU, em tese, menos degradáveis, como plásticos, o principal componente da fração de fibras dos resíduos.

Portanto, é de se esperar que a biodegradação dos resíduos orgânicos e outros processos físico-químicos que ocorrem durante a vida útil de um aterro contribuam significativamente para modificar o comportamento do resíduo com o tempo, influenciando assim o desempenho de todo o aterro.

Diferentes abordagens foram apresentadas nos últimos anos, numa tentativa de se compreender o comportamento compressivo dos RSU.

De acordo com Machado et al. (2002), a aplicação de conceitos e teorias da mecânica de solos para o estudo da compressibilidade apresentou resultados razoáveis em alguns casos, embora não tenham sido capazes de reproduzir todo o fenômeno envolvido no processo. A separação dos principais mecanismos

envolvidos no processo de compressão parece ser mais eficaz para se reproduzir o comportamento do aterro sanitário, assim como levar em consideração sobreposição de efeitos, isto é, o cálculo cumulativo dos recalques individuais das respectivas camadas que constituem o aterro sanitário, incluindo e considerando diferentes aspectos particulares como idade, geometria, nível de tensões, relacionados a cada uma delas. Os autores também ressaltam que a definição apropriada do componente tempo é de suma importância na maioria das abordagens existentes, assim como Pereira (2000), Abreu (2000) e Palma (1995).

Nesse contexto, tem-se a medição, análise e previsão de recalques nos aterros de resíduos sólidos urbanos como importante contribuição para a salvaguarda destes empreendimentos, já que estes sofrem reduções volumétricas significativas que podem impactar diretamente na avaliação das condições de estabilidade dos maciços de resíduos, na estimativa da vida útil dos mesmos, na avaliação da integridade dos sistemas de revestimento, de cobertura e dos dispositivos de drenagem de lixiviados e gases, bem como no desenvolvimento de estudos para reaproveitamento das áreas ocupadas após o fechamento dos aterros (PEREIRA, 2000, SIMÕES & CATAPRETA, 2009, BABU et al., 2010, MCDOUGALL 2011).

Alguns valores relatados referentes a recalques em relação à espessura total inicial, ou seja, deformação, colhidos da literatura técnica são apresentados na Tabela 2, cada caso com particularidades como o tempo de monitoramento e o tipo de experimento (aterros sanitários, aterros experimentais e lisímetros de laboratório).

Autor (Ano)	Deformação (%)
Sowers (1973)	Da ordem de 30%
Edil et al. (1990)	Entre 10% e 30%
Wall & Zeiss (1995)	Entre 25% e 50%
Grisolia & Napoleoni (1996)	Entre 10% e 30%
Ling et al. (1998)	Entre 30% e 40%
Abreu (2000)	Entre 10% e 30%
Pereira (2000)	Da ordem de 3%
Monteiro et al. (2006)	Da ordem de 7,6%
Alcântara (2007)	Entre 21,8% e 23,2%
Benson et al. (2007)	Entre 5% e 25%
Machado et al. (2008)	Entre 3% e 15,5%
Simões & Catapreta (2009)	Entre 4,1% e 16,4%
Alcântara & Jucá (2010)	Entre 8,1% e 14,2%
Gomes & Caetano (2010)	Da ordem de 5%
Silva (2010)	Da ordem de 28%
Carneiro (2013)	Da ordem de 0,06%
Denardin (2013)	Entre 11,5% e 24,2%
Caribé (2015)	Da ordem de 37%
Eyay (2016)	Entre 3,4% e 7,1%
Korf et al.	Entre 24% e 57%

Tabela 2 – Recalques em maciços sanitários relativos a espessura inicial.

Fonte: Adaptado de Boscov (2008).

2.3.1 Mecanismos de compressão

Segundo Pereira (2000) e McDougall (2011), os primeiros estudos quanto a natureza e magnitude de recalques em aterros sanitários são da década de 1940.

Merz & Stone (1962) relataram que as células experimentais nas quais a biodegradação tinha sido incentivada mostraram recalques três vezes maiores do que os que ocorreram nas células de controle.

No entanto, apenas em 1973 os mecanismos de recalque que se desenvolvem neste tipo de situação foram estudados, através do precursor da matéria, John F. Sowers. O autor adaptou a teoria de adensamento de Terzaghi (1943) para os RSU e concluiu que a taxa de recalque secundário (tema que será

abordado adiante no presente estudo) está relacionada com o conteúdo de matéria orgânica dos RSU.

A compressão dos maciços sanitários resulta, em linhas gerais, do carregamento e de alterações dos materiais componentes dos RSU. Segundo Sowers (1973), existem seis principais mecanismos de compressão dos maciços sanitários que serão explanados a seguir.

O primeiro dentre estes mecanismos é a solicitação mecânica que se dádiretamente após o carregamento do maciço com camadas de resíduo (recalque por carregamento), quando ocorre o colapso estrutural, distorção, dobras, esmagamento, quebra ou rearranjo das partículas dos materiais componentes dos RSU. Segundo Bente et al. (2009), este mecanismo é causado pela compressão dos vazios maiores existentes no maciço e neste momento a resistência dos materiais vai depender do conteúdo de materiais fibrosos, que irão atuar como reforço.Wall & Zeiss (1995), apud Pereira (2000) afirmam que este recalque é análogo a compressão elástica que ocorre em solos e é virtualmente instantâneo, chamado de recalque imediato.

O ravinamento interno ocorre como consequência de fenômenos de erosão e migração dos materiais mais finos para os vazios entre partículas maiores, inclusive o material utilizado para cobertura da camada de resíduos. De acordo com Morris & Woods (1990), a migração de grãos do solo de cobertura diária para os vazios da massa de resíduos é significativa. O ravinamento também pode ser desencadeado após eventos imprevisíveis que favorecem a degradação dos RSU, tais como variações repentinas dos níveis de lixiviado e inundações causadas por chuvas torrenciais ou pelo rompimento de tubulações (ABREU, 2000).

As alterações físico-químicas são outro mecanismo. São constituídas basicamente por meio dos fenômenos de corrosão e oxidação de parte dos materiais dispostos no maciço.

Outro mecanismo é a dissipação de poro-pressões de lixiviados e gases. Semelhante ao adensamento de solos, este mecanismo ocorre com a expulsão de líquidos e gases do interior do maciço sanitário, impactando, depois de certo período de tempo, na ocorrência de recalques. De acordo com Sowers (1973) e Pereira (2000), considera-se este recalque como primário, proporcionado pelo peso próprio das camadas sobrejacentes de resíduos. Este recalque se produz em um tempo relativamente maior que o recalque imediato, da ordem de trinta a cem dias depois da aplicação da carga. De acordo com Wall & Zeiss (1995), há indícios significativos de que o recalque primário nos resíduos sólidos não pode ser explicado com base no pressuposto de Terzaghi (1943) para solos de granulometria fina, já que os aterros estão, raramente, saturados, bem como pelo fato de que a permeabilidade dos resíduos é da mesma ordem de grandeza das areias e cascalhos, de modo que as poro-pressões não se desenvolvem neste processo, uma vez que os líquidos podem percolar rapidamente a partir da massa de resíduos.

Outro tipo de mecanismo de significativa importância é o devido a decomposição biológica. Uma vez que esteja contida no interior do maciço, a matéria orgânica é usualmente decomposta, por meio da ação aeróbia e anaeróbia de microrganismos, conforme explicitado anteriormente neste estudo, transformando massa de resíduos de fase sólida em fases líquida e gasosa, fazendo com que o material se torne mais solto em profundidade, havendo uma elevação na quantidade e tamanho dos vazios do maciço, resultando em ocorrência de recalque devido a carga constante existente. De acordo com Bjarngard & Edgers (1990) e König et al. (1996), este mecanismo se torna protagonista no processo de recalques que se desenvolvem no maciço após aproximadamente um ano de existência de RSU aterrados.

Conforme essa transformação acontece, também há a ocorrência do fenômeno de *creep*, ou rastejo, como conseqüência. Este mecanismo consiste no movimento descendente, lento e contínuo das partículas menores de resíduos no interior do maciço, caracterizando um incremento plástico, sem geometria e superfície de ruptura definidas na deformação da massa de resíduos, sendo importante informar que, segundo McDougall (2011), este mecanismo é, geralmente, considerado como possuidor de uma taxa de ocorrência gradualmente diminuta durante toda a vida do aterro.

A interação dos seis mecanismos citados anteriormente também é caracterizada por Sowers (1973) como um mecanismo, pois esta potencializa a compressibilidade dos resíduos sólidos. Na Figura 1, pode-se observar a ocorrência dos mecanismos de recalque abordados relacionada com o tempo decorrido na vida de um aterro.



Figura 1 – Ocorrência dos mecanismos de recalque com o tempo.

Fonte: Adaptado deMcDougall (2011).

Os recalques por biodegradação, alterações físico-químicas e por *creep* são considerados recalques secundários. De acordo com Pereira (2000), o processo de compressão secundária, diferentemente das outras fases, não depende da aplicação de carga, pois nesse caso, a variável dependente é o tempo. Estes recalques se prolongam por um longo período de tempo, no entanto, a velocidade de recalques existente neste caso é menor do que nos tipos anteriores.

De acordo com Sowers (1973), teoricamente, o recalque global em resíduos sólidos nunca cessará, embora a maior parte dele ocorra no primeiro ou no segundo ano após a disposição final de resíduos em um aterro. Kamon (1997), por sua vez, observa que, para se tornar estável, ou seja, para não sofrer incidência dos mecanismos de recalque, um aterro precisa que se transcorra um período superior a 20 anos.

Segundo McDougall (2011), entre os diferentes autores que tratam da matéria, existe consenso sobre a sequência de atuação dos mecanismos de recalque. Efeitos relacionados com a carga, geralmente referidos como recalque primário ou inicial, tem ocorrência esperada ao longo do primeiro mês (SOWERS, 1973, MORRIS & WOODS, 1990 e WALL & ZEISS, 1995). Depois do primeiro mês, efeitos relacionados com *creep*, corrosão físico-química e biodegradação dominam o cenário, etapa na qual é comum a adoção da referência recalque secundário, ou de longo tempo. Esta etapa pode continuar por 30 ou mais anos (MCDOUGALL, 2011). Bjarngard & Edgers (1990) e Park & Lee (1997) usam terminologias e faixas de tempo diferentes, mas suas interpretações do fenômeno são consistentes com a sequência geral de ocorrência de recalques.

Na Figura 2, podem-se observar as classificações temporais dos recalques de acordo com alguns autores selecionados da literatura técnica.





Fonte: Adaptado deMcDougall (2011).

Conforme explicitado anteriormente neste estudo, o conhecimento sobre o tempo específico de atuação dos recalques é de grande valia para o gerenciamento de um empreendimento como um aterro, tanto do ponto de vista de segurança do empreendimento como de aproveitamento ideal, em termos de aumento da capacidade de disposição de resíduos, ou seja, da sua vida útil.

2.3.2 Fatores que afetam os mecanismos de recalque

Segundo Boscov (2008), os fatores de maior influência sobre os mecanismos de ocorrência de recalques em RSU são a sua composição, tamanho das partículas, características de operação do aterro, densidade obtida na compactação, velocidade de disposição, pré-tratamento dos RSU, peso específico dos resíduos aterrados, teor de umidade, eficiência dos sistemas de drenagem superficial e de efluentes do aterro, flutuação do nível de lixiviado, condições climáticas, condições para desenvolvimento da atividade dos microrganismos (pH, temperatura) e idade de disposição dos resíduos no aterro.

A Figura 3, ilustra uma série de fatores que influenciam os recalques em aterros sanitários interligados a um conjunto de mecanismos de recalques primário e secundário. Os fatores de influência podem ser vistos tanto por fatores internos que

definem a condição do resíduo no interior do maciço sanitário (os grafados dentro dos retângulos), quanto por fatores externos, ou seja, de operação do aterro e de condições ambientais iniciais.





Os fatores que controlam os processos químicos e biológicos foram considerados nas investigações sobre recalques em aterros de RSU. Condições de umidade ótima e disponibilidade de oxigênio contribuem para recalques cerca de três vezes maiores do que os que ocorrem geralmente em uma célula anaeróbia com pouca umidade (MERZ & STONE, 1962). Sowers (1973) observou que manter um aterro "seco" poderia parar a decomposição da fração orgânica.

El-Fadel (1999) reportou dados sobre o impacto que a variação de fatores que influenciam na biodegradação tem sobre a ocorrência de recalques e observou um aumento significante destes em células experimentais, como indicado no Gráfico 7, onde a célula A teve recirculação de lixiviado, incentivando o fenômeno, e célula F de controle não o teve.

Fonte: Adaptado de McDougall (2011).



Gráfico 7 – Efeito da recirculação de lixiviado na magnitude de recalques.

Fonte: El-Fadel (1999).

2.4 Modelos de Previsão de Recalques

A previsão de recalques é uma importante ferramenta no gerenciamento de um aterro sanitário. Fazendo o uso desta, é possível melhor se planejarem estratégias de construção do maciço e de todos os sistemas componentes do aterro, garantindo sua integridade.

Segundo Bente et al. (2009), devido a elevada heterogeneidade de fatores que influenciam no comportamento compressivo do maciço, qualquer prognóstico quantitativo relacionado aos recalques é de difícil obtenção. Marques (2001) afirma que o recalque final em maciços de resíduos sólidos se apresenta como um valor de difícil avaliação e define que um modelo adequado para previsão de recalques, assim como os seus parâmetros de cálculo, apresentam-se como principal fator limitante nas análises de deformabilidade de aterro sanitários. Tal dificuldade decorre da interação de diferentes mecanismos (*creep*, decomposição biológica etc) no processo de compressão dos resíduos, os quais seguem leis próprias de comportamento e são governados por parâmetros distintos entre si.

