

ANDRÉ GERALDO CORNELIO RIBEIRO

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS POR MEIO DE RETRO-
ANÁLISES DE TESTES EM LABORATÓRIO**

Dissertação 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
2007

ANDRÉ GERALDO CORNELIO RIBEIRO

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS POR MEIO DE RETRO-
ANÁLISES DE TESTES EM LABORATÓRIO**

Dissertação 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: 20 de março de 2007.

Prof^a. Rejane Nascentes
(Co-orientador)

Prof^a. Izabel C. Duarte Azevedo
(Co-orientador)

Prof. Rodrigo Martins Reis

Prof. Orêncio Monje Vilar

Prof. Roberto Francisco de Azevedo
(Orientador)

*Tu, que habitais sob a proteção do Altíssimo,
que morais à sombra do Onipotente, dize ao Senhor: “Sois meu refúgio e
minha cidadela, meu Deus, em que eu confio”
(Salmo 90)*

*Ao meu irmão Ivan, que me mostrou o
verdadeiro significado da expressão
“Lutar pela vida”, e que sempre estará
no meu coração.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, a quem me dá força pra seguir vencendo as batalhas e dificuldades passageiras da vida.

Aos meus pais, Maria Heloisa e José Geraldo, a quem agradeço a Deus todos os dias por serem os pais maravilhosos e dedicados que são comigo e com meus irmãos e por não terem medido esforços para que eu chegasse até aqui.

Aos meus irmãos Ivan e Érica, que sempre me apoiaram nos momentos mais difíceis da minha vida, com amizade, amor e carinho.

À minha namorada Lindsay, a quem tenho um amor e carinho muito grande, estando sempre ao meu lado nos momentos de angústia, medo e dor e por todos os momentos que passamos juntos que me fizeram crescer em todos os sentidos.

À toda minha família, em especial a minha Vó Maria, pelas suas orações e incentivos mesmo a distância.

Aos amigos da república dos morangueiros, pela amizade e companheirismo compartilhado durante sete anos.

Ao grande amigo, incentivador, e a quem tenho um enorme respeito professor Roberto Francisco de Azevedo, pela paciência, pela confiança, a qual devo enfatizar que sem sua orientação, ajuda e colaboração essa pesquisa não teria seu sucesso desejado.

À Universidade Federal de Viçosa por me proporcionar a oportunidade de participar do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

À professora Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo, pela amizade, pelos ensinamentos, paciência e convivência.

Aos professores Rodrigo Martins Reis e Rejane Nascentes, pelos conselhos, incentivo e estímulo.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil, pelos ensinamentos ministrados no curso.

Aos laboratoristas do Departamento de Engenharia Civil, Paulo (Capelão) e Paulo (P3), pela presteza e amizade.

Enfim, a todos os colegas da graduação e da pós-graduação, que de uma maneira ou de outra, tiveram uma participação para que se realizasse este trabalho.

BIOGRAFIA

ANDRÉ GERALDO CORNELIO RIBEIRO, filho de Maria Heloisa Cornélio Ribeiro e José Geraldo de Paiva Ribeiro, nasceu em São Gonçalo do Sapucaí – MG, em 04 de novembro de 1981.

Em 1999, concluiu o segundo grau no Colégio Irmão Lucas (Objetivo), em São Gonçalo do Sapucaí - MG.

Graduou-se Engenheiro Civil, em janeiro de 2005, pela Universidade Federal de Viçosa.

Iniciou, em abril de 2005, o curso de Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.	x
RESUMO.	xv
ABSTRACT.	xvi

Capítulos	Páginas
1. INTRODUÇÃO.	01
1.1. Contexto geral.	01
1.2. Objetivos.	03
1.3. Organização da tese.	03
2. REVISÃO DE LITERATURA.	05
2.1. Introdução.	05
2.2. Propriedades físicas dos resíduos sólidos urbanos.	06
2.2.1 Teor de umidade dos RSU.	06
2.2.2 Peso específico dos RSU.	07
2.3. Teoria da capacidade de carga.	08
2.3.1. Método de equilíbrio limite.	10
2.4. Estudo da estabilidade de talude dos maciços de lixo.	15
2.4.1. Métodos de análises de estabilidade de taludes por equilíbrio limite.	16

2.4.1.1. Método de Bishop.	17
2.5. Parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos (RSU).	20
2.5.1. Parâmetros de resistência estimados por retro-análises.	21
2.5.2. Parâmetros de resistência estimados por ensaios <i>in situ</i>	22
2.5.3. Parâmetros de resistência estimados por ensaios de laboratório. .	24
3. MATERIAL E MÉTODOS.	27
3.1. Coleta e caracterização da amostra de Lixo.	27
3.2. Ensaio de prova de carga em RSU.	28
3.2.1. Descrição do equipamento.	28
3.2.2. Metodologia utilizada no ensaio.	32
3.2.3. Determinação do teor de umidade da amostra.	38
3.3. Ensaio de estabilidade de talude de RSU.	39
3.3.1. Descrição do equipamento desenvolvido.	39
3.3.2. Metodologia utilizada no ensaio.	43
3.3.3. Determinação do teor de umidade da amostra.	50
3.4. Cálculo dos parâmetros de resistência dos RSU.	50
3.4.1. Cálculo dos parâmetros através do ensaio de prova de carga.	50
3.4.2. Cálculo dos parâmetros através do ensaio de estabilidade de talude.	52
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.	56
4.1. Características das amostras ensaiadas.	56

4.2. Ensaio de capacidade de carga.	58
4.2.1. Primeiro ensaio ($\gamma = 7,0 \text{ kN/m}^3$).	58
4.2.2. Segundo ensaio ($\gamma = 5,0 \text{ kN/m}^3$).	69
4.2.3. Comparação entre os dois ensaios de prova de carga.	77
4.3. Ensaio de estabilidade de talude.	80
4.3.1. Ensaio com peso específico igual a 7 kN/m^3	80
4.3.2. Ensaio com peso específico igual a 5 kN/m^3	82
4.3.3. Comparação dos ensaios de estabilidade de talude.	85
4.4. Comparação dos parâmetros de resistência dos ensaios de prova de carga com os ensaios de estabilidade de talude.	87
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.	92
5.1. Conclusões.	92
5.2. Sugestões.	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	96

LISTA DE TABELAS.

Tabelas	Páginas
1 - Peso específico dos RSU segundo diversos autores.	08
2 - Equações para o cálculo de N_c e N_q , segundo PRANDTL (1921) e REISSNER (1924).	11
3 - Equações proposta por outros autores para o cálculo de N_γ	13
4 - Valores de N_γ em função de $k_{p\gamma}$, segundo BOWLES (1988).	13
5 - Fatores de forma, segundo TERZAGHI (1943) e DE BEER (1967). .	14
6 - Equações para cálculo dos fatores de capacidade de carga, segundo MEYERHOF (1951).	15
7 - Fatores de forma, profundidade e inclinação, segundo MEYERHOF (1951).	15
8 - Composição gravimétrica da amostra de lixo.	56
9 - Características das amostras de RSU submetidas aos ensaios nas manilhas de concreto.	57
10 - Características das amostras de RSU submetidas aos ensaios na caixa de madeira.	58
11 - Dados completos e acumulativos do 1º ensaio.	65
12 - Parâmetros de resistência obtidos no primeiro ensaio.	67
13 - Dados completos e acumulativos do 2º ensaio.	73
14 - Parâmetros de resistência obtidos no segundo ensaio.	75
15 - Parâmetros de resistência obtidos nos três primeiros ensaios.	81
16 - Parâmetros de resistência obtidos nos três últimos ensaios.	84
17 - Comprimentos L1 e L2 medidos nos ensaios.	85

LISTA DE FIGURAS.

Figuras	Páginas
1 - (A) Variação do Teor de Umidade dos RSU com a profundidade (apud CARVALHO, 1999); (B) Variação do Teor de Umidade dos RSU com a matéria orgânica. (LANDVA & CLARK, 1990).	07
2 - Mecanismos de ruptura em aterros sanitários. (SOWERS, 1968).	09
3 - Superfície de ruptura dividida em lamelas.	18
4 - Equilíbrio de força na direção vertical.	19
5 - (A) Envoltórias de ruptura de RSU obtidas por vários autores; (B) Comparação com a envoltória recomendada por AZEVEDO (2005).	20
6 - Parâmetros de resistência obtidos por retro-análises.	21
7 - Ensaio de SPT realizados por diversos autores. (apud CARVALHO, 1999).	22
8 - Ensaio de CPT realizados por diversos autores. (apud CARVALHO, 1999).	23
9 - Curvas tensão x deformação típicas dos RSU. (apud CARVALHO, 1999)	25
10 - Esquema do equipamento para o ensaio de prova de carga.	29
11 - Vista frontal do equipamento para realização dos ensaios.	30
12 - Enchimento da caixa para aplicação do peso estático.	30
13 - Detalhe do macaco hidráulico adaptado ao sistema de carga.	31
14 - Detalhe do eixo regulável de aplicação de carga.	31
15 - Compactação dos RSU na manilha.	32
16 - Cobertura dos resíduos após a compactação em camadas.	32

17 - Pesagem da brita para as etapas de carregamento.	34
18 - Vista geral do equipamento e do sistema de leitura dos recalques. .	35
19 - Detalhe do aparelho de nível de placas paralelas, da régua fixa na parede e do eixo de carregamento com papel milimetrado.	35
20 - Detalhe dos RSU durante o ensaio de capacidade de carga.	36
21 - Vista superior da sapata, mostrando a deformação dos resíduos. ...	37
22 - Detalhe da sapata durante o ensaio.	37
23 - Determinação da massa bruta úmida dos RSU.	38
24 - Amostras na estufa para determinação do teor de umidade dos RSU.	39
25 - Esquema do equipamento desenvolvido para realização da capacidade de carga em um talude de RSU.	40
26 - Detalhe da caixa de madeira com a parede removível.	40
27 - Vista geral do equipamento para realização dos ensaios.	41
28 - Detalhe do sistema de aplicação de carga do ensaio.	42
29 - Mistura e pesagem dos resíduos.	44
30 - Compactação dos RSU na em camadas.	44
31 - Detalhe do equipamento após a compactação dos RSU.	45
32 - Relógios medidores de deslocamentos apoiados na sapata.	46
33 - Amostra sendo misturada e espalhada para secagem.	47
34 - Observações feitas durante os ensaios.	48
35 - Detalhe da ruptura em todos os ensaios.	49
36 - Vista aproximada da sapata.	51
37 - Esquema para calcular a superfície de ruptura.	53

38 - Especificação das coordenadas e do carregamento no programa GEO-SLOPE.	54
39 - Cálculo do ângulo de atrito por tentativas.	55
40 - Superfície de ruptura para fator de segurança $F = 1$	55
41 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 6,10 kN).	59
42 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 8,42 kN).	59
43 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 10,74 kN).	60
44 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 13,06 kN).	60
45 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 15,38 kN).	61
46 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 17,70 kN).	61
47 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 20,02 kN).	62
48 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 22,34 kN).	62
49 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 24,66 kN).	63
50 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 26,98 kN).	63
51 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) do 1° ensaio ($\gamma = 7,0 \text{ kN/m}^3$).	64
52 - Curva tensão (kPa) <i>versus</i> deformação (%) do 1° ensaio.	66
53 - Parâmetros de resistência em função da deformação obtida no 1° ensaio.	68
54 - Parâmetros de resistência em função de quatro níveis de deformação (1° ensaio – $\gamma = 7 \text{ kN/m}^3$).	69
55 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 6,10 kN).	70
56 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 8,42 kN).	70
57 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 10,74 kN).	71
58 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 13,06 kN).	71

59 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 15,38 kN).	72
60 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) (carga = 17,70 kN).	72
61 - Curva recalque (mm) <i>versus</i> tempo (min) do 2° ensaio ($\gamma = 5,0 \text{ kN/m}^3$).	73
62 - Curva tensão (kPa) <i>versus</i> deformação (%) do 2° ensaio.	73
63 - Parâmetros de resistência em função da deformação obtida no 2° ensaio.	76
64 - Parâmetros de Resistência em função de dois níveis de deformação.	77
65 - Comparação entre as curvas recalque <i>versus</i> tempo, obtida nos dois ensaios.	78
66 - Comparação entre as curvas tensão <i>versus</i> deformação obtida nos dois ensaios.	78
67 - Comparação entre os parâmetros de resistência em função da deformação e do peso específico dos RSU.	79
68 - Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento em função do teor de umidade ($\gamma =$ 7 kN/m^3).	80
69 - Parâmetros de resistência em função do teor de umidade ($\gamma = 7 \text{ kN/m}^3$).	82
70 - Curvas tensão <i>versus</i> deslocamento em função do teor de umidade ($\gamma =$ 5 kN/m^3).	83
71 - Parâmetros de resistência em função do teor de umidade ($\gamma = 5 \text{ kN/m}^3$).	84
72 - Comparação entre as curvas tensão <i>versus</i> deslocamento.	86
73 - Comparação entre parâmetros de resistência calculados.	87

74 - Extrapolação dos parâmetros obtidos para $w = 90\%$ ($\gamma = 7 \text{ kN/m}^3$). .	88
75 - Comparação dos parâmetros de resistência calculados nos dois tipos de ensaio ($\gamma = 7 \text{ kN/m}^3$).	89
76 - Extrapolação dos parâmetros obtidos para $w = 90\%$ ($\gamma = 5 \text{ kN/m}^3$). .	90
77 - Comparação dos parâmetros de resistência calculados nos dois tipos de ensaio ($\gamma = 5 \text{ kN/m}^3$).	91

RESUMO

RIBEIRO, André Geraldo Cornelio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2006. **Determinação de parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de retro-análises de testes em laboratório.** Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Co-Orientadores: Rejane Nascentes e Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo.

A escassez de áreas para disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem aumentado a cada ano, devido ao grande volume de lixo gerado diariamente. Em função disso, frequentemente, é necessário aumentar a capacidade de aterros sanitários já existentes, ou dispor resíduos em aterros já encerrados. Dessa maneira, taludes de lixo cada vez maiores, têm sido comuns nos aterros sanitários, levando os projetistas a se preocuparem mais com a estabilidade desses taludes. Assim, é de grande importância conhecer, além de outras propriedades mecânicas, os parâmetros de resistência dos RSU, essenciais para análises de estabilidade de talude. Neste sentido, o presente trabalho trata da determinação dos parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos, através de retro-análises de ensaios de grandes dimensões. Inicialmente, é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre o tema. Em seguida, são descritas as duas metodologias utilizadas para a determinação dos parâmetros. Primeiramente, realizaram-se ensaios de prova de carga em uma sapata apoiada em RSU dispostos em manilhas de concreto, com cerca de 1,6 m de altura e 1,0 m de diâmetro. Além disso, foram realizadas provas de carga em taludes de lixo feitos dentro de uma caixa de madeira, com cerca de 0,8 m de altura, 0,8 m de largura e 0,8 m de comprimento. Os resultados dos ensaios nas manilhas e na caixa de madeira são apresentados e discutidos. Por fim, entre as principais conclusões, destacam-se a dependência dos parâmetros de resistência com o peso específico e a umidade dos resíduos, e os valores dos parâmetros de resistência recomendados em análises de estabilidade de taludes.

