



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Annik Frasso Corrêa Klink

**Previsão de recalques em aterros sanitários utilizando modelos de compressibilidade: estudo de caso da Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu-RJ**

Rio de Janeiro

2019

Annik Frasso Corrêa Klink

**Previsão de recalques em aterros sanitários utilizando modelos de compressibilidade:  
estudo de caso da Central de Tratamento de Resíduos de 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.<sup>a</sup> Dra. Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk

Coorientador: Prof. Dr. Júlio César da Silva

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

K65 Klink, Annik Frasso Corrêa.  
Previsão de recalques em aterros sanitários utilizando modelos de compressibilidade: estudo de caso da central de tratamento de resíduos de Nova Iguaçu - RJ / Annik Frasso Corrêa Klink. – 2019.  
98f.

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

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Aterro sanitário - Teses. 3. Gestão integrada de resíduos sólidos - Teses. 4. Engenharia geotécnica - Teses. I. van Elk, Ana Ghislane Henriques Pereira. II. Silva, Júlio César da. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 628.4:624.131

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

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

---

Assinatura

---

Data

Annik Frasso Corrêa Klink

**Previsão de recalques em aterros sanitários utilizando modelos de compressibilidade:  
estudo de caso da Central de Tratamento de Resíduos de 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 10 de julho de 2019.

Banca Examinadora:

---

Prof.<sup>a</sup> D.Sc. Ana Ghislane H. Pereira Van Elk - Orientador  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. D.Sc. Júlio César da Silva - Coorientador  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. D.Sc. Armando Prestes de Menezes Filho  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Ph.D. Celso Romanel  
Faculdade de Engenharia - PUC-Rio

Rio de Janeiro

2019

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família pelo apoio em todos os momentos, em especial a minha mãe, por ser um exemplo de sabedoria e dedicação à família em todos os momentos.

Ao Aterro CTR-NI, pelo total apoio em todos os trabalhos de campo. Especialmente aos funcionários Caio Martini Alves Nascimento e Diogo Barbosa Arantes, pela compreensão e apoio técnico às pesquisas realizadas, cedendo gentilmente informações úteis ao trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PEAMB/UERJ), por seus coordenadores, professores e funcionários sempre dedicados e solícitos. Aos colegas Matheus da Silva Cezário, Andreia Gontijo, Mariana Garcia por contribuírem na realização do estudo, o auxílio deles foi fundamental para dinamizar o tempo e aprimorar os resultados.

Destaco a minha orientadora Profa. Dra. Ana Ghislane Pereira Van Elk, pela incansável preocupação e orientação sobre o andamento dos trabalhos, pelos conselhos e pela paciência durante todo o processo. Ao Prof. Dr. Júlio Cesar da Silva, meu coorientador, pelo incentivo, orientação, discussões deste trabalho, a ajuda dos dois professores foi fundamental ao longo dessa jornada para que eu pudesse ter sempre estímulo e apoio para a conclusão da pesquisa.

Pessoas extraordinárias não cultivam apenas o desejo de aprender, mas também demonstram vontade de ensinar e cuidar dos outros.

*Dr. Dakusa Ikeda*

## RESUMO

KLINK, Annik Frasso Corrêa. *Previsão de recalques em aterros sanitários utilizando modelos de compressibilidade*: estudo de caso da Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu-RJ. 2019. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

O presente trabalho apresenta a previsão dos recalques a longo prazo a partir dos dados de monitoramento de campo à luz de cinco modelos teóricos clássicos, Sowers, Gandolla, Ling, Meruelo e Oweis. Os valores dos recalques medidos durante 960 dias foram utilizados para fazer uma previsão para 50 anos, comparando os valores previstos esperados com os valores observados nos marcos superficiais. Com o monitoramento foram verificados deslocamentos verticais e horizontais de baixa magnitude, variando entre 103 mm a 230 mm os deslocamentos verticais e entre 0 a 18 mm os horizontais, as deformações encontradas variaram no intervalo de 0,48% a 1,30%. Na análise comparativa das previsões, os modelos de Sowers, Ling e Meruelo apresentaram comportamento semelhante apesar de serem conceitualmente diferentes. Para o conjunto de marcos superficiais monitorados os recalques variaram de 160 a 365mm. Os três modelos apresentam uma estabilização dos recalques previstos a partir de 2000 dias, ou seja, aproximadamente 5 anos. Já os modelos de Gandolla e Oweis apresentam um comportamento destacado, com previsões de recalques maiores, variando entre 328 a 1085mm, contudo, o modelo de Gandolla apresenta uma estabilização a partir de 8000 dias, aproximadamente 22 anos e o modelo de Oweis não atinge a estabilização mesmo para um período maior que 50 anos, fato este incoerente com a literatura geotécnica, tornando assim o modelo não representativo a realidade do aterro estudado. A partir dos resultados encontrados nesta pesquisa, foi possível aferir que quando se pretende prever recalques futuros e dispõe-se de poucos dados medidos em campo, é preferível aplicar uma modelagem mais simples ao invés de utilizar um modelo mais complexo, onde se torna necessário adotar parâmetros que podem diferir da condição particular do local investigado.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; Compressibilidade; Modelos de previsão; Recalques.

## ABSTRACT

KLINK, Annik Frasso Corrêa. *Prediction of settlement in landfills using compressibility models: case study Nova Iguaçu waste treatment plant – Rio de Janeiro*. 2019. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

The present work is about the prediction of long-term Settlement from the field monitoring data in the light of five classical theoretical models, Sowers, Gandolla, Ling, Meruelo and Oweis. The values of the measurements measured during 960 days were used to make a prediction for 50 years, comparing the predicted values expected with the values observed in the surface landmarks. With the monitoring, vertical and horizontal displacements of low magnitude were verified, ranging from 103 mm to 230 mm the vertical displacements and between 0 to 18 mm the horizontal ones, the deformations found ranged from 0.48% to 1.30%. In the comparative analysis of the predictions, the models of Sowers, Ling and Meruelo presented similar behavior despite being conceptually different. For the set of monitored surface landmarks, the setbacks ranged from 160 to 365mm. The three models show a stabilization of the projected settlements from 2000 days, that is, approximately 5 years. Gandolla and Oweis have a remarkable behavior, with predictions of larger repression ranging from 328 to 1085mm, however, the model of Gandolla it presents a stabilization from 8000 days, approximately 22 years and the Oweis model does not reach stabilization even for a period greater than 50 years, a fact that is inconsistent with the geotechnical literature, thus making the model not representative the reality of the studied landfill. From the results found in this research, it was possible to verify that when it is intended to predict future repression and there is little data measured in the field, it is preferable to apply a simpler modeling rather than a more complex one, where it is necessary to adopt parameters that may differ from the particular condition of the site investigated.

Keywords: Municipal Solid Waste; Compressibility; Prediction Settlements; Settlements.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU NO BRASIL POR TIPO DE DESTINAÇÃO (T/DIA) ...	18
FIGURA 2 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM ATERRO SANITÁRIO BIOENERGÉTICO .....	20
FIGURA 3- CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA EM FRAÇÕES ORGÂNICAS E INORGÂNICAS DO TOTAL DE AMOSTRAS DE NOVA IGUAÇU.....	23
FIGURA 4 - CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RSU DE NOVA IGUAÇU .....	24
FIGURA 5- PERMEABILIDADE DOS RESÍDUOS VARIANDO COM A PROFUNDIDADE .....	26
FIGURA 6 - RECALQUES MEDIDOS DO VAZADOURO DE MARAMBAIA DURANTE 8 ANOS .....	29
FIGURA 7 – CURVA TEÓRICA DE COMPRESSIBILIDADE DE RSU SEGUNDO GRISOLIA&NAPOLEONI (1996) .....	32
FIGURA 8 – SEQUÊNCIA DOS MECANISMOS DE RECALQUE E AS CLASSIFICAÇÕES TEMPORAIS.....	33
FIGURA 9- FATORES INTERNOS E EXTERNOS QUE INFLUENCIAM OS MECANISMOS DE RECALQUE.....	35
FIGURA 10 - EFEITO DA RECIRCULAÇÃO DE LIXIVIADO NA MAGNITUDE DE RECALQUES .....	36
FIGURA 11 - IMAGEM AÉREA DO CTR-NI DE JUNHO DE 2004. ....	51
FIGURA 12 - IMAGEM AÉREA CTR-NI DE JUNHO DE 2007 .....	51
FIGURA 13 - IMAGEM AÉREA CTR-NI DE JUNHO DE 2014 .....	51
FIGURA 14 - IMAGEM AÉREA CTR-NI DE JANEIRO DE 2019 .....	52
FIGURA 15 - IMAGEM TOPOGRÁFICA EM 3D DO VALE III, EM FEVEREIRO DE 2019 .....	53
FIGURA 16 -DADOS CLIMATOLÓGICOS E PLUVIOMÉTRICOS DA ESTAÇÃO DUQUE DE CAXIAS - XERÉM-A603 .....	54
FIGURA 17 - IMAGEM AÉREA DO VALE III .....	55
FIGURA 18 - IMAGEM TOPOGRÁFICA DO VALE III.....	56
FIGURA 19 - MEDIDAS DE RECALQUE VERTICAL DOS 8 MS .....	61

FIGURA 20 - CURVA DE DEFORMAÇÃO VERTICAL VERSOS LOG DO TEMPO PARA OS 8MS .....	62
FIGURA 21 - DESLOCAMENTO HORIZONTAL DOS 8 MARCOS SUPERFICIAIS DOS 8 MS ..	63
FIGURA 22 - DESLOCAMENTO HORIZONTAL DOS MARCOS MS12 E MS58 .....	64
FIGURA 23 - CALIBRAÇÃO DO MODELO DE SOWERS (1973) .....	66
FIGURA 24 - PREVISÃO DO MODELO DE SOWERS (1973) PARA 50 ANOS .....	67
FIGURA 25 - CALIBRAÇÃO DO MODELO DE GANDOLLA <i>ET AL.</i> (1994).....	68
FIGURA 26 - PREVISÃO DO MODELO DE GANDOLLA <i>ET AL.</i> (1994) PARA 50 ANOS .....	69
FIGURA 27 - CALIBRAÇÃO DO MODELO DE MERUELO (1995) .....	71
FIGURA 28 - PREVISÃO DO MODELO DE MERUELO (1995) PARA 50 ANOS.....	71
FIGURA 29 – CALIBRAÇÃO DO MODELO DE LING <i>ET AL.</i> (1998) .....	73
FIGURA 30 - PREVISÃO DO MODELO DE LING <i>ET AL.</i> (1998) PARA 50 ANOS.....	74
FIGURA 31 - CALIBRAÇÃO DO MODELO DE OWEIS (2006) .....	77
FIGURA 32 - PREVISÃO DO MODELO DE OWEIS (2006) PARA 50 ANOS .....	77
FIGURA 33 - PREVISÃO DO MODELO DE OWEIS (2006) PARA 200 ANOS .....	78
FIGURA 34 - PREVISÃO COMPARATIVA DOS MODELOS -MS01 .....	79
FIGURA 35 - PREVISÃO COMPARATIVA DOS MODELOS -MS04 .....	80
FIGURA 36 - PREVISÃO COMPARATIVA DOS MODELOS -MS04 .....	80
FIGURA 37 - PREVISÃO COMPARATIVA DOS MODELOS -MS04 .....	81
FIGURA 38 – PREVISÃO COMPARATIVA DOS MODELOS – MS30.....	81
FIGURA 39 - PREVISÃO COMPARATIVA DOS MODELOS – MS43 .....	82
FIGURA 40 - PREVISÃO COMPARATIVA DOS MODELOS – MS53 .....	82
FIGURA 41 - PREVISÃO COMPARATIVA DOS MODELOS - MS58 .....	83

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DE RSU DE RIYADH COMPARADA COM OUTROS PAÍSES .....	24
TABELA 2- CLASSIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE RECALQUES DE ACORDO COM DIFERENTES AUTORES .....	30
TABELA 3 - RESUMO DAS COORDENADAS, DESLOCAMENTOS VERTICAIS E HORIZONTAIS DE 8 MARCOS SUPERFICIAIS.....	55
TABELA 4 - RESUMO DOS PARÂMETROS ENCONTRADOS PARA CADA MODELO E O MÉTODO UTILIZADO PARA ENCONTRÁ-LOS .....	59
TABELA 5 – RESUMO DOS PARÂMETROS ANALISADOS DOS 8 MARCOS SUPERFICIAIS MONITORADOS .....	60
TABELA 6 -PARÂMETROS OBTIDOS DO MODELO DE SOWERS (1973).....	65
TABELA 7- PARÂMETROS OBTIDOS DO MODELO DE GANDOLLA <i>ET AL.</i> (1994).....	68
TABELA 8 -PARÂMETROS OBTIDOS DO MODELO DE MERUELO (1995) .....	70
TABELA 9- PARÂMETROS OBTIDOS DO MODELO DE LING <i>ET AL.</i> (1998). .....	72
TABELA 10 - PARÂMETROS OBTIDOS DO MODELO DE OWEIS (2006) PARA O RECALQUE DA FLUÊNCIA ADICIONAL .....	75
TABELA 11 - PARÂMETROS OBTIDOS DO MODELO DE OWEIS (2006) PARA O RECALQUE DA BIODEGRADAÇÃO .....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
BDMET	Banco de dados meteorológicos
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
COD	Quantidade de matéria orgânica biodegradável presente no resíduo por ano
CTRNI	Central de tratamento de resíduos de Nova Iguaçu
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
IBOPE	Instituto Brasileiro de Opinião Pública e Estatística
INMET	Instituto Nacional Meteorológico
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MS	Marco superficial
PET	Polímero termoplástico
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos sólidos urbanos
USEPA	Manual de emissões de gases de aterro sanitário

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Constante de recalque unitário
$A$	Coefficiente de compressão em relação ao ar fase
$\alpha$	Coefficiente de perda de massa
$B$	Constante interativa associada à biodegradação de orgânicos
$\beta$	Fração de massa de resíduo que possa potencialmente ser convertida em gás
$C_c$	Índice de compressão primária
$C'_c$	Coefficiente de compressão primária
$C_\alpha$	Índice de compressão secundária
$C'_\alpha$	Coefficiente de compressão secundária
$\Delta\sigma$	Tensão de compressão dependente da altura do maciço, peso específico e cargas externas
$\Delta\sigma_{v0}$	Acréscimo de pressão vertical
$e_0$	Índice de vazios
$\varepsilon_s$	Tensão vertical devido a fluência
$H_0$	Altura inicial do aterro em metros
$k$	Constante de taxa de decomposição / Constante de decaimento durante o enchimento
$k'$	Constante de decaimento pós-preenchimento.
$kh$	Coefficiente de hidrólise (dia-1)
$m$	Compressibilidade de referência
$m'$	Taxa de preenchimento do aterro
$n$	Parâmetro de taxa de compressão/ Número de camadas de resíduos
$S$	Recalque total
$S_d$	Recalque pela decomposição
$S_p$	Recalque primário

$S_s$	Recalque da fluência
$S_{stc}$	Recalque da fluência no período de encerramento
$S_{ult}$	Recalque último esperado
$\sigma_{v0}$	Pressão vertical inicial
$\rho_0$	Taxa inicial de recalque
$t$	Tempo decorrido
$T$	Temperatura absoluta dentro do aterro
$t_0$	Tempo inicial
$t_1$	Tempo para conclusão da compressão primária
$t_2$	Tempo de estimativa de recalque
$t_c$	Tempo de construção do aterro
$t_r$	Tempo de referência
$v$	Velocidade do recalque
$V_0$	Inicial volume total de resíduos

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>16</b>
1.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	16
1.2 ATERROS SANITÁRIOS - BIOENERGÉTICOS	18
1.3 BIODEGRADAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	20
1.4 PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DOS MACIÇOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	21
1.4.1 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA	22
1.4.2 TEOR DE UMIDADE	25
1.4.3 PERMEABILIDADE	25
1.4.4 PESO ESPECÍFICO	26
1.4.5 COMPRESSIBILIDADE	27
1.5 MECANISMOS QUE INFLUENCIAM OS RECALQUES	30
1.6 FATORES DE INFLUÊNCIA	34
1.7 PREVISÃO DE RECALQUES	36
1.8 MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES	39
1.8.1 SOWERS (1973)	39
1.8.2 EDIL <i>ET AL.</i> (1990)	42
1.8.3 GANDOLLA <i>ET AL.</i> (1994)	42
1.8.4 MERUELO (1995)	44
1.8.5 LING <i>ET AL.</i> (1998)	45
1.8.6 OWEIS (2006)	46
<b>2.MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>50</b>
2.1 ÁREA DE ESTUDO	50
2.2 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DA ÁREA DE ESTUDO	53
2.3 MEDIDAS DE RECALQUE DO VALE III	54
2.4 MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES	57
2.5 CALIBRAÇÃO E PREVISÃO DOS MODELOS	57
<b>3.ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	<b>60</b>
3.1 MONITORAMENTO A CURTO PRAZO	60
3.2 CALIBRAÇÃO E PREVISÃO DO MODELO DE SOWERS (1973)	64
3.3 CALIBRAÇÃO E PREVISÃO DO MODELO DE GANDOLLA <i>ET AL.</i> (1994)	67

<b>3.4 CALIBRAÇÃO E PREVISÃO DO MODELO DE MERUELO (1995)</b>	<b>70</b>
<b>3.5 CALIBRAÇÃO E PREVISÃO DO MODELO DE LING <i>ET AL.</i> (1998)</b>	<b>72</b>
<b>3.6 CALIBRAÇÃO E PREVISÃO DO MODELO DE OWEIS (2006)</b>	<b>74</b>
<b>3.7 COMPARAÇÃO DAS PREVISÕES OBTIDAS</b>	<b>79</b>
<b><u>4.CONCLUSÃO</u></b>	<b><u>85</u></b>
<b><u>REFERÊNCIAS</u></b>	<b><u>87</u></b>
<b><u>APÊNDICE A</u></b>	<b><u>94</u></b>



## INTRODUÇÃO

Tornou-se imperativo que as instalações de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos (RSU), sejam maximizadas visando sua viabilidade econômica, pois é difícil encontrar áreas disponíveis principalmente nos grandes centros urbanos como alertado por Pereira (2000). Devido às grandes alturas que alcançam tais empreendimentos, o estudo da compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos contribui para não só para aumentar o volume adicional que pode ser utilizado, como também para a segurança do empreendimento.

Além destes requisitos mencionados acima, existe a necessidade de estudar e entender o comportamento compressivo dos resíduos frente à heterogeneidade do material, à deformabilidade da massa de resíduos e à presença de grandes vazios. Os resíduos sólidos são conhecidos por serem um material compressível e sujeitos a grandes deformações resultantes do processo de degradação bioquímica que ocorre no interior dos taludes. Com o passar o tempo, a geração de gases e lixiviados favorece a redução da altura das camadas de resíduos no aterro. (ESPINACE *et al.*, 1999).

Os recalques são mecanismos úteis dentro de um projeto de aterro, porém trazem sérios transtornos quando são excessivos. Podem: produzir trincas e fissuras nas camadas de cobertura, danificar os sistemas de drenagem de lixiviados facilitando o vazamento de chorume, aumentar as pressões internas, acelerar as deformações verticais e horizontais, criar áreas de acúmulo de água, aumentar a erosão e assoreamento, causar saturação da massa de resíduos, aumentar a instabilidade nos aterros sanitários. Inviabilizando assim, a utilização do espaço pós-encerramento. (PEREIRA, 2000)

Dentro deste estudo se faz necessário entender quais os fatores que influenciam a magnitude dos recalques. Segundo Sowers (1973), Yen&Scanlon (1975), Edil (1990), Manassero *et al.* (1996), McDougall (2007), o recalque de aterros sanitários é o produto de uma combinação de processos, incluindo fenômenos relacionados à carga, fluência e biodegradação. A compressão mais significativa ocorre em um espaço de tempo mais curto, logo após a deposição de resíduos, devido a processos físicos e mecânicos. Em sequência, a compressão ocorre a uma taxa mais lenta por um longo período de tempo devido a processos químicos, biológicos e de fluência.

O monitoramento geotécnico acompanha as dimensões dos recalques ao longo do tempo. Tais dimensões são influenciadas pela forma de deposição das camadas de resíduos, pela sua composição, pela interação biodegradativa de seus elementos, e por fatores externos, como por exemplo, clima e umidade. (CARVALHO,1999; PEREIRA,2000). Os marcos superficiais são um tipo de instrumentação empregada no plano de monitoramento geotécnico que analisa os deslocamentos verticais e horizontais do aterro. Tais dados fornecem fundamental subsidio à análise de estabilidade dos taludes.

Já a previsão de recalques fornece uma estimativa do comportamento dos recalques à longo prazo. A previsão é realizada através da utilização de modelos matemáticos. A partir desses modelos e dos dados históricos medidos em campo é possível identificar a real capacidade de armazenamento do aterro, estimar custos de projeto, dimensionar a vida útil entre outros fatores.

Por conta disso, o monitoramento e a previsão de recalques são ferramentas que contribuem para tornar mais eficiente a capacidade operacional, a estabilidade do talude, a diminuição dos custos com manutenção e pós-encerramento do projeto além de minimizar os impactos ao meio ambiente.

O presente trabalho que se apresenta, tem por objetivo geral prever os recalques futuros a partir dos dados monitoramento em campo do aterro de Nova Iguaçu-RJ (CTR-NI). Constituem objetivos específicos desta pesquisa:

- a) Analisar os resultados obtidos através de marcos superficiais, analisando os deslocamentos verticais e horizontais de um vale do aterro;
- b) Selecionar cinco modelos de previsão de recalque
- c) Calibrar os modelos e prever o comportamento a longo prazo; e
- d) Analisar comparativamente o comportamento das curvas de recalques obtidas através dos modelos para cada marco superficial selecionado.

## 1. REVISÃO DA LITERATURA

### 1.1 Resíduos sólidos urbanos

O termo resíduo sólido definido pela norma NBR 10.004/04 engloba resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Incluindo o lodo proveniente dos sistemas de tratamento de água e determinados líquidos cuja particularidade justifique serem tratados como resíduos sólidos.

Um dos grandes desafios da atualidade é gerenciar o que resulta de toda atividade humana, seja domiciliar, agrícola, comercial, industrial, lazer entre outras, levando em conta o tempo, o espaço e capacidade do meio ambiente em assimilar tal demanda. A quantidade de resíduos gerados aumenta com o tempo e o impacto ambiental tende a ser cada vez maior.

Segundo panorama dos resíduos sólidos urbanos no Brasil desenvolvido pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais em 2017 os números referentes à geração de RSU são de 78,4 milhões de toneladas no país e esse valor representa um crescimento aproximado de 1% em relação a 2016. O montante coletado foi de 71,6 milhões de toneladas, registrando um índice de cobertura de coleta de 91,2% para o país, o que evidencia que 6,9 milhões de toneladas de resíduos não foram objeto de coleta e, conseqüentemente, tiveram destino impróprio. (ABRELPE,2017).

No tocante à disposição final de RSU, o panorama não registrou avanços em relação ao cenário de 2016. Segundo pesquisa, 59,1 % dos RSU coletados são dispostos em aterros sanitários e o restante, 42,3 milhões de toneladas, seguem para locais adequados e inadequados (figura 1). Ainda existe uma quantidade significativa de lixões e aterros controlados espalhados pelo país que comprometem a proteção ao meio ambiente e causam danos diretos a saúde da população que reside no entorno. (ABRELPE,2017).

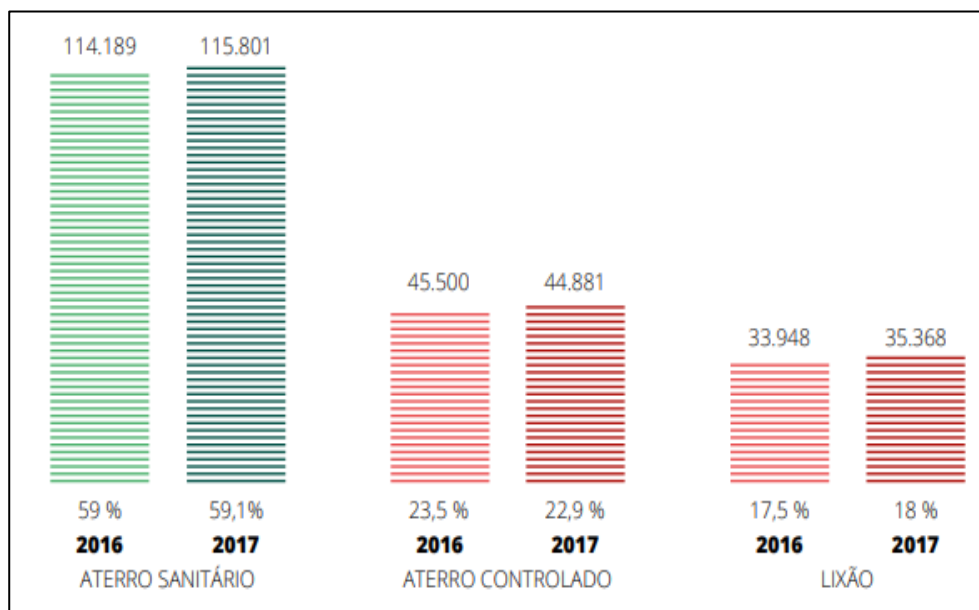
Embora o país ainda enfrente uma fase de crise econômica, houve aumento na geração de resíduos sólidos urbanos, em índice superior ao crescimento populacional. A geração total de RSU cresceu 1% no período pesquisado. Contudo o volume de resíduos

enviados para lixões cresceu em 3% por conta da falta de recursos de municípios menores em gerir seus resíduos. Salienta-se que a preocupação com a gestão de resíduos é recente visto que a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos foi promulgada em 2010. A Lei nº 12.305/2010 dispõe sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, porém não contempla soluções alternativas para municípios ou regiões com escassez de recursos financeiros e de informações que facilitem o conhecimento dos benefícios de um sistema de gestão integrado. (GOMES, 2010).

Dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada analisam a percepção da sociedade sobre resíduos e sobre a forma como colaborarão para sua correta gestão e mostram que a população pouco ou quase nada sabe sobre o tema. Segundo o estudo 75% dos entrevistados revelaram não separar seus resíduos em casa, e uma das possíveis razões que levam a isso é a falta de informação, já que 66% dos entrevistados afirmaram saber pouco ou nada a respeito de coleta seletiva. Além disso, o estudo revela desconhecimento sobre quais materiais podem ser reciclados, onde somente 4% das pessoas sabem que as embalagens longa vida são recicláveis e 60% não reconhecem as garrafas PET como um tipo de plástico reciclável. (IPEA,2012).

Todo sistema de gerenciamento de resíduos envolve aspectos culturais, econômicos, técnicos e socioambientais. A cadeia de gestão de resíduos engloba a segregação, acondicionamento, coleta, tratamento e disposição final. Contudo o final do processo, a disposição final, sempre foi a etapa mais complexa de ser implementada e mantida. Visto que, conforme expresso em lei, os resíduos devem ser encaminhados para aterros observando normas operacionais sem causar danos à saúde e ao meio ambiente.

Figura 1- Disposição Final de RSU no Brasil por tipo de destinação (T/dia)



Fonte: ABRELPE (2017)

## 1.2 Aterros Sanitários - Bioenergéticos

Segundo a norma NBR 8419/NB 843 no artigo 3 define aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

Aterro sanitário é uma área licenciada por órgãos ambientais destinada a receber preferencialmente resíduos sólidos urbano. O sistema difere de um lixão ou aterro controlado por possuir uma infraestrutura mais complexa e eficiente de proteção ao meio ambiente e à saúde pública.

Todo projeto de aterro sanitário deve ser elaborado segundo as normas preconizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). No caso de aterro sanitário de

resíduos classe II (não perigosos) a norma a ser seguida é a NBR 8419/NB 843 que descreve as diretrizes técnicas básicas para implantação de projetos de aterros, tais como: informações sobre os resíduos a serem dispostos no aterro sanitário, caracterização do local destinado ao aterro sanitário, sistema de drenagem superficial, sistema de drenagem e remoção de percolato, impermeabilização inferior e/ou superior, sistema de drenagem de gás, transporte e disposição dos resíduos sólidos, controle tecnológico, plano de encerramento do aterro e cuidados posteriores e uso futuro da área do aterro sanitário

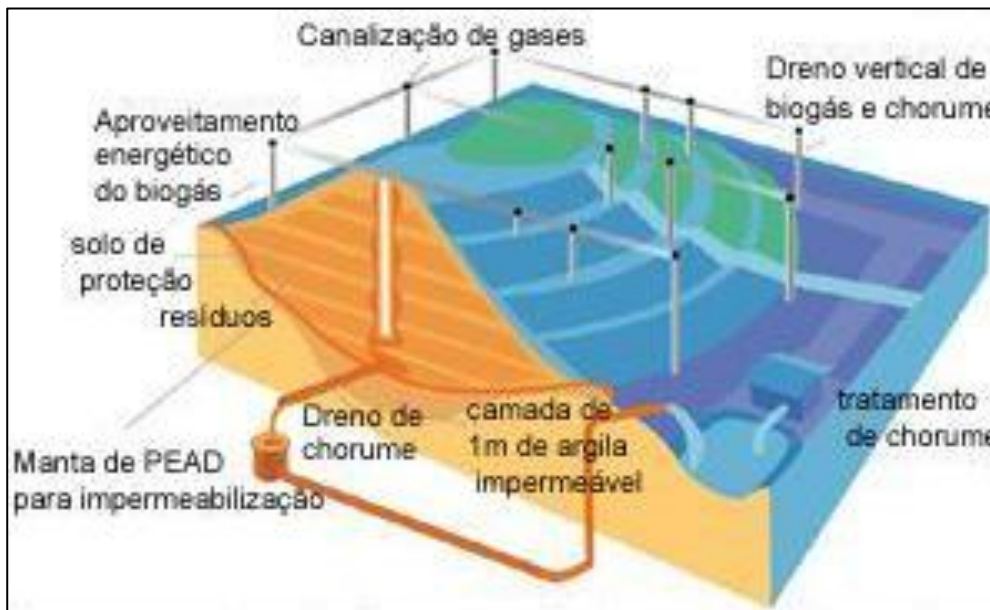
Com relação a forma de operação, os resíduos são lançados sobre o terreno impermeabilizado e recoberto com solo do local, preferencialmente argiloso, de forma a isolá-lo do ambiente externo, criando assim camadas de resíduos enterrados. Durante todo o processo de distribuição do lixo, máquinas de terraplanagem trabalham pelo pátio com a finalidade de compactar e reduzir volume das camadas de resíduos. (BOSCOV,2008)

A fração gasosa, composta predominantemente por metano e dióxido de carbono, é drenada pelo sistema de drenagem de gás podendo ser queimada no *flare* ou encaminhada para uma unidade de tratamento de biogás. O lixiviado, também conhecido como chorume, que é o líquido produzido pela decomposição da matéria orgânica, também é drenado e encaminhado para uma unidade tratamento de efluentes. (MMA, 2003)

Por conta desse avanço tecnológico, aterros sanitários também podem ser denominados de aterros sanitário-bioenergético. Pois além de atender a normas técnicas de projeto geram energia. O biogás gerado através da decomposição anaeróbia dos RSU é rico em metano, gás de grande poder calorífico. A captura do biogás traz grandes vantagens para o aterro, pois além de reduzir as emissões dos gases efeito estufa à atmosfera, evita riscos de explosões dentro dos maciços de lixo e gera energia elétrica que pode ser utilizada na própria operação do aterro. (MMA, 2003)

Os aterros sanitários estão sendo cada vez mais operados como reatores nos quais a degradação controlada de resíduos depende do movimento de gases e líquidos dentro do aterro de resíduos. Com o propósito de medir a condutividade do líquido e do gás e a eficiência da decomposição dos RSU do aterro, as instalações são projetadas com sistemas de drenagem capazes de recircular lixiviado/ gás ou descarregar lixiviado / gás da célula de resíduos sólidos urbanos. Medidas da quantidade de lixiviado / gás adicionado ou exaurido e pressão em diferentes locais induzidas pelo fluxo de lixiviados / gás também são necessárias. (CHEN,2012; FLEMING, 2015).

Figura 2 - Esquema de funcionamento de um aterro sanitário bioenergético



Fonte: Faperj (2018)

### 1.3 Biodegradação de resíduos sólidos urbanos

A biodegradação é uma das propriedades mais importantes dos resíduos sólidos. Do ponto de vista geotécnico, a degradação e a estabilização, alteram sob inúmeras formas, o comportamento dos aterros sanitários. As transformações biológicas constituem-se nas modificações dos componentes sólidos em gases e líquidos, acarretando uma redução no volume do material depositado e variações em suas propriedades geotécnicas ao longo do tempo. (JUCÁ, 1997; ABREU, 2000; MELO 2003; MCDUGALL, 2011).

A compressibilidade de resíduos sólidos urbanos é um processo acoplado ao biológico, hidráulico e mecânico que resulta na diminuição da fase sólida e na variação no esqueleto, tamanho de partícula e estrutura de poros dos RSU. A degradação bioquímica de Resíduos Sólidos Municipais (RSU) reduz o volume do maciço de resíduos induzindo uma alteração da compressibilidade e da condutividade líquida e gasosa dos resíduos. Muitas pesquisas são baseadas em estudos de solo para estudar as propriedades geotécnicas de RSU em diferentes estágios de degradação. (LANDVA E CLARK, 1990; GABR E VALERO,

1995; WALL E ZEISS, 1995; CARVALHO, 1999; HOSSAIN, 2005; MONTEIRO *et al.*, 2006; MACHADO *et al.*, 2008; CHEN, 2010).

O processo biodegradativo dos resíduos sólidos provoca a geração de novos vazios dentro da massa de resíduos no aterro sanitário e conseqüentemente a ocorrência de recalques. Tais recalques podem ser representados pelos deslocamentos verticais e deslocamentos horizontais que sofre a massa de resíduos. (VAN ELK *et al.*, 2018)

Estudos mostram que a velocidade e a magnitude desses deslocamentos sofrem influência da idade do resíduo, tendem a diminuir com o tempo e seus efeitos permanecem perceptíveis por muitos anos. Portanto, a biodegradação de resíduos orgânicos e outros processos físico-químicos que ocorrem durante a vida de um aterro deverão contribuir significativamente para a modificação do comportamento compressivo dos resíduos ao longo do tempo, influenciando assim o desempenho de todo o aterro. (ESPINACE *et al.*, 1999; MACHADO *et al.*, 2008; VAN ELK *et al.*, 2018).

A estabilidade da massa de resíduos depende do conteúdo de material biodegradável e a taxa de biodegradação varia ao longo do tempo. A taxa do processo de decomposição depende de fatores ambientais que são difíceis de estimar em longo prazo, incluindo temperatura, presença de ar, umidade, pH, presença e tipos de bactérias, etc. Dificultando assim a simulação do processo biodegradativos. (MCDOUGALL, 2011).

#### **1.4 Propriedades geotécnicas dos maciços de resíduos sólidos urbanos**

O conhecimento das propriedades geotécnicas está relacionado com o estudo das propriedades físicas e mecânicas dos resíduos sólidos urbanos. A quantificação dessas propriedades é complexa, pois as propriedades de resíduos devem ser consideradas específicas de cada local. O maciço de resíduos apresenta componentes heterogêneos, de diferentes formas e tamanhos alterando assim suas propriedades geotécnicas constantemente. Além disso, tem-se dificuldades associadas a amostragem de resíduos *in situ*, dificuldade tanto técnica como referentes a procedimentos em laboratório devido ao tamanho das amostras e aos processos degradativos aos quais estão sujeitas. (COUMOULOS, 1997)



As propriedades físicas estão diretamente relacionadas às características específicas dos RSU e incluem: composição, distribuição do tamanho das partículas, temperatura, teor de umidade, permeabilidade e peso específico.

As propriedades mecânicas dos resíduos depositados em aterros são importantes para a avaliação do desempenho do aterro, estabilidade do declive do resíduo, análise de assentamento e capacidade final de resíduos. (FLEMING, 2015)

Tais parâmetros são determinados usualmente através de ensaios de campo ou em laboratório, porém estão sujeitos a inúmeras incertezas devido à falta de um modelo conceitual de referência de comportamento para este material, a análise é geralmente feita a partir de modelos e métodos estabelecidos para solos. (MANASSERO *et al.*, 1996)

A importância da análise de tais parâmetros se deve pelo fato de que os resíduos aterrados apresentam altos índices de vazios, e portanto, uma grande compressibilidade, apresentam partículas de natureza muito diferente, sendo que algumas delas são pouco e/ou muito deformáveis e degradáveis, provocando uma auto consolidação e variação das propriedades com o tempo. (SIMÕES, 2009)

Para o presente estudo serão apresentadas as seguintes propriedades: composição gravimétrica, teor de umidade, permeabilidade, densidade e compressibilidade.

#### 1.4.1 Composição gravimétrica

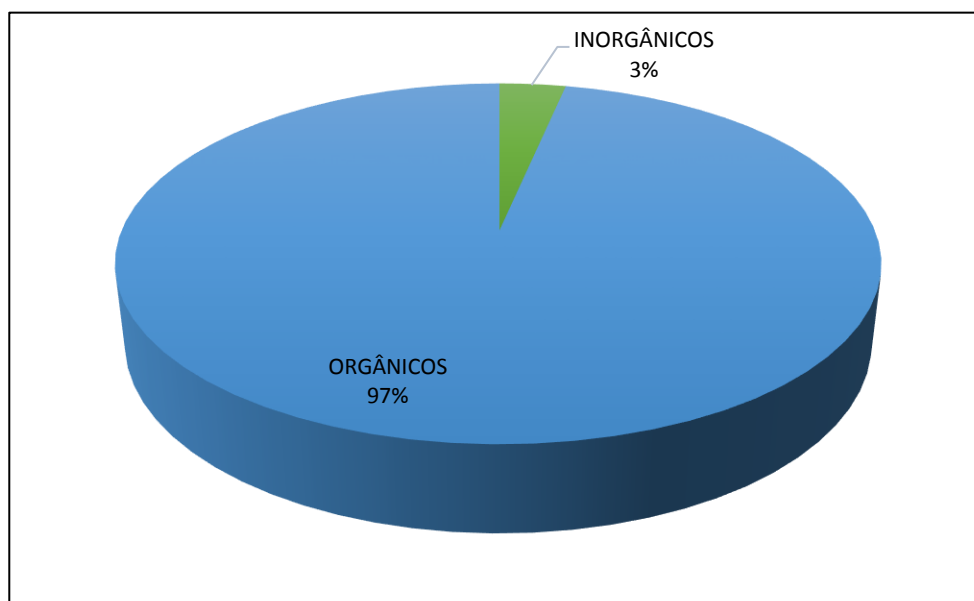
A composição gravimétrica é um parâmetro que define a característica dos resíduos, que permite conhecer o percentual de cada componente presente na massa de resíduos em relação ao peso total da amostra. Os RSU são admitidos como material heterogêneo, multifásico, constituído pelas fases sólida, líquida e gasosa. Num primeiro momento, tem-se o predomínio da fase sólida, os resíduos propriamente dito, após algum tempo, devido a processos de biodegradação, surgem as fases líquidas e gasosas. (GRISOLIA & NAPOLEONI, 1996)

Além disso existe uma variação significativa na porcentagem dos principais componentes do lixo urbano de uma região para outra, a qual está diretamente relacionada a níveis de desenvolvimento econômico, cultural e social. Em geral, locais menos desenvolvidos tendem a apresentar maior porcentagem de matéria orgânica que locais mais

desenvolvidos. (MARQUES, 2001). E também é fortemente influenciada por fatores externos, como por exemplo, a sazonalidade do clima. Todos esses fatores contribuem para alterar a composição gravimétrica dos RSU ao longo do tempo.

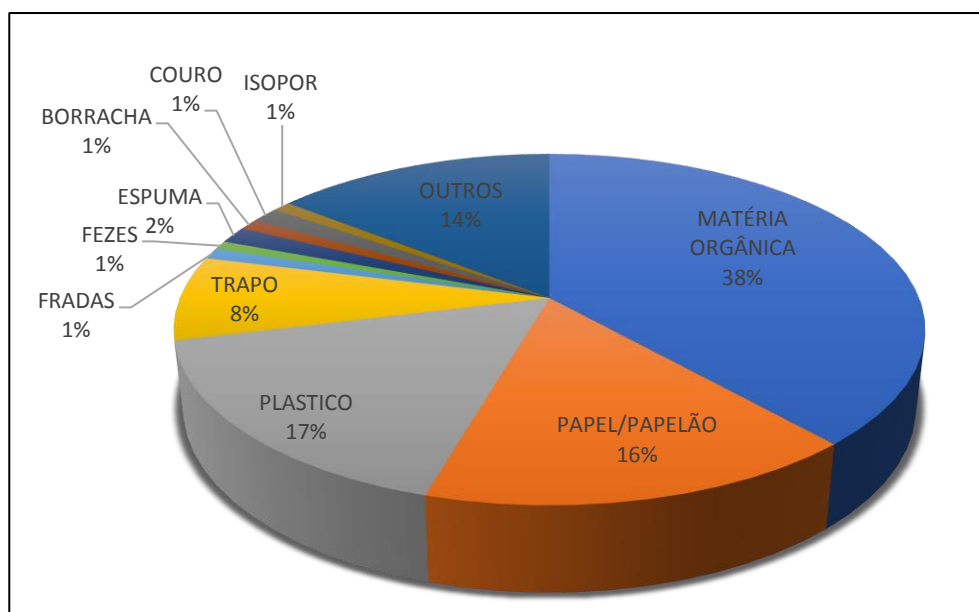
No Brasil, o percentual de matéria orgânica dos RSU varia entre 50 e 60%, típico de países em desenvolvimento (MANASSERO *et al.* 1997). Este alto teor orgânico propicia, entre outros fatores, um elevado teor de umidade aos resíduos. Soares (2011), apresenta a distribuição da caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do município de Nova Iguaçu em orgânicos e inorgânicos, e a partir desta pode ser observado que cerca de 97% dos resíduos são orgânicos, e somente 3% são compostos inorgânicos. (figura 3). A figura 4 apresenta a distribuição da caracterização gravimétrica da fração orgânica dos RSU do município de Nova Iguaçu.

Figura 3- Caracterização gravimétrica em frações orgânicas e inorgânicas do total de amostras de Nova Iguaçu.



Fonte: Adaptado de Soares (2011)

Figura 4 - Caracterização gravimétrica da fração orgânica dos RSU de Nova Iguaçu



Fonte: Adaptado de Soares (2011)

Segundo a pesquisa a maior contribuição da fração orgânica é de matéria orgânica (38%). Já a fração inorgânica que contribui apenas com 3% do total de RSU, a maior contribuição vem dos metais com 74% e os 26% restantes são de vidros.

Almohana (2017), pesquisou a composição dos RSU do aterro de Riyadh, Arábia Saudita e pode-se observar que composição de RSU em Riyadh é semelhante a países menos desenvolvidos. A tabela 1 ilustra as componentes típicas de RSU e fornece uma comparação clara da composição RSU entre os países desenvolvidos e os menos desenvolvidas de gestão de resíduos.

Tabela 1 - Composição de RSU de Riyadh comparada com outros países

<b>Componentes (%)</b>	<b>EUA (Landva &amp; Clark, 1990)</b>	<b>África (Hoy, 2014)</b>	<b>Riyadh Stringfellow (2017)</b>	<b>Índice de desenvolvimento econômico (OCDE, 2017)</b>
Orgânico	5-42	57	57.2	27
Papel	20-55	9	7	32
Plástico	2-15	13	13	11
Vidro	2-15	4	3	7
Metal	6-15	4	2.4	6
Outros	-	13	16.6	17

Fonte: Adaptado de Landva & Clark, (1990) e Almohana (2017)

### 1.4.2 Teor de umidade

Segundo Jessberger (1995), o teor de umidade do RSU está relacionado com a composição inicial da massa de resíduos, condições climáticas, forma de operação do aterro, taxa de decomposição biológica, capacidade e funcionamento sistemas de coleta de lixiviados no que diz respeito à quantidade de umidade que entra e que é gerada nos aterros.

Observou-se que o teor de umidade aumenta com o teor orgânico dos resíduos, mas também depende da estação do ano, da umidade do ar e das condições meteorológicas, em especial do índice pluviométrico. (LANDVA & CLARK,1990).

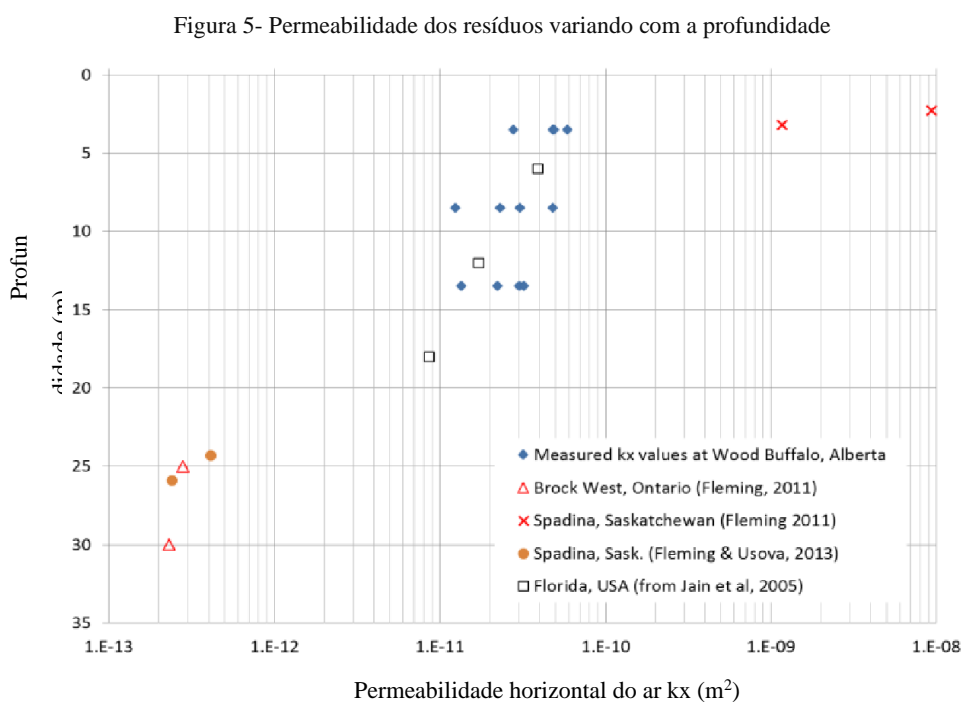
O teor de umidade pode variar significativamente entre um ponto e outro, tornando-se relevante a obtenção do perfil de umidade com profundidade. Monteiro *et al.* (2006) analisou parâmetros físico, químico e biológico do aterro de Muribeca em Recife e os resultados da umidade variando com a profundidade mostram valores numa faixa de 20% e 40%. Os baixos valores encontrados revelam que a matéria orgânica se apresentava quase totalmente decomposta conseqüentemente revelando uma menor a atividade microbiológica. Já em outros pontos em alguns pontos foram encontrados altos teores de umidade devido a bolsões de chorume naquelas profundidades.

### 1.4.3 Permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade é um importante parâmetro de projeto para instalação e operação de um aterro sanitário. Principalmente para o gerenciamento de problemas estruturais de estabilidade e de sistemas de controle e coleta de lixiviado. (Manassero,1996).

A permeabilidade é altamente dependente do procedimento de aterramento, grau de compactação, pressão de sobrecarga e idade do lixo (KNOCHENMUS *et al.*, 1998). Enquanto a literatura internacional mostra grande incidência de coeficientes de permeabilidade de RSU entre  $10^{-6}$  e  $10^{-4}$  m/s, os valores obtidos para RSU brasileiros encontram-se na maioria na faixa de  $10^{-8}$  e  $10^{-6}$  m/s (BOSCOV, 2008). Tal diferença pode ser atribuída a maior presença de materiais orgânicos nos resíduos brasileiros.

Fleming (2015), realizou testes de curto prazo de bombeamento de ar e injeção de ar no aterro de Wood Buffalo em Alberta (Canadá), os resultados de permeabilidade foram analisados juntamente com vários outros conjuntos de dados, todos em função da profundidade dos aterros. Embora haja alguma incerteza resultante das correções para condições insaturadas encontradas em profundidades maiores que 24 metros, a pesquisa evidenciou que a permeabilidade é fortemente influenciada pela profundidade. Os valores resultantes são apresentados na Figura 5.



Fonte: Fleming, 2015

#### 1.4.4 Peso específico

A relação entre o peso e o volume unitário na massa de resíduos representa o peso específico, sendo que seu valor varia de acordo com a etapa considerada, ou seja, desde sua geração até o destino final nos aterros, variando também com o tempo. (SOARES, 2011).

O peso específico varia de aterro para aterro, sendo fator fundamental a composição do lixo, além do método de disposição, envelhecimento induzido, profundidade e teor de umidade local.

No caso dos resíduos sólidos, em função da heterogeneidade da massa, o estudo do peso específico requer muita atenção, pois a gravimetria e granulometria variam de acordo com a composição dos resíduos, que sofre a influência de fatores que vão desde a sazonalidade de eventos, ao poder aquisitivo da população atendida pela coleta dos resíduos sólidos, até as crises econômicas. (JESSBERGER,1995).

Landva e Clark (1990) encontraram pesos específicos in situ entre 7 e 14 kN/m<sup>3</sup> em vários aterros de resíduos sólidos do Canadá, apresentando um elevado conteúdo orgânico, superior a 50%.

Silveira (2004), encontrou 9,15 kN/m<sup>3</sup> na Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu, através de ensaios de campo. A pesquisa também mostrou uma tendência de crescimento do peso específico com o tempo.

#### 1.4.5 Compressibilidade

A compressão de maciços sanitários é resultado do processo de carregamento, das alterações físico-químicas e biológicas dos elementos componentes do maciço de resíduos. As camadas de resíduos são formadas por uma composição heterogênea dos constituintes, onde ocorrem processos como: degradação do material com o passar do tempo, deformabilidade das partículas, presença de grandes vazios e a compressibilidade devido à sobrecarga. (SOWERS, 1973; EDIL *et al.*,1990; MCDOUGALL, 2011).

Este fenômeno que está relacionado à deformação do material e à decomposição química e biológica, são processos dependentes do tempo e que se estendem por muitos anos, dependendo dos fatores ambientais e de gerenciamento de preenchimento, como o clima e a recirculação dos lixiviados. (GRISOLIA & NAPOLEONE, 1992 *et al.*)

Em geral, os recalques em aterros são o resultado de processos relacionados à carregamentos, que ocorrem logo após a colocação da carga e deslocamentos a longo prazo sob carga constante. A magnitude do recalque de curto prazo pode ser grande, mas é adequadamente explicada por técnicas geotécnicas convencionais. Já os deslocamentos à

longo prazo são controlados pela evolução da biodegradação, parcela mais complexa de ser monitorada e calculada. (MCDOUGALL, 2008).

A elevada compressibilidade se por um lado prolonga a vida útil de um aterro sanitário por outro pode trazer problemas geotécnicos estruturais. Em geral os recalques em aterros são mais intensos no período inicial (1 a 2 meses após finalizada a construção). Em seguida, continuam a ocorrer por um longo período, porém com uma velocidade menor. Aterro sanitário recalca, sob peso próprio, entre 10 a 40% da altura original do aterro e a maior magnitude ocorre nos primeiros anos após a disposição do resíduo. (SOWERS, 1973; EDIL *et al.* 1990; GANDOLLA, 1994; GRISOLIA&NAPOLEONI, 1996).