Vários modelos de previsão de recalque são reportados na literatura técnica. Esses modelos podem ser divididos em quatro grupos, sendo eles, os modelos baseados em fundamentos da mecânica dos solos, modelos empíricos, modelos reológicos e modelos que incorporam a biodegradação. Apresenta-se, a seguir, uma síntese dos modelos propostos e das suas formulações para avaliação de recalques de aterros sanitários.

2.4.1 <u>Modelos baseados em fundamentos damecânica dos solos</u>

2.4.1.1 Modelo de Sowers (1973)

Sowers (1973) foi o primeiro a propor um modelo de compressibilidade de RSU com base na teoria clássica de adensamento unidimensional dos solos proposta por Terzaghi (1943). Segundo o referido autor, as compressões inicial e primária se produzem rapidamente e em um período igual ou inferior a um mês, sem que se gerem grandes aumentos na poro-pressão. A magnitude da compressão primária é expressa pela Equação 1.

$$S_p = \frac{C_c}{1+e_0} H_0 \log\left(\frac{\sigma_{v0} + \Delta \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}}\right) \tag{1}$$

Em que:

S_p = recalque ao final da consolidação primária;

 H_0 = altura inicial do aterro;

C_c = coeficiente de compressibilidade;

 σ_{v0} = tensão efetiva prévia no aterro;

 $\Delta \sigma_{v0}$ = sobrecarga efetiva;

 $e_0 =$ índice de vazios.

Neste modelo, o índice de compressão primária, C_c é função do índice de vazios, embora haja uma grande dispersão de acordo com a composição dos
resíduos, de forma que $C_c = 0,15.e_0$ para RSU com baixo conteúdo de matéria orgânica e $C_c = 0,55.e_0$ para RSU com alto conteúdo de matéria orgânica.

A compressão secundária de longo prazo se expressa pela Equação 2.

$$S_s = \frac{C_\alpha}{1+e_0} H \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$
(2)

Em que:

S_s = recalque por consolidação secundária no tempo t₂;

 $H = altura do aterro no tempo t_1;$

t₁ = tempo, em dias, para conclusão da compressão primária;

t₂ = tempo, em dias, para o qual é feita a previsão do recalque;

 $e_0 =$ indice de vazios;

 C_{α} = índice de compressão secundária.

Segundo Sowers (1973), da mesma forma que o caso anterior, o índice de compressão secundária, C_{α} , é função do índice de vazios. No entanto, este coeficiente varia muito de acordo com as condições favoráveis ou desfavoráveis para com a ocorrência de decomposição biológica, conforme descrito no item 2.2 deste trabalho. Assim, o seu valor é maior em condições favoráveis, de forma que $C_{\alpha} = 0,03$. e_0 , assim como $C_{\alpha} = 0,09$. e_0 para condições desfavoráveis.

De acordo com o referido autor, a obtenção dos parâmetros C_{α} e C_{c} , bem como do índice de vazios é bastante difícil, posto que é complicada uma tomada de amostra representativa desse material, além da escassez de equipamentos de laboratório para realizar ensaios confiáveis. Uma solução para esta dificuldade é adotar como parâmetros as seguintes Equações 3 e 4.

$$C'_c = \frac{C_c}{1+e_0} \tag{3}$$

$$C'_{\alpha} = \frac{C_{\alpha}}{1+e_0} \tag{4}$$

Com isso, a equação para o cálculo da magnitude da compressão primária se expressa conforme a Equação 5.

$$S_p = C'_c H_0 \log\left(\frac{\sigma_{v0} + \Delta \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}}\right)$$
(5)

Da mesma forma, a expressão para se calcular a magnitude do recalque secundário passa a se apresentar conforme a Equação 6.

$$S_s = C'_{\alpha} H log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \tag{6}$$

De acordo com Babu et al. (2010), os valores dos índices de compressão C'_c e C'_a reportados na literatura técnica variam numa faixa de 0,163 a 0,205 e 0,015 a 0,350 respectivamente.

Segundo Pereira (2000), o modelo de Sowers prevê, para os recalques de longo prazo, um processo de crescimento infinito, já que o recalque final não tende a uma estabilização, portanto não é recomendado para previsão de recalques com prazos muito longos.

2.4.1.2 Modelo de Bjarngard & Edgers (1990)

Bjarngard & Edgers (1990) subdividiram a compressão secundária em duas novas fases, por meio de ajuste de curvas e introduziram o coeficiente intermediário de compressão secundária ($C_{\alpha 1}$) e um coeficiente final de compressão secundária ($C_{\alpha 2}$). O modelo pode ser expresso pela Equação 7.

$$\Delta H = HC_{c}^{*}\log\left(\frac{\sigma_{0}+\Delta\sigma}{\sigma_{0}}\right) + HC_{\alpha 1}\log\left(\frac{t_{2}}{t_{1}}\right) + HC_{\alpha 2}\log\left(\frac{t_{3}}{t_{2}}\right)$$
(7)

Em que: ΔH = recalque; H = altura inicial da camada sob análise; σ_0 = tensão vertical efetiva inicial ao meio da camada sob análise; $\Delta \sigma$ = incremento de tensão vertical ao meio da camada sob análise; t_1 = tempo, em dias, para conclusão da compressão inicial; t_2 = tempo, em dias, para conclusão da compressão intermediária; t_3 = tempo, em dias, para o qual é feita a previsão do recalque; C_c^* = coeficiente de compressão primária; $C_{\alpha 1}$ = coeficiente de compressão secundária intermediária; $C_{\alpha 2}$ = coeficiente de compressão secundária de longo prazo.

Os autores observaram que a evolução dos recalques ocorre em 3 fases. Na fase inicial, os recalques ocorrem de forma rápida pela compressão mecânica dos resíduos e redução dos vazios existentes. Na segunda fase, correspondente a compressão secundária intermediária, os recalques são dominados essencialmente por interações mecânicas, enquanto que na última fase, referente à compressão secundária de longo prazo, os efeitos da biodegradação dos resíduos são acrescidos aos mecanismos da fase anterior, implicando taxas de recalque mais elevadas. De acordo com Marques (2001), coeficientes de compressão secundária intermediária (C_{α 1}) entre 0,003 e 0,038 e secundária (C_{α 2}) entre 0,017 e 0,51 foram determinados com a aplicação do modelo em casos analisados pelo autor.

2.4.1.3 Modelo de Hossain & Gabr (2005)

Hossain & Gabr (2005) modelaram recalques de longo prazo utilizando três termos, conforme a Equação 8.

$$\frac{\Delta H}{H} = C_{\alpha i} \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) + C_{\beta} \log\left(\frac{t_3}{t_2}\right) + C_{\alpha f} \log\left(\frac{t_4}{t_3}\right)$$
(8)

Em que:

 $\Delta H = recalque;$

H = altura inicial da camada sob análise;

 $C_{\alpha i}$ = índice de compressão, em função do nível de tensão e grau de decomposição;

t₁ = tempo para se completar a compressão inicial;

t₂ = tempo decorrido durante a avaliação da compressão;

 C_{β} = índice de biodegradação;

t₃ = tempo para se completar a compressão biológica;

 $C_{\alpha f}$ = índice de *creep*;

t₄ = tempo para se desenvolver o *creep*, no fim da decomposição bioquímica.

Babu et al. (2010), por meio de levantamento de várias fontes secundárias de dados, relataram que 0,03 e 0,19 são valores comuns de $C_{\alpha i}$ e C_{β} respectivamente.

A compressão mecânica sob tensões externas aplicadas e a pressão devido ao peso próprio das camadas sobrejacentes não foram incluídas.

O grau de decomposição foi caracterizado pela observação da taxa de geração do biogás e da relação proporcional entre celulose, hemicelulose e lignina. Os fatores relacionados aos tempo t₁, t₂, t₃, e t₄ foram determinados pela observação da curva de produção do biogás.

2.4.2 <u>Modelos empíricos</u>

Os modelos empíricos tem como objetivo simular o comportamento geral dos resíduos por meio do ajuste de parâmetros, que por sua vez, são específicos para cada situação de aplicação. As funções matemáticas comumente aplicadas são a função logarítmica, a função *power creep* e a função hiperbólica.

2.4.2.1 Modelo de Yen & Scanlon (1975)

Os autores Yen & Scanlon (1975) expressaram a função logarítmica conforme a Equação 9.

$$\Delta H = H_f \left[\alpha + \beta \log \left(t - \frac{t_c}{2} \right) \right]$$
(9)

Em que:

 ΔH = recalque final;

H_f = altura inicial do aterro;

 α = parâmetro de ajuste;

 β = parâmetro de ajuste;

t = tempo decorrido desde o início da operação do aterro;

t_c = tempo de operação do aterro.

Neste modelo os autores sugerem que a taxa de recalques secundários decresce linearmente com o logaritmo do tempo. Tal proposição foi baseada em resultados de monitoramento de três aterros sanitários com espessuras entre 6,0 e 38,0 metros por períodos de até 9 anos.

Sohn & Lee (1994), a partir dos dados e proposta de Yen & Scanlon (1975), apresentam estudo para definição das constantes α e β do modelo descrito, em função da altura do maciço (H_f). Para a faixa de alturas analisadas, estes autores constataram uma relação linear entre os parâmetros α e β e a altura dos maciços, conforme as Equações 10 e 11.

$\alpha = 0,00095H_{\rm f} + 0,00969$	(10)	
$\beta = 0,00035H_{f} + 0,00501$	(11)	

2.4.2.2 Modelo de Edil et al. (1990)

De acordo com Edil et al. (1990), o modelo *power creep* é uma relação para deformação dependente do tempo sobre tensões constantes e é dado pela Equação 12.

$$\Delta H = H_0 \Delta \sigma M' \left(\frac{t}{t_r}\right)^{N'}$$

(12)

Em que: ΔH = recalque final; H_0 = altura inicial dos resíduos; $\Delta \sigma$ = tensão de compressão dependente da altura do maciço, peso específico e cargas externas;

M' = compressibilidade de referência;

N' = taxa de compressão;

t = tempo desde a aplicação da carga;

 t_r = tempo de referência introduzido para não se ter unidade temporal no resultado, usualmente tido como 1 dia.

Cabe ressaltar que o parâmetro M' é específico de cada localidade e o N' varia de acordo com a idade e condições de acomodação das camadas dos resíduos no aterro.

2.4.2.3 Modelo de Gandola et. al (1994)

Gandola et. al (1994), baseando-se em resultados experimentais efetuados com lisímetros, formulou um modelo exponencial para previsão de recalques não provocados pela variação de cargas.

Os autores fizeram uma interpolação analítica das medições efetuadas, a fim de se estabelecer uma função matemática que poderia expressar as variações de recalque em função do tempo, considerando como condição inicial recalque nulo e como condição final recalques que tendem a um valor assintótico.

De acordo com os autores, se observou que os resultados das medições realizadas durante o experimento formam uma boa aproximação a uma lei exponencial decrescente, conforme a Equação 13.

$$S_s = aH(1 - e^{kt}) \tag{13}$$

Em que: S_s = recalques; H = altura inicial do aterro; a = constante; k = constante;

t = estimativa de tempo dos recalques.

De acordo com Palma (1995) apud Pereira (2000), o recalque unitário final do aterro corresponde ao valor de uma constante "a", enquanto que o parâmetro "k" rege o ritmo de degradação da matéria orgânica, decrescente com o tempo, conforme as leis que regem os processos de reação química.

2.4.2.4 Modelo de Coumoulos & Koryalos (1997)

Coumoulos & Koryalos (1997) propuseram uma equação de atenuação, que é baseada na proposição de que recalques em aterros sanitários podem ser aproximados por uma linha reta, como uma função do logaritmo do tempo.

A principal vantagem deste modelo é que dados de diferentes pontos do aterro, com características diferentes, podem ser agrupados e comparados. O modelo pode ser expresso conforme a Equação 14.

$$Y = \frac{0.434C'_{\alpha}}{t_{c^*} + (t/2)}$$
(14)

Em que:

Y = taxa de deformação vertical expressa em %/mês ou %/ano;

C'_a = coeficiente de compressão secundária;

t = tempo decorrido, em meses ou anos;

t_{c*} = tempo de operação do aterro;

2.4.2.5 Modelo de Ling et al. (1998)

Ling et al. (1998)a partir das análises das limitações dos modelos baseados em funções logarítmicas e de potência, propuseram a utilização de uma função hiperbólica para estimativa de recalques em aterros sanitários conforme apresentada pela Equação 15.

$$S = \frac{t}{1/\rho_0 + t/S_{ult}}$$
(15)

Em que:

t = diferença entre o instante considerado e o início das medições do monitoramento;

S = diferença entre o recalque no instante considerado e o recalque inicial;

 ρ_0 = taxa ou velocidade inicial de recalques;

S_{ult} = recalque último.

Cabe ressaltar que os parâmetros ρ_0 e S_{ult} devem ser determinados pela transformação da Equação 15 a partir da observação gráfica das relações t/S versus t e da realização de uma análise de regressão linear, conforme Equação 16.

$$\frac{t}{S} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{1}{S_{ult}}$$
 (16)

Desta forma, os inversos do intercepto $(1/\rho_0)$ e da inclinação $(1/S_{ult})$ fornecem os parâmetros ρ_0 e S_{ult} respectivamente.

Ling et al. (1998) apresentaram comparações de simulações realizadas utilizando modelo proposto com os modelos que adotam funções logarítmicas e de potência. Os autores verificaram que para os casos analisados, a função hiperbólica apresentou melhores resultados. O autores obtiveram valores para taxa de velocidade inicial de recalques (ρ_0) variando entre 0,0068 e 0,013 mm/dia.