ABSTRACT

RIBEIRO, André Geraldo Cornelio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2006. **Determination of municipal solid waste strength parameters using back analyses of laboratory tests.** Adviser: Roberto Francisco de Azevedo. Co-Advisers: Rejane Nascentes and Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo.

The shortage of areas for municipal solid waste (MSW) disposition has been increasing every year, due to the great garbage volume generated daily. As a result it is necessary, frequently, to increase the storage capacity of existing landfills, or to dispose MSW in landfills already closed. Therefore, MSW slopes progressively higher have been used in sanitary landfills, worrying the design engineers with the stability of these slopes. Thus, it is of great importance to know, besides other mechanical properties, the strength parameters of MSW, which are essential for slope stability analyses. In this sense, the present work deals with the determination of municipal solid waste strength parameters, using large dimension tests. Initially, a short bibliographical revision on the subject is presented. Afterwards, it is described the two methodologies used for the parameters determination. First, a loading capacity tests were realized with a footing over MSW placed on concrete drainpipes having about 1,6 m of height and 1,0 m of diameter. Following, loading capacity tests were executed in vertical MSW slopes placed in a wood box with about 0,8 m of height, 0,8 m of width and 0,8 m of length. Finally, test results in the drainpipes and in the wood box are shown and discussed. The main conclusions are the influence of the MSW water content and specific weight in the strength parameters, and the recommended strength parameters values to be used in slope stability analysis.

1- INTRODUÇÃO

1.1 – Contexto geral

O lixo urbano é um problema crônico em virtude do grande volume gerado diariamente. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, realizada no ano de 2000 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2002) revelou que dos 5507 municípios brasileiros, 63,6% utilizam lixões como destino final do lixo, enquanto 18,4% utilizam aterros controlados e somente 13,8% possuem aterros sanitários. Em termos de massa, ainda segundo o IBGE (2002), das 125281 toneladas de lixo coletadas diariamente no Brasil em 2000, 47,1% eram destinadas a aterros sanitários, 22,3% a aterros controlados e 30,5% a lixões. Ou seja, tanto em relação aos municípios, quanto em relação à massa, a maioria dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados no Brasil ainda não tem uma destinação sanitária e ambiental adequada.

No Estado de Minas Gerais, apenas oito dos mais de quinhentos municípios possuem aterro sanitário licenciado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM): Belo Horizonte, Betim, Contagem, Extrema, Ipatinga, Paracatu, Uberlândia e Visconde do Rio Branco.

Esses dados mostram uma situação de grande relevância, na medida em que o lixo não coletado ou disposto de forma inadequada, acaba por propiciar a proliferação de vetores de doenças, bem como contaminar o solo ou corpos d'água, trazendo sérias conseqüências para a saúde de nossa população.

A forma tradicional de tratamento de lixo empregada no Brasil é através de aterros sanitários que, segundo vários especialistas, são uma forma aceitável, desde que seja bem gerenciada.

O aterro sanitário é considerado uma obra de engenharia, que exige um projeto de execução cuja técnica consiste, basicamente, das seguintes etapas: desmatamento do terreno em que se irá depositar o lixo com revestimento de fundo, para evitar a contaminação do subsolo e das águas

subterrâneas; drenagem das nascentes, captação e tratamento de chorume; depósito dos resíduos em camadas compactadas com trator de esteira, formando-se células de lixo; recobrimento das células de lixo com solo ao término de cada dia de trabalho para evitar problemas de erosão, mau odor e insetos; sistema de coletas de líquidos percolados e de gases gerados, oriundos da degradação da matéria orgânica; lagoas de tratamento do chorume; construção de infra-estruturas e serviços de vigilância para o controle da quantidade de lixos dispostos nos aterros (PRODAM, 1999).

A Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), através da Deliberação Normativa COPAM N° 52/2001, estabeleceu prazos para que todos os municípios mineiros desenvolvessem projetos adequados de destinação final dos seus RSU.

No entanto, segundo OLIVEIRA (2002), fica cada vez mais difícil encontrar novas áreas adequadas, próximas aos centros geradores, devido às regulamentações ambientais restritivas para este tipo de obras, além da grande resistência por parte da população na aceitação de depósitos de resíduos próximos às residências, induzindo assim, a necessidade da otimização da capacidade dos locais já em operação.

Para tentar solucionar esse problema, tem-se construído aterros cada vez mais altos, o que se, por um lado, ameniza o problema da demanda de lixo e conseqüente escassez de áreas para sua disposição, por outro, gera aos projetistas uma preocupação maior em relação à estabilidade desses taludes cada vez maiores.

Devido a isso, faz-se necessário conhecer nos projetos de aterros sanitários, dentre outras propriedades mecânicas, a resistência dos resíduos que, evidentemente, é fundamental em estudos de estabilidade dos taludes do aterro.

Vale ainda ressaltar que os projetos de construção de aterros sanitários no Brasil têm sido caracterizados pela adoção de critérios e parâmetros de projetos “importados”, ou seja, baseados na literatura internacional. Assim torna-se necessário validar estes parâmetros para o tipo de resíduo local, pois as propriedades mecânicas do mesmo variam com sua composição, teor de umidade, etc. (OLIVEIRA, 2002).

1.2 – Objetivos

Em vista do exposto anterior, o objetivo desse trabalho foi determinar os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) dos resíduos sólidos urbanos coletados na cidade de Viçosa-MG, através de ensaios realizados em manilhas de concreto (ensaio de prova de carga), em que se variou o peso específico dos resíduos, e através de ensaios realizados numa caixa de madeira (ensaio de estabilidade de talude), nos quais se buscou variar além do peso específico, o teor de umidade dos resíduos sólidos urbanos.

Dessa forma considera-se que essa pesquisa poderá contribuir positivamente nas ações municipais, em termos de promover e premiar o bom gerenciamento dos resíduos, estudando alternativas para aumentar a vida útil do aterro, evitando a disposição inadequada dos resíduos e preservando a qualidade dos recursos naturais.

1.3 – Organização da tese

A presente dissertação foi organizada em capítulos, da seguinte maneira:

- No **CAPÍTULO 1**, fez-se uma introdução procurando apresentar a relevância do problema de disposição final dos resíduos no Brasil, bem como a importância do estudo dos parâmetros de resistência para os projetos de aterros sanitários. Nesse capítulo são apresentados, também, os principais objetivos dessa pesquisa.
- No **CAPÍTULO 2** apresenta-se uma revisão da literatura disponível para o assunto abordado nesse trabalho, com ênfase nos ensaios já realizados para determinação dos parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos.
- No **CAPÍTULO 3**, discute-se a metodologia do trabalho, que foi subdividida em quatro etapas: realização da coleta e procedimento

para a caracterização do lixo; construção do equipamento de carga e procedimento para os ensaios de prova de carga; construção do equipamento de carga e procedimento para os ensaios de estabilidade de talude; cálculo dos parâmetros de resistência, coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) dos resíduos sólidos urbanos, com base nos resultados encontrados nos ensaios realizados nos dois equipamentos.

- Após a descrição dos ensaios, são apresentados e discutidos no **CAPÍTULO 4** os resultados encontrados, bem como uma comparação entre as duas metodologias utilizadas.
- Por fim, no **CAPÍTULO 5**, são apresentadas as principais conclusões e sugestões para novas pesquisas.

São apresentadas também as referências bibliográficas utilizadas, que serviram como subsídio para as informações contidas nesta dissertação.

2- REVISÃO DE LITERATURA

2.1 – Introdução

Nos últimos anos, a escassez de áreas para destinação final dos resíduos sólidos urbanos (RSU), tem sido uma grande preocupação para a maioria dos municípios brasileiros. A cidade de Belo Horizonte, que destina cerca de quatro mil toneladas de lixo diariamente para seu aterro sanitário, está passando por esse problema, pois a prefeitura ainda não definiu para onde irá destinar seus resíduos, apesar da capacidade do aterro em operação já estar praticamente esgotada. Segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), a vida útil do aterro sanitário da capital mineira vai até meados deste ano (2007). O aterro ocupa 140 hectares junto à BR-040 e funciona desde 1975. A FEAM estuda a proposta da prefeitura de ampliar a cota de lixo do aterro - que passaria de 930 para 935 metros acima do nível do mar.

Atualmente, é cada vez mais difícil encontrar novas áreas adequadas, próximas aos centros geradores, contribuindo para isso a grande resistência por parte da população na aceitação de depósitos de resíduos urbanos próximos às residências.

Dessa forma tem sido comum a tentativa de solucionar esse problema aumentando-se a capacidade de deposição dos locais já em operação ou reutilizando-se locais antigos encerrados. Os novos projetos e os projetos de alteamento de aterros sanitários existentes têm sido desenvolvidos com alturas sem precedentes. (OLIVEIRA, 2002).

Ainda, segundo OLIVEIRA (2002), essa situação tem levado diversos geotécnicos a avaliar a estabilidade de taludes dos maciços dos aterros sanitários e a resistência dos RSU. Como resultado, tem-se publicações diversas que apresentam dados muitas vezes contraditórios. Isso acontece devido à complexidade e heterogeneidade da estrutura do RSU e a dificuldade de se adaptar métodos e equipamentos convencionalmente usados na Mecânica dos Solos, tanto de laboratório quanto de campo, para

estudar RSU. Assim, questões básicas sobre o valor da resistência dos resíduos e sobre a aplicabilidade de certas técnicas de análise de estabilidade, comuns na geotecnia clássica, ainda permanecem.

2.2 – Propriedades físicas dos resíduos sólidos urbanos

Serão abordados, neste item, apenas o teor de umidade e o peso específico dos resíduos, uma vez que no presente trabalho variou-se essas duas propriedades para determinação dos parâmetros de resistência dos RSU.

2.2.1 – Teor de umidade dos RSU

O teor de umidade dos RSU depende de vários fatores, entre eles pode-se citar: sua composição inicial, as condições climáticas, procedimentos operacionais, a taxa de decomposição biológica, além do desempenho do sistema de coleta de gás e de chorume.

A determinação da umidade é realizada pelos métodos usuais da engenharia geotécnica, ou seja, com base no peso seco da amostra, onde a temperatura da estufa deve ser de no máximo 70°C para evitar a queima de matéria orgânica.

Segundo OLIVEIRA (2002), outra umidade bastante utilizada na área ambiental é a umidade volumétrica (q_w) que é determinada em função dos volumes de água e sólidos em vez dos pesos. No entanto alguns autores propõem a determinação da umidade dos resíduos sólidos urbanos com base no peso úmido da amostra, obtendo-se a relação com umidade com base seca, como mostra a equação (2.1).

$$w_{\text{búmida}} = \frac{w}{(1-w)} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Nesse trabalho, a determinação do teor de umidade dos resíduos, foi feita com base no peso seco da amostra.

JUCÁ *et al* (1997), através de ensaios SPT no aterro da Muribeca - PE obteve teores de umidades em profundidade variando entre 20% a 50%. Diversos valores são apresentados na literatura, variando principalmente com a profundidade (Figura 1A). Segundo LANDVA & CLARK (1990) o teor de umidade tende, em geral, aumentar com o aumento do teor de matéria orgânica (Figura 1B).

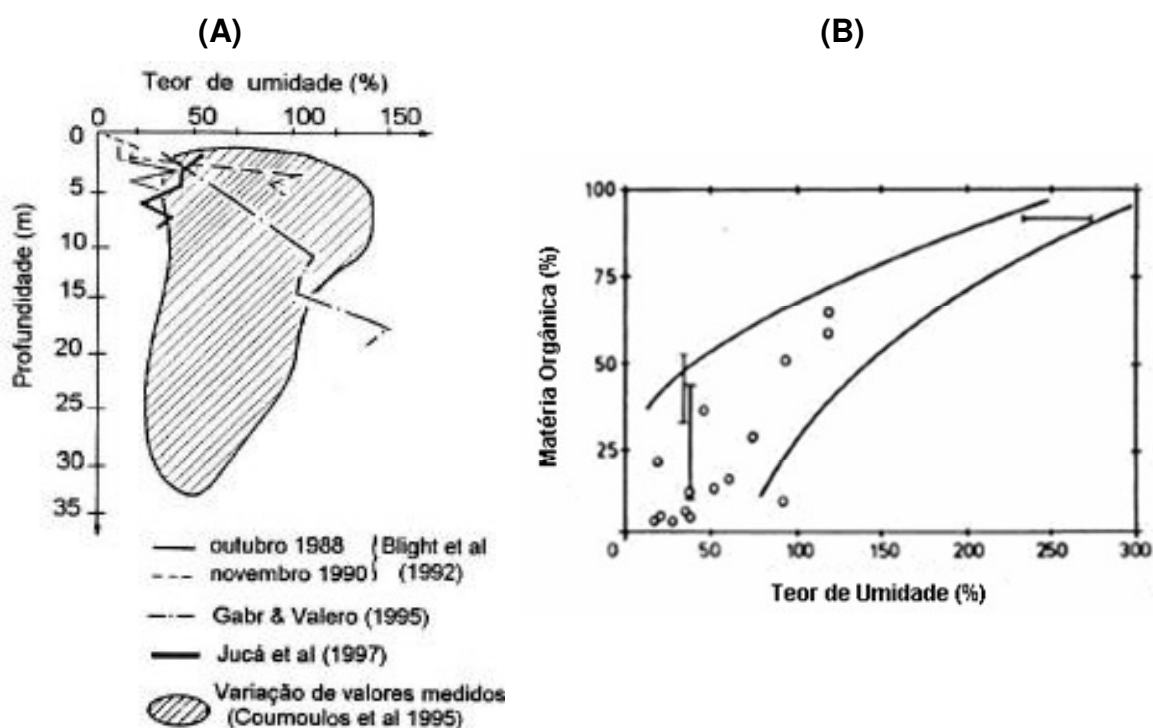


Figura 1 – (A) Variação do Teor de Umidade dos RSU com a profundidade (apud CARVALHO, 1999); (B) Variação do Teor de Umidade dos RSU com a matéria orgânica. (LANDVA & CLARK, 1990).

