

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Ngamuna Eyay

**PREVISÃO DE RECALQUES EM ATERROS SANITÁRIOS
NOVOS: CASO DO ATERRO DE SÃO LEOPOLDO**

Avaliador:
Defesa: dia __/__/2016 às _____ horas
Local: UFRGS / Engenharia Nova Osvaldo Aranha, 99, sala 304

Porto Alegre
julho 2016

NGAMUNA EYAY

**PREVISÃO DE RECALQUES EM ATERROS SANITÁRIOS
NOVOS: CASO DO ATERRO DE SÃO LEOPOLDO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Lucas Festugato

Porto Alegre
julho 2016

NGAMUNA EYAY

**PREVISÃO DE RECALQUES EM ATERROS SANITÁRIOS
NOVOS: CASO DO ATERRO DE SÃO LEOPOLDO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2016

Prof. Lucas Festugato
Dr. pelo PPGECC/UFRGS
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Nilo Cesar Consoli (UFRGS)
Dr. pela Concordia University, Canadá

Prof. Lucas Festugato (UFRGS)
Dr. pelo PPGECC/UFRGS

Prof. Ricardo Born (UFRGS)
M.Eng. pelo PPGECC/UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Florent Ngamuna Sumbey e Hegide Mungulu Ayiwala por acreditarem em mim e terem me deixado sair de casa em busca dos meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho somente foi possível graças à colaboração e ao incentivo de muitas pessoas e instituições. Será difícil citar todos, mas garanto que nenhum deles será esquecido na minha memória. Estando imensamente grato com todos, expresso meus agradecimentos especiais:

A Deus pela vida e pela saúde a partir das quais foi possível realizar mais um sonho. Sem você, a minha vida não faz nenhum sentido.

Ao governo Brasileiro através do programa PEC-G por ter me selecionado para estudar em uma das melhores universidades federais do país.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao seu corpo docente em geral e particularmente ao corpo docente do curso de engenharia civil que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e na ética aqui presentes.

Ao meu professor orientador Lucas Festugato pela confiança, pelos ensinamentos, apoio e incentivo ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Nilo César Consoli pela supervisão do meu estágio obrigatório no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia (LEGG).

À professora Carin Maria Schmitt, pelo conhecimento e auxílio prestado durante o período de desenvolvimento do projeto de pesquisa.

Ao doutorando Naloan Coutinho Sampa, pela disposição e por tirar as minhas dúvidas com toda a humildade.

À empresa Companhia Rio-grandense de Valorização de Resíduos (CRVR) especialmente à toda equipe do aterro sanitário de São Leopoldo que contribui no fornecimento de dados de monitoramento de recalques.

À minha grande família por sua capacidade de acreditar e investir em mim. Mãe, seu cuidado e sua dedicação foi que deu, em alguns momentos, a esperança para seguir e este diploma é teu. Pai, sua presença, mesmo longe, significou segurança e a certeza de que não estou sozinho nesta caminhada.

Aos meus irmãos, Brice, Dorcas, Glodi, Israel, Joseph e Benedicte por fazer parte do meu “batalhão”. De forma especial a você Brice, um irmão amigo com quem eu posso conversar durante horas por telefone. A presença de vocês em minha vida é mais um motivo para correr atrás dos meus objetivos.

A Rosilei Hammerschmitt, uma pessoa chave e discreta que ainda aguenta minha teimosia e presenciou esta caminhada desde a época das minhas velhas aulas de português para estrangeiros. Admiro-te.

À família congoleza de porto alegre: Lionel, Carrel, Maurícia, Nathanael, Benedicte, Grace, Raissa, Mike, Felicité, Bernice, Eric, Thierry, Francis, Dimek, DM e Emmanuel. Um pedaço do congo com quem podia conversar em *lingala* e dar umas boas gargalhadas.

Há homens que lutam um dia e são bons, há outros que lutam um ano e são melhores, há os que lutam muitos anos e são muito bons, mas há os que lutam toda a vida e estes são imprescindíveis.

Bertolt Brecht

RESUMO

Os resíduos sólidos urbanos depositados em aterros sanitários têm diversas origens e são estruturalmente diferentes quanto à sua composição física e química. Sendo assim, o estudo da magnitude dos recalques ao longo do tempo e sua duração tornam-se um dos problemas mais importantes nesses tipos de estruturas e pode contribuir no aumento da sua vida útil. Na literatura, existem vários métodos de previsão de recalques em uso para a avaliação da compressibilidade em aterros sanitários ao longo do tempo em função da sua origem, da sua formulação e do seu método de resolução. Neste presente estudo, foram escolhidos alguns modelos de avaliação de futuros recalques em função do seu método de resolução que pode ser analítico, geométrico, numérico ou tirado de leis correntes afim de compará-los com o comportamento real de recalques observados em campo com o objetivo de propor um modelo que pode ser utilizado para acompanhamento de recalques no aterro sanitário novo de São Leopoldo que iniciou sua operação em 2011. Os modelos aplicados nesse estudo foram: o modelo de Sowers (1973), o modelo logarítmico de Yen & Scanlon (1975), o modelo de Gandolla et al (1992) e o modelo de Ling et al (1998). Embora o modelo logarítmico de Yen & Scanlon (1975) não tenha retornado resultados satisfatórios, os demais tiveram valores de recalques e suas taxas na mesma ordem de grandeza com valores de recalques medidos em campo através de marcos superficiais observados em campo com desvios variando de 8 a 28,8%. Como os modelos testados não conseguiram reproduzir o comportamento exato de compressibilidade em campo, foi proposto um modelo novo que se adaptasse à realidade do aterro sanitário em estudo.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Aterros Sanitários. Recalques. Modelos de previsão de recalques. Modelo novo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama das etapas da pesquisa.....	19
Figura 3.1 – Representação esquemática do Lixão.....	23
Figura 3.2 – Representação esquemática do Aterro Controlado.....	24
Figura 3.3 – Construção do aterro em rampa.....	27
Figura 3.4 – Construção do aterro em trincheira.....	27
Figura 3.5 – Construção do aterro em superfície.....	27
Figura 3.6 – Impermeabilização da camada de base	29
Figura 3.7 – Sistema de drenagem de gás e de percolados.....	30
Figura 3.8 – RSU gerados e coletados em 2011 no Brasil e sua distribuição por região...	31
Figura 3.9 – Destinação final de RSU em 2011 no Brasil por região.....	31
Figura 3.10 – distribuição de municípios com iniciativa de coleta seletiva.....	32
Figura 3.11 – Destinação final dos RSU coletados no Brasil.....	33
Figura 3.12 – Diagrama de resíduos proposto por Grisolia et al. (1995a).....	36
Figura 3.13 – Evolução na representação do resíduo no diagrama de Grisolia et al. (1995a).....	37
Figura 3.14 – Parâmetros de resistência dos RSU.....	42
Figura 3.15 – Curva teórica de compressibilidade de RSU.....	44
Figura 4.2 – definição da idade média do aterro.....	53
Figura 4.3 – Variação da taxa de recalques com a altura e a idade média do aterro.....	54
Figura 4.4 – Coeficientes a e b em função da altura de resíduos.....	54
Figura 4.5 – Fases de ocorrência de recalques.....	56
Figura 4.6 – Características dos recalques em aterros dos RSU.....	56
Figura 4.7 – Representação do modelo proposto por Gibson & Lo (1961).....	58
Figura 4.8 – Valores de parâmetros a b e (λ/b).....	59
Figura 4.9 – Aplicação do método observacional.....	61
Figura 4.10 – Verificação recalques <i>versus</i> tempo.....	62
Figura 5.1 – Localização do Aterro em estudo.....	72
Figura 5.2 – Acesso principal do aterro sanitário.....	73
Figura 5.3 – Acesso principal do aterro sanitário	73
Figura 5.4 – Preparação da base do aterro.....	74
Figura 5.5 – Camada de impermeabilização da base do aterro.....	74
Figura 5.6 – Instalação da geomembrana de PEAD.....	74
Figura 5.7 – Sistema de drenagem de percolados e de biogás.....	75

Figura 5.8 – Queimador de biogás no topo do talude.....	75
Figura 5.9 – Canal de drenagem águas pluviais.....	76
Figura 5.10 – Lagoa de acúmulo e equalização.....	76
Figura 5.11 – Layout das células de disposição.....	77
Figura 5.12 – Taqueômetro utilizado na coleta de dados em campo.....	80
Figura 5.13 – Prisma para reflexão do sinal emitido pelo taqueômetro.....	80
Figura 5.14 – Instalação do taqueômetro tripé para medição das cotas.....	80
Figura 5.15 – Medição de cota no ponto desejado com auxílio de um operário.....	81
Figura 5.16 – Localização dos marcos topográficos em planta.....	82
Figura 5.17 – Curva de recalque com o tempo.....	86
Figura 5.18 – Curva de velocidade de recalque com o tempo.....	86
Figura 5.19 – Comparação de valores calculados e observados para MS6 e MS 10.....	87
Figura 5.20 – Comparação de valores calculados e observados para MS7 e MS 12	87
Figura 5.21 – Comparação de valores médios calculados e observados: Sowers (1973).	88
Figura 5.22 – Recalques calculados e previstos: modelo de Yen & Scanlon (1975).....	91
Figura 5.23 – Recalques calculados e previstos: modelo de Yen & Scanlon (1975).....	91
Figura 5.24 – Deformação média calculada e prevista: modelo de Yen & Scanlon (1975).....	92
Figura 5.25 – Recalques observados nos marcos MS6 e MS10 e previstos Gandolla et al (1992).....	93
Figura 5.26 – Recalques observados nos marcos MS7 e MS12 e comparados com o método de Gandolla et al (1992).....	94
Figura 5.27 – Recalques médio observado e comparados com o método de Gandolla et al (1992).....	94
Figura 5.28 – Deformação média observadae comparada com o método de Gandolla et al (1992).....	95
Figura 5.29 – Recalque medido (MS7 e MS12) e comparado ao modelo de Ling et al (1998).....	97
Figura 5.30 – Recalque médio medidoe comparado ao modelo de Ling et al (1998).....	97
Figura 5.31 – comparação de desvios de recalques.....	98
Figura 5.32 –Apresentação do modelo novo para o aterro de São Leopoldo.....	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Recalques em maciços sanitários.....	45
Quadro 4.1 – Resultados de ensaios laboratoriais.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Municípios com iniciativa de coleta seletiva.....	31
Tabela 3.2 – Composição de resíduos sólidos em %.....	34
Tabela 3.3 – Peso específico de resíduos sólidos urbanos (RSU).....	38
Tabela 3.4 – Teor de umidade de diversos componentes de RSU.....	39
Tabela 3.5 – Resultados obtidos de ensaios de resistência.....	43
Tabela 5.1 – Resumo com as cotas e deslocamentos verticais observados.....	83
Tabela 5.2 – Resumo com as cotas e deslocamentos verticais observados.....	84
Tabela 5.3– Parâmetros calculados e previstos: modelo de Sowers (1973).....	89
Tabela 5.4 – Parâmetros calculados e previstos: modelo de Yen & Scanlon (1975).....	90
Tabela 5.5 – Parâmetros obtidos do modelo de Yen & Scanlon (1975)	90
Tabela 5.6 – Parâmetros médios calculados e previstos: Gandolla et al (1992).....	93
Tabela 5.7 – Parâmetros calculados: Ling et al (1998).....	96
Tabela 5.8 – Parâmetros médios calculados e previstos: Ling et al (1998).....	96

LISTA DE SIGLAS

FEAM – Fundação Estadual do meio Ambientel

ISPM – *Incremental Settlement Prediction Model*

ISSMGE – *Internacional Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*

PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

C_c – índice de compressão primária

C_α – índice de compressão secundária

C_c' – coeficiente de compressão primária

C_α' – coeficiente de compressão secundária

e_0 – índice de vazios

d – diâmetro

S_p – recalque ao final da compressão primária

H_0 – espessura inicial da camada de resíduo

σ_{v0} – tensão vertical

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

S_s – recalque devido à compressão secundária

t_1 – tempo inicial da compressão secundária

t_2 – tempo de estimativa de recalques

m – taxa ou velocidade de recalques

ΔH – recalque medido em campo

Δt – intervalo de tempo entre as leituras

t_c – tempo de construção do aterro

a – parâmetro de recalque

b – parâmetro de recalque

$\Delta H/H$ – deformação vertical

$\varepsilon(t)$ – deformação

λ/b – taxa de compressão secundária

t_0 – tempo de aplicação da tensão vertical

k – constante do modelo de Gandolla et al (1992)

v – velocidade de recalques

α – coeficiente de perda de massa

COD – quantidade de matéria orgânica biodegradável presente no resíduo por ano

ΔH_{ult} – recalque último esperado

ρ_0 – taxa de recalque inicial

t_f – tempo final de recalques

t_f – tempo final de recalques

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA.....	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	16
2.2.1 Objetivo principal	16
2.2.1 Objetivo secundário	16
2.3 PRESSUPOSTOS	16
2.4 PREMISAS	17
2.5 DELIMITAÇÕES	17
2.6 LIMITAÇÕES	17
2.7 DELINEAMENTO	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS	20
3.1.1 Definição e Conceitos.....	20
3.1.2 Destinação final dos RSU.....	21
3.1.2.1 Usinas de triagem e compostagem	22
3.1.2.2 Método de Incineração	22
3.1.2.3 Lixão ou Vazadouro a “céu aberto”	23
3.1.2.4 Aterros Controlados	24
3.1.3 Aterro Sanitário	25
3.1.3.1 Definição	25
3.1.3.2 Construção e Operação	25
3.1.4 Geração de resíduos no Brasil	30
3.2 CARACTERÍSTICAS DOS RSU	33
3.2.1 Características físicas	33
3.2.1.1 Composição gravimétrica	33
3.2.1.2 Peso específico	37
3.2.1.2 Teor de umidade	38
3.2.2 Características mecânicas	39
3.2.2.1 Resistência ao cisalhamento	41
3.2.2.2 Compressibilidade dos RSU	43
4 MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES	47

	13
4.1 INTRODUÇÃO	47
4.2 FORMULAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES	48
4.2.1 Modelos logarítmicos	48
4.2.1.1 Modelo logarítmico de Sowers (1973)	48
4.2.1.2 Modelo logarítmico de Yen & Scanlon (1975)	52
4.2.1.3 Modelo logarítmico Bjarngard & Edgers (1990)	55
4.2.2 Modelos oriundos de leis exponenciais.....	57
4.2.2.1 Modelo de Gibson & lo (1961)	57
4.2.2.2 Modelo de Asaoka (1978)	60
4.2.2.3 Modelo de Gandolla et al (1992)	61
4.2.2.4 Modelo de Meruelo (1995)	63
4.2.3 Modelos oriundos de leis correntes.....	64
4.2.3.1 Modelo hiperbólico de Ling et al (1998)	65
4.2.3.2 Modelo de Comoulos & Koryalos (1997)	68
4.2.3.2 Modelo ISPM	68
5 ÁREA DE ESTUDO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	72
5.1 ÁREA DE ESTUDO.....	72
5.1.1 Localização.....	72
5.1.2 Acesso e isolamento do aterro.....	72
5.1.3 Instalação do aterro sanitário.....	73
5.1.4 Operação do aterro sanitário.....	77
5.1.5 Metodologia.....	78
5.1.4.1 Monitoramento geotécnico de campo	78
5.1.4.2 Comparativa dos métodos de previsão escolhidos	83
5.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	84
5.2.1 Modelo de Sowers (1973)	87
5.2.2 Modelo de Yen & Scanlon (1975)	89
5.2.3 Modelo de Gandolla et al (1992)	92
5.2.4 Modelo de Ling et al (1998)	95
5.2.5 Apresentação do Modelo novo	98
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
REFERÊNCIAS	103

1. INTRODUÇÃO

A produção de resíduos pela atividade humana tem se tornado uma preocupação durante décadas. Produz-se cada vez mais quantidades de resíduos sólidos urbanos devido ao aumento da população urbana. Em 2010, o número de habitantes em metrópoles sofreu um crescimento de 3% em relação à década de 2000 passando de 81 para 84% (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010). Diante deste fato, torna-se cada vez necessário encaminhar os resíduos para uma destinação adequada de maneira a evitar impactos ambientais negativos como a contaminação do ar, do solo, do lençol freático nas regiões localizadas no entorno do seu local de armazenamento (DERNARDIN, 2013).

Atualmente, existem diversas tecnologias que procuram eliminar os resíduos sólidos gerados pela atividade humana. Entre elas, destaca-se a técnica de incineração, que consiste em empregar temperaturas elevadas de modo a reduzir o volume global de resíduos tendo como maior desvantagem a produção de subprodutos nocivos como o dióxido de carbono e outros gases poluentes. Além da incineração, emprega-se o método de compostagem; um processo que utiliza o oxigênio, bactérias e fungos com objetivo de decompor a matéria orgânica para conseguir um material a ser usado como suplemento do solo. Em acréscimo aos dois métodos anteriormente mencionados, outra prática é o uso do processo de seleção, limpeza e reutilização de materiais que seriam descartados como lixo.

De qualquer forma, todos esses processos geram resíduos. Tal constatação faz com que os aterros sanitários sejam sempre necessários e se apresentem ainda como uma forma principal e mais econômica para a disposição final de resíduos no Brasil e em grande parte do mundo (MARQUES, 2001).

A dificuldade de encontrar espaços físicos para instalação de novos aterros sanitários, desperta o interesse de um aproveitamento máximo de aterros já projetados. Deste modo, torna-se importante um melhor entendimento do comportamento a médio e longo prazo dos maciços de resíduos sólidos, e a maneira como respondem perante as diferentes técnicas construtivas e operacionais garantindo então um aumento da sua vida útil. Acrescenta-se a estes aspectos a importância da recuperação e reaproveitamento das áreas antigas que

demandam um conhecimento das condições geomecânicas do maciço assim como seu comportamento futuro (MARQUES, 2001).

O estudo do comportamento mecânico de deformações verticais em um aterro sanitário baseado nas teorias de mecânica de solos torna se uma tarefa difícil. Nesse contexto, modelos empíricos, reológicos e os baseados na influência da biodegradação de resíduos foram desenvolvidos para estimativa de recalques futuros. A partir destes modelos juntamente com dados históricos de recalques ocorridos em campo, é possível identificar e verificar a capacidade real de armazenamento do aterro incluindo volumes adicionais provenientes de recalques ocorridos no maciço ao longo do tempo (TEIXEIRA, 2015).

Segundo Tapahuasco (2005), a estimativa dos recalques em aterros sanitários é de grande importância porque permite uma avaliação da integridade dos seus componentes estruturais, tais como camadas de cobertura final e sistema de drenagem de líquidos e gases além de possibilitar a avaliação do desempenho desses empreendimentos após o fechamento.

Diante disso o objetivo deste trabalho consiste em coletar dados de recalque reais do maciço de um aterro sanitário através de marcos superficiais, compará-los com modelos de previsão de recalques existentes na literatura, observar entre os existentes o que mais se adaptar à realidade do aterro e a partir daí, ajustar um modelo novo que preveja recalques para o caso do aterro sanitário em estudo.

2. DIRETRIZES DA PESQUISA

Nos próximos itens estão descritos as diretrizes para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 QUESTÃO DA PESQUISA

A questão da pesquisa deste trabalho é: qual modelo de previsão de recalques pode ser proposto para o caso de aterros sanitários novos?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos desta pesquisa estão divididos em objetivo principal e secundário.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a proposição de um modelo de previsão de recalques para aterros sanitários novos.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário é a apresentação dos resultados e a avaliação do ajuste dos modelos de previsão de recalques presentes na bibliografia aos dados obtidos em campo do aterro sanitário estudado.

2.3 PRESSUPOSTOS

Este trabalho tem como pressuposto de que são válidos todos os modelos de previsão de recalques já existente na literatura em função das suas origens (leis tirada da mecânica dos solos, empíricas, reológicas e modelos biológicos), da sua formulação (logarítmica, exponencial, hiperbólica, etc.) e do seu método de resolução (analítica geométrica ou numérica).

Além disso, parte-se do pressuposto de que são considerados como aterros sanitários novos os que tiverem um tempo de operação inferior a 5 anos como o caso do aterro em estudo.

2.4 PREMISSAS

A premissa do trabalho é que o estudo de previsão de recalques pode auxiliar na verificação da estabilidade do maciço de resíduos sólidos urbanos e no aumento da vida útil de um aterro sanitário.

2.5 DELIMITAÇÕES

Esta pesquisa está focada no aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos que se localiza na cidade de São Leopoldo (RS), na estrada do Socorro, no bairro Arroio Manteiga.

2.6 LIMITAÇÕES

São consideradas como limitações nesta pesquisa:

- a) a dificuldade de detalhar e conhecer as leis de comportamento que governam os mecanismos de compressão observada em alguns dos métodos de previsão de recalques adotados;
- b) os dados foram coletados a partir da conclusão das duas primeiras fases de operação do aterro sanitário em outubro de 2014;
- c) os recalques observados em campo se restringem a um período máximo de observação de 16 meses;
- d) será considerado somente o deslocamento vertical do maciço na previsão de recalques;
- e) a previsão de recalques é realizada somente para resíduos sólidos urbanos.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado a partir das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e serão descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) coleta mensal de dados em campo;

- c) identificação de modelos existentes;
- d) escolha dos métodos adotados;
- e) aplicação do modelo de previsão de recalques;
- f) análise dos resultados;
- g) proposta de um modelo novo;
- h) considerações finais;

Primeiramente foi realizada uma **pesquisa bibliográfica** a fim de obter um embasamento teórico necessário e suficiente para o entendimento do tema. Nesta etapa, procurou-se aprofundar os conhecimentos a respeito das características e do comportamento mecânico de resíduos sólidos.

Junto à etapa acima mencionada, foi feita uma **coleta mensal de dados** de recalques observados através de marcos superficiais instalados em campo. Convém informar que o monitoramento iniciou em outubro de 2014, após o encerramento das duas primeiras fases de operação do aterro sanitário em estudo. Desde então, entre o dia 10 e 15 de cada mês, a equipe de topografia efetua o levantamento de cotas em marcos superficiais instalados no aterro através do qual se verifica os deslocamentos horizontais e verticais dos marcos em questão.

Depois disso, na **identificação de modelos existentes**, foram identificados os diversos modelos de previsão de recalques que já existem na literatura. Na **escolha dos métodos adotados**, foram escolhidos a partir de modelos oferecidos na literatura, os que serão utilizados neste trabalho.

Posteriormente, uma **aplicação do modelo de previsão de recalques** ajudou a comparar os recalques observados em campos com os modelos de previsão de recalques tirados da literatura e aplicados nesta pesquisa. Na **análise dos resultados**, foi constatado o modelo que apresentar o menor desvio entre valores de campos e valores calculados.

A partir do modelo que mais se adaptar à realidade do aterro em estudo, foi apresentada **uma proposta de um modelo novo**. Após de concluídas todas as etapas, foram feitas **considerações finais**.

O diagrama das etapas da pesquisa está ilustrado na figura 2.1.

Figura 2.1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica para o desenvolvimento desta pesquisa onde serão englobados conceitos, propriedades e estudos relacionados aos resíduos sólidos em geral e resíduos sólidos urbanos em particular assim como seu comportamento geomecânico em aterros sanitários afim de um melhor entendimento do assunto.

3.1 RÉSIDUOS SÓLIDOS

Este item trata da definição, dos conceitos, da destinação final, da geração edas características dos resíduos sólidos urbanos.

3.1.1 Definição e Conceitos

Um resíduo pode ser entendido como qualquer material descartado que se origina de atividades comerciais, domésticas e afins. É um produto em que nele não existe mais demanda econômica e conseqüentemente, o mesmo necessita de uma destinação final (TEIXEIRA, 2015).

Na norma NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), define-se como resíduos sólidos, os que resultam de atividades de origem industrial, hospitalar, doméstica, comercial, agrícola, ou de serviços de varrição. Eles se encontram em estado sólido e semissólido. Nesta definição, estão incluídos os lodos que provêm de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle e poluição, assim como determinados líquidos que não podem ser lançados na rede pública ou corpo de água devido às suas particularidades e cujas soluções técnicas são inviáveis economicamente em relação à melhor tecnologia disponível.

A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. Desse modo, de acordo com a NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS, 2004), os resíduos se classificam em classe I e classe II. Os resíduos de classe II por sua vez se dividem duas classes sendo elas a classe II A e a classe II B. Os resíduos que se enquadram na classe I são considerados como perigosos tendo características que os identificam tais como a inflamabilidade, a toxicidade, a corrosividade, a patogenicidade e a reatividade. Os resíduos de classe II são chamados resíduos não perigosos, os da classe II A (não inertes) não se enquadram na classe I e na Classe II B. Eles são reconhecidos por serem biodegradáveis, combustíveis e solúveis em água. Resíduos de classe II B, por fim, abrangem resíduos inertes e não perigosos.

Entre os vários tipos de resíduos, destacam-se os resíduos industriais, os de serviços de saúde, os portuários e aeroportuários, os lodos de estações de tratamento de água e esgoto, os rejeitos estéreis de mineração e os resíduos sólidos urbanos (RSU) cuja composição varia para população dependendo da situação socioeconômica e das condições de hábitos de vida de cada um.

Tapahuasco (2009), define resíduos sólidos urbanos (RSU) como restos inúteis, indesejáveis ou descartáveis, oriundos de atividades domésticas. Os mesmos se apresentam sob estado sólido, semissólido ou semilíquido (com conteúdo líquido insuficiente para que o mesmo possa fluir livremente).

De acordo com a NBR 8419 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), os chamados resíduos sólidos urbanos (RSU) vulgarmente denominados como lixo urbano pertencem à classe II e são resultantes da atividade doméstica e comercial dos centros urbanos excetuados os resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos. Boscov (2008) afirma que esses tipos de resíduos têm uma destinação especial para a qual não há contribuição importante da geotecnia.

3.1.2 Destinação final dos RSU

As técnicas mais utilizadas para a destinação final de resíduos sólidos urbanos no Brasil é a sua disposição em lixões que também são conhecidos como vazadouros a céu aberto. Fora os lixões, se nota a presença de aterros controlados e aterros sanitários além das técnicas de incineração e de compostagem que não são de uso comum no país.

Serão apresentados abaixo os conceitos que envolvem cada técnica utilizada na destinação dos RSUs produzidos pela população Brasileira começando pela técnica de triagem e compostagem, depois disso, terá um comentário sobre o método de incineração de lixo, o método de disposição de resíduos em lixões, aterros controlados e os aterros sanitários serão tratados separadamente no item 3.1.3 por ser ambientalmente o mais correto.

3.1.2.1 Usinas de Triagem e Compostagem

De acordo com a Federação Estadual de Meio Ambiente (2006), em usinas de triagem, uma separação prévia é feita para determinar quais materiais têm potencial de serem reciclados, quais podem ser compostadas e quais são rejeitos. Depois de feito isso, os materiais recicláveis passam por uma prensa para, depois, serem enfardados e armazenados onde ficam até a sua comercialização posterior. Os rejeitos, quanto a eles, são encaminhados em valas de rejeitos por não haver a possibilidade de aproveitá-los. Por fim, a matéria orgânica é encaminhada para uma usina de compostagem, onde ela se vê submetida a um processo de decomposição aeróbica pela ação de organismos biológicos em condições físicas e químicas adequadas. O produto final da compostagem é um composto orgânico que pode ser utilizado em paisagismo entre outros.

A NBR 13591 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996), define uma usina de compostagem como um pátio dotado de equipamentos eletromecânicos destinados a auxiliar no tratamento de frações orgânicas de resíduos domiciliares. Eles são utilizados para a separação manual de diversos materiais que compõem o lixo.

A compostagem é então entendida como uma técnica baseada na reciclagem da parcela orgânica dos resíduos sólidos urbanos transformando-os em substância com aplicação mais nobre com o objetivo do preparo da fração orgânica a fim de favorecer a ação de agentes biológicos.

3.1.2.2 Método de Incineração

A incineração é um processo de redução da massa e do volume do resíduo através de uma combustão controlada (NASCIMENTO, 2007). Ela faz uso de altas temperaturas em fornos para queimar correntes de resíduos que entram em combustão completa. O que garante o tratamento de sanitário além da destruição de componentes orgânicos e minimiza a presença de resíduos combustíveis em cinza volante.

