

ALESSANDRO SARAIVA LORETO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA
AVALIAÇÃO DA COMPRESSIBILIDADE DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS: ESTUDO DE CASO DO ATERRO
SANITÁRIO DE VIÇOSA-MG**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2003

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

L869d
2003 Loreto, Alessandro Saraiva, 1974-
Desenvolvimento de um equipamento para avaliação da
compressibilidade de resíduos sólidos urbanos : estudo de
caso do aterro sanitário de Viçosa - MG / Alessandro
Saraiva Loreto. – Viçosa : UFV, 2003.
82p. : il.

Orientador: Roberto Francisco de Azevedo
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de
Viçosa

1. Aterro sanitário - Consolidação. 2. Compressibilidade
- Testes. 3. Recalque de estruturas – Previsão - Modelos
matemáticos. 4. Lixo – Eliminação – Viçosa (MG). I.
Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 628.364

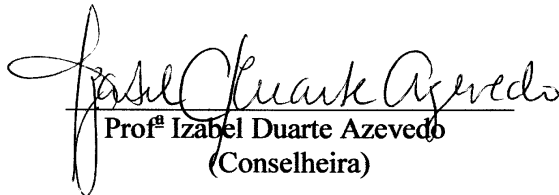
CDD 20.ed. 628.364

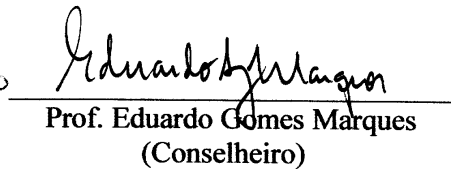
ALESSANDRO SARAIVA LORETO

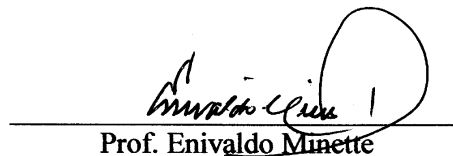
**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA
AVALIAÇÃO DA COMPRESSIBILIDADE DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS: ESTUDO DE CASO DO ATERRO
SANITÁRIO DE VIÇOSA-MG**

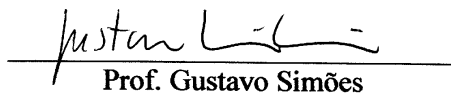
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

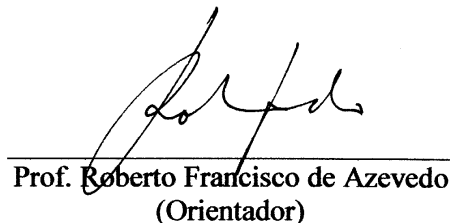
APROVADA: 22 de julho de 2003.


Prof.^a Isabel Duarte Azevedo
(Conselheira)


Prof. Eduardo Gomes Marques
(Conselheiro)


Prof. Enivaldo Minette


Prof. Gustavo Simões


Prof. Roberto Francisco de Azevedo
(Orientador)

A Deus.

Aos meus queridos pais, Léo e Dorinha.

À minha amada esposa, Socorro.

Às minhas amadas filhas, Victória, Alerrandra e Rebeca.

Às minhas queridas irmãs, Patrícia, Giuliana e Daniela.

À minha amiga especial, Dedé.

AGRADECIMENTOS

A meu Deus, meu salvador, guia e sustentador da minha vitória.

À minha esposa Maria do Socorro, companheira de todos os momentos.

Às minhas filhas, Victória, Alerrandra e Rebeca, pelo carinho e paciência durante a realização deste curso.

A minha mãezinha, Maria das Dores S. de Loreto, que muito lutou e me ajudou para que este dia chegasse.

Aos meus familiares, em especial meus pais e irmãs, pelo apoio e confiança nos meus momentos de luta.

À minha amiga Dedé, pela paciência e atenção comigo e minha família.

À Universidade Federal de Viçosa, que tem me atendido desde o Curso Médio, pelas oportunidades de conhecimentos e de qualidade profissional.

Às Instituições de Fomento à Pesquisa, pelos benefícios concedidos como Bolsista de Iniciação Científica, Aperfeiçoamento e de Mestrado; bem como aos meus professores orientadores, que foram grandes incentivadores e amigos: Professores Dario, Benedito, Roberto, Isabel e Eduardo.

Aos membros da Banca Examinadora desta Dissertação de Mestrado, pelo suporte técnico e contribuições no enriquecimento deste trabalho.

Ao bolsista de Iniciação Científica, André, pela amizade e ajuda na realização do trabalho de campo.

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil, que contribuíram para minha formação e realização desta pesquisa.

Aos meus colegas de curso, pelos momentos compartilhados.

Àqueles colegas que, realmente, conhecem o valor de uma amizade: João Reis, Ivoni, Toninho e Joaquim Felício.

À Fundação Educacional de Caratinga-FUNEC, seus diretores, coordenadores, professores, funcionários e alunos, que acreditaram na minha capacidade profissional e pelo apoio irrestrito.

E, finalmente, a todos que, de alguma forma dedicaram seu tempo e prestaram sugestões para o aprimoramento deste trabalho.

BIOGRAFIA

ALESSANDRO SARAIVA LORETO, filho de Leopoldo Loreto e Maria das Dôres Saraiva de Loreto, nasceu em 23 de dezembro de 1974, em Vitória, Espírito Santo.

Desde 1988, iniciou seus estudos na UFV, no Coluni e, posteriormente, no Curso de Graduação e no Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil.

Como estudante de Graduação e recém-formado atuou como Bolsista de Iniciação Científica e de Aperfeiçoamento da FAPEMIG.

Sempre se interessou pela docência, tendo sido Professor Particular, bem como de diversas Instituições de Ensino Médio e de Preparação para o Vestibular. Nesta mesma linha de atuação é, atualmente, Professor da Fundação Educacional de Caratinga (FUNEC/MG).

Em Abril de 2001, ingressou no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, iniciando o Curso de Mestrado, concentrando-se na linha de pesquisa Geotecnia Ambiental, defendendo tese em 22 de julho de 2003.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. O problema e sua importância	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Organização da tese.....	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1. Relevância do estudo de recalques em aterros sanitários	6
2.2. Mecanismos de recalques	8
2.3. Fases do desenvolvimento dos recalques	10
2.4. Modelos de previsão dos recalques	12
2.4.1. Modelo de sowers (1973)	14
2.4.2. Modelo de gandolla e outros (1992).....	16
2.4.3. Modelo de Simões (2000)	18
2.5. Utilização de modelos na previsão de recalques	25
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1. O aterro sanitário de Viçosa-MG	31
3.2. Descrição do ensaio de compressão confinada	36

	Página
3.2.1. O equipamento utilizado.....	36
3.2.2. Metodologia usada nos ensaios	40
3.3. Métodos utilizados no cálculo dos recalques e deslocamentos ...	43
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
4.1. Características das amostras ensaiadas	44
4.2. Ensaios de laboratório em grandes dimensões	45
4.3. Determinação dos parâmetros de compressibilidade	56
4.4. Cálculo de recalques no aterro sanitário de Viçosa-MG	71
4.4.1. Utilizando o modelo de Gandolla com o acréscimo do recalque imediato de Sowers.....	71
4.4.2. Utilizando o modelo de Sowers.....	73
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	76
5.1. Conclusões.....	76
5.2. Sugestões	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE QUADROS

	Página
1 Principais modelos de previsão de recalque em RSU e suas características	13
2 Características das amostras submetidas a ensaios de compressão confinada	44
3 Composição gravimétrica dos RSU do Ensaio 1.....	45
4 Dados da curva de compressibilidade (Ensaio 1).....	49
5 Composição gravimétrica dos RSU (ensaio 2).....	51
6 Dados da curva de compressibilidade (Ensaio 2).....	55
7 Quadro com os valores do Módulo de Elasticidade de todas as etapas de carregamento	58
8 Quadro com os valores dos parâmetros “k” e “a” de todas as etapas de carregamento	65
9 Quadro com as previsões dos recalques por Gandolla incluindo o recalque imediato	72
10 Previsões dos recalques por Sowers.....	74

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Fases de recalques de RSU.....	10
2 Localização da Cidade de Viçosa-MG.....	32
3 Planta Plani-altimétrica	33
4 Concepção Geral do Projeto.....	35
5 Curvas granulométricas.....	36
6 Seção Transversal 4-4	37
7 Vista do equipamento para realização de ensaios de compressão confinada em amostras de RSU de grandes dimensões	38
8 Vista geral do equipamento para realização dos ensaios	39
9 Vista do sistema de ligação da caixa d'água com a viga metálica	39
10 Processo de quarteamento do RSU para ser feito a gravimetria	41
11 Análise Gravimétrica dos RSU	41

	Página
12	Representação da disposição do RSU em camadas..... 42
13	Compactação do RSU na célula 42
14	Curva recalque <i>versus</i> tempo do primeiro carregamento 46
15	Curva recalque <i>versus</i> tempo do segundo carregamento 46
16	Curva recalque <i>versus</i> tempo do terceiro carregamento 47
17	Curva recalque <i>versus</i> tempo do quarto carregamento 47
18	Curva recalque <i>versus</i> tempo do quinto carregamento 48
19	Curva recalque <i>versus</i> tempo do sexto carregamento 48
20	Curva recalque <i>versus</i> tempo do primeiro ensaio 49
21	Curva carga <i>versus</i> recalque do ensaio 1..... 50
22	Curva tensão <i>versus</i> deformação do ensaio 1..... 50
23	Curva recalque <i>versus</i> tempo do primeiro carregamento 51
24	Curva recalque <i>versus</i> tempo do segundo carregamento 52
25	Curva recalque <i>versus</i> tempo do terceiro carregamento 52
26	Curva recalque <i>versus</i> tempo do quarto carregamento 53
27	Curva recalque <i>versus</i> tempo do quinto carregamento 53
28	Curva recalque <i>versus</i> tempo do sexto carregamento 54
29	Curva recalque <i>versus</i> tempo do segundo ensaio 54
30	Curva carga <i>versus</i> recalque do segundo ensaio 55
31	Curva tensão <i>versus</i> deformação do segundo ensaio 56
32	Gráfico para determinação do índice de compressibilidade..... 57
33	Curva tempo (min.) <i>versus</i> $\log(r_f - r_t)$ (mm) do primeiro carregamento (ensaio 1) 59

	Página
34 Curva tempo (min.) <i>versus</i> log(rf - rt) (mm) do segundo carregamento (ensaio 1)	59
35 Curva tempo (min.) <i>versus</i> log(rf - rt) (mm) do terceiro carregamento (ensaio 1)	60
36 Curva tempo (min.) <i>versus</i> log(rf - rt) (mm) do quarto carregamento (ensaio 1)	60
37 Curva tempo (min.) <i>versus</i> log(rf - rt) (mm) do quinto carregamento (ensaio 1)	61
38 Curva tempo (min.) <i>versus</i> log(rf - rt) (mm) do sexto carregamento (ensaio 1)	61
39 Curva tempo (min.) <i>versus</i> log(rf - rt) (mm) do primeiro carregamento (ensaio 2)	62
40 Curva tempo (min.) <i>versus</i> log(rf - rt) (mm) do segundo carregamento (ensaio 2)	62
41 Curva tempo (min.) <i>versus</i> log(rf - rt) (mm) do terceiro carregamento (ensaio 2)	63
42 Curva tempo (min.) <i>versus</i> log(rf - rt) (mm) do quarto carregamento (ensaio 2)	63
43 Curva tempo (min.) <i>versus</i> log(rf - rt) (mm) do quinto carregamento (ensaio 2)	64
44 Curva tempo (min.) <i>versus</i> log(rf - rt) (mm) do sexto carregamento (ensaio 2)	64
45 Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min.) do primeiro carregamento (ensaio 1), recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.....	65
46 Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min.) do segundo carregamento (ensaio 1), recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.....	66
47 Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min.) do terceiro carregamento (ensaio 1), recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.....	66

48	Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min.) do quarto carregamento (ensaio 1), recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.....	67
49	Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min.) do quinto carregamento (ensaio 1), recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.....	67
50	Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min.) do sexto carregamento (ensaio 1), recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.....	68
51	Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min.) do primeiro carregamento (ensaio 2), recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.....	68
52	Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min.) do segundo carregamento (ensaio 2), recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.....	69
53	Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min.) do terceiro carregamento (ensaio 2), recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.....	69
54	Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min.) do quarto carregamento (ensaio 2), recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.....	70
55	Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min.) do quinto carregamento (ensaio 2), recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.....	70
56	Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min.) do sexto carregamento (ensaio 2), recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.....	71
57	Curva de previsões de recalques para a secção 4-4 utilizando o método de Gandolla somado ao recalque imediato de Sowers	73
58	Curva de previsões de recalques para a secção 4-4 utilizando o método de Sowers	74
59	Curva de previsões de recalques comparativa para a secção 4-4 utilizando os métodos de Sowers e Gandolla.....	75

RESUMO

LORETO, Alessandro Saraiva, M.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2003. **Desenvolvimento de um equipamento para avaliação da compressibilidade de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso do aterro sanitário de Viçosa-MG.** Orientador: Roberto Francisco Azevedo. Conselheiros: Izabel Duarte Azevedo e Eduardo Gomes Marques.

As deformações que ocorrem em aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) são devidas, principalmente, a dois processos: o primeiro processo mecânico, decorre, sobretudo, da ação das forças de peso próprio e origina deformações imediatas, deformações com o tempo causadas pela dissipação de excessos de poro pressões gerados nos vazios dos RSU e deformações lenta. Como a permeabilidade dos RSU é elevada, normalmente, estes excessos de poro-pressões se dissipam rapidamente; a biodegradação da matéria orgânica existente nos RSU é o segundo processo gerador de deformações nos aterros sanitários. Este processo é lento e, normalmente, se passa ao longo de vários anos. Estes dois processos, embora ocorram simultaneamente, são, habitualmente, estudados separadamente porque o processo mecânico ocorre muito mais rapidamente que o processo de biodegradação da matéria orgânica. A avaliação de recalques em aterros sanitários é muito importante porque possibilita: uma melhor determinação da sua vida útil; o desenvolvimento de

estudos para o reaproveitamento das áreas ocupadas após o fechamento dos aterros; e a avaliação da integridade do sistema de cobertura final e dos dispositivos de drenagem dos líquidos percolados, dos gases e das águas pluviais. Nos projetos de aterros sanitários, entretanto, não se costuma calcular as deformações sofridas pelos RSU porque ainda são escassos os trabalhos que definem parâmetros para se determinar com razoável precisão as deformações que estes materiais experimentam. Neste sentido, o presente trabalho trata das deformações que ocorrem em RSU devidas a processos mecânicos. Inicialmente, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica sobre o tema. Em seguida, os principais aspectos do aterro sanitário de Viçosa são descritos, bem como os equipamentos e a metodologia utilizados nos ensaios. Na seqüência, apresentam-se os resultados de ensaios de compressão confinada em amostras cilíndricas com cerca de 1m de diâmetro e 2m de altura de RSU da cidade de Viçosa, bem como a determinação dos parâmetros de compressibilidade dos resíduos. Por fim, com os parâmetros obtidos nos ensaios, são feitas estimativas dos recalques para o aterro sanitário da cidade de Viçosa por meio de modelos unidimensionais.

ABSTRACT

LORETO, Alessandro Saraiva, M.S., Universidade Federal de Viçosa, July 2003. **Development of an equipment for compressibility evaluation of urban solid wastes: a case study of Viçosa-MG landfill.** Adviser: Roberto Francisco Azevedo. Committee members: Izabel Duarte Azevedo e Eduardo Gomes Marques.

Sanitary landfill deformations are mainly due to two processes. The first one a mechanical process, is due to the action of body forces and gives rise to immediate deformations and deformations with time caused by the dissipation of excess pore pressures generated in the MSW. Since the permeability of the MSW is high, normally, these excess pore pressures dissipate quickly. The biodegradation of the organic matter that exists in the MSW is the second process that generates deformation in landfills. This process is slow and, normally, occurs during years. These two processes, although simultaneous, are treated, habitually, separately, because the mechanical process occurs much quicker than the biodegradation one. Settlement evaluation in sanitary landfills is very important because facilitates: a better understanding of the live span of the landfill; studies to re-utilize the area after the landfill closure; and, the evaluation of the integrity of the final cover and of the leachate, rainwater and gas drainage systems. In sanitary

landfill projects, however, it is not common to calculate deformations of the MSW, because it is still rare to find works defining parameters necessary to calculate deformation in MSW. In this sense, the present thesis deals with deformations that happen in MSW due to mechanical processes. Initially, a literature review on the subject is presented. Following, the main aspects of the sanitary landfill of Viçosa city are shown, together with the equipments and the methodology used during testing. Subsequently, results of confined compression tests performed in cylindrical samples having 1m diameter and 2m height on MSW of Viçosa city are presented, as well as the procedure utilized to determine the compressibility parameters of the MSW. Finally, with the parameters obtained in the tests, an estimate of the settlements that will happen in the sanitary landfill of Viçosa city is made.

1. INTRODUÇÃO

1.1. O problema e sua importância

Atualmente, a quantidade de RSU gerada em nosso planeta tem aumentado rapidamente a produção de resíduos sólidos urbanos (RSU), caracterizando-se como um dos principais problemas dos municípios. Isto se deve ao crescimento do consumo de produtos industrializados e à explosão populacional das cidades, aliados à baixa degradação natural dos RSU.

BOSCOV e ABREU (2000) citam que em países industrializados, com população total de aproximadamente 750 milhões de pessoas, a produção de RSU é de aproximadamente 0,94 kg/*per capita*/dia, dos quais 68,8% têm como destino final o solo. Também verificaram que, nos países desenvolvidos, produtores de grande parte dos RSU gerados no mundo, 60 a 70% destes resíduos são dispostos inadequadamente, enquanto nos países menos desenvolvidos, a disposição inadequada representa 95% a 100% dos RSU.

Dentre as técnicas de disposição de RSU utilizadas, os aterros sanitários têm sido mais utilizados que outras técnicas, como incinerações, triagem e compostagem embora deva-se entender que estas técnicas não são excludentes. Em outras palavras, o aterro sanitário deve ser considerado como uma técnica de destinação final, quase sempre indispensável, enquanto que

triagem, reciclagem, compostagem e incineração são técnicas de tratamento dos RSU.

O aterro sanitário é considerado um método de engenharia que confina os RSU em uma área dispondo-os em camadas compactadas, cobertas diariamente com solo, possuindo sistemas de impermeabilização, drenagem e tratamento de chorume que procuram minimizar os riscos de causar danos ao meio ambiente.

No Brasil, 37% dos RSU ainda se destinam aos “lixões”, que são descargas a céu aberto, sem nenhuma proteção ao meio ambiente ou à saúde pública, enquanto 21,3% são destinados aos aterros controlados, onde os resíduos são cobertos com solo, eventualmente compactados, não existindo impermeabilização da base, nem drenagem e ou tratamento de chorume ou gases gerados, o que pode levar a impactos ambientais significativos (JUCÁ, 2003).

O crescimento industrial, econômico e demográfico das grandes cidades brasileiras favorece o aumento da produção “per capita” de RSU. Por exemplo, em 1960, 45% dos brasileiros moravam em cidades. Em 2000, este número passou para 81%, levando à necessidade de se adotarem técnicas de disposição de resíduos adequadas do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Jucá (2003) registra uma produção de 240.000 toneladas de RSU por dia no Brasil, sendo a maior parte deste destinada aos “lixões”, necessitando-se, nessas condições, muitos anos para se decompor.

A crescente geração de RSU e a dificuldade em se encontrar áreas próximas aos centros urbanos para disposição dos mesmos, fazem com que os aterros sejam construídos com alturas cada vez maiores (é comum encontrarem-se aterros com mais de 50 metros de altura), possibilitando que a ocorrência de problemas de estabilidade e de grandes recalques de aterros sanitários sejam constantes.

Gomes et al. (2003) e Gandolla et al. (1996) comentam que os recalques podem variar de 25% a 50% em relação à altura inicial dos depósitos de

resíduos. Assim, sua previsão torna-se muito importante para se estimar, além da vida útil do aterro sanitário, o reaproveitamento das áreas de disposição, a estabilidade dos taludes, o bom funcionamento dos sistemas de drenagem, etc.. Entretanto, a estimativa precisa destes recalques é bastante difícil, pois os resíduos contidos dentro de um aterro são compostos, em sua grande maioria, de materiais degradáveis, o que provoca uma contínua transformação destes materiais em líquidos e gases (biodegradação), resultando em uma variação de volume que origina recalques e mudanças na geometria das células do lixo.

É importante frisar que muitos projetos de aterros sanitários no Brasil são feitos com base em parâmetros obtidos em RSU de outros países e em condições diferentes, sem a confirmação para os RSU do nosso país.

1.2. Objetivo

O presente trabalho teve como objetivos:

- O desenvolvimento de um equipamento para avaliação da compressibilidade em RSU;
- O estudo e calibração de modelos de avaliação de recalques em RSU;
- Uma estimativa de recalques no Aterro Sanitário de Viçosa/MG.

1.3. Organização da tese

A presente dissertação foi organizada em seis capítulos, assim delimitados.

No **Capítulo 1**, procurou-se apresentar a relevância do tema abordado, bem como os principais objetivos que se esperavam alcançar com a pesquisa.

No **Capítulo 2**, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os assuntos abordados no trabalho, para fundamentar a discussão dos resultados. Este capítulo foi subdividido em cinco partes: a) relevância do estudo de recalques em aterros sanitários, considerando que o problema do RSU é uma questão

social em todos âmbitos, embora com diferentes níveis de intensidade, em função do estilo de desenvolvimento adotado, que se reflete sobre a alocação e distribuição dos recursos, organização produtiva e nível de tecnologia adotado, assim como sobre o padrão de consumo utilizado. Além disso, procurou-se definir, identificar os aterros sanitários; qual é a importância da modelagem e do monitoramento dos mesmos; b) posteriormente, procurou-se tecer comentários sobre os mecanismos de recalques, de acordo com vários autores na literatura, mostrando que os RSU são meios multifásicos, constituídos por elementos sólidos, líquidos e gasosos; c) na 3ª parte do capítulo 2, foi feito um estudo das fases do desenvolvimento de recalques, procurando-se comentar assuntos sobre compressibilidade, tanto mecânica como biológica, embora saiba-se da ação simultânea de ambas, sendo pressuposto o princípio da superposição dos efeitos; d) na 4ª parte do capítulo 2, são analisados aspectos referentes ao objeto central desta tese, que se refere à quantificação dos recalques ou deformações do aterro sanitário. Inicialmente tratou-se de aspectos introdutórios relacionados às características, fases e fatores condicionantes dos recalques, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os principais modelos de previsão de recalques, para, em seguida, descrever sobre o referencial teórico, componentes, parâmetros, representação matemática e aplicação dos modelos de SOWERS (1973), SIMÕES (2000) e GANDOLLA et. al. (1992), sendo que a presente tese se baseou, nos modelos de Sowers e Gandolla por considerá-los modelos de fácil obtenção de seus parâmetros, adaptando-se assim ao equipamento produzido. Ou seja, apesar de que seja unidimensional, incorpore a história das tensões, o que permite a estimativa dos recalques em diversas situações de carregamento. e) A 5ª seção do capítulo 2 procurou apresentar duas formas para associar ou comparar a previsão dos recalques com seu comportamento real, fazendo-se uso de modelos matemáticos (quando foram associados os parâmetros dos ensaios de laboratório com aqueles já obtidos por SOWERS e GANDOLLA). A importância desta simulação é que a mesma poderá proporcionar subsídios para análise da estabilidade e desempenho do próprio Aterro de Viçosa-MG.

No **Capítulo 3**, discutiu-se a metodologia do trabalho, subdividida em três etapas. Na 1ª fase, foi feita uma apresentação do aterro sanitário de Viçosa-MG, além da caracterização dos RSU, coletados em diferentes bairros do município de Viçosa-MG, por meio da determinação da sua composição gravimétrica, teor de umidade e peso específico. Na 2ª fase descreve-se a construção do equipamento que possibilita realizar ensaios de compressão confinada em amostras de RSU com grandes dimensões. Posteriormente, na 3ª sessão do capítulo 3, procurou-se apresentar a metodologia usada durante a realização dos ensaios.

No **Capítulo 4** são apresentados e discutidos os resultados encontrados nos ensaios de compressibilidade, bem como nas análises das previsões dos recalques do aterro sanitário de Viçosa-MG, utilizando os modelos de Sowers (1973) e Gandolla (1992).

No **Capítulo 5** são apresentadas as principais conclusões encontradas no trabalho e sugestões para novas pesquisas, em função das limitações encontradas no trabalho realizado.

Em seguida são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas, que subsidiam as informações do conteúdo da dissertação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Relevância do estudo de recalques em aterros sanitários

A crescente taxa de geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), associada à escassez de locais apropriados para suas disposições, principalmente nos grandes centros urbanos, tem levado à construção de aterros sanitários cada vez mais altos, que sofrem recalques significativos e possíveis acidentes. Em função disso, metodologias para o cálculo desses recalques têm sido desenvolvidas, apesar de se reconhecer que estas análises são complexas, uma vez que os RSU são caracterizados por apresentar elevada heterogeneidade e comportamento dependente do tempo (ALMEIDA e SIMÕES, 2000).

GOMES et al. (2003) consideram que, para se projetar um aterro sanitário com sucesso, deve-se conhecer a composição gravimétrica dos resíduos a serem dispostos, as características do local e da região do mesmo e ainda, um outro fator importante, que seria uma correta previsão dos recalques e conseqüentemente, as modificações geométricas nas células de RSU construídas.

Segundo Wall e Zeiss (1996), apud Gomes et al. (2003), os RSU são compostos, em sua grande maioria, de material facilmente biodegradável. A

degradação deste material provoca recalques, resultando numa contínua deformação do aterro sanitário. Segundo os autores, os recalques em aterros de RSU variam de 25% a 50% em relação à sua altura inicial.

Segundo Simões (2000), a avaliação de recalques em aterros sanitários permite: a determinação da vida útil dos aterros, fator importante no gerenciamento dos RSU; a avaliação da integridade dos sistemas de revestimento, de cobertura e dos dispositivos de coleta de chorume e gases; e, o desenvolvimento de estudos para o reaproveitamento das áreas ocupadas após o fechamento dos aterros.

SIMÕES (2000) pesquisou sobre a origem e evolução dos recalques por meio de simulações em um aterro sanitário em Taiwan, fazendo uso de ensaios com os RSU realizados em células de grandes dimensões. Os autores concluíram que, devido à escala de tempo em que são realizados os ensaios de laboratório, torna-se impossível incorporar a decomposição da matéria orgânica e sua influência nos recalques. Assim, na versão destes autores e de outros pesquisadores (como por exemplo, CARVALHO, 1999) os modelos de previsão de recalques em RSU devem estar fundamentados nos parâmetros mecânicos que podem ser obtidos em ensaios de laboratório de curta duração, associados a monitoramento de campo.

ABREU (2000) estudou os recalques em aterros sanitários, assim como a velocidade dos mesmos. Para este pesquisador a relevância do estudo dos recalques, suas características, fases de desenvolvimento e mecanismos deriva da necessidade de se ter uma estimativa da vida útil do aterro, de acordo com a previsão do tempo de disposição, face ao volume adicional que se ganha devido aos recalques. Além disto, pela escassez de áreas disponíveis para novos empreendimentos, é importante conhecer como e quando as áreas dos aterros podem ser reaproveitadas, após o encerramento da disposição dos resíduos. Outro aspecto importante a ser ressaltado está associado à questão de se tentar prevenir a degradação dos sistemas de drenagem superficial e de drenagem de chorume. Para tanto é necessário estimar e monitorar as possíveis deformações dos aterros sanitários, dado que existe a possibilidade de

ocorrência de recalques diferenciais, que podem acarretar pontos com declividade invertida, induzindo ao acúmulo indevido tanto de águas pluviais, quanto de chorume, nos sistemas de drenagem de águas superficiais ou de efluentes, respectivamente. Outros aspectos enfatizados por ABREU (2000) quanto à relevância da previsão e monitoramento de recalques em aterros sanitários, principalmente naqueles que possuem grandes espessuras de RSU, são: a evolução dos recalques, que pode fornecer fundamental subsídio à avaliação da estabilidade geotécnica dos taludes e, por outro lado, a avaliação do desempenho do sistema de cobertura final dos RSU. Se ocorrerem trincas decorrentes de recalques diferenciais no sistema de cobertura final, pode haver infiltração de águas de chuvas para o interior da massa de RSU, o que poderá provocar elevação das poro pressões no maciço, e eventualmente, problemas na estabilidade global do aterro.

Enfim, os mecanismos que governam a evolução dos recalques são inúmeros e complexos devido à heterogeneidade dos resíduos, à deformabilidade dos seus constituintes, ao papel desempenhado pelos fluidos presentes, à influência das condições ambientais e das técnicas de operação, principalmente em relação à compactação dos RSU e funcionamento dos sistemas de drenagem. Portanto, vários pesquisadores nacionais e internacionais têm enfatizado a necessidade do estudo das deformações em aterros sanitários (SIMÕES, 2000).

2.2. Mecanismos de recalques

De acordo com VAN MEERTEN et al. (1995), os RSU são meios multifásicos particulados, constituídos por elementos sólidos (elementos inertes estáveis, elementos muito deformáveis de comportamento anisotrópico e por elementos biodegradáveis), líquidos e gasosos que interagem entre si. Por exemplo, a presença e o fluxo de líquidos pode modificar as propriedades das partículas sólidas, gerando comportamentos reológicos diferenciados. Ou seja, a presença de componentes nos RSU com elevada porosidade ou com

capacidade de absorver líquidos, pode modificar o estado físico e as propriedades destes componentes, com a aceleração dos processos de decomposição química e biológica.