2.2.2 – Peso específico dos RSU

Assim como o teor de umidade, o peso específico dos resíduos depende de diversos fatores, entre eles pode-se citar: composição do

resíduo, volume da cobertura diária e grau de compactação durante a deposição.

Várias técnicas podem ser usadas para a determinação do peso específico *in situ*, dentre elas, poços (2 a 4m de profundidade) ou trincheira e radiação gama. Os ensaios em poços consistem na pesagem do material e determinação do volume a partir do preenchimento da cava (em geral com água) devidamente impermeabilizada com manta sintética. Não existem métodos precisos. (OLIVEIRA, 2002)

Diversos valores de peso específico dos RSU são apresentados na literatura. Na Tabela 1, ENGECORPS (1996) apresenta valores de peso específico dos resíduos sólidos urbanos em função do grau de compactação segundo diversos autores.

Tabela 1 – Peso específico dos RSU segundo diversos autores.

Descrição	Peso específico (kN/m ³)	Autor
RSU não compactado	2,4 a 2,7	Merz, R.C. (1962)
RSU medianamente compactado	4,7 a 6,3	Owers (1993)
RSU bem compactado	8,6 a 9,4	Owers (1993)
RSU bem compactado	7,0 a 14,0	Landva, A.O. (1990)
RSU bem compactado	8,0 a 12,0	Sowers (1968)
RSU enfardado	8,6 a 14,1	Owers (1993)

Fonte: ENGECORPS (1996).

2.3 – Teoria da capacidade de carga

O reaproveitamento das áreas de aterros sanitários após seu fechamento, tem sido muito estudado ultimamente por vários pesquisadores.

No entanto, esse interesse, induz a necessidade de um maior conhecimento da capacidade de carga dos maciços de RSU.

OLIVEIRA (2002) relata que a capacidade de carga dos aterros sanitários é geralmente reduzida, e depende de fatores como espessura de solo de cobertura, métodos construtivos, composição e densidade dos resíduos.

De acordo com SOWERS (1968), dentre os fatores citados por OLIVEIRA (2002), o mais significativo é a espessura relativa do solo de cobertura sobre os resíduos. O autor apresenta dois mecanismos clássicos de ruptura em aterros sanitários. Segundo SOWERS (1968), o primeiro ocorre quando se tem resíduos muito compressíveis, carregamentos pequenos e camadas de cobertura relativamente espessas, levando assim a ruptura por punção. O segundo mecanismo é o rotacional, mecanismo clássico de capacidade de carga em solos, no qual os resíduos apresentam resistência e compressibilidade semelhante a de solos, apesar de maiores. Na Figura 2, apresentam-se os dois mecanismos apresentados por SOWERS (1968).

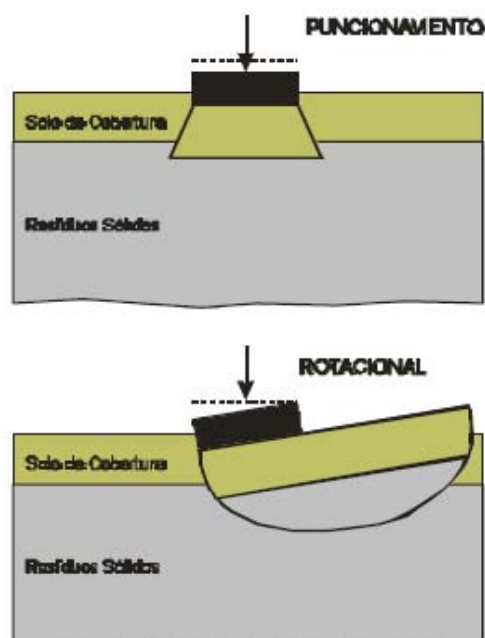


Figura 2 – Mecanismos de ruptura em aterros sanitários (SOWERS, 1968).

No entanto, para melhor compreensão do estudo da capacidade de carga em resíduos sólidos urbanos, serão apresentados alguns conceitos e métodos de capacidade de carga em solos, muito utilizados na engenharia de fundações. Vale ressaltar, que a aplicação de métodos clássicos de solos deve ser feita com precaução, tendo-se em mente as características específicas dos resíduos urbanos.

Segundo TERZAGHI (1943), capacidade de carga ou suporte (q_u) de um solo é a máxima carga que o solo suporta antes do início do escoamento plástico. A partir de um dado incremento de carregamento, o solo passa gradualmente para um estado plástico de equilíbrio.

LOPES (1997) relata em seu trabalho os seguintes métodos para avaliar a capacidade de carga de um solo:

- Métodos analíticos:
 - Método de equilíbrio-limite (TERZAGHI, 1943);
 - Método de análise-limite (DRUCKER *et al*, 1952);
 - Método das linhas de escoamento (SOKOLOVSKY, 1960);
 - Teoria da expansão de cavidade cilíndrica e esférica.
- Métodos empíricos.
 - Correlação com SPT

Nesse trabalho adotou-se somente a análise pelo método de equilíbrio-limite de TERZAGHI (1943), pois se trata do método mais utilizado na prática da engenharia de fundações.

2.3.1 – Método de equilíbrio-limite

Com base na teoria do equilíbrio limite, vários autores desenvolveram equações para o cálculo da capacidade de carga em solos. Nesse trabalho, serão apresentadas algumas dessas equações usadas para o cálculo dos parâmetros de resistência dos RSU, com base nos resultados obtidos com os ensaios de capacidade de carga.

A primeira equação de capacidade suporte foi determinada por PRANDTL (1921) e REISSNER (1924), em que se admitiu a variável sobrecarga, e se impôs condições e restrições ao problema.

$$q_u = c.N_c + q.N_q \quad (2.2)$$

em que N_c e N_q são fatores de capacidade de carga, em virtude da coesão e da sobrecarga, respectivamente.

Tabela 2 – Equações para o cálculo de N_c e N_q , segundo PRANDTL (1921) e REISSNER (1924).

PRANDTL (1921)	REISSNER (1924)
$N_c = \cot \phi \cdot \left[e^{\pi \tan \phi} \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right]$ <p>para $\phi \neq 0$</p>	$N_q = e^{\pi \tan \phi} \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$
$N_c = 5,14$ <p>para $\phi = 0$</p>	$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi$

TERZAGHI (1943) estendeu a teoria de ruptura plástica de PRANDTL (1921), para determinação da capacidade de carga de um solo sob uma fundação superficial corrida, ou seja, no estado plano de deformação ($L \gg B$), onde L é o comprimento da fundação e B a largura.

O autor considerou uma fundação com superfície de base rugosa, apoiada a uma profundidade D_f , com uma sobrecarga $\bar{q} = \gamma D_f$, e desprezava a resistência ao cisalhamento do solo acima do nível de apoio da fundação, tendo considerado ainda ruptura do tipo geral. Obteve, assim, a seguinte equação para determinar a capacidade de carga do solo:

$$q_u = c.N_c + \bar{q}.N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma.B.N_\gamma \quad (2.3)$$

em que N_c , N_q e N_γ são fatores de capacidade de carga, em virtude, respectivamente, da coesão, da sobrecarga e do solo.

Segundo TERZAGHI (1943), as equações para os fatores de capacidade de carga em virtude dos parâmetros citados anteriormente são:

$$N_c = \cot \phi \cdot \left[\frac{\left(e^{\left(\frac{3}{4} \pi - \frac{\phi}{2} \right) \cdot \tan \phi} \right)^2}{2 \cdot \cos^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)} - 1 \right] \quad (2.4)$$

$$N_q = \frac{\left(e^{\left(\frac{3}{4} \pi - \frac{\phi}{2} \right) \cdot \tan \phi} \right)^2}{2 \cdot \cos^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)} \quad (2.5)$$

$$N_\gamma = \frac{\tan \phi}{2} \cdot \left(\frac{k_{p\gamma}}{\cos^2 \phi} - 1 \right) \quad (2.6)$$

Sendo $k_{p\gamma}$ o coeficiente de empuxo de terra passivo, segundo a teoria de Rankine, para $c = 0$, $q = 0$, $\alpha = 180 - \phi$ e $\delta = \phi$ (ângulo de atrito solo/muro por Rankine).

BOWLES (1988) apresentou valores de N_γ em função de $k_{p\gamma}$ (Tabela 4), para o intervalo de $\phi = 0^\circ$ a 50° .

Além de TERZAGHI (1943), outros autores como CAQUOT e KÉRISSEL (1953), LUNDGREN e MORTENSEN (1953), FEDA (1961), também definiram fórmulas empíricas para a determinação do fator de capacidade de carga N_γ (Tabela 3).

Tabela 3 – Equações propostas por outros autores para o cálculo de N_γ .

$N_\gamma \cong 2.(N_q + 1). \tan \phi$	CAQUOT e KÉRISEL, 1953.
$N_\gamma \cong 1,5.(N_q + 1). \tan \phi$	LUNDGREN e MORTENSEN, 1953.
$N_\gamma \cong 0,01.(e^{0,25.\phi})$	FEDA, 1961.

Tabela 4 – Valores de N_γ em função de $k_{p\gamma}$, segundo BOWLES (1988).

ϕ (°)	N_γ	$k_{p\gamma}$
0	0,00	10,80
5	0,50	12,20
10	1,20	14,70
15	2,50	18,60
20	5,00	25,00
25	9,70	35,00
30	19,70	52,00
34	36,00	-
35	42,40	82,00
40	100,40	141,00
45	297,50	298,00
48	780,10	-
50	1153,20	800,00

Fonte: LOPES (1970).

TERZAGHI (1943) propôs para solos com ruptura local, a utilização da equação 2.3, no entanto, com valores de ϕ e c minorados de 2/3.

$$\bar{c} = \frac{2}{3}.c = 0,67.c \quad (2.7)$$

$$\tan \bar{\phi} = \frac{2}{3}.\tan \phi = 0,67.\tan \phi \quad (2.8)$$

DE BEER (1967) propôs o acréscimo de fatores de forma à equação de TERZAGHI (1943). Na Tabela 5 são apresentados os fatores de forma propostos por DE BEER (1967), bem como os valores propostos por TERZAGHI (1943).

Tabela 5 – Fatores de forma, segundo TERZAGHI (1943) e DE BEER (1967).

SAPATA	S_c	S_c^*	S_q	S_q^*	S_γ	S_γ^*
Corrida	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Retangular	$1 + \frac{B}{L} \cdot \frac{N_q}{N_c}$	1,3	$1 + \frac{B}{L} \cdot \tan \phi$	1,0	$1 - 0,4 \cdot \frac{B}{L}$	0,8
Circular ou quadrada	$1 + \frac{N_q}{N_c}$	1,3	$1 + \tan \phi$	1,0	0,6	0,6

*Fatores de forma segundo TERZAGHI (1943).

MEYERHOF (1951) obteve uma equação semelhante à de TERZAGHI, uma vez que os fatores de capacidade de carga (Tabela 6) foram obtidos também em razão da profundidade de assentamento, forma da fundação, rugosidade da base da fundação e inclinação da carga aplicada (Tabela 7).

$$q_u = c \cdot N_c \cdot S_c \cdot d_c \cdot i_c + \bar{q} \cdot N_q \cdot S_q \cdot d_q \cdot i_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \quad (2.9)$$

em que:

N_c , N_q e N_γ = fatores de capacidade de carga;

S_c , S_q e S_γ = fatores de forma;

d_c , d_q e d_γ = fatores de profundidade de embutimento;

i_c , i_q e i_γ = fatores de inclinação da carga;

\bar{q} = sobrecarga = $\gamma \cdot D_f$;

B = menor dimensão da fundação;

c = coesão.

Tabela 6 – Equações para cálculo dos fatores de capacidade de carga, segundo MEYERHOF (1951).

$N_q = e^{\pi \tan \phi} \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$	PRANDTL, 1921 e REISSNER, 1924.
$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi$	PRANDTL, 1921 e REISSNER, 1924.
$N_\gamma = (N_q - 1) \cdot \tan(1,4 \cdot \phi)$	

Tabela 7 – Fatores de forma, profundidade e inclinação, segundo MEYERHOF (1951).

Condição	Fator de forma	Fator de profundidade	Fator de inclinação da carga
Qualquer ϕ	$S_c = 1 + 0,2 \cdot K_p \cdot \frac{B}{L}$	$d_c = 1 + 0,2 \cdot \sqrt{k_p \cdot \frac{D}{B}}$	$i_c = i_q = \left(1 - \frac{\theta^\circ}{90^\circ} \right)^2$
$\phi > 10^\circ$	$S_q = S_\gamma = 1 + 0,1 \cdot K_p \cdot \frac{B}{L}$	$d_q = d_\gamma = 1 + 0,1 \cdot \sqrt{k_p \cdot \frac{D}{B}}$	$i_\gamma = \left(1 - \frac{\theta^\circ}{\phi^\circ} \right)^2$
$\phi = 0^\circ$	$S_q = S_\gamma = 1$	$d_q = d_\gamma = 1$	$i_\gamma = 0$

em que:

$k_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$ = coeficiente de empuxo de terra passivo;

θ = ângulo que a força resultante faz com a vertical;

B, L e D = geometria da fundação, previamente definida.

2.4 – Estudo da estabilidade de talude dos maciços de lixo

Entre alguns trabalhos relacionados ao estudo da estabilidade de taludes de lixo, destaca-se o de OLIVEIRA (2002), que sugere geometrias

para taludes de aterros sanitários com base em estudos do comportamento mecânico da estrutura dos maciços de lixo e determinação de parâmetros de resistência por meio de ensaios de campo, como sondagens de simples reconhecimento (SPT), provas de carga sobre placa (PLT) e ensaios de caracterização.

OLIVEIRA (2002) ressalta a grande dificuldade de se analisar a estabilidade dos taludes de lixo, uma vez que ainda não existem teorias e modelos que representem de forma realista o comportamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Devido a este fato, tem sido muito comum a adoção das teorias clássicas usadas para estudar a estabilidade de taludes de solos para representar o comportamento dos taludes de resíduos.

No presente trabalho, foi realizado ensaios de estabilidade de taludes carregados até a ruptura, nos quais os parâmetros de resistência foram determinados com base em retro-análises da superfície de ruptura utilizando-se métodos de equilíbrio limite.