2.4.3 <u>Modelos reológicos</u>

Os modelos reológicos se baseiam nos pressupostos das deformações atribuídas às compressões primária e secundária em maciços de RSU.

2.4.3.1 Modelo de Gibson & Lo (1961)

Gibson & Lo (1961) sugeriram um modelo aplicável a solos turfosos. Esse modelo foi utilizado por Edil et al. (1990) para recalques totais de longo prazo em aterros de RSU. O modelo se utiliza de uma analogia que representa a compressão primária e secundária, na qual a compressão de uma mola expressa o recalque imediato e a combinação das compressões de um êmbolo e de uma mola expressam a deformação lenta. O modelo pode ser expresso pela Equação 17.

$$\Delta H/H_0 = \Delta \sigma a + \Delta \sigma b \left(1 - e^{-(\lambda/b)t} \right)$$
(17)

Em que: ΔH = recalque final;

H₀ = altura inicial do maciço;

 $\Delta \sigma$ = tensão de compressão dependente da altura do maciço, peso específico e cargas externas;

a = parâmetro de compressão primária;

b = parâmetro de compressão secundária;

 (λ/b) = taxa de compressão secundária;

t = tempo decorrido desde aplicação de cargas.

2.4.3.2 Modelo de Marques (2001)

Marques (2001) desenvolveu um modelo reológico compósito para representar os mecanismos de compressão primária e secundária. A formulação da compressão primária é introduzida como uma "compressão imediata", que é independente do tempo, com base na observação de que o respectivo processo é linear para curvas de índice de vazios como uma função do logaritmo da tensão aplicada. O modelo é representado pela Equação 18.

$$\frac{\Delta H}{H} = C'_c \log\left(\frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0}\right) + \Delta \sigma. b. \left(1 - e^{-ct'}\right) + E_{dg}. \left(1 - e^{-dt''}\right)$$
(18)

Em que:

 $\Delta H = recalque final;$

H = altura inicial do maciço;

C'_c = coeficiente de compressão primária;

- σ_0 = tensão vertical efetiva inicial ao meio da camada sob análise;
- $\Delta \sigma$ = incremento de tensão vertical ao meio da camada sob análise;

b = coeficiente de compressão mecânica secundária;

c = taxa de compressão mecânica secundária;

E_{dg} = compressão total devido à degradação de resíduos;

d = taxa de compressão biológica secundária;

t' = tempo a partir da aplicação do carregamento;

t" = tempo a partir da disposição dos resíduos.

2.4.4 Modelos incorporando biodegradação

2.4.4.1 Modelo Park & Lee (1997)

Park & Lee (1997) propuseram um modelo de previsão de recalques que considera a biodegradação dos RSU como variável dependente do tempo. A taxa de recalques é assumida como sendo o nível de movimentação do maciço que é diretamente proporcional à quantidade de sólidos solubilizados.

A solubilização de materiais orgânicos é geralmente expressa, utilizando-se cinética de primeira ordem. Contudo, a determinação dos coeficientes cinéticos ou das constantes de hidrólise, bem como a sua variação de acordo com as condições ambientais de cada localidade é difícil. O modelo pode ser expresso conforme a Equações 19 e 20.

$$\varepsilon(t)_{mec} = C_{\alpha} \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \tag{19}$$

 $\varepsilon(t)_{dec} = \varepsilon_{tot_dec} \left(1 - e^{-k_1}\right) \tag{20}$

Em que:

 C_{α} = Taxa de compressão secundária;

k = taxa de deformações provenientes de decomposição, constante de primeira ordem/tempo;

 $\varepsilon_{(t)mec}$ = deformação por compressão mecânica;

 $\varepsilon_{(t)dec}$ = deformação por compressão de decomposição biológica;

ε_{tot_dec} = quantidade total de compressão que irá ocorrer devido à decomposição de resíduos biodegradáveis;

t₁ = tempo, em dias, para conclusão da compressão primária;

 t_2 = tempo, em dias, para o qual é feita a previsão do recalque.

A soma de ambos os termos fornece o total de compressão sofrido pelo maciço de RSU.

2.4.4.2 Modelo de Hettiarachchi et al. (2009)

Hettiarachchi et al. (2009) desenvolveram um modelo de previsão assumindo que os recalques provenientes de biodegradação seguem a reação de cinética de primeira ordem. O recalque total é expresso como um processo combinado entre compressão mecânica (ΔH_m) e recalque induzido por biodegradação (ΔH_b). O modelo é expresso conforme as Equações 21, 22 e 23.

$$(\Delta H)_b = H_i \left[\frac{M_{si}}{\rho_w} \sum_{j=1}^4 \frac{f_{sj}}{G_{sj}} \left(1 - exp^{-\lambda_j t} \right) \right]$$
(21)

$$(\Delta H)_m = H_i C^* log(\sigma' + \Delta \sigma' / \sigma')$$
⁽²²⁾

$$H_f = H_i - (\Delta H)_b - (\Delta H)_m \tag{23}$$

Em que: H_i = altura inicial do maciço; M_{si} = massa seca geral inicial dos RSU;

 ρ_w = peso específico da água;

f_{si} = fração de sólidos inicial para cada grupo de resíduos;

G_{si} = peso específico de cada grupo j de resíduos sólidos;

 λ_j = constante cinética de primeira ordem para cada grupo j de resíduos sólidos;

t = tempo decorrido desde o início da operação do aterro;

C* = parâmetro de compressibilidade;

 σ' = tensão efetiva;

 $\Delta \sigma'$ = diferencial na tensão efetiva;

 H_f = altura final pós recalque.

2.4.4.3 Modelo de Marques et al. (2003)

Marques et al. (2003) desenvolveram um modelo de previsão de compressibilidade em aterros de RSU, aplicando melhorias ao modelo elaborado pelo referido autor em 2001.

O presente modelo incorpora três mecanismos, resposta imediata ao carregamento, *creep* e decomposição bioquímica, considerando compressão unidimensional no maciço.

RSU são normalmente dispostos em camadas nos aterros durante um certo período de anos. Na implementação do modelo, a disposição é idealizada como uma série progressiva de camadas. A espessura destas camadas pode ser estabelecida como sendo a mesma das células diárias, pós compactação. A ideia é, depois de todas as camadas terem sido dispostas, o recalque (Δ H) da superfície do aterro, a qualquer tempo (t) poder ser determinado. A deformação total é dada pela Equação 24.

 $\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_c + \varepsilon_b \tag{24}$

Os três termos ε_p , ε_c , e ε_b representam, respectivamente, deformação resultante da aplicação imediata de carga, deformação dependente do tempo proveniente do *creep* e deformação dependente do tempo proveniente da decomposição bioquímica, sendo que o recalque total é dado pela Equação 25.

$$\Delta H = \sum_{i=1}^{N} H_i \left[\varepsilon_{pi} + \varepsilon_{ci}(t) + \varepsilon_{bi}(t) \right]$$
(25)

Em que:

N = número de camadas no aterro;

H_i = espessura inicial da camada i compactada;

ε_{pi} = deformação da camada i, resultante da carga exercida pelas camadas sobrejacentes;

 ϵ_{ci} = deformação no tempo t da camada i, devido ao *creep* associado às tensões pelo peso próprio e pelo peso das camadas sobrejacentes;

ε_{bi} = deformação no tempo t da camada i, devido à decomposição bioquímica da camada i.

As deformações são, então, dadas pelas Equações 26, 27 e 28.

$$\varepsilon_{pi} = C'_c \log\left(\frac{(1/2)\gamma_i H_i + \sum_{j=i+1}^N \Delta \sigma_{ij}}{(1/2)\gamma_i H_i}\right)$$
(26)

$$\varepsilon_{ci}(t) = b \left[\frac{1}{2} \gamma_i H_i \left(1 - e^{-c(t-t_i)} \right) + \sum_{j=i+1}^N \Delta \sigma_{ij} \left(1 - e^{-c(t-t_j)} \right) \right]$$
(27)

$$\varepsilon_{bi}(t) = E_{DG} \left(1 - e^{-d(t-t_i)} \right) \tag{28}$$

Em que:

 γ_i = peso específico da camada i (resíduos e material de cobertura);

H_i = altura inicial do maciço;

t = tempo decorrido após todas as camadas do aterro terem sido dispostas;

t_i = tempo decorrido após a disposição da camada i;

t_j = tempo decorrido após a disposição da camada j, i + 1;

 $\Delta \sigma_{ij}$ = mudança na tensão vertical imposta pela camada j, sobre a camada i;

c = taxa constante para compressão mecânica secundária;

C'_c = índice de compressão;

E_{DG} = índice de deformação total que pode ocorrer por decomposição; d = taxa constante para compressão biológica secundária.

2.4.4.4 Modelo de Oweis (2006)

Oweis (2006) desenvolveu um modelo que prevê recalques provenientes de processos mecânicos e de processos oriundos da decomposição biológica. As previsões são feitas perante as condições de recalques mecânicos provenientes da compressão de RSU devido ao peso das camadas sobrejacentes, recalques mecânicos devido ao creep sob tensão efetiva constante e recalques provenientes da perda de massa ou conversão de matéria orgânica para gás.

O recalque mecânico durante o preenchimento do aterro é calculado por meio da utilização da Equação 29.

$$U_{p} = 0.87 Hm' t_{c} C'_{c}$$
(29)

Em que:

U_p = recalque primário dos RSU para a espessura projetada;

H = espessura projetada;

C'_c = índice de compressão em termos de deformação vertical;

m' = taxa de preenchimento (aumento na espessura da camada/unidade de tempo);

t_c = tempo para conclusão do preenchimento;

No tempo t (meses), enquanto se preenche o aterro, e no tempo t_c, o recalque estimado pelo creep é calculado pelas Equações 30 e 31.

$$U_{s} = 0.435C'_{\alpha}m'[1 + \{tln(t)\} - t]$$

$$U_{stc} = 0.435C'_{\alpha}m'[1 + \{t_{c}ln(t_{c})\} - t_{c}]$$
(30)
(31)

Em que:

U_s = Recalque pelo creep no tempo t;

U_{stc} = Recalque pelo creep no tempo tc;

 C'_{α} = coeficiente de compressão secundária modificado em termos de deformação;

m' = taxa de preenchimento (aumento na espessura da camada/unidade de tempo);

t = tempo em meses durante o preenchimento do aterro;

t_c = tempo para conclusão do preenchimento.

Assumindo que o preenchimento se encerra no tempo t_c, o *creep* adicional se dará pela Equação 32.

$$\Delta U_s = 0.435 H C'_{\alpha} ln\left(\frac{t}{t_c}\right) \tag{32}$$

Em que:

H = espessura projetada do maciço;

 $t = tempo em dias t_c \le t;$

Em se tratando de recalque por decomposição biológica durante o preenchimento do aterro, tem-se o resultado fornecido pela Equação 33.

$$U_{d} = \beta m' \left[t_{c} - \frac{1}{k} (1 - e^{-kt_{c}}) \right]$$
(33)

Em que:

U_d = recalque por decomposição no tempo t_c;

m' = taxa constante de aumento da camada de resíduos com o tempo;

k = constante de decaimento durante o preenchimento;

t_c = tempo para conclusão do preenchimento do aterro;

 β = fração da massa de resíduos com potencial para se converter a gás.

Já o recalque pós vida útil do aterro, ou seja, para aterros encerrados, referente a decomposição biológica, é então dado pela Equação 34.

$$(U_d)_{t \ge tc} = \beta H \left[1 - \left\{ \frac{1}{t_c k} \right\} (1 - e^{-kt_c}) \left(1 - e^{-k'(t_{pc} - t_c)} \right) \right]$$
(34)

Em que:

 $(U_d)_{t \ge tc}$ = recalque por decomposição no tempo t_{pc} maior ou igual a t_c ;

H = espessura projetada do maciço;

t_c = tempo para conclusão do preenchimento do aterro;

 $t_{pc} = tempo > t_c$

β = fração da massa de resíduos com potencial para se converter a gás;

k = constante de decaimento durante o preenchimento;

k' = constante de decaimento pós preenchimento.

2.4.4.5 Modelo de Liu et al. (2006)

Liu et al. (2006) desenvolveram um modelo considerando geração de gás, devida à decomposição de resíduos. A pressão do gás no interior do aterro é elevada, pela acumulação deste, durante a decomposição da fração orgânica dos resíduos. O fluxo de gás, que é induzido pelo aumento da pressão, é calculado com base no conceito do fluxo de gás constante através de um meio não saturado. O recalque do aterro é assumido como sendo a soma da porção sólido decomposta e da porção referente ao escoamento de gás.

O quantitativo de recalque é estimado por meio da adoção de uma relação constitutiva entre tensão e volume, considerando-se meios não saturados. A pressão do gás em diferentes profundidades, em um tempo t decorrido é dada pela Equação 35.

$$U_{a(y,t)} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{4U_0}{(2n+1)\pi} e^{-\lambda_n t} + \frac{4B}{(2n+1)(\lambda_n - k)\pi} \times \left(e^{-kt} - e^{-\lambda_n t} \right) \right] \operatorname{sen}(py)$$
(35)

Em que: $U_a = excesso de pressão de gás (N.m⁻²);$ $U_0 = pressão de gás no tempo t (t=0);$ n = porosidade no aterro;

t = tempo decorrido;

B = constante interativa associada com a biodegradação de orgânicos;

k = constante de degradação de primeira ordem;

y = profundidade abaixo da superfície do aterro.