Naturalmente, as características dos RSU influenciam os mecanismos que produzem os recalques. Estes mecanismos atuam de forma contínua e simultânea ao longo do tempo. SOWERS (1973) descreveu estes mecanismos da seguinte forma:

- Solicitação mecânica: consiste na ocorrência de distorção, dobra, esmagamento, quebra e rearranjo de partículas;

- Ravinamento interno: consiste na erosão e migração de partículas finas para vazios existentes entre as partículas maiores;

- Alterações físico-químicas: quando ocorre corrosão, oxidação e combustão de partículas;

- Biodegradação: envolve a degradação biológica, que corresponde à fermentação e degradação de partículas, levando à transferência da massa da fase sólida para as fases líquida e gasosa;

- Interação: consiste na interação entre mecanismos. Por exemplo: a geração de ácidos orgânicos a partir da biodegradação pode corroer outros materiais. Ou, a alteração do volume pela solicitação mecânica pode provocar ravinamento interno, etc.

- Dissipação dos excessos de pressões de líquidos e gases existentes nos poros: consiste na deformação decorrente da dissipação destes excessos de poro-pressão ao longo do tempo.

MANASSERO et al. (1996) apresentam mecanismos que produzem recalques muito parecidos com os do modelo de Sowers (1973) com a diferença entre uma parcela relativa ao comportamento viscoso, representado por deformações lentas do resíduo, sob a ação de carga constante.

Outro enfoque para os mecanismos de recalques, apresentado por Coduto e Huitric (1990), apud Boscov e Abreu (2000) e SIMÕES (2000), pressupõe que os recalques processam-se em três etapas: a) compactação, processo no qual há uma constante reorientação das partículas sólidas;

b) consolidação ou adensamento, correspondente ao processo de dissipação de excesso de poro pressões produzido pela aplicação de cargas resultantes dos fenômenos de deformação lenta; c) decomposição da matéria orgânica, que consiste no processo em que os sólidos orgânicos são decompostos e convertidos em líquidos e gases, gerando uma redução do volume do resíduo.

2.3. Fases do desenvolvimento dos recalques

Conforme manifestado por BOSCOV e ABREU (2000), a divisão do desenvolvimento dos recalques em fases é questionável, uma vez que tais fases não são independentes e, além disso, podem ocorrer simultaneamente. Contudo, a grande maioria de autores considera que, à semelhança de solos, os recalques dos aterros sanitários, independentemente de seus mecanismos, podem ser divididos, ao longo do tempo, em três fases: compressão inicial, compressão primária e compressão secundária, identificadas e descritas por BOSCOV e ABREU (2000), da seguinte forma (Figura 1):

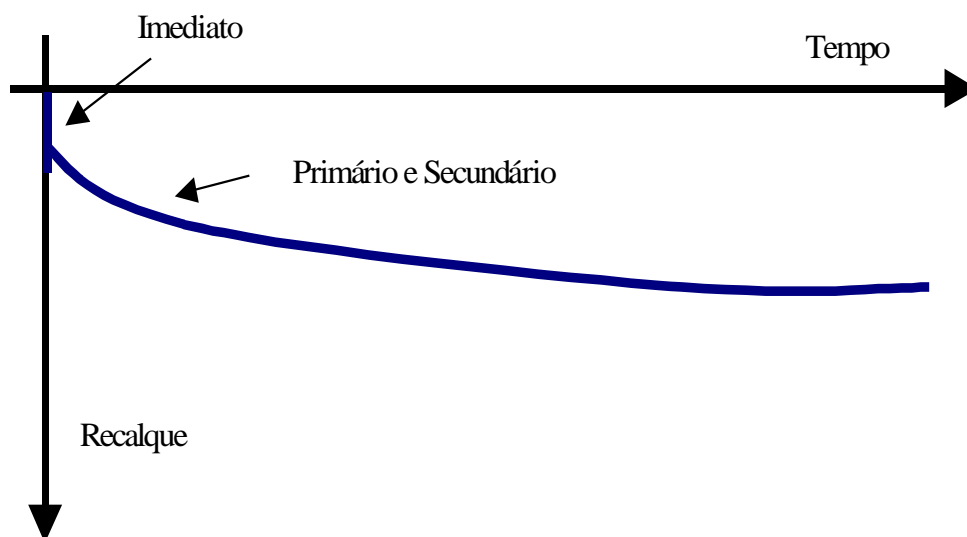


Figura 1 – Fases de recalques de RSU.

- *Compressão inicial*, corresponde ao recalque instantâneo que ocorre

quando uma solicitação externa, peso próprio e/ou sobrecargas, é aplicada ao aterro sanitário.

- **Compressão primária**, que corresponde ao recalque derivado da dissipação dos excessos de poro-pressões (líquido e gás) dos vazios, que, segundo SOWERS (1973), geralmente ocorre nos primeiros 30 dias após a aplicação de carga. Este tipo de recalque é semelhante ao adensamento primário dos solos.

- **Compressão secundária**, que corresponde ao recalque devido à deformação lenta (*creep*), semelhante ao que ocorre nos solos, e à degradação biológica (biodegradação) dos materiais componentes dos RSU. Considera-se que a compressão secundária possa durar décadas, atingir 25% da espessura total do aterro e ser responsável pela maior parcela dos recalques dos aterros sanitários.

Carvalho et al. (2003), por meio de ensaios de laboratório e através de dados de monitoramento no Aterro Sanitário de Bandeirantes, em São Paulo, procuraram determinar as diversas fases do desenvolvimento de recalques em RSU, bem como parâmetros que caracterizam estas fases. Os ensaios de laboratório foram realizados com um consolidômetro de grandes dimensões (365 mm de diâmetro e 385 mm de altura). As amostras de RSU foram compactadas manualmente em 6 camadas dentro do consolidômetro e, em seguida, foram aplicados vários estágios de carregamento vertical, medindo-se os recalques com o tempo em cada um dos estágios. Cada estágio de carregamento durou, em média, 15 dias; enquanto que, em média, cada ensaio de consolidação levou cerca de 4 meses para ser executado. Após a aplicação do último estágio de tensão (no caso 640 KPa) a amostra era descarregada, determinando-se o peso e a umidade do corpo de prova ao final do ensaio.

Os resultados destes ensaios mostraram que os RSU estudados apresentaram uma compressão inicial e, em seguida, um trecho de compressão primária de pequena amplitude. Este processo de compressão primária é relativamente rápido: poucos minutos após a aplicação da carga, inicia um aumento linear das deformações com o logaritmo do tempo, caracterizando a

compressão secundária, cujos índices praticamente independem da sobrecarga e são ligeiramente dependentes do índice de vazios. A explicação para tal resultado pode estar associada à alta permeabilidade do lixo e, portanto, à rápida dissipação dos excessos de pressões gerados pelo carregamento. Constatou-se, também, a dependência do índice de coeficiente compressão primária em relação ao índice de vazios inicial da amostra, cujo valor médio do mesmo coeficiente foi de 0,20.

Os resultados obtidos por meio do monitoramento *in situ* dos recalques, durante 7 anos, mostraram que ocorreram pequenas deformações do início do monitoramento até 150 dias e, a partir deste tempo, as deformações apresentaram-se mais intensas. A relação recalque versus logaritmo do tempo, obtida com este monitoramento, mostrou a existência de uma componente do recalque, que ocorre rapidamente após a aplicação de sobrecarga no aterro; posteriormente ocorre uma segunda componente, que exibe comportamento linear com $\log t$; e, uma terceira componente, que também exibe comportamento linear, mas com uma inclinação diferente, e que iniciou-se aproximadamente aos 200 dias do carregamento, quando os recalques resultam, basicamente, do processo de biodegradação do RSU.

Por fim, os autores sugerem que sejam encontradas alternativas que permitam acelerar os processo de biodegradação durante os ensaios de compressão em laboratório. Por sua vez, enfatizam que retro-análises de resultados de campo são essenciais para aferição dos ensaios de laboratório, dado que as medidas de campo incluem todos os fatores presentes no comportamento dos maciços de RSU.

2.4. Modelos de previsão de recalques

Um bom modelo de previsão de recalques para aterros sanitários deve possuir as seguintes características: ser dimensionalmente correto; ser definido a partir de um pequeno número de parâmetros que possuam significado físico ou, pelo menos, estejam relacionados a alguma propriedade conhecida; ser

capaz de separar a influência dos principais fatores relevantes na análise; e, principalmente, fornecer previsões precisas, tanto quanto possível, ao longo do tempo. Vários modelos para a previsão de recalques em aterros sanitários foram desenvolvidos, embora, também, sejam vários os problemas associados à interpretação e utilização de alguns deles. O Quadro 1 apresenta, de forma sintética, os principais modelos disponíveis e suas características mais relevantes.

A seguir são apresentados os modelos que serão utilizados nesta tese, o modelo de SOWERS (1973) e o modelo de GANDOLLA et. al. (1992), sendo que cita-se, também, o modelo de SIMÕES (2000).

Quadro 1 – Principais modelos de previsão de recalque em RSU e suas características

<i>Modelos</i>	<i>Equações</i>	<i>Parâmetros</i>
Sowers (1973)	$s_I = H \cdot CR \cdot \log \left(\frac{\sigma'_{0i} + \Delta\sigma'_i}{\sigma_0} \right)$ $s_{II} = H \cdot C_{\alpha} \cdot \log \left(\frac{t}{t_{0i}} \right)$	$0.15 < CR < 0.30$ $C_{\alpha} = 0.052 \pm 0.004$ t (dias)
Gibson et al; Edil et al (1990)	$s = H \cdot \Delta\sigma (C_I + C_{II} \cdot (\exp(-\lambda t / C_{II})))$	$C_I = 9.3 \cdot 10^{-5} \text{ kPa}^{-1}$ $C_{II} = 1.3 \cdot 10^{-3} \text{ kPa}^{-1}$ $\lambda / C_{II} = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ dia}^{-1}$
ADEME/SIMECSOL (1996)	$s_I = H \cdot CR \cdot \log \left(\frac{\sigma'_{0i} + \Delta\sigma'_i}{\sigma_0} \right)$ $s_{II} = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} (a - b \cdot \log t) dt$	$CR = 0.22$ $a = 0.00095H + 0.00985$ $b = 0.00035H + 0.00509$ t (mês)
Yen et Scanlon (1975)	$s_{II} = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} (a - b \cdot \log t) dt$	$a = 0.00095H + 0.00985$ $b = 0.00035H + 0.00509$ t (mês)
Jambu et al. (1989)	$s = \frac{H}{r_s} \cdot \ln \frac{t}{t_{0\pi}}$	$10 < r_s < 100$ t (mês)
Gandolla (1992)	$\Delta H = H \cdot a \cdot (e^{-kt_0} - e^{-kt})$	$A = 44.161$ $K = 0.0077 \text{ t (mês)}$
Edil et al. (1990)	$s = \frac{H \cdot \sigma}{q} \cdot t^n$	$2 \cdot 10^3 < q < 3.4 \cdot 10^5 \text{ kPa}$ $0.37 < n < 1.5$ t (dias)
Edgers (1992)	$s_{bio} = H \cdot B \cdot (e^{\beta \cdot (t - t_k)} - 1)$	$0.1223 < \beta < 1.267 / \text{anos}$

em que

CR – Coeficiente de compressão primária.
 C_α - Coeficiente de compressão secundária.
 H – Altura inicial do aterro.
 S_I – Recalque devido à parcela primária.
 S_{II} – Recalque devido à parcela biológica.
 σ₀ – Tensão inicial atuante no aterro.
 Δσ' - Sobrecarga
 t_{0II}, t_{0I} – Tempo de referência inicial.
 s_{bio} – Recalque devido à parcela biológica.
 k – taxa de biodegradação.
 t – tempo decorrente.
 λ, a, b, r_s – parâmetros dos modelos.
 n, q e β – parâmetros dos modelos

2.4.1. Modelo de Sowers (1973)

Este modelo estuda os recalques e o seu desenvolvimento com o tempo, considerando as seguintes fases: compressão inicial, compressão primária e compressão secundária.

Para a obtenção da compressão inicial fez-se uso dos conceitos da teoria da elasticidade convencional. Assim, tem-se, para esta fase inicial, o recalque expresso por:

$$\Delta H_i = \frac{\Delta \sigma \cdot H}{E} \quad (1)$$

em que

E = módulo de elasticidade;

Δσ = sobrecarga aplicada ou acréscimo da tensão vertical;

H = espessura inicial da camada de lixo; e

ΔH_i = recalque total, correspondente à fase de compressão inicial.

O cálculo do recalque devido à compressão primária é feito usando-se a equação:

$$\Delta H = H \times C_R \times \log \left[\frac{(\Delta \sigma + \sigma_0)}{\sigma_0} \right] \quad (2)$$

em que

ΔH = recalques medidos (em mm);
 H = altura inicial da camada de lixo (em mm);
 C_R = índice de compressão dos RSU do aterro;
 σ_o = carga inicial; e
 $\Delta \sigma$ = acréscimo de pressão.

Sowers (1973) foi o primeiro pesquisador a apresentar um modelo de compressão secundária para aterros de RSU, por meio da modificação da Teoria de Buisman, para compressão secundária dos solos. Desta forma, o recalque devido à compressão secundária, pode ser expresso usando-se a equação:

$$\Delta H = H \times C_\alpha \times \log (t / t_o) \quad (3)$$

em que

ΔH = recalques medidos ;
 H = altura inicial da camada de lixo ;
 C_α = coeficiente de compressão secundária dos RSU;
 t = tempo final; e
 t_o = tempo inicial + final compressão primária.

SOWERS (1973) comenta que o aumento da velocidade de degradação devido a condições biológicas favoráveis pode resultar em um aumento de C_α .

Quanto ao desenvolvimento dos recalques com o tempo, SOWERS (1973) menciona que, devido ao alto coeficiente de permeabilidade dos RSU, os recalques da compressão primária ocorrem em aproximadamente 30 dias.

No caso da compressão secundária, SOWERS (1973) considera que a mesma se desenvolve em decorrência da degradação física, química e biológica dos RSU. Afirma que estes recalques podem durar vários anos e representar até 25% da altura do aterro.

ABREU (2000) considera que a proposta de SOWERS (1973) deve ser entendida como um “modelo de ajuste empírico”, uma vez que o mesmo não representa os fenômenos que ocorrem na realidade. Além disso, como comentam BOSCOV e ABREU (2000) e SIMÕES (2000), o modelo SOWERS (1973) admite algumas hipóteses simplificadoras que nem sempre representam o comportamento real dos RSU. Por exemplo: a) a ocorrência de pequenas deformações (teoria linear); enquanto que as deformações nos aterros sanitários são elevadas; b) volume de sólidos constante, o que não acontece com os RSU, pois estes sofrem perda de massa; c) partículas sólidas incompressíveis o que não acontece nos RSU. Finalmente, ainda existem outras hipóteses simplificadoras, não coerentes com a realidade dos aterros, como, por exemplo, compressão e fluxo unidimensional.

Apesar de todas estas limitações, o Modelo de Sowers é um dos modelos mais utilizados para a estimativa e previsão de recalques de RSU (BOSCOV e ABREU, 2000).

2.4.2. Modelo de Gandolla e outros (1992)

O modelo de GANDOLLA et al. (1992), baseado numa função exponencial decrescente e no uso de dados experimentais, tenta representar a variação dos recalques em função do tempo, sem aplicação de sobrecargas (camadas subjacentes de lixo, camadas de cobertura final, etc.). Neste modelo os recalques são ajustados à seguinte equação:

$$\Delta H = H \cdot a \cdot (e^{-kt_0} - e^{-kt}) \quad (4)$$

em que

ΔH = recalques medidos;

H = espessura da camada;

a = constante; e

k = constante;

t = tempo no qual se quer calcular os recalques.

t_0 = tempo inicial, normalmente igual a zero.

$e = 2,718$

Por meio da derivação desta equação, pôde-se chegar à velocidade de recalque (V), expressa por uma equação que proporciona valores finitos para a velocidade inicial e para o recalque final, que é alcançado no tempo infinito. Assim, tem-se que:

$$V = a \cdot k \cdot H \cdot e^{-kt} \quad (5)$$

Conforme MARIANO (1999), os dados experimentais foram obtidos em ensaios de lisímetros; enquanto que as constantes a e k foram obtidas mediante ajuste de mínimos quadrados. O valor de a corresponde ao valor do recalque final e o valor de k é fundamentalmente regido pelo ritmo de degradação, considerada decrescente com o tempo, semelhante às leis que regem os processos de reações químicas e biológicas.

Palma Gonzalez (1995), apud Mariano (1999), tomando como base a equação 4, determinou o coeficiente k , para um determinado intervalo. A partir dos valores k e do recalque, medido desde o momento t_0 até o instante t_f (tempo suposto como final), foi possível determinar o valor do coeficiente a e, desta forma calcular o recalque para qualquer tempo.

Posteriormente, GANDOLLA et al. (1996) propuseram um outro modelo, cujo objetivo final era separar as diversas contribuições no recalque total. A partir de hipóteses sobre as parcelas devidas aos processos físicos e bioquímicos, associados à geração de gases, foram obtidas as medidas do recalque total. A principal característica deste modelo, como comenta SIMÕES (2000), reside na simplicidade dos seus parâmetros: massa, umidade, classes de biodegradabilidade e porcentagem de matéria biodegradável, volume e densidades iniciais e finais.

2.4.3. Modelo de Simões (2000)

SIMÕES (2000) considerando, como já foi ressaltado por diversos autores, que é difícil extrapolar valores dos parâmetros de modelos obtidos em situações diferentes daquelas em análise, não só pelas diferenças na composição do RSU, mas também por fatores relativos às condições climáticas, regime pluviométrico, detalhes de projeto e da operação, propôs um novo modelo, simples e prático, em que os recalques são calculados por meio da soma de ações mecânicas e biológicas, a partir do instante inicial da disposição dos RSU. O comportamento dos resíduos, devido ao aspecto mecânico, envolve duas parcelas: a) a compressão imediata dos resíduos, derivada da adição de novas camadas, cujo processo de disposição gera uma estrutura porosa e não saturada, reduzindo a macroporosidade associada à drenagem de líquidos e gases, presente no momento da aplicação das cargas; b) o comportamento viscoso dos resíduos, que representa as deformações de longo prazo, devidas à ação total das cargas atuantes. Por outro lado, devido à ação biológica, o processo de decomposição dos resíduos se dá, em sua maior parte, em condições anaeróbias, com a transferência de massa da fase sólida para as fases líquida e, principalmente, gasosa, causando uma variação do volume do aterro, após a drenagem dos produtos gerados.

Admitindo-se a validade do princípio da superposição, os recalques, em uma camada de resíduo, podem ser obtidos pelo somatório de três componentes:

$$\Delta H (\text{total}) = \Delta H_{\text{carregamento}} + \Delta H_{\text{comportamento viscoso}} + \Delta H_{\text{biodegradação}}$$

A determinação da componente mecânica do deslocamento devido ao carregamento (ΔP) pode ser obtida por meio de um coeficiente de compressão (C_R), como apresentado na equação 6:

$$\Delta H_1 = H \cdot C_R \cdot \log \left(\frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right) \quad (6)$$

em que

ΔH_1 = Recalque da Camada de Espessura Inicial H;

C_R = Coeficiente de compressão primária;

P_o = Tensão Total Vertical Inicial; e

ΔP = Acréscimo de Tensão Total Vertical.

Observou-se que C_R relaciona linearmente as deformações ao logaritmo do quociente entre as tensões totais (final e inicial); independente, portanto do índice de vazios dos RSU. Admite-se que a deformação causada pelas cargas é muito rápida, o que pode ser explicado pela elevada permeabilidade dos RSU e pela facilidade com que os seus poros podem colapsar.

A outra componente mecânica, derivada do comportamento viscoso do resíduo (ΔH_2) é caracterizada pelo coeficiente de compressão viscoso (C_L), que associa a variação da altura à variação do logaritmo dos tempos, descrita pela seguinte equação:

$$\Delta H_2 = H \cdot C_L \cdot \log \frac{t}{t_i} \quad (7)$$

em que

ΔH_2 = Recalque da Camada de Espessura Inicial H_o , devido ao comportamento viscoso do material;

C_L = Coeficiente de Composição Viscoso;

t = Tempo; e

t_i = Instante de referência inicial – final compressão primária.

Constatou-se que C_L representa a deformação lenta experimentada pelo resíduo sob condições de carga constante, sendo proporcional ao quociente do logaritmo dos tempos (t e t_i).

Com respeito à componente biológica, sua incorporação na previsão de recalques em aterros sanitários torna o modelo mais realista. Vários autores,

como destacado por SIMÕES (2000), já utilizaram diferentes formas para a incorporação da parcela biológica na previsão de recalques, sendo as mais comuns: perda de massa (ZIMMERMAN et al., 1977), crescimento de bactérias (EDGER et al., 1992), hidrólise (ESPINORE et al. 2003), geração de gases (SOLER et al., 1995 e GANDOLLA et al., 1996). Especificamente, no caso do Modelo de SIMÕES (2000), a hipótese é de que a perda da massa está diretamente associada à geração de gases; tendo sido utilizado uma função de decaimento exponencial de massa, para cada uma das frações constituintes potencialmente biodegradáveis dos resíduos. Assim, a perda de massa de cada fração constituinte i , em cada camada j , em um determinado instante t , devido à decomposição biológica do resíduo (ΔH_3), pode ser descrita pela seguinte equação:

$$\Delta H_3 = -\left[\Delta \cdot M_{ij}(t) \right], \quad \text{sendo:}$$

$$\Delta M_{ij}(t) = M_{ij}(0) \cdot \left[1 - e^{-K_{ij}(t-t_0)} \right] \quad (8)$$

em que

M_{ij0} = Massa inicial potencialmente biodegradável da fração constituinte i na camada j ;

k_{ij} = Taxa de biodegradação da fração i na camada j ; e

t_0 = Tempo inicial – final compressão primária.

O modelo prevê, para cada fração constituinte, a utilização de taxas de biodegradação diferentes, o que possibilita a análise de aterros, cuja composição e condições de operação podem variar com o tempo. Havendo a possibilidade da incorporação de várias condições no interior da massa, inclusive a possibilidade de que uma parcela da fração não seja biodegradada.

O modelo proposto por SIMÕES (2000) apresenta a vantagem de incorporar a história de tensões, o que possibilita a estimativa dos recalques em diversas situações de carregamento, tanto na superfície quanto no topo de cada camada disposta. As camadas de cobertura foram tratadas como sendo

constituídas de materiais incompressíveis e de densidade constante; não tendo sido considerada a possibilidade de carreamento dos mesmos para o interior da massa de resíduos.

Os parâmetros considerados como determinantes para o modelo de SIMÕES (2000) são: composição dos resíduos, peso específico dos materiais dispostos, teor de umidade em peso úmido, biodegradabilidade potencial, taxa de decaimento e compressibilidade.

Quanto à composição dos resíduos, procurou-se analisá-la em termos de: origem, fonte e local de produção. Como o modelo trata das propriedades individuais das frações, consideraram-se os seguintes componentes para a caracterização da composição gravimétrica dos RSU: resíduos alimentares, papel, papelão, resíduos de jardim, têxteis, borracha, couro, madeira, plásticos, vidros, latas, alumínio, outros metais, poeiras e cinzas e entulhos.

No que diz respeito ao peso específico dos materiais, procurou-se identificar o peso específico do resíduo, a partir dos pesos de suas frações constituintes e de suas características de compactação.

No que se refere ao parâmetro relativo ao teor de umidade, o modelo de Simões (2000) considerou o teor de umidade do resíduo em função das umidades das suas frações; considerando o peso úmido. Outro fator do modelo está associado à biodegradabilidade potencial da fração orgânica dos RSU, que foi analisada por meio do teor de sólidos voláteis, obtidos pela ignição a 550° C. Alguns autores têm sugerido que a parcela da fração potencialmente biodegradável seja estimada em função do teor de lignina. Deve ser ressaltado que parte dos resíduos não estará disponível para biodegradação, de acordo com as condições ambientais do aterro. Essa parcela poderá ser avaliada mediante análise de dados de campo (monitoramento) associados a ensaios em laboratório.

A taxa de decaimento de cada uma das frações, outro parâmetro determinante do modelo de Simões (2000), foi definida por meio da estimativa de um tempo para que uma porcentagem da massa daquela fração se degrade completamente (em torno de 90%). Inúmeros fatores podem influenciar no

tempo necessário para que ocorra a completa decomposição de RSU. Foi pressuposto um modelo cinético de primeira ordem, com decaimento exponencial da produção de metano, que está associada diretamente à perda de massa. É importante ressaltar que a obtenção de parâmetros corretos só será possível com a utilização do modelo na análise de casos reais, com informações sobre a operação e as condições geoambientais.

No que concerne à compressibilidade, no modelo de Simões os parâmetros de compressão imediata, viscosa e devida à biodegradação foram considerados separadamente, embora ocorram simultaneamente. Ressalta-se que, admitindo-se como válido o princípio da superposição de efeitos, somente de resultados obtidos através de ensaios de compressão confinada em laboratório e provas de carga realizadas em aterros reais, será possível separar os efeitos das três parcelas sobre o comportamento dos recalques.

De uma forma geral este conjunto de parâmetros utilizados no modelo foi estimado, a partir das informações disponíveis tentando-se aproximar a resposta do modelo aos dados obtidos em campo.

Visando avaliar o potencial de aplicação do modelo desenvolvido, dados de monitoramento de recalques de aterros de RSU em diferentes países foram coletados, a partir de uma investigação de literatura.

Os resultados, em termos da componente mecânica, mostraram que, mesmo de acordo com a revisão de literatura, os coeficientes de compressão tendem a variar em função da composição e idade dos resíduos, bem como as condições operacionais e geoambientais; no estudo em questão situaram-se em uma pequena faixa, ou seja, entre 0,10 e 0,20 para o coeficiente de compressão (C_r) e entre 1% e 2% para o coeficiente de compressão viscoso (C_1). Além disso, não foi possível identificar uma função que relacionasse os coeficientes com a idade e composição dos resíduos sendo considerados constantes ao longo do tempo.

Contudo, embora o modelo tenha se prestado, de forma adequada, à determinação dos parâmetros relacionados ao comportamento mecânico dos

resíduos, o tempo foi insuficiente para que fossem registradas reações bioquímicas. Desta forma foi possível a separação dos efeitos da compressão imediata, daqueles de longo prazo associados aos efeitos biológicos.

Os resultados também identificaram que a parcela dos recalques devida à compressão imediata mostrou-se dependente do peso específico dos resíduos, indicando a necessidade da avaliação da composição gravimétrica do resíduo, dos pesos específicos de suas frações constituintes e da forma de compactação dos mesmos.

Com respeito aos resultados relativos à componente biológica pode-se destacar que ao ser investigado o potencial energético dos resíduos e suas formas de estabilização, constatou-se que dentro de uma mesma fração (ex.: papel, resíduos alimentares) os valores dos parâmetros diferenciaram-se em até três vezes, no que se refere ao potencial e taxa de geração de gases. A explicação para essa diferenciação está associada, como comenta SIMÕES (2000), à presença de compostos orgânicos complexos de difícil degradação nestas frações, como é o caso da lignina. Como nem todos compostos orgânicos são degradáveis, a utilização de índices físico-químicos, na identificação da fração potencialmente degradável, deve ser revista, sugerindo-se relacionar o teor de lignina à biodegradabilidade. Neste contexto, o autor destacou a necessidade de se incluir, na avaliação da biodegradabilidade dos resíduos, a influência das condições operacionais e geoambientais do projeto, considerando a aplicação do modelo a casos reais, que disponham dessas informações. Desta forma, considerando que, dependendo do ambiente existente no interior dos aterros, os resíduos com elevada parcela orgânica biodegradável podem apresentar reduzidas taxas de degradação.

SIMÕES (2000) recomenda o uso de técnicas quantitativas de recirculação de percolado na taxa de degradação dos resíduos e na evolução dos recalques. Por outro lado, PARK et al. (2002), ao analisarem os efeitos de longo prazo de decomposição biológica, consideraram que, a maioria dos modelos de previsão propostos, excluindo o modelo da Lei de “Creep”, podem prever com sucesso estes efeitos e suas curvas de estabilização, desde que seja

incluída nos modelos uma compressão logarítmica acelerada, em decorrência da decomposição dos RSU biodegradáveis.

Enfim, em termos gerais, pôde-se observar que a forma das curvas de evolução de recalques, em função do tempo, mostrou alterações das velocidades de recalque e, assim, foi aceita a hipótese de que ocorria a variação dos parâmetros mecânicos e biológicos com o tempo. Pressupõe-se que estas variações poderiam estar sendo provocadas por mudanças climáticas e infiltração de água de chuvas no aterro. Tal resultado comprovou a importância de que seja incorporada no modelo a influência da geração e drenagem de chorume no interior dos aterros, para que o modelo se tornasse mais versátil; possibilitando uma análise mais efetiva da evolução dos recalques (SIMÕES, 2000).

Outro aspecto que foi ressaltado por SIMÕES (2000) refere-se ao fato de que deveria ser considerada a geometria dos aterros, principalmente naqueles construídos em meia encosta, quando deveriam ser examinadas formas de implementação, fazendo-se uso de modelos tensão versus deformação, para que a componente biológica possa ser incorporada na análise do comportamento dos RSU.