A seguir é feita uma breve revisão sobre os métodos de equilíbrio limite para análise da estabilidade de talude em solos que serviram como fonte para se analisar a estabilidade dos taludes de lixo ensaiados.

2.4.1 – Métodos de análises de estabilidade de taludes por equilíbrio limite

Forças gravitacionais e de percolação tendem a causar a instabilidade de taludes naturais, escavados e de aterros. Na maioria dos casos os problemas de estabilidade podem ser considerados bi-dimensionais sendo admitida uma condição de deformação plana.

Na análise por meio dos métodos de equilíbrio limite, define-se como fator de segurança de uma hipotética superfície de ruptura, a relação entre a resistência ao cisalhamento disponível do solo e a resistência ao cisalhamento necessária para manter a condição de equilíbrio em função das forças externas.

Algumas hipóteses para se analisar a estabilidade de um talude por meio do método de equilíbrio limite são:

- O solo se comporta como material rígido-plástico. Ou seja, rompe bruscamente.
- As equações de equilíbrio da estática são válidas até a iminência da ruptura, após este ponto o processo é dinâmico.
- O coeficiente de segurança (F) é constante ao longo da superfície de ruptura, ou seja, ignora-se a existência de ruptura progressiva.

Existem inúmeros métodos para se estudar a estabilidade de taludes. Alguns métodos supõem que a superfície de ruptura é circular. Outros admitem que a superfície de ruptura possa ter uma forma qualquer. Por outro lado, como o estudo do equilíbrio de uma superfície de ruptura é um problema hiperestático, não pode ser resolvido somente por meio das equações de equilíbrio. Como os métodos de equilíbrio limite só usam estas equações, é imprescindível a adoção de hipóteses que diminuam o número de incógnitas de forma que o problema passe a ser isostático, ou seja, tenha o mesmo número de incógnitas e equações. Em função dessas hipóteses, os diferentes métodos são mais, ou menos, precisos.

Entre os diversos métodos de estabilidade de taludes, o método de Bishop é possivelmente o mais utilizado por ser razoavelmente simples e, apesar disso, fornecer fatores de segurança próximos dos obtidos por métodos mais precisos.

Nos estudos de estabilidade de taludes realizados nessa dissertação utilizou-se o método de Bishop que é descrito a seguir.

2.4.1.1 - Método de Bishop

O método de Bishop supõe que a superfície de ruptura seja circular. Além disso, divide a superfície de ruptura em lamelas (Figura 3), e faz o

equilíbrio de momentos do conjunto de lamelas em torno do ponto O, centro do círculo, o que conduz a equação (2.10).

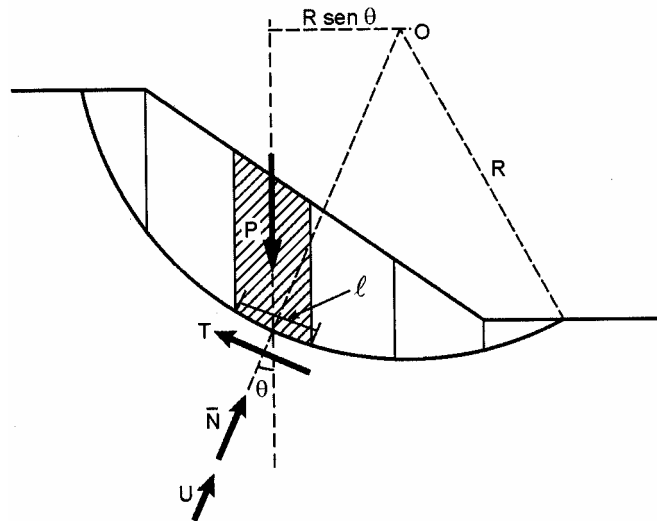


Figura 3 – Superfície de ruptura dividida em lamelas.

$$\sum (P.R).\text{sen } \theta = \sum (T.R) \quad (2.10)$$

temos que:

$$\tau = c' + \sigma' . \tan \phi' \Rightarrow T = (c'.l + \bar{N} . \tan \phi) . \frac{1}{F} \quad (2.11)$$

logo:

$$F = \frac{\sum [c'.l + \bar{N} . \tan \phi']}{\sum (P . \text{sen } \theta)} \quad (2.12)$$

Desde que se suponha que as forças entre lamelas sejam horizontais, a força \bar{N} pode ser obtida diretamente a partir da equação de equilíbrio de forças na direção vertical em cada lamela (Figura 4).

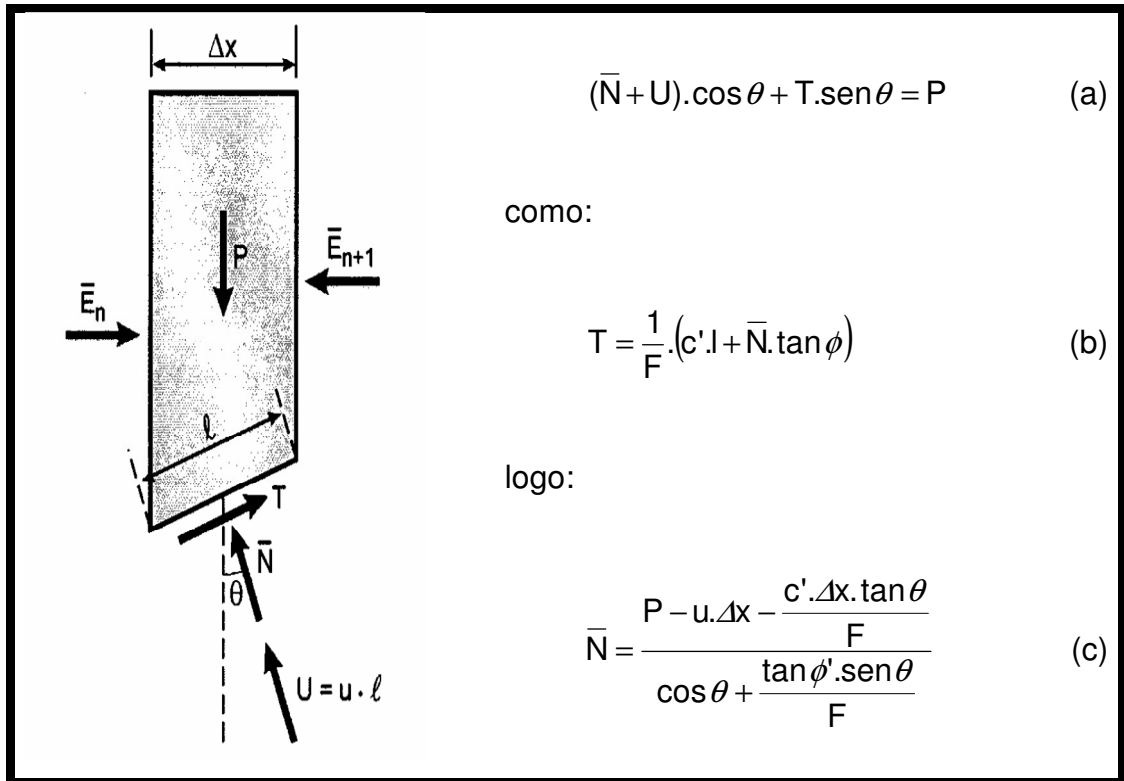


Figura 4 – Equilíbrio de força na direção vertical.

A substituição de \bar{N} , dada na equação (c), na equação de equilíbrio de momentos (2.12) conduz à equação:

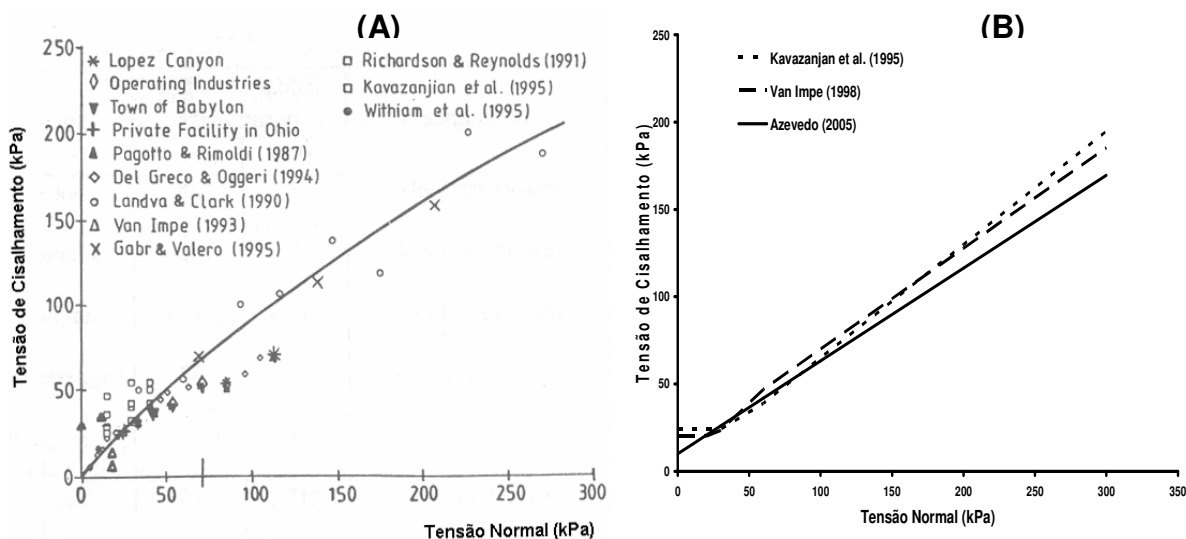
$$F = \frac{\sum \left[c' \cdot l + \frac{P - u \cdot \Delta x - \frac{c' \cdot \Delta x \cdot \tan \theta}{F}}{\cos \theta + \frac{\tan \phi' \cdot \sin \theta}{F}} \cdot \tan \phi' \right]}{\sum (P \cdot \sin \theta)} \quad (2.13)$$

A equação (2.13) tem que ser resolvida iterativamente, ou seja, arbitra-se um valor para o coeficiente de segurança (F) e calcula-se o novo coeficiente de segurança. Se o valor calculado for diferente do valor arbitrado, arbitra-se um novo valor até que os valores arbitrados e calculados sejam aproximadamente iguais.

2.5 – Parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos (RSU)

Existem alguns trabalhos que tratam da determinação de parâmetros de resistência de RSU (VAN IMPE, 1998; MCBEAN, 1995; VERBRUGGE, 2000; ALCITURRI, 2000; etc.). Porém, para os RSU brasileiros, o único trabalho conhecido é o da tese de doutorado de CARVALHO (1999) que realizou ensaios triaxiais em amostras, retirando as maiores partículas dos RSU.

De acordo com JESSBERGER & KOCKEL (1991), algumas propriedades mecânicas dos RSU, como resistência, compressibilidade e deformabilidade, dependem da composição do resíduo, das propriedades mecânicas de seus constituintes e da influência da decomposição e teor de umidade nestas propriedades, o que contribui para aumentar a variabilidade de resultados reportados. Em particular, com relação à resistência ao cisalhamento desses materiais, a sua determinação tem sido realizada por diversos autores por meio de retro-análises de comportamento de campo, por ensaios *in situ* e por ensaios de laboratório.



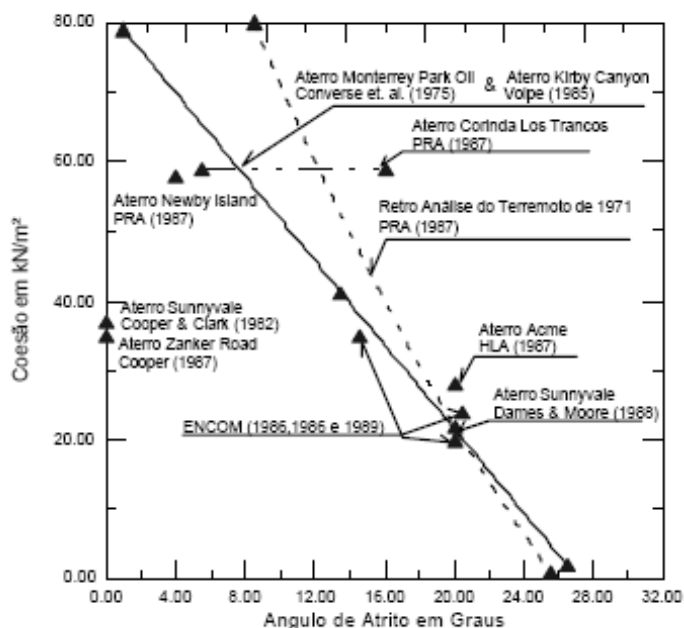
Fonte: AZEVEDO (2005).

Figura 5 - (A) Envoltórias de ruptura de RSU obtidas por vários autores; (B) Comparação com a envoltória recomendada por AZEVEDO (2005).

2.5.1 – Parâmetros de resistência estimados por retro-análises

Segundo OLIVEIRA (2002), a principal justificativa em se usar parâmetros de retro-análise é que eles representam o limite inferior da resistência de campo, sendo, portanto conservativos. Uma das desvantagens nesse tipo de análise é a dificuldade de estabelecer parâmetros corretos, pois a resistência é determinada por um par de parâmetros resultando em uma infinidade de combinações (duas incógnitas e uma equação).

Os valores mais encontrados do ângulo de atrito e da coesão com esse tipo de análise, segundo diversos autores como SINGH & MURPHY (1990); BENVENUTO & CUNHA (1991); OLIVEIRA (1991), situam-se na faixa de 20° a 40° e 0 a 40 kPa respectivamente. Na Figura 6, são apresentados parâmetros de resistência obtidos por retro-análises segundo vários autores.



Fonte: OLIVEIRA (2002)

Figura 6 - Parâmetros de resistência obtidos por retro-análises.

2.5.2 – Parâmetros de resistência estimados por ensaios *in situ*

A determinação dos parâmetros de resistência dos RSU vem sendo realizada por diversos autores, através de ensaios de campo, como SPT e CPT.

JUCÁ *et al.* (1997) observaram que tanto nos ensaios SPT, quanto nos ensaios CPT, há aumento da resistência com a profundidade.

A estimativa de parâmetros através desses ensaios é feita utilizando-se correlações para solos arenosos, encontrando-se normalmente valores de ϕ entre 25 e 40°. (OLIVEIRA, 2002).