Outros termos da Equação 36 são definidos nas Equações 36, 37 e 38.

$$\lambda_n = Ap^2 \tag{36}$$

$$p = \frac{(2n+1)}{2L}\pi\tag{37}$$

$$A = -\frac{V_0 k_a RT}{\omega_i (m_3 V_0 u_a + V_c) q}$$
(38)

Em que:

A = coeficiente de compressão referente a fase aerada;

R = constante universal dos gases (N.m.mole⁻¹.K⁻¹);

T = temperatura absoluta no interior do maciço (K);

L = teor de umidade dos resíduos;

 V_0 = volume inicial total dos resíduos (m³);

k_a = constante de atividade do gás;

V_a = volume de gás nos vazios do maciço (m³);

m₃ = coeficiente de mudança de volume do gás;

 ω_i = massa molecular do ar original (kg. mole⁻¹);

u_a = excesso de poropressão do gás;

g = aceleração da gravidade (m/s).

2.4.4.6 Modelo de Meruelo (PALMA, 1995)

O modelo de Meruelo foi desenvolvido pela equipe de geotecnia da Universidade de Cantabria, Espanha, com a colaboração da equipe de geotecnia da Universidade Católica de Valparaíso, no Chile. Este modelo foi denominado de Meruelo em função do nome do aterro sanitário a partir do qual foi desenvolvido (PEREIRA, 2000).

O modelo depende da perda de massa dos materiais degradáveis que ocorre sob condições anaeróbias e cujo principal fator limitante no processo de biodegradação é a taxa de hidrólise. Esta hipótese é baseada no fato de que a hidrólise é o mecanismo mais frequentemente utilizado pelos microrganismos para transformar compostos orgânicos complexos em compostos mais simples, possibilitando assim a obtenção de condições favoráveis à completa decomposição do resíduo em estágios sucessivos conforme estudos das fases dos processos de degradação apresentados por Barlaz e Han (1993) e Tchobanouglous et al. (1994).

Este modelo visa prever os recalques que ocorrem em um aterro a partir de uma formulação que incorpora e relaciona parâmetros fundamentais que determinam os processos de degradação biológica, de forma que nele só se consideram os recalques secundários.

Portanto, atendendo a avaliação dos recalques, estes se expressam para todo o período posterior ao encerramento da vida útil de um aterro como função dos seguintes parâmetros na Equação 39.

$$S_{s} = \alpha HCOD \left[1 - \frac{1}{k_{h}T_{c}} (e^{-k_{h}} (t - T_{c}) - e^{-k_{h}t}) \right]$$
(39)

Em que:

 $S_s = recalques;$

 α = coeficiente de perda de massa transformada em recalques;

H = altura do aterro;

COD = conteúdo de matéria orgânica biodegradável dos RSU;

 T_c = tempo de preenchimento do aterro;

 k_h = coeficiente de hidrólise;

t = tempo para o qual se deseja prever os recalques.

Nesta expressão se reproduzem as formulações para a degradação de resíduos orgânicos, modificadas para se levar em conta a massa de resíduos que experimenta de forma contínua a degradação e que tenha sido fornecida durante um tempo determinado com um ritmo constante. Além disto, o material degradado,

assim como o remanescente, expressam-se como uma fração do total de material do aterro.

No que diz respeito à relação entre o volume dos recalques produzidos e a correspondente perda de massa por degradação, o coeficiente "α" se considera constante e característico do tipo de aterro e dos resíduos depositados.

Consequentemente, a expressão permite que se faça a previsão dos recalques de longo prazo em um aterro de RSU. De todo modo, a dificuldade levantada inicialmente para se determinar a cota de superfície do aterro no início do processo de degradação, torna adequado expressar os recalques em termos de aumento de profundidade em relação a outro momento determinado, considerado como inicial.

Cabendo ressaltar que as condições reais em um antigo vazadouro, conforme o objeto deste estudo, se obtêm de acordo com um primeiro nivelamento conduzido em um momento t_0 > Tc. Introduzindo estes termos, se chega a Equação 42, que reflete a evolução de recalques.

$$\Delta S = \frac{\alpha HCOD}{k_h T_c} (1 - e^{k_h T_c}) \left(e^{-k_h t'} - e^{-k_h t_0} \right)$$
(42)

Em que:

 ΔS = variação de recalque;

 α = coeficiente de perda de massa transformada em recalques.

H = altura do aterro;

COD = conteúdo de matéria orgânica biodegradável dos RSU;

 k_h = coeficiente de hidrólise;

 T_c = tempo de preenchimento do aterro;

t₀ = tempo decorrido até o início do monitoramento;

t' = tempo para o qual se deseja prever os recalques t'> t_0 .

3. METODOLOGIA

3.1 Escolha da Área de Estudo

A escolha do antigo vazadouro da Marambaia como área de estudo neste trabalho se deve ao fato de se possuírem dados de monitoramento para realização da proposta em tela e, principalmente, pela disponibilidade desses dados em decorrência da interação entre professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UERJ e profissionais da empresa HAZTEC CTR Nova Iguaçu.

3.2 Histórico e Descrição da Área de Estudo

O Aterro Controlado da Marambaia se encontra em Vila de Cava, na região leste do município de Nova Iguaçu. A área se localiza na Estrada Zumbi dos Palmares (RJ-111), número 4.800. Limita-se com o Rio Iguaçu ao norte, com a referida estrada a oeste e terrenos particulares nas outras direções.

O aterro possui área aproximada de 20ha e seu acesso se faz pela RJ-111 que liga o bairro Vila de Cava a Tinguá, conforme Figura 4.



Figura 4 – Acesso à área de estudo.

Fonte: Arquivo do Autor.

As informações a seguir são baseadas, principalmente, no relatório técnico Resol (2003) e nos trabalhos dos autores Mattos (2005) e Mota (2005).

O destino final dos RSU, resíduos dos serviços de saúde e industriais coletados pela Prefeitura Municipal de Nova Iguaçu(PMNI) desde maio de 1987 até fevereiro de 2003, era o antigo "Lixão da Marambaia", chegando a atender uma demanda diária de até 490 toneladas de resíduos.

O vazadouro era operado de forma bastante precária e informal. O espalhamento dos resíduos dispostos ficava a cargo apenas de um trator de esteiras, uma pá carregadeira e um caminhão basculante que eram também utilizados para os serviços de compactação e recobrimento, cabendo ressaltar o caráter não regular de execução destes serviços, especialmente no que concerne à compactação (efetuada de maneira incipiente) e à cobertura da massa de resíduos disposta, com a ocorrência de grandes superfícies descobertas. Dessa forma, os taludes das células de resíduos encerradas se apresentavam em declividades acentuadas.

Durante praticamente a totalidade do período de operação, os acessos internos do aterro não apresentavam pavimento ou qualquer tipo de proteção superficial, comprometendo o tráfego das carretas, veículos coletores e demais máquinas e equipamentos de operação, especialmente em períodos de chuvas intensas, devido à pista escorregadia e à formação de valas causadas pelos próprios pneus dos veículos em trânsito permanente.

Desta forma, era bastante comum, por ocasião das chuvas fortes, que os resíduos fossem descarregados sem qualquer controle ao lado da estrada de acesso à parte alta da área de disposição. Essa situação foi um pouco amenizada somente nos últimos meses de operação do "lixão",quando se implantou uma capa asfáltica no trecho em aclive da via principal de acesso interno à área operacional.

A falta de recobrimento dos resíduos e de qualquer dispositivo para drenagem dos gases gerados também ocasionavam permanentes focos de combustão. Esse fato agravava ainda mais o quadro de degradação ambiental tanto pela poluição atmosférica,como os riscos à segurança da comunidade e das pessoas que se encontravam na qualidade de catadores em atividade no local, conforme Figuras 5 e 6.



Figura 5 – Vista aérea do vazadouro (maio/2000).

Fonte: Emlurb (2000).

Figura 6 – Catadores em atividade no antigo Lixão.



Fonte: Engecorps (2000).

As áreas utilizadas para disposição dos resíduos que se encontravam recobertas por algum tipo de material eram precárias, com espessura apenas suficiente para o controle dos macro-vetores, o que se refletia no grande número de animais (bovinos,eqüinos, suínos e aves diversas) dentro da área operacional, bem como de moscas e outros vetores transmissores de doenças, todos atraídos pelos restos orgânicos expostos.

A falta do sistema de drenagem superficial resultava em elevada produção de lixiviado, potencializada pela já referida inexistência de cobertura na maior parte da área operacional.

Devido à localização do antigo lixão às margens do Rio Iguaçu, a pressão dos órgãos ambientais da época, como a Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA) e a Delegacia Estadual de Meio Ambiente, passou a ser mais efetiva, principalmente, a partir do início de programas estaduais que visavam a melhoria das condições de saneamento da Baixada Fluminense, como o Programa de Despoluição da Baía de Guanabara, Reconstrução Rio e Baixada Viva.

Uma vez que a cada dia que se passava, a situação do antigo Lixão da Marambaia se agravava ainda mais, a PMNI, através da Empresa de Limpeza Urbana (EMLURB), tomou a decisão de encerrá-lo e deu início, no final do ano de 1999, ao processo licitatório por concorrência pública para execução dos serviços relativos ao tratamento e destinação final de resíduos sólidos do município, por meio da construção, implantação, operação e manutenção de uma Central de Tratamento e Destinação Final de Resíduos Sólidos (CTR).

O lixão então funcionaria até o início das operações da nova CTR Nova Iguaçu, ocorrido em 2003, conforme compromisso estabelecido no Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) firmado entre o Ministério Público do Estado do Rio de Janeiro, a PMNI e a FEEMA.Como a EMLURB pretendia resolver o passivo ambiental do lixão encerrado, o projeto previu ainda, por obrigação contratual, a recuperação ambiental do Lixão da Marambaia.

O processo de recuperação ambiental do vazadouro foi iniciado em janeiro de2001, logo após a assinatura do contrato de concessão de serviços de destinação final dos resíduos sólidos de Nova Iguaçu. Foi realizado um primeiro levantamento topográfico da área abrangida pelo antigo lixão, seguindo-se a execução de uma campanha de sondagens.

Utilizando-se dados dos levantamentos realizados, foi possível efetuar uma estimativa do volume de resíduos dispostos ao longo do período de operação do Lixão da Marambaia. Com estes dados, chegou-se à conclusão de que foram dispostos um total de 2.165.193,00 m³ de resíduos no aterro, totalizando 2.814.751,00 toneladas de resíduos até fevereiro de 2003, fim de sua vida útil (MATTOS, 2005).

A recuperação da área degradada e o encerramento técnico do vazadouro, impuseram a implantação de estruturas de engenharia tais como cercamento e isolamento da área, sistemas de drenagem de águas pluviais e de gases e captação do lixiviado, além de promover a impermeabilização e cobertura final das áreas aterradas.

A primeira etapa dos trabalhos se baseou na regularização das plataformas e posteriormente conformação de bermas e taludes. Esta foi efetuada de modo a estabelecer taludes com inclinação 1:2 (V:H) tomando como diretrizes geométricas básicas para execução de bermas, uma largura mínima de 3 metros e uma altura de 5 metros.

Na periferia do vazadouro foram implantados aterros de contenção, executados com material de baixa permeabilidade, que funcionavam como diques de bloqueio dos lixiviados. Ao longo dos limites do dique e junto ao pé dos taludes, foi implantada a linha de drenagem periférica para o lixiviado, que era conduzido para as três lagoas de acumulação nas vertentes norte, sul e sudeste do aterro.

Foi também implantado um sistema para a captação de gases do maciço de resíduos e, posterior, queima em uma usina construída no próprio vazadouro, para a negociação de créditos de carbono como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), firmado pela Haztec CTR Nova Iguaçu, conforme Figura 7.



Figura 7 – Usina de queima de Biogás.

Fonte: Haztec CTR Nova Iguaçu (2012).

Foram executadas canaletas de pé e crista dos taludes, com declividade longitudinal suficiente para conduzir as águas pluviais captadas para os pontos de

cota mais baixa e, posteriormente, por meio de galerias de tubos de concreto armado, para a calha drenante natural.

Definida a conformação final das plataformas, bermas e taludes, foi imediatamente efetuada a cobertura dos resíduos. O revestimento final do aterro foi previsto para ser realizado empregando-se camada de solo argiloso, remanescente no próprio local e em jazidas vizinhas, de 0,60 m de espessura e permeabilidade inferior a 10⁻⁷ cm/s, que foi espalhada e compactada em sub-camadas de 0,30 m (MOTA, 2005).

Sobre a camada impermeabilizante de argila foi efetuada adubação orgânica e, posteriormente, plantio de, aproximadamente, 30.000 mudas de gramíneas e arbustivas, optando-se por trabalhar com espécies pioneiras de rápido crescimento, distribuídas em consórcio entre gramíneas e leguminosas (VEREDA, 2010).

O projeto de recuperação ambiental foi encerrado em setembro de 2004, mantendo-se para posteridade apenas os sistemas de monitoramento dos recursos hídricos, por meio da análise de amostras de poços instalados no aterro, e geotécnico, o qual será abordado adiante neste estudo.

A evolução fotográfica de vazadouro para Aterro Controlado da Marambaia pode ser observada na Figura 8.



Figura 8 – Vista aérea do Aterro Controlado da Marambaia em 2000 (a), 2002 (b), 2008 (c), 2009 (d), 2010 (e) e 2016 (f).

Fonte: Adaptado de Engecorps (2000), Resol (2003), Haztec CTR Nova Iguaçu (2010) e Software Google Earth (2016).

Hoje, todos os equipamentos de controle e monitoramento ambiental se encontram desmobilizados da área de estudo. A Haztec CTR Nova Iguaçu não exerce mais domínio sobre o aterro, uma vez que foi comprovado pelo Ministério Público do Rio de Janeiro que a empresa já cumpriu suas obrigações estipuladas no TAC.

Cabe ressaltar que a região do aterro em Vila de Cava, atualmente, encontrase valorizada, principalmente pela presença de fazendas e sítios voltados para atividade de entretenimento e lazer.