Em função dos resultados apresentados, pôde-se concluir que, após a realização de retroanálises (alteração dos parâmetros C_R , C_L e K_{ij} , até que o ajuste fosse o melhor possível), o modelo proposto por SIMÕES (2000) representou bem o comportamento de campo (os desvios foram da ordem de 3%). Contudo, o autor sugere que alguns ajustes devem ser feitos, para tornar o modelo mais aplicável à realidade de campo, principalmente no que diz respeito à sua componente biológica. Recomenda-se, neste caso, a utilização de outras técnicas, como o método de análises numéricas, o que eliminaria a restrição de unidimensionalidade do modelo. Além disto, poderia ser utilizada uma técnica mais refinada, como o processo inverso e otimização, ou seja, a partir da resposta (evolução dos recalques medida em campo) e um modelo de comportamento quando seria possível obter um conjunto de parâmetros mais adequados reduzindo-se as diferenças entre o ambiente real (aterro) e as

condições ideais utilizadas em laboratório.

2.5. Utilização de modelos na previsão de recalques

ABREU (2000) analisou dados de recalques de 20 marcos superficiais de dois subaterros (AS-2 e AS-5) de um dos maiores aterros sanitários do Brasil: o Aterro Sanitário Bandeirantes/SP. Para tanto, o autor selecionou três modelos internacionais já estudados, o de SOWERS (1973), de PALMA MERUELO (1995) e o Hiperbólico de LING et. al. (1998), que foram ajustados à série histórica de dados de cada marco superficial e, posteriormente, utilizados para a estimativa dos recalques (absolutos e relativos), executando-se a projeção até o ano 2015. Em função dos resultados concluiu-se que as previsões do Modelo Hiperbólico, para os marcos do subaterro AS-2 (mais antigo), foram as que mais se aproximaram dos recalques reais.

CARVALHO et al. (2000) também estudaram a compressibilidade de RSU utilizando tanto resultados de ensaios de laboratório, como dados de monitoramento *in situ* dos recalques em aterros sanitários. Uma diferença foi que estes pesquisadores realizaram ensaios de compressão confinada, de grandes dimensões, executados em amostras deformadas de RSU, coletados do Aterro Sanitário Bandeirantes. Os resíduos com idade variando entre 10 e 15 anos mostraram grandes deformações secundárias, tanto nos ensaios de laboratório quanto nas medidas de campo. O índice de compressão secundária, nos ensaios de compressão confinada, forneceram valores médios de 0,032, que praticamente independem da sobrecarga e são ligeiramente dependentes do índice de vazios. Para os dados de monitoramento dos recalques os coeficientes de compressão secundária apresentaram dois valores, ou seja, na etapa inicial do aterro, seu valor foi de 0,010; enquanto que o valor médio do coeficiente, na segunda etapa, foi de 0,083, associado, principalmente à degradação química e biológica do resíduo. FARIAS (2000), também, analisou os parâmetros de compressibilidade, na célula 2 do Aterro de

Muribeca, no Estado de Pernambuco por meio de ensaios de laboratório, utilizando uma célula de Rowe (célula com paredes móveis no sentido vertical, não existindo atrito lateral). Procurou-se identificar as propriedades físicas dos RSU, utilizados nos ensaios de compressibilidade de campo e de laboratório, com destaque para: ensaio de composição gravimétrica e volumétrica, peso específico úmido e umidade. Os resultados da pesquisa foram comparados com os dados existentes na literatura especializada, apresentando-se bastante coerentes. Especificamente com referência ao peso específico das partículas, este situou-se entre o das argilas e turfas. Nos ensaios de compressibilidade a variação dos índices de vazios sofreu um decréscimo com o aumento da densidade a deformação nestes ensaios e pôde chegar a 50% para baixas densidades de compactação e elevadas pressões verticais além disto, os maiores valores dos coeficientes de compressão correspondem às camadas com maiores valores de peso específico.

A preocupação com o esgotamento de determinadas áreas de disposição de RSU incentivou a pesquisa de Santos (1997), que foi realizada no Aterro de Muribeca, que é o maior aterro da região metropolitana do Recife. Dentro desse projeto de dissertação de mestrado, associado ao tratamento do local, seja para reutilização da área como aterro ou para futuras construções, constatou-se que eram diversos os problemas geotécnicos, destacando-se: elevada compressibilidade, variação dos parâmetros de resistência com o tempo e a falta de informações anteriores relativas à capacidade de carga. Estes fatores contribuem para dificultar a obtenção de modelos adequados à avaliação do comportamento desses materiais. Para avaliar algumas das características e propriedades geotécnicas desses resíduos, está sendo desenvolvido um extenso programa de pesquisa, composto por ensaios de campo e de laboratório no Aterro da Muribeca, como as pesquisas realizadas por MELO e JUCÁ (2002), FARIAS (2000), JUCÁ et. al. (1999), MARIANO (1998), SANTOS (1997) dentre outros. Na pesquisa em questão, SANTOS e JUCÁ (1997) realizou os seguintes ensaios de campo: Provas de Carga, Ensaio de Cone Mecânico, Ensaio de Sondagem à percussão. Os ensaios de

laboratório consistiram de Ensaios de Caracterização e de Cisalhamento Direto no solo de cobertura do aterro, bem como de Ensaios de Determinação do Teor de Umidade e de Sólidos Voláteis nos RSU do aterro. A partir dos resultados obtidos em campo, foi realizada uma análise pelo Método dos Elementos Finitos para verificar a viabilidade da técnica numérica em reproduzir o comportamento *in situ* do material.

Dentro deste extenso programa de pesquisa no Aterro da Muribeca inclui-se também o trabalho de MELO e JUCÁ (2002), que trata de estudos geotécnicos e ambientais para a avaliação do comportamento de RSU, a partir da análise das propriedades dos resíduos (teor de umidade e sólidos voláteis), recalques, composição do chorume e composição qualitativa dos gases emitidos bem como por meio da obtenção dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos das águas superficiais e subterrâneas da área circunvizinha dos aterros da Muribeca e de Aguazinha (Pernambuco) e aterro metropolitano do estado da Bahia. Por meio de ensaios de campo e de laboratório, utilizando amostras de sólidos, líquidos e gases, foi possível realizar o diagnóstico dos aterros, com propostas de intervenção na área estudada.

JUCÁ et al. (1999) procuram, ainda, analisar a formação de recalques devido à decomposição da matéria orgânica e à dissipação de poro-pressões de gases e líquidos; fazendo uso do monitoramento do recalque *in situ*. Os autores monitoraram duas células do Aterro da Muribeca e de Aguazinha (Olinda/PE), que foram tratados por meio da biorremediação (inoculação nas células de uma população microbiana), visando acelerar o processo de degradação anaeróbia e, posteriormente, transformar lixões em aterros controlados, para minimizar a degradação do meio ambiente. O aterro da Muribeca funciona como depósito de lixo desde 1985 sendo que, a partir de 1994, iniciou-se o processo de transformação para aterro controlado, quando os depósitos de lixo foram divididos em 9 células, iniciando-se a inoculação em 1998. Por outro lado, a Aguazinha funcionou como lixão desde 1986, passando a ser controlado em 1997. Os resultados mostraram que os valores dos recalques para os referidos aterros foram baixos, comparativamente aos

valores encontrados na literatura (SOWERS, 1973; WALL E ZEISS, 1996). Estes resultados foram atribuídos a: idade dos aterros, teor de matéria orgânica e espessura da camada do lixo. O baixo teor de matéria orgânica no meio, implica que os dois aterros estão na fase metanogênica, confirmada pelos baixos valores de temperatura e umidade, com alto valor de metano. Os recalques, apesar de serem cada vez menores, podem durar anos e até décadas para sua estabilização.

Outro autor envolvido no Programa de Pesquisas do Aterro de Muribeca foi MARIANO (1999), que procurou estudar os recalques superficiais ocorridos no Aterro de Muribeca, correlacionando-os com a fase de decomposição em que o RSU se encontrava. Além disto, analisou alguns modelos de previsão de recalques disponíveis na literatura visando determinar os parâmetros de compressibilidade do RSU. O autor utilizou ensaios de campo e de laboratório, para a determinação de algumas propriedades físico-químicas dos RSU do aterro, fez também uso de ensaios *in situ* ao aplicar o método de penetração dinâmica (“cone penetration”) para determinar a espessura da camada do lixo e a profundidade do embasamento cristalino e, além disto, coletou amostras de líquidos, sólidos e gases em profundidade visando avaliar qualitativamente (pela sondagem à percussão) a resistência do aterro com o passar do tempo.

Ele pressupôs que os recalques que ocorrem no Aterro da Muribeca são devidos principalmente ao processo de decomposição da matéria orgânica, sendo também influenciados pela aplicação de sobrecargas devido à camada de solo de cobertura, além da dissipação de poro-pressões (líquidos e gases).

Ele selecionou os seguintes modelos de previsão do comportamento e velocidade dos recalques: SOWERS (1973), GANDOLLA et al. (1992) e o modelo de YEN e SCALON (1975). Os resultados mostraram que as pequenas discrepâncias observadas entre as previsões obtidas a partir dos modelos de SOWERS e GANDOLLA et al. (1992) e os valores realmente medidos devem-se ao fato de os modelos internacionais utilizados não considerarem alguns efeitos, tais como: drenagem de líquidos e de gases e sobrecarga. Além

disto, o modelo de previsão de velocidade de recalques de Yen e Scalon apresentou-se limitado, por que apenas considerar como parâmetros o tempo de construção do aterro e a espessura dos mesmos.

Em síntese, é difícil e complexo o cálculo de recalques de aterros de RSU, face à complexidade dos fatores envolvidos neste processo, como as características dos resíduos sólidos que dependem do nível sócio-econômico local, do clima, da estação do ano, da cultura da população, e da idade do aterro.

São de suma importância para a avaliação dos recalques, o teor de umidade da massa sólida, a forma de operação do aterro, a densidade e a permeabilidade dos resíduos no aterro, que, por sua vez, dependem do grau de compactação e da idade do RSU; da temperatura dos resíduos, que afeta a ação microbiana e, portanto, o processo de degradação do RSU e da presença e eficiência de um sistema de drenagem de líquidos e gases.

Toda esta gama de fatores, associados à segurança estrutural e ambiental do aterro sanitário, depende, na opinião de MAHER (2000), BOSCOV e ABREU (2000), KAIMOTO et al. (1999), PASTORE et al. (1998) e de outros pesquisadores, do monitoramento de campo constituindo uma ferramenta importante para o estudo geotécnico dos aterros sanitários e aferição dos modelos de previsão já estudados. Podendo contribuir para a implementação de um programa de pesquisa *in situ* e, por meio dos ensaios de laboratório com amostras coletadas no campo, avaliar a segurança operacional do aterro e seus impactos sobre o meio ambiente, assim como tem condições de obter parâmetros para realização de projetos para modelagem e para avaliação de alternativas de tratamento ou remediação dos locais de disposição dos RSU.

Enfim, como são inúmeros os mecanismos que interferem no comportamento dos recalques, a interpretação dos resultados, para a previsão dos mesmos, possui certo grau de incerteza, principalmente pela escassez de parâmetros utilizados em modelos conceituais adequados para a representação dos aterros brasileiros e, também neste caso, os dados de acompanhamento

dos maciços sanitários, também podem prestar sua contribuição.

Entretanto, como apresentado anteriormente, nos últimos anos, tem ocorrido uma certa sensibilidade e mobilização do meio geotécnico nacional, para analisar os fenômenos e comportamentos relevantes nos aterros sanitários. Pesquisas de compressibilidade no Aterro Sanitário de Bandeirantes e no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca estão sendo conduzidas e devem ser estimuladas, uma vez que podem contribuir para a formação de um banco de dados nacionais de parâmetros relativos ao comportamento dos recalques, como também, fornecer subsídios ao desenvolvimento de novos modelos, que contemplem as características de nossos resíduos (BOSCOV E ABREU, 2000).

Dentre os diversos estudos sobre previsão de recalques, foram utilizados os modelos de SOWERS (1973) e GANDOLLA et. al. (1992) para comparar com os resultados desta tese, uma vez que a partir de uma extensa revisão dos modelos internacionais existentes, implementar modelos conceituais, que pudessem interpretar mais fielmente os mecanismos envolvidos no comportamento real dos aterros e na previsão dos seus recalques. Apesar da sua originalidade e importância, no trabalho não foi utilizado o modelo de SIMÕES (2000) por não se dispor de informações de recalques secundários e de parâmetros necessários para a sua avaliação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, inicialmente, apresentam-se as principais características do projeto do aterro sanitário de Viçosa, em Minas Gerais.

Posteriormente, descreve-se o equipamento de grandes dimensões utilizado para realizar ensaios de compressão confinada em amostras de RSU e a metodologia usada durante a realização dos ensaios.

3.1. O aterro sanitário de Viçosa

O Município de Viçosa está localizado no sudeste brasileiro, na região habitualmente conhecida como Zona da Mata do estado de Minas Gerais (Figura 2). O município é montanhoso e tem uma altitude média de 650 m. A cidade de Viçosa, sede do Município, situa-se na latitude 20° 45' sul e longitude 42° 51' oeste.

O clima predominante é o subtropical úmido caracterizado por duas estações marcantes, inverno seco e verão chuvoso. A temperatura e a precipitação média anual, nos últimos 20 anos, são, respectivamente, 19,8 °C e 1227,1 mm.

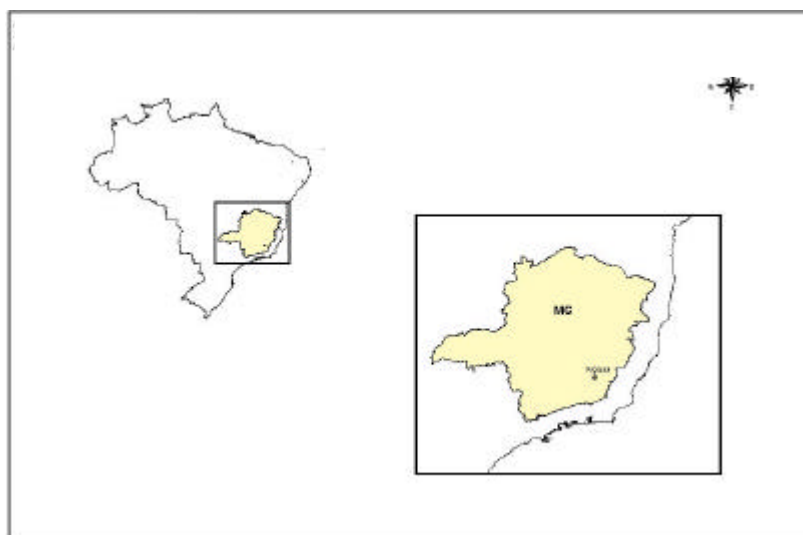


Figura 2 – Localização do Município de Viçosa/MG

A área do aterro sanitário do Município de Viçosa é a mesma que foi utilizada, durante cerca de cinco anos, como depósito de resíduos da cidade. Está localizada no morro de Seriquite, na latitude $20^{\circ}43'35''$ sul e longitude $42^{\circ}56'15''$ oeste, a oito quilômetros do centro urbano. A área tem quinze hectares.

Para a caracterização da área do aterro foram realizados ensaios de campo e laboratório (AZEVEDO, 2002).

Os ensaios de campo foram feitos para se ter um melhor conhecimento do subsolo na região do aterro. Foram feitos 4 furos de sondagens à percussão, todos com medida da resistência a cravação do amostrador ou N_{SPT} . A localização das sondagens é apresentada na planta planialtimétrica da área do aterro (Figura 3).

As sondagens caracterizaram um perfil de intemperismo típico de solo residual de gnaisse, com a predominância de duas camadas: uma de argila siltosa, por vezes arenosa, de cor variada; enquanto que a outra, subjacente à primeira, é de areia fina, argilosa, por vezes siltosa, também de cor variável. Estes dois solos apresentam-se em camadas de diferentes espessuras e situam-se sobrejacentes à camada de alteração de rocha.

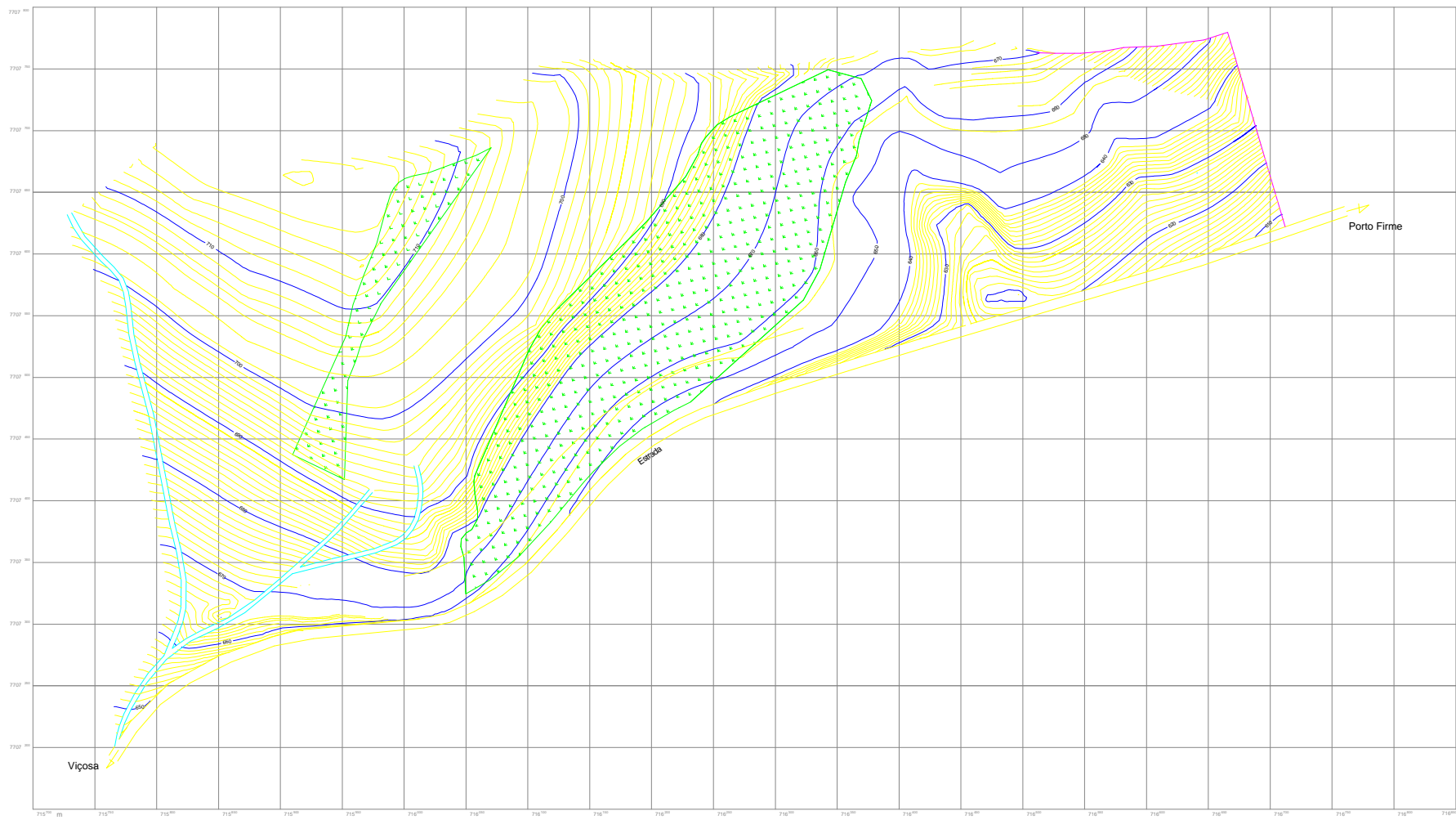


Figura 3 – Planta Plani-altimétrica.

O programa de ensaios de laboratório constou de ensaios de caracterização, compactação, permeabilidade dos solos no estado natural e compactado, e resistência ao cisalhamento da amostra de solo areno-siltosa no estado natural (AZEVEDO, 2002).

Para a execução dos ensaios de laboratório, foram coletadas amostras destas duas camadas de solos em sacos individuais de cerca de 30 kgf e um bloco de amostra indeformada da amostra areno-siltosa (AZEVEDO, 2002).

A concepção geral do projeto é apresentada na Figura 4, em que aparecem os diversos componentes do Aterro Sanitário: as seis plataformas para disposição de resíduos domiciliares, sistema de drenagem de águas pluviais, sistema de tratamento de percolados, valas para resíduos de saúde e animais mortos, etc.

O aterro sanitário foi projetado para receber o RSU municipal da cidade Viçosa-MG durante 15 anos sem reciclagem e, ou, compostagem dos RSU. Naturalmente, a vida útil do aterro poderá ser prolongada se forem implementados projetos de minimização de geração de resíduos, bem como se a usina de reciclagem e compostagem existente no município funcionar a contento.

O aterro sanitário utiliza o método da rampa com seis grandes plataformas, todas com 5 m de altura de RSU e largura variável. Todas as plataformas terão uma declividade longitudinal de aproximadamente 1%. Os resíduos do antigo lixão foram dispostos na primeira plataforma e estão apoiados numa berma construída com o solo escavado durante a abertura desta plataforma.

Na construção dos taludes das plataformas, o solo residual foi escavado com inclinação de 1(V) para 1(H). Os taludes de RSU foram projetados para terem inclinação de 1(V) para 2,5(H).

A Figura 5 apresenta as curvas granulométricas dos solos encontrados no aterro sanitário. De acordo com o Sistema de Classificação Universal Unificado, os dois solos se classificam como solos finos, sendo denominados MH (siltes de alta plasticidade).

A Figura 6 apresenta a seção transversal 4-4 que, posteriormente, foi utilizada no cálculo dos recalques do aterro.



Figura 4 – Concepção Geral do Projeto.

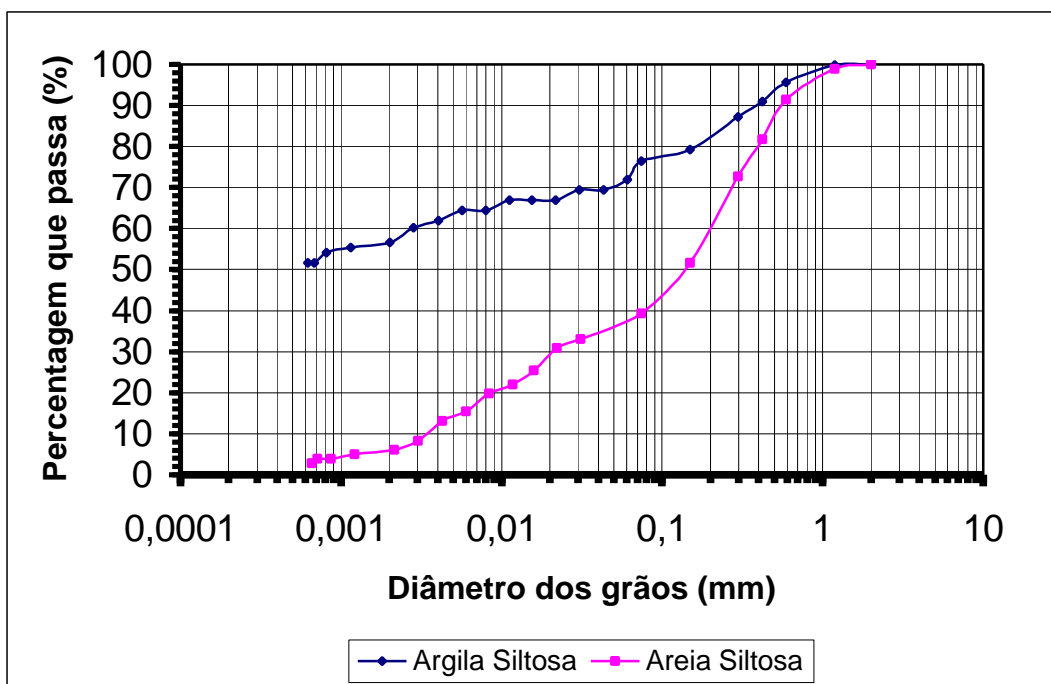


Figura 5 – Curvas granulométricas (AZEVEDO, 2000)

3.2. Descrição do ensaio de compressão confinada

3.2.1. O equipamento utilizado

A Figura 7 apresenta um esquema do equipamento construído no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa para realização de ensaios de compressão confinada em amostras de RSU de grandes dimensões.

Como pode ser visto na Figura 7, o equipamento é composto de uma célula cilíndrica na qual a amostra é compactada e ensaiada, e de um sistema de aplicação de carga. A célula cilíndrica é composta por duas manilhas de concreto armado, cada uma com diâmetro e altura de 1 m.

O sistema de aplicação de carga consiste de uma placa de carregamento rígida, de 76 cm de diâmetro e 3 cm de espessura, ligada a uma haste rígida através de uma rótula. Todas estas três peças são feitas de aço. A haste rígida, na sua extremidade superior, é conectada a uma viga metálica que serve para aumentar o carregamento, por meio do princípio de alavanca. A força

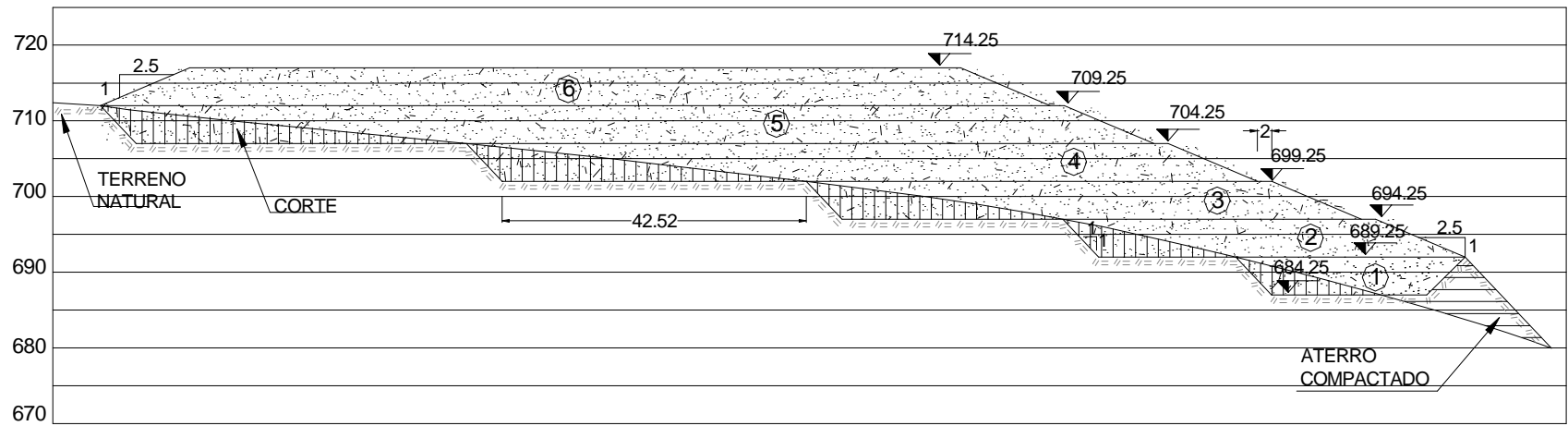


Figura 6 – Seção Transversal 4-4.

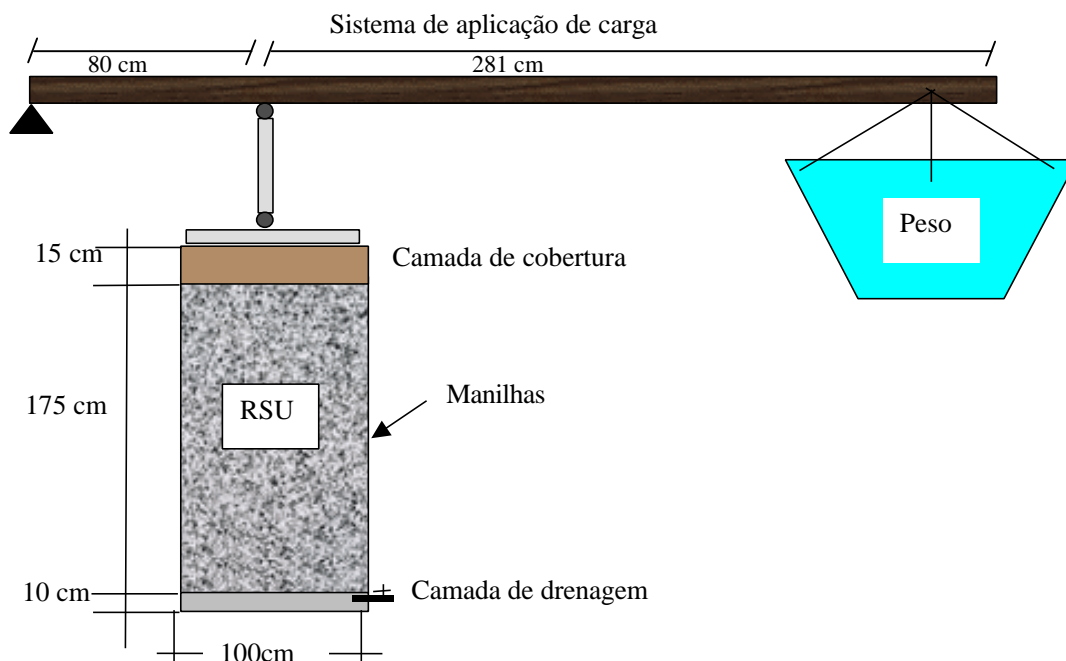


Figura 7 – Vista do equipamento para realização de ensaios de compressão confinada em amostras de RSU de grandes dimensões.

que é aplicada na amostra de RSU origina-se no enchimento de uma caixa d'água de 500 litros e é aumentada 4,52 vezes por este sistema de alavanca.