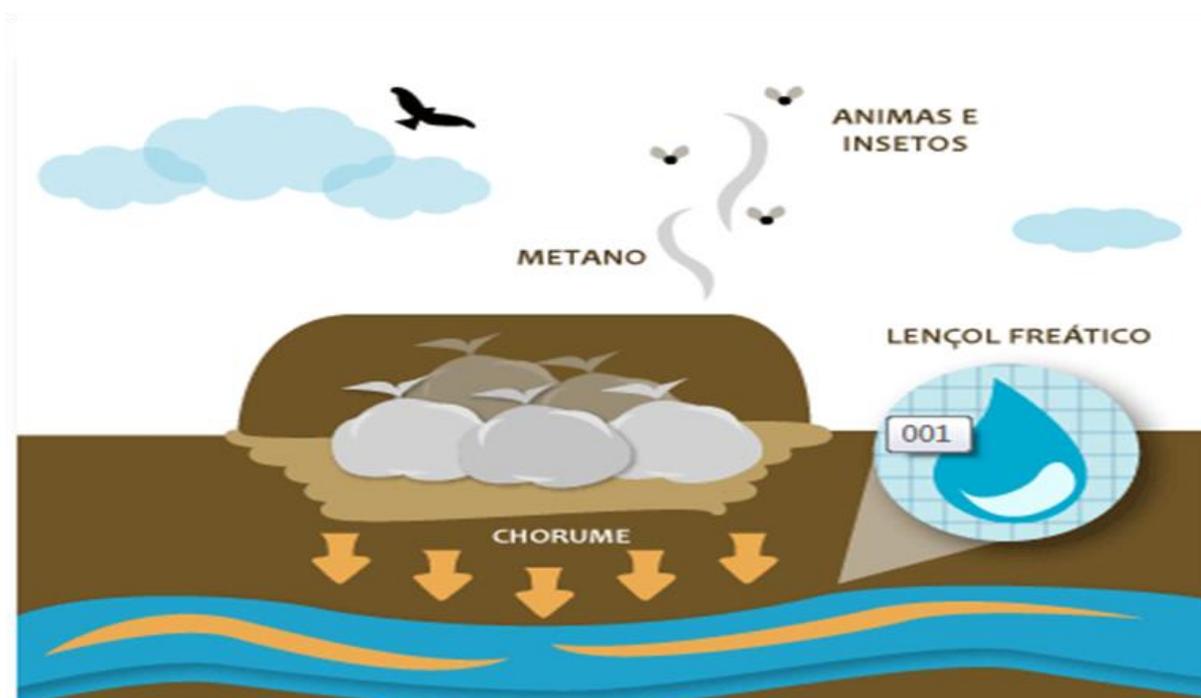
3.1.2.3 Lixão ou Vazadouro a “céu aberto”

Esta técnica não é considerada adequada para disposição final de resíduos. A sua maior característica é a descarga do resíduo diretamente no solo sem que haja nenhuma medida de proteção ambiental ou à saúde pública.

Este método de destinação é desprovido de critérios técnicos e de uma engenharia capaz de mitigar os impactos ambientais além de constituir um risco inerente à saúde pública da população com a proliferação de vetores de doenças, a geração de mau cheiro e, sobretudo a poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas através da geração de chorume, definido como sendo um líquido de coloração escura, de cheiro desagradável e de alto potencial poluidor produzida pela decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos sólidos urbanos (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2006).

Na figura 3, aparece uma representação esquemática de um lixão onde se vê o chorume contaminando a água subterrânea por falta de camada de impermeabilização na base do resíduo. Além do mais, a falta de manutenção e o mau cheiro contribuem na atração de aves e animais.

Figura 3.1 – Representação esquemática do Lixão



(fonte: AMBIENTAL SUSTENTÁVEL, 2012)

3.1.2.4 Aterros Controlados

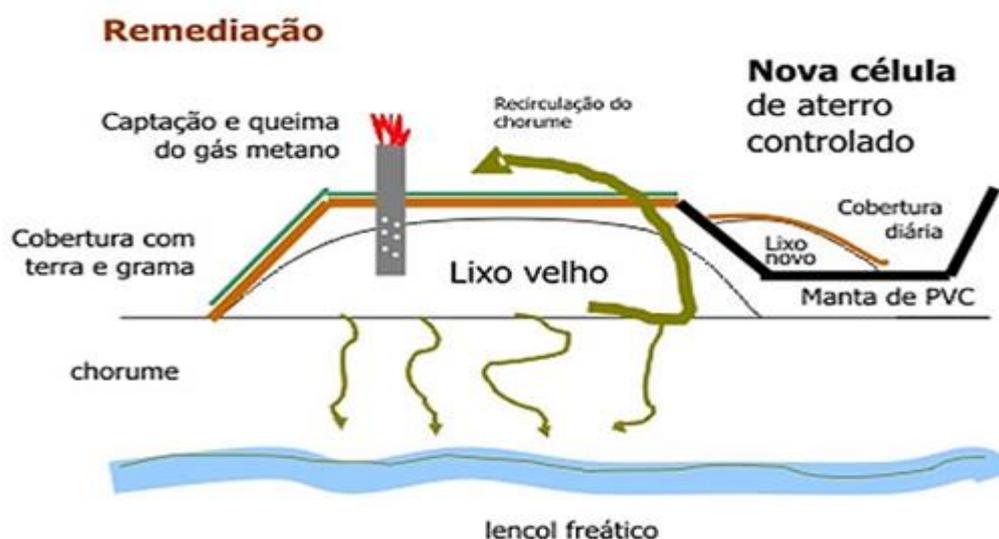
O uso de aterros controlados foi uma solução rápida encontrada para dar resposta a quantidades cada vez maior de resíduos gerados e que os municípios não conseguiram tratar. São consideradas como locais intermediários entre lixões e aterros sanitários.

Segundo a norma NBR 8849 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992 2), o aterro controlado de resíduos sólidos urbanos é uma técnica de disposição que tem como objetivo evitar danos causados à saúde humana e à segurança apaziguando impactos ambientais. Os princípios de engenharia são utilizados neste método no confinamento de resíduos sólidos cobrindo-os com uma cobertura diária de terra natural ou saibro para que o lixo não seja exposto e, conseqüentemente, atraia animais.

O aterro controlado pode ser definido como uma espécie de remediação a antigos lixões onde há novas técnicas de engenharia implantadas como a captação e a queima do gás metano e a colocação de uma cada impermeável para a disposição de resíduos futuros em uma nova célula. O aterro controlado é preferível ao lixão, porém sua qualidade ainda é inferior em relação ao aterro sanitário (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2006).

A figura 4 abaixo ilustra a remediação de um antigo lixão com o surgimento da nova célula de aterro controlado.

Figura 3.2 – Representação esquemática do Aterro Controlado



(fonte: AMBIENTAL SUSTENTÁVEL, 2012)

3.1.3. Aterro Sanitário

O aterro sanitário é um método ambientalmente correto mais utilizado na disposição final dos resíduos. Os itens a seguir tratam da definição, da construção e operação de um aterro sanitário.

3.1.3.1. Definição

De acordo com a norma NRR 8419 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), o aterro sanitário, diferentemente ao lixão e aterro controlado, utiliza técnicas e princípios de engenharia para confinar os resíduos em menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada trabalho ou em menores intervalos caso necessário sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente.

Apesar de ser o método mais simples de destinação de resíduos sólidos e o mais utilizado no mundo, o aterro sanitário exige cuidados especiais e técnicas a serem seguidas desde o preparo da área até a sua operação e monitoramento (DANTAS, 2007).

O aterro deve preferencialmente possuir uma vida útil superior a dez anos prevendo se ainda seu monitoramento geotécnico após seu fechamento. No processo de decomposição dos resíduos, ocorre a liberação de gases e percolados muito poluentes exigindo cuidados muito importantes ainda na fase de projeto como a impermeabilização da base do solo, a implantação de um sistema de drenagem de percolados e de gases suscetíveis de contaminar o lençol freático, o solo e o ar.

3.1.3.2. Construção e Operação

Os métodos construtivos e as respectivas sequências operacionais de um aterro sanitário dependem da topografia do terreno escolhido para a implantação do aterro, da profundidade do lençol freático bem como da jazida com o material adequado para a cobertura dos resíduos.

Segundo Dantas (2007) e Tchobanoglous et al. (1993), existem três métodos principais de se construir um aterro sanitário, são eles: a) o método de rampas; b) o método de trincheira; e c) o método de área.

No método de rampa é utilizado principalmente quando o terreno apresenta uma topografia acidentada, onde o resíduo será depositado conforme a declividade existente fazendo o recobrimento necessário no final de cada dia e prosseguindo até a célula em construção ficar no mesmo plano de topo do declive na parte superior. Esta operação continua até ocupar toda a área escolhida resultando no final em uma área plana que poderá no futuro ser utilizada jardins públicos, praças e parques (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

No método de trincheira é utilizado o terreno plano que é escavado em valas de dois a três metros de profundidade. Esta profundidade pode atingir valores superiores a três metros dependendo da profundidade do lençol freático. O método aproveita o material escavado da própria vala para servir de cobertura do próprio aterro.

Durante o período de disposição do resíduo em trincheira, ele deve ser compactado dentro da vala e coberto no final de cada dia com uma camada de solo entre 20 e 30 centímetros sendo que a camada final de cobertura deve ter espessura mínima de 50 centímetros e elevada acima da superfície natural do terreno a fim de compensar a acomodação do mesmo quando da decomposição do lixo (DANTAS, 2007).

O método de área é o mais usual dos dois métodos precedentes e é empregado geralmente em locais de topografia plana e lençol freático raso. Nessa situação, os desníveis devem ser criados o próprio resíduo. Inicialmente, o resíduo é descarregado em um ponto estratégico do terreno onde deverá ter início o aterro. Os resíduos são então amontoados e compactados formando uma elevação em formato de tronco de pirâmide que é coberta com solo (TCHONANOGLIOUS et al., 1993).

As figuras 3.3; 3.4 e 3.5 mostram uma representação esquemática de aterros sanitário conforme os três métodos construtivos vistos acima.

Figura 3.3 – Construção do aterro em rampa



Figura 3.4 – Construção do aterro em trincheira

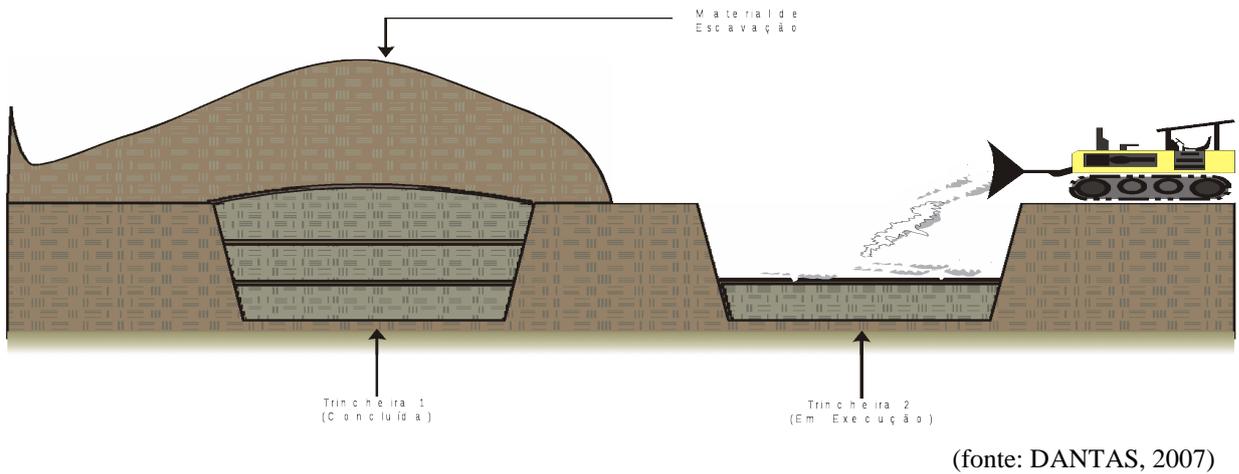
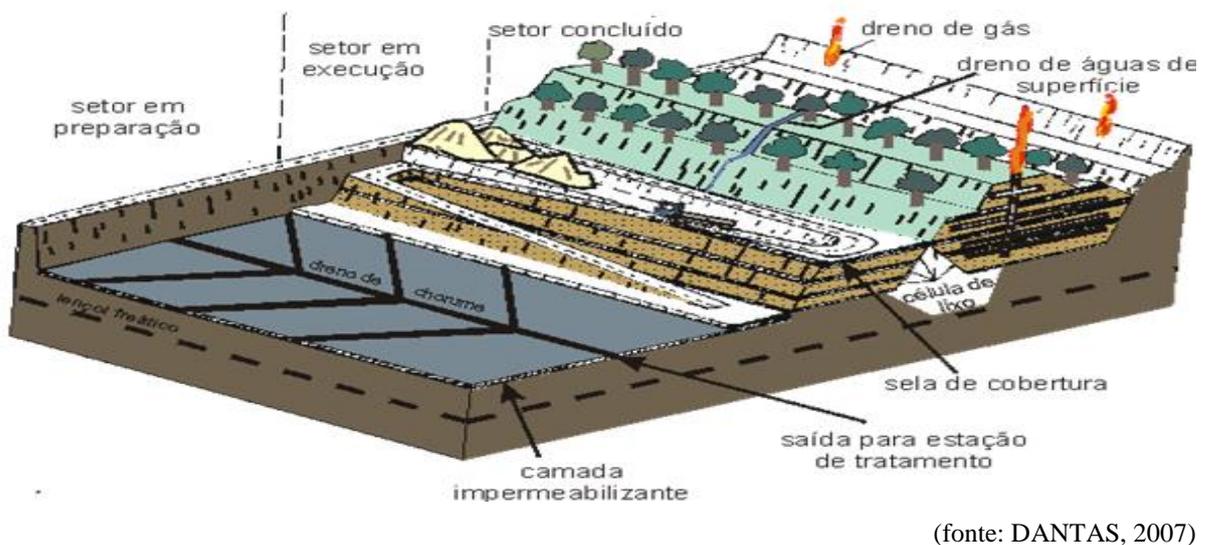


Figura 3.5 – Construção do aterro em superfície



O aterro estudado está sendo construído pelo método de área e conforme comenta Boscov (2008), um aterro sanitário construído no Brasil se desenvolve resumidamente conforme a seguinte operação e sequência construtiva:

- a) prepara-se uma área de disposição recoberta com uma base composta por camadas de impermeabilização e drenagem de percolados e gases
- b) após preparação da base, a construção das camadas de RSU é feita pelo método de rampas depois que o resíduo é descarregado em caminhões basculantes no pé da rampa do talude. Feito isso um trator esteira empurra o lixo de baixo para cima, compactando cada camada com três a cinco passadas em toda sua extensão gerando rampas inclinadas de aproximadamente 1(V):3(H);
- c) diariamente, o lixo compactado pelo trator esteira é recoberto por uma camada de solo com espessura de 15 centímetros,
- d) a construção do aterro é realizada em células com espessura variando entre 2 e 4 metros cada revestidas por camadas de solo na base, no topo e nas laterais com drenagem na base de cada célula;
- e) a sobreposição de uma nova célula de resíduos é feita somente após decomposição aeróbica da célula anterior
- f) após atingir a altura do maciço estabelecida no projeto, o topo do aterro recebe uma cobertura final composta por um sistema de drenagem superficial e de drenos verticais de gases gerados pela decomposição anaeróbica do resíduo.

Como mostra a imagem na figura 3.5 acima, aterros sanitários contam com as estruturas de engenharia capazes de mitigar os impactos ambientais como uma estação de tratamento de efluentes, um sistema de captação e de queima do gás metano que retorna à atmosfera de forma menos poluente.

A camada de impermeabilização da base faz com que os percolados gerados pela biodegradação da matéria orgânica não contaminem o solo e conseqüentemente o lençol freático como foi o caso em lixões e aterros controlados. Esta camada então possui a função estrutural de garantir uma separação segura entre o resíduo depositado no aterro e o subsolo. Esta função impermeabilizante só pode ser desempenhada eficientemente quando a camada de impermeabilização está composta de um solo argiloso de baixa permeabilidade ou com geomembranas sintéticas com espessuras adequadas (FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE, 2006).

Uma ilustração da camada de impermeabilização da base onde será depositado o futuro resíduo está representada na figura 3.6.

Figura 6 – Impermeabilização da camada de base



(fonte: DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA, 2015)

Além da camada de impermeabilização mostrada na figura 3.6, um aterro sanitário deve contar com bom sistema de drenagem interna de percolados e de gases a fim de garantir a estabilidade do maciço do aterro sanitário. Segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente (2006), as redes e as caixas de passagem devem ser monitoradas de maneira rigorosa e o gás metano deve ser queimado imediatamente após a sua produção para evitar a proliferação de mau cheiro no aterro que pode provocar danos à saúde pública.

A figura 3.7 ilustra um sistema de drenagem interna de drenagem de gás e de percolado pronto para coletar e conduzir o líquido percolado reduzindo as pressões destes sobre a massa do resíduo e minimizando o potencial de migração para o subsolo. Segundo a Lei 12305, o sistema deve impedir que o percolado ataque as estruturas do aterro.

Figura 3.7 – Sistema de drenagem de gás e de percolados



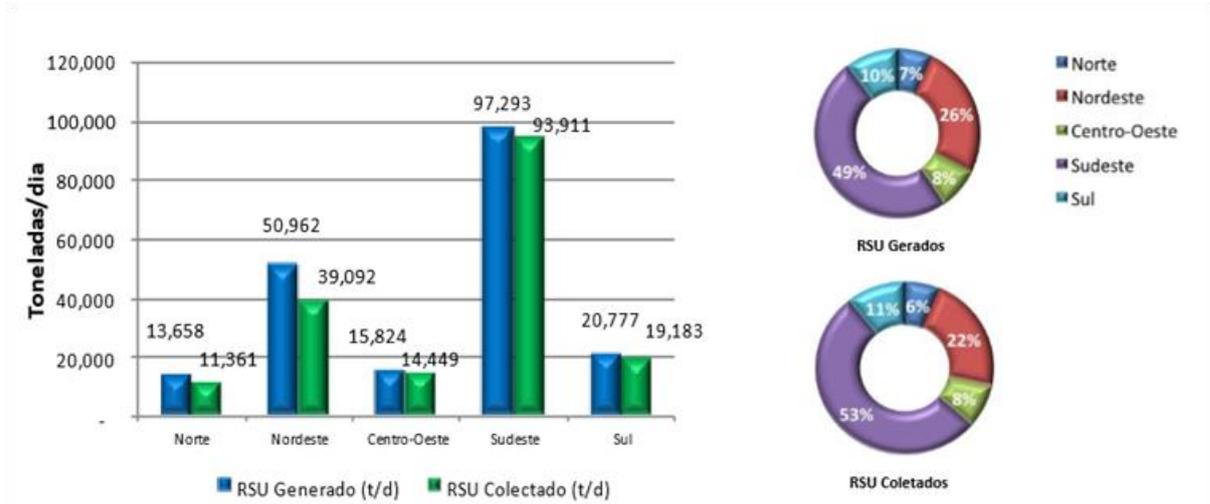
(fonte: DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA, 2015)

3.1.4 Geração de resíduos no Brasil

A ATLAS BRASILEIRO DE GEE E ENERGIA (2013) indica que para o ano 2011, foi gerada aproximadamente 198 mil toneladas de RSU por dia, o equivalente de 62 milhões de toneladas no ano. Do total de resíduos gerados, aproximadamente 180 mil toneladas por dia de resíduos são recicladas, o que equivale a 90% de resíduos reciclados por dia. Dessa quantidade coletada, 17% foram direcionados em lixões, 24% em aterros controlados e 58% em aterros sanitários.

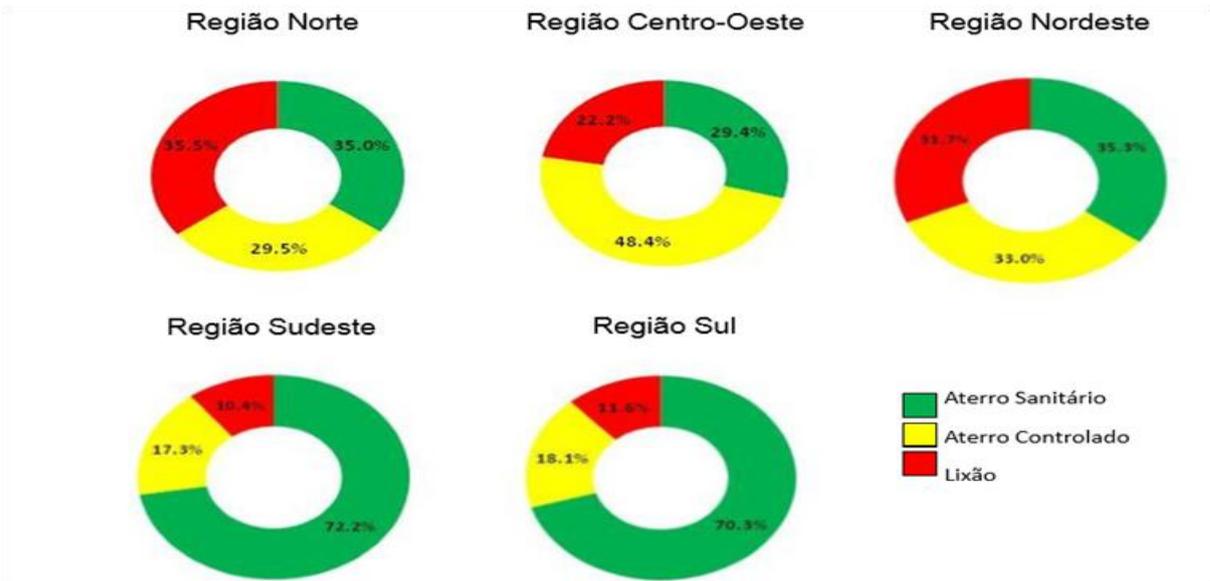
As figuras 3.8 e 3.9 mostram a geração, a coleta, a distribuição assim como a destinação final de resíduos produzidos por região no Brasil em 2011 nas quais se percebe que o aterro sanitário é o destino final de um percentual elevado de resíduos sólidos urbanos.

Figura 3.8 – RSU gerados e coletados em 2011 no Brasil e sua distribuição por região



(fonte: ATLAS BRASIÇEIRO DE GEE E ENERGIA, 2013)

Figura 3.9 – Destinação final de RSU em 2011 no Brasil por região.



(fonte: ATLAS BRASIÇEIRO DE GEE E ENERGIA, 2013)

A partir de 2010, foi estabelecida no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos através da Lei Federal nº 12.305/2010 com a coleta de resíduos previamente separados de acordo com sua constituição e composição devendo ser implementada por municípios como sendo uma forma de encaminhar as ações destinadas ao atendimento do princípio de hierarquia na gestão de resíduos. Em 2013, uma pesquisa realizada pela ABRELPE permitiu projetar que um total de 3459 municípios apresenta iniciativas de coleta seletiva.

Na tabela 3.1, a través da pesquisa realizada pela ABRELPE, aparece o número de municípios com iniciativa de coleta seletiva para os anos 2012 e 2013 enquanto as figuras 3.10 e 3.11 apresentam respectivamente a distribuição percentual de municípios com iniciativa de coleta seletiva de RSU por região e a sua destinação final.

Tabela 3.1 – Municípios com iniciativa de coleta seletiva

Região	Norte		Nordeste		Centro-Oeste		Sudeste		Sul		BRASIL	
	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013
Sim	213	223	678	725	148	158	1.342	1.378	945	975	3.326	3.459
Não	236	227	1.116	1.069	318	309	326	290	243	216	2.239	2.111
Total	450		1.794		467		1.668		1.191		5.570	

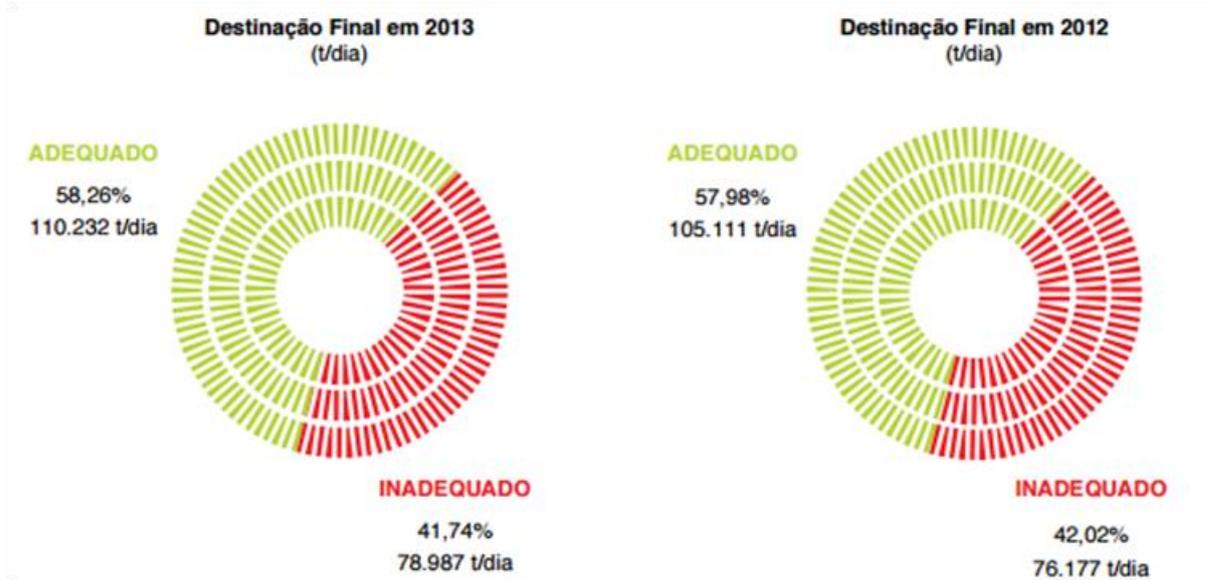
(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA DE RESÍDUOS ESPECIAIS, 2013)

Figura 3.10 – distribuição de municípios com iniciativa de coleta seletiva



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA DE RESÍDUOS ESPECIAIS, 2013)

Figura 3.11 – Destinação final dos RSU coletados no Brasil



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA DE RESÍDUOS ESPECIAIS, 2013)

Como mostra a figura 3.11, entre 2012 e 2013 observou-se um aumento na quantidade de resíduos que tiveram um destino adequado. Isto é, são 58% de RSU com destinação adequada em 2012 contra 58,28% em 2013. O que demonstra que o Brasileiro tem se mostrado cada vez mais preocupado na questão de destinação final de RSU produzidos por sua população.

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS RSU

Nos itens a seguir, serão apresentadas as características inerentes ao RSU. São elas as características físicas e mecânicas.

3.2.1 Características físicas

Neste item será tratado a composição, a estrutura, o peso específico, e o teor de umidade de resíduos sólidos urbanos.

3.2.1.1 Composição gravimétrica dos RSU

A determinação e a composição dos RSU são importantes no sentido que o comportamento global depende de cada um de seus constituintes e da maneira como os componentes interagem entre si. Esta composição não é constante pelo fato de depender da região em que

ela é produzida em função do desenvolvimento, da urbanização e do sistema de coleta seletiva.

Segundo Oliveira (1994), a composição física dos resíduos sólidos urbanos varia de região a região e está ligado intrinsecamente ao nível de desenvolvimento tecnológico, sanitário e cultural de cada região.

A composição física de resíduos sólidos produzido em centros urbanos define o percentual de diversos componentes que compõem o lixo enquanto a composição gravimétrica nós dá uma ideia do poder de compra da população. Isto é, regiões consideradas ricas têm tendência a apresentar um lixo com percentual menor de material orgânica em relação a regiões pobres por causa da menor manipulação de alimentos. Porém, o percentual de vidros e plásticos presentes no lixo tende a ser mais elevado (NASCIMENTO, 2007, p. 45).

Olivier (2003) comenta que, o RSU é um ambiente composto de fases sólida, líquida e gasosa. A fase sólida pode ser dividida em material inerte, deformável e biodegradável. Quanto à fase líquida, ela é composta de resíduos líquidos oriundos tanto da decomposição do resíduo orgânico como da água de percolação proveniente da chuva. A fase gasosa, por fim, contém gases provenientes da decomposição do resíduo orgânico.

A tabela 2 ilustra a composição de diferentes componentes de resíduos sólidos em 10 cidades do mundo contando com a presença de duas cidades Brasileiras.

Tabela 3.2 – Composição de resíduos sólidos em %

Componentes	Cidade / País									
	Bangkok	Pekin	Nairobi	Hong kong	New York	Istanbul	Atenas	Cochabamba	Brasil	
	Tailândia	China	Kenia		USA	Truquia	Grecia	Bolívia	São Paulo	Recife
Metal	1	1	3	3	5	2	4	1	5	2
Papel	25	5	12	3	22	10	19	2	14	15
Plástico	-	1	5	-	-	3	7	3	14	8
Borracha, couro e madeira	7	1	-	7	3	6	4	1	7	-
Têxteis	3	-	-	10	-	3	-	-	3	-
Materiais org.	44	45	74	15	20	61	59	71	51	60
Vidro	1	1	4	10	6	1	2	1	1	2
Outros	19	46	2	22	46	14	5	21	5	13

(fonte: CARVALHO, 1999)

O teor da matéria orgânica existente no resíduo merece uma atenção particular, pois contribui na geração de chorume e gás, no teor de umidade, na resistência ao cisalhamento, no desenvolvimento de pressões neutras dentro do maciço do aterro sanitário, na compressibilidade, na resistência ao cisalhamento e na compressibilidade dos RSU embora o componente do resíduo existente em maior percentual além da matéria orgânica influencie nas características do maciço como um todo (BOSCOV, 2008).