A compressibilidade pode ser determinada a partir de ensaios de laboratório, monitoramento *in situ* e através de modelos matemáticos de previsão. A grande limitação dos ensaios de laboratório e *in situ* está relacionada com o tempo de duração do ensaio e com a incapacidade de contemplar todos os aspectos relativos aos mecanismos de compressão. Em geral os ensaios descrevem apenas o recalque mecânico e os recalques devido à degradação do resíduo não são considerados ou são parcialmente considerados (JESSBERGER, 1995; SIMÕES *et al.* 2009).

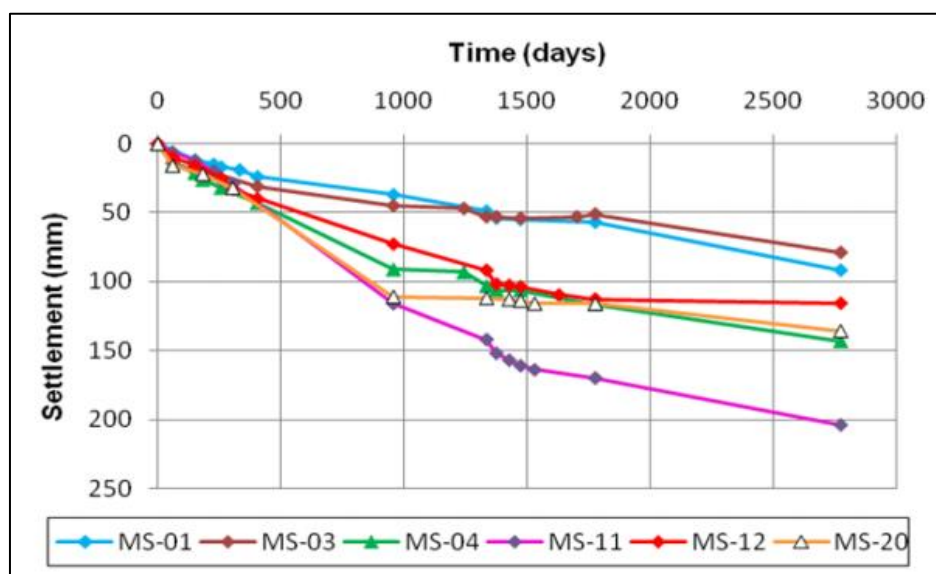
A compressão também pode ser avaliada por meio de ensaios de campo, tais como prova de carga sobre placas usadas em camadas mais superficiais, técnica conhecida como “aterros experimentais”. De acordo com Sanchez-Alciturri *et al.* (1994) os ensaios de carga são utilizados para avaliar a capacidade de carga dos aterros para possível aproveitamento da área e a deformabilidade do maciço. Existe, porém, uma restrição para o ensaio de carga que é a pequena zona de influência, em geral, o ensaio atinge somente a parte superior da camada de resíduo, podendo desta forma, dar resultados não representativos do conjunto. (LANDVA&CLARK,1990).

Para Wall e Zeis (1995), estimativas de recalque totais de aterros sanitários variam da ordem de 25 a 50%. Segundo Ling *et al.* (1998), os recalques finais podem chegar a 40% da altura inicial. Abreu (2000) encontrou valores na ordem de 10 a 30%.

Van Elk *et al.* (2014) realizou ensaios de campo em escala natural em um aterro de RSU, em Madrid, afim de efetuar um estudo de reconhecimento e compressibilidade dos resíduos. Foram instalados marcos superficiais e feito uma análise dos recalques medidos em campo com o tempo e os resultados comparados com a literatura científica. O estudo encontrou recalques que representam 3% da espessura dos resíduos sólidos existentes.

Corrêa (2017) apresentou os resultados da análise da compressibilidade de Resíduos Sólidos (RSU) do lixão de Marambaia, localizada no município de Nova Iguaçu – RJ. A pesquisa foi realizada através do monitoramento de marcos superficiais durante o período de 2008 a 2015. Com o monitoramento foi possível observar que os assentamentos verticais variaram entre 79 e 204 mm, representando deformações na faixa de 0,16 a 0,41%. (figura 6).

Figura 6 - Recalques medidos do vazadouro de Marambaia durante 8 anos



Fonte: Corrêa (2017)

A contribuição do estudo de compressibilidade de resíduos sólidos urbanos (RSU), impacta diretamente na avaliação da estabilidade da massa de resíduos, na estimativa da sua vida útil, na avaliação da integridade sistemas de revestimento e de cobertura e de lixiviados e de drenagem de gás, bem como desenvolvimento de estudos para reaproveitamento das áreas ocupadas após o fechamento dos aterros sanitários (PEREIRA, 2000, SIMÕES & CATAPRETA, 2009, BABU *et al.*, 2010, MCDOUGALL 2011).



## 1.5 Mecanismos que influenciam os recalques

Os mecanismos de recalque dos RSU depositados em aterros sanitários são descritos e conceituados por vários autores. Cada autor difere sobre a provável incidência dos mecanismos de recalque durante a vida de um aterro porém existe um consenso sobre a sequência de mecanismos e sua classificação temporal, maioria dos autores descreve o recalques de resíduos sólidos urbanos como sendo o resultado de cinco mecanismos (carga, fluência mecânica, biodegradação, mecanismos físico-químicos e interações entre eles) e dividem a classificação temporal dos recalques em: inicial, primário e secundário. (SOWERS, 1973, YEN E SCANLON ,1975; EDIL *et al.*,1990; GRISOLIA&NAPOLEONI,1992; MANASSERO *et al.*,1996).

A tabela 2 apresenta a classificação dos mecanismos de recalques segundo Sowers (1973), Yen e Scanlon (1975), Grisolia&Napoleoni (1992) e Manassero *et al.* (1996).

Tabela 2- Classificação dos mecanismos de recalques de acordo com diferentes autores

Autor	Mecanismos
Sowers (1973)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Compressão mecânica: distorção, flexão e esmagamento</li> <li>● Ravinamento interno: erosão, peneiração de partículas finas</li> <li>● Alterações físico-químico: corrosão, oxidação e combustão</li> <li>● Biodegradação: fermentação e decaimento, aeróbico e anaeróbio</li> <li>● Interações entre os outros quatro mecanismos.</li> </ul>
Yen e Scanlon (1975)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Movimento de partículas menores em grandes vazios</li> <li>● Perda de força devido a reações químicas e biológicas</li> <li>● Perda de material devido à biodegradação e produção de metano</li> <li>● Processos de fluência</li> <li>● Processos de consolidação.</li> </ul>
Grisolia&Napoleoni (1992)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Fase I – inicial deformação</li> <li>● Fase II – recalque residual dos materiais altamente deformáveis</li> <li>● Fase III – deformação lenta e decomposição dos orgânicos</li> <li>● Fase IV- deformação concluída</li> <li>● Fase V- deformação residual</li> </ul>
Manassero <i>et al.</i> (1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Compressão física devido a devido a distorção mecânica, flexão, reorientação e esmagamento.</li> <li>● Variação de volume devido ao rearranjo de partículas menores para espaços maiores.</li> </ul>

- 
- Comportamento viscoso e fenômeno de consolidação envolvendo o esqueleto sólido e as partículas individuais.
  - Recalques causados pela biodegradação do material orgânico.
  - Colapso dos componentes devido as alterações físico-químicas processadas através da corrosão, oxidação e degradação dos componentes inorgânicos.
- 

Fonte: Adaptado de Manassero *et al.* (1996).

Sowers (1973) foi o primeiro a definir os mecanismos de recalque da seguinte forma:

- a) Recalque inicial ou imediato é o recalque instantâneo que ocorre depois que uma carga externa é aplicada - isto é, a colocação fora de outros resíduos, e o mecanismo principal é a natureza mecânica. Está geralmente associado à imediata compactação do espaço vazio e do esmagamento de partículas devido à carga sobreposta durante as primeiras horas de operação.
- b) O recalque primário é devido à compressão mecânica por esmagamento, distorção, reorientação, flexão e / ou quebra de partículas de resíduos, pois as tensões verticais são aumentadas durante a compactação da máquina ou devido ao peso próprio do preenchimento quando outro material é depositado. A compressão primária devido a efeitos de peso provavelmente ocorreria durante ou logo após o período, geralmente ao longo de um período de trinta a sessenta dias. O recalque primário não afetaria, portanto, o comportamento pós-fechamento de um aterro e seu sistema de cobertura.
- c) Os recalques secundários ocorrem durante um período mais longo (anos). Expressam a redução do volume provocada pelas transformações do material e às perdas de massa resultantes da fuga de gases e líquidos.

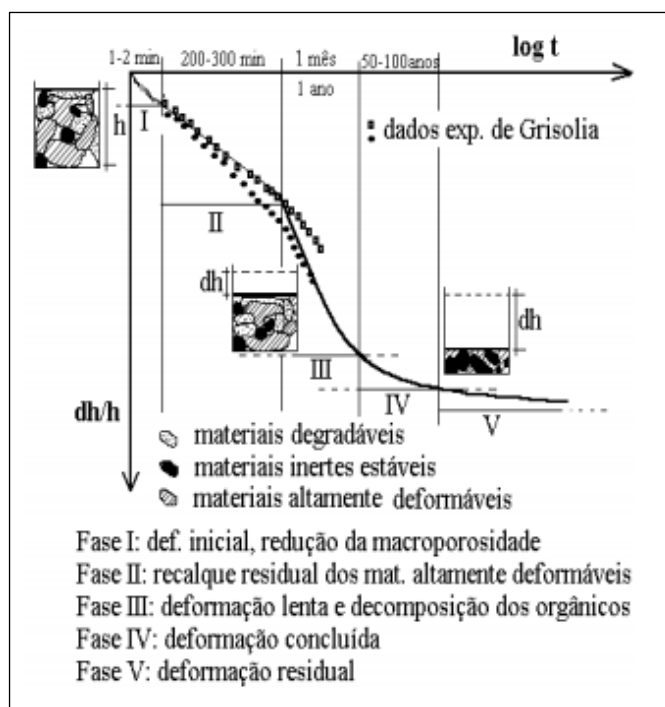
Grisolia & Napoleoni (1992) dividem os mecanismos em fases (figura 7), que mostram a evolução dos recalques com o tempo e de acordo com três classes de matérias (inertes estáveis, altamente deformáveis e facilmente degradáveis):

- A fase I seriam os dois primeiros minutos após o lançamento dos resíduos.
- A fase II, seriam as primeiras cinco horas onde sob carga ocorre uma acentuada redução do volume dos materiais altamente deformáveis e deslocamento dos inertes estáveis.

Mantendo a carga constante, ocorrem deformações do tipo “creep” ou também denominada de fluência mecânica e transformações da matéria orgânica, após um mês, completando a fase III.

- As fases IV e V seriam os processos de recalque a longo prazo, onde a velocidade dos recalques tende a ser cada vez menor e o contato entre os diferentes tipos de matérias cada vez maior.

Figura 7 – Curva teórica de compressibilidade de RSU segundo Grisolia&Napoleoni (1996)



Fonte: Adaptado de Grisolia&Napoleoni (1996).

Ambos os autores convergem para a ideia de que o primeiro mecanismo atuante é a deformação mecânica. Portanto, estes recalques estão diretamente ligados ao tratamento prévio de resíduos e ao processo de compactação na área de descarga, quando ocorre o colapso estrutural, distorção, dobras, esmagamento, quebra ou rearranjo das partículas dos materiais componentes dos RSU. (SOWERS, 1973; MCDOUGALL,2008).

Posterior a fase mecânica, em seguida, se iniciam as transformações físico-químicas, perda de material devido à biodegradação e produção de metano, e a dissipação de pressões de lixiviados e gases, quando a água e o gás são retirados dos vazios devido à aplicação de carga. Esse mecanismo é responsável por um recalque maior do que o recalque

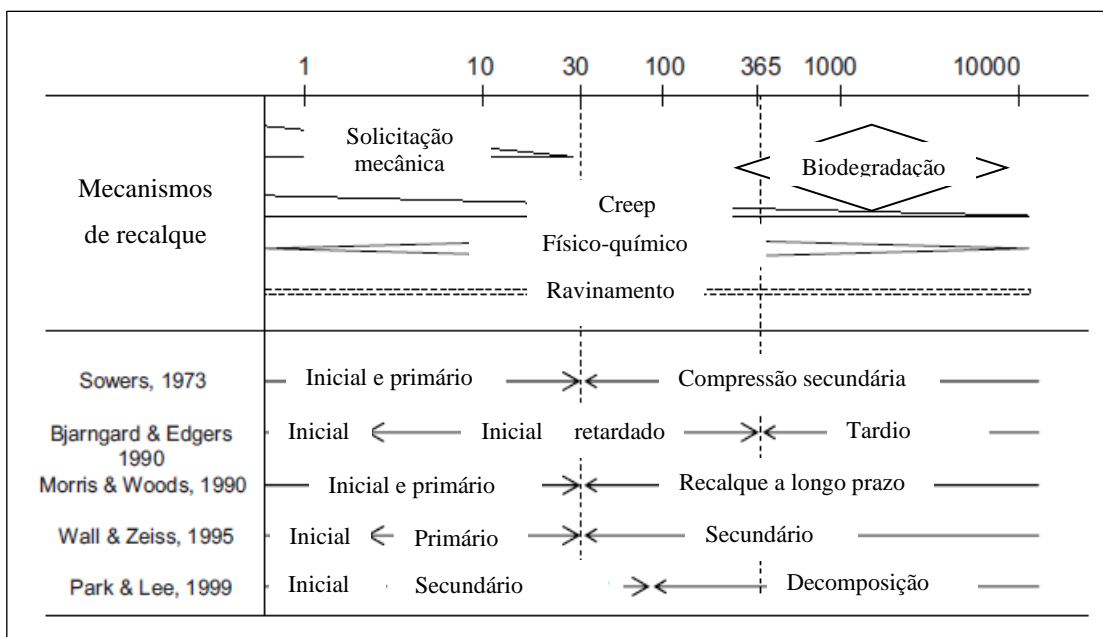
promovido pela solicitação mecânica, representam um rebaixamento da ordem de 5 a 30% da altura inicial do aterro. (BJARNGARD & EDGERS, 1990; KÖNIG *et al.*, 1996)

Durante o processo de solicitação mecânica e biodegradação ocorre o mecanismo de fluência mecânica também denominado de “creep”. Este mecanismo é caracterizado por um movimento viscoso, lento e contínuo das partículas menores de resíduos no interior do maciço. Segundo McDougall (2011), este mecanismo é, geralmente, considerado como possuidor de uma taxa de ocorrência gradualmente decrescente durante toda a vida do aterro.

Finalmente, são os processos de consolidação, que é a interação dos mecânicos citados anteriormente, Sowers (1973) denomina de recalque secundário os recalques por biodegradação, alterações físico-químicas e por creep. (EL-FADEL *et al.*, 1999; PEREIRA, 2000; HOSSAIN, 2005; IVANOVA, 2007; SIDDIQUI, 2011).

A figura 8 mostra a sequência dos mecanismos e a classificação temporal dos recalques de acordo com os principais pesquisadores no assunto. Os recalques referidos como inicial e primário estão relacionados a efeitos de carga e ocorrem ao longo do primeiro mês por Sowers (1973), Morris e Woods (1990) e Wall e Zeiss (1995). Após um mês inicia a fluência mecânica onde predominam os efeitos físico-químicos/corrosivos e biodegradáveis, essa fase é referida como fase secundária ou de longo prazo. Esta fase pode continuar por trinta ou mais anos. Bjarngard e Edgers (1990) e Park e Lee (1997), usam diferentes terminologias e prazos, mas suas interpretações são consistentes com outras e a sequência geral de mecanismos de recalque.

Figura 8 – Sequência dos mecanismos de recalque e as classificações temporais



Fonte: Adaptado de McDougall, (2011)

Antes de examinar mais de perto os modelos de recalques de aterros sanitários existentes e os recém-desenvolvidos, é instrutivo reconhecer a gama de fatores de influência que os parâmetros de entrada dos modelos de assentamento de aterros tentam representar.

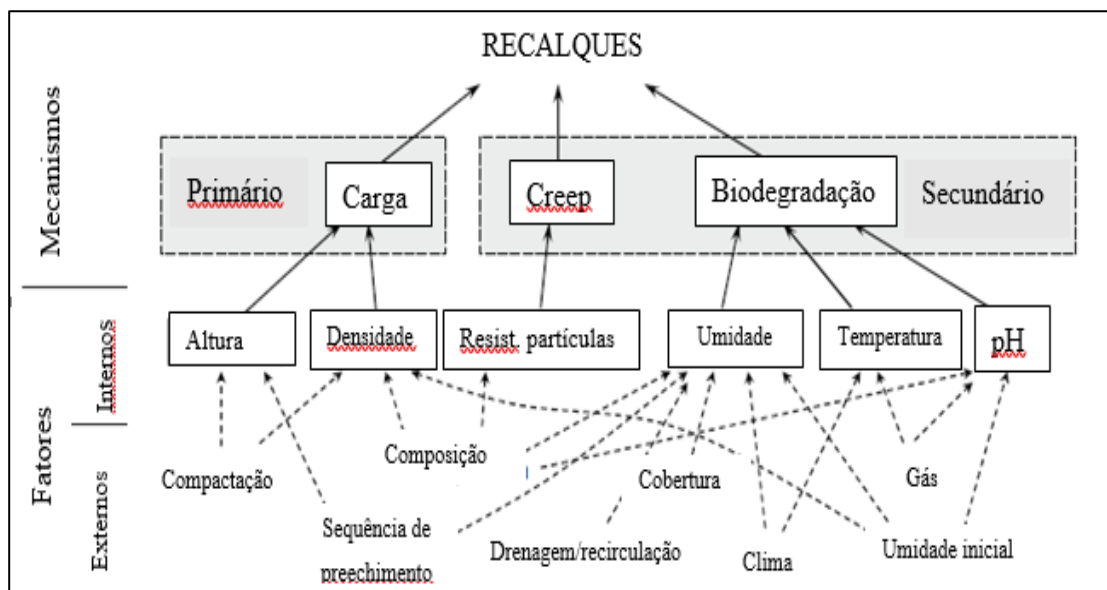
## 1.6 Fatores de influência

Segundo Edil *et al.* (1990), muitos fatores afetam a magnitude dos recalques, sendo eles: densidade inicial dos resíduos domésticos ou índice de vazios, conteúdo de material degradável nos resíduos domésticos, altura de preenchimento do aterro, forma de operação do aterro, nível de lixiviado, fatores ambientais como teor de umidade, temperatura, presença e geração de gases no interior do aterro.

McDougall (2008) mostra uma série de fatores que influenciam recalques de aterros em um conjunto simplificado de mecanismos de recalques primários e secundários. Fatores influenciadores podem ser vistos como: Fatores que definem a condição dos resíduos dentro de uma célula de aterro, ou seja, internos ao aterro e fatores ou operações e controles do local ou condições iniciais que influenciam as condições internas (figura 9).

Alguns dos fatores que influenciam a biodegradação, ou seja, umidade, chorume e composição do gás não são incorporados de forma imediata ou explícita nos modelos convencionais de recalque. Além disso, durante o período sob investigação, a influência desses fatores pode mudar e de forma não gradual nem previsível. De fato, Landva & Clark (1990), concluíram que os efeitos da decomposição são muito complexos para prever.

Figura 9- Fatores internos e externos que influenciam os mecanismos de recalque



Fonte: Adaptado de McDougall (2011).

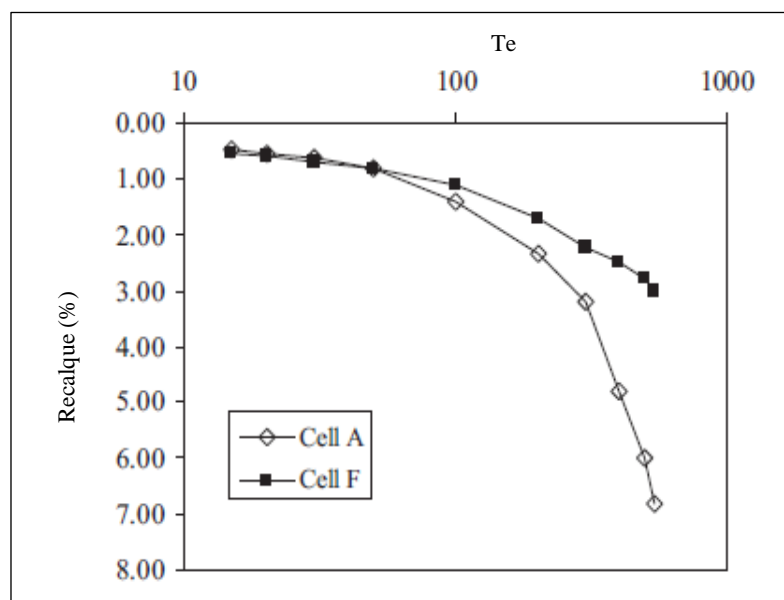
Os fatores que controlam os processos químicos e (micro) biológicos foram considerados nas primeiras investigações sobre o recalque de aterros sanitários. Irrigação e condições aeróbicas foram observadas como responsáveis por um recalque cerca de três vezes maior do que o que ocorre em uma célula anaeróbica seca (MERZ & STONE, 1962).

Sowers (1973) observou que manter um local seco pode interromper a decomposição. Ele também reconheceu o complexo papel da umidade notando que a inundação sem oportunidade para a circulação da água também pode interromper a decomposição devido à inibição (microbiana) do produto.

El-Fadel (1999) relatou que fatores como umidade, lodo e adição de tampão e seu impacto na biodegradação em uma série de células de teste no aterro controlado Vista da Montanha. Aumentos significativos na quantidade e taxa de recalque foram observados quando a biodegradação é aumentada (Figura 10). El Fadel, observa que a célula A analisada

obteve recalques maiores que a célula F, em virtude da recirculação de lixiviado. Nesta pesquisa a recirculação favoreceu a decomposição de resíduos.

Figura 10 - Efeito da recirculação de lixiviado na magnitude de recalques



Fonte: Adaptado de El-Fadel (1999).

## 1.7 Previsão de recalques

Aterros sanitários sofrem recalques que variam em média de 25% a 50% da espessura original do aterro (BJARNGARD & EDGERS, 1990; ESPINACE *et al.*, 1999). Valores mais significativos ocorrem preferencialmente a curto prazo, na fase de preenchimento e permanece uma quantidade significativa de recalque a longo prazo. Deformações desta magnitude e duração impactam no projeto, operação, fechamento e uso futuro dos aterros sanitários. (MCDOUGALL, 2011)

A previsão do recalques de aterros sanitários tem sido considerada como um fator imprescindível na elaboração e manutenção de um projeto de aterro sanitário, na estimativa de sua capacidade e na produção de gás e lixiviado, visto que, se o recalque for excessiva ou imprevisto, a integridade da camada de cobertura e qualquer infraestrutura para a coleta

de gás ou a recirculação do lixiviado podem ser comprometidas. Mesmo que a camada de cobertura permaneça intacta, é necessário evitar depressões na superfície superior, onde a água da chuva pode se acumular. (EL-FADEL & KHOURY, 2000; ALMOHANA, 2017)

Na maioria dos casos relatados na literatura, a previsão é estimada utilizando a teoria da consolidação unidirecional ou através de expressões empíricas resultantes de dados de monitoramento de campo. (LING *et al.*, 1998, SIMÕES *et al.*, 2009).

A Simulação do recalque secundário é muito mais complicada, uma vez que depende de muitos fatores, como o material biodegradável da fermentação, falta de compactação adequada em algumas áreas, dissolução de porções sólidas no lixiviado e o aumento da compressibilidade da massa de resíduos pela aplicação de cargas quando o aterro já está fechado. Entre esses fatores, a biodegradação é a mais complexa para simular porque a taxa do processo de decomposição depende dos fatores ambientais que são difíceis de estimar a longo prazo, incluindo a temperatura, a presença de ar, umidade, pH, presença e tipos de bactérias, etc. (EDIL *et al.*, 1990; EDGERS *et al.*, 1992; BLEIKER *et al.*, 1995; MCDUGALL, 2007).

A compressão dependente do tempo é atribuída à fluência mecânica e à biodegradação da fração orgânica de RSU. Existem três abordagens gerais para modelar a compressão dependente do tempo (MCDUGALL, 2007):

(1) aplicação de funções matemáticas únicas a três fases de compressão individuais (fluência mecânica, biocompressão e fluência mecânica final);

(2) aplicar duas funções matemáticas para representar fluência mecânica e biocompressão; ou

(3) usando uma única formulação matemática para representar toda a compressão dependente do tempo. Cada uma dessas abordagens tem vantagens e desvantagens, e a principal diferença na modelagem depende da compressão em relação às duas primeiras abordagens como fluência mecânica e biocompressão são combinados.

Diferentes propostas foram apresentadas nos últimos anos na tentativa de compreender o comportamento de compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e prever os recalques de aterros sanitários. Ambas as propostas têm em comum (McDOUGALL, 2008):

- a) A aplicação dos conceitos e teorias da mecânica do solo ao estudo da compressibilidade dos resíduos sólidos.



- b) A separação dos principais mecanismos envolvidos no processo de compressão do RSU, ou seja, compressão mecânica primária e secundária (creep) e compressão secundária devido à biodegradação. Alguns modelos consideram a compressão imediata (GIBSON & LO, 1979).
- c) A definição apropriada do componente temporal parece ser extremamente importante em todas as abordagens existentes. O uso de diferentes equações e funções matemáticas é adotado por algumas abordagens para se reproduzir e se adequar melhor às curvas observadas de Recalque vs. tempo.