As Figuras 8 e 9 mostram o equipamento durante a realização de um ensaio. Várias observações podem ser apontadas. A placa de carregamento tem o diâmetro menor que o diâmetro interno da manilha para evitar que a placa, no transcorrer do ensaio, emperrasse na parede interna da manilha, além disto, pintou-se internamente a manilha com material resinoso para evitar os atritos do RSU com as paredes laterais.

Ainda na Figura 8, constatou-se grande deformação dos RSU na etapa do ensaio apresentada, o que forçou a utilização de peças cilíndricas rígidas abaixo da rótula na ponta inferior da haste de carregamento para manter o equipamento nivelado em relação a horizontal. Observa-se, também, na mesma figura, o nível de placas plano-paralelas usado para medir os recalques. Este sistema consistia de um nível, tipo placas planas paralelas, e duas referências: uma móvel, na haste e outra fixa, na parede, atrás das manilhas (Figura 9).

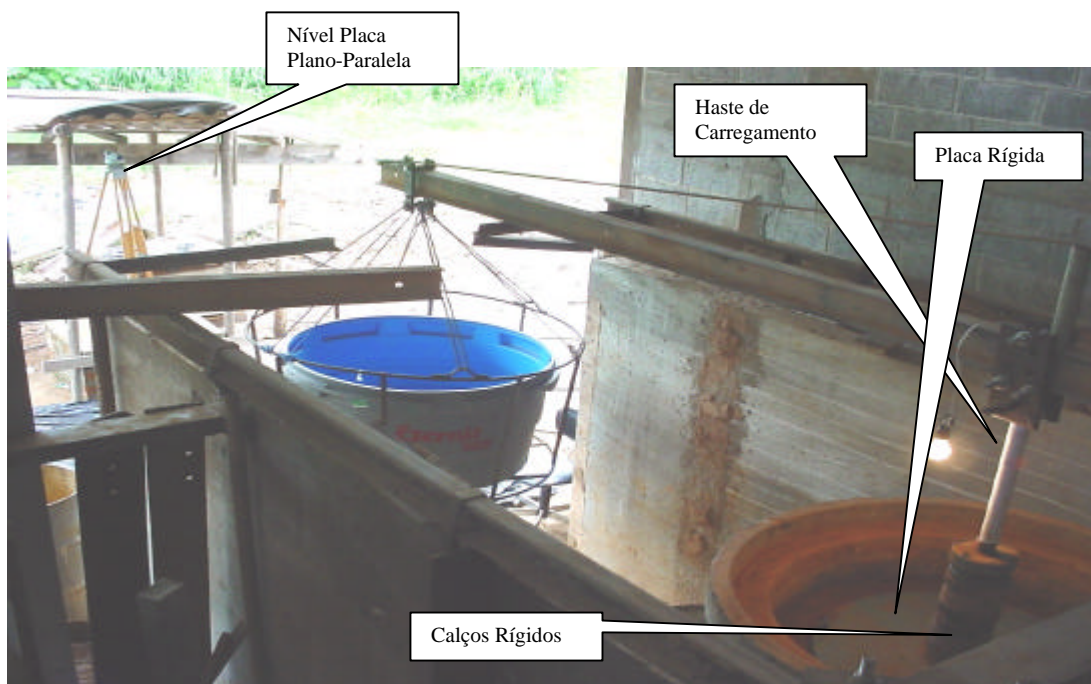


Figura 8 – Vista geral do equipamento para realização dos ensaios.

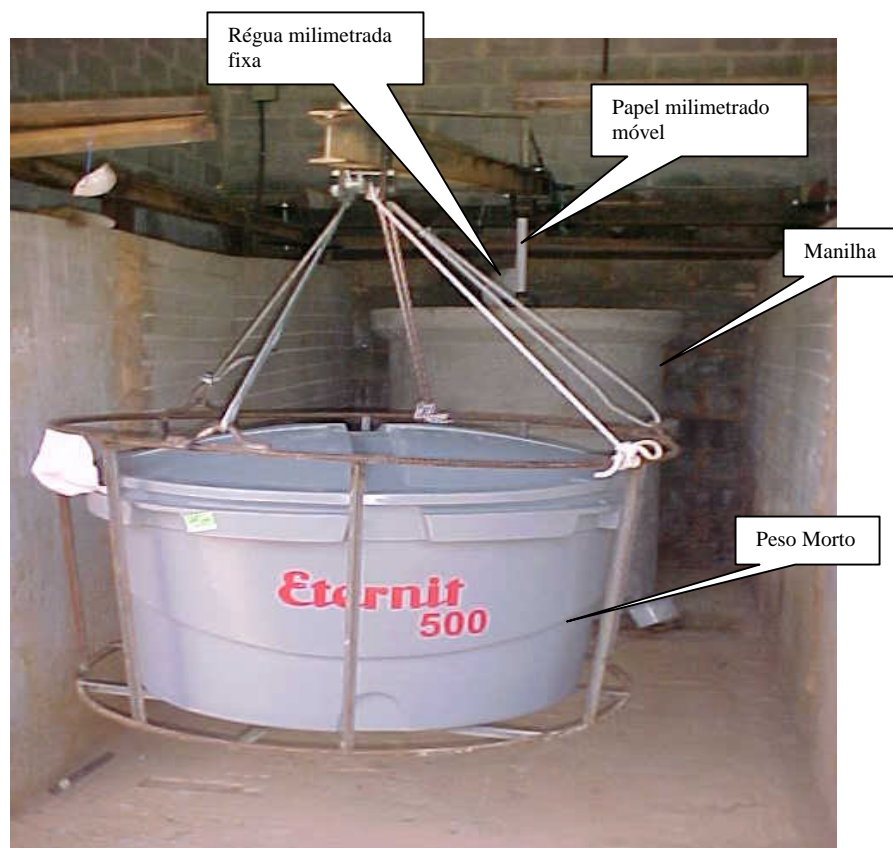


Figura 9 – Vista do sistema de ligação da caixa d'água com a viga metálica.

Na Figura 9 mostra-se a gaiola metálica que foi usada para pendurar a caixa d'água na viga metálica.

3.2.2. Metodologia usada nos ensaios

Os ensaios foram realizados na seguinte seqüência:

- **Coleta dos resíduos.** Nesta etapa, recebia-se, numa área vizinha à área na qual os ensaios foram executados, um caminhão com RSU recém-coletados em diversos bairros da cidade.

- **Determinação da composição gravimétrica e da umidade dos resíduos.** Nesta etapa, procurou-se incorporar a maioria das classificações disponíveis em dados da literatura, adotando-se os seguintes componentes para caracterização da composição gravimétrica dos RSU: matéria orgânica, papel e papelão, plásticos, vidros, alumínio, metais ferrosos, borracha, couro, madeiras, trapos e outros, antes da separação das frações constituintes dos RSU fez-se um quarteamento, que consiste em separar o RSU em quatro partes iguais usando as duas partes opostas para a análise gravimétrica e as outras duas partes utilizando para o ensaio. Para achar a umidade do RSU antes e após o encerramento do ensaio, tirava-se uma amostra de 3 kg de RSU do meio do corpo de prova e a 40°C fazia-se a determinação da umidade até que atingisse um peso constante. As Figuras 10 e 11 ilustram esta etapa dos ensaios.

- **Compactação das amostras de RSU.** Nesta etapa, os resíduos eram dispostos em camadas que eram compactadas para se obter um peso específico inicial de 7 kN/m^3 , valor normalmente adotado nos projetos de aterros sanitários. Cada camada de lixo, com 88 kg de resíduos e uma altura de 15 cm disposta em dez camadas até uma altura de 160 cm, a parede interna da manilha foi pintada com uma mistura resinosa para evitar atritos resíduo-parede. As Figuras 12 e 13 ilustram o procedimento de compactação usado.



Figura 10 – Processo de quarteamento do RSU para ser feito a gravimetria.



Figura 11 – Análise Gravimétrica dos RSU.



Figura 12 – Representação da disposição do RSU em camadas.



Figura 13 – Compactação do RSU na Célula.

- *Carregamento em etapas*. Nesta fase, aplicavam-se vários estágios de carregamento vertical na amostra de lixo, procurando sempre aumentar a tensão anterior em 10,51 kPa (ou seja, iniciou-se com 10,51 kPa, passando-se para 21,02 kPa, 31,53 kPa, 42,04 kPa, 52,55 kPa e, finalmente, 63,06 kPa). Cada estágio de carregamento durou, em média, 7 dias. Desta forma, em média, cada ensaio levou cerca de 3 meses para ser executado.

- **Medição dos deslocamentos.** Nesta fase, os deslocamentos eram medidos, usando um nível de placas plano-paralelas (com precisão de décimos de milímetro) visando o pistão, marcado com papel milimetrado, e a parede fixa, também marcada com uma régua milimetrada.

- **Descarregamento.** Após a aplicação do último estágio de tensão, no caso 63,06 kPa (tensão máxima que pode ser usada com segurança, para 500 litros de água), a amostra era descarregada, segundo a ordem decrescente do sentido de carregamento.

- **Encerramento.** Nesta etapa, o ensaio era desmontado e determinava-se a umidade do resíduo sólido no final do ensaio, como foi descrito no item determinação da umidade. As amostras, após a abertura do consolidômetro, apresentavam um odor extremamente forte e desagradável.

3.3. Métodos utilizados no cálculo dos recalques e deslocamentos

Os recalques foram calculados por meio dos modelos de SOWERS (1973) e GANDOLLA et. al. (1992) descritos no capítulo 2. Os parâmetros dos modelos foram obtidos através dos resultados dos ensaios de compressão confinada, de grandes dimensões realizados, cujos resultados são mostrados a seguir.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, inicialmente, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de laboratório realizados. Em seguida, discute-se a determinação dos parâmetros de deformabilidade dos RSU obtidos destes ensaios. Finalmente, com estes parâmetros, são feitas previsões aproximadas de recalques no aterro sanitário de Viçosa, em Minas Gerais, com utilização de modelos unidimensionais de SOWERS (1973) e GANDOLLA et. al. (1992).

4.1. Características das amostras ensaiadas

No Quadro 2 apresentam-se as características da amostra de RSU antes e depois dos ensaios.

Quadro 2 – Características das amostras de RSU submetidas a ensaios de compressão confinada

Índices	Amostra Ensaio 1		Amostra Ensaio 2	
	Antes	Depois	Antes	Depois
W(%)	90,00	39,70	65,00	40,00
γ (kN/m ³)	7,00	9,97	7,00	9,82
γ_d (kN/m ³)	5,63	11,74	5,36	10,48

Em que, W – Teor de Umidade; γ - Peso Específico Natural; e γ_d – Peso Específico Seco.

4.2. Ensaio de laboratório em consolidômetros de grandes dimensões

- *Primeiro Ensaio*

O Quadro 3 apresenta a composição gravimétrica dos RSU utilizados no primeiro ensaio.

Quadro 3 – Composição gravimétrica dos RSU do Ensaio 1

Material	Peso Total (kg)	(%)
Matéria Orgânica*	116,8	42,12
Papel e Papelão	68,1	24,56
Plásticos	60,2	21,69
Vidros	9,9	3,57
Alumínio	0,9	0,32
Metais Ferrosos	11,1	4,0
Borracha e Couro	2,3	0,82
Madeiras	1,3	0,47
Trapos	6,8	2,45
Outros **	-	-
Total	277,3	100

* Restos de comida, frutas, verduras, aparos de poda, folhas etc.

** Materiais de difícil classificação.

O teor de umidade dos RSU deste primeiro ensaio foi calculado como sendo igual a 90%. Este valor foi obtido secando-se a amostra de aproximadamente 5 kg de RSU numa estufa com temperatura máxima igual a 44°C. O ensaio durou 12 dias até que se obtivesse invariabilidade na massa dos RSU ensaiados.

Nas Figuras 14 a 19 apresentam-se as curvas recalque (imediate mais primário) versus tempo, considerando-se as diversas etapas de carregamento do primeiro ensaio.

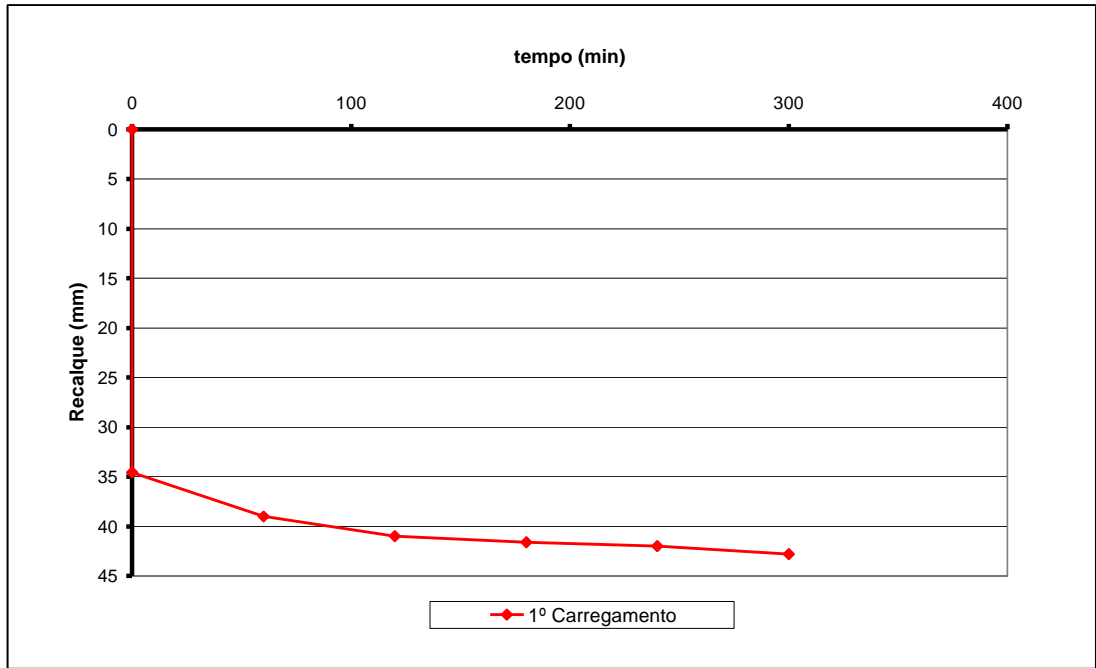


Figura 14 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 424,78 kgf)

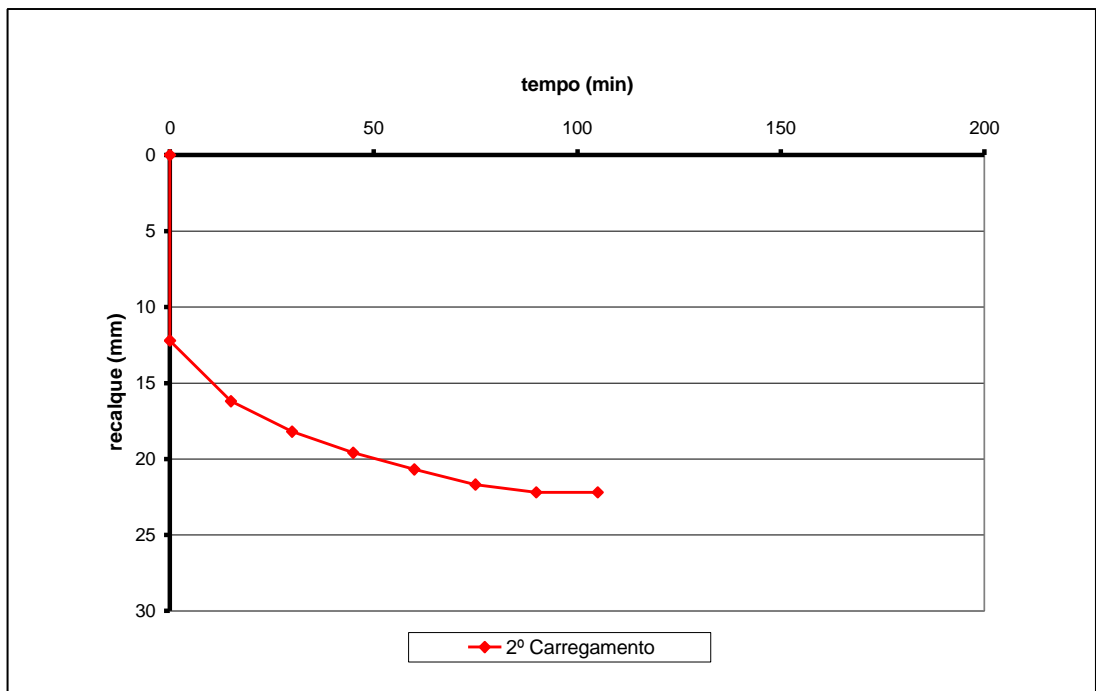


Figura 15 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 877,28 kgf)

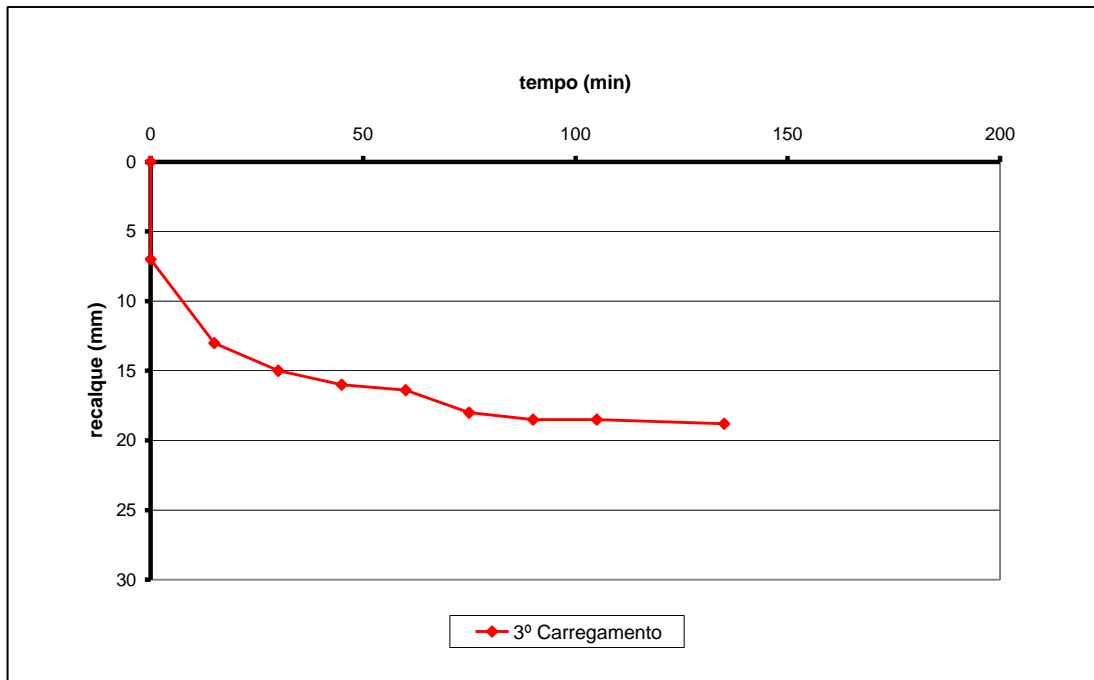


Figura 16 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 1.329,78 kgf).

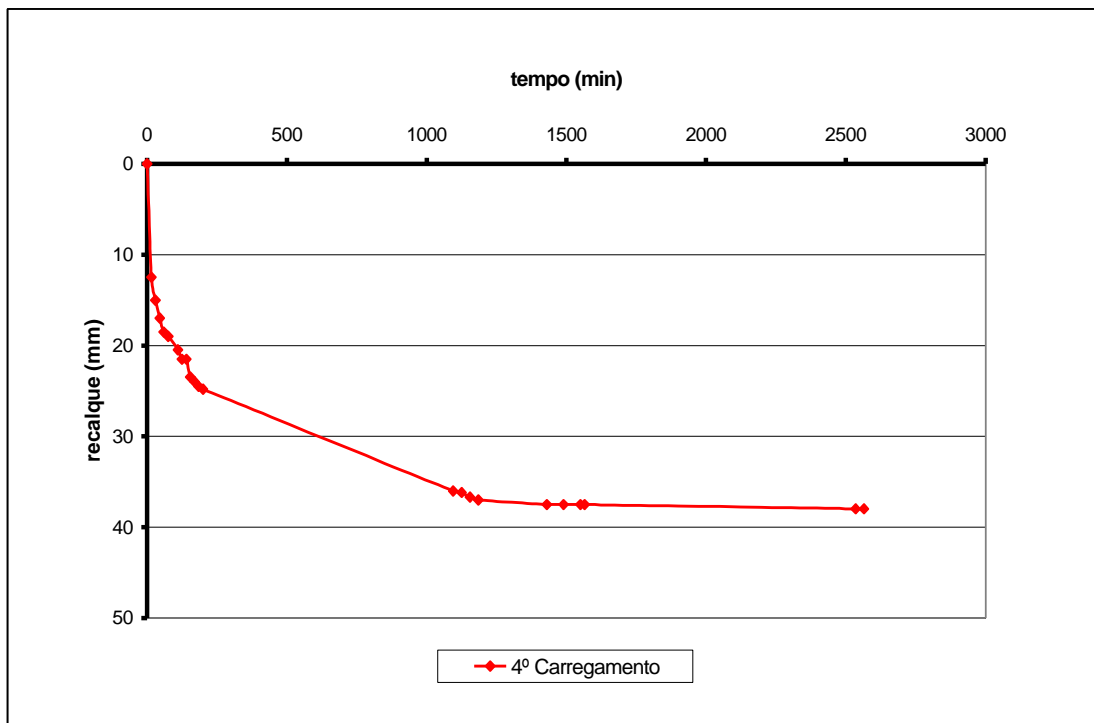


Figura 17 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 1.782,28 kgf).

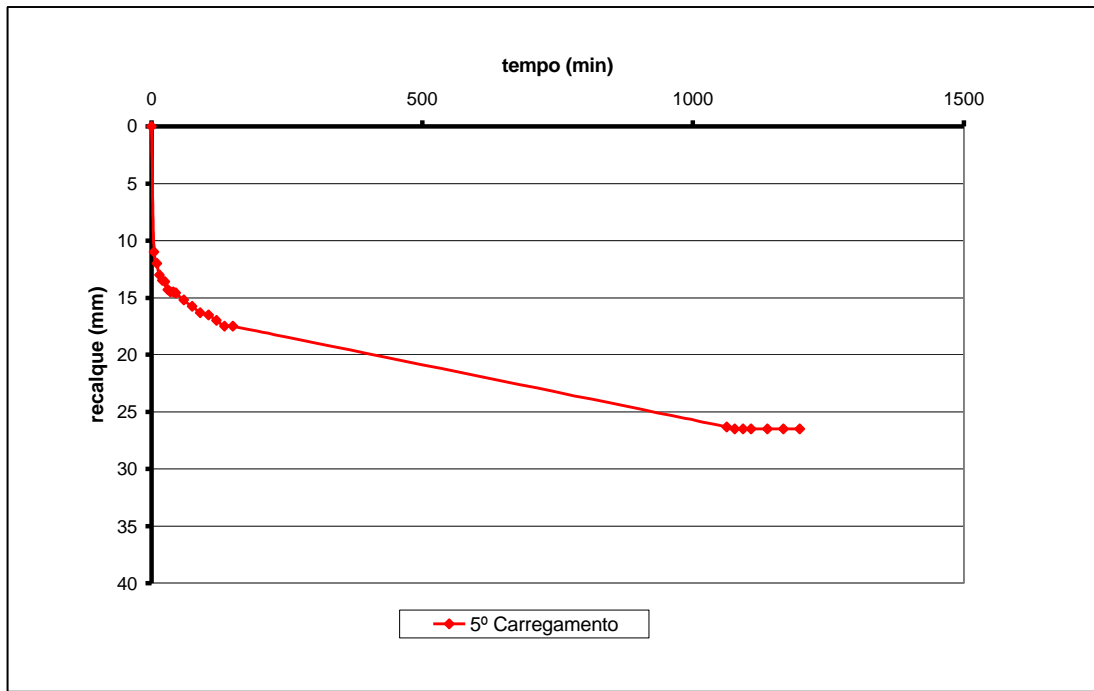


Figura 18 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 2.236,78 kgf).

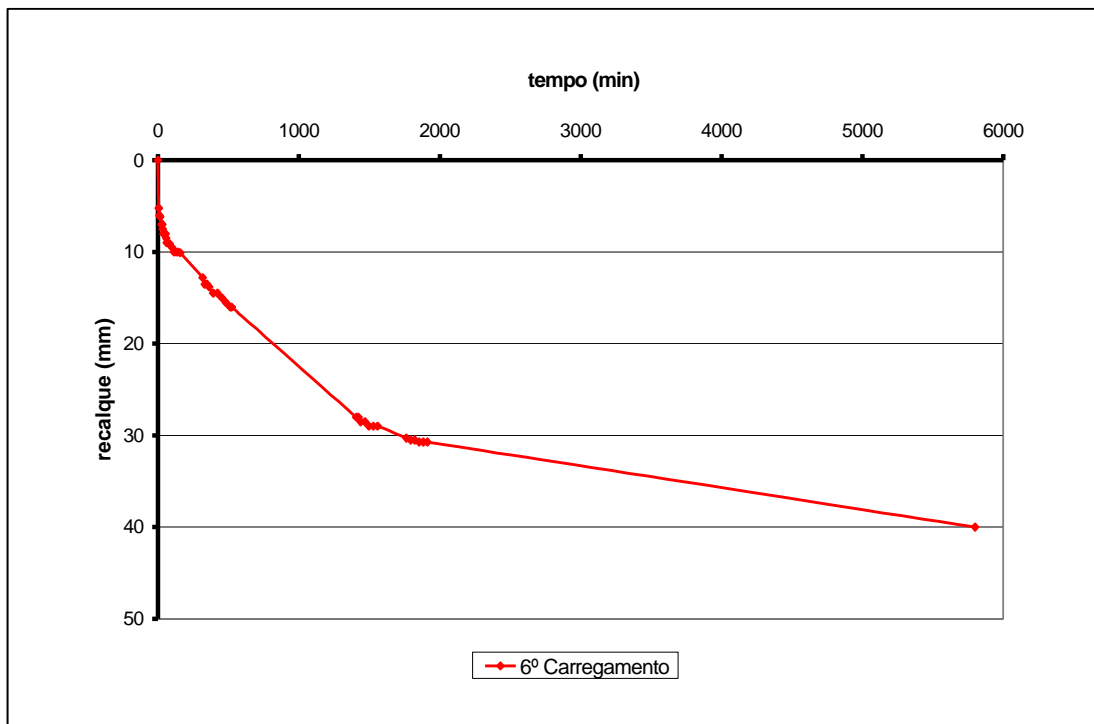


Figura 19 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 2.675,11 kgf).

Na Figura 20 apresenta-se a curva recalque *versus* tempo do primeiro ensaio de uma forma geral.

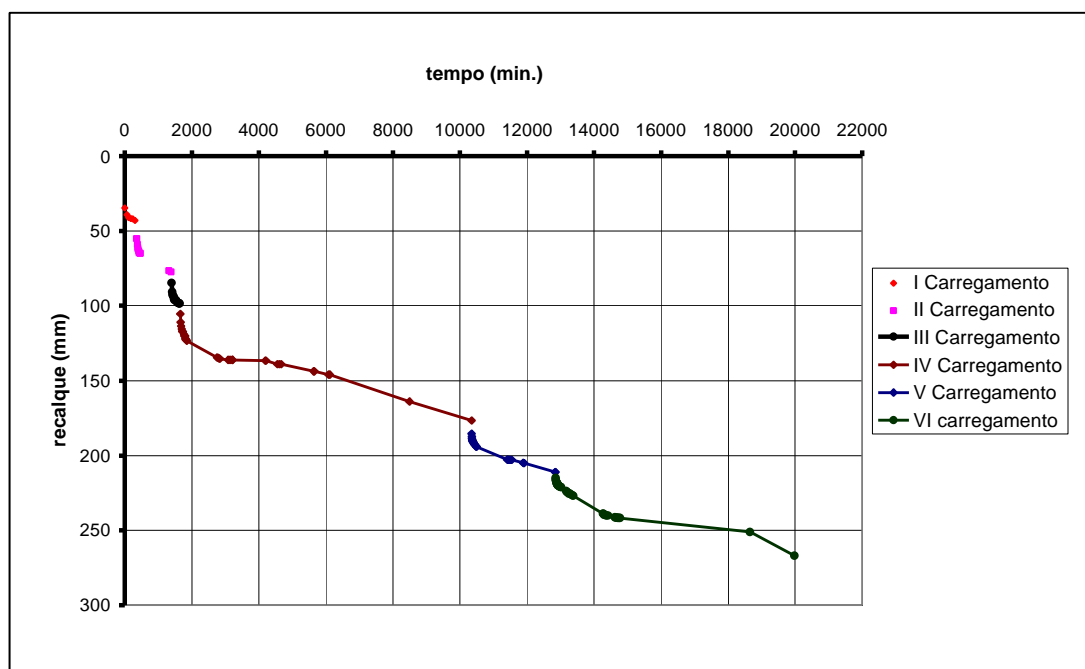


Figura 20 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do primeiro ensaio.

No Quadro 4 apresentam-se os dados completos e acumulativos sobre a curva de compressibilidade no primeiro ensaio e nas Figuras 21 e 22 apresentam-se, respectivamente, a curva carga (kgf) *versus* recalque (mm) e a curva tensão (kPa) *versus* deformação (%) do mesmo ensaio.