Na tabela 2 acima, observa-se que o teor de materiais putrescíveis nas cidades do mundo é relativamente elevado em relação aos outros componentes dos resíduos sólidos urbanos. Nas cidades de São Paulo e Recife especialmente, a porcentagem da matéria orgânica é de 51 e 60 % respectivamente. Porém as características gerais do maciço terão tendência a se assemelhar ao papel, presente em maior quantidade.

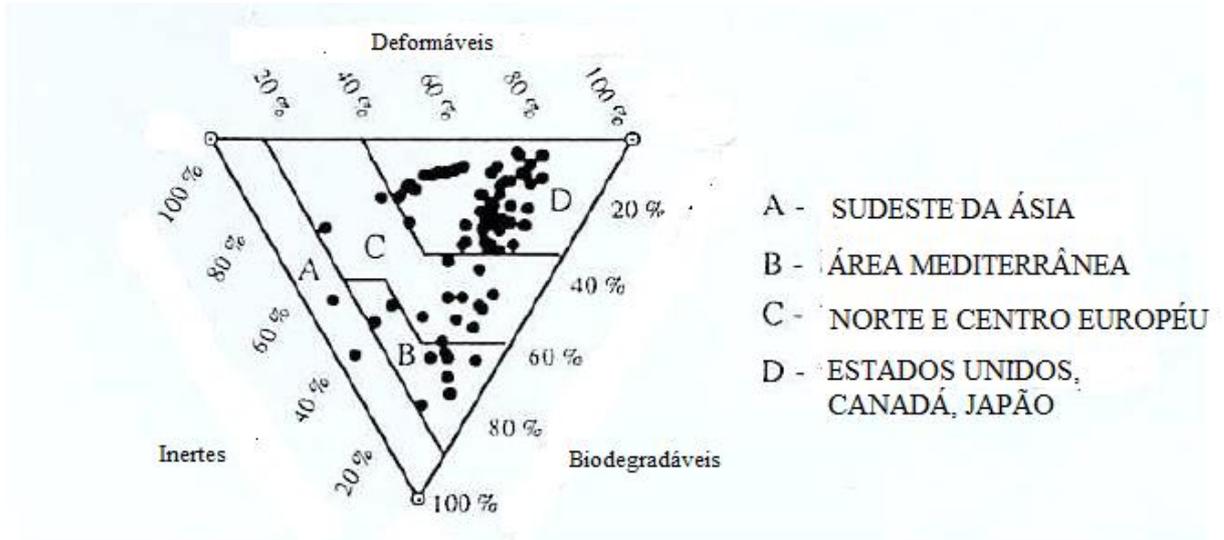
BoscoV (2008) comenta que, em razão da heterogeneidade de resíduos sólidos urbanos, os modelos clássicos utilizados em geotecnia não são adequados para estudá-los. Mas, a fim de superar esta dificuldade, procura-se melhorar a estimativa de seus parâmetros geotécnicos e buscar modelos de comportamentos mais adequados.

Grisólia et al. (1995a) propuseram uma classificação particular de resíduos sólidos dividindo-os em 3 categorias. São elas: a) os resíduos inertes. São reconhecidos por terem um comportamento mecânico semelhante aos solos e sua resistência à deformação é muito elevada fazendo com que sua composição não varie ao longo do tempo. Os exemplos mais comuns são plásticos, madeiras, cerâmicas e vidros. b) os resíduos deformáveis. Sua degradação é muito lenta. Fazem parte desta categoria de resíduos os papeis, têxteis, borrachas, etc. Quando submetidos a uma carga, eles tendem a recalcar instantaneamente por causa da sua macroporosidade. A influência dos materiais deformáveis sobre o conjunto do resíduo depende do tamanho de diferentes elementos constituintes dos resíduos, dos efeitos da compactação, das tensões existentes, etc. c) os resíduos degradáveis. É o caso dos resíduos domésticos cuja degradação influencia na redução do volume do conjunto do resíduo. É importante salientar que o efeito de degradação dos elementos degradáveis depende tanto da quantidade e das características do material degradável como das condições climáticas que governam esse processo de transformação.

Uma representação em forma de diagrama esquemático foi proposta por Grisólia et al. (1995a) para identificar as 3 categorias de resíduos por eles propostas. O que torna fácil

reconhecer resíduos provenientes de diferentes lugares do mundo assim como as correlações entre concentrações de pontos observados e a origem geográfica correspondente aos mesmos como mostra a figura 1.

Figura 3.12 – Diagrama de resíduos proposto por Grisolia et al. (1995a)

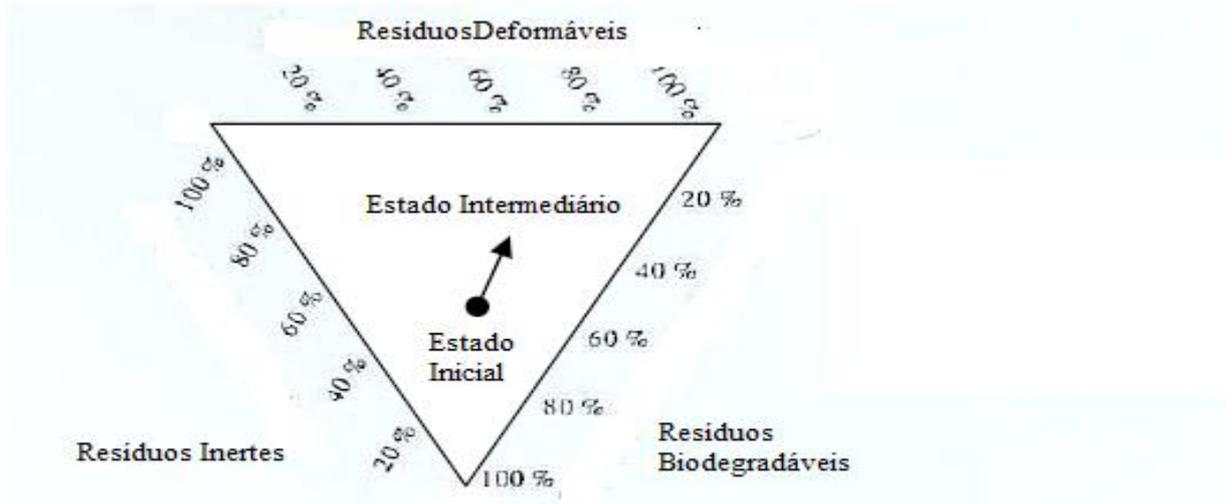


(fonte: adaptado de GRISOLIA ET AL, 1995a)

Este diagrama ilustra a proporção de resíduos em seu estado inicial desconsiderando então os efeitos de mudança de estado de resíduos ao longo do tempo. Estes elementos, ao sofrerem uma degradação tanto física como bioquímica ou sob efeitos de sobrecargas, terão seu comportamento mecânico evoluir mais ou menos rapidamente dependendo da sua constituição até atingir um comportamento que poderia ser assemelhado a um solo comum, o que seria o ideal para Boscov (2008).

Tendo em vista o fato de não considerar os efeitos da degradação, Olivier (2001), sugeriu uma melhoria no diagrama de Grisolia et al. (1995a), mostrando a evolução do resíduo em relação à degradação ao longo do tempo onde o resíduo sai do seu estado inicial até atingir um estado intermediário, conforme mostra a figura 3.13.

Figura 3.13 – Evolução na representação do resíduo no diagrama de Grisolia et al. (1995a)



(fonte: adaptado de OLIVIER, 2003)

3.2.1.2 Peso específico

O peso específico dos RSU é o seu peso em relação ao seu volume. Ele depende de vários fatores entre os quais: os métodos de lançamento e de compactação, a degradação com o tempo, o adensamento ocorrido por sobreposição de camadas, a espessura de cobertura da camada diária, a distribuição granulométrica, a composição gravimétrica, etc.

Atualmente, não existe norma para a determinação do peso específico dos resíduos sólidos urbanos. Este fato faz com que haja fontes variáveis na determinação do mesmo. Porém, na falta de ensaios normalizados, surgiram vários métodos de determinação do peso específico de resíduos sólidos em aterros sanitários.

Boscov(2008) indica que a dificuldade de retirar amostras representativas de para posteriores ensaios laboratoriais, principalmente para resíduos novos faz com que uma das maneiras de determinação do peso específico seja feito *in situ* por retirada do material em uma vala, pesagem do mesmo e determinação do volume da vala a partir do preenchimento da cava devidamente impermeabilizada com manta sintética. Esta técnica se restringe para valas com profundidade entre 2 e 4 metros (NASCIMENTO, 2007). Segundo Olivier (2003), a profundidade em que se encontra o resíduo influencia no seu peso específico. Isto é quanto maior a profundidade do resíduo, maior será o seu peso específico.

A tabela 3.3 apresentada por Marques (2001, p. 25) mostra os diferentes valores encontrados para o peso específico dos resíduos sólidos urbanos por diferentes autores em função do seu grau de compactação.

Tabela 3.3 – Peso específico de resíduos sólidos urbanos (RSU)

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

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

(fonte: MARQUES, 2001, p. 25)

3.2.1.3 Teor de umidade

O teor de umidade compreende a quantidade de água existente na massa dos resíduos sólidos urbanos. Assim como o peso específico do resíduo sólido urbano, o teor de umidade do resíduo em um instante considerado depende da sua composição inicial, do grau de

compactação, da técnica de disposição em aterro sanitário, do grau permeabilidade da cobertura final e do sistema de drenagem e reinjeção de lixiviado.

No mesmo aterro sanitário, pode acontecer que o teor de umidade varie de um ponto a outro, fato que torna relevante a obtenção do perfil de umidade em função da profundidade do maciço (NASCIMENTO, 2007). Segundo Boscov (2008), o teor de umidade é um parâmetro muito importante no desenvolvimento de recalques e pressões naturais além de ajudar na velocidade de degradação de materiais putrescíveis.

A sua determinação pode ser feita através de métodos empregues pela engenharia geotécnica utilizando o peso seco da amostra onde a temperatura na estufa não deve ultrapassar os 70°C para que a matéria orgânica não queime (RIBEIRO, 2007).

O teor de umidade de diferentes componentes de resíduos sólidos urbanos de acordo com Boscov (2008, p. 49) está representado na tabela 4.

Tabela 3.4 – Teor de umidade de diversos componentes de RSU

COMPONENTES	TEOR DE UMIDADE (%)
Metais	19,6
Papel	74,8
Vidro	5,9
Plástico	41,5
Borracha	24,5
Têxteis	55,0
Pedra	12,6
Madeira	69,8
Matéria putrescível	47,0

(fonte: BOSCOV, 2008)

3.2.2 Propriedades Mecânicas dos RSU

O estudo do comportamento mecânico de resíduos sólidos abordado através de ensaios de campo, de laboratório e de monitoramento de estruturas reais é uma tarefa muito complexa devido à dificuldade de incorporar os efeitos da biodegradação dificultada pela escala de tempo e as condições ambientais. Desta maneira os ensaios e monitoramento de campo se tornam mais adequados por considerar as condições reais em que os resíduos se encontram. Porém, torna-se difícil mesmo assim, encontrar os parâmetros para diferentes idades do

resíduo por considerar o comportamento médio da massa como um todo nos resultados (SIMÕES, 2000).

Segundo Olivier (2003), O comportamento mecânico do resíduo sólido urbano conta primeiramente com uma fase de operação durante a qual o maciço do aterro sanitário está sendo construído (instalação da base, construção do sistema de drenagem de gás metano e de lixiviado, compactação da base, instalação da camada impermeável, recebimento de resíduos, compactação, cobertura diária).

Nesta fase, as camadas de resíduos estão sendo submetidas a sobrecargas crescentes. Caso a altura total da camada de resíduo for estabelecida na licença de operação concedida pelo órgão de licenciamento competente, o volume de resíduos irá depender dos recalques observados ao longo desta fase. O período de operação pode ter durar algumas semanas ou ainda levar alguns anos.

A segunda fase é a que ocorre logo que o maciço recebe a sua cobertura final com a vegetação. Nesta fase, as sobrecargas aplicadas a cada camada de resíduo são tomadas como constantes. O resíduo confinado no maciço prossegue sua degradação e cabe ao responsável pelo empreendimento garantir a drenagem e o tratamento dos efluentes assim e a estabilidade da camada de cobertura que sofre os efeitos de recalques. Olivier (2003) reforça que este período de pós-operação pode ter uma duração de 30 anos contados a partir da colocação da cobertura vegetal no maciço do aterro sanitário.

Depois deste período, o maciço as taxas de recalques não comprometem na estabilidade do aterro; o maciço então é considerado estabilizado sem possibilidade de ocorrência de futuros recalques significativos. Deste modo acrescenta-se a estas duas primeiras fases uma terceira que pode ser chamada de período pós-gestão onde a área poderá ser reaproveitada afim de elaboração de novos projetos.

Ensaio de laboratórios convencionais podem servir na avaliação de propriedades mecânicas de resíduos com partículas de pequenas dimensões cujo comportamento mecânico se assemelha ao dos solos. No que se refere às partículas com grandes dimensões, é necessário modificações tanto nos procedimentos de ensaio como nos equipamentos. A execução de ensaios em aterros experimentais apresenta-se então como opção mais adequada para

determinação de parâmetros mecânicos de resíduos cujo comportamento mecânico não for similar ao dos solos (MARQUES, 2001).

Nesse item, as propriedades mecânicas a serem consideradas no comportamento de aterros sanitários de resíduos sólidos conforme Manassero et al. (1996) são a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade dos resíduos. Essas duas características dependem da composição, das propriedades de seus constituintes e das suas variações com o tempo devido à degradação. Normalmente utiliza-se os procedimentos da mecânica dos solos. Porém, no caso de resíduos sólidos, o comportamento mecânico muito diferente de solos comuns leva à busca de modelos de análise próprios como o índice de vazios elevado resultando em uma compressibilidade volumétrica muito elevada, a presença de distintas partículas dentro dos resíduos cuja maioria é frágil e deformável, a variação das propriedades dos materiais e o seu processo de decomposição com o tempo.

3.2.2.1 Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento apresentada na literatura varia consideravelmente com valores do coeficiente de atrito entre 10 a 53° e a coesão, por sua vez, apresenta valores entre 0 e 67 Kpa. Esta larga dispersão de dados em ensaios torna difícil estimar os valores da coesão e do ângulo de atrito de resíduos sólidos com maior precisão (KONIG E JESSBERGER, 1997).

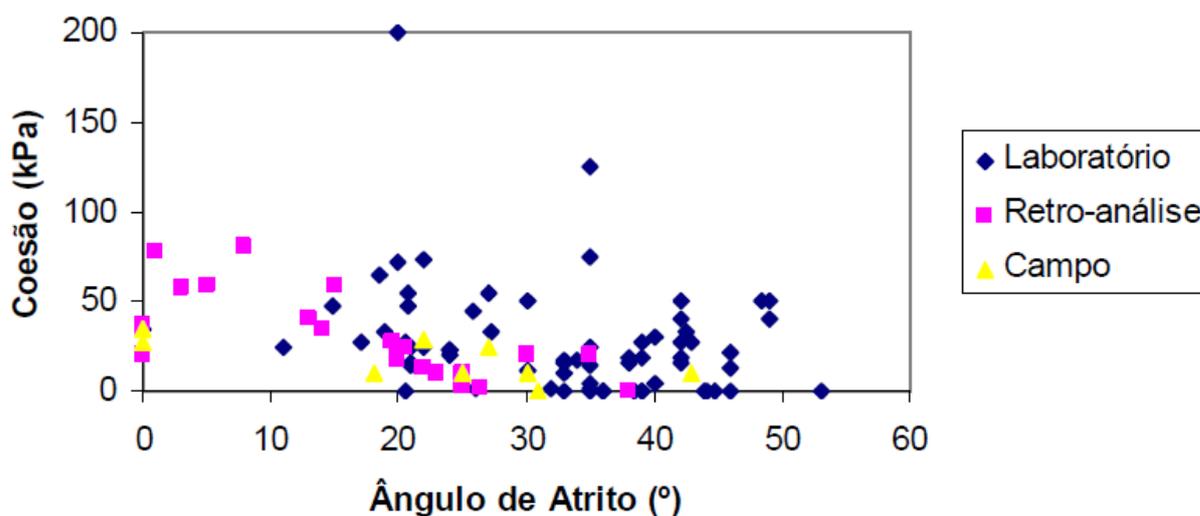
Tradicionalmente, esses parâmetros são determinados por ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais, em dispositivos de grande dimensão, ensaios em campo, ou através de retro análise (OLIVIER, 2003).

Segundo Marques (2001), vários autores tem utilizado ensaios de cisalhamento direto em ensaios laboratoriais partindo do pressuposto de que também são válidas as leis de Mohr-Coulomb para resíduos sólidos urbanos. Porém, muitos baixos valores nos resultados observados são contraditórios em relação às observações de campo de taludes estáveis de aterros de resíduos. Desta maneira, faz se necessário estabelecer um critério de deformação para que os parâmetros de resistência fiquem claramente definidos.

A partir da dispersão de dados obtidos da literatura, Simões (2004) montou pares de coesões e ângulos de atrito contendo resultados dos estudos de campo, de laboratório e de retroanálise. A larga dispersão observada na figura 3.14 se deve às diferentes composições de resíduos

sólidos urbanos utilizados nos ensaios assim, aos diferentes equipamentos que foram empregados e à falta de padronização de processos utilizados nos ensaios.

Figura 3.14 – Parâmetros de resistência dos RSU



(fonte: SIMÕES, 2004)

Jessberger e Kockel (1994) constataram que os parâmetros de resistências são extremamente dependentes do nível de deformações impostos aos mesmos.

A tabela 5 apresenta um resumo de valores da coesão e do ângulo de atrito observado por diversos autores na literatura conforme o aterro, o tipo de ensaio e a idade do resíduo utilizado na realização do mesmo.

Observa-se que o valor máximo do ângulo de atrito tende ser mobilizado para deformações menores a 20 % enquanto isso, na coesão, não é observado um valor máximo que caracterize a condição limite do material. É necessário, dessa forma, definir um estado crítico correspondente a uma deformação fixada a priori (10, 15, 20%) a fim de descobrir uma lei de ruptura para o caso de resíduos sólidos urbanos que podem sofrer deformações consideráveis sem demonstrar sinais de instabilidade.

Tabela 3.5 – Resultados obtidos de ensaios de resistência

REFERÊNCIA	ATERRO	c (kPa)	ϕ (°)	OBSERVAÇÕES
LUKAS (1985)	Chicago (EUA)	39,0	34,5	ensaio triaxial CU
	Edmonton (Canadá)	23,0	24,0	resíduo triturado (cisalhamento direto)
LANDVA & CLARK (1990)	Blackfoot (Canadá)	16,0	33,0	resíduo antigo (cisalhamento direto)
		19,0	39,0	resíduo antigo (cisalhamento direto)
	Hantsport (Canadá)	0	36,0	resíduo antigo (cisalhamento direto)
JESSBERGER & KOCKEL (1991)	-	22,0	46,0	ensaio triaxial em amostras de grande dimensão ($\epsilon = 20\%$)
KÖLSCH (1993,1995)	-	0	26,4	resíduo novo (cisalhamento direto)
		0	17,7	resíduo antigo (cisalhamento direto)
DEL GRECO & OGGERI (1993)	Chivasso (Itália)	16,0	21,0	$\gamma=5,0 \text{ kN/m}^3$ (cisalhamento direto)
		24,0	22,0	$\gamma=7,0 \text{ kN/m}^3$ (cisalhamento direto)
GABR & VALERO (1995)	Pioneer Crossing (USA)	0-27,5	20,5-39,0	resíduo antigo (cisalhamento direto)
SHIMIZU (1996)	Tokyo Port (Japão)	16,8	34,0	resíduo antigo (ensaio triaxial CU)
		15,0 a 91,0	8,0 a 20,4	resíduos antigos (ensaio triaxial CD)
		26,0 a 36,0	4,3 a 6,4	resíduos antigos (ensaio triaxial UU)
		48,0 a 116,0	30,0 a 47,0	resíduos novos (cisalhamento direto)
CARVALHO (1999)	Bandeirantes (São Paulo)	42,0 a 60,0	21,0 a 27,0	resíduos antigos (ensaio triaxial CD)

(fonte: MARQUES, 2001)

3.2.2.2 Compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos

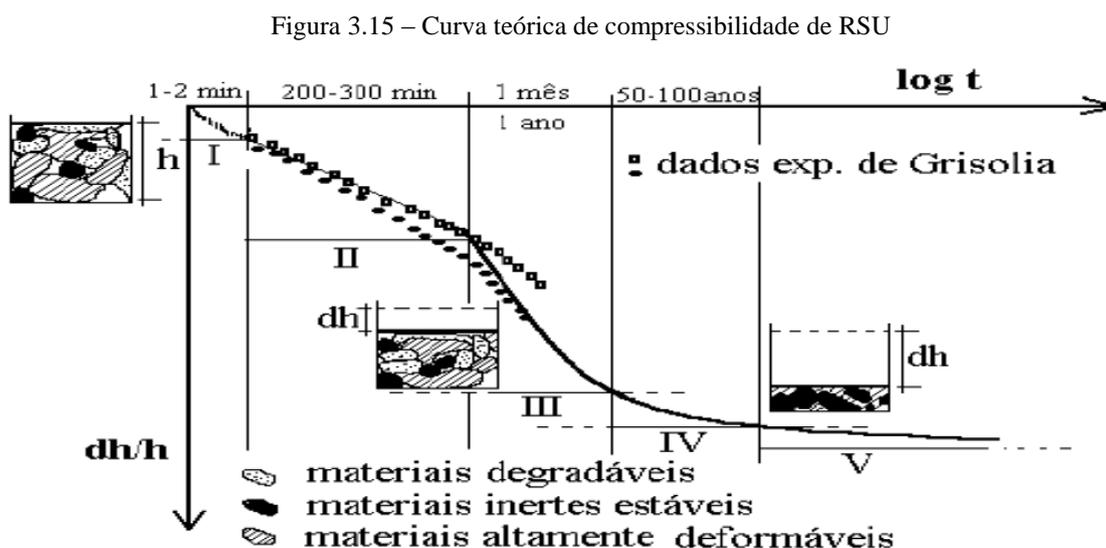
Assim como a resistência ao cisalhamento, a compressibilidade é uma propriedade mecânica muito importante para a previsão do comportamento dos aterros sanitários. Ela é muito influenciada pela composição e o estado de alteração do resíduo bem como pelo comportamento individual de cada componente.

A previsão de recalques em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos permite a avaliação da integridade das camadas de cobertura assim como do sistema de drenagem de gás e de lixiviado além de possibilitar a avaliação do desempenho desses empreendimentos após fechamento. A elevada compressibilidade dos aterros sanitários, apesar de ser, por um lado,

problemática, por outro, prolonga a vida útil do aterro, possibilitando deposições adicionais de resíduos e o reaproveitamento das áreas após o encerramento da disposição (NASCIMENTO, 2006).

Os autores como Sowers (1973), Yen e Scanlon (1975), Boscov (2008), e Manassero et. al. (1996) mencionaram alguns mecanismos favoráveis ao recalque nos aterros municipais. São eles: a) a solitação mecânica: distorção, dobra, esmagamento, quebra e rearranjo de materiais; b) o ravinamento interno: erosão e migração de materiais finos para os vazios entre partículas maiores; c) alterações físico-químicas: corrosão, oxidação e combustão dos materiais; d) a biodegradação: degradação causada por micro-organismos, transferindo massa da fase sólida para as fases líquida e gasosa; e) a dissipação das pressões neutras de líquidos e gases: esta fase é semelhante ao adensamento de solos comuns onde ocorre uma expulsão de líquidos e gases do interior do maciço; f) o mecanismo “*creep*”: é a deformação lenta quando aplica-se uma carga constante por cause de fenômenos viscosos. Uma última causa responsável pelo mecanismo de compressão dos maciços sanitário é a interação de todos os mecanismos acima citados.

Para explicar os diversos mecanismos de recalques ocorridos em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, Grisolia e Napoleoni (1996) apresentaram uma curva de compressibilidade teórica conforme mostra a figura 3.15.



(fonte: GRISOLIA e NAPOLEONI, 1996)

As cinco fases presentes na figura 14 representam respectivamente: a) o recalque instantâneo por meio da compressão mecânica devido ao decaimento de macroporos e à deformação de resíduos altamente deformáveis;b) o recalque mecânico primário onde há compressão contínua e ajuste de resíduos;c) a deformação mecânica secundária devido ao arraste e à decomposição inicial da matéria orgânica;d) a decomposição primária do material orgânico;e) a deformação residual, mecânica e biológica.

Após a disposição no aterro, o resíduo apresenta uma estrutura porosa que pode variar bastante de forma e volume. Com o acréscimo das sobrecargas, ocorre uma acentuada redução de volume dos materiais altamente deformáveis e deslocamento dos componentes inertes estáveis (Fase II). Mantendo a sobrecarga constante, ocorrem deformações do tipo “*creep*” e transformações da matéria orgânica (Fase III), até que estabeleçam, no fim do processo, contatos diretos entre os elementos inertes estáveis.

Comparando com maciços de solos, os recalques ocorridos em maciços de aterros sanitários são muito mais elevados. Alguns autores fizeram uma avaliação de recalques ocorridos em maciços de aterros sanitários em relação à sua espessura total inicial e chegaram a valores variando entre 10 e 50% conforme mostra o quadro 1 elaborado por Boscov (2008).

Quadro 3.1 – Recalques em maciços sanitários

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

(fonte: BOSCOV, 2008)

Marques (2001) comenta que a compressibilidade observada em resíduos sólidos urbanos confinados em um maciço de aterro sanitário pode ser dividida em três etapas: a compressão inicial, a compressão primária e a compressão secundária. Cada etapa de compressibilidade de resíduos sólidos tem duração e um comportamento mecânico diferente.

Na fase de compressão inicial, observam-se recalques instantâneos que tiram sua origem na aplicação de cargas externas. Ela é, normalmente, associada à compressão inicial de espaços vazios e partículas devido às cargas sobrepostas.

A compressão primária ocorre em um período de 30 dias após aplicação do carregamento. A origem desta compressibilidade é dada à drenagem de gases e líquidos percolados (SOWERS 1973). Vale lembrar que nesta etapa os resíduos ainda não estão estabilizados e a compressão deverá prosseguir devido à deformação mecânica e à perda de massa no interior do maciço.

Quanto à compressão secundária, ela ocorre por dois processos; a degradação da matéria orgânica e a deformação lenta dos componentes dos resíduos (BOSCOV,2008).

O capítulo 4 trata de modelos de previsão de recalques já existentes na literatura particularmente os que foram obtidos a partir da sua formulação (logarítmica, exponencial, hiperbólica, etc.).

4. MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES

4.1 INTRODUÇÃO

Os modelos de previsão de recalques que existem na literatura consideram algumas variáveis envolvidas no processo de recalque de resíduos sólidos urbanos. Abreu (2000) afirma que não existe nenhum modelo de previsão de recalque que considere todas as variáveis envolvidas no processo de recalque de resíduos sólidos.

A concepção de modelo que considere todos os mecanismos relevantes na previsão de recalques através de observações de campo e ensaios laboratoriais não é tarefa fácil. Isto é, a definição de um modelo adequado assim como seus parâmetros de cálculo são os principais fatores limitantes nas análises de deformabilidade de aterros sanitários (OLIVEIRA, 1992). Deste modo, algumas simplificações deverão ser incluídas nos modelos de previsão de recalques que podem ser empíricos ou teóricos dependendo da forma de abordagem do problema adotado (DENARDIN, 2013).

É considerado como bom modelo de previsão de recalques de aterros sanitários, aquele que, obrigatoriamente é: a) dimensionalmente coreto; b) definido a partir de um menor número de parâmetros com significado físico ou ao menos relacionado a propriedades devidamente conhecidas; c) capaz de destacar a influência dos fatores relevantes e fornecer previsões realistas e precisas tanto quanto possível, em longo prazo (ISSMGE, 1997).

Segundo Edit et al.(1990) a identificação dos mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento de recalques em aterros sanitários é fundamental na interpretação do comportamento mecânico da massa do resíduo para propor modelos de previsão de recalques e realizar as simulações a longo prazo.

Da mesma forma que existem modelos para previsão de recalque em aterros sanitários, novos modelos vêm sendo propostos quando já existe um histórico de recalques observado em um aterro sanitário através de marcos superficiais ou piezômetros nele instalados. Mas, o problema geralmente ocorre tanto na interpretação como na utilização dos mesmos (BOSCOV, 2008).

Segundo Olivier (2003), existe, nos dias atuais, certo número de previsão de recalques em aterros sanitários que pode ser classificado em três critérios em função de:

- a) sua origem;
- b) sua formulação; e
- c) seu método de resolução

A origem desses modelos é baseada em leis tiradas da mecânica dos solos, leis reológicas, leis empíricas e modelos biológicos. A formulação de um modelo de previsão de recalques pode ser logarítmica, exponencial, hiperbólica, etc. O método de resolução que dá origem a um modelo de previsão de recalques pode ser analítico, geométrico ou numérico.