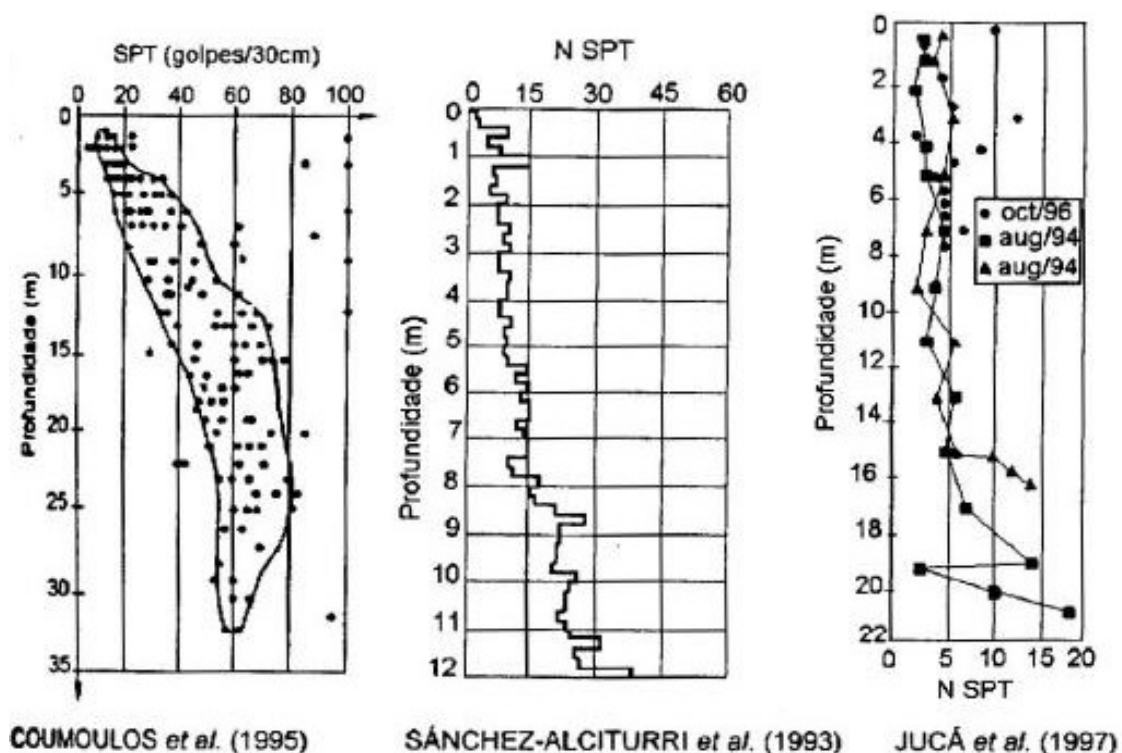


Figura 7 – Ensaios de SPT em RSU realizados por diversos autores. (*apud* CARVALHO, 1999).

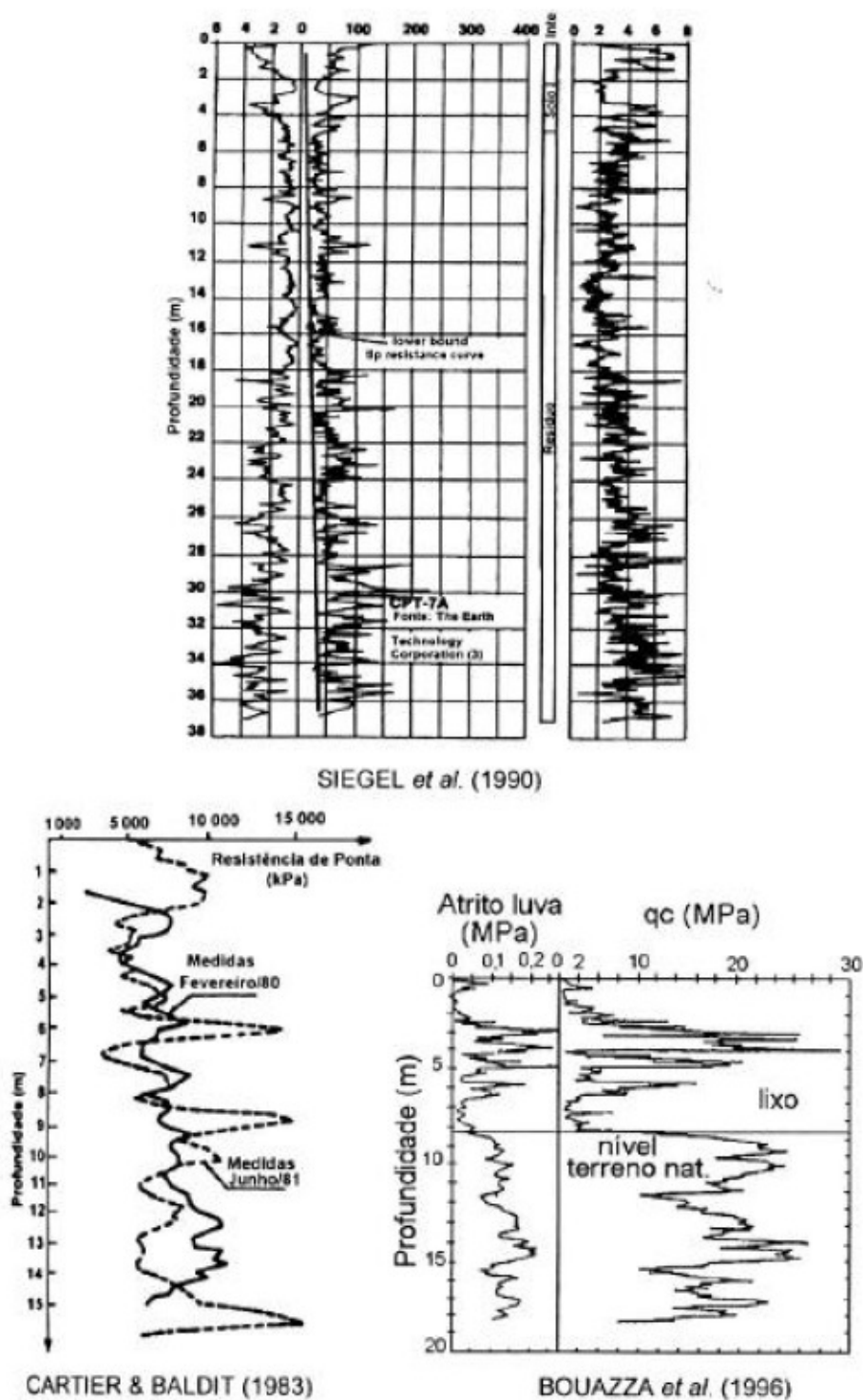


Figura 8 – Ensaio de CPT em RSU realizados por diversos autores. (apud CARVALHO, 1999).

2.5.3 – Parâmetros de resistência estimados por ensaios de laboratório

EDINCLILER *et al.* (1996) declaram que a melhor metodologia para estudar propriedades mecânicas de resíduos sólidos é conduzir uma série de ensaios laboratoriais de grandes dimensões em conjunto com alguns ensaios de campo em grande escala.

LANDVA & CLARK (1986) empregaram um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões (43,4 cm x 28,7 cm) na determinação da resistência de RSU de amostras de resíduos considerados velhos (não é fornecida a idade), tendo obtido valores de ϕ entre 38° e 42° e coesão de 14 kPa. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em barris plásticos onde seguiram um processo de decomposição, por um ano. Após esse período as amostras foram novamente ensaiadas, tendo sido obtido um ângulo de atrito menor, 33°, porém a coesão manteve-se no mesmo patamar, 16 kPa. LANDVA & CLARK (1986) acreditam que a perda de resistência seja justificada pela decomposição, mas indicam necessidade de mais investigações para confirmação. Além desse teste, os mesmos autores conduziram ensaios com um resíduo novo triturado, constituído por uma grande porcentagem de material plástico, e encontraram $\phi = 24^\circ$ e $c = 23$ kPa. Por fim, investigaram a resistência de um aterro constituído basicamente de resíduo madeireiro e obtiveram $\phi = 33^\circ$ e $c = 10$ kPa.

HOWLAND & LANDVA (1992) apresentam resultados de cisalhamento direto em laboratório em uma diversidade de materiais. Os ensaios foram executados em uma caixa de grandes dimensões (43,2 cm x 27,9 cm) com resíduos com idades entre 10 a 15 anos, amostrados com trados helicoidais de eixo sólido com 15,2 cm e 27,9 cm de diâmetro. Durante os ensaios as amostras foram submetidas a tensões normais da ordem de 574 kPa e cisalhadas até um máximo de deslocamento de 10,2 cm, sob condições drenadas. Os valores de ângulo de atrito e coesão foram reportados como 33° e 17 kPa, respectivamente.

JESSBERGER & KOCKEL (1991) conduziram ensaios triaxiais em RSU com 3 e 7,5 anos de idade, assumindo que o volume da amostra

permaneceu constante durante o teste. Nos ensaios, a resistência de pico não foi alcançada em nenhuma das amostras, mesmo para deformações axiais maiores que 20%.

OLIVEIRA (2002) relata que as curvas tensão x deformação típicas apresentadas por CARVALHO (1999), exibem ganho contínuo de resistência (Figura 9) sem apresentar ruptura. Nesses casos tem sido comum a obtenção dos parâmetros para uma dada deformação (15 a 20%).

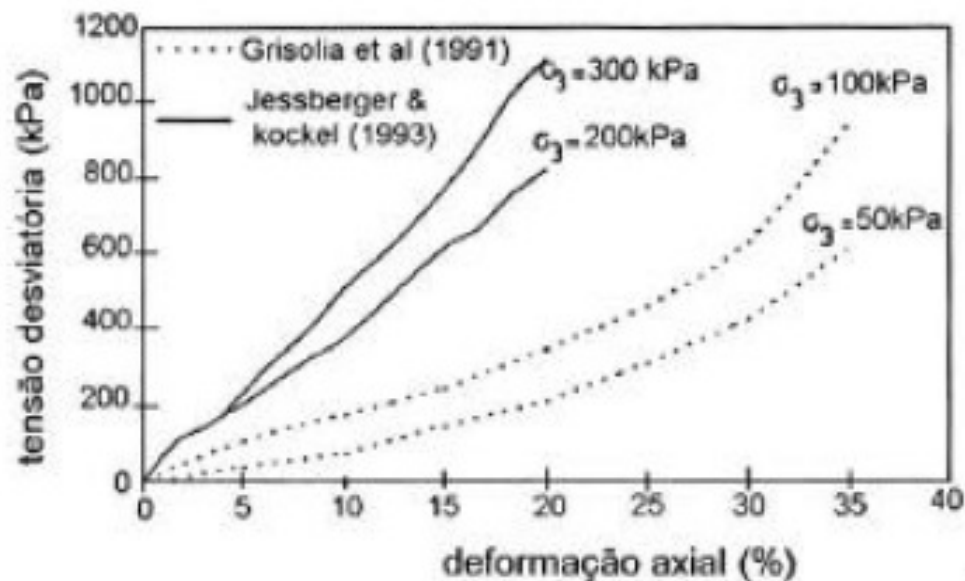


Figura 9 - Curvas tensão x deformação típicas dos RSU. (apud CARVALHO, 1999).

GERBER (1991) construiu uma caixa de cisalhamento direto com 1,5 m x 1,5 m de dimensões transversais para estudar um aterro sanitário em Maine, EUA, onde havia ocorrido uma ruptura de talude, descrita por RICHARDSON & REYNOLDS (1991). Nos seis ensaios de grandes dimensões realizados em diferentes pontos, as tensões normais foram aplicadas por meio de grandes blocos de concreto e as tensões horizontais por mecanismos hidráulicos. Os valores médios dos parâmetros de resistência obtidos foram $\phi = 27^\circ$ e $c = 25$ kPa.

Posteriormente, WITHIAM *et al.* (1995) realizaram ensaios em uma caixa de cisalhamento direto bi-partida de aço, com dimensões 1,5 m x 1,5

m x 1,5 m. A caixa foi colocada sobre um bloco de RSU livre, pouco amolgado, escavado a partir da superfície até a profundidade de 1,5m. As forças horizontais foram aplicadas por meio de cabos e guincho mecânicos e as normais através de um sistema de pesos com blocos de madeira e concreto. Os testes foram realizados em três diferentes níveis de tensões normais, variando entre 0 e 21 kPa. Os parâmetros reportados foram $\phi = 30^\circ$ e $c = 10$ kPa.

KAVAZANJIAN *et al.* (1995), baseados em observações dos resultados de HOWLAND & CLARK (1992) e em outros diversos dados, sugeriram que a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb apropriada para RSU consistia de $\phi = 0^\circ$ e $c = 24$ kPa para tensões normais inferiores a 30 kPa, e $\phi = 33^\circ$ com $c = 0$ kPa para tensões normais superiores a 30 kPa.

A maioria desses trabalhos, entretanto, inclusive o de CARVALHO (1999), tem sido executada com RSU selecionados, separando-se as partículas de maior dimensão ou triturando os RSU, o que, evidentemente, modifica as propriedades de compressibilidade e resistência dos resíduos.

Conclui-se, portanto, que existe uma grande carência no conhecimento de parâmetros de resistência de RSU brasileiros, justamente num momento em que o desenvolvimento de projetos e construção de aterros sanitários estão sendo fomentados pelas autoridades políticas do nosso país.

3- MATERIAL E MÉTODOS

Nesse capítulo, são apresentadas duas metodologias para a obtenção dos parâmetros de resistência dos RSU, utilizando dois equipamentos de grandes dimensões.

O primeiro foi desenvolvido por LORETO (2003), para a realização de ensaios de compressibilidade em RSU (compressão confinada) e posteriormente utilizado por AZEVEDO *et al.* (2006), para realização de ensaios de capacidade de carga.

No presente trabalho, utilizou-se esse equipamento para realizar ensaios de prova de carga em uma sapata rasa, como feito por AZEVEDO *et al.* (2006), mas com algumas modificações. O segundo equipamento foi construído neste trabalho, uma vez que se observou com os ensaios realizados com o primeiro equipamento, a necessidade de se realizar um ensaio que definisse melhor a ruptura e, conseqüentemente, os parâmetros de resistência dos RSU.

A seguir, são descritos os procedimentos utilizados nos ensaios para a preparação das amostras, os equipamentos e as metodologias, bem como os cálculos usados para a obtenção dos parâmetros de resistência dos RSU.

3.1 – Coleta e caracterização da amostra de lixo

Para realização dos ensaios de capacidade de carga, foram coletados, em 12 tambores de 200 litros, aproximadamente 900 Kg de lixo (RSU) da cidade de Viçosa-MG, que seriam dispostos no aterro sanitário do município.