Quadro 4 – Dados da curva de compressibilidade (Ensaio 1)

Carga (Kgf)	Recalque (mm)
0,00	0,0
424,78	42,8
877,28	77,5
1.329,78	98,5
1.782,28	164,0
2.236,78	186,3
2.675,11	225,2

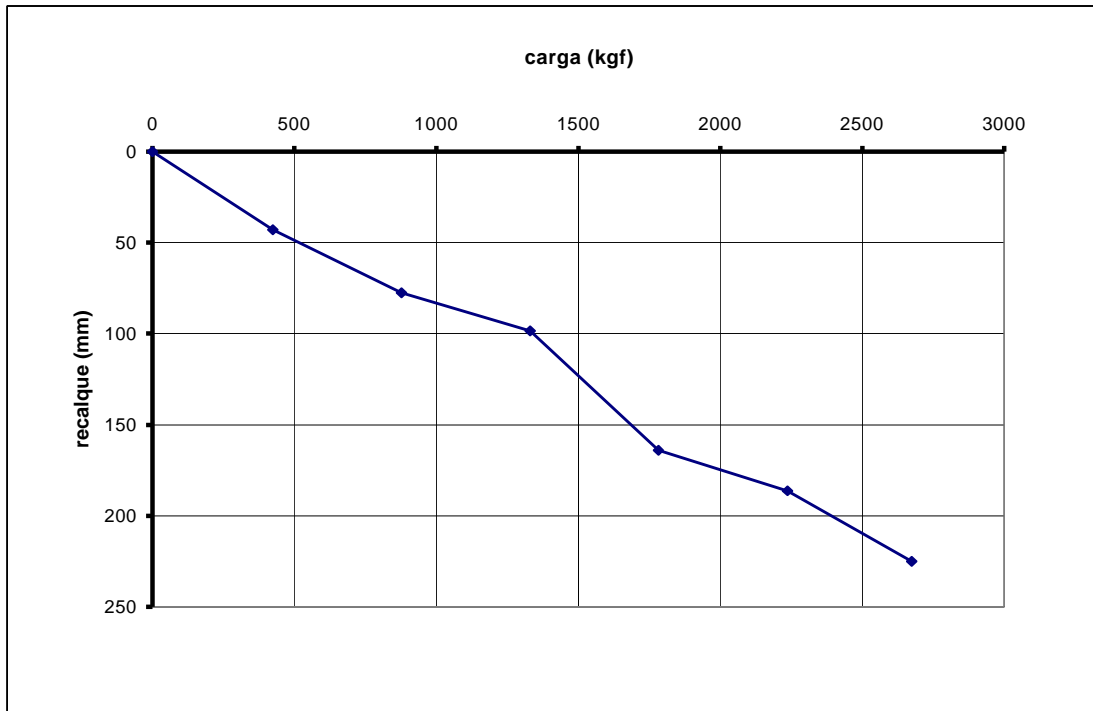


Figura 21 – Curva carga (kgf) *versus* recalque (mm) do ensaio 1.

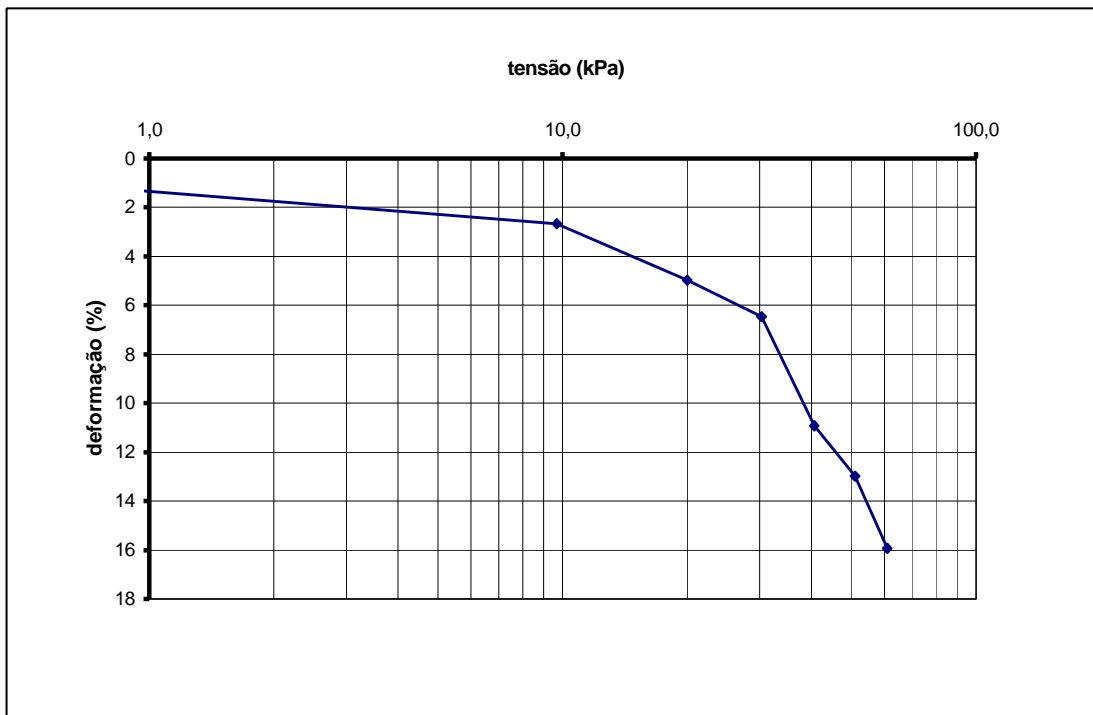


Figura 22– Curva tensão (kPa) *versus* deformação (%) do ensaio 1.

- Segundo Ensaio

O Quadro 5 apresenta a composição gravimétrica dos RSU utilizados no segundo ensaio.

Quadro 5 – Composição gravimétrica dos RSU (ensaio 2)

Material	Peso Total (kg)	(%)
Matéria Orgânica*	287,8	65,02
Papel e Papelão	62,8	14,19
Plásticos	37,6	8,49
Vidros	4,6	1,04
Alumínio	1,6	0,36
Metais Ferrosos	5,4	1,22
Borracha e Couro	3,8	0,86
Madeiras	2,0	0,45
Trapos	9,6	2,17
Outros **	27,4	6,20
Total	442,6	100

* Restos de comida, frutas, verduras, aparos de poda, folhas etc.

** Materiais de difícil classificação.

O teor de umidade dos RSU deste segundo ensaio foi calculado igual a 65 %, da mesma forma como foi feito no primeiro ensaio. Nas Figuras 23 a 28 apresentam-se as curvas recalque (imediate mais primário) *versus* tempo, considerando as diversas etapas de carregamento do segundo ensaio.

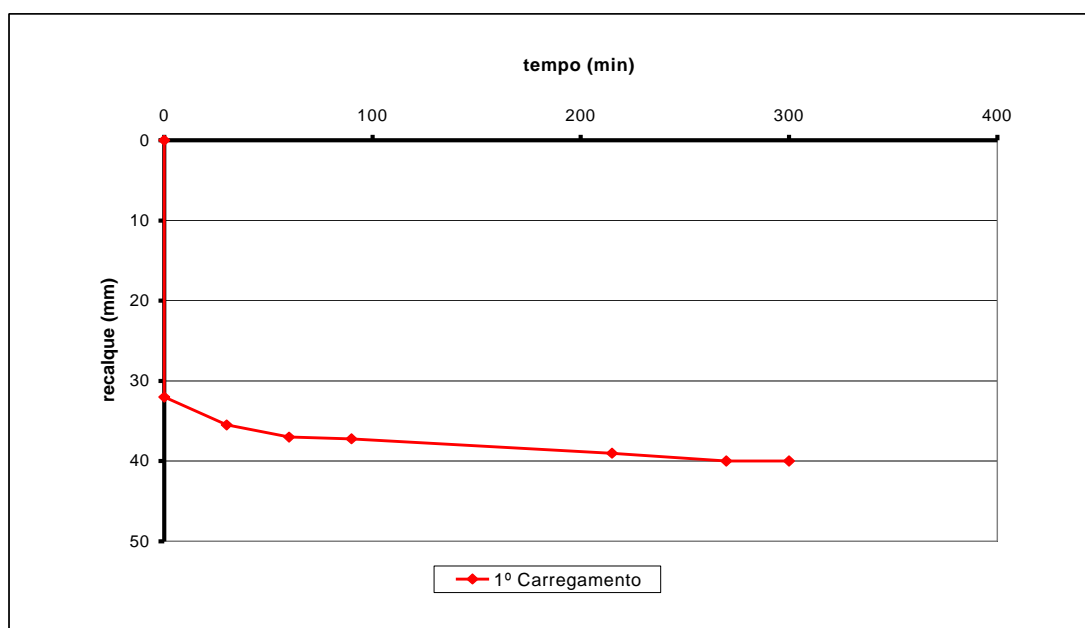


Figura 23 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 424,78 kgf).

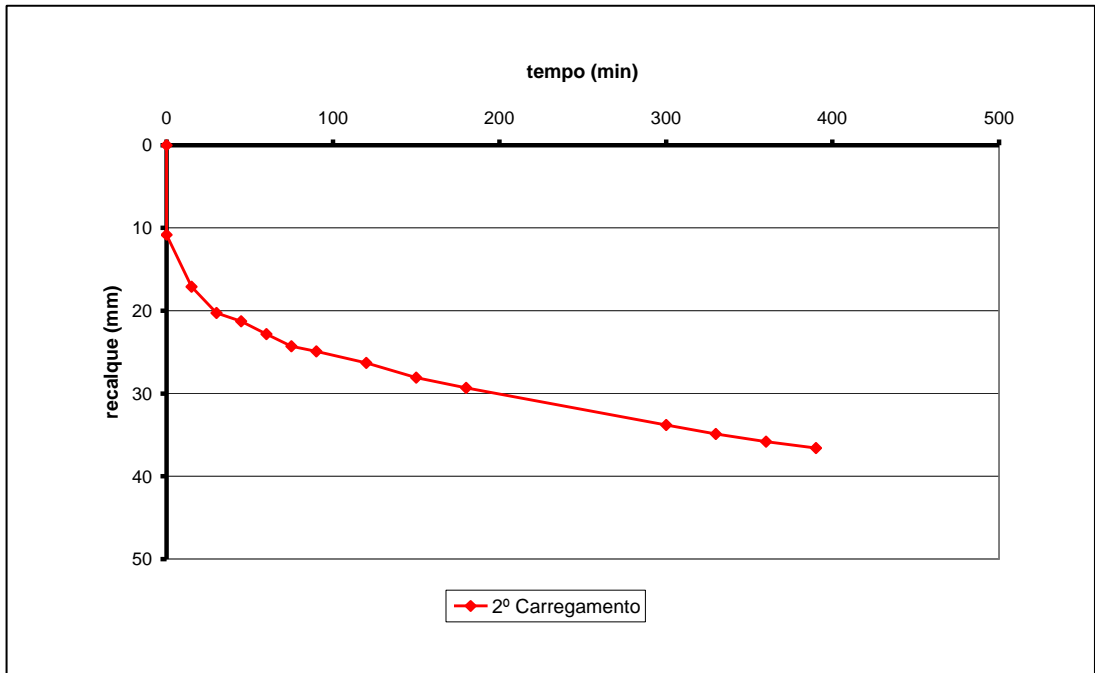


Figura 24 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 877,28 kgf).

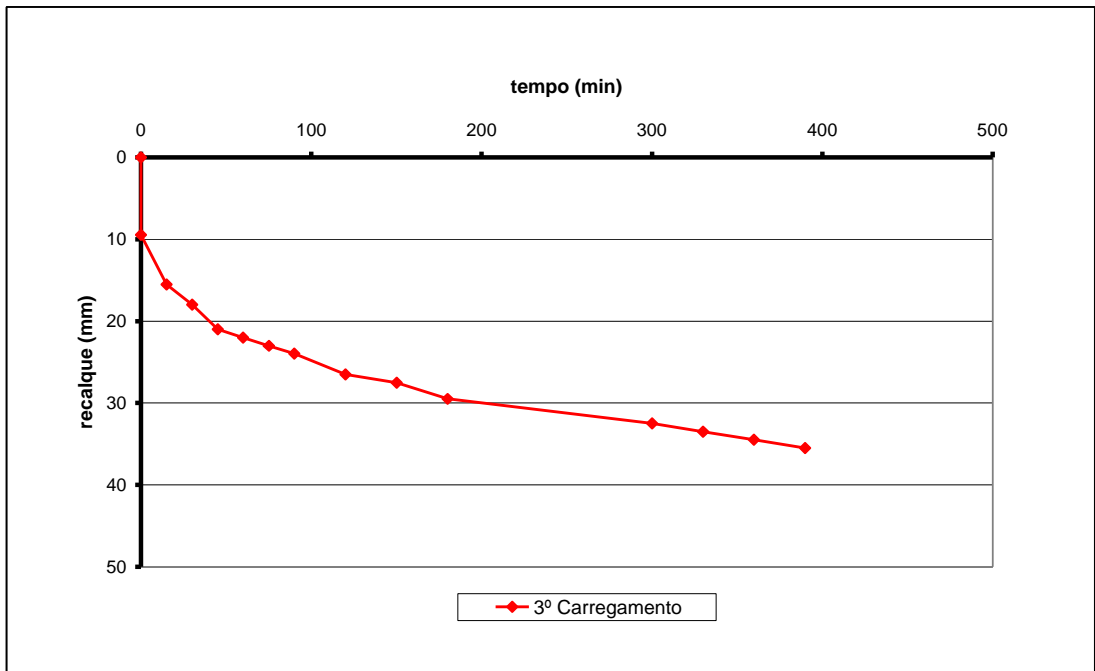


Figura 25 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 1.329,78 kgf).

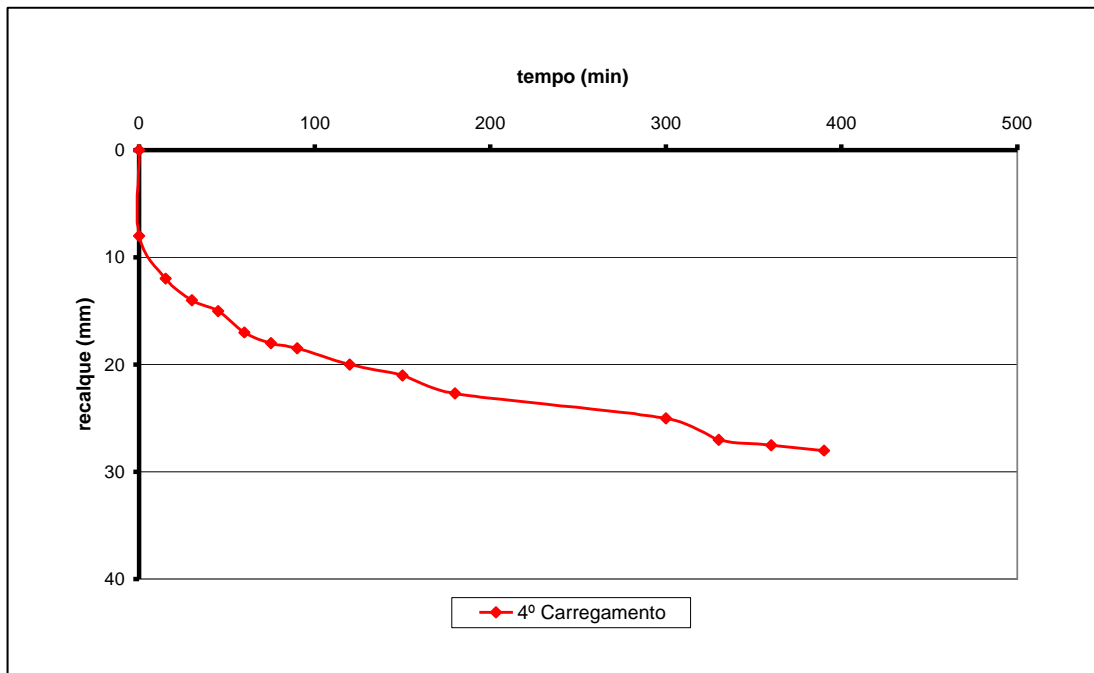


Figura 26 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 1.782,28 kgf).

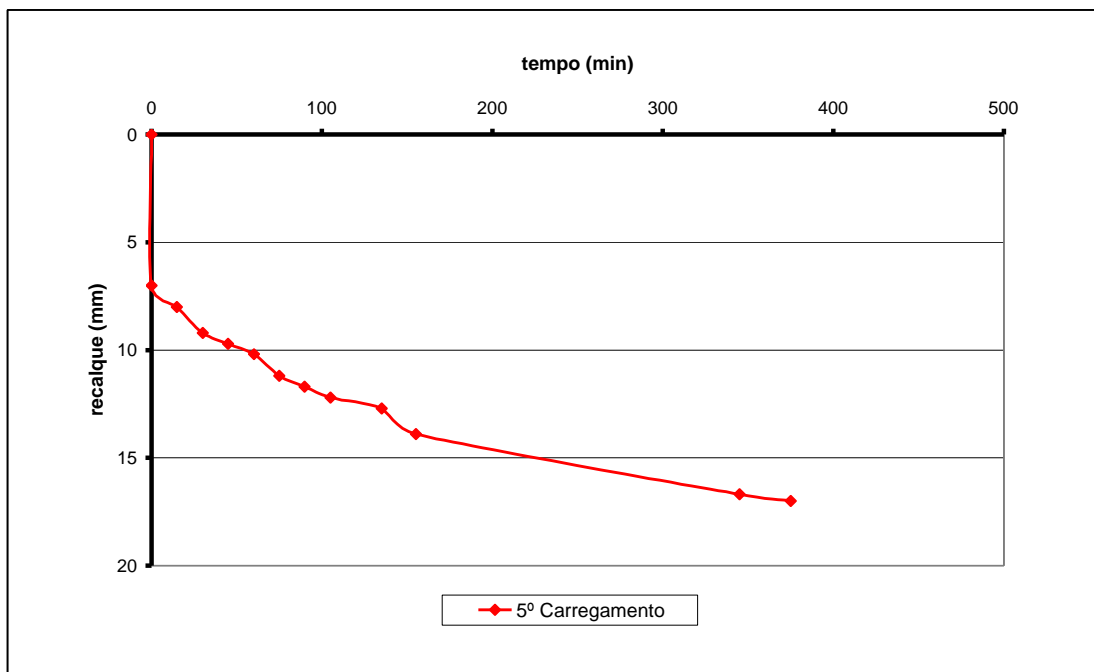


Figura 27– Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 2.236,75 kgf).

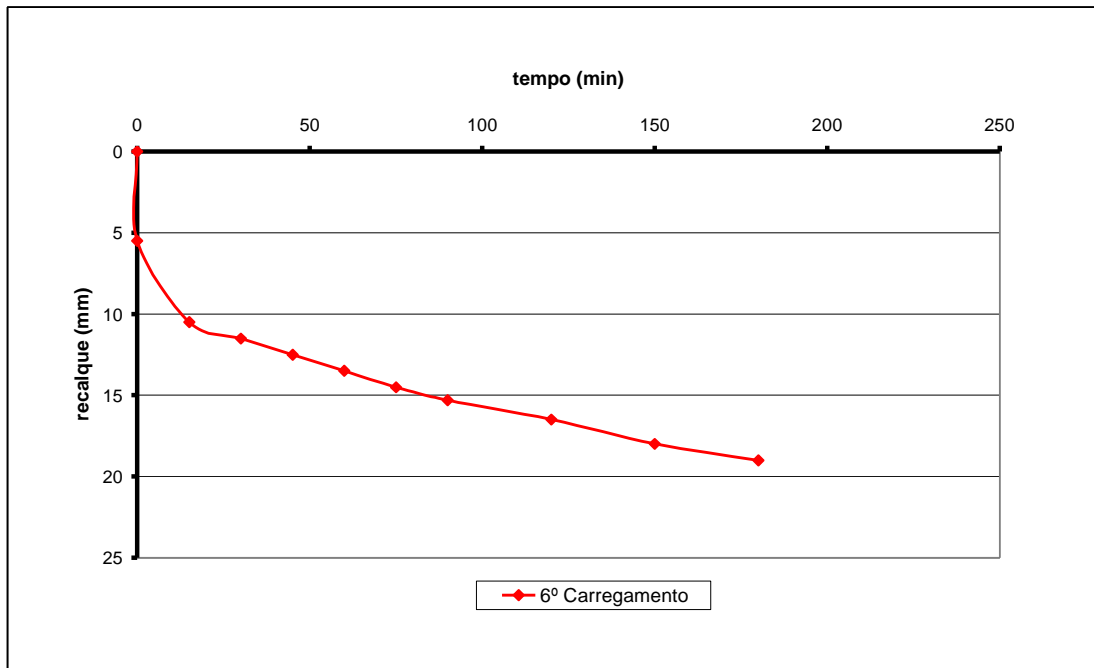


Figura 28 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 2.675,11 kgf).

A Figura 29 apresenta a curva recalque *versus* tempo considerando as diversas etapas de carregamento do segundo ensaio.

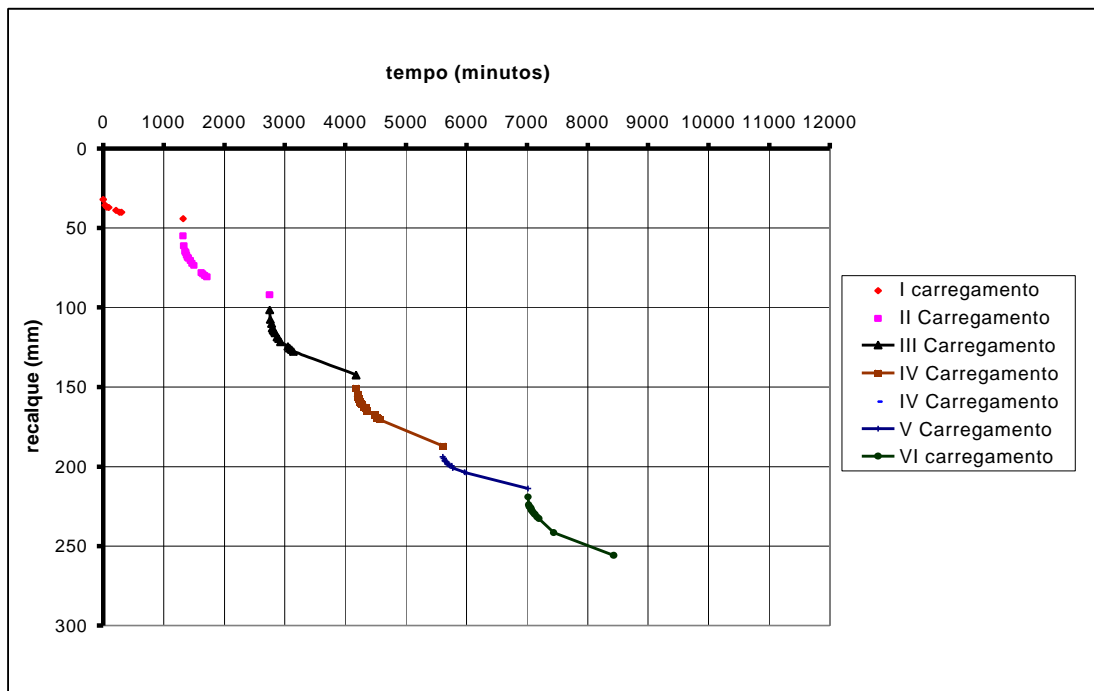


Figura 29 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do segundo ensaio.

No Quadro 6 apresentam-se os dados completos e acumulativos sobre a curva de compressibilidade no segundo ensaio.

Quadro 6 – Dados da curva de compressibilidade (Ensaio 2)

Carga (Kgf)	Recalque (mm)
0	0
424,78	44,2
877,28	92,0
1.329,78	142,5
1.782,28	187,0
2.236,78	213,7
2.675,11	256,0

A Figura 30 apresenta a curva carga (kgf) *versus* recalque (mm) do segundo ensaio, enquanto a Figura 31 apresenta a curva tensão (kPa) *versus* deformação (%) do mesmo ensaio.



Figura 30 – Curva carga (kgf) *versus* recalque (mm) do segundo ensaio.

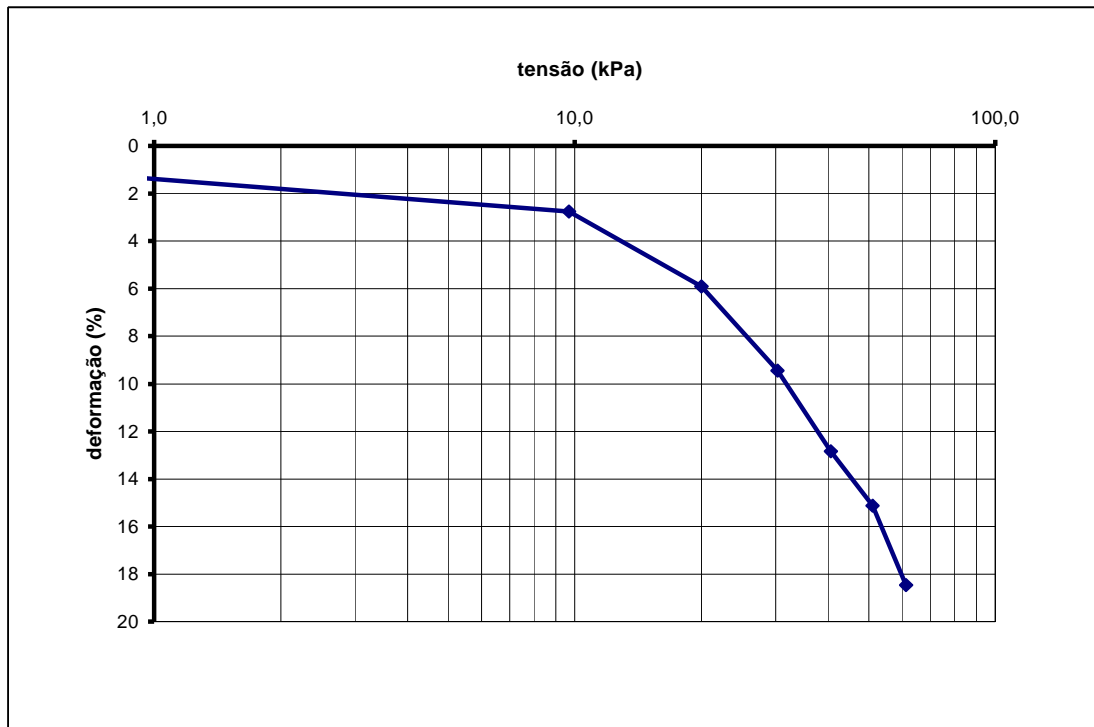


Figura 31 – Curva tensão (kPa) *versus* deformação (%) do segundo ensaio.

4.3. Determinação dos parâmetros de compressibilidade

- Índice de Compressibilidade (C_c)

Juntando-se numa mesma figura os resultados dos ensaios 1 e 2, apresentados nas Figuras 22 e 31, e ajustando-se a melhor reta possível obteve-se um índice de compressão primária (C_c) da ordem de 0,16 (Figura 32).

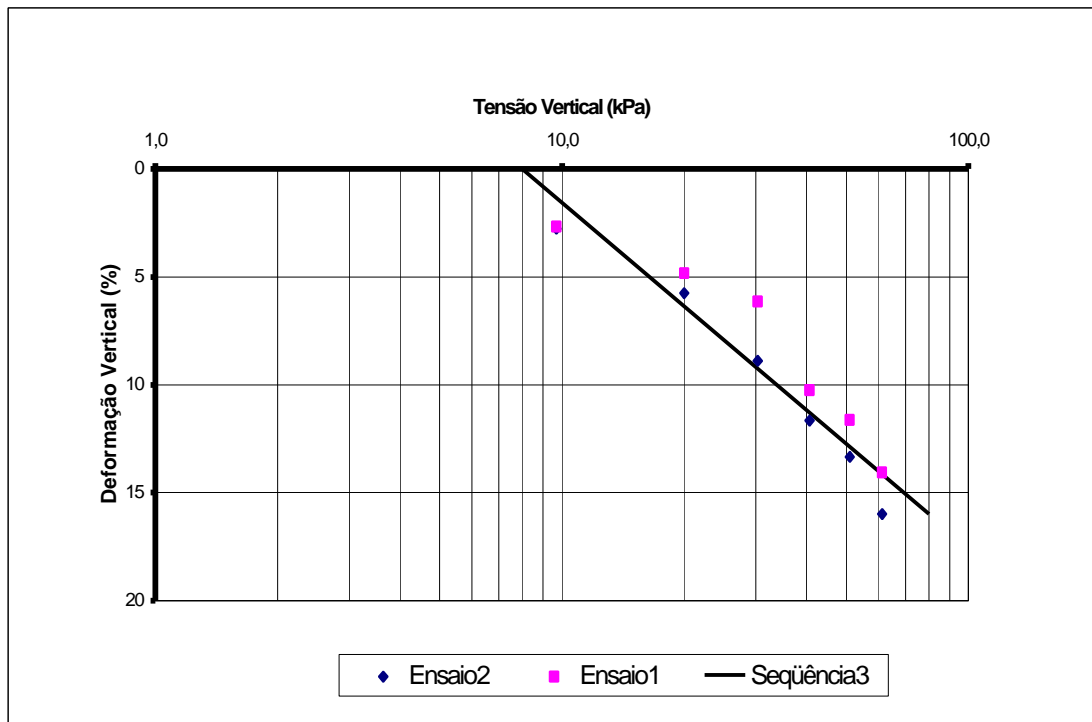


Figura 32 – Gráfico para determinação do índice de compressão primária (Cc).