3.3 Características Climáticas da Região da Marambaia

O Aterro Controlado da Marambaia está situado na chamada zona de transição, situada entre a zona de expansão urbana e a Reserva Biológica do Tinguá, de acordo com Mota (2005).

O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) apresenta as características do microclima da referida região, que são definidas em função de uma série de processos, sendo eles posição geográfica, relevo, dinâmica das massas de ar e os processos urbanos locais.

De acordo com o método tradicional de classificação climática, o método de Koppen, a área de influência do aterro da Marambaia pode ser classificada como quente e úmida, representando clima megatérmico com estação seca no inverno.

Com relação a umidade relativa do ar na região do aterro, tem-se a ocorrência da faixa média anual entre os valores de 80 e 82%, sendo responsáveis pela sua variação fatores como presença de vegetação e posicionamento das encostas.

Segundo os autores Mota (2005) e Mattos (2005), na região monitorada pelas estações meteorológicas de Xerém, Tinguá e outras,a qual se insere a área de estudo, os padrões de precipitação variam de acordo com a dinâmica das massas de ar e a orografia existentes.

Utilizando-se do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), que é um dos instrumentos de gestão previstos na Política Nacional de

Recursos Hídricos, instituída pela Lei Federal nº 9.433, de 08 de Janeiro de 1997, foram investigadas as estações pluviométricas da região do aterro.

Foram reconhecidas as estações Barreira (fora de operação) e Catavento, ambas operadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), a estação Santa Cruz da Serra, operada pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA), estação Xerém 2 operada pelo Centro Estadual de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), estação Tinguá (fora de operação) e estação Xerém, ambas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Devido à ausência de dados das estações mais próximas ao aterro no sistema, foram selecionados como parâmetro de dados para o aterro, os dados da estação Xerém.

Quanto à variação de temperatura na região, foi possível verificar com o levantamento que a temperatura varia entre 24 e 42 °C nos meses de verão e entre 14 e 26 °C nos meses de inverno entre os anos de 2008 e 2015, apresentando-se como condicionantes principais para as variações locais fatores como presença de vegetação, exposição do solo e sombreamento.

Os dados pluviométricos e climatológicos disponíveis da região no intervalo de tempo entre 2008 e 2015 indicaram que a distribuição sazonal da média mensal de precipitação apresenta o valor máximo, em um período de verão, de 208 mm, e o mínimo, em um período de inverno, com 63 mm. O valor médio anual é de 1.595 mm e a variação mensal média mostra que janeiro é mês mais chuvoso, com 229 mm, e julho o mais seco, com 51,4 mm de precipitação.

3.4 Ensaio de Reconhecimento dos Resíduos no Aterro da Marambaia

Para se obter maior conhecimento das condições atuais dos resíduos dispostos no Aterro Controlado da Marambaia, esperava-se realizar ensaios de reconhecimento na área. Planejou-se a realização de três sondagens a trado, entretanto só foi possível realizar uma sondagem, já que havia pessoas reivindicando a área e que não permitiram a realização dos demais ensaios planejados.

Durante a atividade, foram coletadas amostras de resíduos em três profundidades diferentes, por meio de um furo, localizado próximo ao Marco Superficial 20, sendo elas 0,80 m, 1,10 m, e 1,40m, uma vez que se levantou a informação que o aterro dispunha de uma camada de cobertura de 0,60 m de espessura (RESOL, 2003).

Foi feita uma análise tátil-visual das amostras para se observar o nível de degradação e a diferença de coloração entre as camadas de resíduos coletadas. A etapa é retratada na Figura 9.

Figura 9 – Execução de sondagem e análise dos resíduos.



Fonte: Arquivo do autor.

Cabe ressaltar que neste ensaio não foi possível obter resultados que traduzissem o real estado de decomposição dos resíduos, uma vez que, mesmo adotando as referidas profundidades, observou-se que as amostras representavam o material da camada de cobertura do aterro e pedaços de embalagens de plástico.

3.5 Monitoramento de Recalques no Aterro da Marambaia

A pesquisa teve como base a análise do monitoramento dos recalques realizado no aterro pelo corpo técnico da Haztec CTR Nova Iguaçu no período de fevereiro de 2008 a setembro de 2015, totalizando um intervalo de tempo de 2771 dias.

O monitoramento geoténico dos recalques no Aterro Controlado da Marambaia contou com a instalação de 20 marcos superficiais (MS), numerados de MS-01 a MS-20, distribuídos por toda área do aterro, sendo que, para este estudo, foram analisados os dados de recalque dos marcos MS-01, MS-03, MS-04, MS-11 a MS-16 e MS-18 a MS-20, uma vez que os regitros dos outros marcos descartados se apresentavam erráticos e incompletos. Na Figura 10, pode-se observar registro fotográfico do MS-20.





Fonte: Arquivo do Autor.

A topografia do terreno com informação das cotas de cada região do aterro foi obtida na etapa de conformação dos taludes, durante execução do projeto de recuperação da área, e as alturas iniciais de cada MS foram obtidas através de nova leitura topográfica realizada no início do monitoramento.

O período de leitura topográfica dos MS durante o monitoramentose deu conforme a Tabela 3, cabendo ressaltar que a última leitura se deu no período da coleta dos dados com o corpo técnico da empresa que cedeu as informações, sendo somente possível a leitura dos MS que ainda se apresentavam íntegros e fixados em seus locais de origem.

Data	Tempo (dias)
01/fev/08	0
01/abr/08	60
01/jul/08	151
01/ago/08	182
15/set/08	227
16/out/08	257
02/dez/08	304
30/dez/08	332
12/mar/09	404
15/set/10	956
28/jun/11	1242
28/set/11	1334
07/nov/11	1374
29/dez/11	1426
13/fev/12	1472
10/abr/12	1529
18/jul/12	1628
28/set/12	1700
12/dez/12	1775
04/set/15	2771

Tabela 3 – Período de leitura dos MS.

Fonte: Arquivo do Autor.

Para o registro topográfico de cada marco foi utilizada Estação Total da marca TOPCON, modelo GTS 212, com precisão angular de 6" e precisão linear de ± 3mm + 5 ppm.

No Apêndice A do presente estudo, podem ser observados os dados dos registros de cada marco superficial trabalhado, detalhados durante todo período de monitoramento e tratados pelo presente Autor.

Na Figura 11, pode-se observar a distribuição espacial de todos os marcos superficiais na área de estudo, inclusive suas especificações de coordenadas UTM.





Fonte: Adaptado de Haztec CTR Nova Iguaçu.

3.6 Previsão de Recalques

A escolha dos modelos de previsão de recalques a serem utilizados se baseou nas premissas de cada um dos modelos, ou seja, em que base teórica o modelo foi criado, quais os parâmetros necessários para sua utilização, o grau de dificuldade com a obtenção destes parâmetros e na precisão da estimativa de recalques. Foram definidos então quatro modelos, sendo eles o modelo de Sowers (1973), baseado em teorias da mecânica dos solos, Meruelo (PALMA, 1995) e Oweis (2006), baseados em variáveis que incorporam biodegradação, e o modelo empírico de Ling et al. (1998), para servirem como ferramentas da previsão de recalques a longo prazo dos RSU do vazadouro da Marambaia.

Para verificação de desempenho dos modelos utilizados neste estudo, ou seja, constatação de qual modelo melhor representou os dados observados no monitoramento, foi utilizada a proposta de Marques (2001), que compara o recalque medido com o previsto, verificando o desvio (D) obtido entre os valores calculados e observados, conforme a Equação 43.

$$D_{i,J} = \left(\frac{|\Delta H_{calc}(i,j) - \Delta H_{obs,j}|}{\Delta H_{obs,j}}\right) \times 100$$
(43)

Em que:

 $D_{i,j}$ = 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.

Com os dados do monitoramento, foi realizada a calibração dos referidos modelos e, a partir desta, foi efetuado um ajuste fino dos parâmetros ora obtidos com a ferramenta *Solver* do programa *Microsoft Office Excel*. Posteriormente, realizou-se uma previsão dos recalques verticais de longo prazo para um período de até 50 anos, contabilizado a partir da data inicial do monitoramento em tela.

Cabe ressaltar que existiram limitações para a aplicação desta metodologia, como, por exemplo, o não conhecimento da composição inicial exata dos RSU dispostos na área de estudo, devido à falta de controle da atividade,o fato de não ter

sido possível realizar uma sondagem em toda a massa de resíduos, com coleta de amostras e o fato de o aterro ter encerrado suas atividades em março de 2003 e os dados de monitoramento refletirem o período avaliado de 2008 a 2015, impactando diretamente na observação dos recalques referentes a compressão inicial e primária. Desta forma, algumas características e hipóteses de cálculo tiveram de ser previamente estabelecidas.

4. **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nesta seção são apresentados os resultados de monitoramento de recalques e as previsões utilizando os modelos matemáticos de Sowers (1973), Meruelo (PALMA, 1995), Ling et al. (1998) e Oweis (2006), para um período de 50 anos.

4.1 Monitoramento

A análise da compressibilidade dos RSU foi baseada nos controles e levantamentos topográficos realizados após o encerramento do antigo vazadouro da Marambaia, por meio de 12 marcos superficiais (MS), instalados sobre o aterro.

Essa análise teve como finalidade avaliar o comportamento compressivo do aterro, por meio dos dados de monitoramento e comparando estes valores com os dados encontrados na literatura técnica.

É importante destacar que, devido ao fato dos dados de recalque observados neste estudo terem sido obtidos entre 2008 e 2015 e o antigo vazadouro da Marambaia ter sido encerrado em 2003, pode-se afirmar que os referidos recalques se devem exclusivamente aos processos de compressão secundária, que estão sob a ação dos mecanismos de decomposição biológica, *creep*, alterações físico-químicas e ravinamento interno, conforme afirma McDougall (2011). Cabe ressaltar que não se pode separar as parcelas resultantes de cada mecanismo no comportamento da compressibilidade dos RSU da área de estudo, devendo-se analisá-los como um todo, assim como afirma Pereira (2000).

Os Gráficos 8 e 9 mostram as curvas de recalques verticais medidos em função do tempo de monitoramento considerado.



Gráfico 8 – Medidas de recalque dos MS que tiveram 5 anos (1775 dias) de observação.

Fonte: Arquivo do Autor.





Fonte: Arquivo do Autor.

O resumo das características encontradas nos marcos em estudo, bem como o período de leituras, a altura inicial do maciço sob o ponto monitorado, o recalque e a deformação observados estão apresentados na Tabela 4.
MS	Período de leituras	H(m)	Recalque (mm)	Deformação (%)
1	01/02/2008 a 04/09/2015	35,876	92	0,26
3	01/02/2008 a 04/09/2015	35,854	79	0,22
4	01/02/2008 a 04/09/2015	35,439	143	0,40
11	01/02/2008 a 04/09/2015	49,783	204	0,41
12	01/02/2008 a 04/09/2015	51,120	116	0,23
13	01/02/2008 a 12/12/2012	50,608	122	0,24
14	01/02/2008 a 12/12/2012	50,756	79	0,16
15	01/02/2008 a 12/12/2012	50,324	111	0,22
16	01/02/2008 a 12/12/2012	50,193	141	0,28
18	01/02/2008 a 12/12/2012	50,293	155	0,31
19	01/02/2008 a 12/12/2012	49,677	126	0,25
20	01/02/2008 a 04/09/2015	50,199	136	0,27

Tabela 4 – Resumo dos dados dos MS monitorados.

Fonte: Arquivo do Autor.

Observa-se nos Gráficos 8 e 9 que os recalques apresentaram valores que variaram entre 79 mm e 204 mm, representando deformações na faixa de 0,16% a 0,41%. Observa-se que a magnitude dos recalques é pequena no período monitorado, porém, como o vazadouro operou de maio de 1987 a fevereiro de 2003 e as medidas de recalque foram iniciadas em 2008, é muito provável que os recalques mais elevados já tenham ocorrido.

Levando-se em conta os resultados que constam na literatura técnica pode-se constatar que os valores obtidos se encontram na mesma ordem de valores encontrados por Carneiro (2013), média de 20 mm, que trabalhou com dados de um monitoramento de recalque, realizado entre julho de 2012 e junho de 2013, totalizando 335 dias, no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia, no Ceará, região de estações mais secas, em uma célula que teve início de operação em 1991 e foi encerrada em 2008, representando condições semelhantes ao monitoramento do vazadouro de Marambaia, ou seja, iniciou-se o monitoramento quando já haviam transcorrido grande parte dos recalques.

Os dados encontrados no presente estudo também se encontraram na mesma faixa de valores obtida por Gomes & Caetano (2010), que foi de 120 mm em média. Porém os autores trabalharam com dados de monitoramento, em um período de dois anos, de seis marcos superficiais de referência no aterro sanitário de pequeno porte localizado em Presidente Lucena (Rio Grande do Sul), o qual atende uma população de apenas 2100 habitantes. No estudo foi concluído que os resíduos possuíam poucos anos de aterramento, já que ainda apresentavam elevado teor de

matéria orgânica (50%). Durante o monitoramento dos autores as temperaturas da região variaram entre 5,1 °C e 34,7°C e a precipitação diária entre 0 e 59,7 mm.

Já em comparação com a faixa de valores definida por Pereira (2000), em média 1290 mm, os valores se apresentaram inferiores. A autora analisou resíduos com 4 anos de aterramento e monitorou os recalques por um período aproximado de 600 dias. A referida autora, em parte de seu trabalho, analisou os recalques imediatos, primários e secundários em pontos topográficos de referência superficiais alocados em uma célula experimental localizada no aterro controlado de Valdemingómez em Madri (Espanha), que se encontra em uma região de contrastes térmicos, com invernos severos e verões quentes, possuindo precipitação média anual de 430 mm.