Segundo Liu *et al.* (2006), os modelos existentes para calcular recalques de aterro podem ser divididos nas categorias seguintes:

(1) Modelo de Adensamento - a teoria de Terzaghi que é normalmente aplicado no cálculo de recalques em solos é adotada para calcular o recalque primário e secundário; Ex: Sowers (1973) Yen & Scanlon (1975) Rao *et al.* (1977) Oweis & Khera (1986) Bjarngard & Edgers (1990) Edil *et al.* (1990).

(2) Modelos Reológicos – o comportamento de compressão de resíduos é modelado com utilização de conceitos e parâmetros reológicos dos materiais; Ex: Gibson & Lo (1961), Edil *et al.* (1990) e Chen & Chou (1998).

(3) Modelo de Biodegradação - o comportamento de biodegradação da matéria orgânica (quer dizer, os componentes orgânicos sólidos que diminuíram gradualmente como resultado do processo de decomposição) é considerado na formulação do modelo; Ex: Wall & Zeiss (1995), Marques *et al.* (2003) e Simões *et al.* (2009).

(4) Modelos de Regressão - algumas funções comuns (por exemplo, logarítmico, hiperbólico, séries de potência, bi linear, multilinear) são usadas para calibrar os dados. Ex: Sowers (1973), Edil *et al.* (1990), Ling *et al.* (1998), Gandola *et al.* (1994).

## 1.8 Modelos de previsão de recalques

### 1.8.1 Sowers (1973)

Sowers (1973), foi o primeiro a avaliar os recalques de aterro sanitário por meio de aproximação da mecânica dos solos. Admitiu que os recalques totais de um aterro sanitário podem ser divididos em duas parcelas, uma gerada pelas solicitações mecânicas e, a outra, pela decomposição físico-química e biológica.

Esse modelo considera as parcelas de compressão inicial, primária e secundária. O recalque total é a soma dessas parcelas, sua formulação é simples e conta com um número de parâmetros reduzidos. Os coeficientes podem ser deduzidos a través de monitoramento de uma camada de resíduo em período de tempo relativamente curto com o objetivo de prever recalques em períodos de tempos maiores.

Os recalques primários são relacionados ao incremento de carga e ocorrem de forma rápida (cerca de um mês) e os recalques secundários incluem os fenômenos de fluência e biodegradação e admite a linearidade do recalque com o logaritmo do tempo (BABU *et al.*, 2010).

Os índices de compressão primária ( $C_c$ ) e secundária ( $C_\alpha$ ) dependem do índice de vazios inicial ( $e_0$ ). Este valor pode variar em função do potencial de alteração físico-químico, quanto maior a quantidade matéria orgânica e mais favorável forem as condições ambientais para os processos degradativos maior será o valor desses parâmetros. ( $C_c = 1,5 * e_0$  e  $C_s = 0,03 * e_0$  para aterros com baixo teor de matéria orgânica e condições de decomposição desfavoráveis e  $C_c = 0,55 * e_0$  e  $C_s = 0,09 * e_0$  para aterros com alto teor de matéria orgânica e condições de decomposição favoráveis). (MARQUES, 2001)

Devido à dificuldade da determinação confiável do índice de vazios do RSU, tem sido determinado os coeficientes por retro análise, a partir de ensaios de carga ou recalques medidos na superfície do aterro. Eles correspondem respectivamente ao declive das curvas  $\Delta H/H$  versus logaritmo de tensão vertical  $\sigma$  e  $\Delta H/H$  versus logaritmo de tempo  $t$ . (EL-FADEL & KHOURY, 2000). Os coeficientes de compressibilidade também podem ser determinados pelas equações 1 e 2:

$$C'_c = \frac{C_c}{1+e_0} \quad (1)$$

$$C'_\alpha = \frac{C_s}{1+e_0} \quad (2)$$

Onde:

$C'_c$  = coeficiente de compressão primária;

$C'_\alpha$  = coeficiente de compressão secundária;

$C_c$  = índice de compressão primária;

$C_s$  = índice de compressão secundária;

$e_0$  = índice de vazios

Landva & Clark (1990), com a finalidade de avaliar a compressibilidade de resíduos sólidos antigos (idade desconhecida) de vários aterros do Canadá, fizeram ensaios de compressão confinada em célula de grande dimensão (diâmetro = 0,45m). Os resultados obtidos por estes autores apresentaram alta compressibilidade, com valores de coeficientes de compressão primária ( $C'_c$ ) variando de 0,2 a 0,5 e coeficientes de compressão secundária ( $C'_\alpha$ ) variando de 0,03 a 0,002, com este último, segundo os autores, parecendo aumentar com o aumento do conteúdo orgânico. Mais tarde, Landva *et al.* (2000) apresentaram resultados obtidos em um consolidômetro com diâmetro de 60 cm e encontrou valores de coeficiente de compressão primária ( $C'_c$ ) na faixa de 0,17 a 0,24 e os resultados em termos de coeficiente de compressão secundária ( $C'_\alpha$ ) variam entre 0,010 e 0,016. De acordo com Babu *et al.* (2010), os valores dos índices de compressão  $C'_c$  e  $C'_\alpha$  reportados na literatura técnica variam numa faixa de 0,163 a 0,205 e 0,015 a 0,350 respectivamente.

A compressão primária pode ser obtida pela equação 3:

$$S_p = C'_c \times H_0 \times \log \frac{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad (3)$$

Onde:

$S_p$  = recalque primário;

$C'_c$  = coeficiente de compressão primária;

$H_0$  = espessura inicial da camada;

$\sigma_{v0}$  = tensão vertical inicial;

$\Delta\sigma_{v0}$  = acréscimo de tensão vertical

Já a compressão secundária pode ser representada pela equação 4:

$$S_s = C'_\alpha \times H_0 \times \log \frac{t_2}{t_1} \quad (4)$$

Onde:

$S_s$  = recalque secundário;

$C'_\alpha$  = coeficiente de compressão secundária;

$H_0$  = espessura inicial da camada;

$t_1$  = tempo para conclusão da compressão primária;

$t_2$  = tempo de estimativa de recalque

E o recalque total seria a soma dessas parcelas, sendo apresentados pela equação 5:

$$\frac{S}{H_0} = C'_c \times \log \frac{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} + C'_\alpha \times \log \frac{t_2}{t_1} \quad (5)$$

Onde:

$S$  = recalque total;

$H_0$  = espessura inicial da camada;

$\frac{S_t}{H_0}$  = deformação vertical (recalque normalizado);

$t_1$  = tempo para conclusão da compressão primária;

$t_2$  = tempo de estimativa de recalque

Os modelos propostos por Bjarngard & Edgers e Fasset *et al.*, pressupõem que, a curto prazo, a relação entre deformação vertical  $\left(\frac{S}{H_0}\right)$  e  $\log\left(\frac{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}}\right)$  é linear.

### 1.8.2 Edil et al. (1990)

Edil *et al.* (1990) expandiu o modelo de Gibson & Lo (1961). Também denominado de modelo potência de creep, tem sido utilizado para a estimativa do comportamento do “creep” (fluência) transiente de inúmeros materiais de engenharia, sendo dado pela equação 6:

$$S = H_0 \times \Delta\sigma \times m \times \left(\frac{t}{t_r}\right)^n \quad (6)$$

Onde:

$S$  = recalque total;

$H_0$  = 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

$t_r$  = tempo de referência (considerado usualmente como 1 dia)

$t$  = tempo após aplicar a carga

Edil *et al.* (1990) estimaram valores para os parâmetros “ $m$ ” e “ $n$ ” realizando ajustes de curvas a partir de registros de monitoramentos e observaram que, apesar do reduzido número de registros, os desvios entre os recalques previstos pelo modelo e os medidos foram de 0 a 14%.

### 1.8.3 Gandolla et al. (1994)

O modelo de Gandolla *et al.* (1994), baseou-se em resultados experimentais efetuados com lisímetros para formular um modelo exponencial para previsão de recalques. Os

autores propuseram em seus trabalhos representar a evolução dos recalques secundários ao longo do tempo respeitando a condição de recalque nulo que coincide com o final da construção do aterro ( $t_c$ ) e verificaram que o recalque é proporcional ao peso específico inicial e que sua variação em relação ao tempo pode ser expressa por uma função exponencial decrescente conforme mostra a equação 7. A velocidade dos recalques é obtida por derivação da equação 7 em relação ao tempo (equação 8).

$$\frac{S}{H_0} = a x (1 - e^{-kt}) \quad (7)$$

$$v = a x k x Hx e^{-kt} \quad (8)$$

Onde:

$S$  = recalque total;

$H_0$  = altura inicial dos resíduos;

$v$  = velocidade do recalque;

$a$  = constante de recalque unitário;

$k$  = constante de taxa de decomposição;

$t$  = tempo em meses

Neste modelo, a constante  $a$  corresponde ao recalque unitário final enquanto o parâmetro  $k$  se refere à taxa de decomposição, decrescente com o tempo. Gandolla *et al.* (1994) determinaram os valores das constantes  $a$  e  $k$  equivalentes a 0,4416 e 0,0077 respectivamente. Os valores dos parâmetros encontrados corresponderam a um recalque de cerca de 45% da altura inicial de resíduos confinados em um lisímetro. Tendo em vista os valores observados em campo por outras pesquisas, recalques variando de 10 a 35% da altura inicial, os valores propostos por Gandolla *et al.* (1994) foram elevados.

Porém, segundo Simões *et al.* (2009), um aspecto positivo deste modelo se refere à simplicidade de encontrar seus parâmetros. Diferentemente de Gibson & Lo (1961), o modelo não envolve a tensão vertical efetiva aplicada no maciço de resíduos.

#### 1.8.4 Meruelo (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. O modelo foi desenvolvido a partir dos estudos realizados no aterro de Meruelo, no norte da Espanha.

Este modelo tem a finalidade de prever os recalques secundários a partir da formulação que incorpora e relacionam os parâmetros que determinam os processos de degradação como o tempo, teor de matéria orgânica, umidade, ritmo de desenvolvimento de processos de degradação, entre outros.

A previsão de recalques por perda de massa, considerando que o peso específico se mantém constante e que os processos de biodegradação levam a uma redução do volume do maciço de resíduo no aterro, pode ser expressa, para períodos posteriores à operação, pela equação 9.

$$S = \frac{1}{k_h t_c} \times \alpha \times H_0 \times COD [(1 - e^{K_h t_c}) \times (e^{-K_h t} - e^{-K_h t_0})] \quad (9)$$

Onde:

S = recalque total;

$\alpha$  = coeficiente de perda de massa;

$H_0$  = altura inicial do aterro em metros;

COD = quantidade de matéria orgânica biodegradável presente no resíduo por ano;

$k_h$  = coeficiente de hidrólise ( $\text{dia}^{-1}$ );

t = tempo;

$t_c$  = tempo de construção do aterro;

$t_0$  = idade do aterro no início das medições.

Os parâmetros do modelo,  $k_h$ ,  $\alpha$  e COD, estão diretamente relacionados aos processos de biodegradação e podem ser obtidos de forma indireta a partir da curva original de recalques e/ou adotados. (TAPAHUASCO, 2009)

Os coeficientes de perda de massa ( $\alpha$ ) pode ser determinado através dos registros de recalques medidos em campo por retroanálise e aferir o valor do coeficiente de hidrólise ( $K_h$ ) que pode variar entre 0,1 e 0,0008 dia<sup>-1</sup> (GOMES, 2010). Segundo Simões *et al.* (2009), a principal hipótese adotada no modelo é referente a identificação da hidrólise como principal fator limitante no processo de biodegradação. Esta hipótese é baseada no fato de que a hidrólise utiliza microrganismos para transformar compostos orgânicos complexos em compostos orgânicos mais simples, possibilitando condições favoráveis a completa decomposição dos RSU.

#### 1.8.5 Ling *et al.* (1998)

O modelo hiperbólico foi aplicado pela primeira vez aos RSU por Ling *et al.* (1998). O modelo incorpora em uma única equação as compressões primária e secundária com o tempo inicial correspondente ao tempo de início de monitoramento dos recalques. Utiliza a magnitude do recalque final e taxa de recalque inicial como parâmetros-chave em sua formulação. O modelo é representado pela equação 10.

$$S = \frac{t}{\frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{S_{ult}}} \quad (10)$$

Onde:

$S$  = recalque total;

$\rho_0$  = taxa inicial de recalque ( $S_t/\Delta t$ ) para  $t=t_0$ ;

$t$  = diferença entre o instante considerado e o início das medidas ( $t = t_i - t_0$ );

$S_{ult}$  = recalque último esperado (tempo infinito)

Segundo Olivier (2003), Gomes (2010) e Tapahuasco (2009) o tempo  $t_0$  pode corresponder ao início das medições e geralmente tomado como igual a zero ( $t_0=0$ ), porém, a função hiperbólica permite que o  $t_0$  comece em qualquer tempo de interesse após encerramento. O modelo hiperbólico embora seja fácil de utilizar e independa do tempo de construção e espessura da camada de lixo, sua boa aplicação está diretamente relacionada às velocidades de



recalques, apresentando melhores correlações para as velocidades de recalque que diminuem com o tempo. Além disso, seus parâmetros são próprios e característicos ao comportamento de cada curva de recalques.

Os parâmetros  $\rho_0$  e  $S_{ult}$  podem ser determinados por uma análise de regressão linear através da relação  $t/S_{(t)}$  versus  $t$  (equação 11).

$$\frac{t}{S_{(t)}} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{S_{ult}} \quad (11)$$

Para Ling *et al.* (1998), o recalque final pode estar entre 80 e 95% em relação ao recalque último esperado.

#### 1.8.6 Oweis (2006)

O modelo de previsão de recalque de Oweis (2006) avalia o recalque mecânico e de decomposição de resíduos sólidos durante e após o preenchimento das camadas de resíduos no aterro. De acordo com seus estudos o recalque mecânico pode chegar a 25% da altura inicial do projeto durante o preenchimento das camadas de resíduos enquanto que no pós-encerramento os recalques mecânicos são relativamente pequenos.

A elaboração de suas fórmulas matemáticas considerou as seguintes suposições: taxa uniforme de enchimento, constantes uniformes de decaimento antes e depois do término do preenchimento, peso unitário uniforme e parâmetros de compressibilidade dos resíduos separados em dois períodos, durante e pós-encerramento do projeto.

Segundo Oweis (2006), para um parâmetro de decaimento ( $k$ ) de 0,05 e compressibilidade mecânica média, os recalques durante a operação equivalem a cerca de 30% da espessura do aterro, dependendo período de enchimento e ambiente de decomposição.

Durante a operação o recalque é dividido em: recalque mecânico ou primário ( $S_p$ ), recalque de fluência ( $S_s$ ) e recalque da decomposição ( $S_d$ ). O recalque mecânico é representado pela equação 12.

$$S_p = 0,87 \times m' \times t_c \times C'_c \quad (12)$$

Onde:

$S_p$  = recalque primário/mecânico

H = espessura final do aterro

$C'_c$  = coeficiente de compressão primária

$t_c$  = tempo para completar o preenchimento

$m'$  = taxa de preenchimento do aterro ( $m' = t_c/H$ )

O coeficiente de compressão secundária é definido como mudança do índice de vazios pelo log do tempo durante o preenchimento. O recalque da fluência durante o preenchimento é estimado pelas equações 13 e 14:

$$S_s = 0,435 \times C'_\alpha \times m' \times [1 + (t \ln t) - t] \quad (13)$$

$$S_{s t_c} = 0,435 \times C'_\alpha \times m' \times [1 + (t_c \ln t_c) - t_c] \quad (14)$$

Onde:

$S_s$  = recalque da fluência no tempo  $t$ ;

$S_{s t_c}$  = recalque da fluência no período de preenchimento  $t_c$ ;

$C'_\alpha$  = coeficiente de compressão secundária modificado em termos de deformação;

$t$  = tempo em meses durante o preenchimento do aterro;

$t_c$  = tempo para conclusão do preenchimento.

Na literatura geotécnica o coeficiente de compressão secundária ( $C'_\alpha$ ) varia na faixa de 0,02 a 0,32, os valores mais altos podem ser reflexo do recalque promovido pela decomposição. O recalque provocado pela decomposição antes do encerramento do aterro pode ser expresso pela equação 15:

$$S_d = \beta m' \left( t_c - \frac{1}{k} (1 - e^{-k t_c}) \right) \quad (15)$$

Onde:

$S_d$  = recalque pela decomposição no  $t \leq t_c$ ;

$\beta$  = fração de massa de resíduo que possa potencialmente ser convertida em gás.

$k$  = constante de decaimento durante o enchimento (valor constante)

$m^?$  = taxa de preenchimento do aterro

O parâmetro  $k$  varia de 0,003 a 0,21 de acordo com USEPA 1998. McBean *et al.* (1995) sugeriu valores de 0,46 - 1,38 para alimentos de categoria de resíduos rapidamente decomponíveis (jardim e orgânicos) e 0,028 - 0,138 para a categoria moderadamente decomposta (papel e madeira). Na ausência de dados específicos do local, um valor padrão de 0,05 é sugerido para a implementação dos requisitos do padrão federal de desempenho de novas fontes ou 0,04 com base nos fatores de emissão da Compilação de Ar da USEPA. Marques *et al.* (2003) citou um valor  $k$  médio de 0,42 ano<sup>-1</sup> com base na análise de regressão de 20 locais instrumentados.

Para o parâmetro  $\beta$  que é fração de massa de resíduo que possa potencialmente ser convertida em gás, Marques *et al.* 2003 determinou um valor  $\beta$  de 0,159 para resíduos com 56,3% matéria orgânica. O valor de 0,2 pode ser usado para um aterro de lixo municipal típico na ausência de dados específicos do site. Segundo Oweis (2006), para um ambiente mais favorável à decomposição o parâmetro  $k$  é mais alto, os constituintes orgânicos no aterro são consumidos mais rapidamente, levando a uma estabilização mais rápida do aterro.

No período pós-encerramento, o modelo assume que existe uma fluência adicional ao tempo  $t_c$  (tempo para o preenchimento do aterro). Sendo esta fluência adicional encontrada pela equação 16.

$$\Delta S_s = 0,435HC'\alpha \ln \left( \frac{t}{t_c} \right), t \geq t_c \quad (16)$$

Onde:

$\Delta S_s$  = recalque de fluência adicional

$H$  = espessura no final do preenchimento

$C'\alpha$  = coeficiente compressão secundária

$t$  = tempo em meses pós-encerramento ( $t \geq t_c$ )

$t_c$  = tempo para completar o preenchimento

Já o recalque da decomposição biológica dos resíduos pode ser estimado pela equação 17.

$$S_{d_{t \geq t_c}} = \beta H \left[ 1 - \left( \frac{1}{t_c k} (1 - e^{-k t_c}) (1 - e^{-k'(t_{pc} - t_c)}) \right) \right] \quad (17)$$

Onde:

$S_{d_{t \geq t_c}}$  = recalque da decomposição num tempo t maior ou igual a  $t_c$ .

$\beta$  = fração de massa de resíduo que possa potencialmente ser convertida em gás.

H= altura no final do preenchimento

k = constante de decaimento durante o enchimento

k' = constante de decaimento pós-preenchimento.

$t_c$  = tempo para conclusão do preenchimento do aterro;

$t_{pc}$  = tempo maior que  $t_c$

Segundo Oweis (2006), os maiores valores de recalque ocorrem no final do período de preenchimento do aterro. E no pós-enchimento os recalques acumulados mecânicos e de fluência são relativamente pequenos. O recalque mecânico 20 anos após o encerramento do aterro é da ordem de 0,4 a 1% da altura espessura final do preenchimento. Em comparação ao restante do recalque promovido pela decomposição para  $k = 0,05$  é cerca de 4 % da espessura do aterro (sendo 20% o máximo recalque pela decomposição). Sendo necessário o acompanhamento pelo menos 20 anos de monitoramento pós-encerramento para iniciar alguma nova construção na área.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

A primeira etapa deste trabalho consistiu da seleção da área para o desenvolvimento do estudo da compressibilidade dos resíduos. A área escolhida para o desenvolvimento dessa pesquisa foi a Central de Tratamento de Resíduos sólidos (CTR) Nova Iguaçu, localizado no distrito de Vila Cava, bairro de Adrianópolis, que fica a cerca de 10km do centro urbano do município de Nova Iguaçu. Nova Iguaçu é município do estado do Rio de Janeiro e pertence à região Metropolitana do Rio de Janeiro. É considerada a maior cidade da baixada fluminense, com o maior centro infra estruturado da região Metropolitana depois da capital do estado Rio de Janeiro.

A CTR-NI teve sua operação iniciada em 13 de fevereiro de 2003, sendo projetado para uma vida útil de 20 anos, ocupando uma área de 1.200.000 m<sup>2</sup>. É o primeiro aterro sanitário licenciado no Estado do Rio de Janeiro e o primeiro do Brasil a ter um projeto de mitigação de gases de efeito estufa e geração de energia limpa a partir dos resíduos sólidos e venda de crédito de carbono aprovado através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), no âmbito do Protocolo de Quioto.

A estrutura física da CTR- Nova Iguaçu é composta por:

- Aterro sanitário bioenergético;
- Unidade de tratamento de biogás;
- Unidade de tratamento de Resíduos de Serviços de Saúde (RSS);
- Unidade de beneficiamento de Resíduos de Construção Civil (RCC);
- Estação de tratamento de efluentes (ETE);
- Laboratório; e
- Viveiro de Mudas.

Trata os resíduos de Nova Iguaçu, Mesquita, Nilópolis, Queimados, São João de Meriti, além de grandes geradores. Foi projetado para receber 5.000 toneladas de resíduos diárias, porém chega a receber até 6.000 toneladas diárias.

O aterro possui uma área de 120 hectares separado em quatro vales (vale I, vale II, vale III e vale IV). A área em estudo está localizada no Vale III. Esta área recebeu resíduos do tipo domiciliar, limpeza pública, comercial e industrial (classe II), incluindo lodos de estações de tratamento, durante o período de novembro de 2006 a fevereiro de 2014, e a mesmo vale voltou a operar em agosto de 2017 e encontra-se em atividade nesse ano de 2019.

Figura 11 - imagem aérea do CTR-NI de junho de 2004.



Fonte: GoogleEarth,2019

Figura 12 - Imagem aérea CTR-NI de junho de 2007



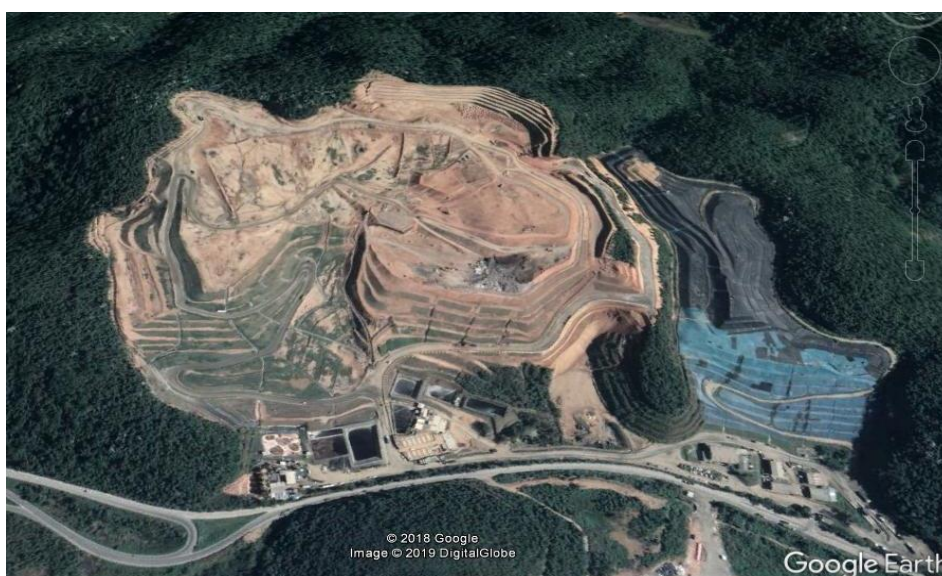
Fonte: GoogleEarth,2019

Figura 13 - Imagem aérea CTR-NI de junho de 2014



Fonte: GoogleEarth,2019

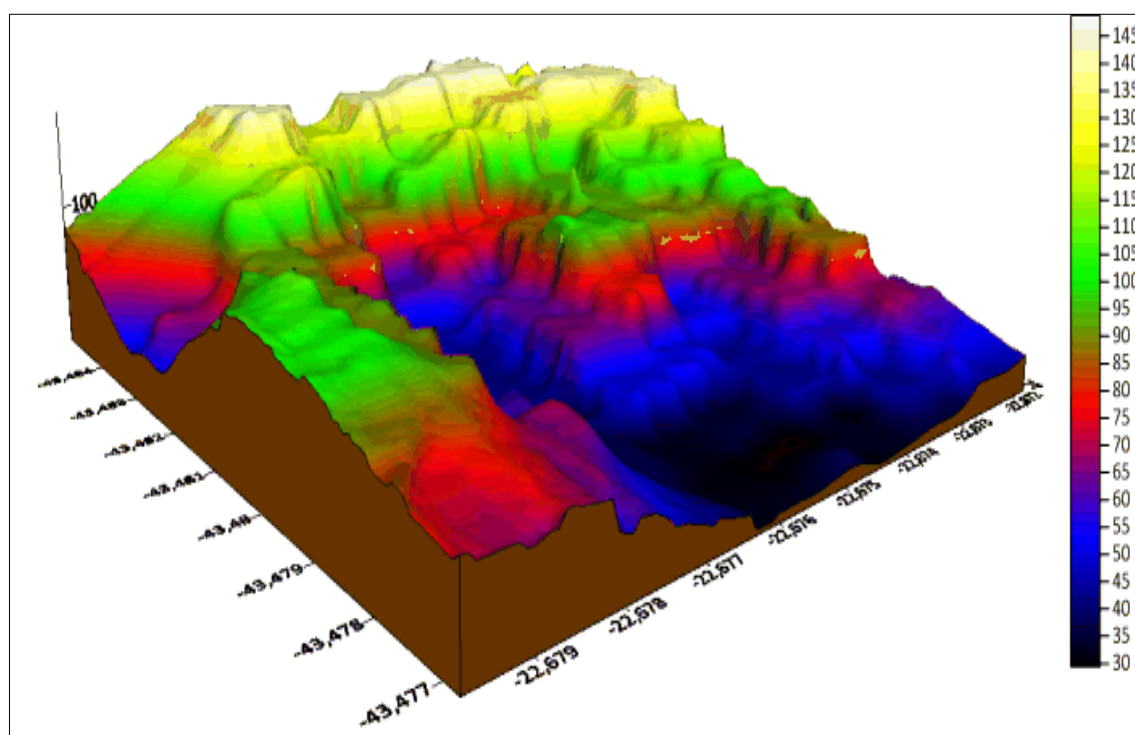
Figura 14 - Imagem aérea CTR-NI de janeiro de 2019



Fonte: GoogleEarth,2019

Em fevereiro de 2019, o aterro CTR-NI completou dezesseis anos de operação, faltando apenas 4 anos para encerrar o prazo de útil projetada. Através do programa SURFER (Golden Software, Inc.) foi possível plotar uma imagem em 3D do comportamento espacial atual do aterro. O mapa topográfico foi gerado a partir das medidas de posição (coordenadas) e altitude de vários pontos do terreno, tais dados foram importados do GoogleEarth. Observa-se que o vale III já atinge em 2019 a conta de 145 metros.