- Módulo de Elasticidade (E)

No Quadro 7 apresenta-se, para cada etapa de carregamento dos ensaios, a sobrecarga ($\Delta\sigma$), os recalques imediatos (ΔH_i) e as alturas iniciais de RSU no interior da célula. A partir destes valores encontra-se, através da equação 1, o valor do módulo de elasticidade médio. Os módulos de elasticidade foram obtidos através dos recalques imediatos observados no início do carregamento de cada etapa, e apresentados nas Figuras 14 a 19 para o ensaio 1, e nas Figuras 23 a 28, para o ensaio 2.

Quadro 7 – Quadro com os valores do Módulo de Elasticidade de todas as etapas de carregamento

Ensaio	Estágio	Sobrecarga (kPa)	Ho (mm)	DHi (mm)	E (kPa)
<i>I</i>	1°	10,51	1.600,0	34,55	487,0
	2°	10,51	1.557,2	12,20	1.341,0
	3°	10,51	1.522,5	7,00	2.286,0
	4°	10,51	1.501,5	7,00	2.254,0
	5°	10,51	1.423,5	9,00	1.662,0
	6°	10,51	1.389,0	4,00	3.650,0
<i>II</i>	1°	10,51	1.600,0	32,00	526,0
	2°	10,51	1.555,8	10,80	1.514,0
	3°	10,51	1.508,0	9,50	1.668,0
	4°	10,51	1.457,5	8,00	1.915,0
	5°	10,51	1.413,0	7,00	2.122,0
	6°	10,51	1.386,3	5,50	2.649,0

Ho – Altura inicial do RSU

ΔH_i – Recalque imediato do RSU

E – Módulo de Elasticidade

- Parâmetros do modelo de Gandolla (k e a)

As Figuras 33 a 38, referentes ao primeiro ensaio, e as Figuras 39 a 44, referentes ao segundo ensaio, apresentam curvas tempo *versus* o logaritmo da diferença do recalque final com o recalque no tempo e mostram a linearização de Gandolla, ou seja, com a inclinação da melhor reta (método dos mínimos quadrados) obtivemos o parâmetro “k” e com o coeficiente linear da reta achamos o recalque final (ΔH_f). Com esses dados obtemos o parâmetro “a” que é o recalque final dividido pela altura inicial do aterro (Ho). No Quadro 8 estão demonstrados os valores dos parâmetros “k” e “a” do modelo de Gandolla para cada etapa de carregamento nos dois ensaios.

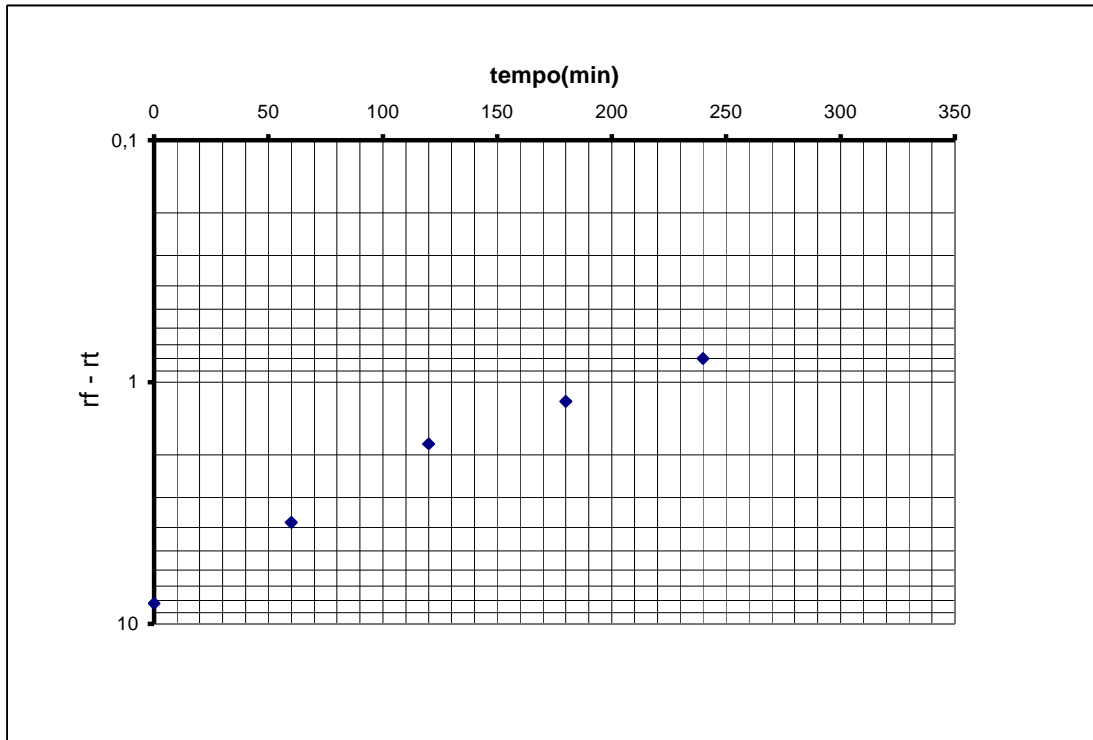


Figura 33 – Curva tempo (min) *versus* log(rf - rt) (mm) do primeiro carregamento (ensaio 1).

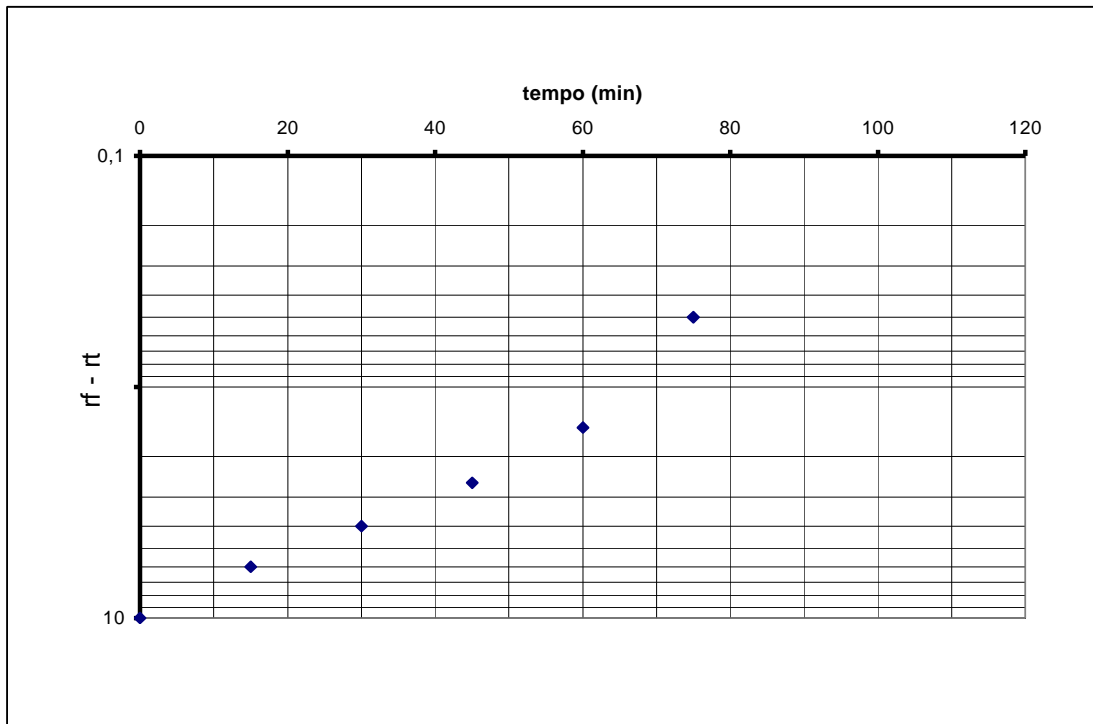


Figura 34 – Curva tempo (min) *versus* log(rf - rt) (mm) do segundo carregamento (ensaio 1).

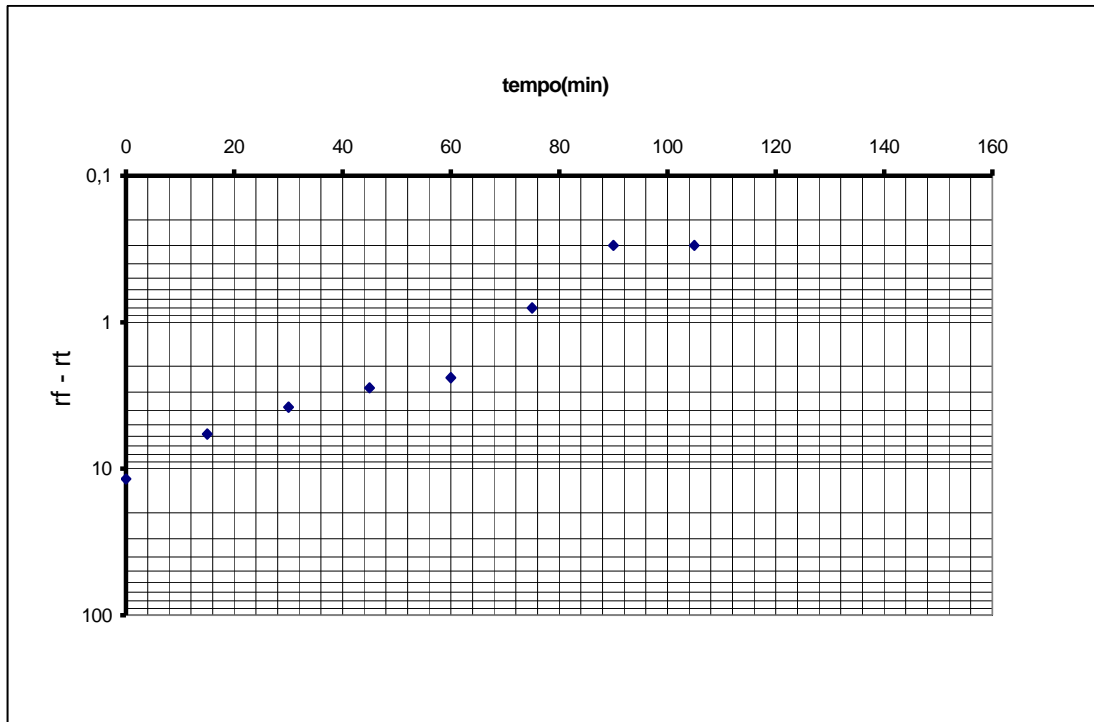


Figura 35 – Curva tempo (min) *versus* $\log(rf - rt)$ (mm) do terceiro carregamento (ensaio 1).

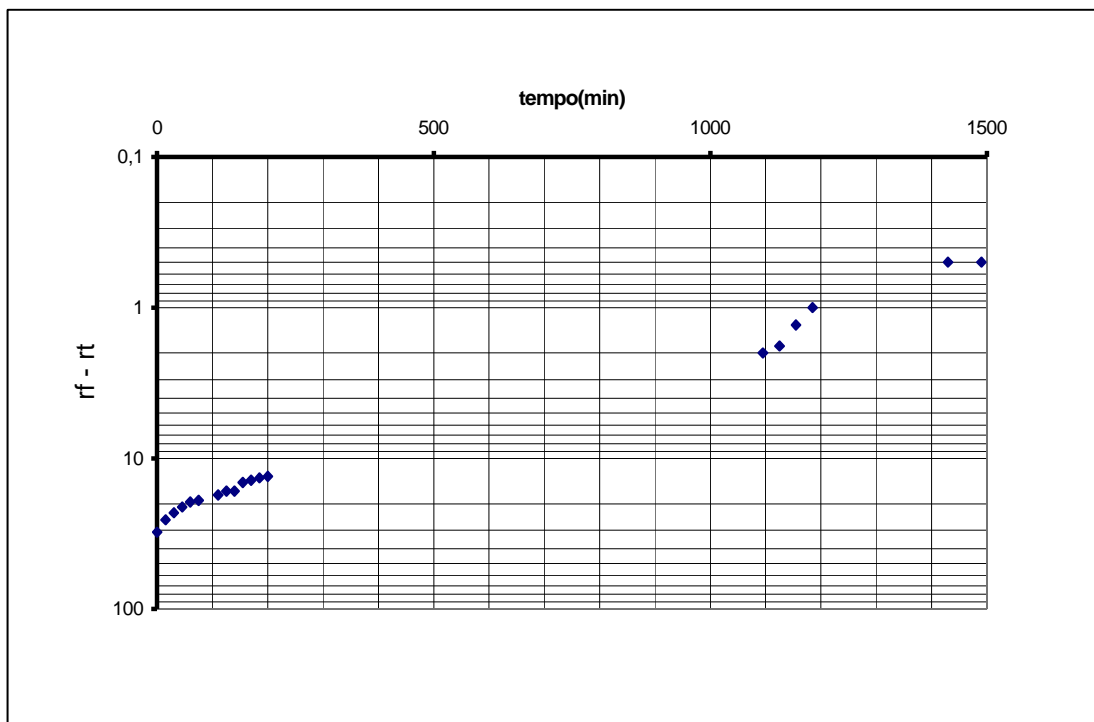


Figura 36 – Curva tempo (min) *versus* $\log(rf - rt)$ (mm) do quarto carregamento (ensaio 1).

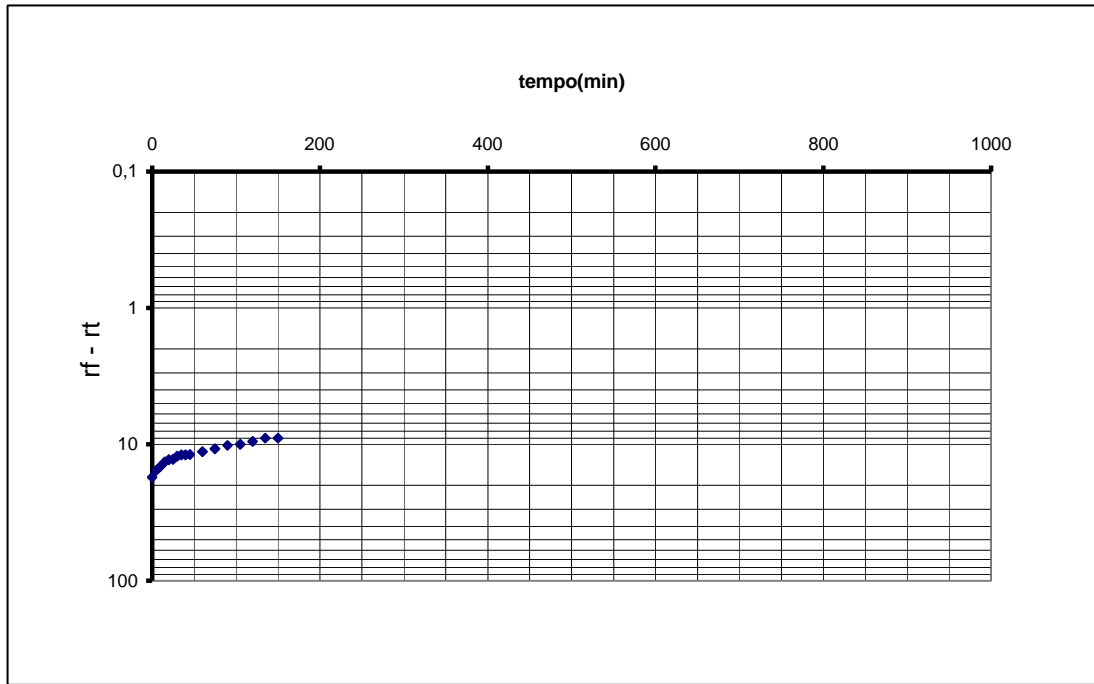


Figura 37 – Curva tempo (min) *versus* log(rf - rt)(mm) do quinto carregamento (ensaio 1).

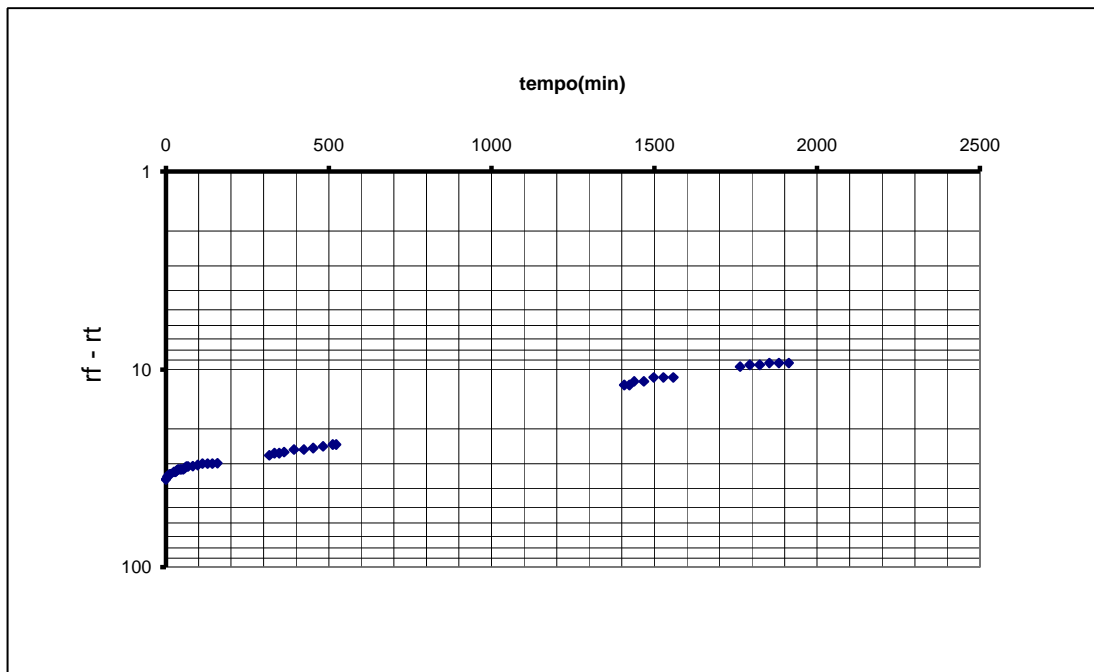


Figura 38 – Curva tempo (min) *versus* log(rf - rt) (mm) do sexto carregamento (ensaio 1).

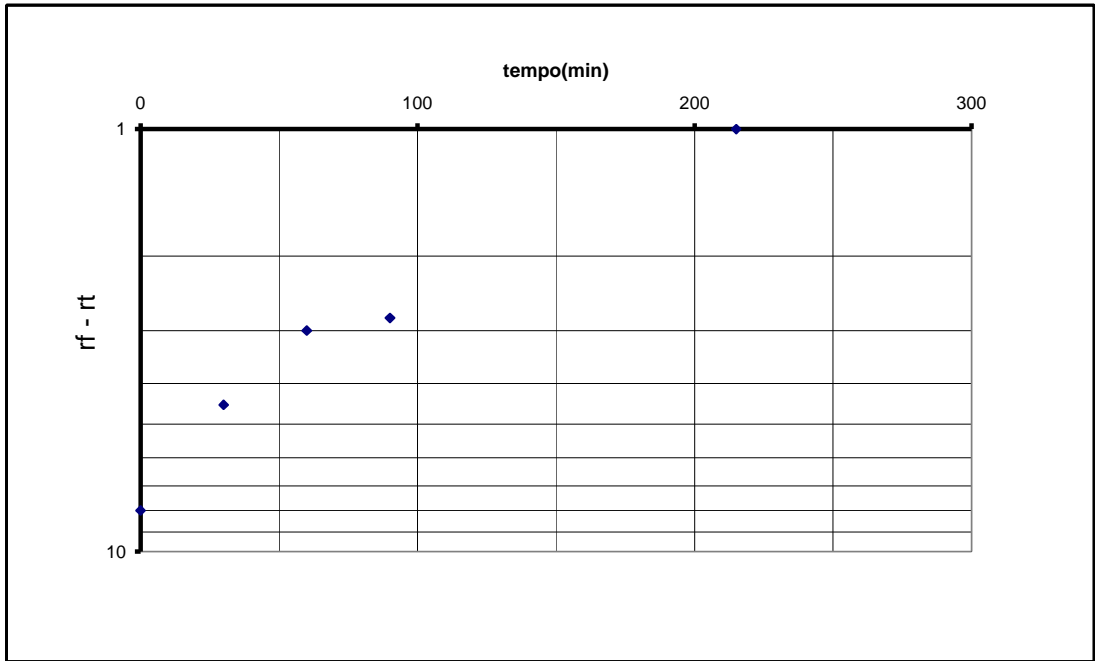


Figura 39 – Curva tempo (min) *versus* log(rf - rt) (mm) do primeiro carregamento (ensaio 2).

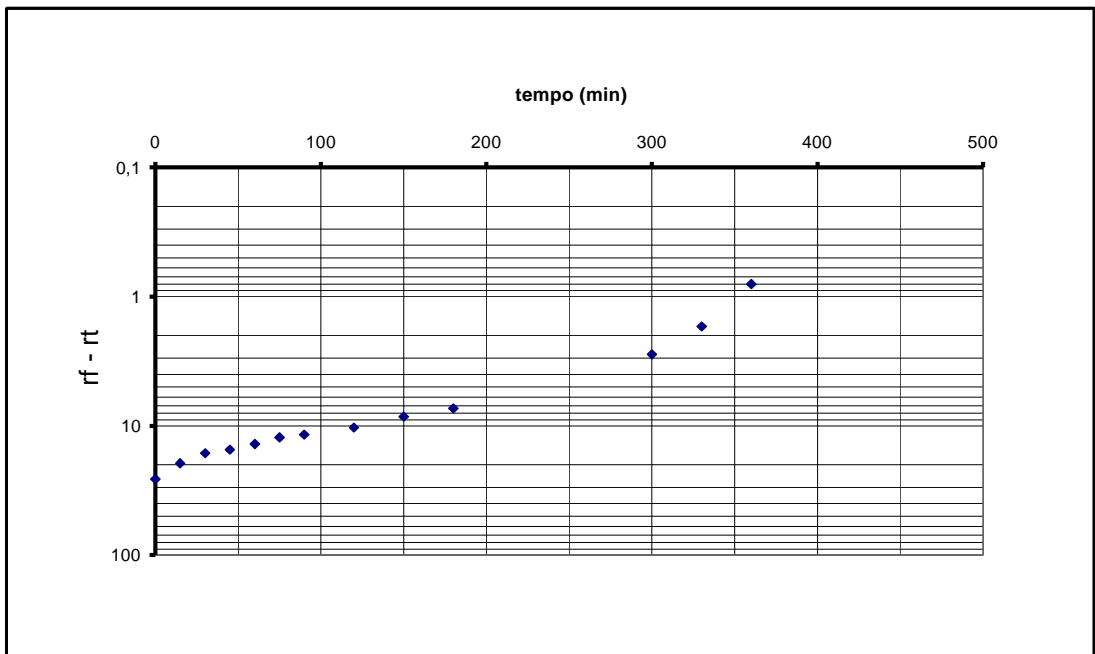


Figura 40 – Curva tempo (min) *versus* log(rf - rt) (mm) do segundo carregamento (ensaio 2).

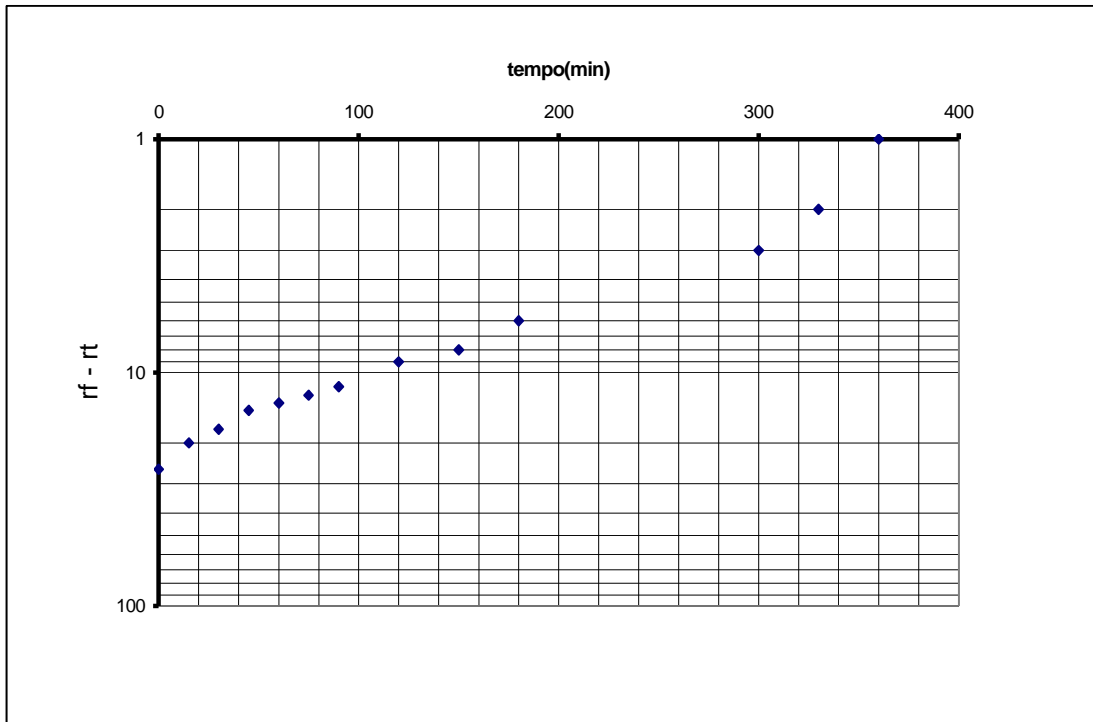


Figura 41– Curva tempo (min) *versus* log(rf - rt) (mm) do terceiro carregamento (ensaio 2).

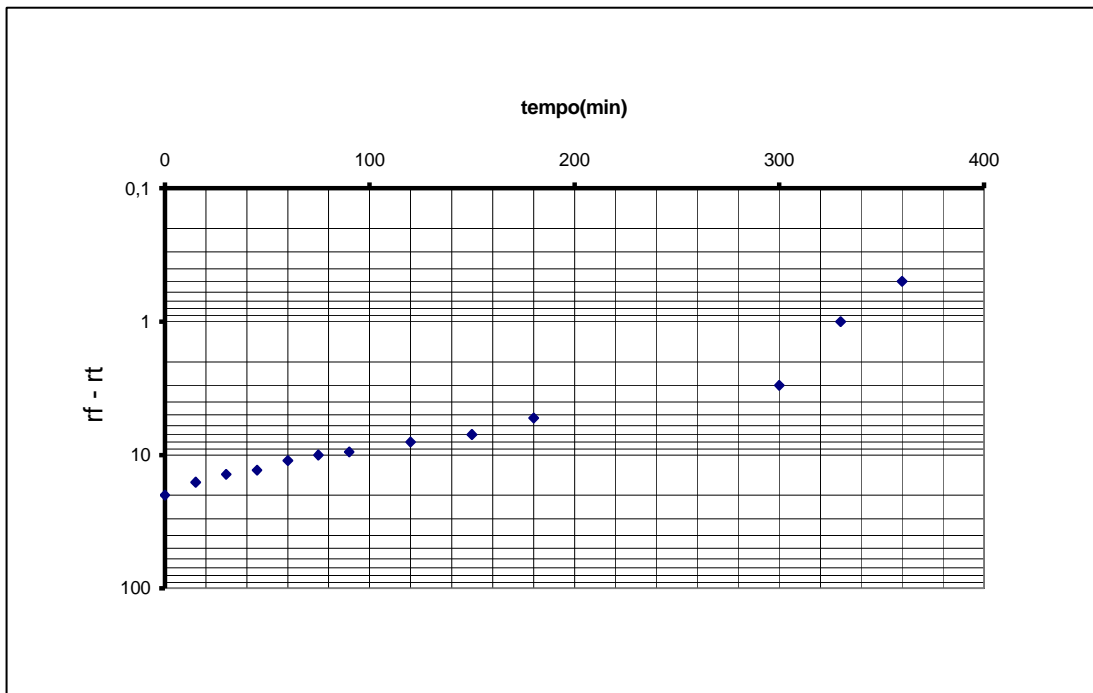


Figura 42 – Curva tempo (min) *versus* log(rf - rt) (mm) do quarto carregamento (ensaio 2).