O mesmo ocorrendo com relação aos valores reportados por Denardin (2013), que analisou dados de monitoramento de dois aterros, ambos inseridos em regiões de temperaturas médias inferiores as da área de estudo, sendo eles, uma célula encerrada do Aterro Sanitário de Minas do Leão, no município de Minas do Leão, RS, o qual atende 150 cidades com uma média de 50.000 ton/mês e uma área já encerrada do Aterro Sanitário de São Leopoldo, no município de São Leopoldo, RS, sendo esta área correspondente a um antigo lixão (Fase 1), esse possuindo uma demanda de 500 ton/mês. No primeiro aterro foram analisados 5 MS, no período de 1800 dias, com início no ano de 2007 e término no ano de 2012, tendo os recalques observados variado entre 2300 mm e 3950 mm. No segundo aterro foram analisados também 5 marcos superficiais, no período entre 1458 e 2067 dias, com início no ano de 2006 e término no ano de 2011, tendo os recalques medidos variado entre 680 mm e 2360 mm.

Também se apresentaram inferiores em comparação com a faixa de valores definida por Eyay (2016), 432 mm em média. O autor, trabalhando no Aterro Sanitário de São Leopoldo, na área definida como Fase 2, encerrada em 2014, analisou resultados de monitoramento de recalque de quatro marcos superficiais, durante um período de 16 meses.

Os Gráficos 10 e 11 mostram as curvas de velocidade, ou seja, taxa de recalque medidas em função do tempo de monitoramento considerado.



Gráfico 10 – Medidas de velocidade dos MS que tiveram 5 anos (1775 dias) de observação.

Fonte: Arquivo do Autor.



Gráfico 11 – Medidas de velocidade dos MS que tiveram 8 anos (2771) dias de observação.

Fonte: Arquivo do Autor.

Analisando o comportamento da velocidade de recalque, observou-se que os dados apresentam valores que variaram entre 0,333 e 0,029 mm/dia. Pode-se observar que a velocidade de recalque decresce com o transcorrer do tempo, assim como o esperado e apontado por diversos autores na literatura técnica, traduzindo um estabilização futura do maciço, conforme Sowers (1973), Abreu (2000), Alcântara (2007), Benson et al. (2007), Silva (2010), Caribé (2015), entre outros.

Pereira (2000) obteve valores de velocidade de recalques variando em uma faixa de 63,50 mm/dia a 2,50 mm/dia, já Denardin (2013) obteve valores de velocidades variando na faixa entre 7mm/dia e 3,5 mm/dia, no Aterro de Minas do

Leão, e entre 3,2mm/dia e 0,4 mm/dia, no Aterro de São Leopoldo. Por sua vez, Eyay (2016) obteve valores de velocidade variando entre 3,5 mm/dia a 0,5 mm/dia.

Verifica-se que os resultados de velocidade do monitoramento em Marambaia se apresentaram menores em comparação aos supracitados. Tal fato pode ser justificado pela idade avançada dos RSU da área de estudo do presente trabalho e pelo período de monitoramento ter se iniciado cinco anos após o encerramento das atividades, existindo grande possibilidade das maiores velocidade de recalque já terem transcorrido.

4.2 Análises Através da Modelagem de Recalques

Nesta seção, utilizam-se os resultados do monitoramento em campo para aplicação dos modelos de previsão de recalques. A análise dos dados permitiu obter o conjunto de parâmetros necessários para empregar os modelos utilizados, resultando em novos valores que indicam o provável comportamento do aterro em um período de até 50 anos.

Assim como informado anteriormente no presente trabalho, bem como ressaltado por Carvalho (1999), deve-se considerar que, antes da instalação dos MS, os resíduos, muito provavelmente, já haviam experimentado significativo processo de compressão devido ao tempo transcorrido. Portanto, para calibração dos modelos foram utilizados os dados obtidos no monitoramento, visando, exclusivamente, a modelagem da compressão secundária.

É importante esclarecer que as comparações dos resultados dos parâmetros de calibração dos modelos realizadas nesta seção tem caráter meramente informativo, uma vez que é esperado que cada área possua suas particularidades características, ou seja, variáveis de entrada nas equações.

4.2.1 Calibração do modelo Sowers (1973)

A calibração do modelo de Sowers (1973), em um primeiro momento, consistiu na organização dos termos da sua equação em função do índice de compressão secundária.

$$S_s = C'_{\alpha} H log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$
(6)

De forma que o tempo em dias para a conclusão da compressão primária (t₁) foi adotado como sendo 1 dia, uma vez que, conforme já informado, o monitoramento englobou somente o período em que existiu compressão secundária, o tempo em dias para que se desejava prever o recalque (t₂) foi o mesmo do intervalo de observação para cada MS monitorado e o recalque previsto foi fixado como sendo o máximo observado no monitoramento.

Posteriormente, com os valores iniciais de C' α obtidos, foi realizado um ajuste fino dos valores dos parâmetros do modelo que consistiu na utilização da ferramenta *Solver* para otimizar os valores de t₁e C' α , tendo como meta a ser atingida o menor desvio possível dos valores de recalque modelados em comparação com o dados obtidos no monitoramento, de forma que os resultados se apresentaram conforme a Tabela 5.

MS	t ₁ (dias)	H (mm)	t ₂ (dias)	C' α
01	77	35.876	2771	0,0009
03	37	35.854	2771	0,0009
04	19	35.439	2771	0,0014
11	120	49.783	2771	0,0026
12	103	51.120	2771	0,0016
13	80	50.608	1775	0,0018
14	78	50.756	1775	0,0012
15	97	50.324	1775	0,0014
16	83	50.193	1775	0,0018
18	100	50.293	1775	0,0014
19	133	49.677	1775	0,0022
20	110	50.199	2771	0,0020

Tabela 5 – Calibração do modelo de Sowers (1973).

Fonte: Arquivo do Autor.

Os valores de C'α obtidos variaram na faixa entre 0,0009 a 0,0026. Em comparação com valores encontrados por outros autores, verifica-se que a faixa se encontra próxima a obtida por Pereira (2000), valores próximos a 0,0017. No entanto, difere da que Babu et al. (2010) indicou,entre 0,015 e 0,350, por meio do levantamento de várias fontes secundárias de dados na literatura técnica,assim como também difere do valor obtido por Korf (2016), que operou com lisímetros em escala de laboratório, encontrando 0,1 como resultado para o parâmetro.

4.2.2 <u>Calibração do modelo Meruelo (PALMA, 1995)</u>

A calibração do modelo de Meruelo (PALMA, 1995) consistiu, em um primeiro momento, na obtenção do coeficiente de hidrólise (K_h) e do coeficiente de perda de massa transformada em recalques (α).

$$S_{s} = \alpha HCOD \left[1 - \frac{1}{k_{h}T_{c}} (e^{-k_{h}} (t - T_{c}) - e^{-k_{h}t}) \right]$$
(39)

Com o auxílio da verificação da equação da curva exponencial que melhor se adaptou aos dados do monitoramento de cada MS, gerada pelo programa *Microsoft Office Excel*, foi possível se obter o valor de K_h. Uma vez que se possuía este valor, reorganizou-se a equação do modelo em função de α para que este parâmetro fosse obtido.O COD adotado foi de 0,50 (UNFCCC, 2011), valor fornecido pelo relatório da referida convenção como sendo a fração de carbono orgânico degradável nos RSU que pode se decompor. O tempo de preenchimento do aterro foi o próprio tempo de operação (T_c), o tempo decorrido até o início do monitoramento (t₀) foi de 7605 dias, o tempo para o qual se deseja prever os recalques (t') foi o decorrido até o fim do período de observação para cada MS monitorado e o recalque previsto foi fixado como sendo o máximo observado no monitoramento.

Obtidos todos os parâmetros necessários ao modelo, foi realizado um ajuste fino do valor de α, por meio da utilização da ferramenta *Solver*, visando se obter um menor desvio possível dos valores de recalque modelados em comparação com o

dados obtidos no monitoramento, de forma que os resultados se apresentaram conforme a Tabela 6.

MS	H (mm)	COD	k _h (dia ⁻¹)	T _c (dias)	t ₀ (dias)	t' (dias)	α
01	35.876	0,50	0,0008	5.810	7.605	10.376	0,0891
03	35.854	0,50	0,0006	5.810	7.605	10.376	0,0556
04	35.439	0,50	0,0009	5.810	7.605	10.376	0,2229
11	49.783	0,50	0,0013	5.810	7.605	10.376	0,2866
12	51.120	0,50	0,0009	5.810	7.605	10.376	0,1426
13	50.608	0,50	0,0009	5.810	7.605	9.380	0,1692
14	50.756	0,50	0,0010	5.810	7.605	9.380	0,1363
15	50.324	0,50	0,0013	5.810	7.605	9.380	0,3701
16	50.193	0,50	0,0011	5.810	7.605	9.380	0,2842
18	50.293	0,50	0,0016	5.810	7.605	9.380	0,5363
19	49.677	0,50	0,0012	5.810	7.605	9.380	0,2595
20	50.199	0,50	0,0008	5.810	7.605	10.376	0,1292

Tabela 6 – Calibração do modelo de Meruelo (PALMA, 1995).

Fonte: Arquivo do Autor.

Os valores obtidos de K_h e α variam nas faixas de 0,0008dia⁻¹ a 0,0016 dia⁻¹ e 0,0556 a 0,5363 respectivamente.

Quanto a K_h, observou-se que os valores se apresentaram na mesma ordem de valores obtida por Palma (1995) e Mariano (1999) que encontraram uma faixa de 0,0001 dia⁻¹ a 0,0004 dia⁻¹, já em comparação com os obtidos por Pereira (2000), Melo (2003), Simões & Catapreta (2009), Denardin (2013) e Korf (2016), que encontraram valores variando entre 0,001 a 0,1, os resultados não se aproximaram.

Quanto ao parâmetro α , a faixa de valores encontrada se apresentou coerente com a encontrada com os referidos autores, exceto a de Korf (2016) que encontrou valor da ordem de 0,8.

4.2.3 Calibração do modelo de Ling et al. (1998)

A calibração do modelo de Ling et al. (1998) consistiu na obtenção da velocidade inicial de recalques (ρ_0) e do recalque último (S_{ult}).

$$S = \frac{t}{1/\rho_0 + t/S_{ult}}$$
(15)

Para tanto foi necessária uma análise de regressão linear para os dados de monitoramento de cada MS presente na área de estudo, de forma que foram plotadas dispersões t/S versus t e geradas as equações das retas que melhor se adaptavam aos referidos dados. Uma vez que se possuíam as equações, analisavam-se os inversos do intercepto e da inclinação que vinham a ser, respectivamente, ρ_0 e S_{ult} em um primeiro momento.

Posteriormente, com a utilização da ferramenta *Solver*, foi possível realizar um ajuste dos valores destes parâmetros, visando otimizar a calibração em tela no sentido de se minimizar o desvio entre valores monitorados e modelados, de forma que foram obtidos novos dados, conforme Tabela 7.

MS	ρ ο (mm/dia)	Sult (mm)
01	0,067	135,14
03	0,141	68,11
04	0,155	205,34
11	0,102	5000,00
12	0,125	192,61
13	0,140	232,58
14	0,150	114,77
15	0,080	1190,17
16	0,158	311,24
18	0,114	1250,00
19	0,117	400,24
20	0,132	270,04

Tabela 7 – Calibração do modelo de Ling et al. (1998).

Fonte: Arquivo do Autor.

Os valores obtidos de ρ_0 e S_{ult} variam nas faixas de 0,067 mm/dia a 0,155 mm/dia e 68 a 5000 mm respectivamente.

Quanto a ρ_0 , a faixa de valores determinada se encontra na mesma ordem da obtida por Eyay (2016), a qual foi de 0,024mm/dia a 0,142 mm/dia, contudo difere da obtida por Ling et al. (1998) que encontraram valores entre 0,0068 mm/dia e 0,013 mm/dia, Catapreta (2008) que encontrou valores entre 0,0039 mm/dia e 0,00791 mm/dia e Denardin (2013) que encontrou valores entre 0,0171 mm/dia e 0,0457 mm/dia.

Quanto a S_{ult}, a faixa de valores engloba as faixas definidas por Catapreta (2008) e Eyay (2016), as quais foram, respectivamente, 428 a 502 mm e 229,6 a 636,0 mm, porém estas tiveram amplitude de valores mais restrita, já com relação à Denardin (2013), que encontrou a faixa de 22,65 a 58,08 mm, os resultados não tiveram aderência.

4.2.4 <u>Calibração do modelo de Oweis (2006)</u>

A calibração do modelo de Oweis (2006) consistiu na utilização de duas equações propostas pelo autor, sendo elas, a referente ao recalque pelo mecanismo de *creep* após o encerramento das atividades no aterro (ΔU_s) e a referente a decomposição biológica pós-encerramento do aterro respectivamente (U_d).

$$\Delta U_s = 0.435 H C'_{\alpha} ln\left(\frac{t}{t_c}\right) \tag{32}$$

$$(U_d)_{t \ge tc} = \beta H \left[1 - \left\{ \frac{1}{t_c k} \right\} (1 - e^{-k t_c}) \left(1 - e^{-k' (t_{pc} - t_c)} \right) \right]$$
(34)

Para utilizar tais equações foi necessário reorganizar os termos da primeira (Equação 32) em função de C'_{α} (coeficiente de compressão secundária), de forma que o tempo de preenchimento do aterro foi o próprio tempo de operação (t_c), o tempo para o qual se deseja prever os recalques (t) foi o decorrido até o fim do período de observação para cada MS monitorado e o recalque previsto foi fixado como sendo o máximo observado no monitoramento.