Figura 15 - Imagem topográfica em 3D do vale III, em fevereiro de 2019



Fonte: SURFER,2019

## 2.2 Caracterização climática da área de estudo

De acordo com método tradicional de classificação climática, o método de Köppen, o clima de Nova Iguaçu é tropical quente e úmido, com diminuição de chuvas no inverno e temperatura média anual de 23,4°C, tendo invernos secos e verões chuvosos com temperaturas altas. O mês mais quente, janeiro, conta com temperatura média de 24,9°C, sendo a média máxima de 32,7°C e a mínima de 23,6°C. E o mês mais frio, julho, de 25,4°C, sendo 27,1°C e 0,7°C a média máxima e mínima, respectivamente. Outono e primavera são estações de transição (INMET,2019)

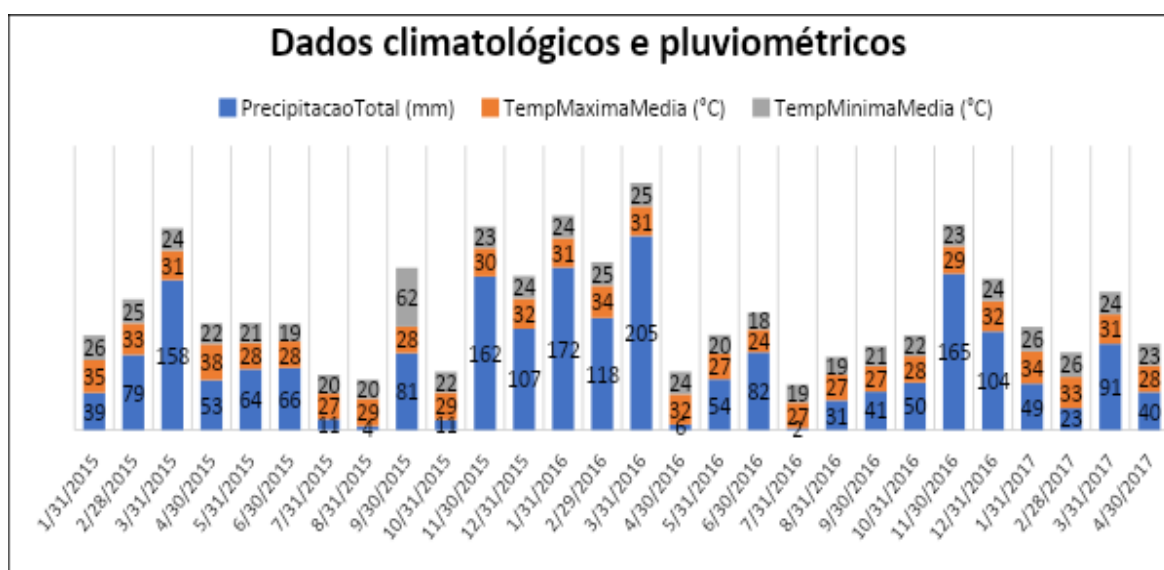
Os dados pluviométricos e climatológicos históricos selecionados na base de dados do BDMET- INMET entre 01/01/20015 e 30/04/2017 da estação Duque de Caxias - Xerém-A603, ficaram faltando os quatro últimos meses para completar o tempo total da pesquisa,



porém a estação não coletou dados neste período. Os dados analisados foram: de precipitação média total, temperatura máxima média mensal e temperatura mínima média mensal.

Os valores máximos de precipitação encontram-se no período de verão, 205 mm no mês de março de 2016, e o mínimo em um período de inverno, 2mm em julho de 2016. A precipitação média anual é 1300mm/dia. A temperatura média máxima registrada no período foi de 38 °C e a temperatura média mínima foi de 18 °C. Os valores encontram-se dentro do esperado para uma região de clima quente e úmido.

Figura 16 -Dados climatológicos e pluviométricos da estação Duque de Caxias - Xerém-A603



Fonte: BDMEP – INMET, 2019

### 2.3 Medidas de recalque do vale III

Como já escrito anteriormente, o vale III recebeu resíduos durante o período de novembro de 2006 a fevereiro de 2014. O monitoramento geotécnico do vale III no CTR-NI consistiu na instalação de 58 marcos de superfície e 4 piezômetros (figura 18). As leituras foram feitas pela equipe técnica da empresa que opera o aterro, mensalmente (Fozz Haztec CTR Nova Iguaçu). Foram selecionados 8 marcos superficiais e os dados analisados do período de 7/01/2015 a 24/08/2017, 960 dias encontram-se resumidos na tabela 3. Os

valores de altura inicial  $H_0$  foram determinados diminuindo o valor da conta inicial do marco e da cota de referência das leituras.

Tabela 3 - Resumo das coordenadas, deslocamentos verticais e horizontais de 8 marcos superficiais

Marcos	Início das leituras: 07/01/2015			Fim das leituras: 24/08/2017			Desloc. Horiz. (m)
	N (m)	E (m)	Cota (m)	N (m)	E (m)	recalque (m)	
MS01	7491624,84	656505,72	9,01	7491723,25	656356,58	0,117	0,018
MS04	7491777,81	656391,05	14,76	7491777,76	656390,96	0,130	0,000
MS07	7491772,93	656369,64	18,92	7491772,85	656369,62	0,135	0,000
MS12	7491662,09	656301,89	19,44	7491666,27	656282,43	0,103	0,002
MS30	7491809,20	656301,51	33,97	7491809,14	656301,47	0,143	0,000
MS43	7491786,78	656276,99	37,27	7491786,72	656276,97	0,212	0,000
MS53	7491809,42	656259,11	41,42	7491708,39	656208,05	0,180	0,011
MS58	7491880,02	656226,17	49,17	7491729,74	656206,55	0,230	0,015

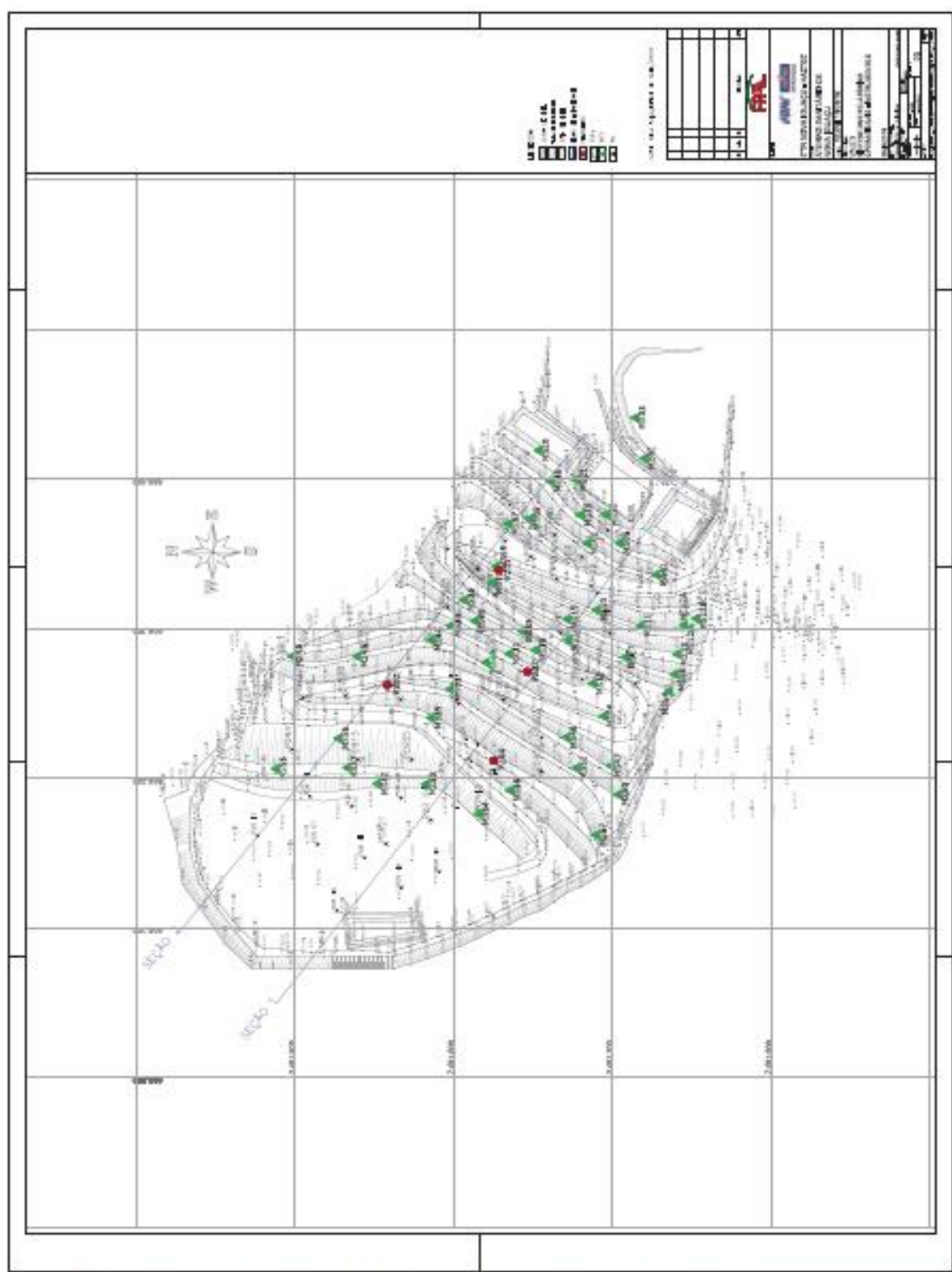
Fonte: Arquivo do autor

Figura 17 - Imagem aérea do vale III



Fonte: GoogleEarth, 2019.

Figura 18 - Imagem topográfica do Vale III



Fonte: CTR-NI, 2017

## 2.4 Modelos de previsão de recalques

Foi realizada uma revisão bibliográfica dos modelos de previsão de recalques mais utilizados no meio geotécnico. Os métodos foram comparados a fim de identificar qual se assemelha mais ao comportamento dos recalques do aterro de Nova Iguaçu.

Após avaliação das premissas de cada método, a quantidade e a natureza de seus parâmetros foram selecionadas cinco modelos de previsão de recalques na presente pesquisa, Sowers (1973), Gandolla *et al.* (1994), Ling *et al.* (1998), Meruelo (1995) e Oweis (2006).

## 2.5 Calibração e previsão dos modelos

Nesta pesquisa, a calibração de cada modelo foi feita utilizando as medidas de recalques obtidas com o monitoramento do vale III a fim de obter os parâmetros necessários à aplicação de cada modelo matemático

Para previsão de recalque empregando o modelo de Sowers (1973), foram desconsiderados os recalques primários, pois as medições disponibilizadas do vale III foram de um ano após o encerramento das atividades no vale. A calibração consistiu na determinação do coeficiente de compressão secundário ( $C's$ ) utilizando a equação 4. A altura, ( $H_0$ ) foi considerada a altura inicial do aterro registrada no início das medições menos cota de fundo do aterro, o tempo inicial do processo de recalque secundário  $t_1$  foi adotado como 1 dia para validar matematicamente a equação e  $t_2$  foi considerado o intervalo de tempo em dias decorrido entre a primeira e a última leitura topográfica de cada marco superficial e o  $S$  é o recalque total, correspondente as leituras finais de recalques medidas. Depois de encontrar os índices de compressão secundários, pode-se calcular os recalques totais utilizando a equação 4.

A calibração do modelo de Gandolla *et al.*, (1994) consistiu na determinação das constantes  $a$  e  $k$  determinadas a partir do ajuste de curvas pelo método dos mínimos quadrados, com o auxílio da ferramenta Solver do programa Microsoft Excel, que aplica esse método, ou seja, determina as constantes pelo ajuste entre as curvas medidas em campo e as curvas

teóricas. A partir de então aplicou-se os parâmetros encontrados na formula 7 para obter o valor dos recalques totais.

Para o modelo de Meruelo (1995) foi utilizado a equação 9. O tempo de construção ( $t_c$ ) foi considerado o tempo que o aterro operou (2675 dias), o  $t_0$  foi considerado o tempo decorrido até o início do monitoramento (3015 dias) e  $t$  foi considerado o tempo decorrido até o término do período de observação de cada MS (3975 dias). O coeficiente de hidrólise ( $k_h$ ) e coeficiente de perda de massa ( $\alpha$ ) foram determinados a partir do ajuste de curvas pelo método dos mínimos quadrados, com o auxílio da ferramenta Solver do programa Microsoft Excel. E o COD (conteúdo orgânico degradável) foi adotado o valor 0,50 sugerido pela United Nation Framework Convention on Climate Change. (UNFCCC,2011).

O modelo empírico de Ling *et al.* (1998) foi calibrado a partir de uma análise de regressão linear com os dados de tempo ( $t$ ) e recalque ( $S$ ) de cada marco monitorado. A partir daí plotou-se gráficos de dispersão  $t/S$  por  $t$ , e gerando assim as equações da reta que melhor se ajustaram a estas curvas, foi possível obter os valores de velocidade inicial,  $\rho_0$ , e recalque final  $S_{ult}$  para cada MS e a partir de então aplicou-se os parâmetros encontrados na fórmula 10 para obter o valor do recalque total.

A calibração do modelo de Oweis, consistiu na utilização das Equações 16 e 17 que preveem o recalque após o encerramento das atividades do aterro devido aos mecanismos de fluência adicional ( $\Delta S_s$ ) e decomposição biológica ( $S_d$ ). O tempo de preenchimento do aterro foi o próprio tempo de operação ( $t_c$ ) 2675 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, 3975 dias, e o recalque previsto foi de 50 anos. O parâmetro  $k$  foi adotado como sendo 0,05, na ausência de dados específicos do local a USEPA 1998 sugere que parâmetro  $k$  varie de 0,003 a 0,21. Os parâmetros  $C'\alpha$ ,  $\beta$  e  $k'$  foram encontrados por meio da ferramenta Solver, assim como nos modelos anteriores.

A calibração, teve como objetivo estimar parâmetros desconhecidos baseado em amostras observadas. E a partir desta etapa foi possível representar o comportamento das curvas de recalque para um período de 50 anos.

A tabela 4 indica um resumo de quais parâmetros foram calculados e o método aplicado.

Tabela 4 - Resumo dos parâmetros encontrados para cada modelo e o método utilizado para encontrá-los

Modelo	Parâmetros	Método
Sowers (1973)	$C'\alpha$	Aplicação da equação de Sowers
Gandolla <i>et al.</i> (1994)	a, k	Solver do programa Microsoft Excel
Meruelo (PALMA,1995)	COD, $k_h$ , $\alpha$	Solver do programa Microsoft Excel COD - adotado
Ling <i>et al.</i> (1998)	$\rho_0$ , $S_{ult}$	Regressão linear
Oweis (2006)	$C'\alpha$ , k, $k'$ , $\beta$	Solver do programa Microsoft Excel k – adotado

Fonte: Arquivo do autor

### 3. ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 3.1 Monitoramento a curto prazo

Com a finalidade de avaliar o comportamento do aterro a curto prazo, foram analisados os dados de marcos superficiais, e calculados seus deslocamentos verticais e horizontais durante 960 dias. Portanto, após ser feita a análise e o tratamento dos dados fornecidos pela companhia responsável pelo monitoramento, decidiu-se trabalhar com apenas 8, dos 58 marcos superficiais, por apresentaram dados mais consistentes e com menos lacunas nas leituras. A tabela 5 apresenta os parâmetros analisados a partir dos dados monitorados.

Para o estudo dos recalques considerou-se o tempo zero como sendo a data de início do monitoramento (07/01/2015) e a altura inicial da camada de resíduos como sendo a diferença entre a cota de fundação e a cota de posicionamento do marco superficial. Como o aterro foi construído em uma região de vale os marcos possuem diferentes alturas iniciais ( $H_0$ ).

Tabela 5 – Resumo dos parâmetros analisados dos 8 marcos superficiais monitorados

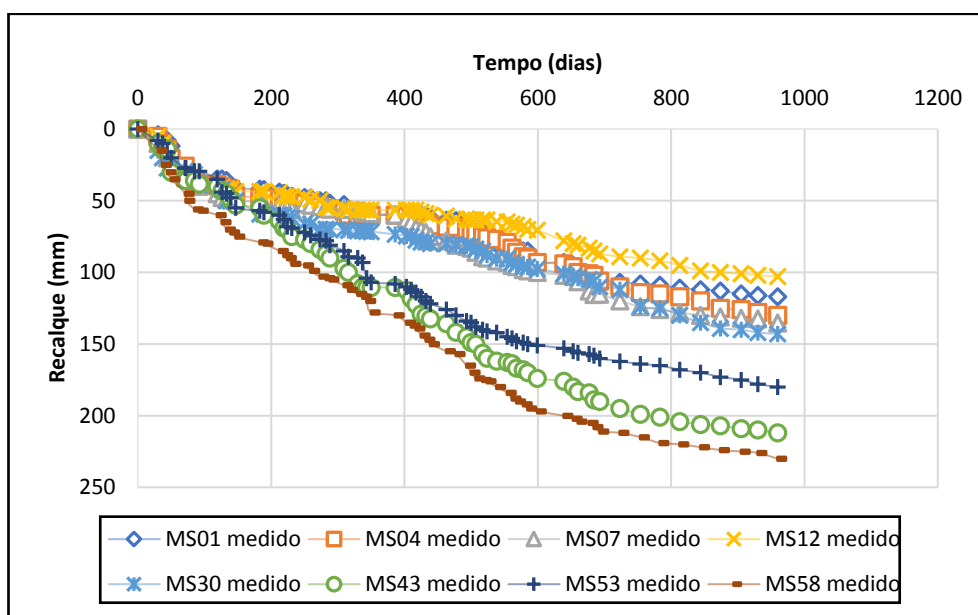
Marcos	Início das leituras: 07/01/2015		Fim das leituras: 24/08/2017		
	Frequência das leituras	$H_0$ (m)	Recalque vertical (m)	Desloc. horizon. (m)	Deformação vertical (%)
MS01	mensal	9,01	0,117	0,018	1,30
MS04	mensal	10,1	0,130	0,002	1,08
MS07	mensal	18,9	0,135	0,001	0,71
MS12	mensal	19,4	0,103	0,002	0,78
MS30	mensal	33,9	0,143	0,001	0,48
MS43	mensal	37,2	0,212	0,001	0,78
MS53	mensal	41,4	0,180	0,011	1,14
MS58	mensal	49,1	0,230	0,015	0,65

Fonte: Arquivo do autor

Através da análise dos resultados dos 8 marcos superficiais pode-se observar que os valores de recalques sofridos pelo maciço são de baixa magnitude, variando entre 103 mm a 230 mm, os deslocamentos horizontais variaram entre 0 a 18 mm e as deformações verticais encontradas ficaram em um intervalo de 0,48% a 1,30% ambos também de baixa magnitude.

A figura 19 mostra as curvas de recalques verticais medidos em função do tempo de monitoramento.

Figura 19 - Medidas de recalque vertical dos 8 MS



Fonte: Arquivo do autor

É importante ressaltar que esses valores dos recalques são referentes à compressão secundária, visto que o período de leitura analisado se iniciou um ano após uma pausa na operação do vale III. Bjarngard e Edgers (1990) e König *et al.* (1996) destacaram a existência de dois estágios identificáveis de recalque secundário. O primeiro é atribuído a fenômenos viscosos, enquanto o segundo é devido ao início da biodegradação e à perda de massa associada. O máximo recalque observado foi o do marco superficial MS58 e o menor recalque observado foi o do marco superficial MS12 que correspondem respectivamente a 103mm e 230mm.

As curvas de recalques apresentadas, na figura 20, são semelhantes e tendem a um comportamento retilíneo crescente e uniforme, representam o comportamento de compressão secundária de longo prazo. Bjarngard e Edgers (1990), divide o comportamento

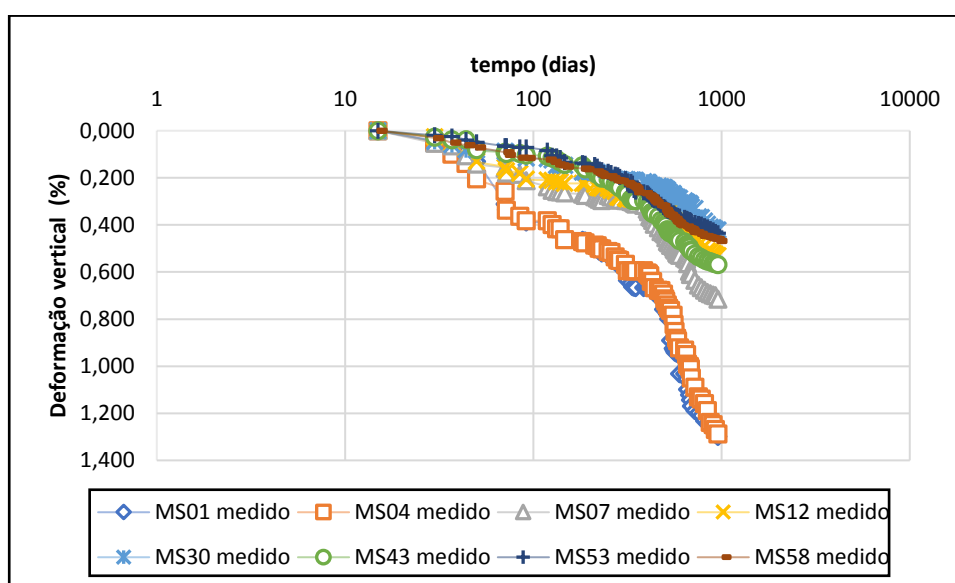


das curvas de recalque, tomando como referência a relação deformação vertical vs. logaritmo do tempo, em três fases, a fase inicial 1 possui tendência retilínea acompanhada de grandes recalques que ocorrem em curto espaço de tempo (30 dias aproximadamente).

Posteriormente a Fase 2 com tendência parabólica, onde a taxa de recalque é menor que na fase anterior; trecho com desenvolvimento aproximado entre 30 e 180 dias. Segundo o autor o comportamento da Fase 2 se deve ao ajustamento do maciço ao processo final da acomodação das partículas associado à ação da degradação anaeróbica que se inicia mais predominantemente. Finalmente, o desenvolvimento de uma Fase 3 de tendência retilínea crescente; trecho caracterizado pelo crescimento dos recalques de maneira bastante regular e uniforme, onde certamente há o predomínio da degradação biológica sobre os demais elementos.

A figura 20 a seguir apresenta outra forma de avaliar o que seria a fase 3 ou compressão secundária de longo prazo do vale III da CTR-NI, apresentando a deformação vertical versus log do tempo para o período de monitoramento observado.

Figura 20 - Curva de deformação vertical versus log do tempo para os 8MS

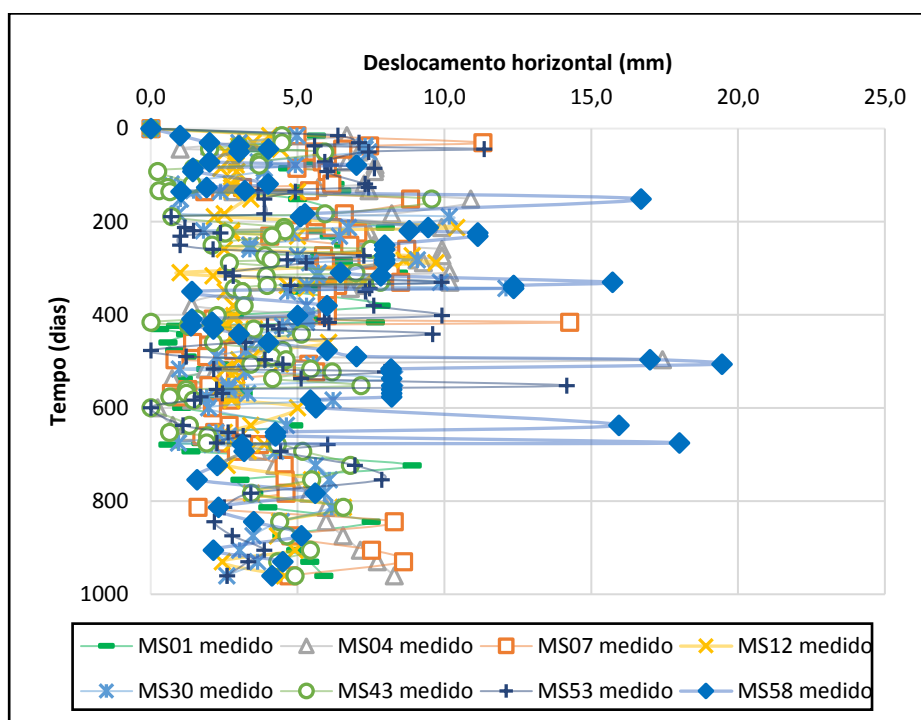


Fonte: Arquivo do autor

Sowers (1973) concluiu que, desde que não ocorram mudanças significativas no interior das células de resíduos, ou seja, desde que os diversos fatores que influenciam o processo de degradação permaneçam constantes, a relação recalque vs logaritmo do tempo é aproximadamente linear.