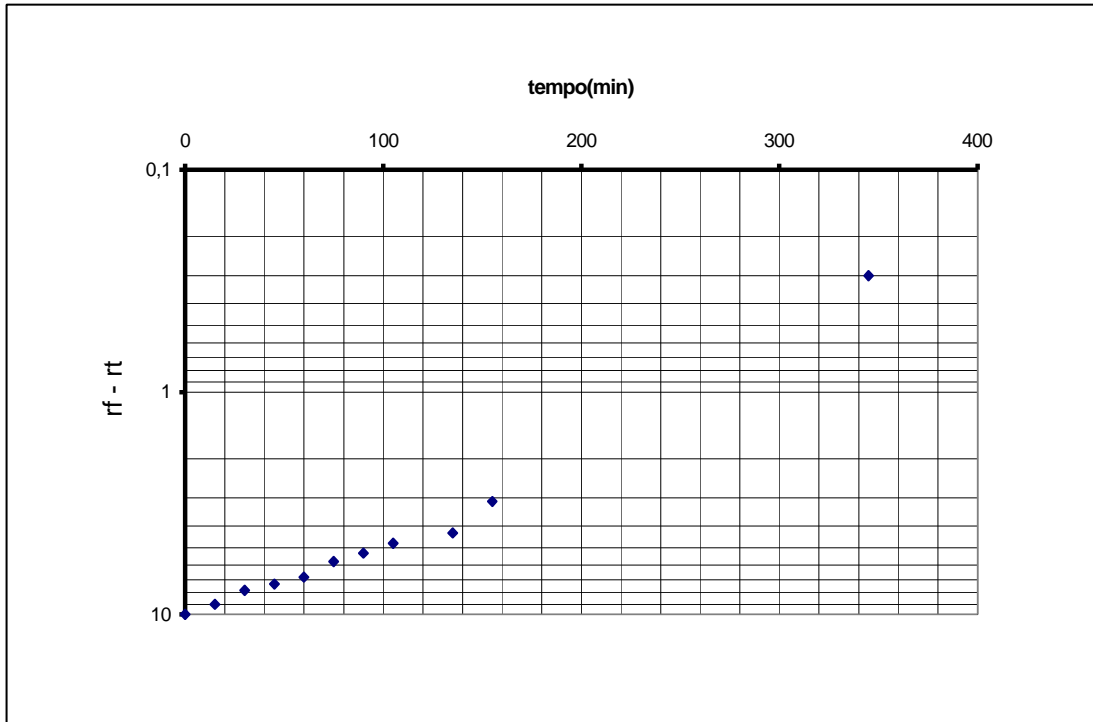


Figura 43 – Curva tempo (min) *versus* log(rf - rt) (mm) do quinto carregamento (ensaio 2).

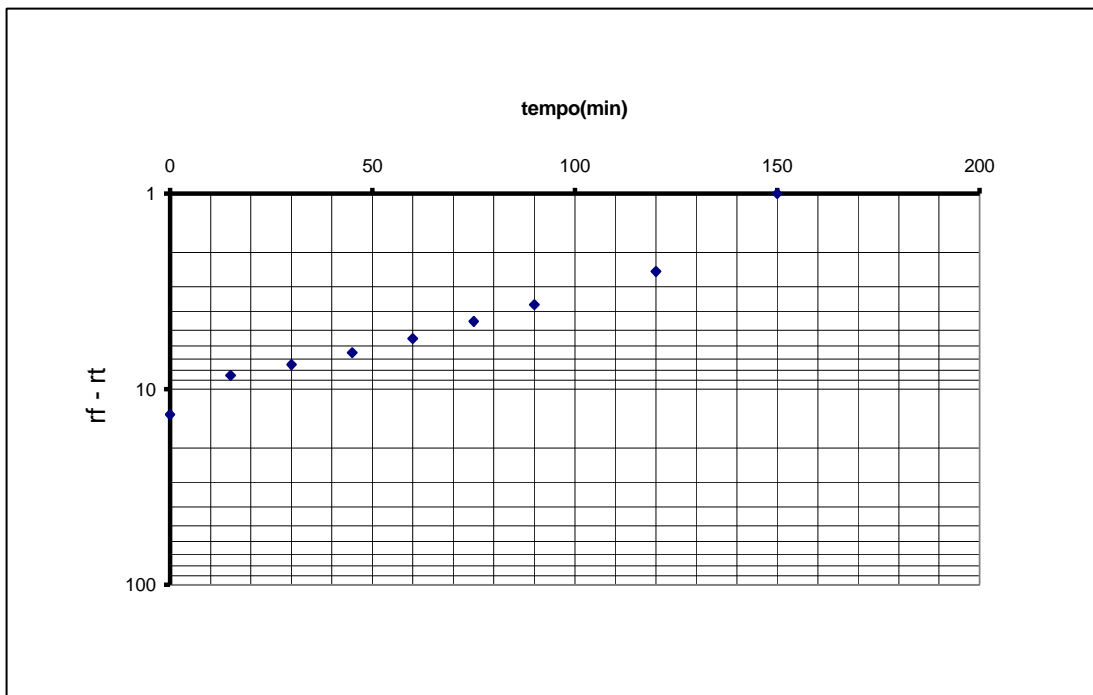


Figura 44 – Curva tempo (min) *versus* log(rf - rt) (mm) do sexto carregamento (ensaio 2).

Quadro 8 – Quadro com os valores dos parâmetros “k” e “a” de todas as etapas de carregamento.

PARAMÊTROS ENSAIO GANDOLLA (Ensaio 1)			PARAMÊTROS ENSAIO GANDOLLA (Ensaio 2)		
CARGA (kg)	<i>K</i> (min ⁻¹)	<i>a</i>	CARGA (kg)	<i>K</i> (min ⁻¹)	<i>a</i>
424,78	0,0112	0,02734	424,78	0,01705	0,0255
877,28	0,06266	0,05016	877,28	0,00862	0,0523
1329,78	0,04163	0,0635	1329,78	0,0077	0,0851
1782,28	0,00764	0,0721	1782,28	0,00766	0,11762
2236,78	0,00625	0,1435	2236,78	0,00695	0,1451
2675,11	0,000966	0,1812	2675,11	0,017	0,1685

As Figuras 45 a 50, referentes ao primeiro ensaio, e as Figuras 51 a 56, referentes ao segundo ensaio, apresentam a relação recalque versus tempo mostrando a aproximação dos recalques medidos no RSU e os recalques calculados pelo modelo matemático de Gandolla utilizando-se os valores dos parâmetros “k” e “a” do Quadro 8.

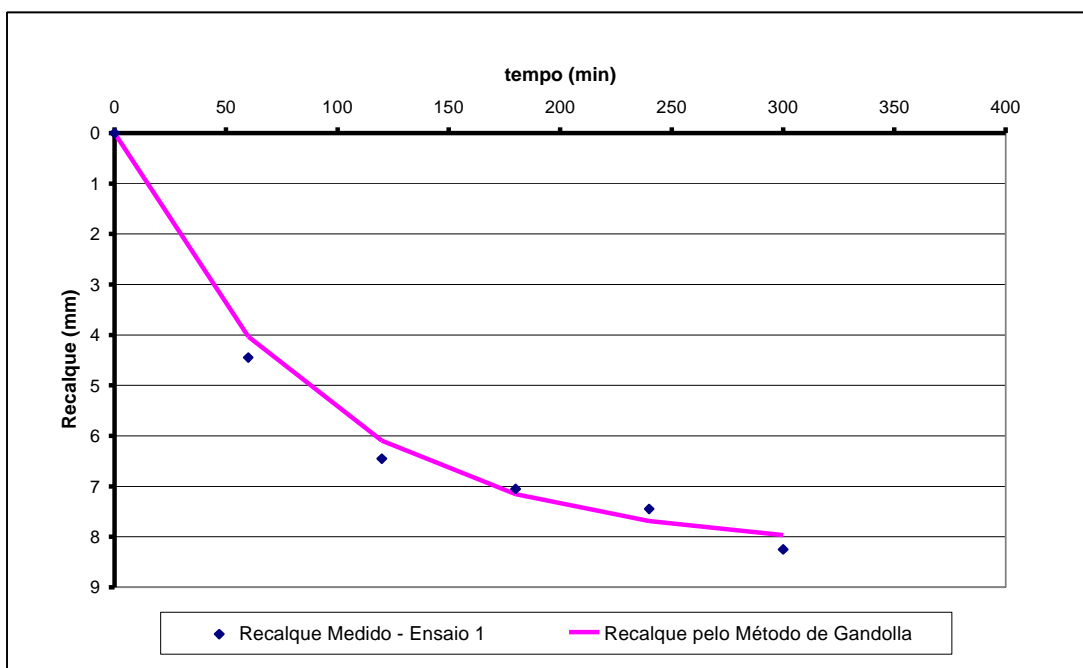


Figura 45 – Curva recalque (mm) versus tempo (min) do primeiro carregamento, recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.

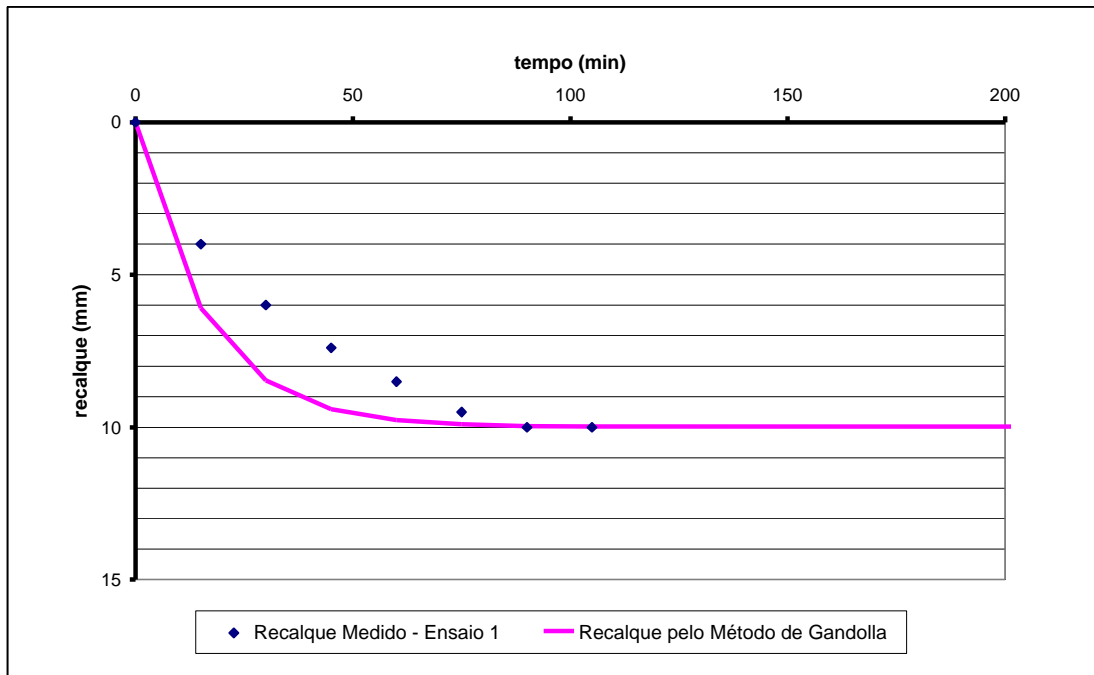


Figura 46 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do segundo carregamento, recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.

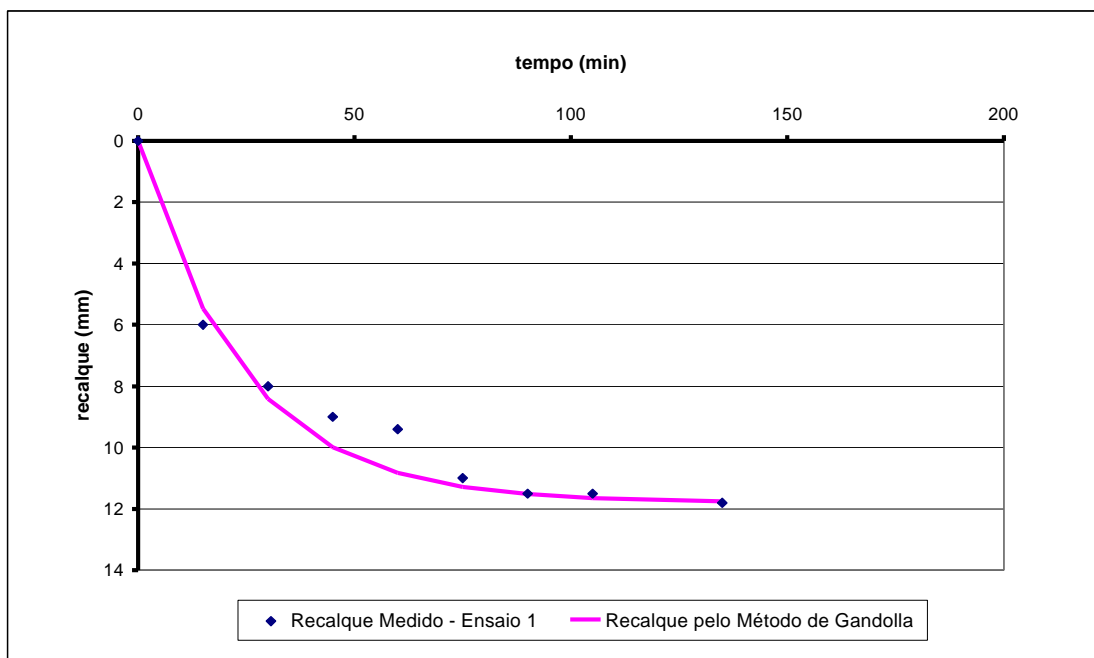


Figura 47 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do terceiro carregamento, recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.

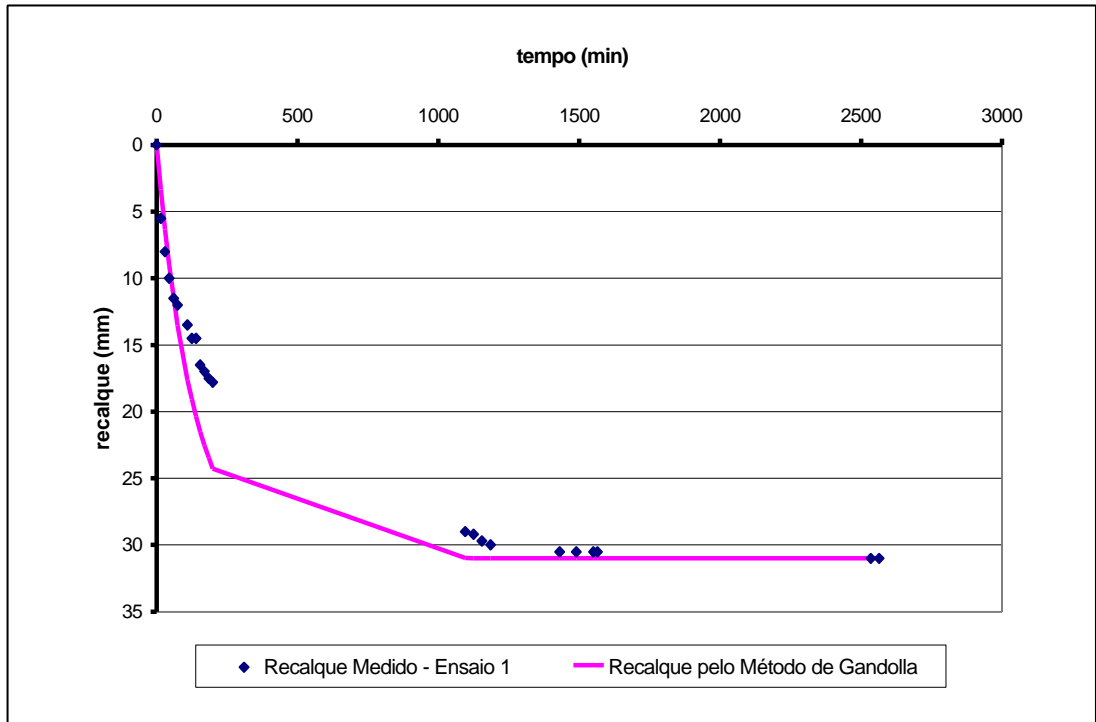


Figura 48 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do quarto carregamento, recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.

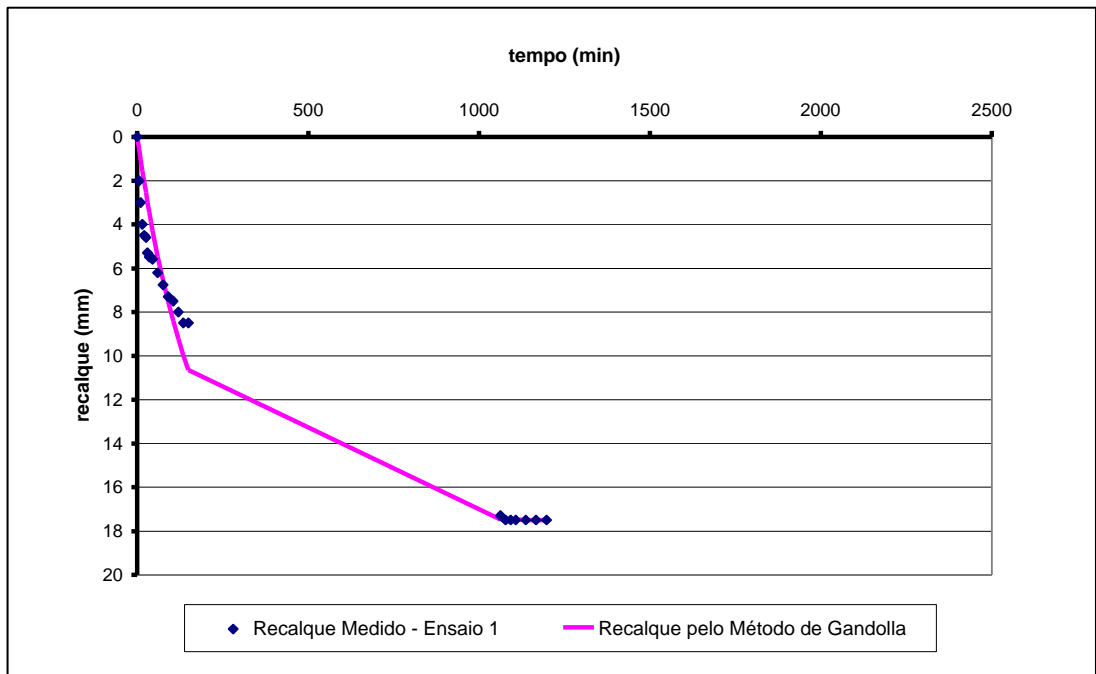


Figura 49 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do quinto carregamento, recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.

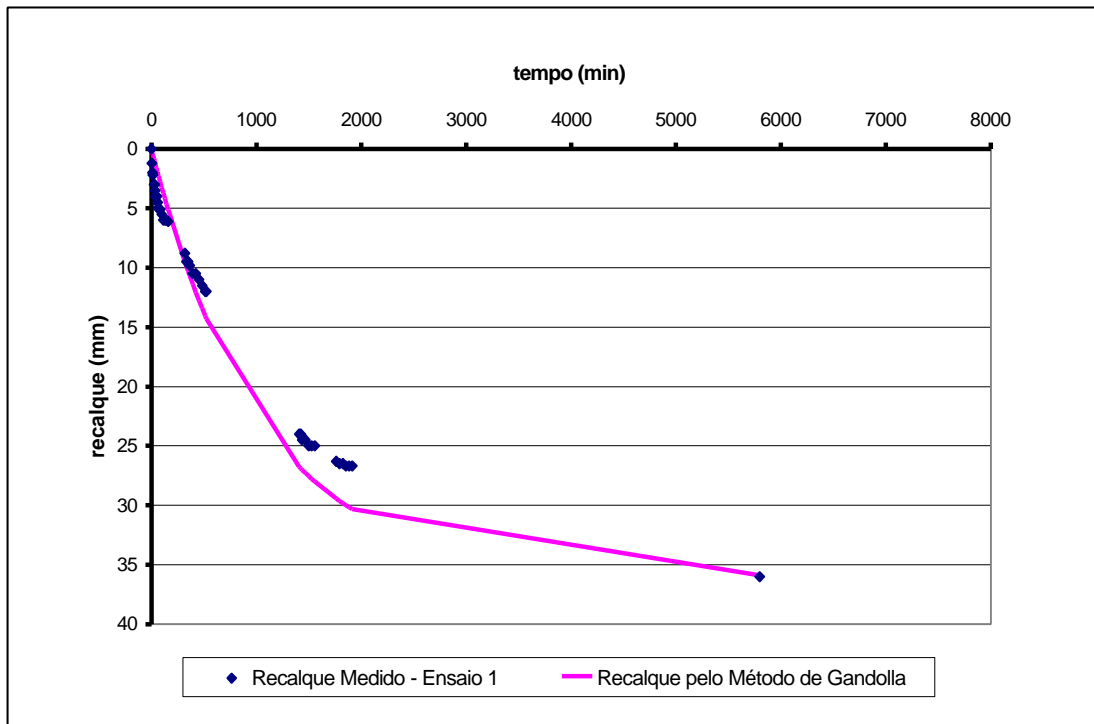


Figura 50 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do sexto carregamento, recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.

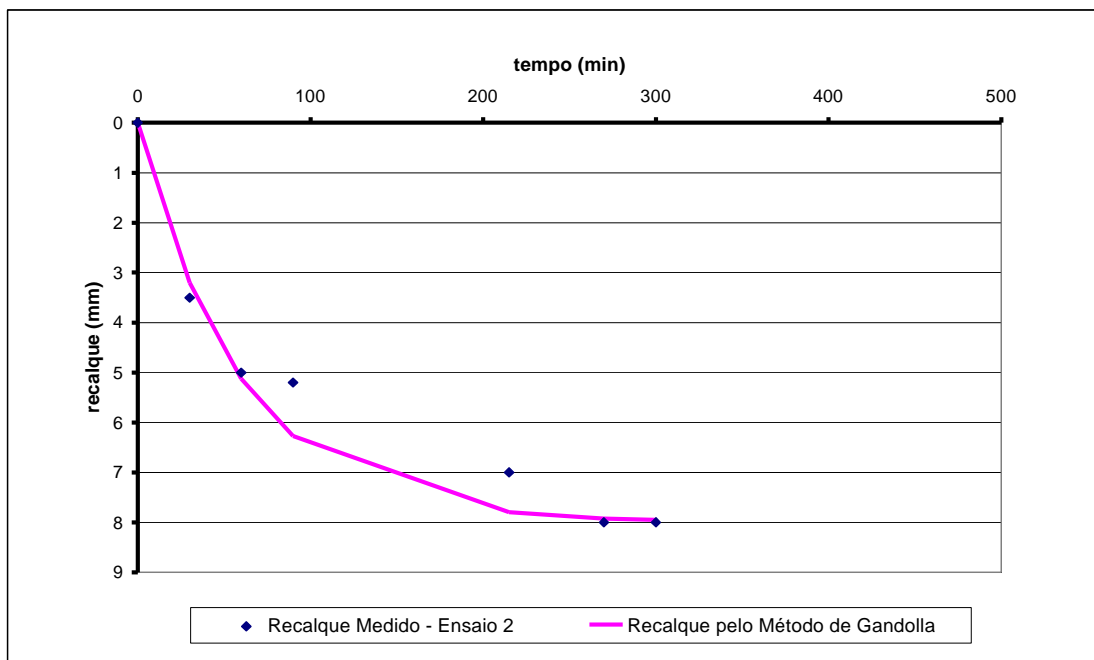


Figura 51 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do primeiro carregamento, recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.

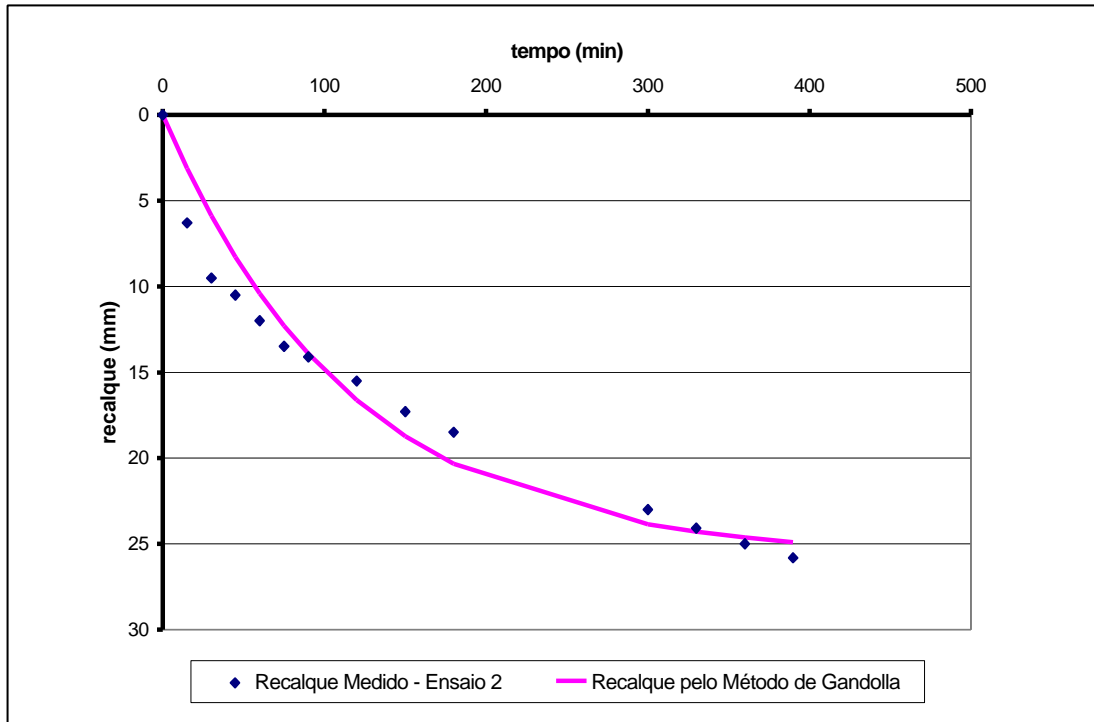


Figura 52 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do segundo carregamento, recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.

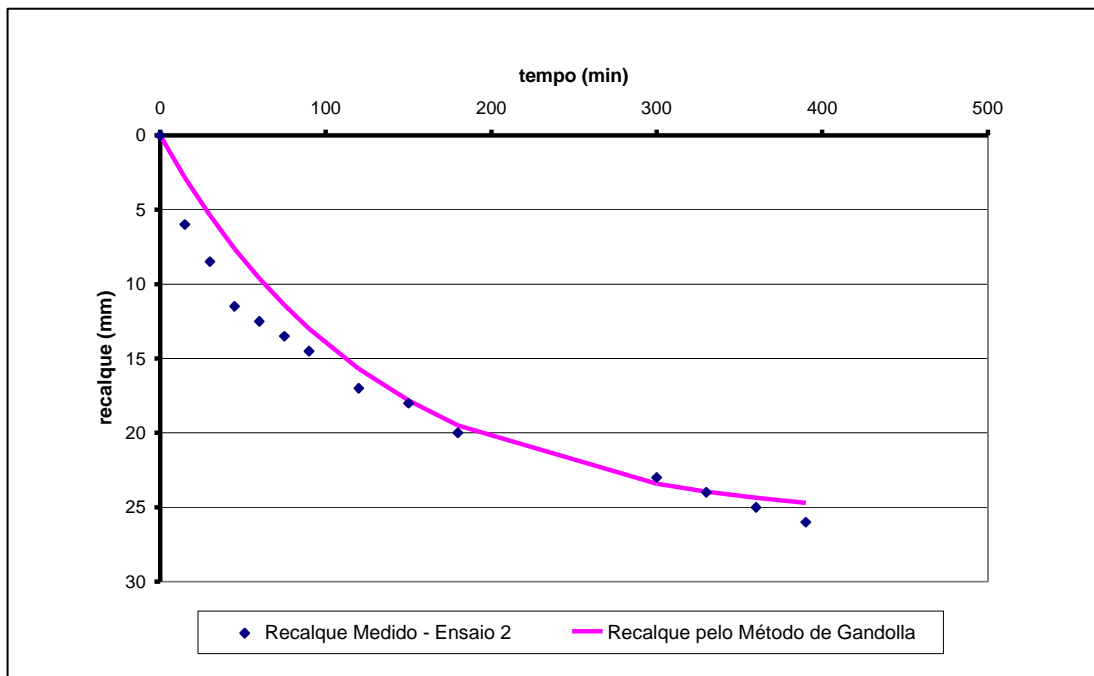


Figura 53 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do terceiro carregamento, recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.

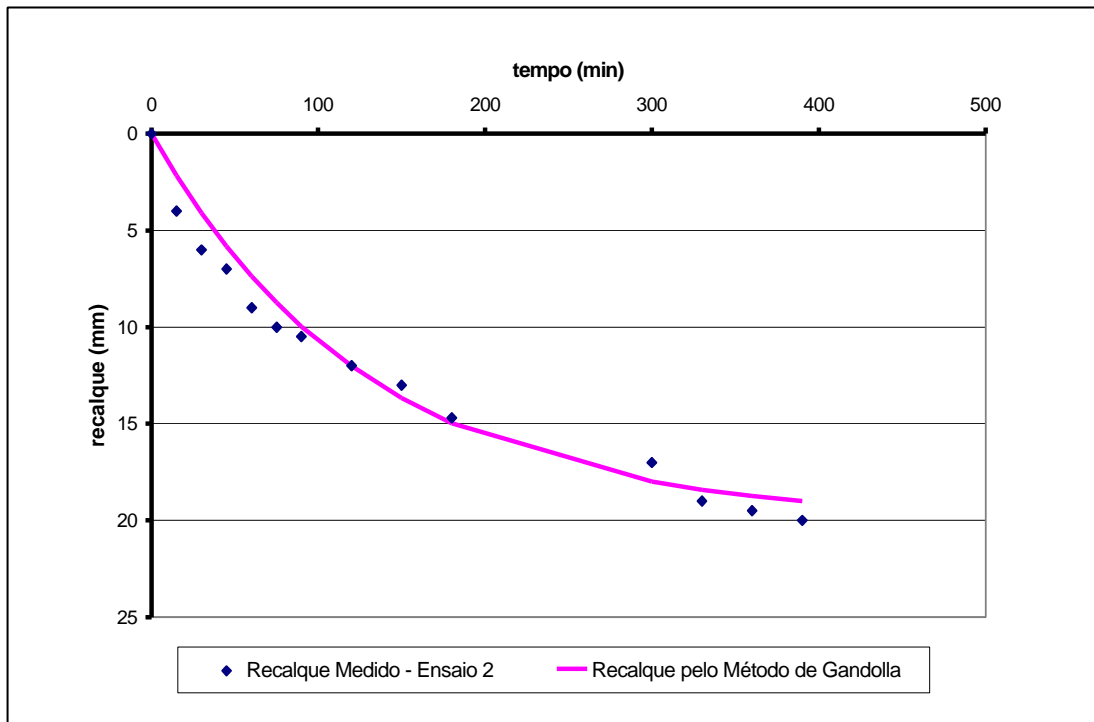


Figura 54 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do quarto carregamento, recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.