Em um segundo momento, os termos da segunda (Equação 34) foram reorganizados em função de β (fração da massa de resíduos com potencial para se converter a gás), de forma que k (constante de decaimento durante o preenchimento) foi adotada como sendo 0,004167 (USEPA, 1998), conforme sugerido por Babu et al. (2010), k' (constante de decaimento pós preenchimento) foi adotada como sendo a constante de hidrólise do modelo de Meruelo e t_{pc} foi o tempo decorrido até o fim do período de observação para cada MS monitorado.

Por fim, por meio da utilização da ferramenta *Solver*, procedeu-se um ajuste dos valores de C'_a, k' e β , no sentido de se minimizar o desvio entre valores monitorados e calculados com o presente modelo, de forma que os resultados se apresentaram conforme Tabelas 8 e 9.

MS	H (mm)	t _c (dias)	t (dias)	C'α
01	35.876	5.810	10.376	0,03
03	35.854	5.810	10.376	0,03
04	35.439	5.810	10.376	0,07
11	49.783	5.810	10.376	0,08
12	51.120	5.810	10.376	0,05
13	50.608	5.810	9.380	0,06
14	50.756	5.810	9.380	0,04
15	50.324	5.810	9.380	0,05
16	50.193	5.810	9.380	0,06
18	50.293	5.810	9.380	0,08
19	49.677	5.810	9.380	0,06
20	50.199	5.810	10.376	0,05

Tabela 8 – Calibração da equação do creep secundário de Oweis (2006).

Fonte: Arquivo do Autor.

MS	H (mm)	k	k'	t _c (dias)	t _{pc} (dias)	β
01	35.876	0,004167	0,0019	5.810	10.376	(0,004)
03	35.854	0,004167	0,0224	5.810	10.376	(0,002)
04	35.439	0,004167	0,0817	5.810	10.376	(0,008)
11	49.783	0,004167	0,0902	5.810	10.376	(0,010)
12	51.120	0,004167	0,011	5.810	10.376	(0,006)
13	50.608	0,004167	0,0016	5.810	9.380	(0,007)
14	50.756	0,004167	0,0041	5.810	9.380	(0,004)
15	50.324	0,004167	0,0008	5.810	9.380	(0,006)
16	50.193	0,004167	0,0289	5.810	9.380	(0,007)
18	50.293	0,004167	0,2523	5.810	9.380	(0,009)
19	49.677	0,004167	0,0033	5.810	9.380	(0,007)
20	50.199	0,004167	0,0026	5.810	10.376	(0,006)

Tabela 9 – Calibração da equação de decomposição biológica de Oweis (2006).

Fonte: Arquivo do Autor.

Os valores obtidos de C'_a e β variam nas faixas de 0,03 a 0,08 e 0,002 a 0,010 respectivamente, sendo importante destacar, a título de validação matemática, que os valores deste último parâmetro se apresentaram negativos, contudo próximos a zero.

Babu et al. (2010) levantaram na literatura técnica valores de C'_{α} variando entre 0,02 e 0,32, faixa que engloba a encontrada pelo presente autor, e Oweis

(2006) encontrou valores de β na ordem de 0,2, valor não coerente com o encontrado.

4.2.5 Análise Geral das Calibrações

Tornou-se então possível verificar visualmente o desempenho das calibrações de cada modelo, para cada MS trabalhado conforme Gráficos 12 a 23.



Gráfico 12 - Calibração do MS-1.

Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 13 – Calibração do MS-3.



Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 14 - Calibração do MS-4.



Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 15 – Calibração do MS-11.



Fonte: Arquivo do Autor.



Gráfico 16 – Calibração do MS-12.

Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 17 – Calibração do MS-13.



Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 18 – Calibração do MS-14.



Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 19 – Calibração do MS-15.



Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 20 - Calibração do MS-16.



Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 21 – Calibração do MS-18.



Fonte: Arquivo do Autor.





Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 23 – Calibração do MS-20.



Fonte: Arquivo do Autor.

Utilizou-se então a proposta de Marques (2001) sobre a obtenção do desvio médio geral de recalque para a verificação do desempenho dos modelos durante toda a calibração, conforme resultado da Gráfico 24.



Gráfico 24 – Verificação do desvio médio geral.

Conforme observado, verificou-se que a análise procedida apresentou resultados razoáveis, permitindo observar uma boa relação entre os valores observados e os calculados, principalmente, pelo modelos Ling et al. (1998) e Oweis

Fonte: Arquivo do Autor.

(2006) com desvios médios de recalque de apenas 7,93% e 9,82% respectivamente, indicando uma melhor aproximação aos dados de campo.

4.2.6 Análise da previsão de recalques

Tomando como base os parâmetros obtidos pela calibração dos modelos ajustados na seção anterior, foi procedida uma previsão de recalques de longo prazo para todos os MS trabalhados no monitoramento realizado no antigo Lixão da Marambaia conforme descrito na seção 3.6, para o período de até 50 anos após o início do monitoramento. Os Gráficos 25 ao 36 apresentam os resultados dessa previsão.





Fonte: Arquivo do Autor.



Gráfico 26 – Previsão de recalques para MS-3.

Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 27 – Previsão de recalques para MS-4.



Fonte: Arquivo do Autor.



Gráfico 28 – Previsão de recalques para MS-11.

Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 29 – Previsão de recalques para MS-12.



Fonte: Arquivo do Autor.



Gráfico 30 – Previsão de recalques para MS-13.

Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 31 – Previsão de recalques para MS-14.



Fonte: Arquivo do Autor.



Gráfico 32 – Previsão de recalques para MS-15.

Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 33 – Previsão de recalques para MS-16.



Fonte: Arquivo do Autor.



Gráfico 34 – Previsão de recalques para MS-18.

Fonte: Arquivo do Autor.

Gráfico 35 – Previsão de recalques para MS-19.



Fonte: Arquivo do Autor.



Gráfico 36 – Previsão de recalques para MS-20.

A Tabela 10 apresenta os resultados da previsão para 50 anos de cada MS trabalhado.

МС	Sowers	s (1973)	Meruelo	o (1995)	Ling et a	ıl. (1998)	Oweis (2006)		
IVIS	Rec. (m)	Def. (%)	Rec. (m)	Def. (%)	Rec. (m)	Def. (%)	Rec. (m)	Def. (%)	
1	0,080	0,22%	0,081	0,23%	0,122	0,34%	0,339	0,95%	
3	0,086	0,24%	0,094	0,26%	0,066	0,19%	0,273	0,76%	
4	0,153	0,43%	0,149	0,42%	0,191	0,54%	0,677	1,91%	
11	0,281	0,56%	0,092	0,18%	1,354	2,72%	1,038	2,09%	
12	0,186	0,36%	0,138	0,27%	0,178	0,35%	0,693	1,36%	
13	0,214	0,42%	0,162	0,32%	0,213	0,42%	0,789	1,56%	
14	0,141	0,28%	0,099	0,19%	0,110	0,22%	0,509	1,00%	
15	0,158	0,31%	0,119	0,24%	0,656	1,30%	0,706	1,40%	
16	0,209	0,42%	0,155	0,31%	0,281	0,56%	0,803	1,60%	
18	0,158	0,31%	0,082	0,16%	0,781	1,55%	1,023	2,03%	
19	0,230	0,46%	0,104	0,21%	0,337	0,68%	0,807	1,62%	
20	0,225	0,45%	0,164	0,33%	0,243	0,48%	0,709	1,41%	

Tabela 10 – Resultado da previsão para 50 anos de cada MS, recalque e deformação.

Fonte: Arquivo do Autor

Nota-se que tanto o menor recalque previsto, quanto o maior se referem ao modelo hiperbólico de Ling et al. (1998), com 0,066 m no MS-03 e 1,354 m no MS-11 respectivamente, assim como os valores de deformação, 0,19% e 2,72%. Os dados comprovam uma estabilização do maciço, conforme afirmaram Sowers

Fonte: Arquivo do Autor.

(1973), Abreu (2000), Alcântara (2007), Benson et al. (2007), Silva (2010), Caribé (2015), entre outros.

No que se refere ao modelo de Meruelo, os resultados apontaram para uma estabilização do maciço por volta dos 5000 dias, desde o início do monitoramento, ou seja por volta dos 18 anos após o encerramento das atividades no antigo vazadouro da Marambaia. Tal constatação se encontra ratificada conforme as conclusões de Kamon (1997) que reporta que os aterros tendem a se estabilizar por volta dos 20 anos após o encerramento de suas atividades.

Já para os modelos de Sowers (1973) e Oweis (2006), ao se considerar um tempo muito longo desejado, os valores de recalque mostram uma tendência de aumento contínuo, o que não é uma realidade, já que a massa de resíduos tende a se estabilizar.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma análise da compressibilidade dos resíduos dispostos no antigo vazadouro de Marambaia, por meio de dados de monitoramento de recalques superficiais verticais e de previsão dos recalques que sofrerá a massa de resíduos em 50 anos utilizando os modelos Sowers (1973), Meruelo (PALMA, 1995), Ling et al. (1998) e Oweis (2006).

O monitoramento por meio dos MS trabalhados permitiu avaliar o comportamento compressivo dos RSU no aterro e obter parâmetros dos modelos matemáticos em estudo.

Os resultados permitiram observar que os recalques apresentaram valores que variaram entre 79 e 204 mm, representando deformações na faixa de 0,16 a 0,41% em relação a altura inicial do maciço, e as velocidades de recalque obtidas se encontravam entre 0,029 e 0,333 mm/dia, de forma que, pela magnitude de dados encontrada no intervalo de tempo considerado, foi possível concluir que há uma tendência de estabilização do maciço.

A modelagem de recalques, por meio da calibração, permitiu obter valores para os principais parâmetros de compressibilidade dos modelos estudados, que se mostraram coerentes com valores descritos na literatura. Foi possível concluir que os modelos que apresentaram melhor desempenho quanto aos dados de monitoramento foram Ling et al. (1998) e Oweis (2006) com desvios médios gerais de recalque de 7,93% e 9,82% respectivamente, sendo o primeiro um modelo de base teórica empírica e o segundo um modelo que incorpora biodegradação.

Quanto à previsão de recalques para o período de 50 anos, observou-se que tanto o modelo Meruelo (PALMA, 1995), quanto o hiperbólico Ling et al. (1998) indicaram uma tendência de estabilização do aterro, porém este último indicou que esta estabilização ocorre de maneira mais tardia. O modelo Meruelo (PALMA, 1995) apresentou período de estabilização mais coerente em relação a literatura técnica. Já os modelos de Sowers (1973) e Oweis (2006) mostraram que mesmo para tempos longos os recalques não tendem a uma estabilização, o que não é coerente com os processos que se desenvolvem no aterro.

Foi possível concluir, tomando-se por base a previsão de recalques a longo prazo, que a área do aterro pode se estabilizar em 18 anos após o encerramento das atividades no antigo vazadouro da Marambaia e que, portanto, seria viável um uso futuro da área para outras finalidades.

Contudo, é importante ressaltar que, quando da previsão de recalques em aterro sanitários, as tomadas de decisão não devem se limitar a um só modelo, mas devem ser considerados outros modelos, buscando avaliar qual melhor se adapta à real situação, sendo também importante atentar para as condições de operação na qual os aterros trabalharam durante suas vidas úteis, bem como o estado de conservação de seus sistemas de controle e monitoramento ambientais pós encerramento das atividades.

REFERÊNCIAS

ABREU, R. *Compressibilidade de maciços sanitários.* 2000. 127 f. Dissertação(Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo.

ALCÂNTARA, P. B. Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados. 2007. 366 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil,* 2016. 92 p.

BABU, S. L. G. et al. Prediction of Long-Term Municipal Solid Waste Landfill Settlement Using Constitutive Model. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, v. 14, n. 2, p. 139-150, April 2010.

BARLAZ, M.A.; HAN, R. K. *Leachate and gas generation*: Geotechnical practice for waste disposal. London: ed. David E. Daniel, Chapman & Hall, 1993.

BENSON C.H. et al. Practice review of five bioreactor/recirculation landfills. *Waste Management*, v. 27, n. 1, p 13-29, Jan 2007.

BENTE, S. et al. Modelling long term settlements of msw landfills. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 12, 2009, Sardinia.

BJARNGARD, A.; EDGERS, L. Settlement of municipal solid waste landfills. In: ANNUAL MADISON WASTE CONFERENCE, 13, Madison, 1990.

BRASIL. LEI Nº 9.433, DE 08 DE JANEIRO DE 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 09 jan. 1997.

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

CANEJO, C. E. S. Índice de Qualidade de Destinação Final de Resíduos Sólidos Urbanos do Estado do Rio de Janeiro (IQDR – RJ). In: SEMINÁRIO GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2016, Rio de Janeiro, *Resultados 2014*. Rio de Janeiro: UERJ, PEAMB, 2016.

CARIBÉ, R. M. Análise multivariada no comportamento dos recalques em célula experimental de resíduos sólidos urbanos. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal De Campina Grande, Campina Grande.

CARNEIRO, A. A. Estudo da capacidade de carga de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos com base em ensaios de laboratório e campo. 2013. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

CARVALHO, A. R. *Propriedades Geotécnicas Dos Resíduos Do Aterro Sanitário De Santo André, São Paulo – Brasil.* 2002. 132 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia Ambiental) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CARVALHO, M. F. *Comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos.*1999. 306 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos.

CATAPRETA, C. A. A. Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação. 2008. 337 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

COMPANHIA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA, COMLURB, Caracterização Gravimétrica e Bacteriológica dos Resíduos Sólidos Domiciliares Recolhidos pela COMLURB no Município do Rio de Janeiro - 2012, p. 105, 2012.

COUMOULOS, D. G; KORYALOS, T. P. Prediction of attenuation of landfill settlement rates with time. In: INT. CONF. ON SOILMECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 14, Hamburg, 1997.