O material foi despejado numa área aos fundos do Laboratório de Engenharia Civil (LEC), onde se iniciou o processo de quarteamento para a determinação da composição gravimétrica dos RSU. Foram adotados os seguintes componentes para este estudo: matéria orgânica, metais ferrosos, papel e papelão, borracha e couro, plásticos, madeiras, vidros, trapos, alumínio, e outros.

3.2 – Ensaio de prova de carga em RSU

3.2.1 – Descrição do equipamento

O equipamento utilizado nos ensaios de prova de carga foi desenvolvido por LORETO (2003) e posteriormente utilizado por AZEVEDO *et al.* (2006), para obtenção de parâmetros de compressibilidade e resistência, respectivamente.

Nesse trabalho foram feitas algumas adaptações no equipamento original para a realização dos ensaios.

O equipamento consiste de duas manilhas superpostas, com 1,6 m de altura por 1 m de diâmetro e um sistema de carga composto por uma viga metálica, rotulada em uma das suas extremidades e carregada com um peso estático na outra. Entre as duas extremidades, um eixo rotulado de carregamento que, por sua posição, amplifica o peso estático, aumentando a carga aplicada na sapata em aproximadamente 4,55 vezes.

Os RSU contidos nas manilhas foram carregados através de uma sapata cilíndrica rígida feita de madeira, com altura de 40 cm e 16 cm de diâmetro. Na Figura 10 apresenta-se, esquematicamente.

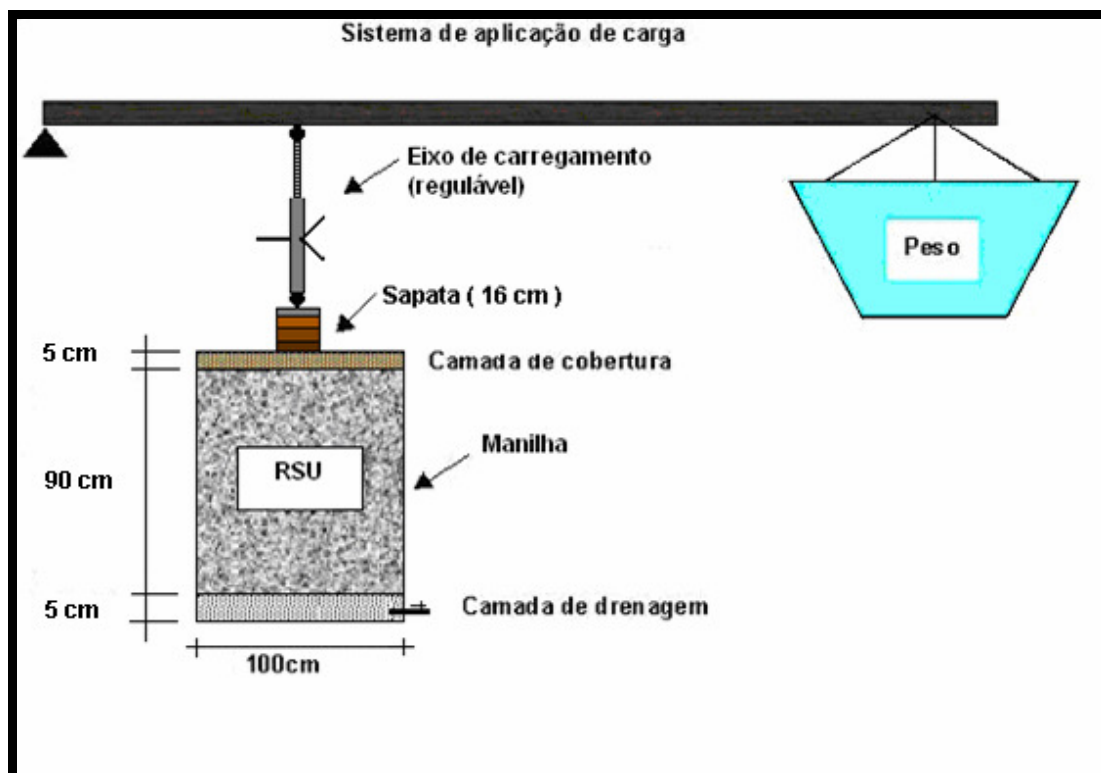


Figura 10 – Esquema do equipamento para o ensaio de prova de carga.

Uma adaptação feita no equipamento original, para a realização dos ensaios de prova de carga, consistiu em aterrar a manilha em 60 cm a partir do fundo, para se ter uma amostra de RSU com 90 cm altura. Isto porque se concluiu, com base no bulbo de tensões, que não seria necessária uma altura de 1,50 m de RSU. Foi, portanto, com essa altura inicial que se determinaram as deformações durante a realização dos ensaios.

A Figura 11 mostra uma vista frontal do equipamento de prova de carga utilizado no ensaio.



Figura 11 – Vista frontal do equipamento para realização dos ensaios.

O peso estático foi exercido pelo enchimento, com brita 1, de uma caixa d'água de 500 litros, como mostrado na Figura 12.



Figura 12 – Enchimento da caixa para aplicação do peso estático.

Foi, também, adaptado um macaco hidráulico (Figura 13), que serviu para levantar o braço de alavanca (viga metálica) com intuito de manter o equipamento nivelado. Uma outra adaptação feita em relação ao sistema de

carga original (LORETO, 2003) foi que o eixo rotulado, que aplica a carga na sapata, foi modificado com a introdução de um sistema de rosca sem-fim (Figura 14). Dessa forma, esse eixo passou a ser regulável, permitindo, com a ajuda do macaco, o nivelamento da viga de aplicação de carga, à medida que os recalques aconteciam.

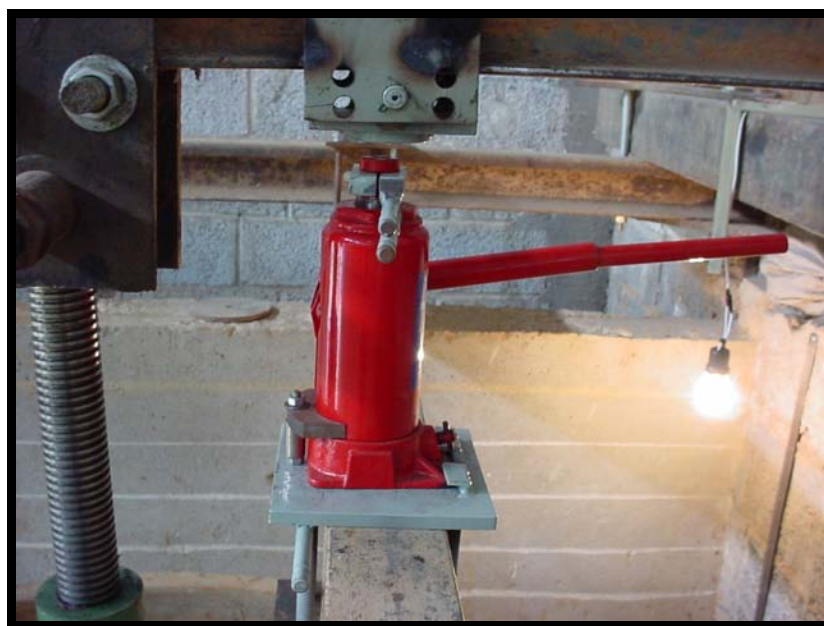


Figura 13 – Detalhe do macaco hidráulico adaptado ao sistema de carga.



Figura 14 – Detalhe do eixo regulável de aplicação de carga.

3.2.2 – Metodologia utilizada no ensaio

Foram realizados dois ensaios de prova de carga confinados para obtenção dos parâmetros de resistência dos RSU. Em ambos os ensaios, a umidade dos RSU, determinada conforme descrito no item 3.2.3, foi praticamente a mesma. A única variação foi o peso específico dos resíduos: um ensaio foi realizado com o peso específico de 5 kN/m^3 e o outro com 7 kN/m^3 .

Após a montagem do equipamento de carga, realizou-se a compactação dos RSU nas manilhas buscando-se alcançar primeiramente, o peso específico de $7,0 \text{ kN/m}^3$ (primeiro ensaio), comumente utilizado em projetos de aterros sanitários, e posteriormente um peso específico menor, de 5 kN/m^3 (segundo ensaio) (Figura 15).



Figura 15 – Compactação dos RSU na manilha.

Para se obter os pesos específicos desejados, a manilha foi marcada com 6 camadas de 15 cm de altura, cada uma apresentando assim um volume de aproximadamente $0,118 \text{ m}^3$. Com isso, para o peso específico de 7 kN/m^3 , eram pesados e compactados cerca de 82,50 kg de RSU em cada

camada, e para se chegar ao peso específico de 5 kN/m^3 , eram pesados e compactados cerca de $58,90 \text{ kg}$ de RSU em cada camada.

Após a compactação dos RSU na manilha, estes foram cobertos com finas camadas de solo e serragem para evitar a presença de vetores como moscas e outros insetos, além de evitar o mau cheiro. Na Figura 16 apresenta-se a manilha após a compactação dos resíduos, já com a devida cobertura, antes de se iniciar o ensaio.



Figura 16 – Cobertura dos resíduos após a compactação em camadas.

O processo de carregamento iniciou com o enchimento de 50 kg de brita na caixa, que corresponde a uma carga de $6,10 \text{ kN}$ e uma tensão de $303,49 \text{ kPa}$, uma vez que a carga (C) exercida na sapata, obtida através do equilíbrio de forças e considerando os pesos próprios da viga, do eixo, dos cabos de aço e da sapata, obedece à equação (3.1).

$$C = 3,783 + 4,55.P \text{ (kN)} \quad (3.1)$$

em que, P equivale ao peso na extremidade da viga, neste caso a quantidade de brita colocada na caixa.

Cada etapa de carregamento tinha uma duração de 24 horas e correspondia a um acréscimo de 50 kg (Figura 17) de brita na caixa, ou seja,

um acréscimo de 2,32 kN, conforme a equação (3.1). Durante o estágio de carregamento, monitorava-se a variação do recalque com o tempo (curva recalque versus tempo).

No primeiro ensaio, foram realizadas 10 etapas de carregamento, o que corresponde a um peso total de 500 Kg de brita na caixa. No segundo, foram realizadas 6 etapas de carregamento, o que equivale a um peso total de 300 Kg de brita na caixa.



Figura 17 – Pesagem da brita para as etapas de carregamento.

Os recalques foram acompanhados durante o ensaio, por um sistema de medição, composto por um nível topográfico de placas planas paralelas e duas referências, uma móvel, na haste de carregamento utilizando papel milimetrado, e outra fixa, na parede, atrás das manilhas utilizando uma régua graduada.

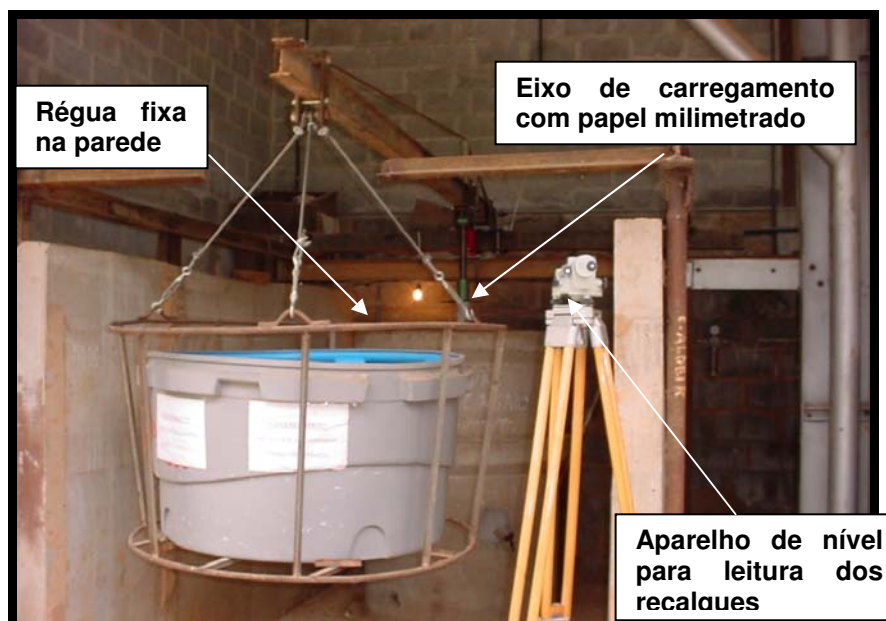


Figura 18 – Vista geral do equipamento e do sistema de leitura dos recalques.



Figura 19 – Detalhe do aparelho de nível de placas paralelas, da régua fixa na parede e do eixo de carregamento com papel milimetrado.

Para determinação dos deslocamentos, faziam-se duas leituras através do aparelho de nível de placas plano-paralelas. A primeira era feita na régua e outra no eixo de carregamento, e o recalque era medido pela diferença entre as duas leituras.

As leituras na primeira hora de cada etapa de carregamento eram feitas aos 5, 10, 15, 30, 45 e 60 minutos, e a cada 30 minutos no restante do ensaio.

Cada etapa de carregamento tinha uma duração de 24 horas. Por causa disso, o primeiro ensaio durou 10 dias e o segundo 6 dias. Durante os ensaios, monitoraram-se os recalques com o tempo e os recalques em função da tensão aplicada.

Após o último estágio de carregamento, a amostra foi descarregada. No primeiro ensaio, o descarregamento foi realizado retirando-se metade da brita contida na caixa, ou seja, 250 kg, e após 24 horas os outros 250 kg restantes. Já no segundo ensaio, o descarregamento foi feito com a retirada de uma só vez dos 300 kg de brita contidos na caixa.

Durante os ensaios notou-se que, após algumas etapas de carregamento, a amostra de RSU desprendia-se das paredes laterais da manilha (Figura 20), possivelmente devido a grande quantidade de plástico presente na amostra, os resíduos se comportavam como um material reforçado.