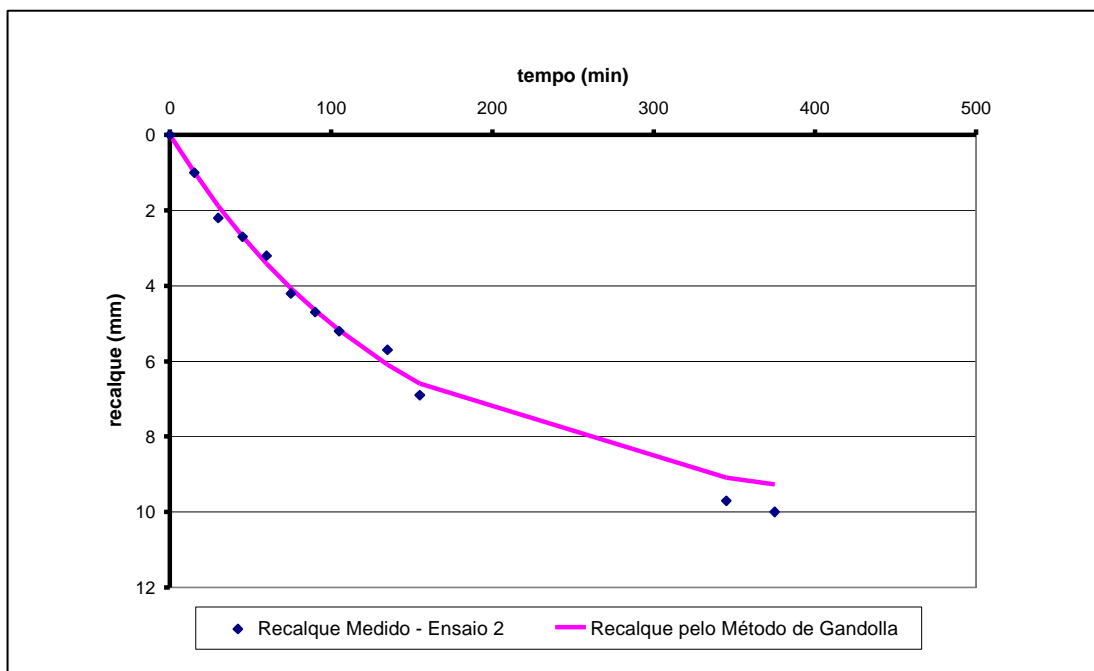


Figura 55 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do quinto carregamento, recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.

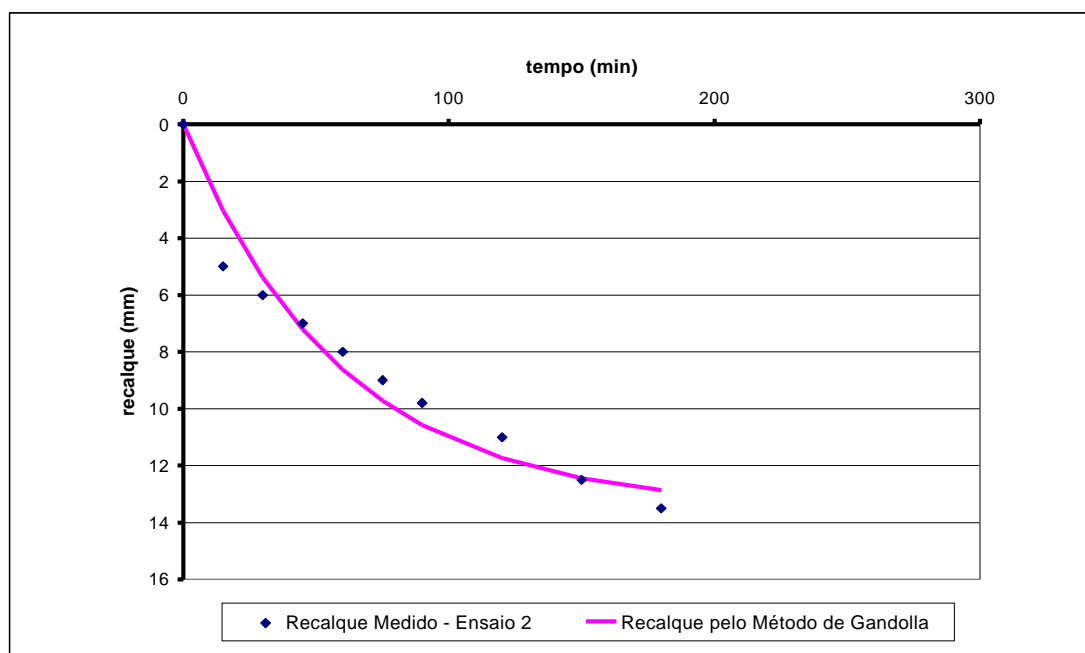


Figura 56 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do sexto carregamento, recalques medidos com os recalques do método de Gandolla.

4.4. Cálculo de recalques no aterro sanitário de Viçosa

4.4.1. Utilizando-se o Modelo de Gandolla com o acréscimo do recalque imediato de Sowers

No Quadro 9 estão apresentados os recalques finais em quatro pontos (H_1 , H_2 , H_3 e H_4) da seção 4-4 do Aterro Sanitário de Viçosa-MG. Estes recalques finais são dados pela equação (9).

$$\Delta H_f = \Delta H_i + \Delta H_p \quad (\text{equação 9})$$

em que

ΔH_i = recalque imediato Sowers; e

ΔH_p = recalque primário Gandolla.

Quadro 9 – Quadro com as previsões dos recalques determinados pelo Método de Gandolla, incluindo-se o recalque imediato de Sowers.

Local	H ₀ (m)	s _v (Média) (kPa)	Carga (Kg)	K (min ⁻¹)	a	DH _i (m)	DH _{Gand.} (m)	Hf _{Gand} (m)
<i>1</i>	7,750	27,125	1189,0	0,030	0,063	0,11	0,49	7,15
<i>2</i>	13,125	45,940	2013,7	0,007	0,120	0,31	1,57	11,25
<i>3</i>	18,125	63,430	2780,3	0,009	0,175	0,59	3,17	14,37
<i>4</i>	13,750	48,120	2109,2	0,007	0,144	0,34	1,98	11,43

O recalque imediato, devido ao peso próprio, foi calculado utilizando-se o Módulo de Elasticidade médio dos ensaios igual a 1.732 kPa, dividindo-se a altura total da camada em dez subcamadas. O recalque de uma subcamada era calculado a partir de uma sobrecarga correspondente ao peso próprio da camada sobrejacente.

O recalque de Gandolla foi calculado para o tempo infinito (recalque final), utilizando-se valores de “a” obtidos da seguinte maneira. Para cada altura H₀ calculava-se a tensão vertical média na camada, considerando-se o peso específico igual a 7 KN/m³. Em seguida, para este nível de tensão nos ensaios realizados (Quadro 8), determinava-se o parâmetro “a” por interpolação, caso fosse necessário.

Na Figura 57 apresentam-se curvas mostrando a configuração aproximada da seção 4-4 antes e depois das deformações.

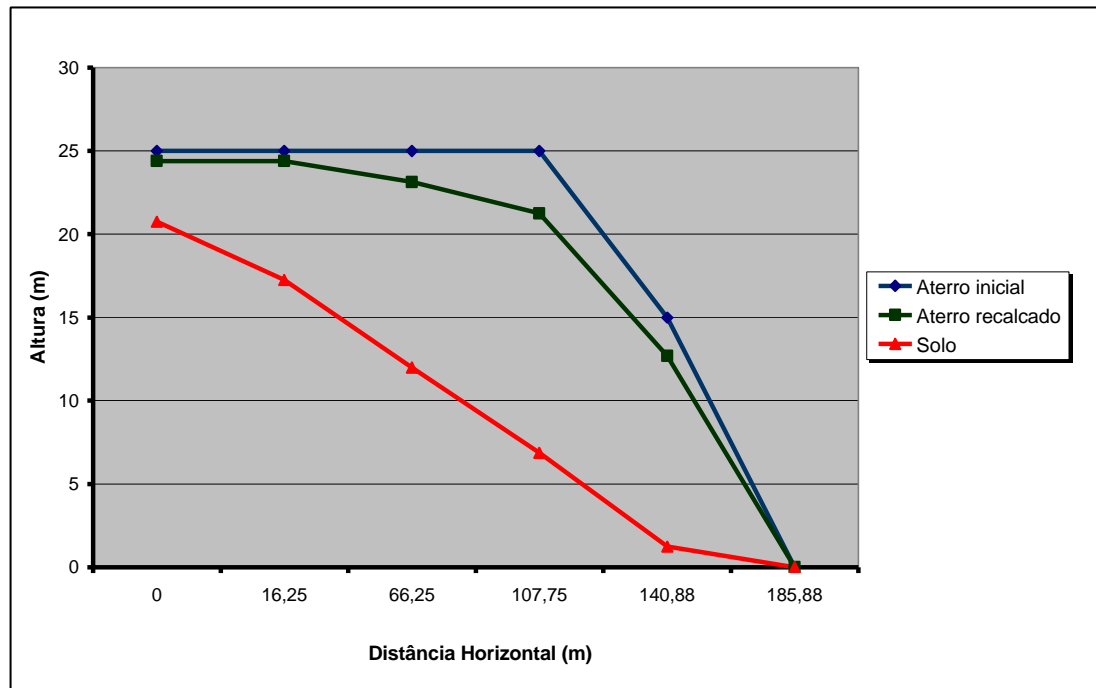


Figura 57 – Curva de previsões de recalques para a secção 4-4 (15 anos) utilizando-se o método de Gandolla somado ao recalque imediato de Sowers.

4.4.2 Utilizando o Modelo de Sowers

Na previsão dos recalques, devido ao peso próprio pelo método de Sowers também utilizou-se a equação 9.

Os recalques imediatos foram calculados da mesma maneira que no modelo anterior.

Os recalques primários foram calculados dividindo-se a camada em dez subcamadas e procedendo-se da seguinte maneira:

- Em cada subcamada calculava-se a tensão vertical no ponto correspondente à meia altura da camada, considerando-se o peso específico igual a 7 KN/m^3 .
- Em seguida, considerava-se como sobrecarga o peso da camada sobrejacente.
- Finalmente, calculam-se os recalques das subcamadas utilizando-se a equação 2 e o índice de compressão primário (C_c) igual a 0,16, todos

encontrados no início deste mesmo Capítulo. No Quadro 10 apresentam-se os recalques finais em quatro pontos (H₁, H₂, H₃ e H₄) da seção 4-4 do aterro sanitário de Viçosa-MG, sendo que os recalques finais são dados pela equação 10.

$$\Delta H_f = \Delta H_i + \Delta H_p \quad (\text{equação 10})$$

em que

ΔH_i = recalque imediato Sowers; e

ΔH_p = recalque primário Sowers.

Quadro 10 – Previsões dos recalques utilizando-se o Método de Sowers

Local	H _o (m)	s _v (Média) (kPa)	Carga (Kg)	DH _i (m)	DH _{Sow.} (m)	H _{f Sow.} (m)
1	7,750	27,125	1.189,0	0,11	0,72	7,03
2	13,125	45,940	2.013,7	0,31	1,53	11,59
3	18,125	63,430	2.780,3	0,59	2,27	15,85
4	13,750	48,120	2.109,2	0,34	1,62	12,13

Na Figura 58 são mostrados recalques no final de 15 anos, para o aterro Sanitário de Viçosa-MG, em quatro pontos da seção 4-4 pelo método de Sowers.

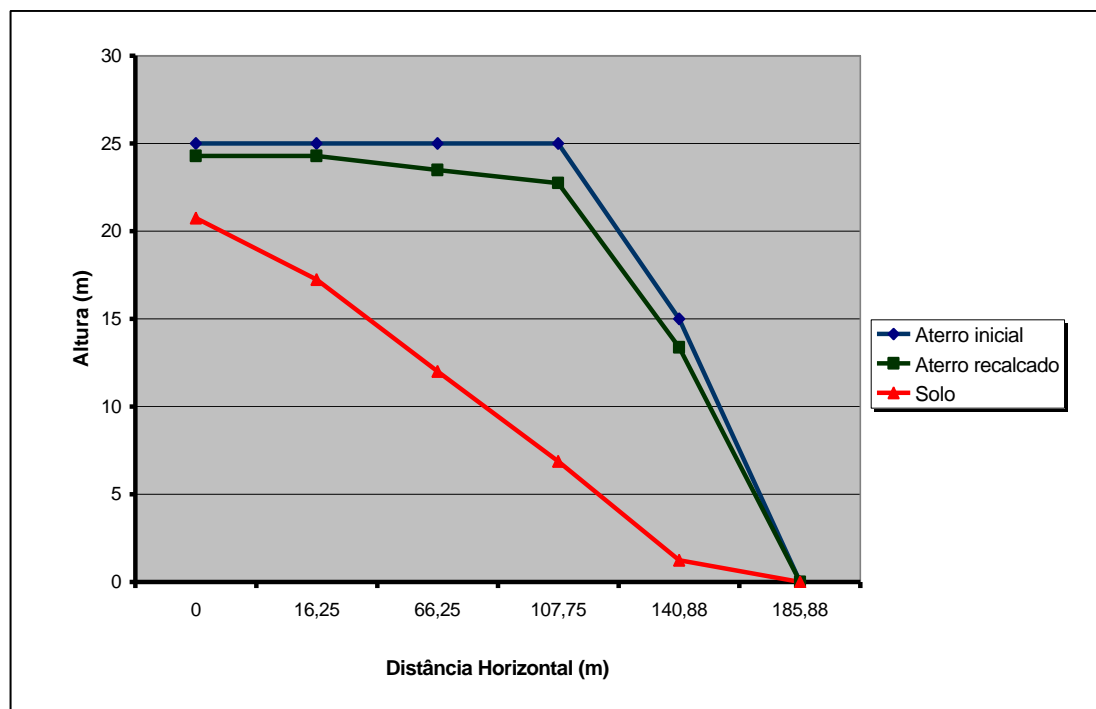


Figura 58 – Curva de previsões de recalques para a seção 4-4 utilizando o método de Sowers (15 anos).

Na Figura 59 apresenta-se uma análise comparativa das previsões de recalque para os modelos de Gandolla e Sowers (15 anos).

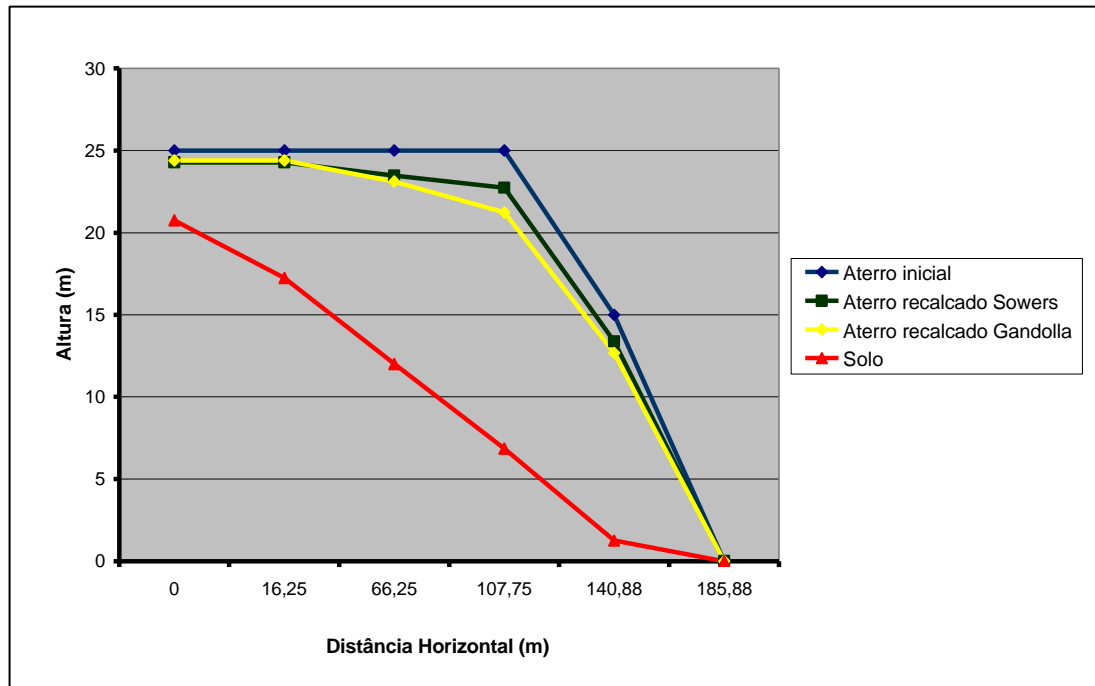


Figura 59 – Curva de previsões de recalques comparativa para a seção 4-4 utilizando os métodos de Sowers e Gandolla.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. Conclusões

Neste trabalho, procurou-se estudar compressibilidade em RSU. Para isso, foi desenvolvida uma célula de compressão confinada de grandes dimensões e realizados ensaios nos RSU do município de Viçosa-MG. Posteriormente, com as características de deformabilidade encontradas nos ensaios realizados, fez-se uma previsão dos recalques que ocorrerão no aterro sanitário de Viçosa.

As principais conclusões encontradas no trabalho foram as seguintes:

- O equipamento desenvolvido mostrou-se adequado e eficiente para determinação de características de deformabilidade de RSU.

- A variação dos recalques com o tempo proposta no Modelo de Gandolla (1992) e Sowers (1973) representou adequadamente os recalques observados nos ensaios realizados.

- As curvas carga-recalque obtidas nos dois ensaios foram muito próximas, apesar das diferenças nos teores de umidade inicial e na composição gravimétrica dos resíduos. Num dos ensaios, a quantidade de matéria orgânica era cerca de 50% maior que no outro. Isto evidencia que os recalques inicial e primário são pouco influenciados por estes dois fatores. É natural que a

quantidade de matéria orgânica influencie os recalques secundários devidos à biodegradação. Entretanto, devido ao limite de tempo inerente a uma tese de mestrado, estes recalques foram pouco significativos nos ensaios realizados.

- Os valores dos parâmetros de deformabilidade encontrados nos ensaios, índice de compressão, módulo de elasticidade e os parâmetros “a” e “k” de Gandolla (1992) ficaram dentro das faixas de valores encontradas em trabalhos anteriores.

- Os parâmetros k e a do modelo de Gandolla (1992), relacionados com a variação dos recalques com o tempo, variaram durante os ensaios. O parâmetro k variou em menor quantidade que o parâmetro a nas diversas etapas dos dois ensaios. Por outro lado, o parâmetro “a”, do mesmo modelo, relacionado com o recalque final, variou pouco entre os dois ensaios realizados, mas variou consideravelmente nas diferentes etapas de carregamento de cada ensaio.

- A variação do parâmetro “a” do modelo de Gandolla (1992), nos dois ensaios, foi crescente com as crescentes etapas de carregamento.

- As previsões de recalques numa seção transversal do aterro sanitário de Viçosa, feita com os modelos de Gandolla (1992) e Sowers (1973) deram resultados diferentes, sendo que com o modelo de Gandolla obtiveram-se recalques da ordem de 10 a 20% maiores que no modelo de Sowers.

- Os recalques totais (recalques imediatos mais primários) ficaram na faixa de 12% a 18% da espessura da camada RSU.

5.2. Sugestões

O desenvolvimento deste trabalho proporcionou apontar algumas sugestões para trabalhos futuros:

- No equipamento construído, a haste metálica, que transfere a carga do perfil metálico para a amostra de RSU, vai desnivelando-se à medida que os recalques vão ocorrendo. Por isso, durante os ensaios, são necessários descarregamentos para a colocação de novos calços rígidos entre a placa e a

rótula. Sugere-se confeccionar uma haste telescópica que possa variar seu comprimento (subindo todo o sistema de carga) sem que seja necessário fazerem-se descarregamentos nem se colocarem calços;

- Devido às limitações de tempo desta tese, as etapas de carregamento dos ensaios realizados tiveram uma duração curta. Sugere-se que carregamentos de maior duração sejam executados para que os recalques secundários possam ser melhor avaliados;

- As análises de recalques realizadas no aterro sanitário de Viçosa foram simplificadas e se restringiram a modelos uni-dimensionais;

- Sugere-se que análises bi ou tri-dimensionais, utilizando o método dos elementos finitos, sejam feitas;

- Normatizar as etapas de carregamento de acordo com o que se faz em provas de cargas em solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, R. C. de. **Compressibilidade de Maciços Sanitários**. São Paulo: Escola Politécnica de São Paulo. 2000, 241 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- ALMEIDA, L. L.; SIMÕES, G. F. Implementação Computacional de Modelos para Avaliação de Recalques em Aterros de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos. In: **XI SEMANA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFMG**. 2000. Belo Horizonte- MG. Resumo... Belo Horizonte – MG, p.1-1, 2000.
- AZEVEDO, R.F. **Relatório técnico sobre o aterro sanitário de Viçosa-MG**. 2002.
- BALERINI, C. Saneamento – Tratar o Lixo para Preservar o Planeta. **Revista Ecologia e Desenvolvimento**. Ed. 88, p1-4, 2000.
- BOSCOV, M. E. G., ABREU, R. C. de. Aterros Sanitários. In: **Previsão de Desempenho – Comportamento Real – Aterros Sanitários, Taludes, Túneis, Fundações, Aterros Sobre Solos Moles**. São Paulo: ABMS/NRSP, p. 7-44, 2000.
- CARVALHO, M. de F.; VILAR, O.M.; KAIMOTO, L. S. Estudo da Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos. 2003. 17 p. **REVISTA SOLOS E ROCHA**, São Paulo, vol. 23, n.1, p.3-19, Abril 2003.

- CARVALHO, M. F. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. São Carlos: Universidade de São Paulo 1999, 300p. Dissertação (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo- SP.
- CODUTO, D. P.; HUITRIC, R. Monitoring Landfill Movements Using Precise Instruments. In: **Geotechnics of Waste Fill – Theory and Practice**. Theory and Practice. Arvid Landva, David Krowles (Eds). ASTM STP 1070. p. 358-370. 1990.
- EDGERS, L.; NOBLE, J. J.; WILLIAMS, R. S. A Biologic Model for Long Term Settlement in Landfills. In: **Proceedings of Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology**. 1992. Turquia. Usmen & Acar(Eds) Balkeman, p. 177-184, 1992.
- ESPINORE, A; PALM, J. G, SZANTO, M. N. **La Geotecnia Ambiental Aplicada a los Vertederos Sanitarios** . 2003. 21 p. Disponível em <[icc.ucv.el/geotcnica/publica/cantabria. Doc](http://icc.ucv.el/geotcnica/publica/cantabria.Doc)>. Acesso em 29/03/2003.
- FARIAS, A . B. **Parâmetros de Compressibilidade em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos** – Recife: UFPE, 2000, 1p. Resumo da Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Disponível em <http://www.ufpe.ler/grs/textoresumos.htm> Acesso 03/03/2003.
- GANDOLLA, M.; ACAIA, C.; DECKA, I. Previsione dei Cedimenti della Superficie di una Discarica per RSU. In: **Proceedings ITALIAN – BRAZILIAN CONGRESS – III SIBESA** . 1996 Gramado, Brasil. Anais... p. 1-10, 1996
- GANDOLLA, M.; DUGNANI, L.; BRESSI, G.; ACAI, C. **The determination of subsidence effects at municipal solid waste disposal sites**. Proceedings of 6th International Solid Waste Congress and Exhibition, Madrid, p.1-17, 1992.
- GOMES, L. P.; CONCEIÇÃO, D. C. da; FLECK, A. **Avaliação dos Recalques em Sistemas Piloto de Aterramento de Resíduos Sólidos Urbanos**. Lixo Brasil. 1p. 2003. Disponível em <<http://www.pop-pe.rnp.br/lixobrasil/tra031.htm>>, Acesso em 28/03/2003.
- JUCÁ, J. F. T. **Diagnóstico de Resíduos Sólidos no Estado de Alagoas**. Maceió- AL. 2003. 48 p. (Relatório Técnico).
- JUCÁ, J. F. T., MONTEIRO; V. E. D., OLIVEIRA, F. J.S. de, MACIEL; F. J. Monitoramento Ambiental do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca. In: **IV CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNICA AMBIENTAL – REGEO'99** Anais... São José dos Campos –SP, p. 1-32, 1999.

- KAIMOTO, L. S. A; CEPOLINA, M. ABREU; R. C. de. Alguns Aspectos sobre Recalques e Deslocamentos Horizontais em Aterros Sanitários. In: **IV CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNICA AMBIENTAL – REGEO’99**. São José dos Campos – SP. Anais... São José dos Campos – SP, p. 462-465, 1999.
- LELIS, M. de P. N. Compostaje sobre Fraccion Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos, In. **SEMINÁRIO SOBRE COMPOSTAJE.2002**. Montevideo, Uruguay, PREDEG/GTZ-CEMPRE, p. 1-9, Noviembre/2002.
- LING, H. I., LESHCHINSKY, D., MOHRI, Y. & KAWABATA, T. **Estimation of municipal solid waste landfill settlement**. Journal of Geotechnics and Geoenvironmental Engineering. ASCE, vol. 124, nº 1, 1998, pp. 21-28.
- MACHADO, S. L., CARVALHO, M.F.; VILAR, O M. **Constitutive Model for Municipal Solid Waste**. Journal of Geoenvironmental Engineering. ASCE. V. 128. n. 11, p. 940 – 951. November 2002.
- MAHER, C. F. **Aspectos Gerais, Formas e Destinação e Características dos Resíduos Sólidos Urbanos e Especiais**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2000. 30p.
- MANASSERO, M.; VAN IMPE, W.F., BOVAZZA; A Waste Disposal and Containment In: **PROCEEDINGS, SECOND INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS**. 1996. Osaka, Japan. A.A.Balkema, Rotterdam, v.3, p.1425-1474, 1996.
- MARIANO,M.O.H. **Recalques no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca – PE**. Recife: UFPE, 1999, 98p. Dissertação (Mestrado de Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco – PE.
- MARIANO,M. O H.; JUCÁ, J. F. T. Monitoramento de Recalques no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca. In: **XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA**. 1998. Brasília – DF. Anais... vol. . Brasília – DF, p. 1671-1678, 1998.
- MELO, V. L.A de; JUCÁ, J. F. T. **Estudos Geotécnicos e Ambientais para Avaliação do Comportamento de Resíduos Sólidos Urbanos**. Recife:UFPE, 2002, 9p. (Relatório Técnico).
- PALMA, J. H. M. **Comportamiento Geotécnico de Vertedores Controlados de Residuos Sólidos Urbanos**, Santander, Espanha, 1995. pp. 286-396. Tese (Doutorado) – Universidade de Cantabria.
- PARK, J. Y.; BATCHELOR, B. General Chemical Equilibrium Model for Stabilized / Solidified Wastes. **Journal of Environmental Engineering**. ASCE. V. 128, n. 7, p. 653 – 661, July 2002.

- PASTORE, E. L.; SOUZA, N. M.; PEREIRA, J. H. F.; FRANCO, H. A.; SANTOS, P. C. V.; SILVA, A.R.L. Métodos de Investigação e Modelo Geológico – Geotécnico do Aterro de Lixo do Jóquei- Brasília/DF. In: **XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA**. 1998. Brasília – DF. *Anais...* vol. 3, Brasília – DF, p. 1767-1773. 1998.
- SANTOS, S. M. **Propriedades Geotécnicas de um Aterro de Resíduos Sólidos**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 1997, 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, PE.
- SIMÕES, G. F. **Modelo para Avaliação de Recalques em Aterros de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2000, 106 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – R.J.
- SOLER, N. D.; MAHER, A; CHAE, Y. S.; HAMIDI, A . A Conceptual Model for Transient Settlement in Waste fills. IN: **PROCEEDINGS UNSAT'95**. 1995. PARIS. Alonso & Delage (Ed). P. 411-416, 1995.
- SOWERS, G. F.; Settlement of Waste disposal Fills. In: **EIGHT INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING**. 1973. Moscow, URSS, v. 2, Part 2, p. 207-210, 1973.
- VAN MEERTEN, J. J.; SELLMEIJER, J. B.; PEREBOOM. D. Prediction of Landfill Settlements. In: **PROCEEDINGS OF 5th INTERNATIONAL LANDFILL SYMPOSIUM**. 1995, Sardinia' 95, P. 823-831, 1995.
- WALL, D.K.; ZEISS, C. Municipal Landfill Biodegradation and Settlement. **Journal of Environmental Engineering**. ASCE. v.121, n.3, p. 214-224, March 1996.
- YEN, B. C; SCALON, BC. Sanitary Landfill Settlement Rates. **Journal of Geotechnical Engineering Division**. ASCE. v. 101, 6t5, p. 475 – 487, 1975.
- ZIMMERMAN, RE; CHEN, W. W. H., FRANK A.G. Mathematical. Model for Solid Waste Settlement In: **Proceedings Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Material**. 1977. Michigan: Univ. of Michigan. ASCE, p. 210-226, 1977.