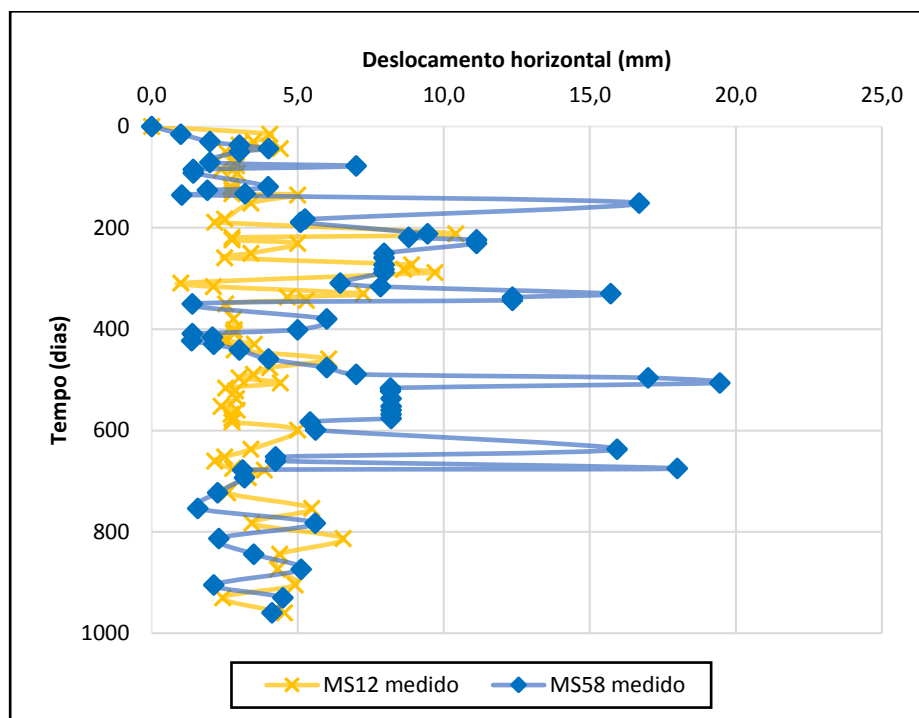
A figura 21 apresenta os deslocamentos dos 8 marcos superficiais medidos em campo. E Para facilitar a visualização, a figura 22, apresentará o deslocamento apenas dos MS12 e MS58.

Figura 21 - Deslocamento horizontal dos 8 Marcos superficiais dos 8 MS



Fonte: Arquivo do autor

Figura 22 - deslocamento horizontal dos marcos MS12 e MS58



Fonte: Arquivo do autor

Observando os gráficos das figuras 21 e 22 conclui-se que os marcos analisados não apresentaram deslocamentos horizontais significativos, os valores máximos foram de aproximadamente 20mm, o que pode ser interpretado como deslocamentos horizontais nulos e/ou resultados da própria calibração do instrumento. Valores pouco significativos de recalques horizontais foram observados por Conducto & Huitric (1990), Pereira (2000), Simões et. al. (2009), Van Elk *et. al.* (2018) e Caldas (2017).

### 3.2 Calibração e previsão do modelo de Sowers (1973)

Este modelo como descrito na revisão bibliográfica, considera as parcelas de compressão inicial, primária e secundária, porém, conforme já informado, o monitoramento englobou somente o período em que existiu compressão secundária. Na tabela 6 estão

apresentados os parâmetros do modelo de Sowers (1973) para os 8 marcos superficiais analisados. O tempo inicial foi considerado igual ao tempo de início do monitoramento.

Tabela 6 -Parâmetros obtidos do modelo de Sowers (1973)

<b>MS</b>	<b>H (m)</b>	<b>t1 (dias)</b>	<b>t2 (dias)</b>	<b>C'α</b>	<b>S (m)</b>
1	9	1	960	0,007	0,117
4	15	1	960	0,005	0,130
7	19	1	960	0,004	0,135
12	19	1	960	0,003	0,103
30	34	1	960	0,001	0,143
43	37	1	960	0,003	0,212
53	41	1	960	0,067	0,180
58	49	1	960	0,003	0,230

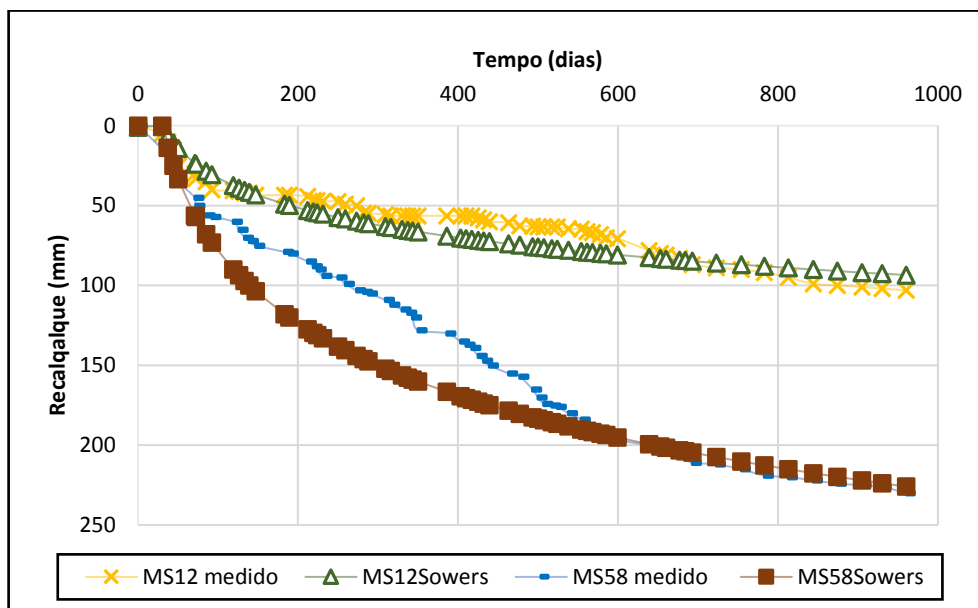
Fonte: Arquivo do autor

Para este estudo, na impossibilidade de determinação do índice de vazios para o aterro, trabalhou-se com o coeficiente de compressão secundária (C'α). Os valores do coeficiente de compressão secundária encontrados variaram na faixa entre 0,067 e 0,07. Em comparação com valores encontrados por outros autores, verifica-se que a faixa se encontra abaixo da obtida por: Sowers (1973) de 0.057 a 0.36, Bjardngard & Edgers (1990), reportaram valores entre 0,003 e 0,038 (estágio inicial) e entre 0,017 e 0,51 (estágio avançado), Marques (2001) obteve valores situados entre 0,04 e 0,18 e Babu (2010) encontrou valores entre 0,015 a 0,350. Porém os valores desta pesquisa encontraram-se mais próximas dos valores obtidos por Corrêa (2017) que foi de 0,0009 a 0,003, onde monitorou o pós-encerramento do vazadouro de Marambaia, em Nova Iguaçu.

Segundo os autores, o coeficiente de compressão secundaria é maior com o aumento do conteúdo orgânico (Landva & Clark ,1990; Pereira, 2000; Babu, 2010). Embora seja muito difícil comparar valores de C'α obtidos sem levar em consideração as particularidades de cada aterro, pois como foi observado na revisão bibliográfica vários autores comentam que a compressibilidade é influenciada por muitos parâmetros, entre eles composição dos resíduos, umidade, forma de operação do aterro, condições climáticas locais, entre outros.

A figura 23 apresenta o resultado da calibração do modelo de Sowers (1973), para o período de 960 dias, serão apresentados apenas 2 marcos, o obteve o menor valor de recalque e o marco que obteve o maior valor de recalque, MS12 e MS 58, respectivamente. A calibração dos marcos, MS01, MS04, MS07, MS30, MS43 e MS53 encontram-se no apêndice A.

Figura 23 - Calibração do modelo de Sowers (1973)

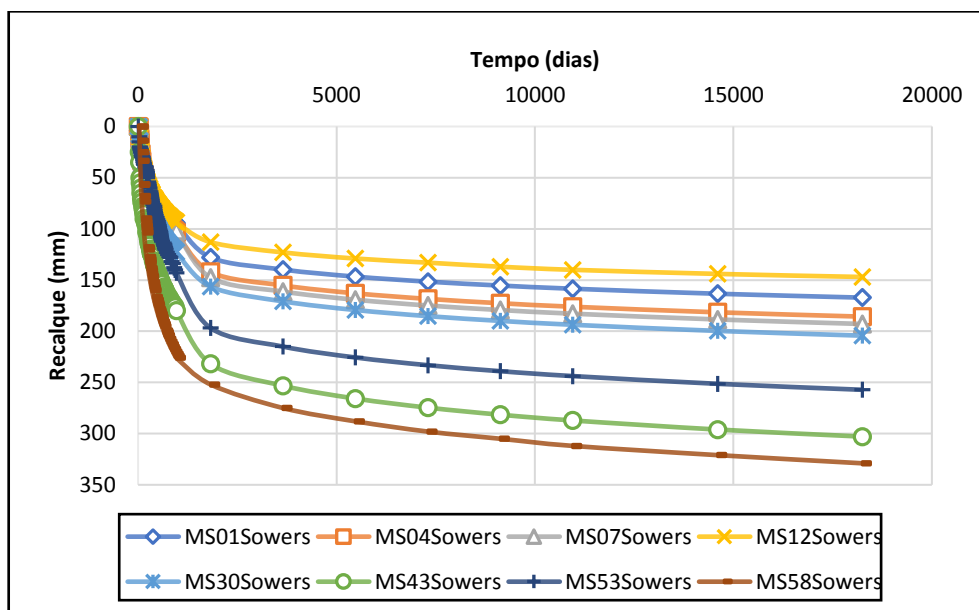


Fonte: Arquivo do autor

Nota-se que os resultados entre valores previstos e medidos para os dois marcos superficiais estão aproximados, contudo, o marco MS12 obteve melhor aderência que o marco MS58 e a partir de 600 dias observa-se um melhor ajuste para os dois marcos, tal comportamento é justificado pela heterogeneidade dos resíduos que compõem o aterro.

A figura 24 apresenta o resultado da previsão do modelo para os 8 MS para 50 anos.

Figura 24 - Previsão do modelo de Sowers (1973) para 50 anos



Fonte: Arquivo do autor

A longo prazo, o modelo de Sowers prevê um recalque de mínimo 147 mm no MS 12 e um recalque máximo de 330 mm no MS58. Observando o gráfico há uma queda na velocidade dos recalques a partir dos 2000 dias, porém por se tratar de um modelo baseado em uma função logarítmica a curva não estabiliza de fato com o avançar do tempo.

### 3.3 Calibração e previsão do modelo de Gandolla *et al.* (1994)

Este modelo estima os recalques através de uma função exponencial decrescente. A tabela 7 apresenta os resultados dos parâmetros do modelo em estudo. A constante de taxa de decomposição ( $k$ ) variou de 0,006 a 0,013 e a constante de recalque unitário ( $a$ ) variou de 0,018 a 0,051.

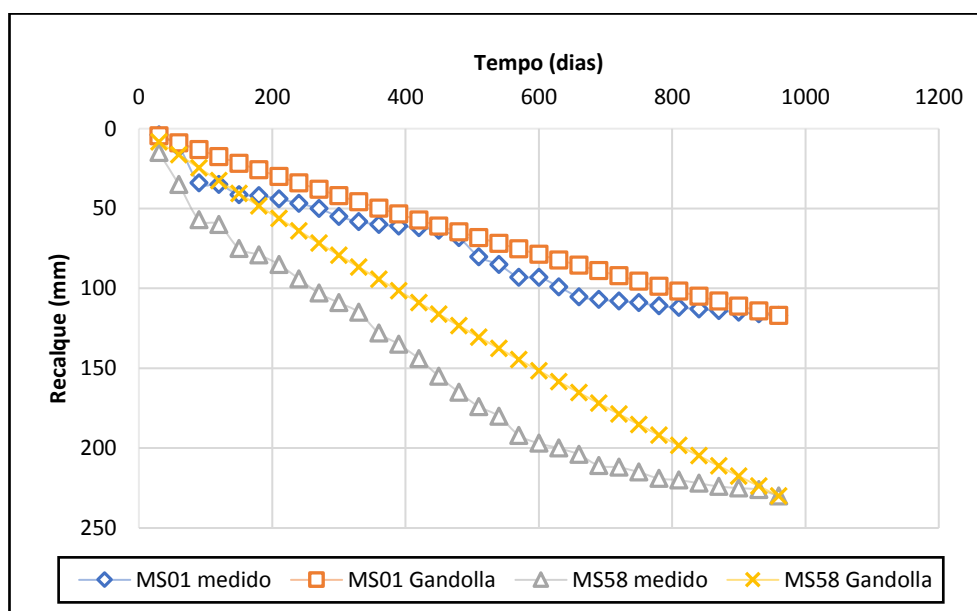
Tabela 7- Parâmetros obtidos do modelo de Gandolla *et al.* (1994).

MS	H0 (mm)	S(mm)	K	a	t (meses)
1	9010	117	0,013	0,038	32
4	10096	130	0,009	0,051	32
7	18920	135	0,008	0,033	32
12	19440	103	0,006	0,029	32
30	33970	143	0,006	0,024	32
43	37270	212	0,010	0,021	32
53	41420	180	0,008	0,019	32
58	49172	230	0,009	0,018	32

Fonte: Arquivo do autor

Em comparação com valores encontrados por outros autores, Pereira (2000), no aterro de Valdemingómez em Madri, encontrou valores de  $a = 0,055$  e  $k = 0,0126$ .

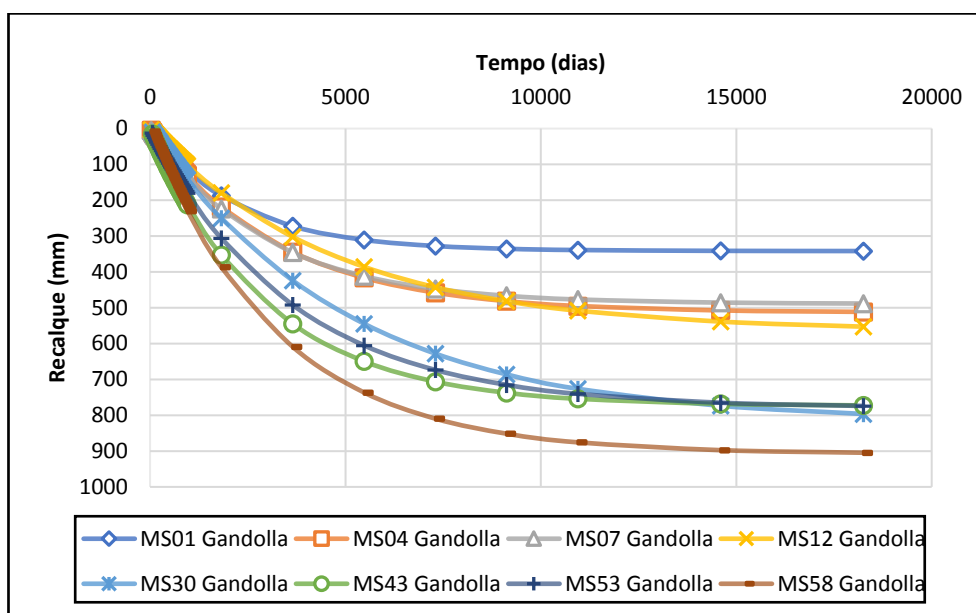
A figura 25 apresenta o resultado da calibração do modelo, para o período de 960 dias, para o marco que obteve o menor valor de recalque e o marco que obteve o maior valor de recalque, MS1 e MS 58, respectivamente. A calibração dos marcos, MS04, MS07, MS12, MS30, MS43 e MS53 encontram-se no apêndice A.

Figura 25 - Calibração do modelo de Gandolla *et al.* (1994)

Fonte: Arquivo do autor

A figura 26 apresenta a previsão do modelo para os 8 MS para 50 anos. Observa-se que no curto prazo o modelo de Gandolla *et al.* (1994) tem um comportamento linear e torna-se uma curva exponencial decrescente no longo prazo, como mostra a figura 26.

Figura 26 - Previsão do modelo de Gandolla *et al.* (1994) para 50 anos



Fonte: Arquivo do autor

A longo prazo, o modelo de Gandolla *et al.* (1994) prevê um recalque mínimo de 342 mm no MS 01 e um recalque máximo de 905mm no MS58. No modelo, observa-se uma tendência a estabilização do maciço de resíduos a partir dos 8000 dias para o marco MS01, a partir dos 10000 dias para os marcos MS04, MS07, MS43, MS53, MS58, enquanto os marcos MS12 e MS30 não atingiram a estabilização. Tal comportamento é justificado pela heterogeneidade dos resíduos que compõem o aterro.



### 3.4 Calibração e previsão do modelo de Meruelo (1995)

O modelo de Meruelo (1995) estima os recalques com base na degradação da matéria orgânica. A tabela 8 apresenta os resultados dos parâmetros do modelo de Meruelo (1995) para os 8 marcos analisados.

Tabela 8 -Parâmetros obtidos do modelo de Meruelo (1995)

<b>MS</b>	<b>H (mm)</b>	<b>COD</b>	<b>kh (dia-1)</b>	<b>SS(mm)</b>	<b>Tc (dias)</b>	<b>t0 (dias)</b>	<b>t' (dias)</b>	<b><math>\alpha</math></b>
1	9010	0,50	0,0013	117	2675	3015	3975	0,20
4	10096	0,50	0,0016	130	2675	3015	3975	0,25
7	18920	0,50	0,0017	135	2675	3015	3975	0,15
12	19440	0,50	0,0015	103	2675	3015	3975	0,09
30	33970	0,50	0,0016	143	2675	3015	3975	0,08
43	37270	0,50	0,0014	212	2675	3015	3975	0,10
53	41420	0,50	0,0010	180	2675	3015	3975	0,06
58	49172	0,50	0,0012	230	2675	3015	3975	0,07

Fonte: Arquivo do autor

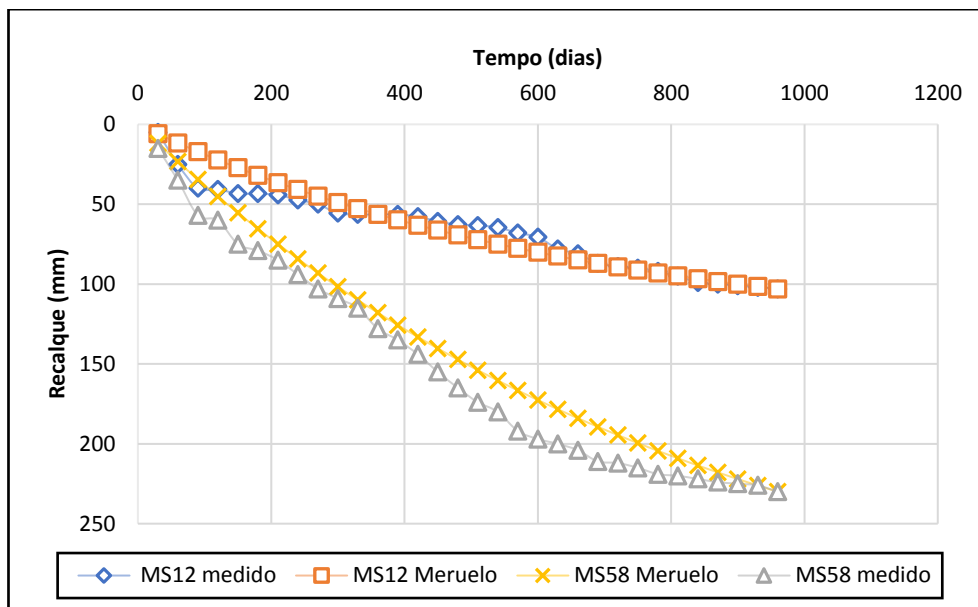
Os principais parâmetros analisados neste modelo são:  $\alpha$  (perda de massa),  $k_h$  (coeficiente de hidrólise) e COD (conteúdo orgânico degradável). O valor de  $k_h$  e  $\alpha$  variaram na faixa de 0,0010 a 0,0017 dia<sup>-1</sup> e 0,06 a 0,25 respectivamente. O COD adotado foi 0,50 segundo recomendado pelo UNFCCC.

Comparando os parâmetros com outros autores, Catapreta (2008) encontrou valores de coeficiente de perda de massa ( $\alpha$ ) variando entre 0,24 e 0,27, similar aos descritos por Palma (1995), o qual apresentou valores entre 0,15 e 0,50. O coeficiente de hidrólise ( $k_h$ ) apresentou valores variando entre 4,26 x 10<sup>-3</sup> e 6,12 x 10<sup>-3</sup> dia<sup>-1</sup>, também similares aos obtidos por Palma (1995). Corrêa (2017) adotou COD=0,50 e o valor de  $k_h$  e  $\alpha$  variaram na faixa de 0,0008dia<sup>-1</sup> a 0,0016 dia<sup>-1</sup> e 0,0556 a 0,5363 respectivamente.

A figura 27, apresenta o resultado da calibração do modelo, para o período de 960 dias, para o marco que obteve o menor valor de recalque e o marco que obteve o maior valor de recalque, MS12 e MS 58, respectivamente. A calibração dos marcos MS01, MS04, MS07, MS30, MS43 e MS53 encontram-se no apêndice A.

Com base nos resultados obtidos pelo modelo de Meruelo (1995), a calibração obteve uma boa aderência entre os valores de recalques medidos e estimados, como mostra a figura 27.

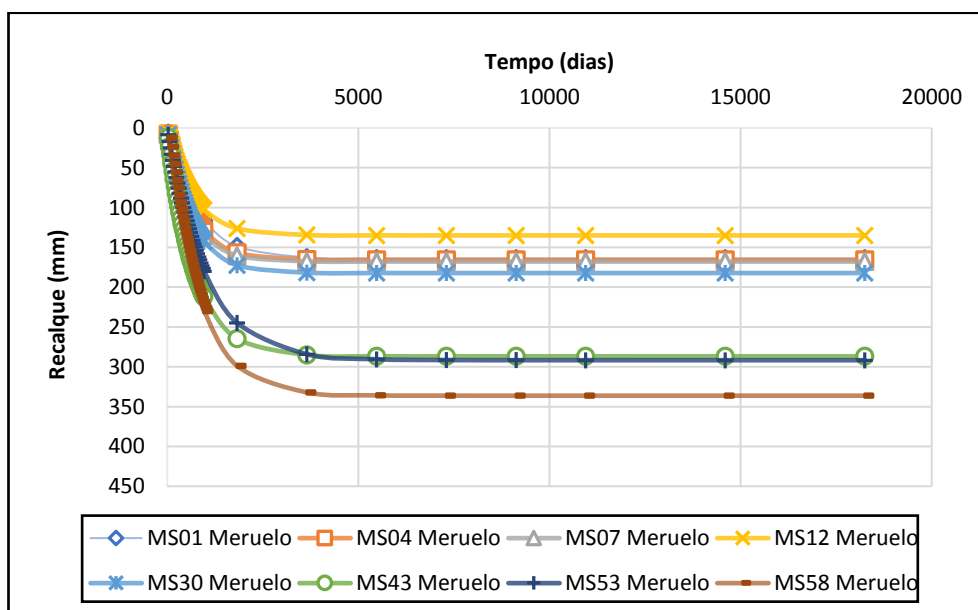
Figura 27 - Calibração do modelo de Meruelo (1995)



Fonte: Arquivo do autor

A figura 28 apresenta a previsão do modelo para os 8 MS para 50 anos.

Figura 28 - Previsão do modelo de Meruelo (1995) para 50 anos



Fonte: Arquivo do autor

A longo prazo, o modelo de Meruelo prevê um recalque de mínimo 135 mm no MS12 e um recalque máximo de 336 mm no MS58. No gráfico, observa-se uma tendência a estabilização do maciço de resíduos a partir dos 2000 dias para os marcos MS01. MS04. MS07. MS12 e MS30 e a partir dos 4000 dias os marcos MS43, MS53 e MS58. Tal comportamento é justificado pela heterogeneidade dos resíduos que compõem o aterro.

### 3.5 Calibração e previsão do modelo de Ling *et al.* (1998)

É um modelo hiperbólico que utiliza a magnitude do recalque final e taxa de recalque inicial como parâmetros-chave em sua formulação. A calibração do modelo de Ling *et al.* (1998) consistiu na obtenção da velocidade inicial de recalques ( $\rho_0$ ) e do recalque último ( $S_{ult}$ ). Os valores obtidos de  $\rho_0$  e  $S_{ult}$  variam nas faixas de 0,18 mm/dia a 0,56 mm/dia e 189 a 400 mm respectivamente (tabela 9).

Tabela 9- Parâmetros obtidos do modelo de Ling *et al.* (1998).