Neste trabalho, serão utilizados somente modelos de previsão de recalques existentes em função da sua formulação. Desse modo, serão apresentados três modelos logarítmicos, Quatro modelos exponenciais e mais três modelos tirados de leis correntes.

A seguir, são apresentados modelos encontrados na literatura.

4.2 FORMULAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE RECALQUES

A formulação de modelos de previsão de recalques está subdividida em modelos logarítmicos, exponenciais e outros modelos tirado de leis correntes conforme apresentado a seguir:

4.2.1 Modelos logarítmicos

Os modelos logarítmicos encontrados na literatura são:

- a) o modelo de Sowers (1973)
- b) o modelo de Yen e Scanlon (1975)
- c) o modelo de Bjarngard e Edgers (1990)

Nos itens abaixo estão apresentadas as características inerentes a cada modelo logarítmico.

4.2.1.1 Modelo logarítmico de Sowers (1973)

Sowers (1973) foi o primeiro a propor um modelo de previsão de recalques em maciços de aterros sanitários baseado na teoria de adensamento da mecânica dos solos proposta por

Terzaghi (1943). Esta transposição se limita em condições edométricas (assentamento de uma coluna de resíduo em que as deformações laterais são desprezíveis), ou seja, dos resíduos suficientemente afastados dos taludes.

Sua formulação é simples e conta com um número de parâmetros reduzidos. Segundo Olivier (2003), 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.

Este modelo considera as parcelas de compressão imediata, primária e secundária. O recalque total é a soma dessas parcelas. Os recalques primários são relacionados ao incremento de carga e ocorrem de forma rápida (cerca de um mês) e com pequeno ou nenhum acréscimo de pressão neutra. 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).

Secundo o autor e Marques (2001), os índices de compressão primária (C_c) e secundária (C_s) dependem do índice de vazio inicial e para cada índice de vazio, existem diferentes possíveis valores em função do potencial de alteração físico-química e bioquímica. Quanto maior for a quantidade de matéria orgânica e quanto mais favoráveis forem as condições ambientais para os processos de decomposição, 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), onde e_0 representa o índice de vazios inicial.

Tendo em vista a dificuldade de avaliar o índice de vazio inicial de resíduos, são utilizados os coeficientes de compressão primária e secundária representados por C'_c e C'_s e são determinados por retroanálise, a partir de ensaios de carga ou assentamentos medidos na própria superfície do aterro. Eles correspondem respectivamente ao declive das curvas $\Delta H/H$ versus logaritmo de tensão σ e $\Delta H/H$ versus logaritmo de tempo t . Os coeficientes de compressão primária e secundária podem ser obtidos pelas equações 4.1 e 4.2.

$$C'_c = \frac{C_c}{1 + e_0} \quad (\text{Equação 4.1})$$

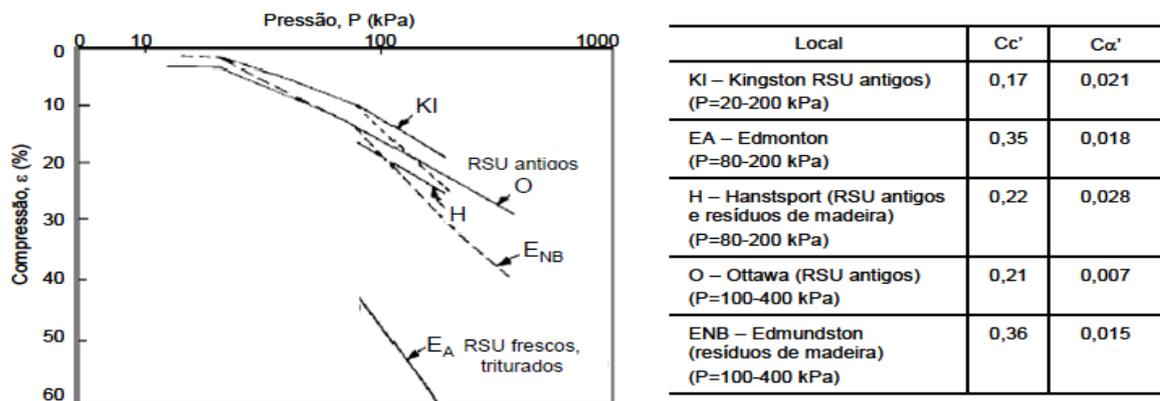
$$C'_s = \frac{C_s}{1 + e_0} \quad (\text{Equação 4.2})$$

Sendo:

C'_c	=	Coefficiente de compressão primária
C_c	=	Índice de compressão primária
C'_s	=	Coefficiente de compressão secundária
C_s	=	Índice de compressão secundária
e_0	=	Índice de vazios

Ensaio realizado por Landva & Clark (1990) em um consolidômetro de grandes dimensões ($d = 47$ cm) a partir de amostras de resíduos sólidos provenientes de diferentes aterros sanitários do Canadá resultaram em valores do coeficiente de compressão primária C'_c variando entre 0,2 e 0,4. Para coeficiente de compressão secundária C'_s , os valores variaram entre 0,002 e 0,03. Os autores constataram ainda que os valores do coeficiente de compressão primária C'_c eram superiores em resíduos com maior teor de matéria orgânica. Na figura 15 estão os valores encontrados pelos autores.

Figura 4.1 – Ensaio de compressão em resíduos de aterros no Canadá



(fonte: LANDVA & CLARK, 1990)

Mais tarde, Landva *et al.* (2000) apresentaram resultados obtidos em um consolidômetro com diâmetro de 60 cm. As características das amostras ensaiadas e os valores do coeficiente de compressão primária C'_c são apresentados no Quadro 2e os resultados em termos de coeficiente de compressão secundária C'_s variam entre 0,010 e 0,016.

Quadro 4.1 – Resultados de ensaios laboratoriais

Origem/Tipo do RSU	γ_0 (KN/m ³)	W (%)	C' _c
Aterro; 6 anos; 24,7% < 4,75 mm; 52,6% plástico e papel	10,4	15,6	0,17
Aterro; 3 anos; 46,8% < 12,5 mm; 35,6% plástico e papel	8,9	18,8	0,22
Artificial; 66% < 12,5 mm; 10% plástico e papel	7,9	53,1	0,22
Misto; 59% < 12,5 mm; 20,5% plástico e papel	7,6	51,3	0,24
Misto; 59% < 12,5 mm; 20,5% plástico e papel	7,6	51,3	0,23
Misto; 43,5% < 12,5 mm; 17,6% plástico e papel	8,2	-	0,21

(fonte: LANDVA et al, 2000),

A compressão primária pode ser obtida pela equação 4.3.

$$S_p = C'_c * H_0 * \log \frac{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad (\text{Equação 4.3})$$

Onde:

S_p	=	Recalque ao final da compressão primária
C'_c	=	Coefficiente de compressão primária
H_0	=	Espessura inicial da camada
σ_{v0}	=	Pressão vertical inicial
$\Delta\sigma_{v0}$	=	Acréscimo de pressão vertical

A compressão secundária, por sua vez, pode ser representada pela equação 4.2.

$$S_s = C'_\alpha * H_0 * \log \frac{t_2}{t_1} \quad (\text{Equação 4.4})$$

Onde:

S_s	=	Recalque devido à compressão secundária
C'_α	=	Coefficiente de compressão secundária
H_0	=	Espessura inicial da camada
t_1	=	Tempo inicial da compressão secundária
t_2	=	Tempo de estimativa dos recalques

4.2.1.2 Modelo logarítmico de Yen & Scanlon (1975)

Yen & Scanlon (1975) fizeram o monitoramento de três aterros sanitários experimentais localizados na vizinhança de Los Angeles em Califórnia por um período de 9 anos. Esses aterros receberam resíduos domésticos e uma quantidade mínima de resíduos oriundos da construção civil. As áreas desses aterros eram de 77.000 m², 324.000 m² e 89.000 m² com espessura de resíduos entre 6 e 38 metros. Os objetivos da pesquisa realizada pelos autores eram: a) examinar sistematicamente os dados com tendências comuns na relação recalque *versus* tempo nos próximos anos após a construção dos aterros; b) deduzir a partir de dados de monitoramento de campo os fatores que influenciam no processo de recalques; e c) fornecer uma base de dados eficiente a partir do qual futuros modelos de previsão de recalques podem ser testados.

Os autores propuseram um modelo empírico para a determinação da velocidade de recalques. Os mesmos observaram que a taxa de recalques decresce linearmente com o logaritmo do tempo e cresce com a altura do aterro. Segundo Marques (2001), as observações e o modelo somente são aplicados para o recalque secundário descartando os recalques imediato e primário considerados por Sowers (1973).

Para definir a origem do tempo, foi proposto o conceito de idade média da coluna de resíduos (t_1). Ele corresponde à metade do tempo de construção do aterro (t_c) e, de modo simplificado, representa a história de construção do aterro (figura 16). O modelo e a idade média do aterro são determinados pelas equações 4.5 e 4.6 respectivamente.

$$m = \frac{\Delta H}{\Delta t} = a - b \log t_1 \quad (\text{Equação 4.5})$$

$$t_1 = t - \frac{t_c}{2} \quad (\text{Equação 4.6})$$

Sendo:

m = taxa ou velocidade de recalques
 ΔH = recalques medidos

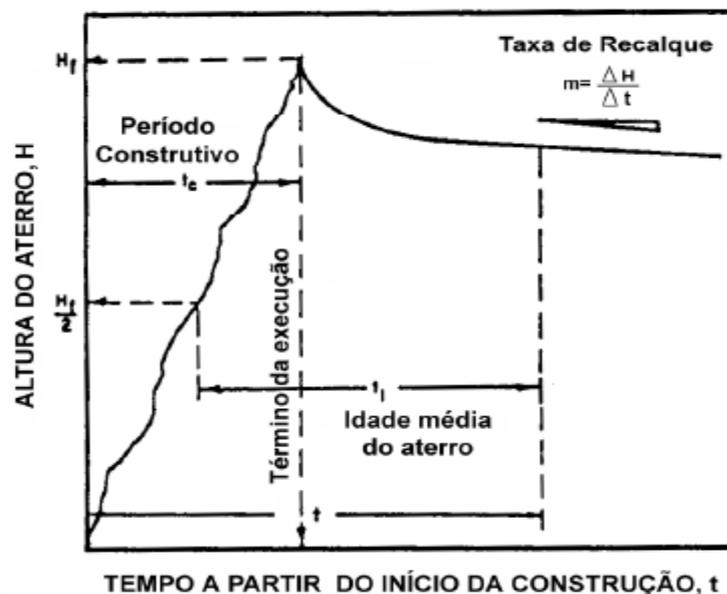
Δt	=	intervalo de tempo entre as leituras
t	=	tempo de início da construção à leitura
t_c	=	tempo de construção do aterro
t_1	=	idade média do aterro
a & b	=	parâmetros do modelo

Os parâmetros a e b devem ser determinados e dependem da altura camada de resíduo $H(t_c)$ e do tempo de construção do aterro (t_c), sendo obtidos por ajuste de mínimos quadrados dos pontos na curva m versus t_1 (figura 17). Mais tarde, a partir de dados de monitoramento e da proposta de Yen & Scanlon (1975), os autores Sohn & Lee (1994) apresentaram um estudo para a determinação desses parâmetros constatando uma relação linear entre eles e a altura do maciço de resíduos $H(t_c)$ conforme mostram as equações 4.7 e 4.8 e a figura 18.

$$a = 0,00095 * H_{t_c} + 0,0985 \quad (\text{Equação 4.7})$$

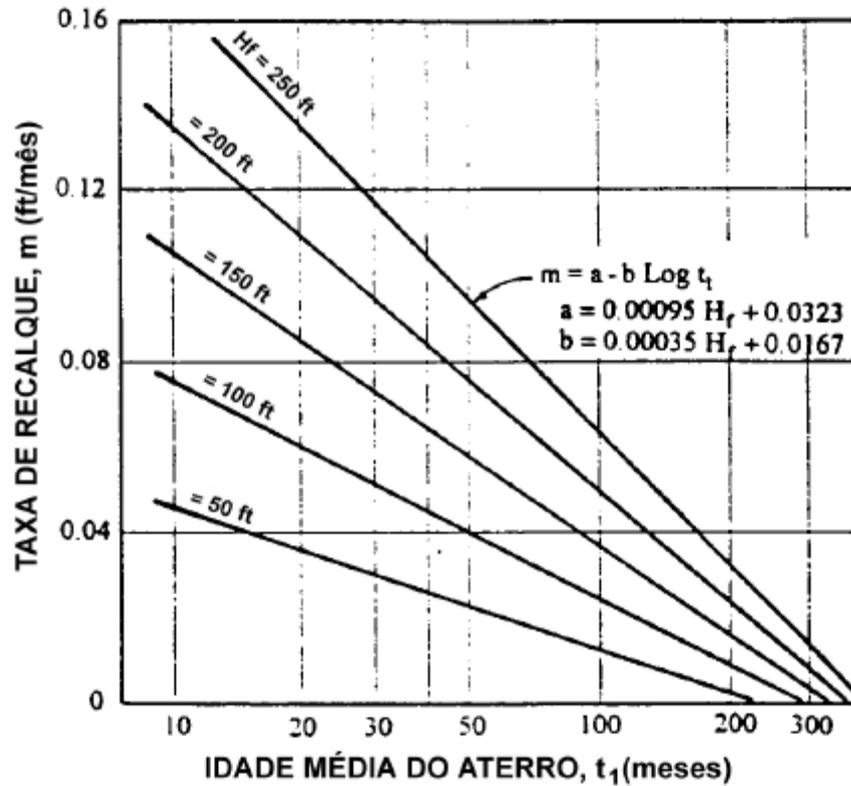
$$b = 0,00035 * H_{t_c} + 0,0985 \quad (\text{Equação 4.8})$$

Figura 4.2 – definição da idade média do aterro



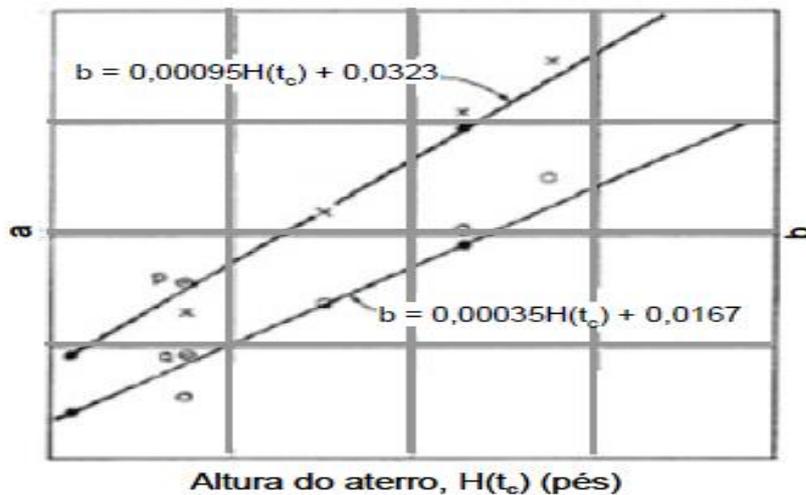
(fonte: adaptado de YEN & SCANLON, 1975)

Figura 4.3 – Variação da taxa de recalques com a altura e a idade média do aterro



(fonte: adaptado de SOHN & LEE, 1994)

Figura 4.4 – Coeficientes a e b em função da altura de resíduos



(fonte: adaptado de SOHN & LEE, 1994)

Uma das limitações deste modelo segundo Olivier (2003) e Gomes (2008) é o fato das velocidades de recalques se tornarem nulas após períodos variando de 200 a 300 meses. Considerando a própria expressão da velocidade de recalques (equação 4.5), a partir de um

período superior a $10^{a/b}$ os recalques se tornam negativos, o que não faz sentido fisicamente. Assim o modelo fica limitado a recalques máximos que podem ser expresso por $\Delta H = b \cdot t_{\text{máx}}$, com $t_{\text{máx}} = 10^{a/b}$.

4.2.1.3 Modelo logarítmico de Bjarngard & Edgers (1990)

Os autores geraram um procedimento empírico de avaliação de recalques a partir do monitoramento e análise de 22 aterros nos Estados Unidos e descobriram que a evolução de recalques ocorre em três fases diferentes conforme mostra a equação 4.9. Os aterros monitorados, segundo Gomes (2008), tinham alturas entre 1,5 e 45 m recebendo resíduos orgânicos e industriais com período de operação variando de alguns meses a 24 anos.

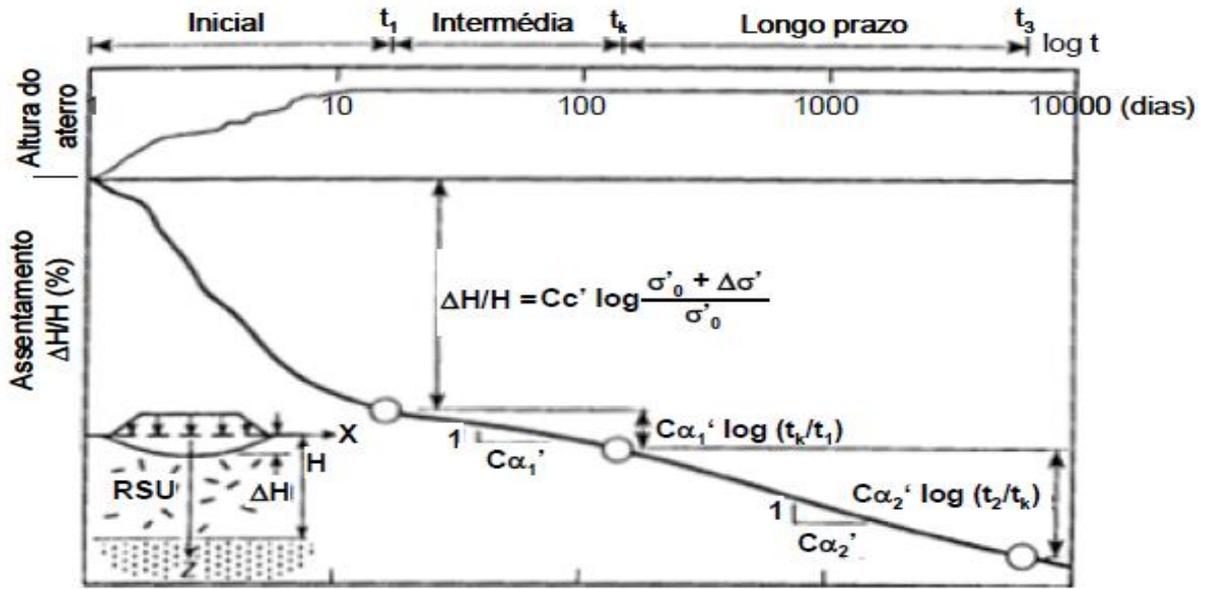
$$\frac{\Delta H}{H} = C'_c \log \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0} + C'_{s1} \log \frac{t_2}{t_1} + C'_{s2} \log \frac{t_3}{t_2} \quad (\text{Equação 4.9})$$

Onde:

ΔH	=	Recalque estimado
H	=	Espessura inicial da camada de resíduos sob análise
$\Delta H/H$	=	Deformação vertical (recalque normalizado)
σ_0	=	Tensão vertical efetiva inicial no meio da camada sob análise
$\Delta \sigma$	=	Acréscimo de tensão vertical no meio da camada sob análise
t_1	=	Tempo, em dias, para a conclusão da compressão inicial
t_2	=	Tempo, em dias, para a conclusão da compressão intermediária
t_3	=	Tempo, em dias, para o qual é feita a previsão de recalques
C'_c	=	Coefficiente de compressão primária
C'_{s1}	=	Coefficiente de compressão secundária intermediária
C'_{s2}	=	Coefficiente de compressão secundária de longo prazo

Os autores consideram a ocorrência de recalques em 3 fases. São elas: a) a fase rápida inicial em que os recalques se devem à compressão dos resíduos e à redução dos vazios sob aplicação de sobrecarga; b) a fase de compressão secundária intermediária devido a interações mecânicas; e c) a fase de compressão secundária de longo prazo que considera os efeitos da biodegradação no maciço de resíduos. As 3 fases estão ilustradas na figura 19.

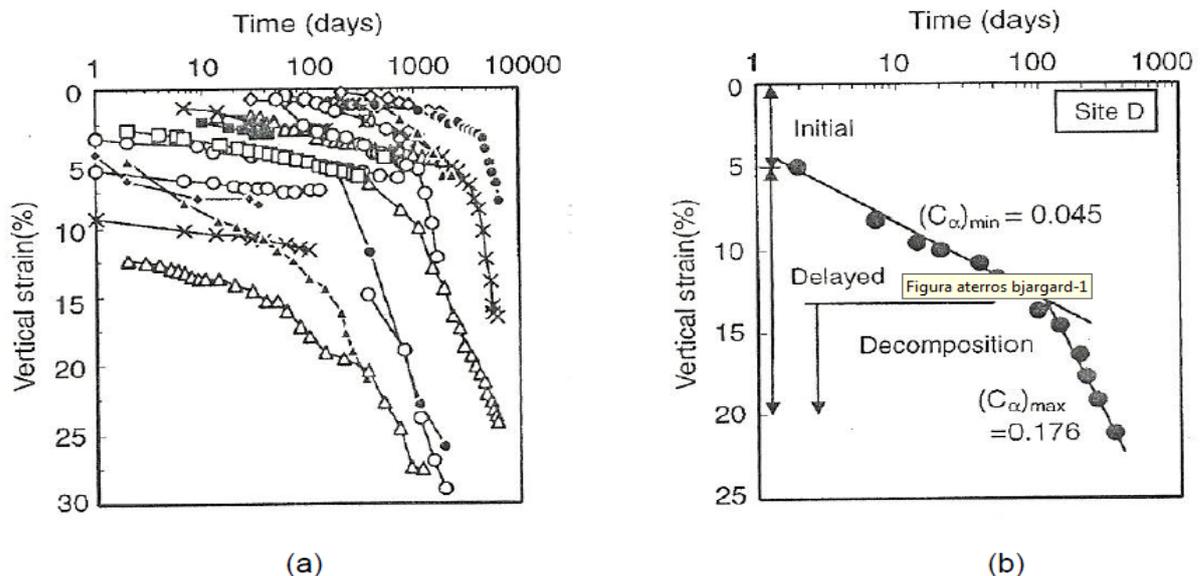
Figura 4.5 – Fases de ocorrência de recalques



(fonte: adaptado de BJARNGARD & EDGERS, 1990)

Após análise de dados de monitoramento, os autores ainda identificaram dois trechos de curvas na compressão secundária, o trecho de compressão intermediária e o trecho de compressão de longo prazo conforme ilustra a figura 19(b). A existência dos coeficientes de compressão primária e secundária elimina a necessidade de conhecer o índice de vazio inicial que, secundo Simões (2000), não é trivial de ser encontrado quando se trata de resíduos sólidos urbanos.

Figura 4.6 – Características dos recalques em aterros dos RSU



(fonte: BJARNGARD & EDGERS., 2002)

A partir de dados analisados, os autores deduziram que os valores do coeficiente de compressão secundária intermediário (C'_{s1}) varia entre 0,003 e 0,038 com média de 0,019 e os valores do coeficiente de compressão secundária de longo prazo varia entre 0,017 e 0,51 com uma média de 0,125 (TAPAHUASCO, 2009).

Embora modelo dispense a necessidade de conhecer o índice de vazão inicial do resíduo (e_0), sua principal limitação, conforme comentam Olivier (2003) e Gomes (2008), é a não definição clara de um critério do tempo inicial. Esse tempo influencia significativamente nos valores dos coeficientes de compressão secundária. Além do mais, o tempo para a conclusão da compressão intermediária (t_2) e o coeficiente de compressão secundária de longo prazo (C'_{s2}) só podem ser determinados por retro análise a partir de dados de monitoramento topográfico de recalques por um período maior do que t_2 . Este período pode durar até um pouco mais de 10 anos tornando a aplicação do modelo limitada na prática. Em condições atuais não é possível pressupor o valor de t_2 (OLIVIER, 2003).

4.2.2 Modelos oriundos de leis exponenciais

Os modelos exponenciais encontrados na literatura são:

- a) o modelo de Gibson & Lo (1961)
- b) o modelo de Asaoka (1978)
- c) o modelo de Gandolla et al (1992)
- d) o modelo de Meruelo (1995)

A seguir estão apresentadas as características inerentes a cada modelo de previsão de recalques tirada de leis exponenciais.

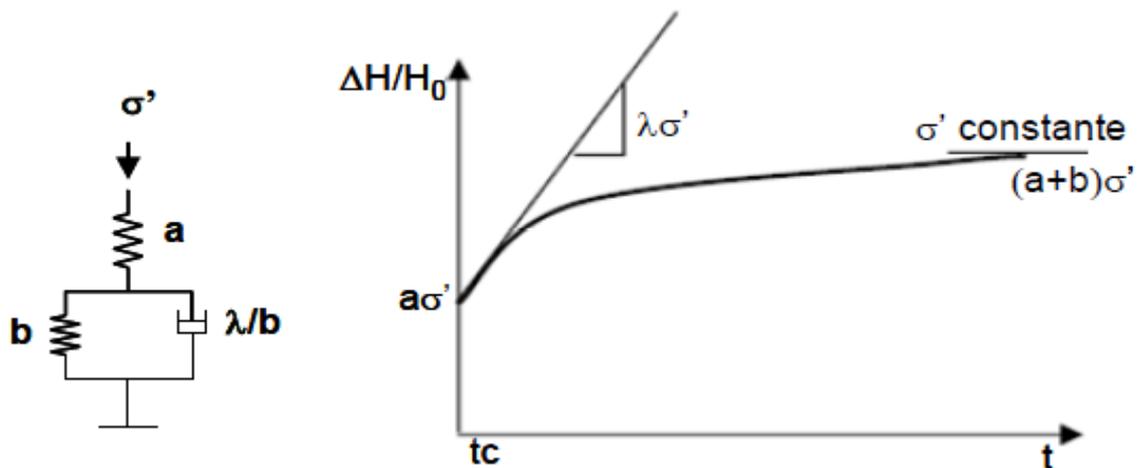
4.2.2.1 Modelo de Gibson & Lo (1961)

Os autores propuseram um modelo reológico muito utilizado para avaliação de recalques primário e secundário em solos orgânicos e turfosos. O modelo reológico de Gibson & Lo (1961) foi adaptado mais tarde por Ranguette et al (1989), que admitem um modelo de comportamento visco-elástico linear.

O modelo associa um elemento de Hooke em série de constante de mola (a) independente da tensão vertical efetiva (σ'). Este elemento de Hooke simula a compressão primária de

resíduos. A compressão secundária, em função do tempo, é representada por um elemento de Kelvin composto por uma mola de Hooke de constante (b) montado em paralelo com um amortecedor de viscosidade (λ/b). No momento de aplicação da tensão vertical efetiva (σ'), somente a mola de Hooke de constante (a) se comprime instantaneamente; a compressão do elemento de Kelvin sendo atrasada pela presença do amortecedor. O modelo pode ser representado pela figura 21.

Figura 4.7 – Representação do modelo proposto por Gibson & Lo (1961)



(fonte: RANGUETTE et al, 1989)

A relação entre a tensão vertical efetiva e a deformação desenvolvida por Gibson & Lo (1961) pode ser expressa pela equação 4.10.