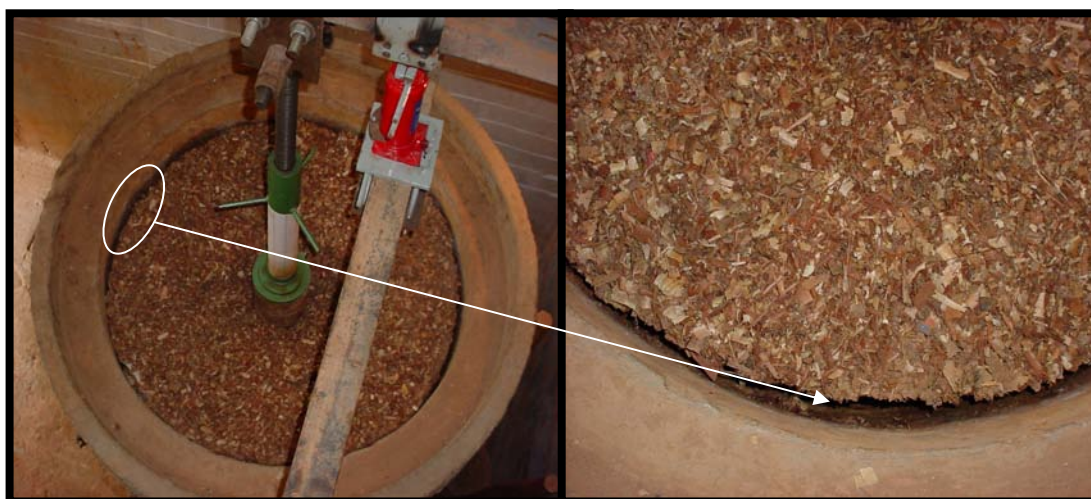


Figura 20 – Detalhe dos RSU durante o ensaio de capacidade de carga.

Além disso, em ambos os ensaios, puderam-se notar grandes deformações dos resíduos, como mostram as Figuras 21 e 22. No entanto, nem no primeiro ensaio, com peso específico de 7 kN/m^3 , nem no segundo,

em que os resíduos foram compactados com peso específico menor de 5 kN/m³, se observou ruptura da sapata.



Figura 21 – Vista superior da sapata, mostrando a deformação dos resíduos.



Figura 22 – Detalhe da sapata durante o ensaio.

3.2.3 – Determinação do teor de umidade da amostra

Ao término de cada ensaio, foi retirada no centro da manilha uma amostra com aproximadamente 6 kg de RSU, para a determinação do teor de umidade.

Foram utilizados cinco recipientes, devidamente secos e pesados, para determinar a massa bruta úmida das amostras previamente misturadas (Figura 23). Os recipientes com os RSU foram levados a uma estufa especialmente construída para esse propósito, e deixados secar a uma temperatura média de 35°C (Figura 24) até que atingissem peso constante.



Figura 23 – Determinação da massa bruta úmida dos RSU.



Figura 24 – Amostras na estufa para determinação do teor de umidade dos RSU.

3.3 – Ensaio de estabilidade de talude de RSU

Os resultados encontrados nos dois ensaios de prova de carga da sapata superficial não apresentaram tensão de ruptura definida. Devido a isso, desenvolveu-se um novo equipamento visando contornar esse problema.

3.3.1 – Descrição do equipamento desenvolvido

O novo equipamento é constituído por uma caixa de madeira de dimensões 80 x 80 x 80 cm, na qual a amostra de resíduos é colocada, e por um sistema de carga, que consiste, basicamente, num atuador de pressão com um pistão de 12 cm de curso, que aplica a carga nos RSU através de uma sapata rígida de madeira com 70 cm de comprimento por 10 cm de largura e 10 cm de altura.

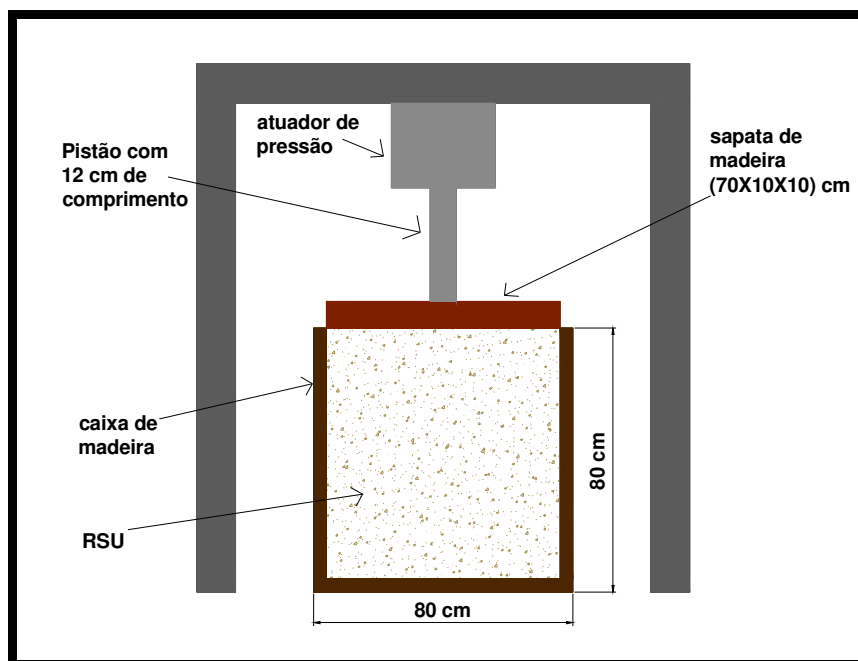


Figura 25 – Esquema do equipamento desenvolvido para realização da capacidade de carga em um talude de RSU.

A caixa foi construída de tal forma que uma de suas paredes laterais é removível, como mostra a Figura 26, de modo que, após a compactação dos resíduos e a retirada dessa parede, tinha-se um talude vertical de lixo.

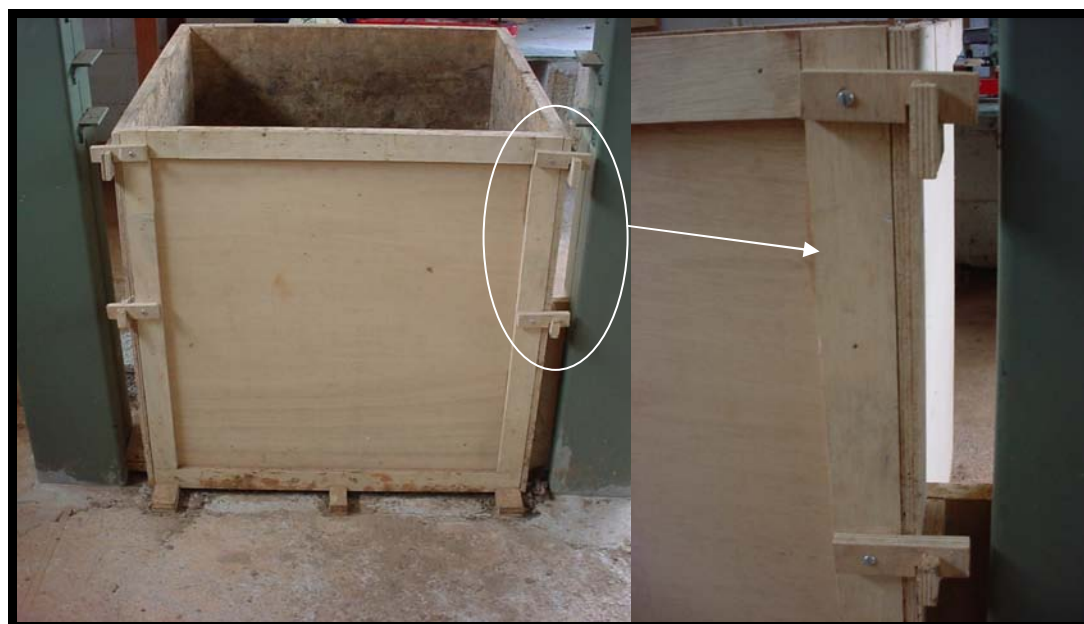


Figura 26 – Detalhe da caixa de madeira com a parede removível.

O atuador de pressão com pistão é fixado a uma viga de 100 cm de comprimento apoiada em canaletas soldadas em diversas alturas, em dois pilares de aço, como pode ser observado nas Figuras 27 e 28.

O pistão é acionado através da aplicação de uma pressão de ar regulada por uma válvula e por um manômetro situados num painel (Figuras 27 e 28).

Além do painel para regular a pressão, o equipamento inclui um outro painel, fixo no pilar ao lado da caixa, com quatro válvulas que servem para aplicação e liberação do ar no atuador de pressão, podendo-se assim realizar o carregamento e o descarregamento do ensaio (Figuras 27 e 28).

Para monitorar os recalques dos resíduos, foram adaptados ao equipamento, dois relógios medidores de deslocamentos, com precisão de 0,01 mm, e capacidade de medir até 100 mm de deslocamento (Figuras 27 e 28).

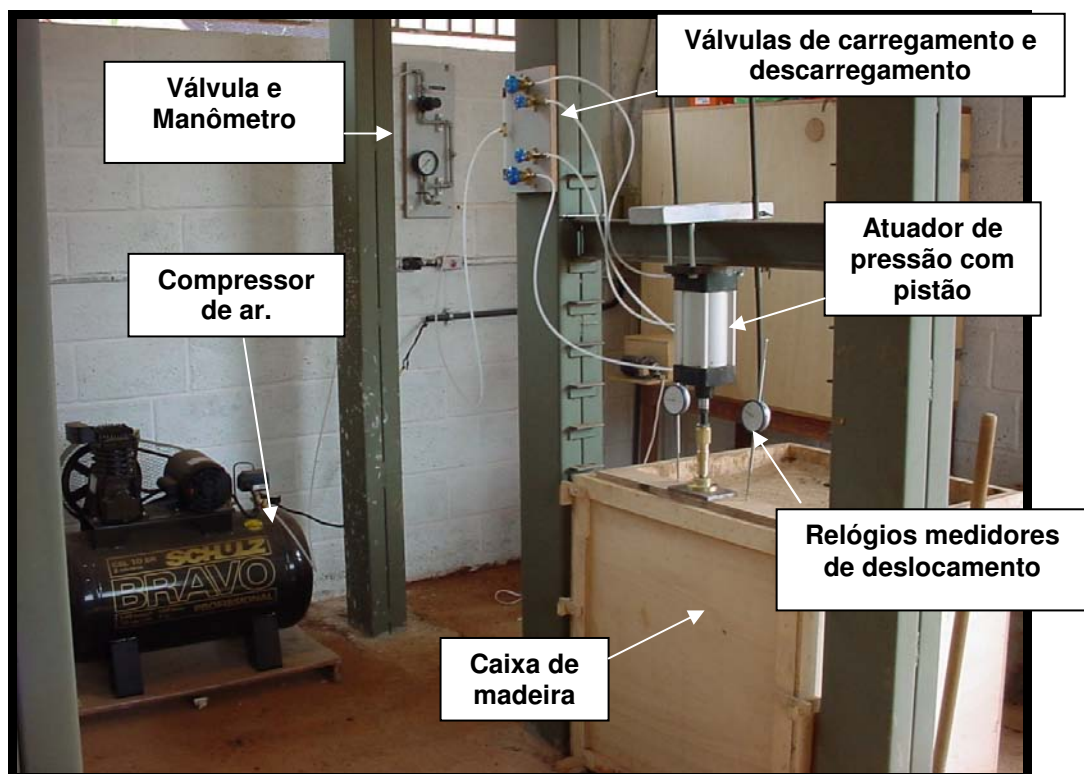


Figura 27 – Vista geral do equipamento para realização dos ensaios.

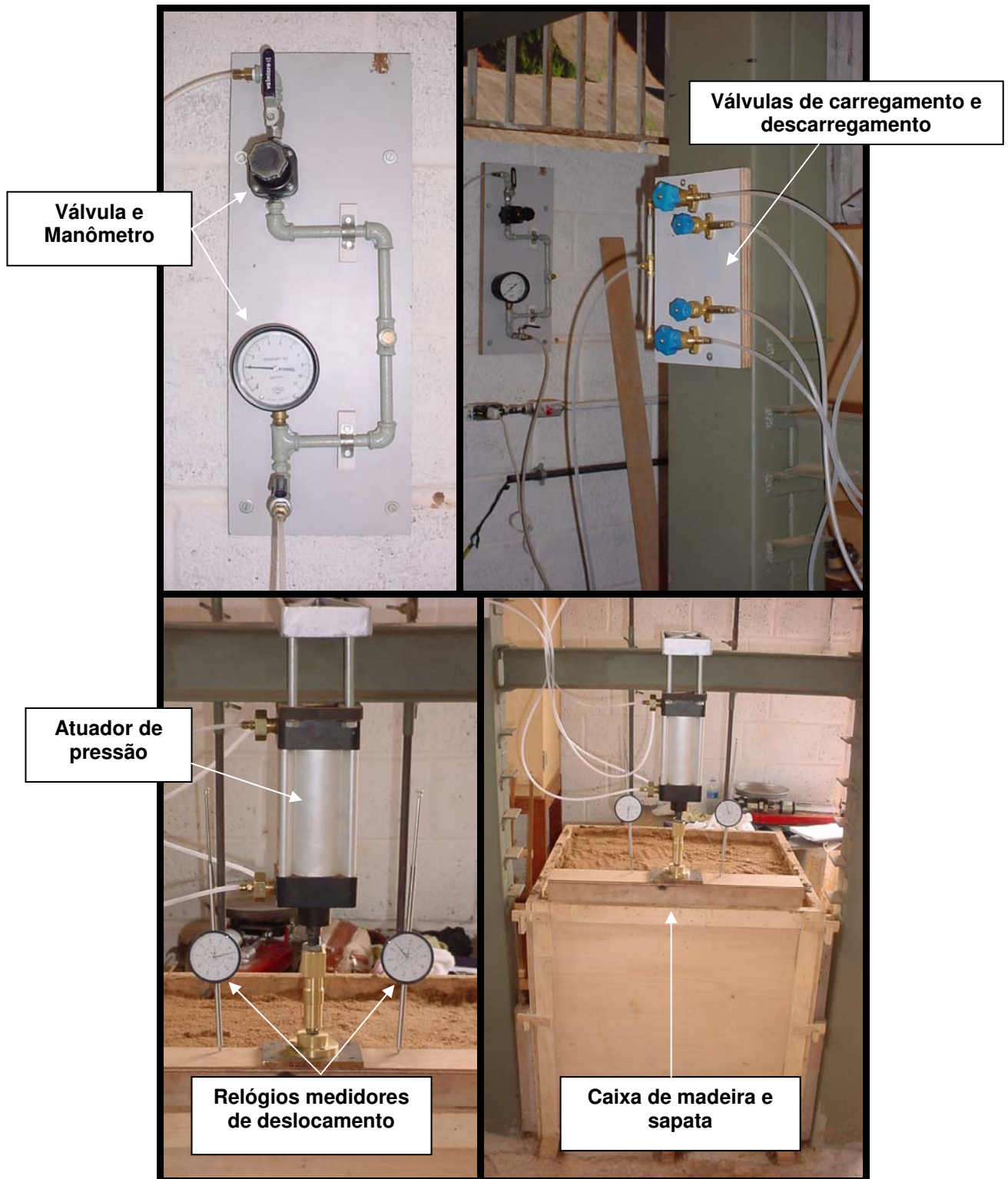


Figura 28 – Detalhe do sistema de aplicação de carga do ensaio.