MS	H <sub>0</sub> (mm)	$\rho_0$ (mm/dia)	S <sub>ult</sub> (mm)
1	9010	0,32	189
4	10096	0,22	345
7	18920	0,37	217
12	19440	0,18	256
30	33970	0,25	345
43	37270	0,50	380
53	41420	0,47	300
58	49172	0,56	400

Fonte: Arquivo do autor

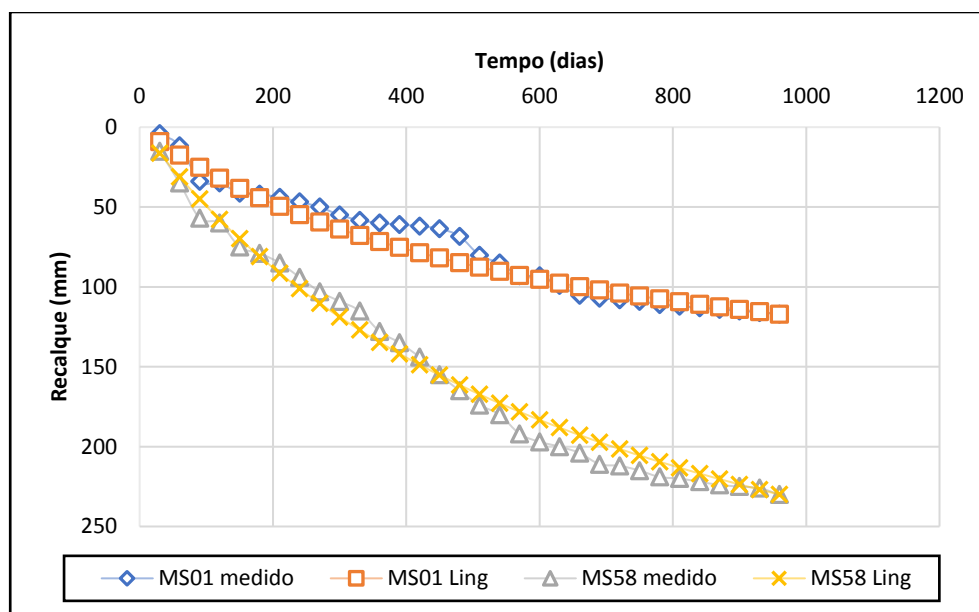
Comparando os parâmetros com outros autores, Ling *et al.* (1998) que encontraram valores  $\rho_0$  entre 0,0068 mm/dia e 0,013 mm/dia, Catapreta (2008) que encontrou valores entre 0,0039 mm/dia e 0,00791 mm/dia e Denardin (2013) que encontrou valores entre

0,0171 mm/dia e 0,0457 mm/dia, Eyay (2016), de 0,024mm/dia a 0,142 mm/dia e Corrêa (2017) que encontrou valores entre 0,067 mm/dia e 0,155 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, e com relação a Corrêa (2017) que obteve valores na faixa de 68 a 5000 mm, porém este atingiu uma amplitude de valores maior.

A figura 29 apresenta o resultado da aplicação do modelo de Ling *et al.* (1998), para o período de 960 dias, para o marco que obteve o menor valor de recalque e o marco que obteve o maior valor de recalque, MS1 e MS 58, respectivamente. A calibração dos marcos MS04, MS07, MS12, MS30, MS43 e MS53 encontram-se no apêndice A.

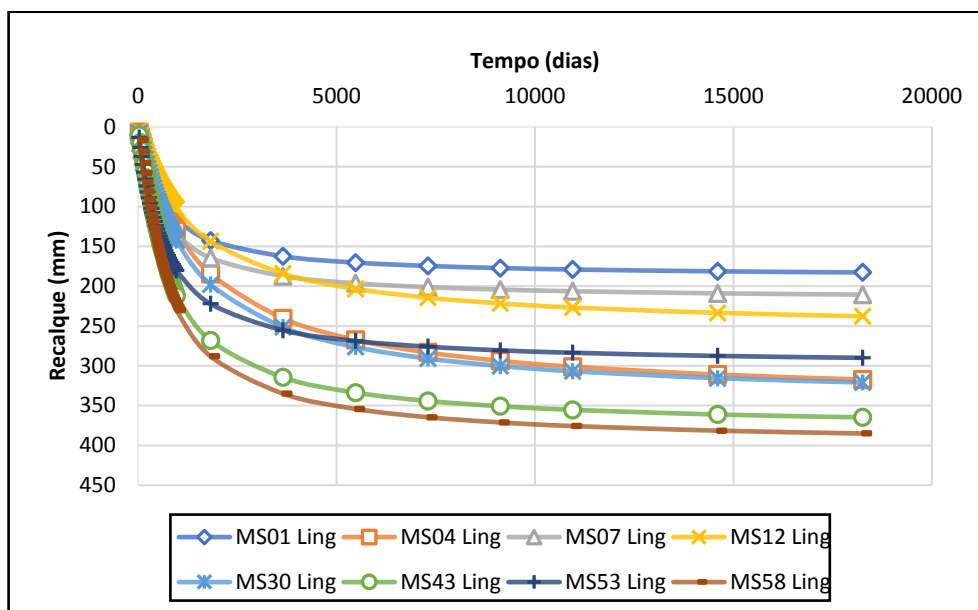
Figura 29 – Calibração do modelo de Ling *et al.* (1998)



Fonte: Arquivo do autor

Com base nos resultados da calibração, observa-se uma boa aderência entre os valores de recalques medidos e estimados durante todo o período.

A figura 30 apresenta a previsão do modelo para os 8 MS para 50 anos.

Figura 30 - Previsão do modelo de Ling *et al.* (1998) para 50 anos

Fonte: Arquivo do autor

A longo prazo, o modelo de Ling prevê um recalque de mínimo 183 mm no MS 1 e um recalque máximo de 385 mm no MS58. Nota-se uma tendência a estabilização do maciço de resíduos a partir de 4000 dias para os marcos MS01 e MS07 e de 5000 para os marcos restantes. Tal comportamento é justificado pela heterogeneidade dos resíduos que compõem o aterro.

### 3.6 Calibração e previsão do modelo de Oweis (2006)

O modelo de previsão de recalque de Oweis (2006) avalia o recalque durante e após o preenchimento do aterro. No pós-encerramento o recalque final é a soma das parcelas de recalque influenciadas pela fluência adicional e pela decomposição de resíduos sólidos no aterro. A previsão deste modelo consistiu na utilização de duas equações propostas pelo autor, sendo elas, a primeira equação referente ao recalque da fluência adicional ( $\Delta S_s$ ) e a

segunda equação referente a decomposição biológica ( $S_d$ ) ambas no pós-encerramento do aterro respectivamente.

Com auxílio da ferramenta *Solver*, procedeu-se um ajuste dos valores de  $C'\alpha$ ,  $k'$  e  $\beta$ , 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 10 e 11.

Tabela 10 - Parâmetros obtidos do modelo de Oweis (2006) para o recalque da fluência adicional

<b>MS</b>	<b>H (mm)</b>	<b><math>\Delta S_s</math> (mm)</b>	<b><math>t_c</math> (dias)</b>	<b>t (dias)</b>	<b><math>C'\alpha</math></b>
1	9010	117	2675	4000	0,07
4	10096	130	2675	4000	0,07
7	18920	135	2675	4000	0,02
12	19440	103	2675	4000	0,02
30	33970	143	2675	4000	0,02
43	37270	212	2675	4000	0,03
53	41420	180	2675	4000	0,02
58	49172	230	2675	4000	0,02

Fonte: Arquivo do autor

O tempo para conclusão do preenchimento do vale III ( $t_c$ ) foi de 2675 dias e o tempo de monitoramento iniciou em 3015 dias e terminou em 3975 dias. Os valores obtidos de coeficiente de compressão secundária  $C'\alpha$  variaram na faixa de 0,02 a 0,07. Hossain (2005), encontrou valores que variaram entre 0,02 e 0,03. Babu *et al.* (2010) levantaram na literatura técnica valores de  $C'\alpha$  variando entre 0,02 e 0,32. Corrêa (2017) encontrou valores  $C'\alpha$  na faixa de 0,03 a 0,08. O parâmetro obtido pela presente pesquisa encontra-se dentro da faixa encontrada na literatura científica.

Tabela 11 - Parâmetros obtidos do modelo de Oweis (2006) para o recalque da biodegradação

<b>MS</b>	<b><math>H_0</math> (mm)</b>	<b><math>S_d</math> (mm)</b>	<b>k</b>	<b><math>k'</math></b>	<b><math>t_c</math> (dias)</b>	<b><math>t_{pc}</math> (dias)</b>	<b><math>\beta</math></b>
1	9010	117	0,050	0,004	2675	3975	0,0010
4	10096	130	0,050	0,022	2675	3975	0,0010
7	18920	135	0,050	0,042	2675	3975	0,0036
12	19440	103	0,050	0,040	2675	3975	0,0025
30	33970	143	0,050	0,011	2675	3975	0,0015
43	37270	212	0,050	0,002	2675	3975	0,0010
53	41420	180	0,050	0,004	2675	3975	0,0001
58	49172	230	0,050	0,001	2675	3975	0,0005

Fonte: Arquivo do autor

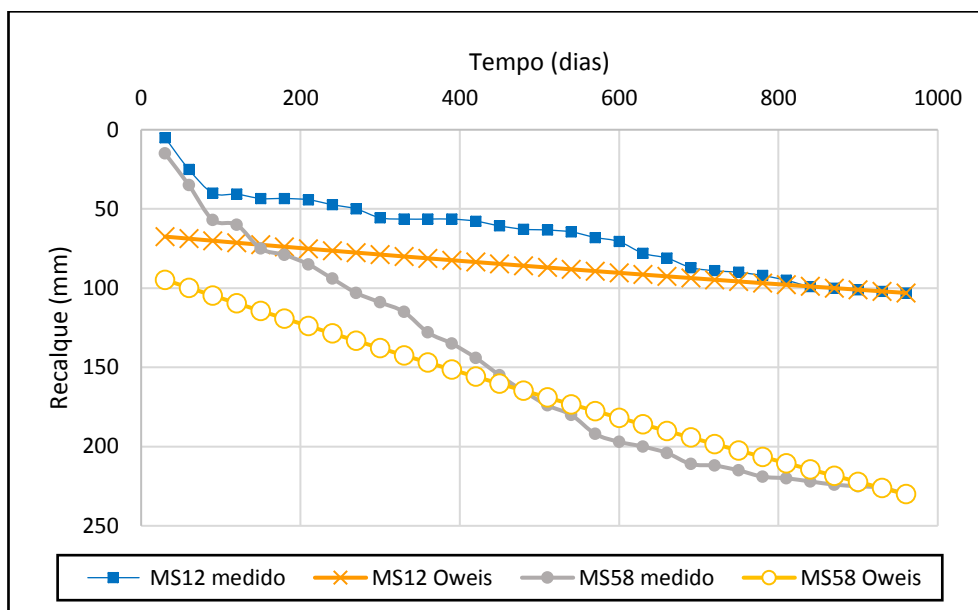
Para o parâmetro  $\beta$  que é fração de massa de resíduo que possa potencialmente ser convertida em gás os valores obtidos de foram de 0,0001 a 0,0036, Marques *et al.* 2003 determinou um valor  $\beta$  de 0,159 para resíduos com 56,3% matéria orgânica. Os valores encontrados foram bem abaixo dos encontrados na literatura.

O parâmetro  $k$ , que é constante de decaimento durante o enchimento (valor constante), foi adotado o valor de 0,05. Na ausência de dados específicos do local, como foi o caso do aterro CTR-NI, um valor padrão de 0,05 é sugerido pela USEPA (1998). Segundo Oweis 2006, para um ambiente mais favorável à decomposição o parâmetro  $k$  é mais alto, os constituintes orgânicos no aterro são consumidos mais rapidamente, levando a uma estabilização mais rápida do aterro.

Já o parâmetro  $k'$ , que é a constante de decaimento pós-preenchimento, variou de 0,001 a 0,042. Oweis 2006 sugere que  $k'$  tenha um valor mais baixo que  $k$ , visto que esteja diretamente relacionado às práticas de operação do aterro. Já os aterros que utilizam sistema de recirculação de lixiviado criam um ambiente favorável a decomposição acelerada de resíduos durante a operação diminuindo os recalques no pós-encerramento. O autor comenta que para aterros com extração ativa de gás, uma estimativa aproximada da taxa de geração de gás pode ser feita através de vários episódios de medições, isso permitirá uma estimativa da constante de decaimento  $k'$  mais real do que a encontrada pela ferramenta solver.

A figura 31 apresenta o resultado da calibração do modelo de Oweis (1973), para o período de 960 dias, para o marco que obteve o menor valor de recalque e o marco que obteve o maior valor de recalque, MS12 e MS 58, respectivamente. A calibração dos marcos MS01, MS04, MS07, MS30, MS43 e MS53. encontram-se no apêndice A.

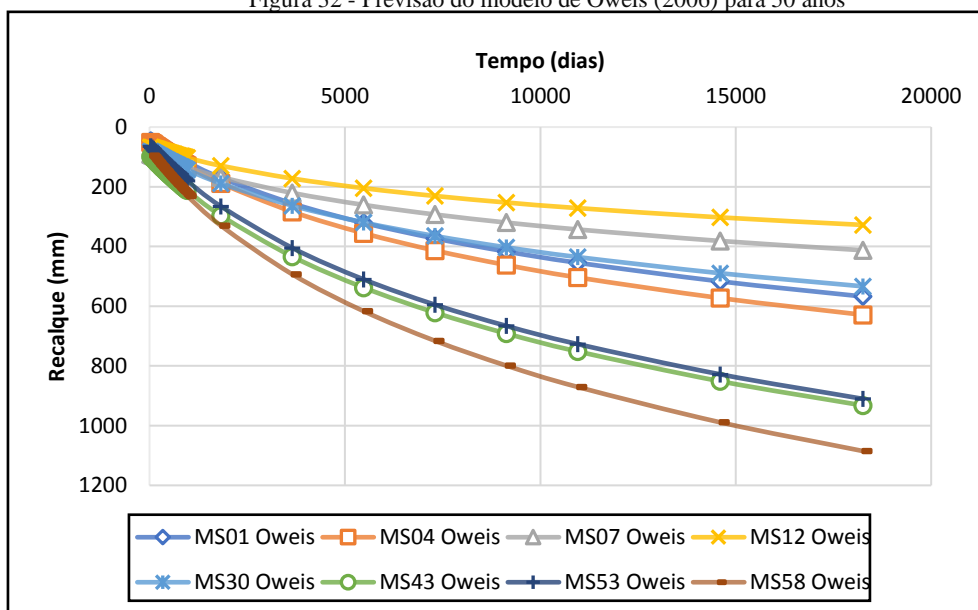
Figura 31 - Calibração do modelo de Oweis (2006)



Fonte: Arquivo do autor

Com base nos resultados na calibração observa-se uma melhor aderência entre os valores de recalques medidos e estimados a partir de 700 dias para o MS12 e a partir de 500 dias no MS58. A figura 32 apresenta a previsão do modelo de Oweis (2006) para os 8 MS para 50 anos.

Figura 32 - Previsão do modelo de Oweis (2006) para 50 anos



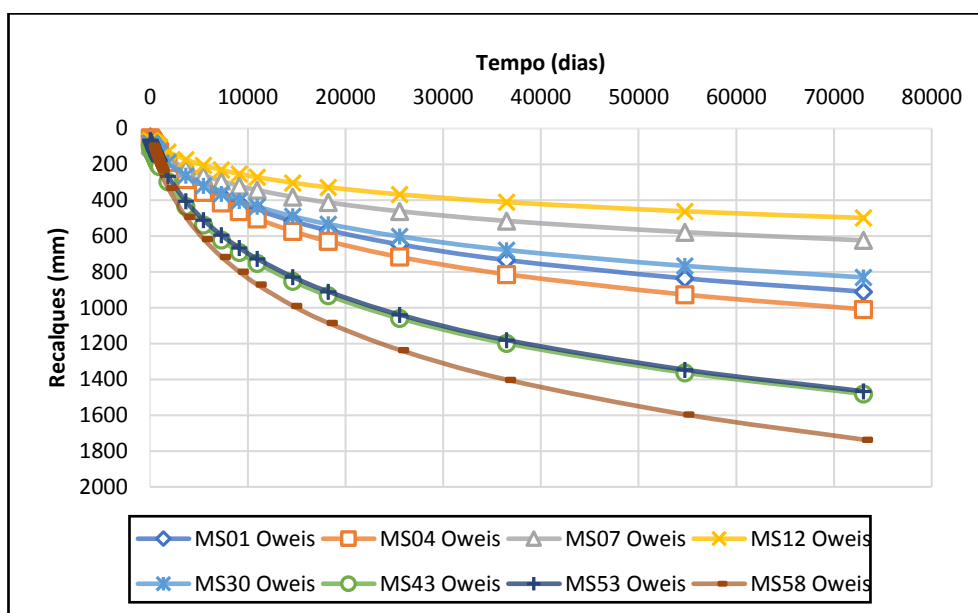
Fonte: Arquivo do autor



A longo prazo, o modelo de Oweis (2006) prevê um recalque de mínimo 328 mm no MS12 e um recalque máximo de 1085 mm no MS58. Observou-se uma tendência de aumento contínuo do recalque no tempo e ausência de estabilização das curvas de recalques.

A figura 33 representa a previsão do modelo de Oweis (2006) para 200 anos.

Figura 33 - Previsão do modelo de Oweis (2006) para 200 anos



Fonte: Arquivo do autor

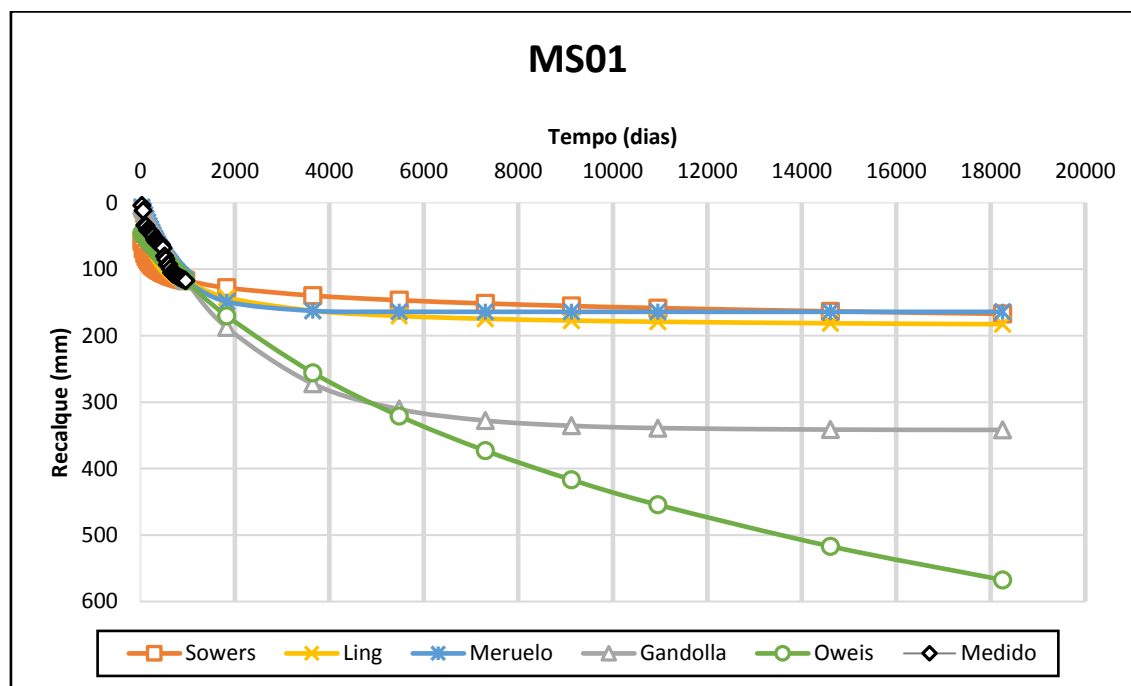
Com o intuito de se verificar o comportamento das curvas de recalque, posterior ao prazo de 50 anos, realizou-se uma previsão para 200 anos. Com base nisto, observa-se que mesmo para períodos muito longos a estabilidade do maciço não é atingida, comportamento este discrepante do descrito na literatura geotécnica e pelo próprio Oweis (2006). Segundo o referido autor, os maiores valores de recalque ocorrem no final do período de preenchimento do aterro. E no pós-preenchimento os recalques acumulados mecânicos e de fluência são relativamente pequenos, da ordem de 0,4 a 1% da altura espessura final do preenchimento e os recalques promovidos pela biodegradação seriam na ordem de até 20% da espessura final de preenchimento.

O parâmetro  $k'$  utilizado no modelo deve ser maior do que o valor estimado pela ferramenta solver, visto que segundo Oweis (2006), para um ambiente mais favorável à decomposição o parâmetro  $k$  é mais alto, os constituintes orgânicos no aterro são consumidos mais rapidamente, levando a uma estabilização mais rápida.

### 3.7 Comparação das previsões obtidas

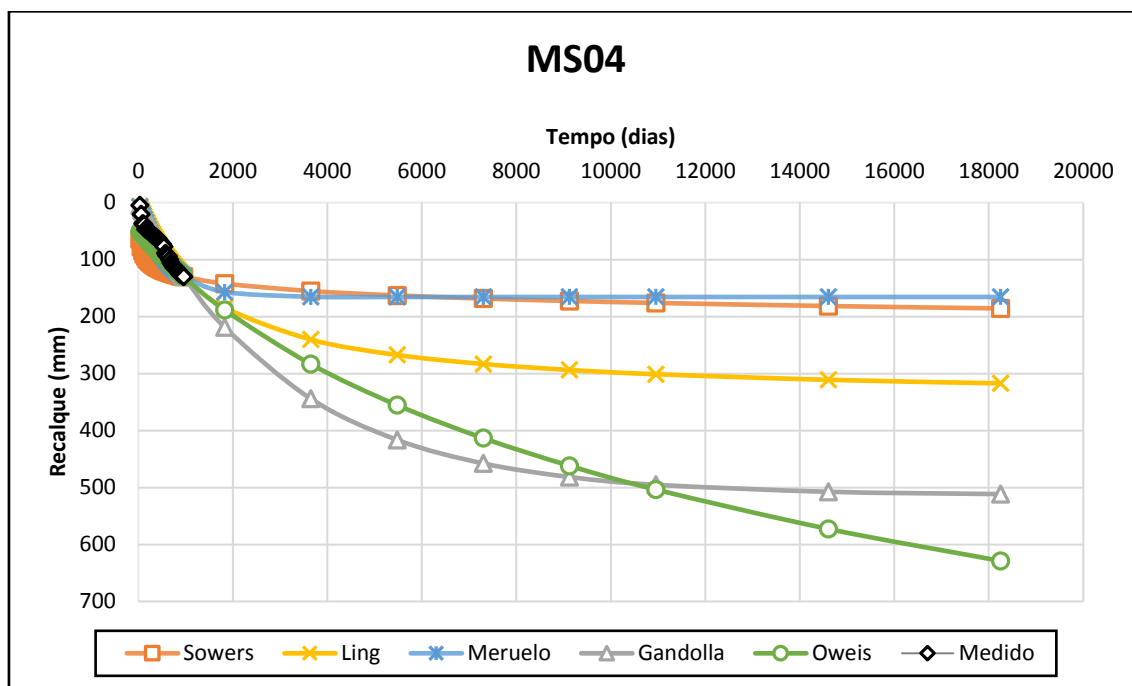
A seguir são apresentados o comportamento dos cinco modelos estudados (Figura 34 a 41). Segundo Babu *et al.* (2010) um estudo comparativo de diferentes modelos permite avaliar a confiabilidade e as limitações de cada modelo, mas a precisão do modelo depende dos parâmetros utilizados e as condições específicas de cada local.