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta H(t)}{H} = \sigma' \left[a + b \left(1 - e^{-\frac{\lambda(t-t_0)}{b}} \right) \right] \quad (\text{Equação 4.10})$$

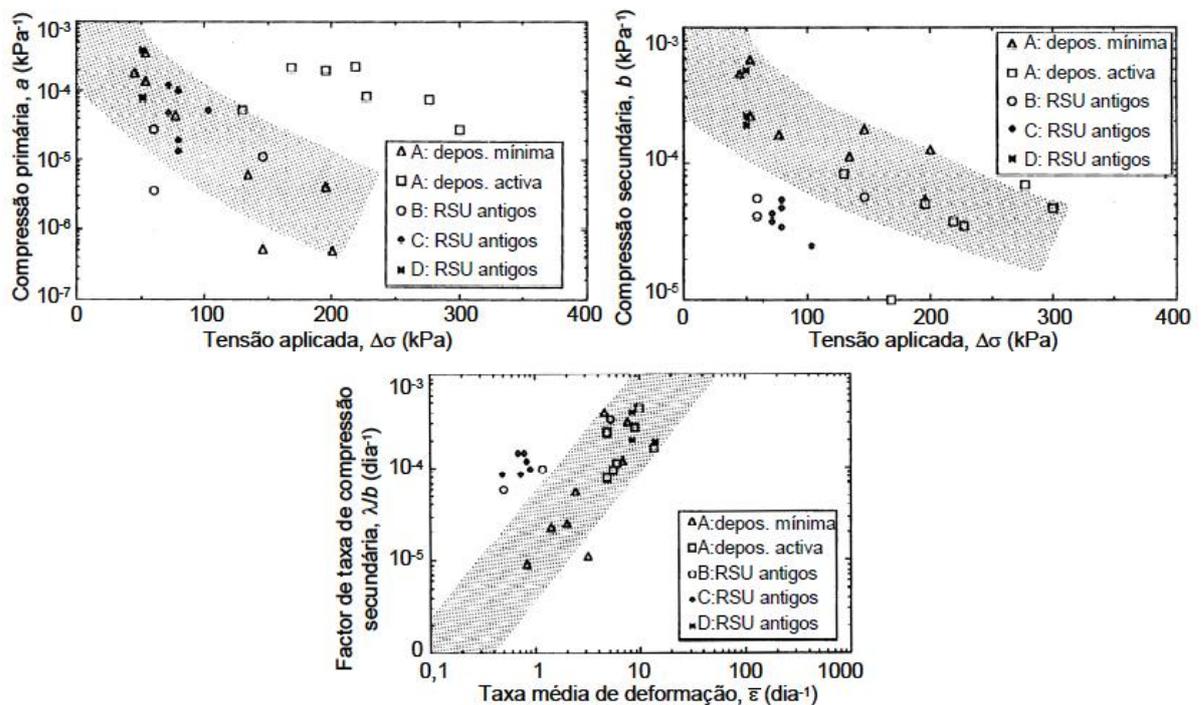
Onde:

$\varepsilon(t)$	=	Deformação
ΔH	=	Recalque no instante (t)
H	=	Altura inicial do aterro
σ'	=	Tensão vertical efetiva
a	=	Coefficiente de compressão primária equivalente ao módulo edométrico E_s (kPa^{-1})
b	=	Coefficiente de compressão secundária (kPa^{-1})

λ/b	=	Taxa de compressão secundária
t	=	Tempo decorrido após aplicação da tensão vertical efetiva
t_0	=	tempo de aplicação da tensão vertical efetiva

Os valores dos parâmetros a , b e (λ/b) foram obtidos por Edil *et al* (1990) a partir de um estudo realizado em 4 aterros sanitários de diferente altura, idade, estado de tensão e tempo de monitoramento de recalques obtendo valores representados na figura 22.

Figura 4.8 – Valores de parâmetros a e b e (λ/b)



(fonte: EDIL et al, 1990)

Os coeficientes de compressão primária e secundária e a taxa de compressão secundária apresentaram respectivamente valores seguintes: $5,11 \times 10^{-7} < a < 3,8 \times 10^{-4} \text{ Kpa}^{-1}$, $1,00 \times 10^{-4} < b < 5,87 \times 10^{-3} \text{ Kpa}^{-1}$ e $9,2 \times 10^{-5} < \lambda/b < 4,9 \times 10^{-3} \text{ dias}^{-1}$. Edil et al. (1990) chegaram à conclusão que: a) os parâmetros a e b tendem a diminuir com o aumento da tensão vertical; b) os valores de a são mais elevados e os de b reduzidos em resíduos novos; c) a taxa de compressão secundária (λ/b) aumenta com o aumento da taxa de deformação.

Contudo, devido às incertezas referentes à idade média e à saturação parcial dos resíduos assim como à tensão vertical efetiva, concluiu-se que este modelo apresenta resultados menos satisfatórios que os apresentados pela lei de potência (OLIVIER, 2003).

4.2.2.2 Modelo de Asaoka (1978)

Asaoka (1978) propôs um método observacional de previsão de recalques em solos compressíveis baseada sobre a análise de recalques observados em intervalos de tempos iguais (Δt) variando de 30 a 100 dias.

Marques (2001) comentou o sucesso no uso do método observacional de Asaoka (1978) por Manassero & Pasqualine (1993) para previsão de recalques em aterros sanitários. Para chegar neste resultado, fez se necessário uma série de $(n+1)$ leituras de recalques (ΔH) obtidos sob carga constante em intervalos constante de tempo (Δt) conforme indica Asaoka (1978). Estas observações são plotadas em gráficos, tendo o recalque (ΔH_n) como ordenada e o recalque (ΔH_{n-1}) como abscissa. Os pontos devem formar uma linha reta sendo a inclinação e o intercepto iguais às constantes β_0 e β_1 , correspondente à formulação básica do método na equação 4.11.

No entanto, segundo Olivier (2003), a restrição que apresenta o modelo reside na necessidade de manter esses intervalos de tempo, o que na prática, devido a imprevistos, esta condição é difícil de ser cumprida em caso de medição em um longo período de tempo. Isso força o usuário a interpolar os recalques medidos correndo riscos de prováveis erros suscetíveis de surgirem.

$$\Delta H_j = \beta_0 + \beta_1 \Delta H_{j-1} \quad (\text{Equação 4.11})$$

Onde:

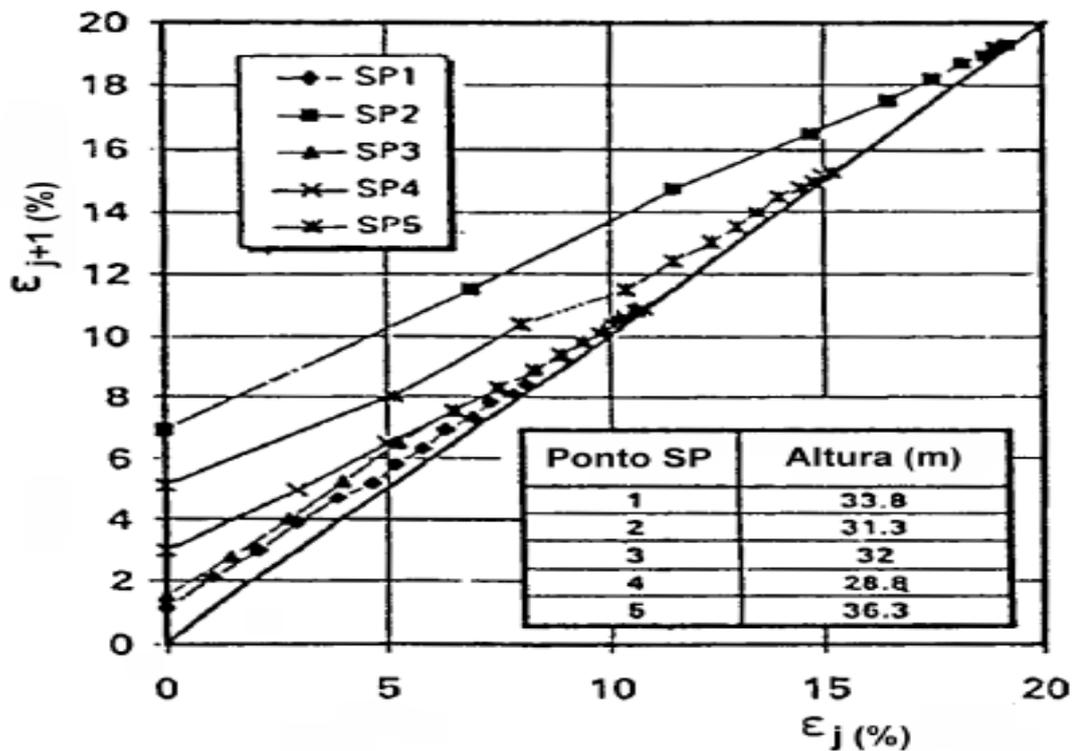
ΔH_j = Recalque no tempo t_j ($t_j = j \Delta t$, $j = 1, 2, 3, \dots, n$)

O recalque final pode ser calculado graficamente (interseção da reta plotada com a reta $\Delta H_n = \Delta H_{n-1}$) ou analiticamente pela equação 4.12.

$$\Delta H_{ult} = \frac{\beta_0}{[1 - \beta_1]} \quad (\text{Equação 4.12})$$

A aplicação do método por Marques (2001) em dados observados em intervalos de tempos iguais a 50 dias no aterro de Bandeirantes em São Paulo, onde os recalques estão apresentados em termo de deformações, está ilustrada na figura 23.

Figura 4.9 – Aplicação do método observacional



(fonte: MARQUES, 2001)

4.2.2.3 Modelo de Gandolla et al (1992)

Um dos objetivos do estudo realizado por Gandolla *et al* (1992) no aterro sanitário de Sottoceneri (Suíça) foi de elaborar uma fórmula analítica que pudesse representar a evolução dos recalques secundários ao longo do tempo respeitando a condição de recalque nulo que coincide com o final da construção do maciço do aterro (t_c) com o final dos recalques tendendo a um valor assintótico como mostra a figura 24.

O modelo é o resultado de um estudo realizado em lisímetros de 1 metro de diâmetro e 3 metros de altura composto de resíduos triturados e misturados com lama durante o período de um mês. Este resíduo era composto essencialmente de 60% de matéria orgânica, 55% e 7% de lama. Segundo Olivier (2003) a massa de resíduo confinada em um dos lisímetros foi submetida a uma tensão vertical de 57 kPa os dois restantes sendo submetidos a uma pequena

carga que não teve influência na cinética dos recalques. O monitoramento dos recalques se estendeu para um período de 6 anos. Com base nos resultados obtidos, os autores verificaram que o recalque em 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 13. A velocidade dos recalques é obtida por derivação da equação 4.13 em relação ao tempo (equação 4.14)

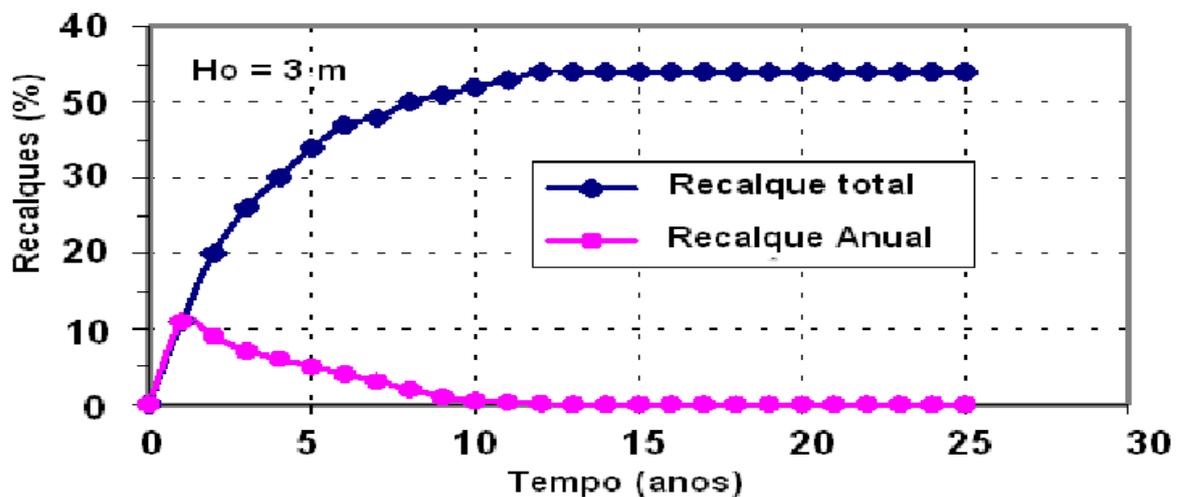
$$\frac{\Delta H}{H} = a. (1 - e^{-kt}) \quad (\text{Equação 4.13})$$

$$v = a.k.H.e^{-kt} \quad (\text{Equação 4.14})$$

Sendo:

ΔH	=	Recalque
H	=	Altura inicial do aterro
v	=	Velocidade dos recalques
a e k	=	Constantes
t	=	Tempo (em meses)

Figura 4.10 – Verificação recalques versus tempo



(fonte: GANDOLLA et al, 1992)

Gandolla et al (1992) determinaram os valores das constantes a e k equivalentes a 0,4416 e 0,0077 respectivamente. Neste modelo, a constante a corresponde ao recalque unitário final enquanto o parâmetro k se refere à taxa de decomposição, decrescente com o tempo.

Os valores dos coeficientes obtidos, após estudo, corresponderam a um recalque de cerca de 45% em relação à sua altura inicial dos resíduos confinados nos lisímetros. Considerando a deformação máxima observada em aterros sanitários (de 10 a pelo menos 35%), os valores propostos por Gandolla et al (1992) parecem elevados tendo em vista a taxa de recalques reais observada geralmente em campo (OLIVIER, 2003).

Os autores ainda sugerem que a aplicação deste modelo a aterros sanitários possa ser efetuada calculando o recalque de cada camada de resíduo levando em consideração o tempo decorrido desde a sua disposição e o recalque total será dado a partir do somatório de cada camada.

O aspecto positivo deste modelo de previsão de recalques segundo Simões (2000) é a simplicidade dos parâmetros necessários para sua definição. São eles: a porcentagem da matéria orgânica e sua biodegradabilidade; a massa; o volume e as densidades iniciais e finais dos resíduos. O modelo se diferencia da proposta de Gibson & Lo (1961) por seus termos não envolverem a tensão vertical efetiva aplicada.

4.2.2.4 Modelo de Meruelo (1995)

Este modelo foi desenvolvido pelas universidades de Cantábria (Espanha) e católica de Valparaiso (Chile) entre 1994 e 1995 no aterro sanitário meruelo (na região norte da Espanha) que deu origem ao nome do modelo. Marques (2001) comenta que o monitoramento de recalques foi efetuado no aterro por um período de 3 anos com resíduo composto basicamente por matéria orgânica (52%), papéis (21,9%), plástico (8,3%), metais (3,2%), vidros (4,1%), e outros materiais (10,5%). Os resíduos sofreram uma compactação feita através de rolos compactadores atingindo pesos específicos estimados entre 8,0 e 10,0 KN/m³. Os recalques observados durante o período de monitoramento foram de 3 a 4% da altura total inicial do maciço de resíduos e as taxas de assentamento decrescentes ao longo do tempo.

O modelo considera apenas a parcela da biodegradação anaeróbica que é fundamental nos recalques de longo prazo por meio de parâmetros com significado físico, mas não leva em consideração a parcela do “*creep*”, também importante na determinação de deformações de longo prazo. Este modelo se aplica melhor a aterros antigos quando não há mais influência

dos mecanismos de dissipação de pressões neutras e de solicitações mecânicas (Bosco, 2006).

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 4.13.

$$\Delta H = \frac{1}{K_h \cdot t_c} \alpha \cdot H \cdot COD \cdot [(1 - e^{K_h t_c}) \cdot (e^{-K_h t} - e^{-K_h t_0})] \quad (\text{Equação 4.15})$$

Onde:

ΔH	=	recalque observado
α	=	coeficiente de perda de massa
H	=	altura inicial do aterro em metros
COD	=	quantidade de matéria orgânica biodegradável presente no resíduo por ano
K_h	=	coeficiente de hidrólise (dia^{-1})
t_c	=	tempo de construção do aterro
t	=	tempo para o qual se deseja prever recalques
t_0	=	idade do aterro no início das medições.

A partir de registro de recalques no aterro sanitário, pode se estimar o valor do coeficiente de perda de massa α (valor constante que depende do tipo de aterro e do resíduo depositados) por retro análise e aferir o valor do coeficiente de hidrólise K_h que pode variar entre 0,1 e 0,0008 dia^{-1} (GOMES, 2008). Denardin (2013) afirma que a hidrólise, mecanismo utilizado pelos micro-organismos para a transformação dos compostos orgânicos mais complexos em compostos simples a fim de facilitar a obtenção de condições favoráveis para a decomposição de resíduos em estágios sucessivos, é apontada como fator limitante para o processo de biodegradação.

4.2.3 Modelos oriundos de leis correntes

São modelos de previsão de recalques encontrados na literatura a partir de leis correntes:

- a) o modelo hiperbólico de Ling et al (1998)
- b) o modelo de Comoulos & Koryalos (1997)
- c) o modelo ISPM “*Incremental Settlement Prediction Model*”

Nos itens abaixo, assim como nos modelos logarítmicos e exponenciais, estão apresentados as características inerentes a cada modelo.

4.2.3.1 Modelo hiperbólico de Ling et al (1998)

Este modelo foi proposto, tendo em vista as limitações do modelo logarítmico de Yen & Scanlon (1975), usando uma função hiperbólica para previsão de recalques em aterros sanitários de resíduos sólidos. Usando os dados de três aterros sanitários (Spadra, Wisconsin e Meruelo), os autores compararam os resultados da aplicação deste modelo com os obtidos a través do modelo de Yen & Scanlon (1975) tendo obtido melhores coeficiente de correlação com o modelo proposto (0,93 a 0,99).

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 (TAPAHUASCO, 2009). A equação proposta pelos autores seguindo a relação recalque tempo é:

$$\Delta H = \frac{t}{\left[\frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{\Delta H_{ult}} \right]} \quad (\text{Equação 4.16})$$

Onde:

ΔH	=	recalque medido entre tempo t_i e t_0
t	=	diferença entre o tempo de interesse e o início da medição ($t_i - t_0$)
ρ_0	=	taxa de recalque inicial ($\Delta H / \Delta t$)
ΔH_{ult}	=	recalque último esperado (tempo infinito)

Segundo Olivier (2003), Gomes (2008) e Tapahuasco (2005), o tempo t_0 pode corresponder ao início das medições e geralmente tomado como igual a zero ($t_0=0$), porém, a função hiperbólica uma flexibilidade para permitir que o t_0 comece em qualquer tempo de interesse

após encerramento. Particularmente, isso é utilizado quando há mudança nas condições de carregamento (sobrecarregamento dos resíduos sobre camadas antigas).

A taxa de recalque inicial (ρ_0) e o recalque último esperado (ΔH_{ult}) podem ser determinados pela transformação da equação 4.16 através da relação $t/\Delta H$ versus t e sendo avaliados em uma análise de regressão linear (Equação 4.17). Os inversos do intercepto e da inclinação fornecem os parâmetros ρ_0 e ΔH_{ult} .

$$\frac{t}{\Delta H} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{\Delta H_{ult}} \quad (\text{Equação 4.17})$$

Para Ling *et al* (1998), o recalque final pode estar entre 80 e 95% em relação ao recalque último esperado e o tempo que leva para atingir os 95% do recalque final (equação 4.18) é calculado pela equação 4.19.

$$H_f = 0,95. \Delta H_{ult} \quad (\text{Equação 4.18})$$

$$t_f = \frac{19. \Delta H_{ult}}{\rho_0} \quad (\text{Equação 4.19})$$

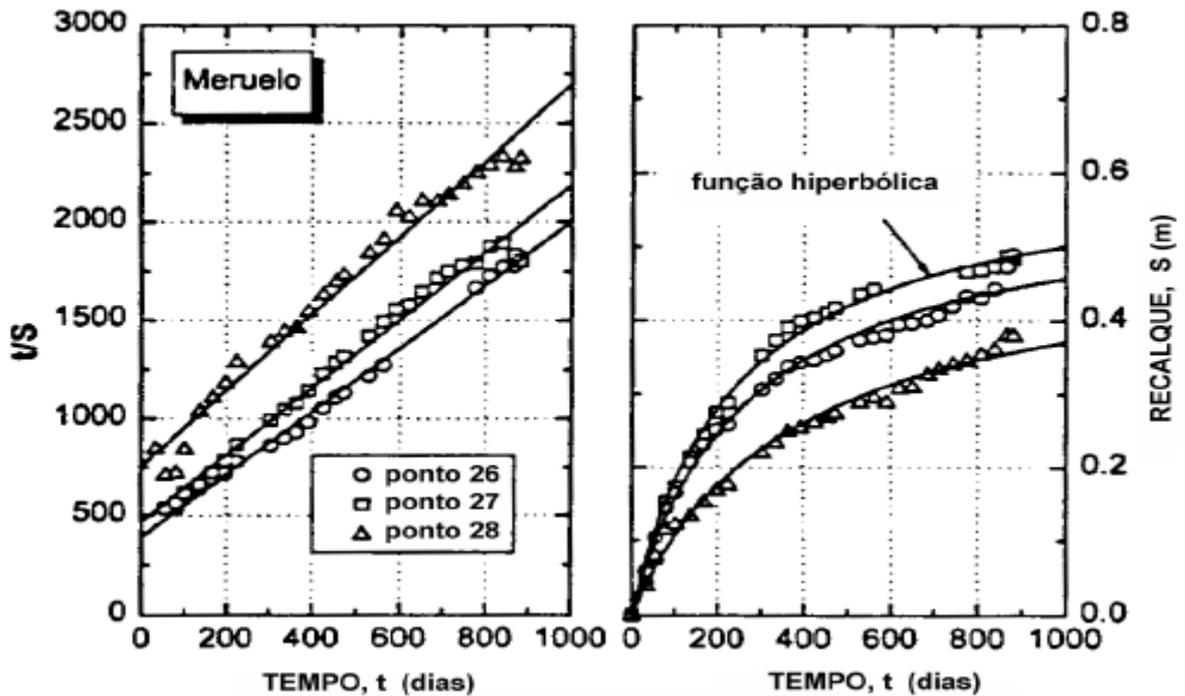
Onde:

t_f = tempo no final dos recalques
 H_f = recalque final

Tapahuasco (2005) comenta que a boa aplicabilidade deste modelo está associada às velocidades de recalques apresentando melhores correlações para as taxas que diminuem com o tempo embora o modelo seja fácil de utilizar e não dependa do tempo de construção t_c e da espessura da camada de resíduos. Além disso, seus parâmetros são próprios e característicos ao comportamento de cada curva de recalques.

A aplicação do modelo para o aterro sanitário de Meruelo (Espanha) está apresentada na figura 25.

Figura 4.11 – Modelo hiperbólico aplicado ao aterro sanitário de Meruelo



(fonte: MARQUES, 2001)

São apresentados abaixo os valores das taxas de recalque inicial ρ_0 e os valores dos últimos recalques esperados ΔH_{ult} seguido dos seus respectivos coeficientes de correlação R a partir da aplicação do modelo nos 3 aterros monitorados (Tabela 6).

Tabela 4.1 – Parâmetros obtidos para o modelo hiperbólico de Ling *et al* (1998)

Parâmetros	Wisconsin	Meruelo	Spadra
ρ_0 (m/dia)	0,001	0,003; 0,002; 0,001	0,015; 0,04; 0,054; 0,102; 0,036
ΔH_{ult} (m)	1,14	0,62; 0,58; 0,51	0,48; 0,63; 0,72; 0,91; 0,69
R	0,961	0,998; 0,992; 0,988	0,998; 0,997; 0,9997; 0,9298; 0,9998

(fonte: TAPAHUASCO, 2005)

4.2.3.2 Modelo de Comoulos & Koryalos (1997)

O modelo é a constatação nas diferenças de velocidades de recalques após período de construção em aterros construídos rapidamente que acusaram maiores taxas de compressão em relação a aterros cujas construções ocorreram em períodos mais longos. Como Sowers (1973), Comoulos & Koryalos (1997) propuseram um modelo de previsão de recalques de longo prazo admitindo uma relação linear entre a compressão secundária e o logaritmo do tempo.

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} = C'_\alpha \log \frac{t}{t_1} \quad (\text{Equação 4.20})$$

$$m = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \frac{C'_\alpha}{t \cdot \ln 10} \quad (\text{Equação 4.21})$$

Onde:

ε	=	deformação secundária
t & t_1	=	tempos decorridos após encerramento do aterro na curva de compressão secundária
m	=	taxa ou velocidade de deformação vertical
C'_α	=	coeficiente de compressão secundária

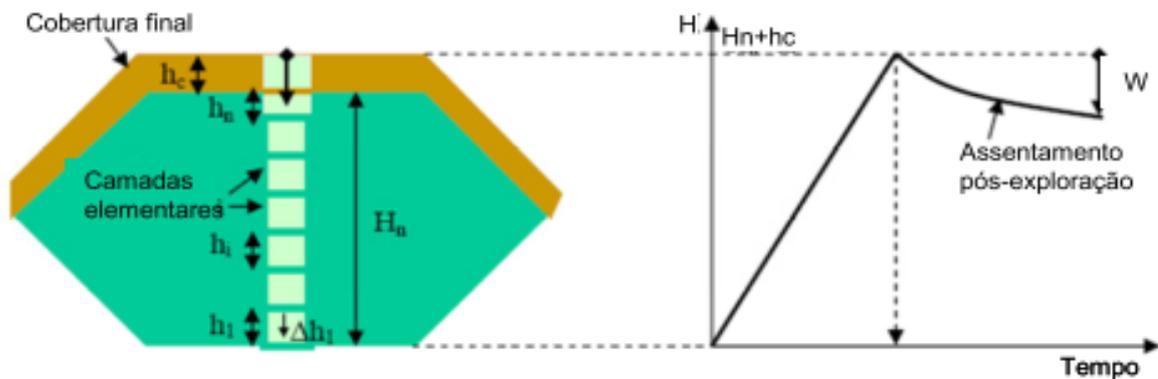
O coeficiente de compressão secundária acusou valores próximos a 0,07 após análise de diversos resultados na literatura. O tempo inicial t_0 partir do qual são definidos os tempos t e t_1 corresponde ao encerramento do aterro (MARQUES, 2001).

Gomes (2008) comenta a vantagem no uso do modelo de Comoulos & Koryalos (1997) que é o fato do tempo de origem e do início dos recalques secundários não intervirem no uso das velocidades de recalques permitindo a comparação de dados oriundos tanto de diferentes regiões do aterro como de aterros distintos.

4.2.3.3 Modelo ISPM – Incremental Settlement Prediction Model

Trata-se de um modelo incremental introduzido por Gourc *et al* (1999) antes de ser desenvolvido por Thomas (2000), Olivier *et al* (2003) e comentado mais tarde por Gomes (2008). Segundo estes autores, o modelo baseia-se no armazenamento de resíduos em camadas elementares que formam a altura final do maciço no término da construção considerando o recalque primário e secundário de cada camada elementar que constitui a coluna final. Neste contexto, são associados parâmetros inerentes a cada camada e o comportamento mecânico de cada uma delas é estudado individualmente em função de sobrecargas ao longo do tempo (Figura 26).

Figura 4.12 – Ilustração da segregação de um aterro em camadas elementares



(fonte: Adaptado de GOURC *et al*, 1999)

Considerando uma coluna de resíduo como uma superposição de n camadas horizontais conforme mostrada na figura 26, são consideradas como hipótese do modelo ISPM:

- as alturas iniciais de cada camada h_0 e seus respectivos pesos específicos γ_0 após compactação são idênticos para todas as n camadas;
- a compactação afeta apenas a camada superficial em consequência da rápida dispersão lateral das tensões com a profundidade;
- a perda de massa devido ao processo de biodegradação é negligenciável, pelo que não induz a variações significativas do peso específico;
- a coluna de resíduo está localizada fora da zona de influência de taludes e sua altura é reduzida em comparação à sua largura podendo então desprezar o deslocamento horizontal do maciço;
- os resíduos são considerados como não saturados. Assim, as tensões efetivas são iguais às tensões totais;
- os recalques imediatos resultantes da deposição e da compactação não são considerados no cálculo de recalques;
- os recalques da camada de base são desprezíveis;

- h) é considerada incompressível, a cobertura final dos resíduos de altura h_c e peso específico γ_c ;
- i) não são consideradas as coberturas intermediárias uma vez que estas acabam misturando-se com o próprio resíduo;
- j) a tensão de pré-consolidação, σ_c , é considerada igual para todas as camadas sendo da ordem de 20 a 40 kPa para os cilindros correntes de pé de carneiro;
- k) recalques imediatos resultantes na disposição e na compactação diária de resíduo não são considerados.

O recalque primário, para uma camada elementar i , em analogia à teoria de Terzaghi (1943), é calculado por:

$$\frac{\Delta h_i^p}{h_0} = C_s^{*'} \log \frac{\sigma_i}{\sigma_0} (\sigma_0 \leq \sigma_i \leq \sigma_c) \text{ e } C_s^{*'} \approx 0 \quad (\text{Equação 4.22})$$

$$\frac{\Delta h_i^p}{h_0} = C_c^{*'} \log \frac{\sigma_i}{\sigma_c} (\sigma_i > \sigma_c) \quad (\text{Equação 4.23})$$

Onde:

Δh_i^p	=	recalque primário na camada i
h_0	=	espessura inicial das camadas
C_s^{*}	=	coeficiente de compressão primária intrínseca (fase sobreconsolidada)
C_c^{*1}	=	coeficiente de compressão primária intrínseca (fase normalmente consolidada)
σ_i	=	tensão vertical aplicada no topo da camada i
σ_0	=	tensão vertical inicial
σ_c	=	tensão de pré-consolidação

Segundo a teoria de Buissman (1936), o recalque secundário pode ser expresso da maneira seguinte:

$$\frac{\Delta h_i^S}{h_0} = C_{\alpha}^{*'} \log \frac{\tau}{\tau_{ci}} \quad (\text{Equação 4.24})$$

Onde:

Δh_i^S	=	recalque secundário na camada i
h_0	=	altura inicial de cada camada
$C_{\alpha}^{*'}$	=	coeficiente intrínseco de compressão secundária
τ	=	tempo decorrido após construção da camada i
τ_{ci}	=	tempo de construção da camada i

Neste capítulo, foi apresentado um total de sete modelos de previsão de recalques existentes na literatura em função da sua formulação. São eles, modelos logarítmicos, exponenciais e os que foram tirados de leis correntes.