DENARDIN, G. P. *Estimativa de recalques no aterro sanitário da Central de Resíduos de Recreio – Minas do Leão/ RS.* 2013. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

EDIL, T. B. et al. Settlement of municipal refuse - Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice. Philadelphia: Landva & Knowles, 1990.

EL-FADEL, M. Leachate recirculation effects on settlement and biodegradation rates in MSW landfills. *Environmental Technology*, v. 20, n. 2, p. 121-133, 1999.

EMPRESA DE LIMPEZA URBANA, 2000, il. color.

ENGECORPS, Projeto executivo recuperação do lixão de Marambaia, 2000, il. color.

ESPINACE, R. et al. Problemas geotécnicos de los rellenos sanitarios. *CEDEX*, [S.I.], n. 77, p. 77 - 83, Dec. 1999.

EYAY, N. *Previsão de recalques em aterros sanitários novos: caso do aterro de São Leopoldo*. 2016. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FARIAS, A. M. S. *Estudo Dos Recalques Em Aterros De Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Experimental E Estatística*. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal De Campina Grande, Campina Grande.

FARQUHAR, G. F. & ROVERS, F. A. Gas production during refuse decomposition. *International Journal of Environmental Pollution*, [S.I.], v. 2, n. 4, p.483 - 495, Dec. 1973.

GABR, M.A. & VALERO, S. N. Geotechnical properties of municipal solid waste. *Geotechnical Testing Journal*, v.18, n. 2, 1995.

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

GIBSON, R. E.; LO, K. Y. A theory of soils exhibiting secondary compression. *Acta Polytech. Scand.*, v. 10, p. 1 – 15, 1961.

GOMES, P. L.; CAETANO, M. O. Municipal Solid Waste Sanitary Landfill Compressibility Study with Linear Regression Application. *Soils and Rocks*, v. 33, n. 3, p 145 – 157. Jan 2010.

GRISOLIA, M. & NAPOLEONI, Q. Geotechnical characterization of municipal solid waste: choice of design parameters. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 2, Osaka, 1996.

HAZTEC CTR NOVA IGUAÇU, 2012, il. color

HETTIARACHCHI, C. H.; MEEGODA, J.; HETTIARACHCHI, P. Effects of gas and moisture on modeling of bioreactor landfill settlement. *Waste Management*, v. 29, n. 3, p. 1018–1025, Mar. 2009.

HOSSAIN, S. M.; GABR, M. A. Prediction of municipal solid waste landfill settlement with leachate recirculation. In: GEO-FRONTIERS, 50, Austin, 2005.

KAMON, M. *Geotechnical properties of waste landfill*: Geoenvironment Engineering. London: ed. Thomas Telford, 1997.

KÖNIG, D.et al. Assessment of the stability and the prediction of settlements of mixed waste dumps. In: NÜRNBERGER DEPONIESEMINAR, 12, Nürnberg, 1996.

KORF, E. P. et al. Monitoramento e modelagem dos recalques de resíduos sólidos de diferentes composições em um lisímetro de laboratório. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigacion, desarrolo y práctica*, v. 9, n. 2, p 200 – 211, Ago 2016.

LANDVA, A.O. & CLARK, J.I. *Geotechnics of Waste Fills:* Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice. Ed. Landva & Knowlea, ASTM STP-1070, p. 86-103, 1990.

LING, H.I et al. Estimation of municipal solid waste landfill settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 124, n. 1, p. 21 - 28, 1998.

LIU, C. N.; CHEN, R. H.; CHEN, K. S. Unsaturated consolidation theory for the prediction of long term municipal solid waste landfill settlement. *Waste Manage. Res.*, v. 24, n. 1, p. 80 – 91, 2006.

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; VILAR, O. M. Constitutive model for municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 128, n. 11, p. 940 – 951, Oct 2002.

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

MARIANO, M. O. H. *Recalques no aterro de resíduos sólidos da Muribeca - PE*. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MARQUES, A. C. M. *Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos.* 2001. 409 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos.

MARQUES, A. C. M.; FILZ, G. M.; VILAR, O. M. Composite compressibility model for municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 129, n. 4, p. 372–378, April 2003.

MATTOS, T. P. Avaliação da contaminação hídrica no entorno do antigo lixão da Marambaia – RJ. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MCDOUGALL, J. R. Settlement: the short and the long of it. ASCE Geotechnical Special Publication 209, p 76 – 111, 2011.

MELO, M. C. Uma análise de recalques associada à biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca. 2003. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MERZ, R. C.; STONE, R. Landfill settlement rates. *Public Works,* v. 93, n. 9, p 103 – 106, 1962.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, PNRS*. Brasília, Agosto 2011, 106 p. Relatório técnico.

MONTEIRO, V. E. D et al. Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, n. 3, p 223 – 230, Jul 2006.

MORRIS, D.V.; WOODS, C.E. Settlement and engineering considerations in landfill and final cover design: Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice. Ed. Landva & Knowlea, 1990.

MOTA, M. F. P. Avaliação da contaminação do solo e o transporte de contaminantes no lixão da Marambaia – Nova Iguaçu/RJ. 2005. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

OWEIS, I. S. Estimate of Landfill Settlements Due to Mechanical and Decompositional Processes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 132, n. 5, p. 644 - 650, May 2006.

PALMA, J. H. Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos. 1995. 270 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Cantabria, Santander.

PARK, H.; LEE, S. R. Long-term settlement behavior of landfills with refuse decomposition. *Journal of Resource Management Technology*, v. 24, n. 4, p. 159 – 165, 1997.

PEREIRA, A.G.H. *Compresibilidad de los residuos sólidos urbanos*. 2000. 300 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Oviedo, Espanha.

RESOL ENGENHARIA LTDA. *PROJETO EXECUTIVO DE ENCERRAMENTO E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DO VAZADOURO DE MARAMBAIA – NOVA IGUAÇU/RJ:* Relatório Final. Nova Iguaçu, Março 2003, 49 p. Relatório técnico.

SILVA, F. H. R. *Aplicação de modelos numéricos para estimativa de recalques de uma célula do aterro sanitário de Belo Horizonte.* 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SILVEIRA, A. M. M. *Estudo Do Peso Específico De Resíduos Sólidos Urbanos.* 2004. 112 f. Dissertação(Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SIMÕES, G.F.; CATAPRETA, C.A.A. Settlement Monitoring at Belo Horizonte Sanitary Landfill, Brazil. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 12, 2009, Sardinia.

SOHN, K.C.; LEE, S. A method for prediction of long- term settlement of sanitary landfill. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 1,1994, Edmonton.

SOWERS, G. F. Settlement of waste disposal fills. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, [s.n.], 1973, Moscow, p. 207–210.

TERZAGHI, K. Theoretical soil mechanics. New York: John Wiley and Sons, 1943.

TCHOBANOGLOUS, G., THEISEN, H.; VIGIL, S.A. Integrated solid waste management – engineering principles and management issues. New York: ed. Mc Graw – Hill, 1994.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. *Methodological tool*: Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site. Jun. 2011. 9 p. Relatório técnico.

U.S. EPA. *User's manual landfill gas emissions:* Model version 2.0. EPA/ 6006r-98–054. Research Triangle Park, 1998. Relatório técnico.

VEREDA ESTUDOS E EXECUÇÃO DE PROJETOS LTDA. *Relatório Plantio:* Recuperação ambiental do antigo vazadouro da Marambaia. Nova Iguaçu, Julho 2010, 27 p. Relatório técnico.

WALL, D. K. & ZEISS, C. Municipal landfill biodegradation and settlement. *Journal of Environmental Engineering*, v. 121, n. 3, p 214 – 224, Mar 1995.

WATTS, K.S.; CHARLES, J.A. Settlement of recently placed domestics refuse landfill. In: INSTN. CIVIL ENGINEERING,1990, [S.I.: s.n.], 1990.

YEN, B. C.; SCANLON, B. S. Sanitary landfill settlement rates. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 101, n.5, p. 475 – 487, 1975.

	Tempo	MS-01			MS-03				MS-04			MS-11			MS-12			MS-13	5
DATA	(dias)	Cota	Recalque	Velocidade															
	(ulus)	(m)	(mm)	(mm/d)															
01/fev/08	0	35,876	-	-	35,854	-	-	35,439	-	-	49,783	-	-	51,120	-	-	50,608	-	-
01/abr/08	60	-	-	-	35,840	14	0,233	35,424	15	0,250	49,777	6	0,100	51,110	10	0,167	50,594	14	0,233
01/jul/08	151	35,864	12	0,079	35,834	20	0,132	35,418	21	0,139	49,771	12	0,079	51,104	16	0,106	-	-	-
01/ago/08	182	-	-	-	-	-	-	35,413	26	0,143	-	-	-	-	-	-	50,585	23	0,126
15/set/08	227	35,861	15	0,066	35,833	21	0,093	-	-	-	49,763	20	0,088	-	-	-	-	-	-
16/out/08	257	35,859	17	0,066	-	-	-	35,407	32	0,125	49,757	26	0,101	51,095	25	0,097	50,578	30	0,117
02/dez/08	304	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49,754	29	0,095	51,087	33	0,109	-	-	-
30/dez/08	332	35,857	19	0,057	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12/mar/09	404	35,852	24	0,059	35,823	31	0,077	35,396	43	0,106	-	-	-	51,080	40	0,099	50,563	45	0,111
15/set/10	956	35,839	37	0,039	35,809	45	0,047	35,348	91	0,095	49,667	116	0,121	51,047	73	0,076	50,510	98	0,103
28/jun/11	1242	-	-	-	35,807	47	0,038	35,346	93	0,075	•	-	-	-	•	-	-	-	-
28/set/11	1334	35,827	49	0,037	35,801	53	0,040	35,336	103	0,077	49,641	142	0,106	51,028	92	0,069	50,490	118	0,088
07/nov/11	1374	35,822	54	0,039	35,801	53	0,039	35,333	106	0,077	49,631	152	0,111	51,018	102	0,074	-	-	-
29/dez/11	1426	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49,626	157	0,110	51,017	103	0,072	50,489	119	0,083
13/fev/12	1472	35,821	55	0,037	35,800	54	0,037	35,333	106	0,072	49,622	161	0,109	51,016	104	0,071	-	-	-
10/abr/12	1529	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49,619	164	0,107	-	-	-	50,487	121	0,079
18/jul/12	1628	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51,010	110	0,068	-	-	-
28/set/12	1700	-	-	-	35,801	53	0,031	-	-	-	-	-	_	-	_	-	-	-	-
12/dez/12	1775	35,819	57	0,032	35,803	51	0,029	35,323	116	0,065	49,613	170	0,096	51,007	113	0,064	50,486	122	0,069
04/set/15	2771	35,784	92	0,033	35,775	79	0,029	35,296	143	0,052	49,579	204	0,074	51,004	116	0,042	-	-	-

APÊNDICE – Monitoramento de Recalques no Aterro da Marambaia.

	Tempo	MS-14			MS-15				MS-16			MS-18	3		MS-19)	MS-20		
DATA	(dias)	Cota	Recalque	Velocidade															
	((m)	(mm)	(mm/d)															
01/fev/08	0	50,756	-	-	50,324	-	-	50,193	-	-	50,293	-	-	49,677	-	-	50,199	0	
01/abr/08	60	50,750	6	0,100	50,309	15	0,250	50,173	20	0,333	50,285	8	0,133	49,662	15	0,250	50,183	16	0,267
01/jul/08	151	50,743	13	0,086	-	-	-	-	-	-	50,276	17	0,113	49,660	17	0,113	-	-	-
01/ago/08	182	50,734	22	0,121	50,305	19	0,104	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50,177	22	0,121
15/set/08	227	-	-	-	-	-	-	50,160	33	0,145	50,268	25	0,110	49,652	25	0,110	-	-	-
16/out/08	257	-	-	-	50,304	20	0,078	50,157	36	0,140	50,266	27	0,105	-	-	-	-	-	-
02/dez/08	304	50,720	36	0,118	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49,652	25	0,082	50,167	32	0,105
30/dez/08	332	50,712	44	0,133	50,298	26	0,078	50,154	39	0,117	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12/mar/09	404	50,696	60	0,149	-	-	-	50,142	51	0,126	50,256	37	0,092	49,649	28	0,069	-	-	-
15/set/10	956	50,686	70	0,073	50,239	85	0,089	-	-	-	50,172	121	0,127	49,585	92	0,096	50,088	111	0,116
28/jun/11	1242	-	-	-	-	-	-	50,088	105	0,085	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28/set/11	1334	-	-	-	-	-	-	50,074	119	0,089	-	-	-	-	-	-	50,087	112	0,084
07/nov/11	1374	-	-	-	50,222	102	0,074	50,065	128	0,093	50,150	143	0,104	49,556	121	0,088	-	-	-
29/dez/11	1426	50,683	73	0,051	50,214	110	0,077	50,055	138	0,097	50,140	153	0,107	49,552	125	0,088	50,086	113	0,079
13/fev/12	1472	50,680	76	0,052	-	-	-	50,053	140	0,095	50,140	153	0,104	49,552	125	0,085	50,085	114	0,077
10/abr/12	1529	-	-	-	50,213	111	0,073	-	-	-	50,139	154	0,101	49,553	124	0,081	50,083	116	0,076
18/jul/12	1628	50,678	78	0,048	-	-	-	50,052	141	0,087	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28/set/12	1700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	_	-	-	-	-	-	-	-
12/dez/12	1775	50,677	79	0,045	50,213	111	0,063	50,052	141	0,079	50,138	155	0,087	49,551	126	0,071	50,083	116	0,065
04/set/15	2771	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	_	-	-	-	-	50,063	136	0,049