Figura 34 - previsão comparativa dos modelos -MS01



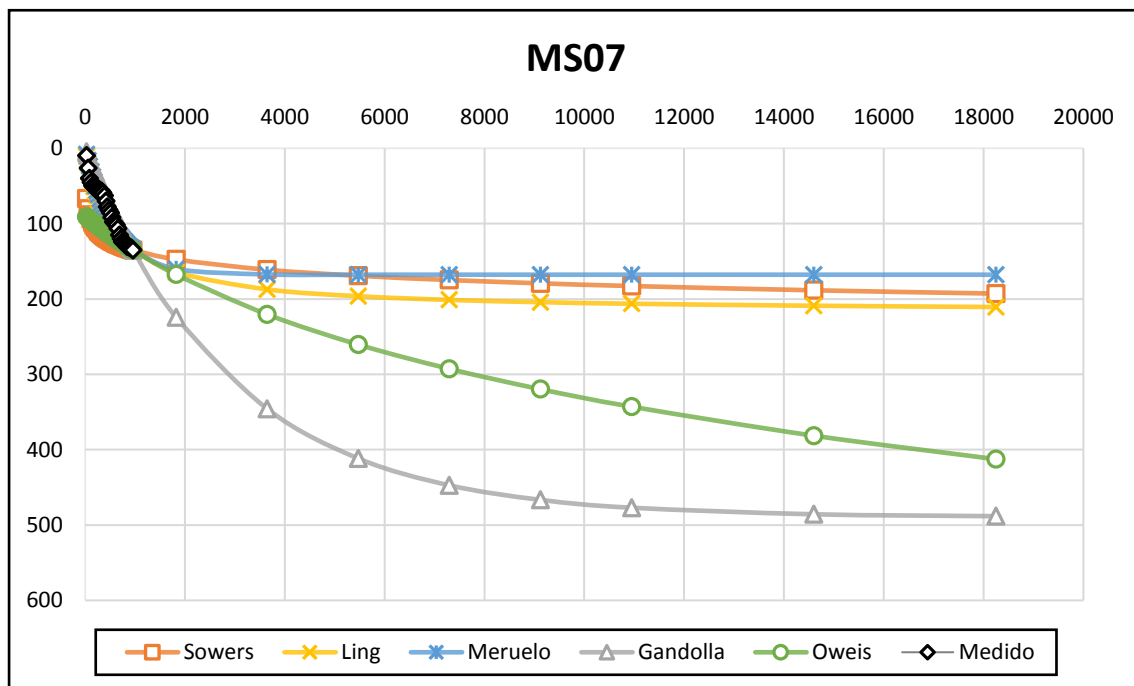
Fonte: Arquivo do autor

Figura 35 - previsão comparativa dos modelos -MS04



Fonte: Arquivo do autor

Figura 36 - previsão comparativa dos modelos -MS04



Fonte: Arquivo do autor

Figura 37 - previsão comparativa dos modelos -MS04

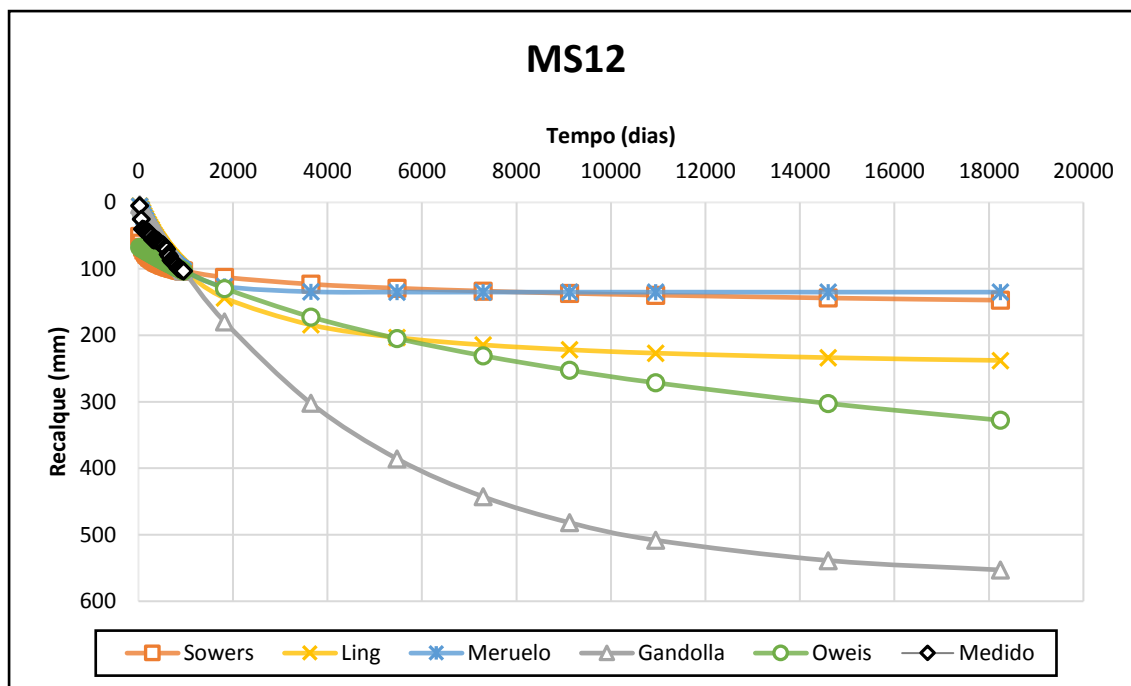


Figura 38 - previsão comparativa dos modelos - MS30

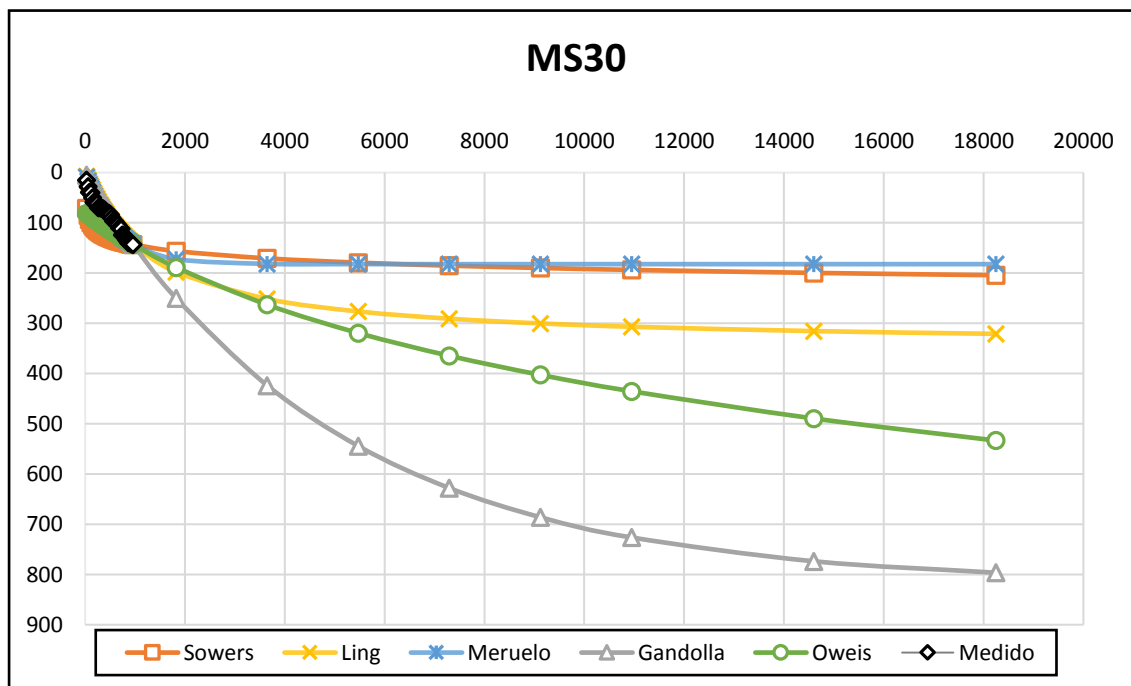
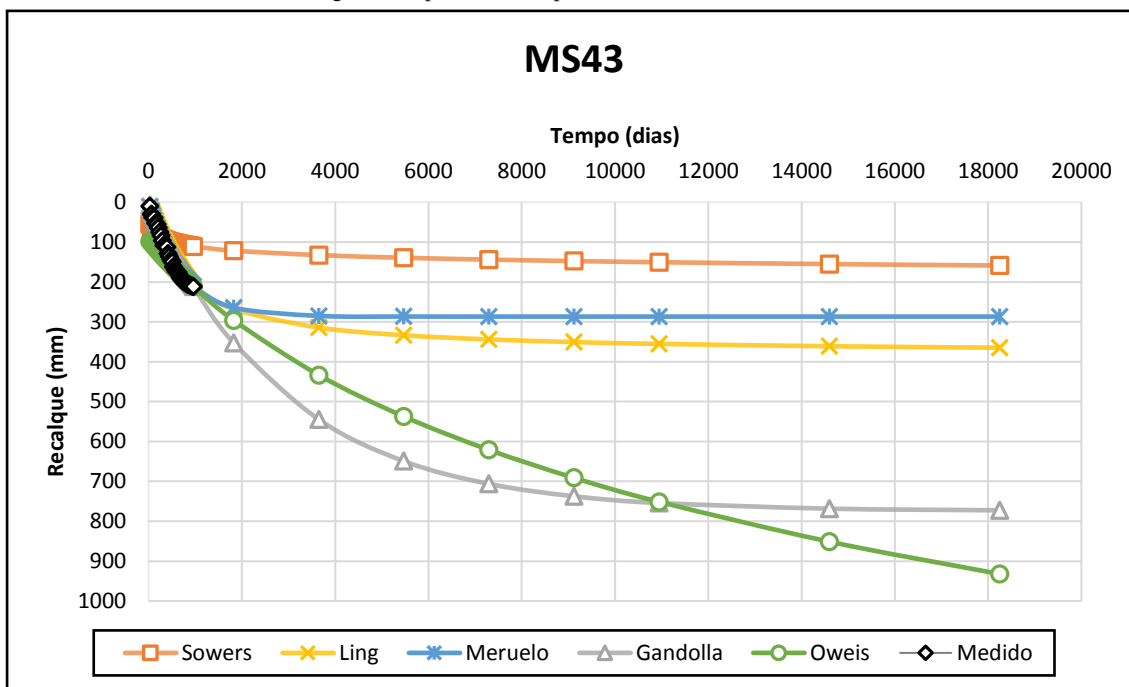
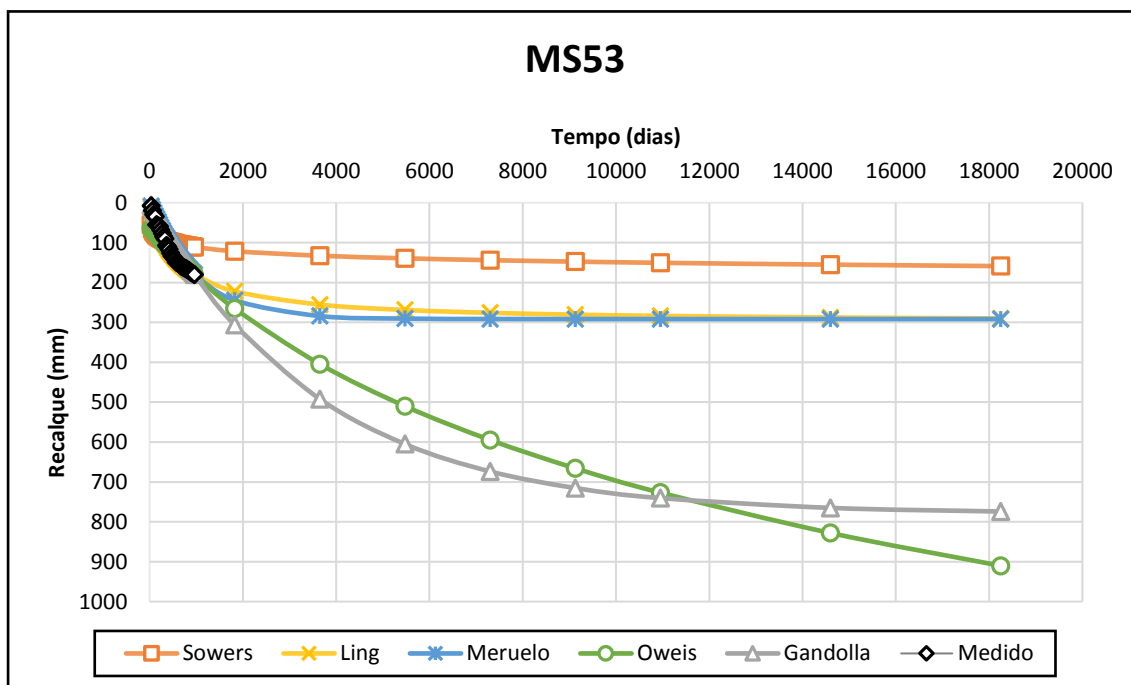


Figura 39 - previsão comparativa dos modelos – MS43



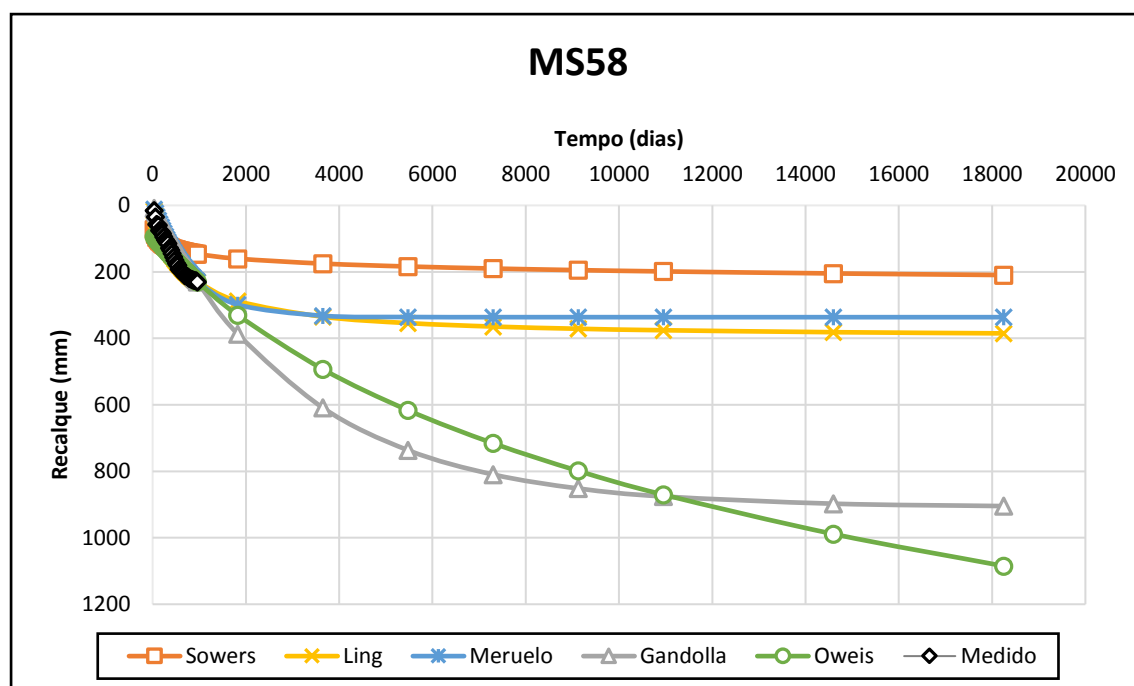
Fonte: Arquivo do autor

Figura 40 - Previsão comparativa dos modelos – MS53



Fonte: Arquivo do autor

Figura 41 - Previsão comparativa dos modelos - MS58



Fonte: Arquivo do autor

Como já citado anteriormente cada marco superficial possui comportamento representativo do local onde foi instalado, devido a heterogeneidade dos resíduos que compõem o aterro, o comportamento das curvas de recalques, são diferentes em cada marco superficial, porém, tendem a manter um comportamento semelhante e/ou característico para cada tipo de modelo matemático utilizado.

Na análise comparativa dos modelos, pode-se observar que os modelos de Sowers (1973), Ling *et al.* (1998) e Meruelo (1995) apresentaram um comportamento semelhante entre si na maioria dos marcos superficiais estudados, atingindo magnitudes de recalques finais aproximados. Apesar de serem conceitualmente diferentes, visto que o modelo de Sowers (1973) é um modelo baseado nos conceitos da mecânica dos solos e expressa a compressão secundária através de uma função logarítmica, o modelo de Ling *et al.* (1998) é expresso através de uma função hiperbólica e o modelo Meruelo (1995) ignora a compressão mecânica e leva em consideração a biodegradação com coeficiente similar a compressão secundária e recalque dependente do tempo. Destes três modelos, o modelo de Meruelo (1995) e Ling *et al.* (1998), foram os que tiveram melhor ajuste em termos de comportamento das curvas de recalque.

O modelo de Meruelo (1995) apresentou uma estabilização a partir de 2000 dias para os marcos MS01, MS04, MS07, MS12 e MS30 e a partir dos 4000 dias os marcos MS43, MS53 e MS58. Ling *et al.* (1998) também apresenta uma estabilização, a partir de 4000 dias para os marcos MS01 e MS07 e de 5000 dias para os marcos restantes.

Já os modelos de Gandolla *et al.* (1994) e Oweis (2006) apresentam um comportamento destacado, com previsões de recalques maiores. Gandolla prevê uma estabilização mais tardia, a partir de 8000 dias para os marcos MS01 e a partir dos 10000 dias para os marcos MS04, MS07, MS43, MS53, MS58 e os marcos MS12 e MS 30 não atingem a estabilização. Porém as curvas do modelo de Oweis conduzem a recalques cada vez maiores, não condizente com a literatura geotécnica que define que os recalques serão cada vez menores face à aproximação da estabilização.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste estudo, foi feito um monitoramento dos recalques sofridos no vale III do CTRNI durante 960 dias. Tais dados serviram de base para previsão de recalques a longo prazo utilizando cinco modelos matemáticos de previsão de recalques existentes na literatura.

Neste monitoramento, foram verificados deslocamentos verticais e horizontais de baixa magnitude, variando entre 103 mm a 230 mm os deslocamentos verticais e entre 0 a 18 mm os deslocamentos horizontais. As deformações correspondentes variaram no intervalo de 0,48% a 1,30%. Com isso, foi possível verificar que o aterro se encontra sob condições de estabilidade, possuindo menor probabilidade de sofrer grandes deslocamentos verticais no futuro.

Na análise comparativa das previsões, os modelos de Sowers (1973), Ling *et al.* (1998) e Meruelo (1995) apresentaram comportamento aproximado. Para o conjunto de marcos superficiais monitorados os recalques variaram de 160 a 365mm. Os três modelos apresentam uma tendência a estabilização dos recalques a partir de 2000 dias, ou seja, aproximadamente 5 anos.

O modelo de Gandolla *et al.* (1994), apesar de apresentar uma estabilização a partir de 8000 dias, foram verificadas elevadas magnitudes de recalques variando de 350 a 900mm em comparação com os demais modelos estudados. O modelo Gandolla considera o parâmetro relacionado a decomposição como sendo constante ao longo do tempo, fato este que não ocorre na prática, provavelmente o valor encontrado pode estar subestimado, levando ao adiamento do período de estabilização do maciço.

Os recalques previstos baseados no modelo de Oweis (2006) apresentaram valores crescentes no decorrer do tempo, não tendendo a uma estabilização em 50 anos nem em um intervalo de tempo maior, 200 anos. Por se tratar de um modelo mais sofisticado, em comparação aos anteriores, este modelo possui muitos parâmetros que foram estimados de forma indireta e não através de monitoramento e/ou laboratório. Como se usou um período de 960 dias para estimar tais parâmetros, estes podem estar subestimados, induzindo a uma expectativa de uma vida útil do aterro maior do que seria verificada em campo.

Com base no que foi exposto, pode-se dizer que os modelos mais simples, que englobam os diversos de processos de recalques em uma única função matemática são mais



fáceis de serem aplicados, embora limitados conceitualmente. Já os modelos mais sofisticados conceitualmente acoplam processos de decomposição e processos hidráulicos, aumentando o número de parâmetros incorporados, dificultando a sua aplicação. Quando se tem poucos dados de entrada, é preferível aplicar uma modelagem mais simples do que utilizar um modelo mais complexo, onde se torna necessário adotar parâmetros que podem diferir da condição particular do local investigado.

Existem muitas variáveis que interferem na compressibilidade dos RSU, quanto mais confiável for os parâmetros de entrada do modelo, mais realista será a previsão de recalques. Por isso, o monitoramento é uma peça fundamental para analisar o comportamento geotécnico de um aterro. A continuidade do monitoramento possibilitará uma análise mais precisa sobre o comportamento a longo prazo da CTRNI.

## 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.
- ALMOHANA, A. *et al.* *Review and application of a settlement model for landfills*. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 16, 2017, Sardinia.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*, 2017. 92 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos Sólidos – classificação. Rio de Janeiro-RJ, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8419 NB 843**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro-RJ, 1992.
- 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.
- 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.
- BOSCOV, M. E. G. *Geotecnia Ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- BRASIL. LEI Nº 12.305 DE 3 DE AGOSTO DE 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 02 ago. 2010.
- 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.
- CALDAS, Á. S. *Produção de Metano em Aterros Sanitários: Influência de diferentes métodos operacionais na geração de metano no Aterro Sanitário Metropolitano Centro*,

Salvador – BA. 2017. Tese (Doutorado) – Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente, Universidade Federal da Bahia, Salvador. 254 p.

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.

CHEN R., CHEN Y., CHEN W., CHEN Y. Time domain reflectometry for water content measurement of municipal solid waste. *Environmental engineering science*, 2012.

CHEN RH, CHEN KS, LIU CN. Study of the mechanical compression behavior of municipal solid wastes by temperature-controlled compression tests. *Environ Earth Sci*. 2010.

CHEN Y, FREDLUND DG, ZHAN L AND XIE Y. Secondary compression of municipal solid wastes and a compression model for predicting settlement of municipal solid waste landfills. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010.

CHEN, D. H.; BILYEYU, J.; HE, R. (1999). Comparison of resilient moduli between field and laboratory testing: A case study. 78th Ann. Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228372215>. acesso em: 16 jan. 2018

CHEN, R.H.; CHOU, I.H. The settlement behavior of municipal waste. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY AND GLOBAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 4, Boston, Massachusetts, 1998.

CODUTO, D. P. E HUITRIC, R. Monitoring landfill movements using precise instruments. *Geotechnics of waste fills – theory and practice*, ASTM STP 1070, Arvid Landva e G. David Knowles (eds). Pp. 358-370. 1990

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.

CORREA, L.R. *Análise de recalques a longo prazo no antigo vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu – RJ*. 2017.105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual do Rio de Janeiro.

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.

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.

EL-FADEL, M., KHOURY, R. Modeling settlement in MSW landfills: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and technology*, 30(3), pp 327-361.2000

ESPINACE, R. *et al.* Problemas geotécnicos de los rellenos sanitarios. CEDEX, [S.l.], 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, R. M. S.; RIBEIRO, L. S.; SILVA, A. S.; ARAÚJO, E. P.; MONTEIRO, V. E. D.; Composição Gravimétrica e Volumétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande/PB com base em planejamento estatístico. IV Seminário Regional Nordeste de Resíduos Sólidos – 2º Encontro Sergipano de Resíduos Sólidos. São Cristóvão – Sergipe, Agosto de 2012.

FLEMING, I. R. In situ evaluation of physical properties of landfilled waste. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 5, Cagliari, Italy, 2015.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO – FAPERJ. Tratamento ambiental de resíduos transforma lixo em eletricidade.2007. Disponível em: <http://www.faperj.br/?id=910.2.2>. Acesso em: 25 jun, 2018.

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.

GOOGLE. Google Earth website. <http://earth.google.com/>, 2019.

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.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. Diagnóstico de Educação Ambiental em Resíduos Sólidos. 2012. Disponível em: [http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121002\\_relatorio\\_eduacao\\_ambiental.pdf](http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121002_relatorio_eduacao_ambiental.pdf). Acesso em: Jan, 2019.

IVANOVA, L.K., *et al.* The long-term settlement of landfill. waste. *Waste and Resource Management*, vol. 161 n. 3, p.121–133. 2008.

JESSBERGER, H. L. *et al.* Investigation of waste body- behavior and waste-structure-interaction. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 5, Cagliari, Italy, 1995.

JUCÁ, J. F. T. Disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. In: V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Anais... Porto Alegre: REGEO, p. 443-470. 2003.

JUCÁ, J. F. T. *et al.* Geotechnics of a municipal solid waste landfill in Recife, Brazil recent developments in soil and pavement mechanic, Almeida (ed), Balkema, Rotterdam, p.429 – 436. 1997.

KNOCHENMUS, G.; WOJNAROWICZ, M.; VAN IMPE, W. F. Stability of municipal solid wastes, In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 3, Lisboa. 1997.

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

LANDVA A. O. *et al.* Lateral earth pressure at rest and compressibility of municipal solid waste. *Canadian Geotechnical Journal*. 2000.

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.

MANASSERO, M. VAN IMPE, W.F. &BOUAZZA, A. Waste disposal and containment. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 2, Osaka, 1996.

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.

MCDUGALL, J. R. Assessment of Landfill Settlement Data for Evaluation of a Hydro-Bio-Mechanical Settlement Model. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 11, Sardinia, 2007.

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

MCDUGALL, J.R, PYRAH IC. Phase relations for decomposable soils. *Geotechnique*. 2004.

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.

MENZ, R. C. & STONE, R. (1962). *Publics Works*, 93, set., 103.

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

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Primeiro inventário brasileiro das emissões antrópicas de gases de efeito estufa: relatório de referência: emissões de metano no tratamento e na disposição final de resíduos. São Paulo: CETESB, 2003. Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/01/Primeiro\\_Inventario\\_GEE\\_WEB\\_Segunda-Edicao-v1.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/01/Primeiro_Inventario_GEE_WEB_Segunda-Edicao-v1.pdf). Acesso em fev. de 2018.

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, 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.

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

OWEIS, I.S. AND KHERA, R.P. Geotechnology of waste management. PWS. Boston. 1998

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.

SANCHEZ-ALCITURRI, J.M *et al.* Three years deformation monitoring at Meruelo landfill. In: Waste disposal by landfill, Boston, 1994.

SIDDIQUI, A. A., RICHARDS, D.J., POWRIE, W. Investigations into the landfill behavior of pretreated wastes. *Waste Manager*. 32, p. 1420–1426. 2012.

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.; MARTINS, H. L. Monitoramento geotécnico de aterros sanitários – trabalhos realizados na central de tratamento de resíduos sólidos da BR-040 em Belo Horizonte, MG. Trabalho apresentado no Simpósio Internacional de Tecnologias e Tratamentos de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, 2009.

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

SOARES, E. L. S. F. *Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos*. 2011.103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

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

SURFER, Project for Golden Software, version 16. 2017.

TEIXEIRA, M.C. *Previsão e monitoramento de recalques em Aterros Sanitários/Estudo de Caso: Central de Resíduos de Recreio-Minas Leão/RS e São Leopoldo/RS*. 2015.217f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Marília, Rio Grande do Sul.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. *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.2011.

VAN ELK, A.G.H.P. Redução de emissões na disposição final / Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL aplicado a resíduos sólidos. Coordenação de Karin Segala – Rio de Janeiro: IBAM, 2007.

VAN ELK, A.G.H.P., MAÑAS, L.S. & BOSCOV, M.E. Field Survey of Compressibility of Municipal Solid Waste. *Soils and Rocks*, v. 37(1). p. 85-95. São Paulo.2014.

VAN ELK, A.G.H.P. Análise dos Deslocamentos Verticais e Horizontais do Vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu – RJ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA GEOTECNIA E DESENVOLVIMENTO URBANO, 19, Salvador, 2018.

VAN MEERTEN, J. J., SELLMEIJER, J. B., & PEREBOOM, D. Prediction of Landfill Settlement. Paper presented at the Sardinia 95 - International Landfill Symposium, 5, Cagliari, Italy. 1995.

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

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

ZEKKOS, D., *et al*. Unit weight of municipal solid waste. *ASCE J. Geotech and Geoenviron Eng.* 2006.



## APÊNDICE A – Calibração dos modelos