Os modelos logarítmicos estudados neste capítulo são: o modelo de Sowers (1973), o modelo de Yen & Scanlon (1975) e o modelo de Bjarngard & Edgers (1990). Depois, foi apresentado um total de quatro modelos exponenciais de previsão de recalques: o modelo de Gibson & Lo (1961), o modelo observacional de Asaoka (1978), o modelo de Gandolla et al. (1992) e o modelo de Meruelo (1995). Por último, foram apresentados três modelos de previsão de recalques tirados de leis correntes: o modelo hiperbólico de Ling et al. (1998), o modelo de Comoulos e Koryalos (1997) e um modelo incremental também conhecido como ISPM.

No capítulo 5, será feito um estudo de caso e a apresentação dos resultados de recalques obtidos em campo comparando-os com modelos de previsão existentes a fim de se propor um modelo novo que se ajuste melhor ao comportamento do maciço.

5. ÁREA DE ESTUDO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.

5.1 ÁREA DE ESTUDO

5.1.1 Localização

O aterro está localizado a cerca de 30 km da capital do estado do Rio Grande do Sul na estrada do Socorro 1550, no bairro Arroio da Manteiga com latitude $29^{\circ}44'56,6''$ S e longitude $51^{\circ}11'37,5''$ W (Figura 5.1). O mesmo pertence à Companhia Rio-grandense de valorização de resíduos.

Figura 5.1 – Localização do Aterro em estudo



(fonte: COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS, 2015)

5.1.2 Acesso e Isolamento do aterro

O acesso principal à central é composto por duas pistas de 3,5 metros com revestimento de blocos de concreto intertravados assentados sobre pó de pedra (Figura 5.2). Quanto ao acesso interno, o mesmo consiste no caminho que tem início na guarida de acesso instalada na área

até atingir o dique externo da célula de disposição onde se desenvolve sobre este circundando o aterro de resíduos sólidos.

O isolamento da área foi executada com o cercamento da mesma impedindo a entrada de pessoas não autorizadas e de eventuais animais (Figura 5.3).

Figura 5.2 – Acesso principal do aterro sanitário



(fonte: COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS, 2015)

Figura 5.3 – Acesso principal do aterro sanitário



(fonte: COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS, 2015)

5.1.3 Instalação do aterro sanitário

Instalação do aterro começou com a impermeabilização da camada da base que irá receber os futuros resíduos a fim de impedir que os líquidos gerados no interior do aterro durante o período de operação e após seu encerramento contaminem o lençol freático.

Esta impermeabilização foi realizada com uma camada de solo argiloso com coeficiente de condutividade hidráulica 10^{-9} m/s seguida por uma geomembrana plástica de polietileno de

alta densidade (PEAD) e um geotêxtil de proteção. O mesmo procedimento é realizado na impermeabilização dos taludes.

As figuras 5.4, 5.5 e 5.6 mostram respectivamente a preparação da base, a camada de impermeabilização nela executada e a instalação da geomembrana plástica de PEAD.

Figura 5.4 – Preparação da base do aterro



(fonte: COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS, 2015)

Figura 5.5 – Camada de impermeabilização da base do aterro



(fonte: COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS, 2015)

Figura 5.6 – Instalação da geomembrana de PEAD



(fonte: COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS, 2015)

O sistema de drenagem e remoção de percolados gerados no interior do aterro é realizado por uma camada drenante disposta sobre a camada de proteção da geomembrana do sistema de impermeabilização constituída por uma camada de pó de pedra e uma camada drenante de rachão livre de materiais finos.

A drenagem de biogás é constituído por um conjunto de drenos verticais que são tubos de concreto armado dispostos de forma vertical e revestidos por fragmentos de rocha conformados por uma tela metálica disposta de forma cilíndrica.

A figura 5.7 mostra uma representação da camada drenante de percolados assim como o sistema de dreno vertical de biogás, o queimador de biogás no topo do talude sendo ilustrado pela figura 5.8.

Figura 5.7 – Sistema de drenagem de percolados e de biogás



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.8 – Queimador de biogás no topo do talude



(fonte: elaborado pelo autor)

O sistema de drenagem superficial é constituído por canais revestidos por geotêxtil (Figura 5.9) e seu deságue ocorre em poços de visitas situados ao lado do acesso, interligados à lagoa de decantação e emergência pluvial através de um emissário com tubulações em concreto armado de diâmetro variado. Valas coletoras intermediárias de águas oriundas de precipitações foram instaladas nos taludes com espaçamento de mais ou menos 30 metros para canalizá-las evitando então processos erosivos na cobertura.

Figura 5.9 – Canal de drenagem de águas pluviais



(fonte: elaborado pelo autor)

Quanto ao tratamento de percolados, o aterro conta com 4 lagoas de estabilização dispostas em série utilizados para acúmulo e estabilização de chorume (Figura 5.10), o tratamento desses efluentes sendo realizado em estação de tratamento de esgoto sanitário.

Figura 5.10 – Lagoa de acúmulo e equalização



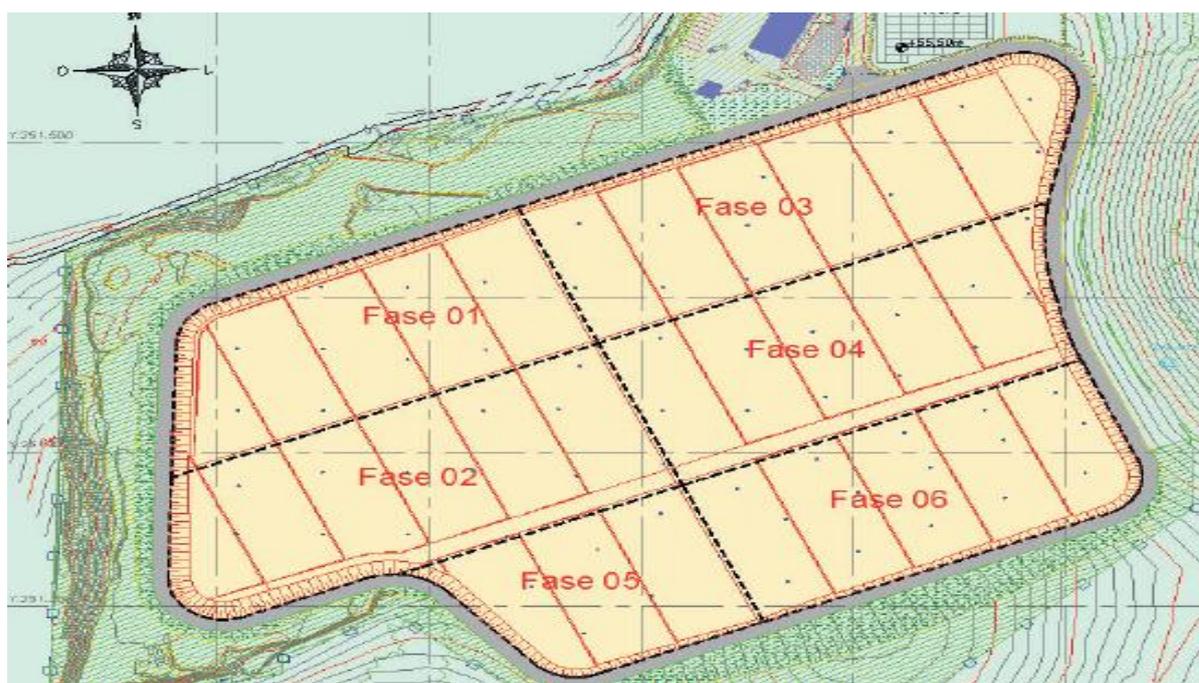
(fonte: elaborado pelo autor)

5.1.4 Operação do aterro sanitário

O aterro foi dimensionado para um total de seis fases de operação (Figura 5.11). Atualmente, está sendo operada a fase 3 e o estudo de previsão de recalques foi baseado nas duas primeiras fases de operação, com uma área impermeabilizada de 3,8 hectares, após seu fechamento em 2014 que corresponde ao ano de início de medição de recalques através de marcos superficiais instalados no maciço.

A sua capacidade de recebimento de resíduo atual é de 5 milhões de toneladas em uma área total de 135 hectares, dos quais utilizam-se 60 para a destinação de resíduos e infraestrutura de apoio. O aterro possui uma vida útil estimada de 20 anos conforme a licença de operação vigente.

Figura 5.11 – Layout das células de disposição



(fonte: AZAMBUJA ENGENHARIA E GEOTECNIA, 2010)

Na operação deste aterro, são utilizados equipamentos mecanizados tais como: veículos leves, caminhões caçamba, trator de esteira, retro escavadeira de pneu, escavadeiras hidráulicas, caminhão pipa e carreta.

O caminhão, antes de encaminhar o resíduo no aterro, é pesado na entrada e após descarregá-lo, ele é pesado de novo na saída por uma balança hidráulica fazendo com que se estime a quantidade em toneladas de resíduo descarregado.

Os taludes têm uma inclinação de 1:1,5 (V:H) com a pista de inclinação e 1:2 (V:H) com a cobertura final.

5.1.5 Metodologia

A base desta pesquisa teve como início na análise dos resultados do monitoramento geotécnico em marcos superficiais instalados no maciço após conclusão das fases 1 e 2 do projeto do aterro sanitário onde estão armazenados resíduos sólidos urbanos (RSU). A partir de resultados de recalques observados em 6 marcos superficiais, foi possível compará-los com 4 dos modelos de previsão de recalques apresentados no capítulo 4 para que então se crie um novo modelo de previsão de recalques em aterros novos inspirado no modelo que melhor se adaptou ao comportamento dos resíduos em campo e prever o recalque no final da vida útil do aterro.

Os itens 5.1.5.1 e 5.1.5.2 explicam respectivamente como foi feito o monitoramento em campo e a análise comparativa dos métodos de previsão escolhidos.

5.1.5.1 Monitoramento geotécnico de campo

O monitoramento de recalques em campo conta com um total de 15 marcos superficiais instalados nas áreas 1 e 2. A disposição de resíduos teve início em 2011 com conclusão em outubro de 2014 quando começou a medição dos deslocamentos observados no maciço do aterro.

As leituras iniciais foram realizadas semanalmente entre o dia 03 e 31 de outubro de 2014 e depois foram realizadas medições mensais ocorrendo entre o dia 10 e 15 de cada mês, sendo que os dados coletados para a análise de recalques foram obtidos até o dia 05 de fevereiro de 2016.

Os marcos superficiais MS1, MS2 e MS3 foram monitorados respectivamente por 7, 3 e 10, meses e retirados para manutenção de talude. O marco superficial MS 5 foi monitorado até novembro de 2015 quando foi retirado definitivamente. Os marcos MS4, MS8 e MS9 tiveram

de ser removidos para fins de construção de acesso do projeto após um período de monitoramento de 13 meses. O marco MS6 foi retirado pelo mesmo motivo, porém foi recolocado tendo seu monitoramento prosseguido até a dada de coleta dos dados para análise de recalques.

A análise de monitoramento foi efetuada através dos marcos MS6, MS7, MS10 e MS12 não sendo considerados outros marcos superficiais por terem período de monitoramento relativamente curto para apresentarem resultados satisfatórios.

O monitoramento topográfico foi feito pela empresa ASTECA TOPOGRAFIA que utilizou a estação total da marca *CYGNUS 2LS TOPCON*. Este equipamento, conforme o fornecedor, apresenta uma operação de 200 metros sem refletor e de até 2000 metros usando um único prisma, uma precisão angular de 2", uma resolução do ângulo de 1"/5", o tempo de medição de 1,1 s e um ponteiro laser integrado para auxiliar no trabalho de *layout* com memória para armazenamento de até 24 000 pontos.

Para efetuar as medições, foi necessário posicionar a estação total e mirar até o prisma fixo em uma trena metálica e diretamente colocado sobre o ponto onde se quer medir. Assim, a estação total emite um feixe de laser que reflete no prisma e retorna ao equipamento. Pelo tempo de resposta e o ângulo de rotação da luneta da estação, o computador calcula os ângulos e as distâncias armazenando os em sua memória interna. A partir daí, é possível calcular os recalques observados em campo pela diferença entre a cota anteriormente medida e a atual.

O taqueômetro utilizado na coleta de dados, o prisma refletor de sinal, a instalação da estação total e a medição de cota em um ponto visado estão representados nas figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15 respectivamente.

Figura 5.12 – Taqueômetro utilizado na coleta de dados em campo



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.13 – Prisma para reflexão do sinal emitido pelo taqueômetro



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.14 – Instalação do taqueômetro no tripé para medição das cotas



(fonte: elaborado pelo autor)

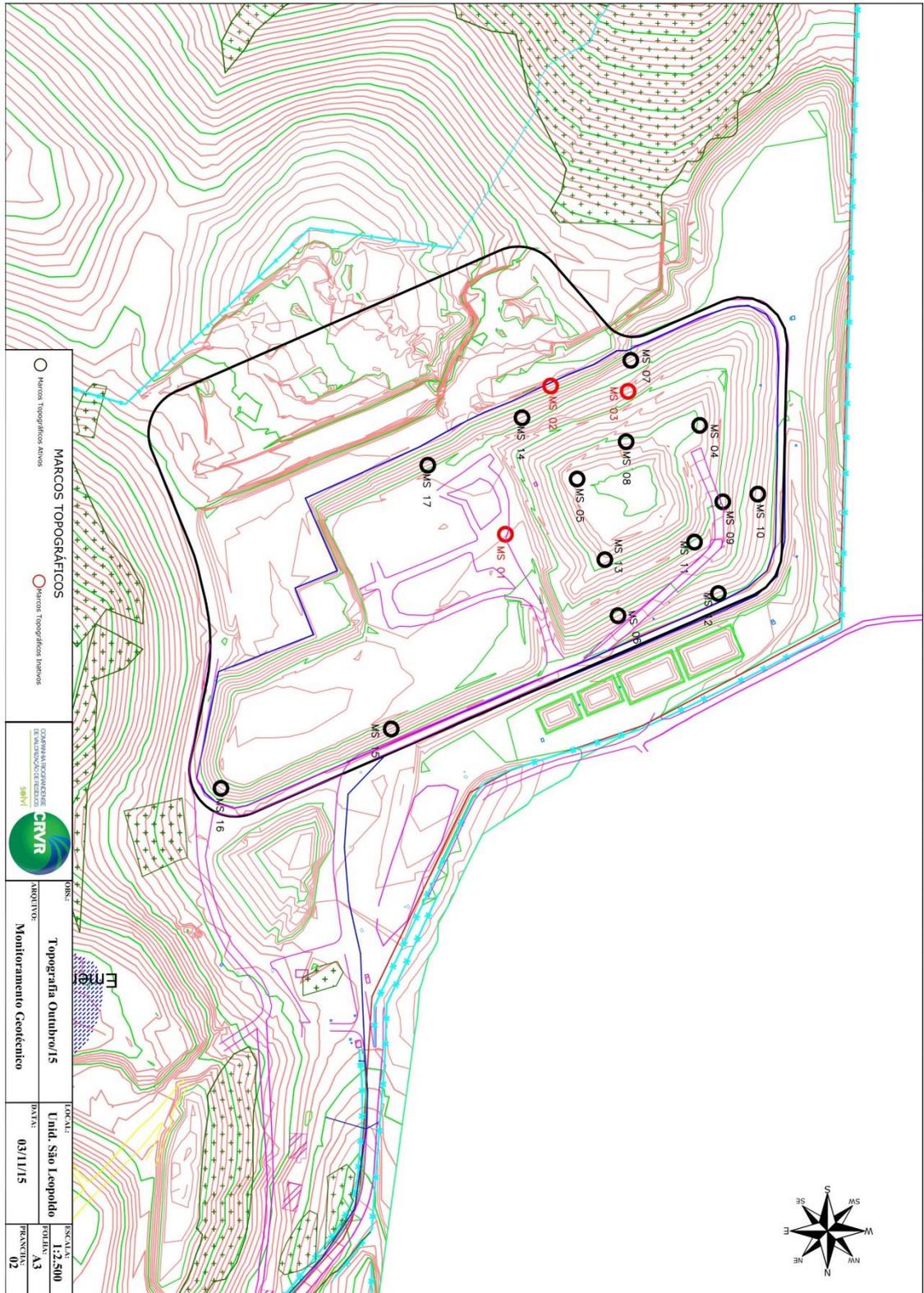
Figura 5.15 – Medição de cota no ponto desejado com auxílio de um operário



(fonte: elaborado pelo autor)

A localização em planta dos marcos topográficos utilizados para o monitoramento dos recalques está representada na figura 5.16 e o resumo com as cotas e deslocamentos verticais observados, na tabela 5.1.

Figura 5.16– Localização dos marcos topográficos em planta



(fonte: COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS)

Tabela 5.1 – Resumo com as cotas e deslocamentos verticais observados

MARCO	Data 1° Monitorados	Coordenadas			Data último monitoramento	COORDENADAS			Meses monitorados	Recalque (m)
		E(m)	N(m)	Cota(m)		E(m)	N(m)	Cota(m)		
MS1	03/10/2014	6709335,9	481083,0	54,89	13/05/2015	6709335,9	481083,0	54,88	7	0,007
MS2	03/10/2014	6709226,6	481049,4	52,91	10/12/2014	6709226,6	481049,3	52,91	2	0,001
MS3	03/10/2014	6709230,5	480991,8	62,53	10/08/2015	6709229,6	480992,0	62,11	10	0,420
MS4	03/10/2014	6709255,6	480938,6	71,31	11/11/2015	6709255,4	480938,3	69,99	13	1,320
MS5	03/10/2014	6709295,2	481029,7	77,45	11/11/2015	6709293,2	481033,2	74,29	13	3,159
MS6	10/10/2014	6709396,1	480999,3	59,18	15/02/2016	6709396,8	480999,1	58,60	16	0,582
MS7	24/10/2014	6709207,7	480989,8	56,92	15/02/2016	6709206,9	480990,2	56,69	16	0,227
MS8	13/05/2015	6709267,3	480993,3	70,82	11/11/2015	6709267,0	480993,4	70,05	6	0,763
MS9	24/10/2014	6709312,0	480921,4	65,71	11/11/2015	6709312,3	480920,1	64,48	13	1,236
MS10	24/10/2014	6709306,3	480895,3	58,02	15/02/2016	6709306,5	480894,6	57,39	16	0,637
MS11	16/07/2015	6709338,1	480951,0	67,88	15/02/2016	6709338,4	480950,7	67,04	7	0,835
MS12	24/10/2014	6709379,6	480924,7	56,26	15/02/2016	6709380,0	480924,5	55,96	16	0,305

(fonte: elaborado pelo autor)

5.1.5.2 Comparativa dos métodos de previsão escolhidos

Uma análise comparativa entre os métodos de recalques existentes na literatura internacional e os dados em campo no aterro sanitário novo de São Leopoldo foi realizada. Primeiramente uma escolha de 4 dos modelos de previsão de recalques apresentado no capítulo 4 foi realizada em função da quantidade de parâmetros utilizados no cálculo de previsão de recalques. Conforme Boscov (2008), um bom modelo de recalques é aquele que apresenta um menor número de parâmetros para a sua aplicação.

Desse modo, foram avaliadas, para cada modelo, as suas premissas, a forma de obtenção dos parâmetros e a sua precisão na estimativa de recalques com base em resultados de sua aplicação em aterros existentes. Os modelos escolhidos foram o modelo logarítmico de Sowers (1973), o modelo logarítmico de Yen & Scanlon (1975), o método de Gandolla et al. (1992) e por último, foi testado o modelo de Ling et al. (1998) devido à indisponibilidade de alguns parâmetros de cálculo necessários e também pelo não conhecimento da sequência construtiva do aterro em estudo. A mesma dificuldade foi encontrada por Denardin (2013) no estudo de recalques no aterro sanitário da central de recreio de Minas do Leão e por Teixeira (2015) que fez o estudo de caso nos aterros de São Leopoldo e Minas do Leão.

A análise para cálculo de recalques e a calibração dos parâmetros foram realizadas através do programa EXCEL e a proposta de um modelo novo a partir do modelo que mais se adequou à realidade observada em campo foi modelada através do programa GRAPHER. Para descobrir o modelo que mais se adapta à realidade do aterro em estudo, foi preciso calcular o desvio de recalques relativo em porcentagem entre os valores calculados e observados conforme orienta Marques (2001).

5.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta parte de apresentação dos resultados, será vista a análise que foi feita somente em marcos superficiais que foram monitorados por 16 meses para uma melhor adaptação da proposição do modelo novo obtido através do ajuste de curva.

O primeiro monitoramento após fechamento das duas primeiras fases (FASE 1 E 2) do aterro sanitário de São Leopoldo começou no dia 03 de outubro de 2014, durante todo o mês, foram realizadas medidas de monitoramento de recalques semanais. Depois desse período, os monitoramentos de recalques foram feitas mensalmente e prosseguem até o momento.

Um total de 17 marcos foi colocado em diferentes posições em cima do maciço conforme mostra a figura 5.14 e alguns tiveram de ser removidos para a construção do acesso previsto no projeto e outros foram simplesmente retirados. Para fins de estudos foi utilizado os marcos MS6, MS7, MS10 e MS12, monitorados por 16 meses contados a partir da data do início dos monitoramentos até fevereiro de 2016.

O resumo das características encontradas nos marcos em estudo como a altura inicial do maciço no ponto monitorado H(m), a frequência de leituras e o recalque observado estão apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resumo com as cotas e deslocamentos verticais observados

MARCO	H(m)	Frequência das leituras	Desl. Vertical (m)	Def.(%)
MS6	9	Semanal em outubro 2014 e Mensal de Outubro de 2014 a Fevereiro de 2016	0,58	6,6%
MS7	7		0,22	3,4%
MS10	8		0,57	7,1%
MS12	5		0,30	5,7%

(fonte: elaborado pelo autor)

A verificação do desempenho de cada modelo foi possível com a equação do desvio de recalques utilizado por Marques (2001) e mais tarde por Denardin (2013) e Teixeira (2015). Esta equação, conforme explicado no item 5.1.5.2, compara o recalque medido com o previsto (equação 5.1)

$$D_{i,j} = \frac{\Delta H_{Calc.(i,j)} + \Delta H_{Obs.(j)}}{\Delta H_{Obs.(j)}} \times 100 \quad (\text{Equação 5.1})$$

Onde:

$D_{i,j}$	=	Desvio no tempo j em relação ao tempo i
$\Delta H_{Calc.(i,j)}$	=	Recalque calculado no tempo j com base nas leituras no tempo i
$\Delta H_{Obs.(j)}$	=	Recalque Observado no tempo j

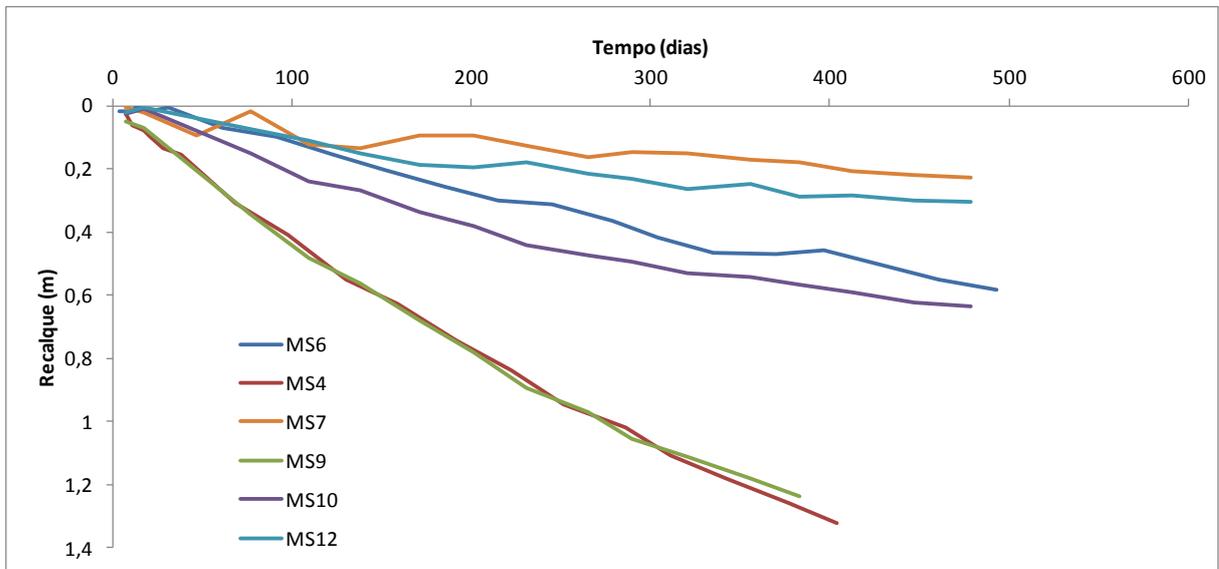
Algumas limitações como informações sobre a sequência construtiva de diversas células que compõem as fases 1 e 2 do aterro sanitário novo de São Leopoldo, a composição inicial dos resíduos sólidos urbanos assim como sua posterior degradação fizeram com que, para a realização das análises, algumas características fossem estabelecidas.

- A sequência construtiva das duas fases não foi obtida de maneira satisfatória: sabe-se que a construção das duas fases começou em 2011 e o monitoramento a partir de outubro de 2014,
- A altura da coluna dos resíduos foi obtida a partir das cotas do fundo do aterro e das cotas nos marcos no início dos monitoramentos.
- O parâmetro de tempo inicial aplicado nos modelos coincide com o tempo de início dos monitoramentos
- O peso específico do resíduo adotado é de 10 kN/m³, sem considerar o efeito das sobrecargas.

A figura 5.17 mostra os recalques observados em marcos superficiais em estudos durante um período total de 16 meses (MS6, MS7, MS10 e MS12) mais dois marcos superficiais que foram monitorados somente por 13 meses (MS4 e MS9) quando foram removidos do aterro para facilitar a construção do acesso de projeto.

Os recalques observados em marcos superficiais monitorados por 16 meses variaram entre 22 a 58 centímetros com espessuras iniciais de resíduos de 5 a 9 metros e deformações observadas de 3 a 7 %. Já nos marcos MS 4 e MS 9, os recalques observados no período de monitoramento foi respectivamente de 1,30 e 1,23 metros com espessuras iniciais de 20 e 15 metros e deformações aproximadas de 6 e 8 %..

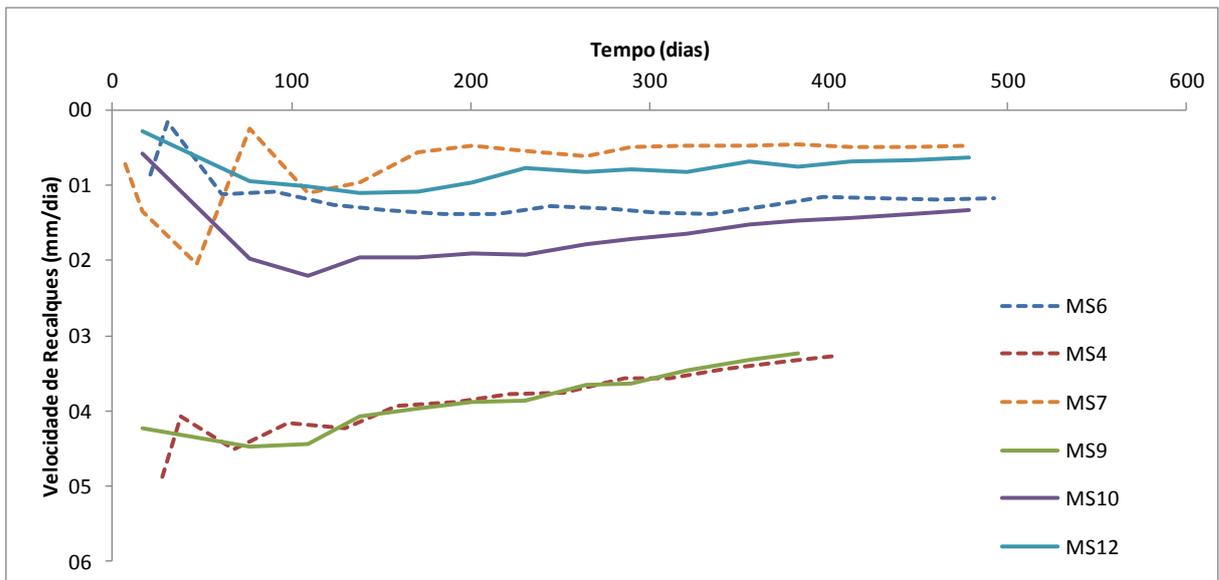
Figura 5.17 – Curva de recalque com o tempo



(fonte: elaborado pelo autor)

As velocidades de recalques, expressos em mm/dia apresentaram valores entre 0,5 e 2 nos 4 marcos em estudos menos nos marcos MS4 e MS9 onde os valores calculados beiram 3,5 (figura 5.18).

Figura 5.18 – Curva de velocidade de recalque com o tempo



(fonte: elaborado pelo autor)

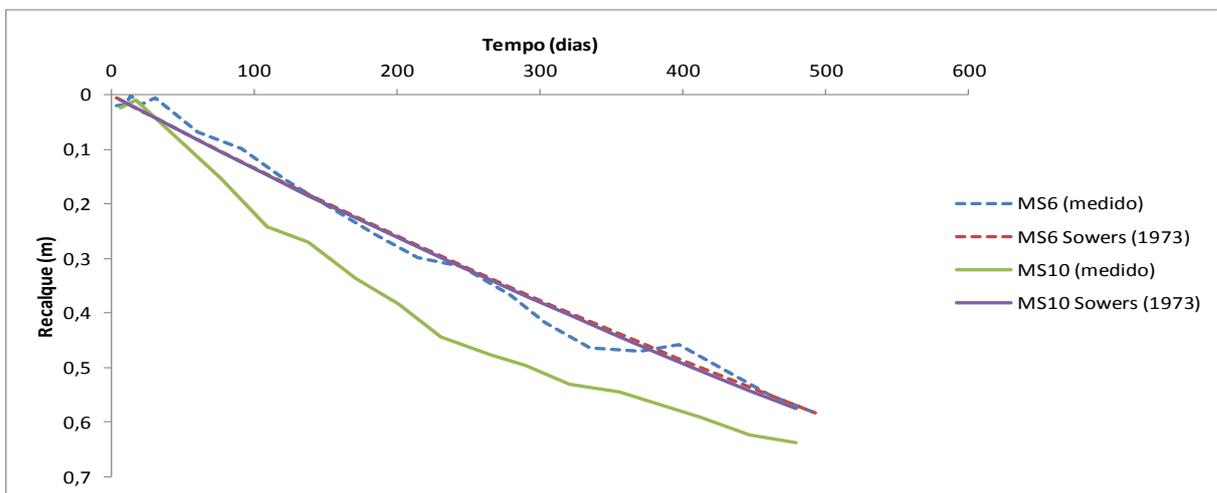
Nos itens a seguir, serão apresentados os resultados obtidos a partir dos modelos de previsão de recalques utilizados nesta pesquisa.

5.2.1 Modelo de Sowers (1973)

Este modelo é um dos primeiros utilizados na estimativa de recalques em aterros sanitários conforme descrito no item 4.2.1.1. Ele utiliza o conceito de recalque imediato, primário e secundário, sendo o recalque total previsto, a soma das 3 parcelas.

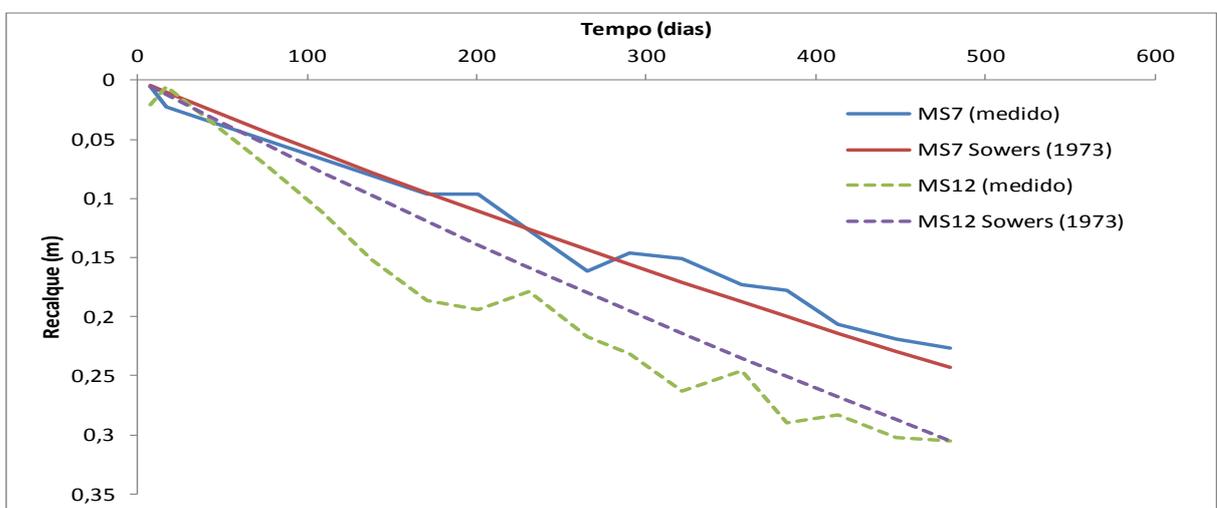
Para o caso do aterro sanitário de São Leopoldo, o modelo de Sowers (1973) apresentou resultados satisfatórios com valores de recalques médios calculados em marcos superficiais muito próximos aos observados em campo. As figuras 5.19 mostra os resultados nos marcos MS6 e MS10 enquanto na figura 5.20 estão os resultados obtidos nos marcos MS7 e MS12.

Figura 5.19 – Comparação de valores calculados e observados para MS6 e MS 10



(fonte: elaborado pelo autor)

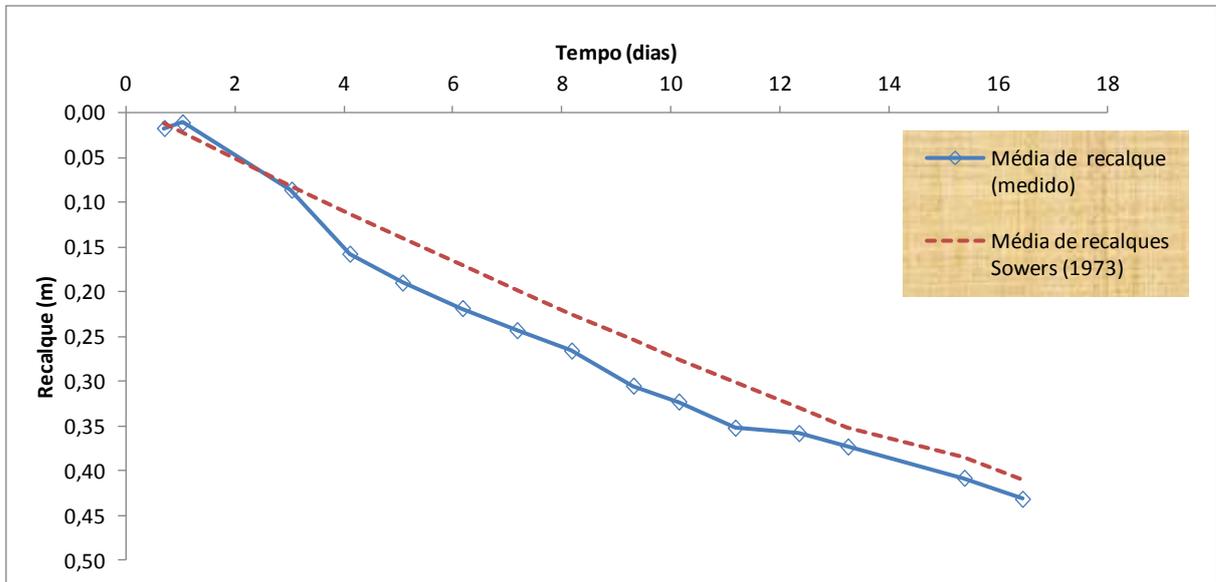
Figura 5.20 – Comparação de valores calculados e observados para MS7 e MS 12



(fonte: elaborado pelo autor)

A média dos recalques observados nos 4 marcos superficiais comparados ao modelos de Sowers está na figura 5.21.

Figura 5.21 – Comparação de valores calculados e observados para MS7 e MS 12



(fonte: elaborado pelo autor)

Observe-se que os valores calculados e observados são praticamente iguais nos primeiros 3 meses de monitoramento e a partir do 4º mês, observa-se uma diferença de 5 centímetros entre os valores calculados e observados em campo, sendo adequado para a previsão de recalques mediante alguns ajustes.

Os valores médios de parâmetros calculados para os quatro marcos superficiais estão representados na tabela 5.3. O desvio dos recalques calculado a partir do segundo mês de medição de recalques acusou inicialmente um valor de 24,16%, porém no décimo sexto mês, a diferença de recalques calculados e previstos pelo modelo de Sowers (1973) foi de somente 4,26%, acusando um desvio médio de 15,95% desde o início dos monitoramentos. Isto mostra a adequação no uso do modelo na previsão de recalques com ajustes. O modelo novo utilizado na previsão de recalques em campo pode ser inspirado do método de Sowers (1973).

Tabela 5.3– Parâmetros calculados e previstos: modelo de Sowers (1973)

Tempo (meses)	Recalque medido(m)	Recalques previsto sowers(1973) (m)	velocidade de Recalque medido(mm/dia)	velocidade de Recalque Sowers(mm/dia)	Deformação Observada(%)	Deformação Sowers (1973) (%)	Desvio de recalques Sowers (1973) (%)
2	0,05	0,05	2,74	1,02	4,00%	0,71%	24,16%
3	0,09	0,08	1,07	1,01	1,18%	1,11%	23,15%
4	0,16	0,11	1,40	0,99	2,19%	1,53%	30,70%
5	0,19	0,14	1,34	0,98	2,65%	1,90%	27,71%
6	0,22	0,17	1,25	0,97	3,02%	2,32%	18,65%
7	0,24	0,20	1,18	0,96	3,33%	2,69%	20,67%
8	0,27	0,22	1,13	0,95	3,61%	3,06%	11,20%
9	0,31	0,25	1,13	0,94	4,17%	3,46%	15,21%
10	0,32	0,28	1,10	0,94	4,39%	3,75%	14,20%
11	0,35	0,30	1,08	0,93	4,80%	4,11%	16,48%
12	0,36	0,33	0,99	0,92	4,86%	4,50%	8,63%
13	0,37	0,35	0,96	0,91	5,12%	4,80%	12,04%
14	0,40	0,38	0,95	0,90	5,41%	5,14%	6,51%
15	0,42	0,40	0,94	0,89	5,78%	5,49%	5,65%
16	0,44	0,43	0,91	0,88	5,96%	5,83%	4,26%
						Média de desvio	15,95%

(fonte: elaborado pelo autor)

5.2.2 Modelo de Yen & Scanlon (1975)

Conforme descrito no item 4.1.1.2, o modelo de Yen & Scanlon é o único que utiliza o conceito de idade média do aterro como base na definição do parâmetro tempo. Conforme destaca Marques (2001), este modelo é válido para uma relação linear decrescente entre as taxas de recalque e o logaritmo do tempo.

Assim como observado por Marques (2001), Denardin (2013) e Teixeira (2015), a aplicação deste modelo nos marcos superficiais instalados no aterro sanitário de São Leopoldo foi inconsistente. A explicação pode ser o fato do modelo original ter sido utilizado em aterros construídos em menores tempos e localizados em regiões de clima seco.

O aterro sanitário de São Leopoldo demonstra sofrer recalques médios maiores aos que prevê o modelo. As velocidades medidas em campo variam de 0,91 a 2,49 mm/dia enquanto as velocidades calculadas pelo modelo de Yen & Scanlon (1975) variaram somente de 0,184 a 0,249 mm/dia acusando taxas de recalques maiores no início dos monitoramentos. Conseqüentemente, as deformações reais foram superiores às previstas e os desvios médios de recalques entre 77 e 86 % (tabela 5.4).

Na tabela 5.5 estão mostrados os valores dos parâmetros do modelo para 6 marcos superficiais sendo que os marcos MS4 e MS9 não foram utilizados no cálculo de recalques por terem sido monitorados durante 13 meses.

Tabela 5.4 – Parâmetros calculados e previstos: modelo de Yen & Scanlon (1975)

Tempo (meses)	Recalque medido(m)	Recalques previsto Yen & Scanlon (1975) (m)	velocidade de Recalque medido(mm/dia)	velocidade de Recalque Yen & Scanlon (1975) (mm/dia)	Deformação Observada(%)	Deformação Yen & Scanlon (1975) (%)	Desvio de recalques Yen & Scanlon (1975) (%)
2	0,054	0,010	2,494	0,249	4,00%	0,14%	86,03%
3	0,091	0,016	1,077	0,228	1,18%	0,23%	75,87%
4	0,158	0,023	1,359	0,224	2,19%	0,32%	81,79%
5	0,190	0,029	1,324	0,220	2,65%	0,41%	82,48%
6	0,218	0,035	1,237	0,216	3,02%	0,50%	79,63%
7	0,243	0,041	1,182	0,212	3,33%	0,58%	78,22%
8	0,266	0,047	1,158	0,209	3,61%	0,66%	78,87%
9	0,305	0,053	1,126	0,205	4,17%	0,74%	79,69%
10	0,323	0,058	1,081	0,202	4,39%	0,80%	78,38%
11	0,352	0,063	1,079	0,199	4,80%	0,87%	78,46%
12	0,358	0,068	1,023	0,196	4,86%	0,95%	78,14%
13	0,373	0,073	0,992	0,193	5,12%	1,01%	77,97%
14	0,396	0,077	0,943	0,190	5,41%	1,07%	77,77%
15	0,424	0,084	0,938	0,186	5,78%	1,16%	78,10%
16	0,438	0,089	0,905	0,184	5,96%	1,23%	77,70%
						Média de desvio	79,27%

(fonte: elaborado pelo autor)

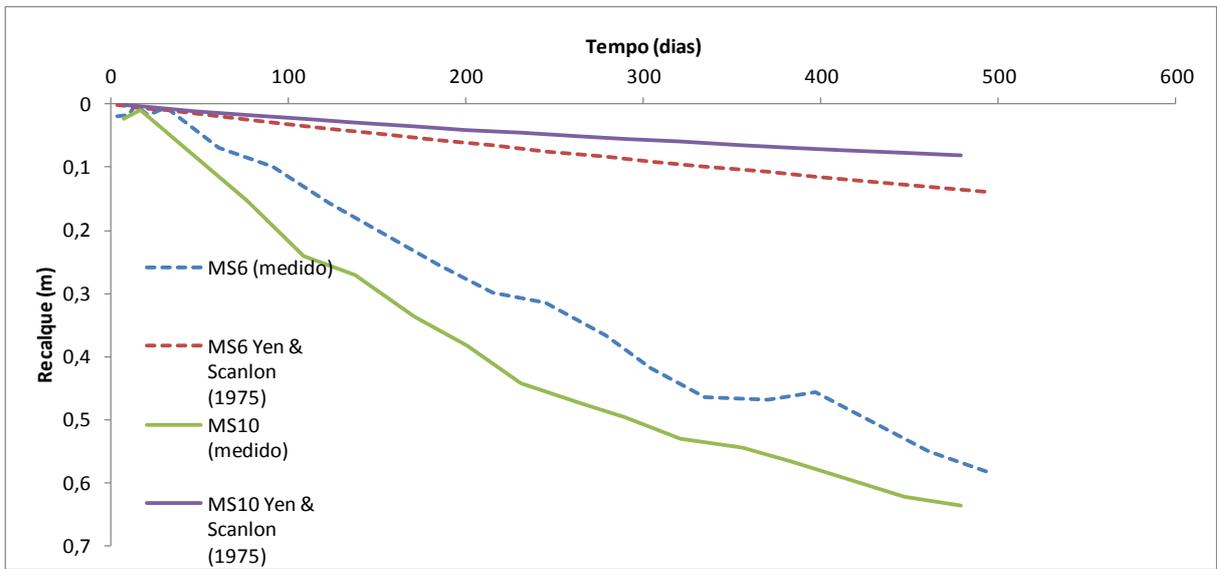
Tabela 5.5 – Parâmetros obtidos do modelo de Yen & Scanlon (1975)

MARCO	Yen & Scanlon (1975)		
	a(mm/dia)	b(mm/dia)	R ² (%)
MS4	6,36	0,49	82,9%
MS6	0,04	0,21	46,7%
MS7	1,69	0,19	34,5%
MS9	5,69	0,36	58,8%
MS10	1,11	0,101	5,1%
MS12	0,9	0,0004	6,0%

(fonte: elaborado pelo autor)

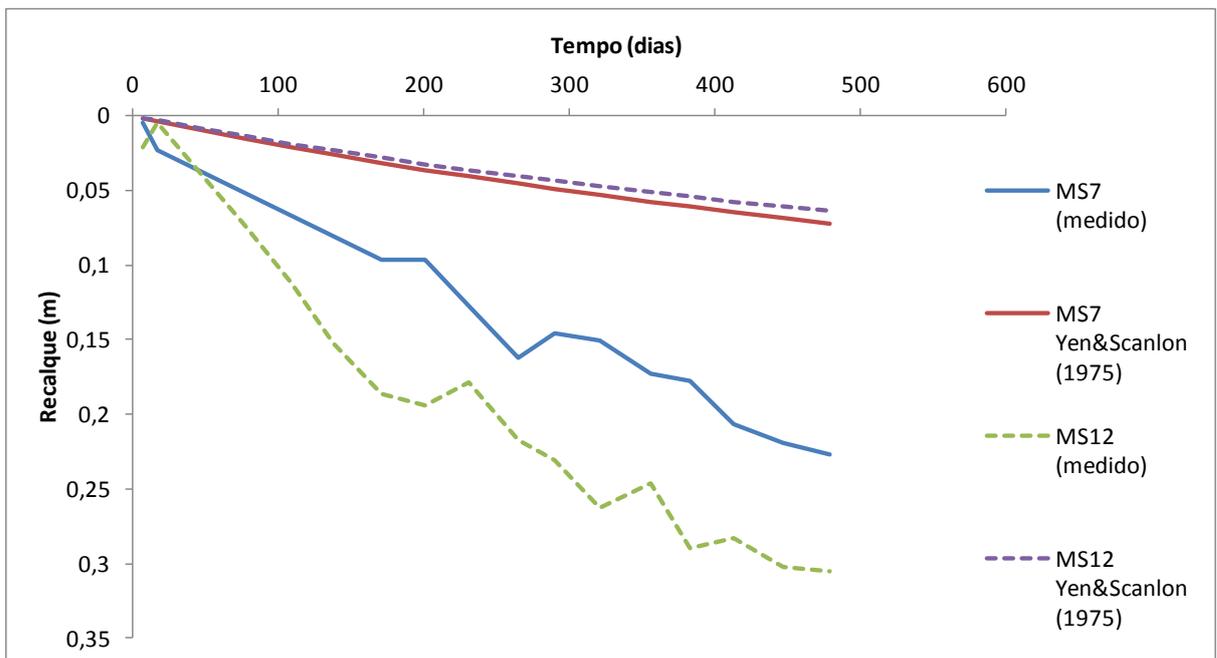
Para uma melhor representatividade entre valores calculados e medidos, Fez-se questão de representar dois marcos superficiais para cada figura. Assim, a figura 5.22 mostra os recalques calculados e medidos em função do tempo para os marcos MS6 e MS10 enquanto os recalques medidos e calculados por este método para os marcos MS7 e MS 12 estão representados na figura 5.23.

Figura 5.22 – Recalques calculados e previstos: modelo de Yen & Scanlon (1975)



(fonte: elaborado pelo autor)

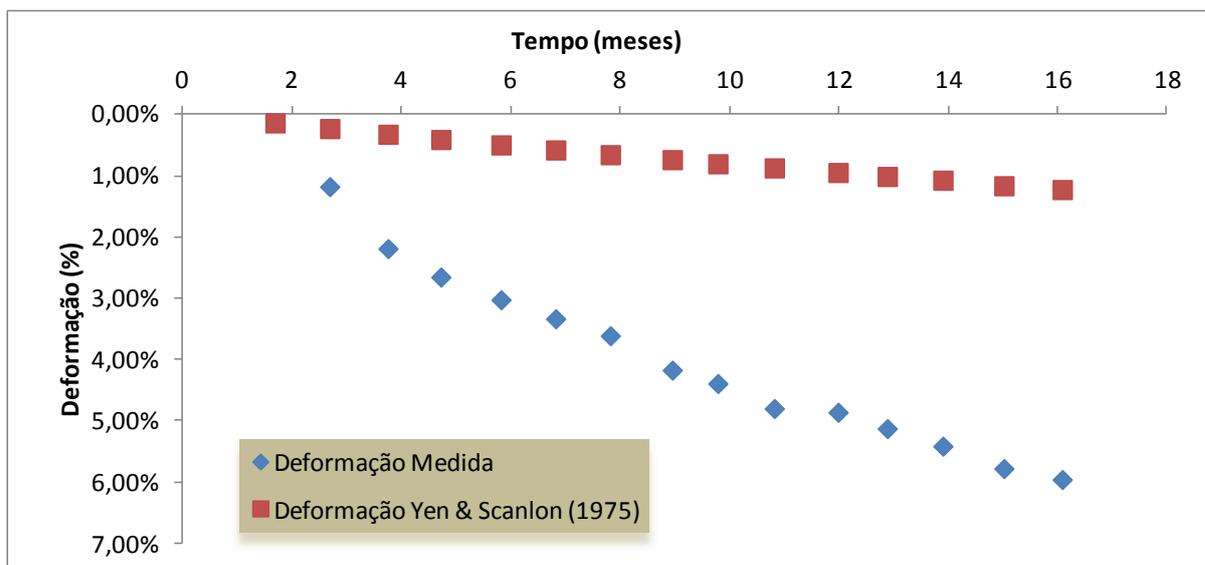
Figura 5.23 – Recalques calculados e previstos: modelo de Yen & Scanlon (1975)



(fonte: elaborado pelo autor)

O uso de funções logarítmicas de Yen & Scanlon (1975) apresentaram elevados desvios de recalques quando comparados os valores observados e previstos (figura 5.24) e não é recomendável tanto para a previsão de recalques como para ajuste de um modelo novo tomando como base esse caso de estudo.

Figura 5.24 – Deformação média calculada e prevista: modelo de Yen & Scanlon (1975)



(fonte: elaborado pelo autor)

5.2.3 Modelo de Gandolla et al (1992)

Este modelo foi escolhido para cálculo de previsão de recalques por utilizar o recalque unitário final a e a taxa de decomposição k como parâmetros necessários e suficientes para analisar recalques secundários com suas taxas correspondentes ao longo do tempo conforme descrito no item 4.2.2.3.

Os resultados foram satisfatórios no uso do modelo comparado com valores reais obtidos em campo, podendo ser utilizado para aproximação de um modelo novo de previsão de recalques ajustado aos valores obtidos em campo.

A média do recalque medido nos marcos superficiais em estudo durante o período de monitoramento de 16 meses é de 44 centímetros enquanto o médio previsto pelo modelo de Gandolla et al (1992) é de 40 centímetros. As velocidades médias observadas em campo variaram entre 1,36 e 0,91 mm/dia contra uma variação 0,75 a 0,56 mm/dia prevista no modelo. Nesse tempo de monitoramento, observou-se uma deformação média de 6 % contra um valor previsto de 5,5 %. Tendo em vista esta aproximação entre valores calculados e previstos, o desvio médio de recalque entre valores calculados e observados *in situ* variou entre 2,5 e 16 % com uma média de 9,1 %.

Os detalhes de valores mensais calculados para cada parâmetro acima constam na tabela (tabela 5.6).

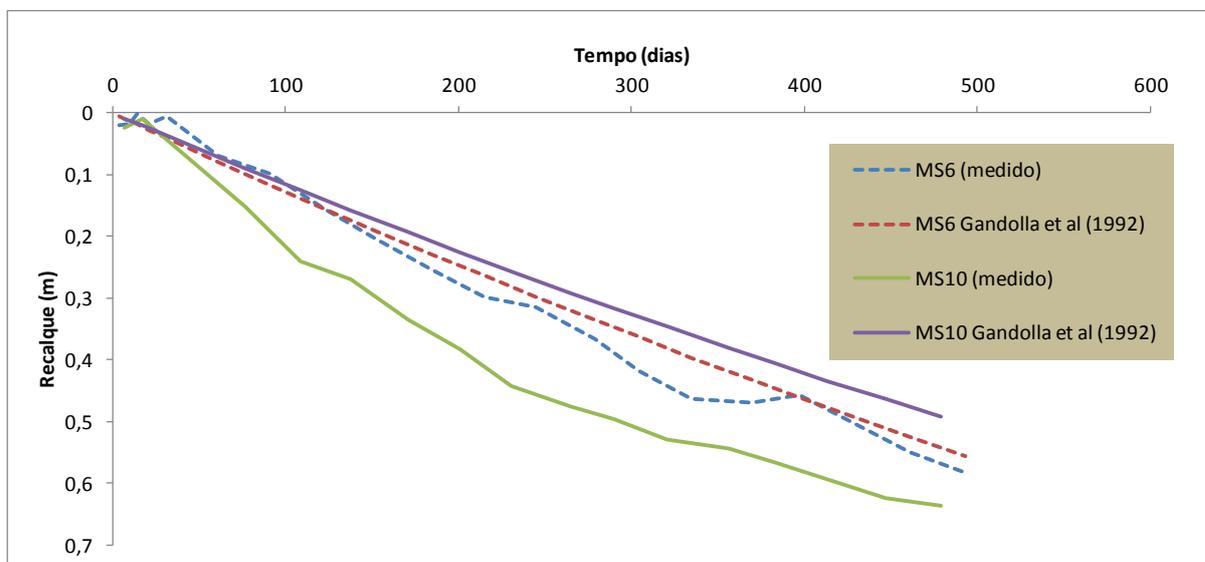
Tabela 5.6 – Parâmetros médios calculados e previstos: Gandolla et al (1992)

Tempo (meses)	Recalque medido(m)	Recalques previsto Gandolla et al.(1992) (m)	velocidade de Recalque medido(mm/dia)	velocidade de Recalque Gandolla et al.(1992) (mm/dia)	Deformação Observada(%)	Deformação Gandolla et al.(1992) (%)	Desvio de recalques Gandolla et al.(1992) (%)
2	0,05	0,04	1,24	0,75	4,0%	0,6%	16,4%
3	0,09	0,09	1,08	0,74	1,2%	0,9%	5,6%
4	0,15	0,14	1,36	0,72	2,2%	1,3%	13,7%
5	0,18	0,17	1,32	0,71	2,7%	1,7%	12,8%
6	0,20	0,20	1,24	0,69	3,0%	2,1%	2,5%
7	0,23	0,22	1,18	0,68	3,3%	2,5%	6,7%
8	0,27	0,26	1,16	0,67	3,6%	2,8%	3,8%
9	0,31	0,30	1,13	0,65	4,2%	3,2%	8,1%
10	0,32	0,30	1,08	0,64	4,4%	3,5%	6,7%
11	0,35	0,30	1,08	0,63	4,8%	3,8%	13,6%
12	0,36	0,32	1,02	0,62	4,9%	4,2%	8,5%
13	0,37	0,32	0,99	0,60	5,1%	4,5%	11,9%
14	0,40	0,34	0,94	0,59	5,4%	4,8%	9,8%
15	0,42	0,38	0,94	0,58	5,8%	5,2%	8,3%
16	0,44	0,40	0,91	0,56	6,0%	5,5%	8,5%
						Média de desvio	9,1%

(fonte: elaborado pelo autor)

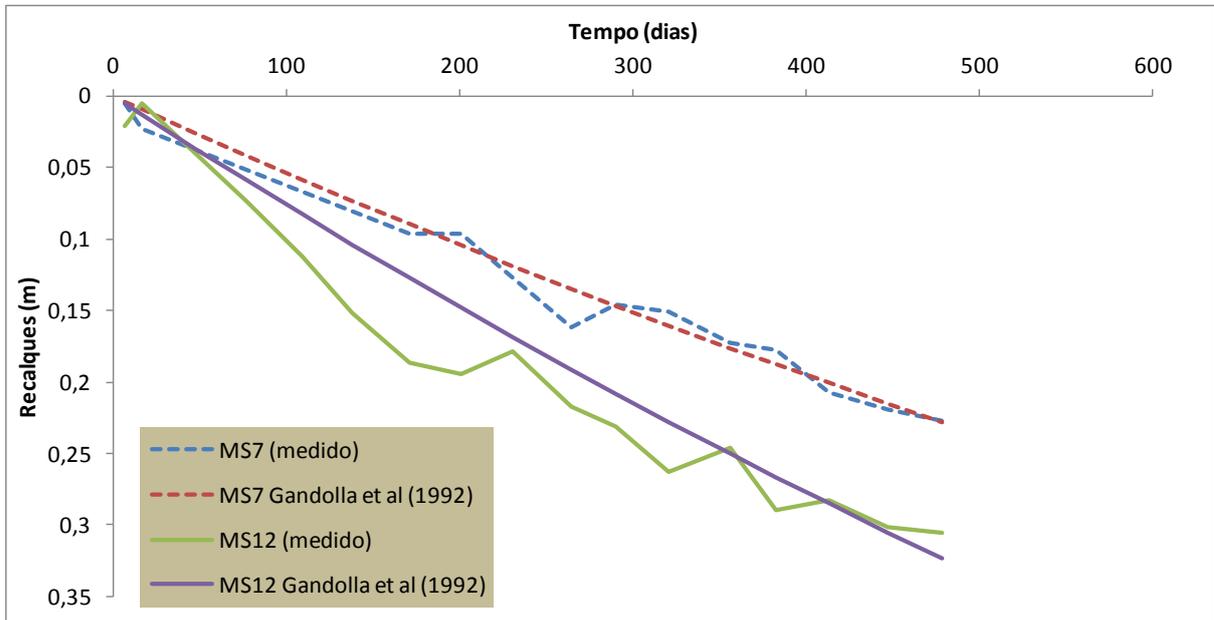
As figuras 5.25 a 5.28 mostram os recalques e as deformações obtidas em função do tempo e comparados com o modelo de Gandolla et al (1992).

Figura 5.25 – Recalques observados nos marcos MS6 e MS10 e comparados com o método de Gandolla et al (1992)



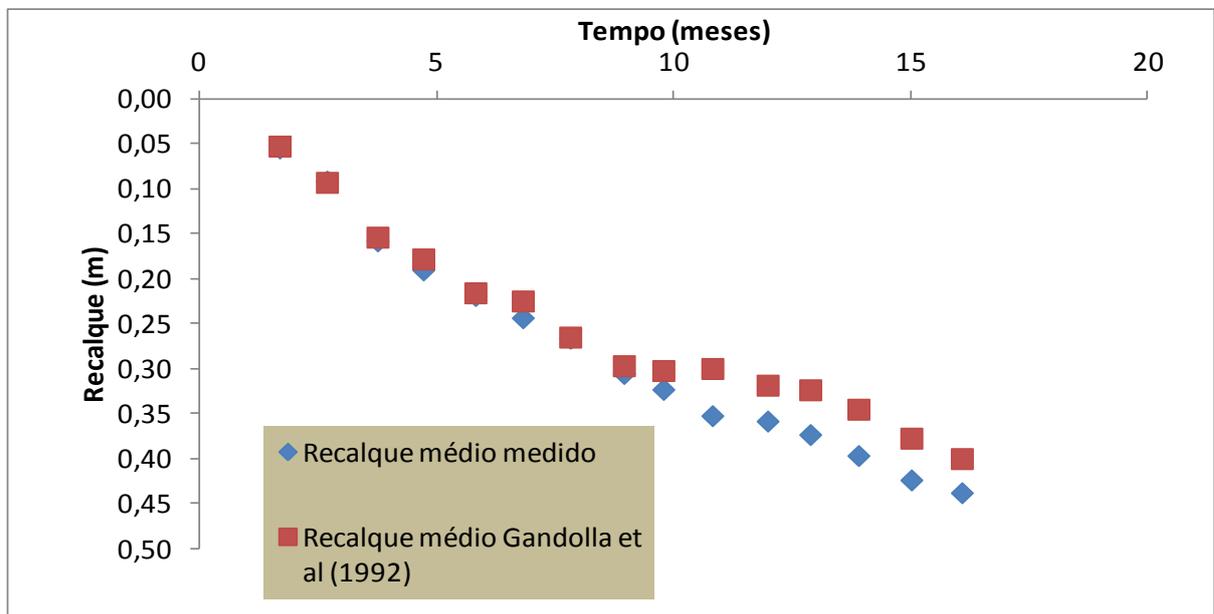
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.26 – Recalques observados nos marcos MS7 e MS12 e comparados com o método de Gandolla et al (1992)



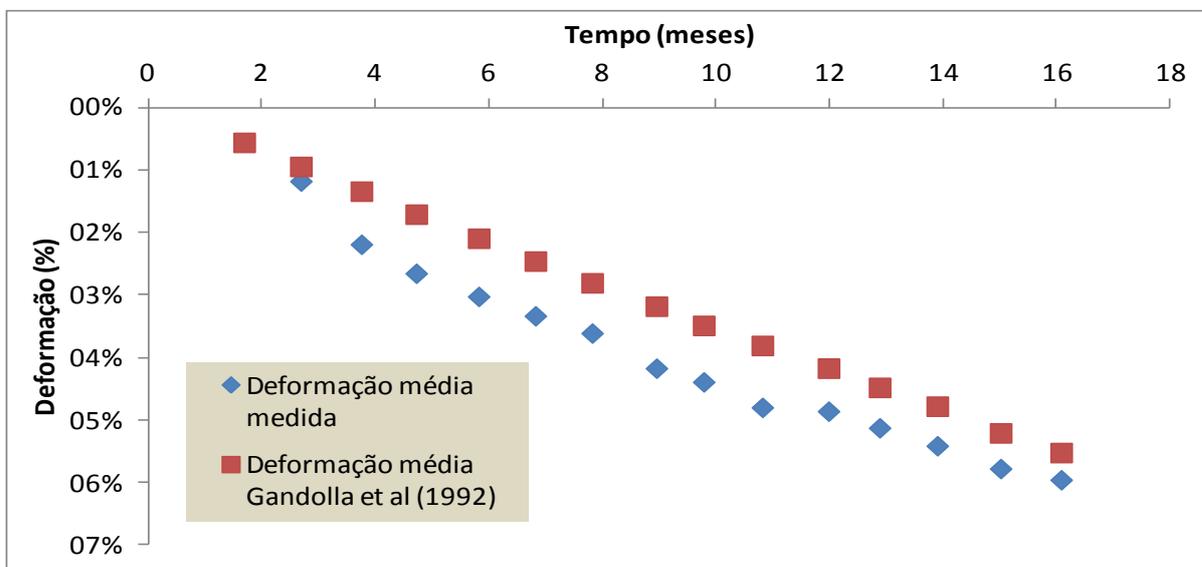
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.27 – Recalques médio observado e comparados com o método de Gandolla et al (1992)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.28 – Deformação média observada e comparada com o método de Gandolla et al (1992)



(fonte: elaborado pelo autor)

5.2.4 Modelo de Ling et al. (1998)

Conforme descrito no item 4.2.3.1, o modelo de Ling et al (1998) incorpora em uma única equação hiperbólica, a compressão primária e secundária. Neste trabalho, o tempo zero foi definido como o início das leituras efetuadas em campo e a formulação adotada foi em termos de deformações.

A taxa de recalque inicial ρ_0 e o recalque último esperado acusaram valores mais próximos aos dados encontrados no aterro sanitário de Spadra (tabela 5.7). O recalque obtido em campo, resultado da média dos 4 marcos superficiais analisados é de 44 centímetros contra 39 centímetros previstos pelo modelos. Os valores de velocidades medidas em mm/dia, as deformações assim como os desvios encontrados durante período de monitoramento constam na tabela 5.8.

Tabela 5.7 – Parâmetros calculados: Ling et al (1998)

PONTO	H(m)	$\epsilon_{ult}(\%)$	ρ_0	DESVIO
MS6	9	6,60%	0,142	4,65%
MS7	6,56	3,50%	0,0243	40,00%
MS10	8	7,95%	0,102	15,80%
MS12	5,2	5,08%	0,09	15,40%

(fonte: elaborado pelo autor)

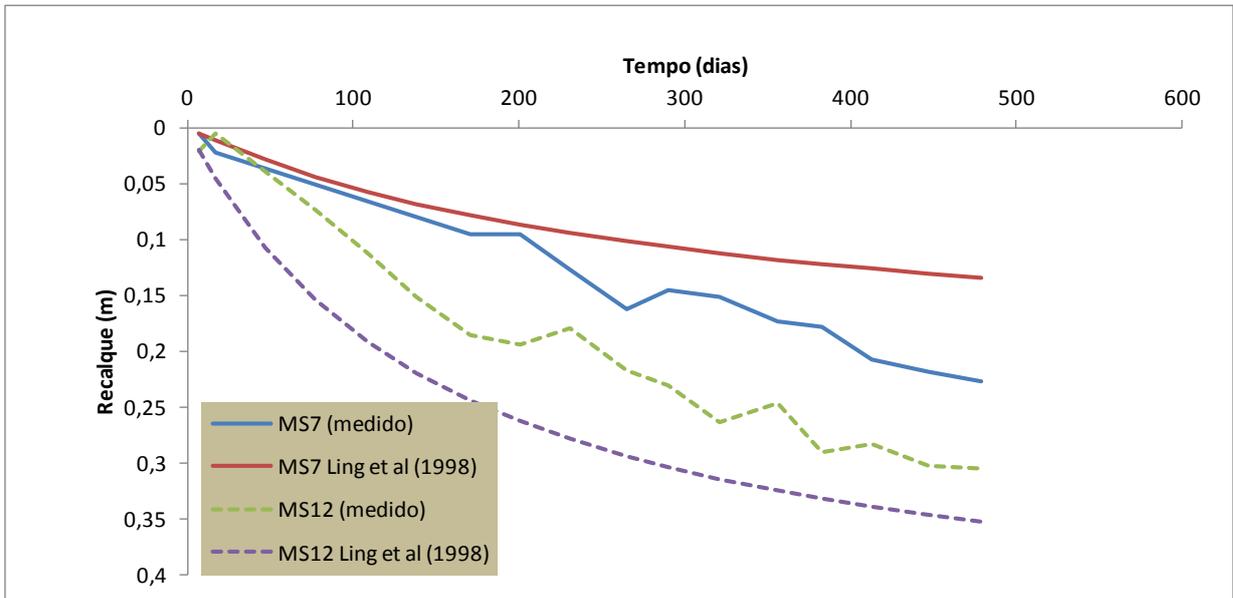
Tabela 5.7 – Parâmetros médios calculados e previstos: Ling et al (1998)

Tempo (meses)	Recalque medido(m)	Recalques previsto Ling et al.(1998) (m)	velocidade de Recalque medido(mm/dia)	velocidade de Recalque Ling et al.(1998) (mm/dia)	Deformação Observada(%)	Deformação Ling et al.(1998) (%)	Desvio de recalques Ling et al.(1998) (%)
2	0,05	0,08	2,49	0,92	4,0%	1,4%	89,4%
3	0,09	0,12	1,08	0,83	1,2%	2,1%	43,4%
4	0,16	0,16	1,36	0,75	2,2%	2,7%	38,8%
5	0,19	0,18	1,32	0,69	2,7%	3,2%	31,7%
6	0,22	0,21	1,24	0,64	3,0%	3,6%	18,8%
7	0,24	0,24	1,18	0,59	3,3%	3,9%	17,9%
8	0,27	0,26	1,16	0,56	3,6%	4,2%	26,9%
9	0,31	0,28	1,13	0,52	4,2%	4,5%	25,4%
10	0,32	0,30	1,08	0,49	4,4%	4,7%	22,2%
11	0,35	0,31	1,08	0,47	4,8%	4,9%	19,9%
12	0,36	0,33	1,02	0,44	4,9%	5,1%	22,6%
13	0,37	0,35	0,99	0,42	5,1%	5,2%	15,9%
14	0,40	0,36	0,94	0,40	5,4%	5,3%	20,3%
15	0,42	0,38	0,94	0,38	5,8%	5,5%	18,9%
16	0,44	0,39	0,91	0,36	6,0%	5,6%	19,2%
						Média de desvio	28,8%

(fonte: elaborado pelo autor)

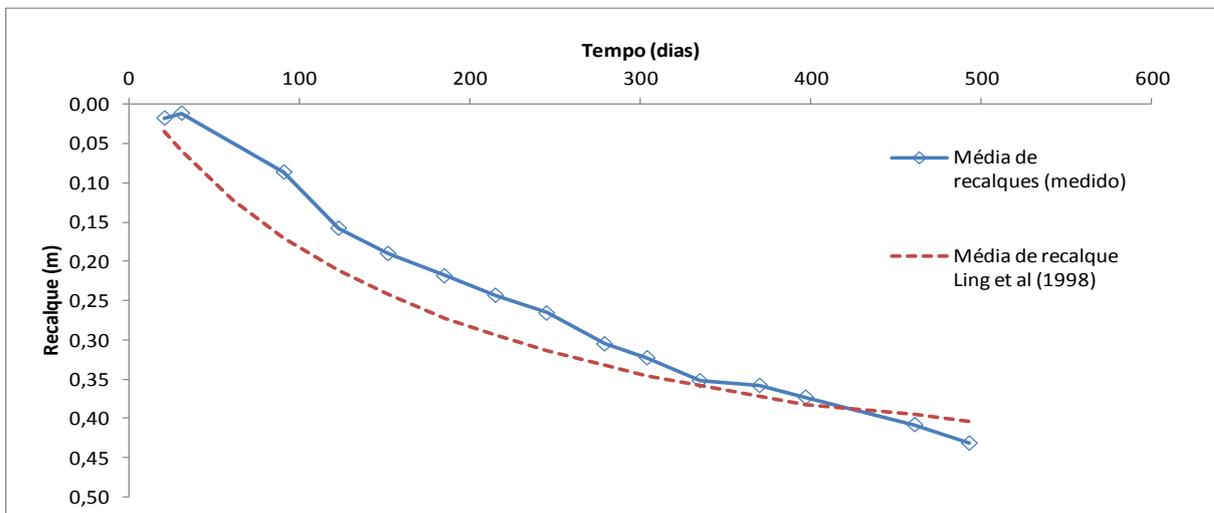
As figuras 5.29 e 5.30 mostram os gráficos de recalques e deformações encontradas em relação ao tempo.

Figura 5.29 – Recalque medido (MS7 e MS12) e comparado ao modelo de Ling et al (1998)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 5.30 – Recalque médio medido e comparado ao modelo de Ling et al (1998)



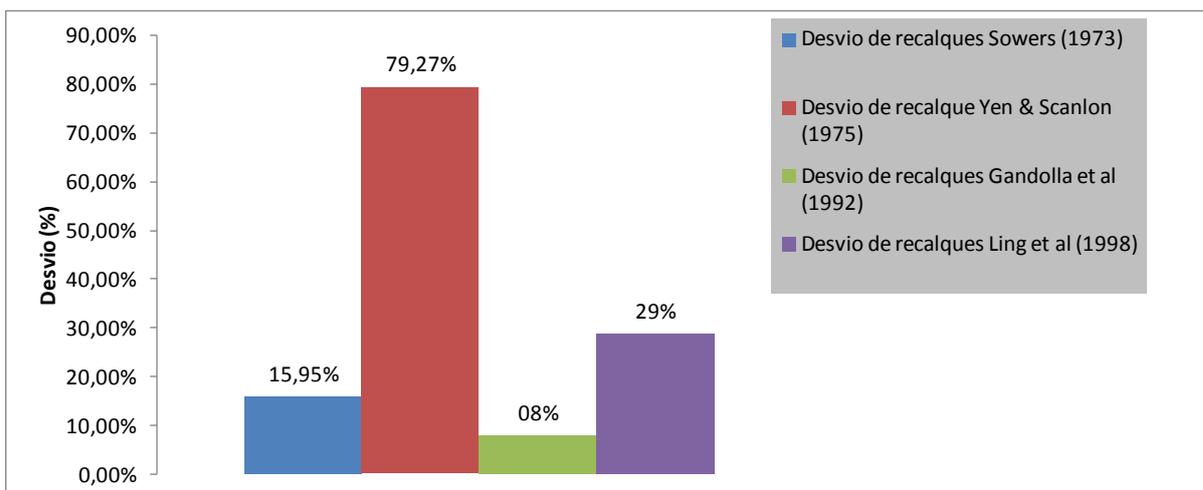
(fonte: elaborado pelo autor)

A aplicação do modelo de Ling et al (1998) apresentou uma boa concordância entre valores calculados e observados em campo a partir do quinto mês de monitoramento de recalques. Porém os desvios altos nos primeiros meses de monitoramento fez com que o desvio médio de recalques calculados e observados beirasse 29%. A utilização desta proposta, com alguns

ajustes, poderia sim ser recomendada para previsão de recalques neste caso de estudo tendo em vista os resultados obtidos.

A figura 5.31 compara os desvios de recalques obtidos utilizando os 4 modelos de previsão de recalques para o caso do aterro sanitário em estudo.

Figura 5.31 – comparação dos desvios de recalques



(fonte: elaborado pelo autor)

O estudo de modelos de compressibilidade de resíduos sólidos aplicado a este trabalho mostrou que os modelos apresentaram resultados satisfatórios na previsão de recalques com valores calculados na mesma ordem de grandeza que valores de recalques obtidos em campo, exceto o modelo de Yen & Scanlon (1975). Porém, os desvios médios de recalques para os modelos de Ling et al (1998) e Sowers (1973) acusaram valores relativamente altos resultado da compressibilidade inicial calculada nos primeiros meses.

Destaca se que o modelo de Gandolla et al.(1992) seria muito interessante para servir de base no ajuste de um modelo novo que se adapte à realidade do aterro em estudo.

Apesar de alguns modelos apresentarem valores de recalques satisfatórios, os desvios existentes levaram a ajustar um modelo novo para o caso do aterro em estudo. Este modelo está apresentado no item 5.2.5.

5.2.5. Apresentação de modelo novo

Este modelo é o resultado de ajuste de curvas a partir dos dados de monitoramento de recalques observados em campo e inspirado da proposta de Gandolla et al. (1992). Para se chegar ao resultado esperado, foi preciso utilizar o software *GRAPHER* para o ajuste da equação.

A proposta do modelo que mais se adaptou à realidade do aterro de São Leopoldo, a partir do qual se pode prever recalque está representado pela equação 5.

$$\rho = \Delta\rho_{0(t \leq 4\text{meses})} + \beta * t^k \quad (\text{Equação 5})$$

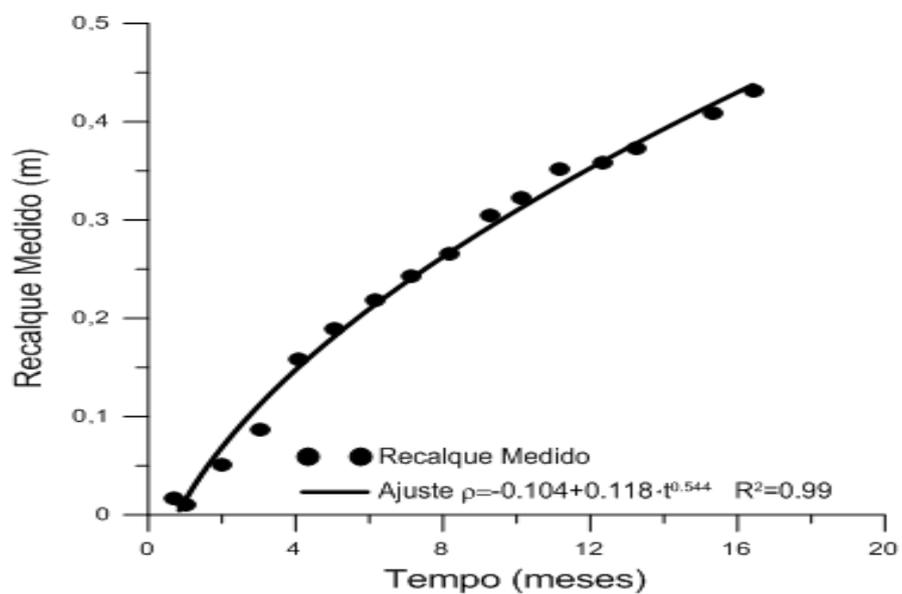
Sendo:

ρ	=	recalque medido (metros)
t	=	tempo ocorrido após a data de monitoramento
$\Delta\rho_{0(t \leq 4\text{meses})}$	=	recalque medido a partir do quarto mês (metros)
β	=	parâmetro intrínseco do modelo
k	=	potência

Os pontos a partir dos quais se modelou a equação é o resultado do recalque médio medido em campo durante um período de 16 meses de observação. Este ajuste acusou uma correção R^2 de 99%. Sendo assim, os futuros recalques poderão ser estimados a partir da equação acima proposta. A potência k apresentou um resultado próximo a uma raiz quadrada. Sendo isto, o parâmetro intrínseco β pode ser expresso em m/\sqrt{s} e para o aterro em estudo, ele vale 0.118. O tempo zero considerado no modelo é contado a partir do quarto mês após início de monitoramento dos recalques onde o recalque médio medido $\Delta\rho_{0(t \leq 4\text{meses})}$ é na ordem de 0.104 metros.

Os valores encontrados dos parâmetros do modelo constam na figura 5.32. Este ajuste de curva é o que melhor representa o comportamento das duas primeiras fases de operação do aterro sanitário de São Leopoldo embora alguns modelos de previsão de recalques avaliados neste trabalho tenham retornados valores de recalques na mesma ordem de grandeza que o comportamento real de campo.

Figura 5.32 – Apresentação do modelo novo para o aterro de São Leopoldo



(fonte: elaborado pelo autor)

No capítulo 6, serão feitas as considerações finais inerentes à previsão de recalques no aterro sanitário de São Leopoldo e umas sugestões para futuros trabalhos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse estudo, fez se uma análise de quatro modelos de compressibilidade existentes na literatura para a proposta de um modelo novo que reproduzisse com exatidão a compressibilidade do aterro sanitário de São Leopoldo tendo como base os dados de monitoramentos de recalques disponibilizados pela equipe de topografia por um período máximo de 16 meses através dos marcos superficiais MS6, MS7, MS10 e MS12 colocados em diferentes posições conforme mostra a figura 5.16 na página 82. Nesses pontos em análise, observou-se recalques de 58, 22, 63 e 30 cm nos marcos MS6, MS7, MS10 e MS 12 respectivamente com velocidades de assentamento entre 1 e 5 mm/dia.

Foi testado o modelo de Sowers (1973) que apresentou valores previstos satisfatórios comparados com os deslocamentos verticais observados nos marcos superficiais. Os recalques previstos calculados por este modelo foram de 58, 24, 57 e 30 cm nos marcos MS6, MS7, MS10 e MS12 tomados nesta ordem. Após ter testado o modelo de Sowers (1973), foi comparado o modelo de Yen & Scanlon (1975) que não apresentou resultados satisfatórios em relação ao recalque medido com valores calculados entre 6 e 15 cm em 16 meses de monitoramento. Quanto ao modelo de Gandolla et al (1992) os recalques calculados foram de 55, 22, 49 e 32 cm nos marcos MS6, MS7, MS10 e MS12 e por fim, os valores recalques calculados pelo modelo de Ling et al (1998) foram de 61, 17, 53 e 35 cm nos marcos superficiais acima mencionados. O modelo de Yen & Scanlon (1975) foi o único que apresentou resultados insatisfatórios em comparação aos recalques medidos.

A verificação do desempenho de cada modelo de previsão de recalques foi possível com uma equação de desvio que compara o recalque medido com o previsto como ilustra a equação 5.1 na página 85. Observou se um desvio de 15,95%, 79,27%, 8% e 29% respectivamente para os modelos de Sowers (1973), Yen & Scanlon (1975), Gandolla et al (1972) e Ling et al (1998). O resumo de desvios médios consta na figura 5.31 na página 98.

Apesar de 3 modelos de previsão de recalques testados apresentarem resultados satisfatórios com recalques previstos na mesma ordem de grandeza que os recalques medidos, eles não conseguiram reproduzir com exatidão o comportamento do maciço *in situ*. Sendo assim, foi

proposto um modelo novo inspirado do modelo de Gandolla et al (1992) através do ajuste de curva utilizando o *software GRAPHER* (figura 5.32).

Para futuros trabalhos, sugere-se a continuação de medição de recalques em marcos superficiais por um período tempo maior, a realização de ensaios de compactação para a verificação e a confirmação do comportamento mecânico e os resultados obtidos para os resíduos sólidos urbanos dispostos no aterro sanitário novo de São Leopoldo. Além disso, sugere-se testar o modelo proposto em outros aterros sanitários com as mesmas características que o aterro estudado a fim de apurar sua eficácia.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA DE RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2013.pdf>> Acesso 17 ago. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 13591**. Compostagem. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. **NBR 8419**. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.
- ABREU, R. C. **Compressibilidade de maciços sanitários**. 2000. 241 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2000.
- AMBIENTAL SUSTENTÁVEL. **Baia de Guanabara estará livre de lixões**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://ambientalsustentavel.org/2012/baia-de-guanabara-estara-livre-de-lixoes-ate-o-fim-do-ano/>> Acesso em 16 maio 2015.
- ASAOKA, A. Soil and foundations, Japanese society of soil mechanics and foundation. **Observational procedure of settlement prediction**, v. 18, n.4, p. 87-101, 1978.
- ATLAS BRASILEIRO DE GEE E ENERGIA. **Destinação final de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 2013.
- BABU, G. L. S.; REDDY, K. R.; CHOUSKEY, S. K.; KULFARNI, H. S. Practice periodical of hazardous, toxic and radioactive waste management: **Prediction of long-term municipal solid waste landfill using constructive model**, p. 139-150, 2010.
- BJARNGARD, A. B.; EDGERS, L. **Settlement of municipal solid waste landfills**. Wisconsin, v. 1, p. 195-205, 1990.
- BOSCOV, M. E. G. **geotecnia ambiental**. São Paulo: oficina de textos, 2008.
- BRASIL. Presidência da República. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei n. 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <http://file.abiplast.org.br/download/lei_12305.pdf>. Acesso em 12 nov. 2015.
- CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 1999. 300 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental**: Avaliação da influencia de projeto, construção e operação. 2008. 316 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

- COUMOULOS, D. G.; KORYALOS, T. P. **Prediction of attenuation of landfill settlement rates with time**, Hamburg: fourteenth international conference on soil mechanics and foundation engineering, 1997.
- D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 1. ed. São Paulo: ITP publicações, 1998.
- D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 2. ed. São Paulo: ITP publicações, 2000.
- DANTAS, L. J. **Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Campina Grande: ABES/PB, 2007.
- 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) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.
- DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA. **Aterro sanitário**. Minas Gerais, 2015. Disponível em:<<http://www.demlurb.pjf.mg.gov.br/>> Acesso em 15 ago.2015.
- EDIL, T. B.; RANGUETTE, V. J.; WUELLNER, W. W. Settlement of municipal refuse. In: GEOTECHNIC OF WATER-REFUSE, THEORY AND PRACTICE. Special Technical Publication, 1990. p. 225-229.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Orientações básicas para operação de aterro sanitário**. Minas Gerais, MG, 2006. Disponível em:<<http://www.feam.br/images/stories/arquivos/Cartilha%20Aterro2.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2015.
- GANDOLLA, M. A determinação dos efeitos do recalque sobre os depósitos de lixo sólido municipal. In: **simpósio internacional de destinação do lixo**. Salvador, 1994.
- GANDOLLA, M.; DUGNANI, L.; BRESSI, G. The determination of subsidence effects at municipal solid waste disposal sites. **Internacional solid waste congress exhibition**, Madrid, v. 1, p. 1-16, 1992.
- GIBSON, R. E.; LO, K. Y. A theory of soils exhibiting secondary compression. Acta polytechnica scandinavica, n. 296, p. 1-15, 1961.
- GOMES, L. P.; CONCEIÇÃO, D. C.; FLECK, A. Avaliação dos recalques em sistema piloto de aterramento de resíduos sólidos urbanos. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA SABITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu. **Anais...**Rio de Janeiro: ABES, 1997. Não paginado. 1 CD-ROM.
- GOURC, J. P.; THOMAS, S.; VUILLEMIN, M. Proposal of waste settlement survey methodology. **Geoenvironment conference**, Lisbon, v. 1, p. 195-200, 1999.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) de 2010. Rio de Janeiro: 2014. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/apps/atlas/>>. Acesso em: 8 set. 2015.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING. **Report of the ISSMGE technical committee on environmental geotechnics**, 1997.

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

LANDVA, A. O.; VALSANGKAR, A. J.; PELKEY, S. G. Lateral earth pressure at rest and compressibility of municipal solid waste. **Canadian geotechnical journal**, Reading, v. 37, p. 1157-1165, 2000.

LING, H.I.; LESCHINSKY, D. YOSHIYUKI, M.;TOSHINORI, K. **Estimation of municipal solid waste landfill settlement**. Journal of geotechnical and environmental engineering, 1998.

MARIANO, M. O. H.; JUCÁ, J. F. T. Recalques superficiais no aterro da Muribeca: valores previstos e medidos. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2000, Porto Seguro, BA. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2000. Não paginado. 1CD-ROM.

MARQUES, A. C. M. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos em Geotecnia**. 2001. 408 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. 2 V.

NASCIMENTO, J. C. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 2007. 159 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

OLIVEIRA, P. J. V. **Algumas Características de um solo com baixa plasticidade**. 1992. 264 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1992.

OLIVIER, F. **Tassement des déchets em CSD de classe II: Du site au modele**. 2003. 333 f. Tese (Doutorado em Geomecânica) – École des hautes études industrielles, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2003.

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

SOHN, K. C.; LEE, S. A method for prediction of long term settlement of sanitary landfill. Edmonton, p. 807-811, 1994.

SOWERS, G. F.; **Settlement of waste disposal fills: 8th international conference on soil mechanics and foundation engineering**. v. 4, p. 445-455, 1973.

TAPAHUASCO, W. F. C. **Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de um novo modelo de previsão de recalques considerando a parcela de biodegradação**. 2009. 169 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Faculdade de tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

TAPAHUASCO, W. F. C. **Avaliação de modelos de previsão de recalques dos resíduos sólidos do aterro Jockey Clube de Brasília**. 2002. 96 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

TEIXEIRA, M. C. **Previsão e monitoramento de recalques em aterros sanitários: estudo de casos – Central de Resíduos de Recreio Minas do Leão e São Leopoldo**. 2015. 217 f. – Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

TCHOBANOUGLOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues**, Mc graw hill, 1993.

YEN, B. C.; SCANLON, B. **Sanitary landfill settlement rates**: Journal of engineering division. p. 475-487, 1975.