3.3.2 – Metodologia utilizada no ensaio

A mesma amostra de lixo usada nos ensaios de capacidade de carga realizado nas manilhas de concreto, foi utilizada no ensaio de estabilidade de talude executado na caixa de madeira. No entanto, o intervalo de tempo entre os dois tipos de ensaio, foi de aproximadamente 2 meses, o que acarretou alguma decomposição da matéria orgânica, possível de ser observada visualmente e pelo odor desagradável.

Foram realizados 6 ensaios no novo equipamento tendo-se procurado variar a umidade e o peso específico dos resíduos, com o objetivo de avaliar a variação dos parâmetros de resistência com cada uma dessas propriedades.

Primeiramente, foram realizados três ensaios com o peso específico dos RSU igual a 7 kN/m^3 , variando-se, o teor de umidade. Com base nos resultados encontrados, foram realizados outros três ensaios com um peso específico menor, igual a 5 kN/m^3 , buscando alcançar em cada um deles, os mesmos valores de teor de umidade usados nos ensaios anteriores.

Os valores de peso específico iguais a 5 e 7 kN/m^3 foram adotados com intuito de comparar os resultados obtidos com os ensaios realizados nas manilhas de concreto.

Todos os ensaios foram realizados seguindo as etapas descritas a seguir.

- *Compactação dos RSU na caixa de madeira.*

Nessa etapa, os resíduos foram compactados na caixa, de modo a alcançar primeiramente um peso específico de 7 kN/m^3 e posteriormente um peso específico de 5 kN/m^3 . Para facilitar a compactação, a caixa foi demarcada em 8 camadas, com 10 cm de altura cada uma. Em cada camada, eram compactados 44 kg de RSU para atingir o peso específico de 7 kN/m^3 . Da mesma maneira, para atingir o peso específico de 5 kN/m^3 , foram pesados e compactados em cada camada, 31,5 kg de RSU (Figuras 29 e 30). Após a última camada, os resíduos eram cobertos com uma fina camada de areia, para evitar a presença de vetores e de mau cheiro.



Figura 29 – Mistura e pesagem dos resíduos.



Figura 30 – Compactação dos RSU na caixa em camadas.

- *Aplicação das cargas.*

Após a compactação dos resíduos, retirava-se a parede removível, posicionavam-se a peça rígida de madeira (sapata), o atuador de pressão e os medidores de deslocamento, e iniciava-se a etapa de carregamento

vertical da amostra de RSU (Figura 31). Para facilitar a ruptura, a sapata era colocada na extremidade do talude. Os estágios de carregamento eram feitos de 20 em 20 minutos, medindo-se o recalque obtido no final de cada estágio. No início do ensaio, os acréscimos de tensão eram de 5,5 kPa. Nos estágios finais, os acréscimos de tensão eram menores para definir melhor a tensão de ruptura.

- *Leitura dos recalques.*

Como descrito no item 3.3.1, os recalques foram medidos com dois relógios medidores de deslocamentos, presos na viga metálica que sustenta o atuador de pressão, um em cada lado da sapata (Figura 32).

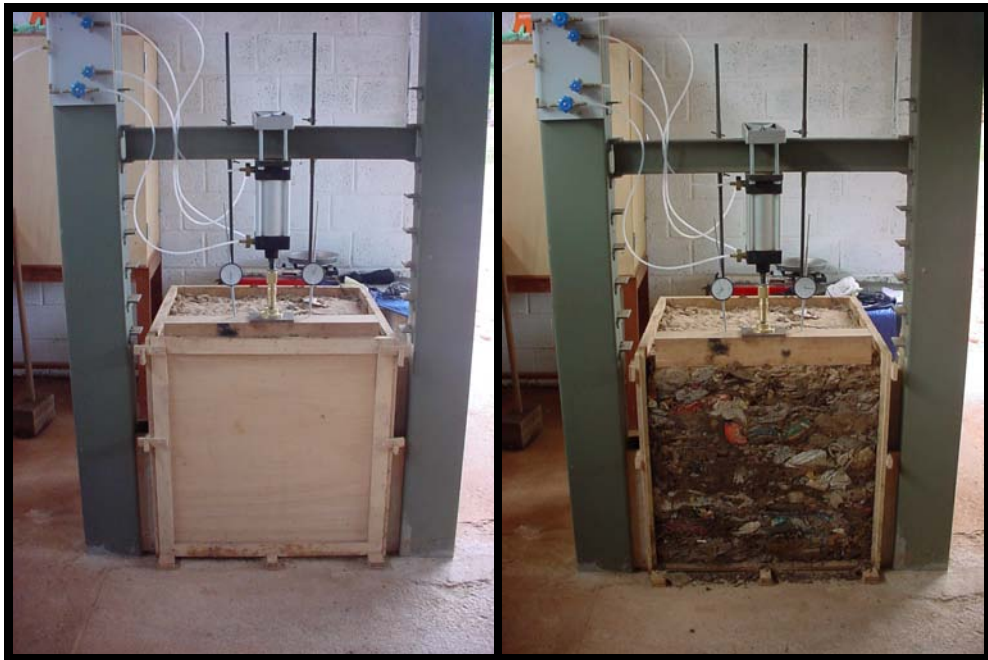


Figura 31 – Detalhe do equipamento após a compactação dos RSU.



Figura 32 – Relógios medidores de deslocamentos apoiados na sapata.

Em todos os ensaios, seguiu-se a mesma seqüência para aplicação dos estágios de carregamento e leitura dos recalques.

No primeiro ensaio, o teor de umidade dos RSU, correspondia ao valor que os RSU tinham depois de dois meses confinados na manilha de concreto, em torno de 60%. A partir desse valor, realizou-se um segundo ensaio, buscando-se aumentar em 20% o teor de umidade, ou seja, resíduos com teor de umidade em torno de 80%. No terceiro ensaio buscou-se um teor de umidade inferior a 60%, na faixa de 40%. Para isso, a amostra de RSU foi espalhada no chão exposta ao ar durante uma semana, tendo-se o cuidado de revirar os resíduos diariamente para facilitar a secagem (Figura 33).



Figura 33 – Amostra sendo misturada e espalhada para secagem.

Ao término do terceiro ensaio, o último com peso específico de 7 kN/m^3 , a amostra foi retirada e pesada novamente, para ser compactada na caixa, agora buscando um peso específico igual a 5 kN/m^3 .

O quarto ensaio foi realizado com a amostra com teor de umidade em torno de 40% e peso específico igual a 5 kN/m^3 . A partir daí, acrescentou-se a amostra certa quantidade de água, para que no quinto ensaio se atingisse um teor de umidade próximo dos 60%. Do mesmo modo no sexto ensaio, acrescentou-se certa quantidade de água, de modo que o teor de umidade atingisse um valor próximo dos 80%.

Algumas observações foram feitas durante os ensaios, dentre as quais podem se destacar:

- Aparecimento de trincas na areia que cobria os resíduos, indicando o início da ruptura (Figura 34).
- Desprendimento dos resíduos das paredes laterais da caixa, o que confirma a hipótese dos plásticos contidos no lixo funcionarem como se fossem “fibras” (Figura 34).
- Deslocamento da sapata no sentido da cunha de ruptura (Figura 34).



Figura 34 – Observações feitas durante os ensaios.

Em todos os ensaios foi possível definir uma tensão de ruptura, ou seja, uma tensão a partir da qual ocorria um grande acréscimo dos deslocamentos, fazendo com que a sapata tombasse (Figura 35).



Figura 35 – Detalhe da ruptura em todos os ensaios.

3.3.3 – Determinação do teor de umidade da amostra

Os teores de umidade das amostras foram determinados da mesma forma como descrito no item 3.2.3. Entretanto, como nos ensaios com a manilha esperou-se cerca de 15 dias para se conseguir secar cada amostra, nesta segunda bateria de ensaios, elevou-se a temperatura da estufa para 68 °C. Com isso, conseguia-se determinar o teor de umidade em cerca de 5 dias.

Além disso, nesta segunda bateria de ensaios foi utilizada uma balança com uma precisão de 5 g, diferente da balança utilizada para os ensaios nas manilhas, cuja precisão era de 0,01 g.

3.4 – Cálculo dos parâmetros de resistência dos RSU

3.4.1 – Cálculo dos parâmetros através o ensaio de prova de carga

Para os ensaios realizados nas manilhas de concreto, os cálculos dos parâmetros de resistência foram feitos com base na fórmula de capacidade de carga desenvolvida por TERZAGHI (1943) (equação 2.3).

Como nos ensaios realizados nas manilhas de concreto, a sapata estava na superfície (Figura 36), a tensão \bar{q} é nula e a equação 2.3 modifica-se de modo que:

$$q_u = c.N_c + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \quad (3.2)$$



Figura 36 – Vista aproximada da sapata.

Como a equação 3.2 depende de dois parâmetros (c e ϕ), escolheu-se arbitrar um deles, a coesão, e calculou-se o ângulo de atrito a partir das cargas de ruptura obtidas nos ensaios.

No entanto, como descrito no item 3.2.2, não se obteve uma tensão de ruptura definida nos dois ensaios realizados. Por isso, para cada tensão aplicada, ou para cada nível de deformação, calculou-se o ângulo de atrito para oito valores de coesão, 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35 e 40 kPa.

Reescrevendo a equação (3.2) em função de ϕ , tem-se:

$$F(\phi) = c.f_1(\phi) + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B.f_2(\phi) - q_u \quad (3.3)$$

em que,

$$f_1(\phi) = N_c = \cot g(\phi) \cdot \left\{ \frac{\left(e^{\left(\frac{3}{4} \cdot \pi - \frac{\phi}{2} \right) \cdot \tan(\phi)} \right)^2}{2 \cdot \cos^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)} - 1 \right\} \quad (3.4)$$

$$f_2(\phi) = N_\gamma = 1,1 \cdot \left\{ \frac{\left(e^{\left(\frac{3}{4} \cdot \pi - \frac{\phi}{2} \right) \cdot \tan(\phi)} \right)^2}{2 \cdot \cos^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)} - 1 \right\} \cdot \tan(1,3 \cdot \phi) \quad (3.5)$$

Logo, dado um valor de q_u , o valor do ângulo de atrito é determinado de tal forma que $F(\phi) = 0$.

No primeiro ensaio, foram calculados através de uma planilha Excel, 80 valores de ângulo de atrito (ϕ), pois foram aplicados 10 estágios de tensão (q_u), e para cada um deles foi arbitrado 8 valores de coesão (c).

No segundo, foram calculados através da mesma planilha, 48 valores de ângulo de atrito (ϕ), pois foram aplicados 6 estágios de tensão (q_u), e para cada um deles foi arbitrado 8 valores de coesão (c).

3.4.2 – Cálculo dos parâmetros através do ensaio de estabilidade de talude

Nesse caso, o cálculo dos parâmetros de resistência foi realizado por retro análise da superfície de ruptura usando-se o método de equilíbrio limite de Bishop Simplificado e o programa computacional SLOPE/W. A carga de ruptura aplicada pela sapata entrou na análise como uma sobrecarga uniformemente distribuída na superfície do talude de RSU. Além disso, considerou-se que as poro-pressões eram nulas, ou seja, que a ruptura era drenada.

A partir dessas premissas, arbitrava-se uma coesão (c) e determinava-se o valor do ângulo de atrito (ϕ) correspondente ao fator de segurança $F=1$ para a superfície de ruptura observada no ensaio, quando a sobrecarga era máxima (ruptura).

O cálculo dos parâmetros seguiu as seguintes etapas:

- Após cada ensaio, mediu-se a cunha de ruptura como mostra a Figura 37, através dos comprimentos $L1$ e $L2$.
- Em seguida, desenhou-se num papel milimetrado, o talude de lixo em escala, e determinou-se com a ajuda de um compasso, as coordenadas do centro e o raio do círculo que passa pelos pontos a e b indicados na Figura 37.

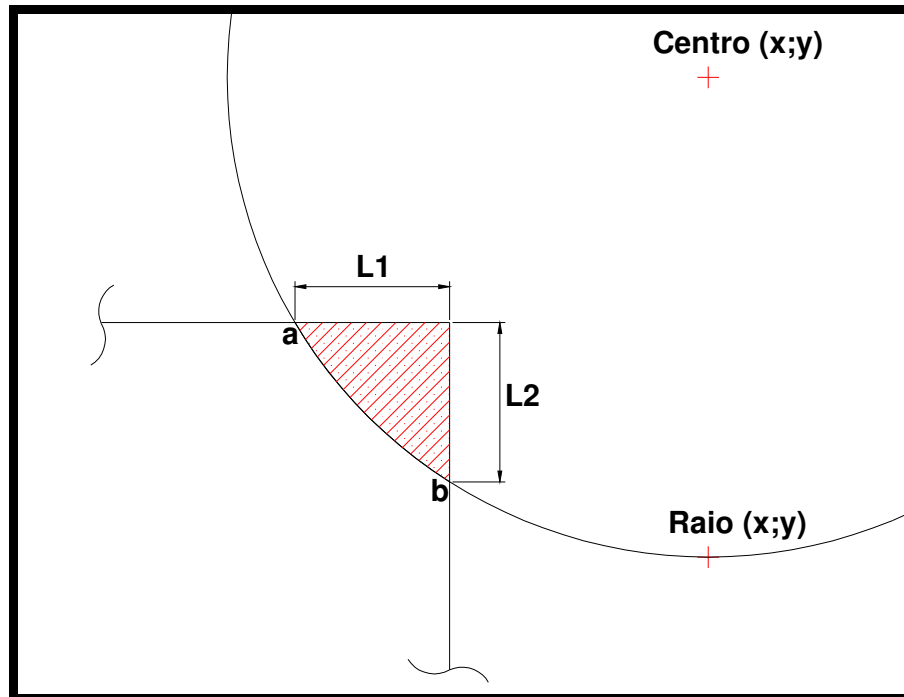


Figura 37 – Esquema para calcular a superfície de ruptura.

- No programa GEO-SLOPE, representou-se o talude de lixo, especificando-se, além das coordenadas do centro e o raio do círculo, o valor da tensão de ruptura representada por uma sobrecarga uniformemente distribuída nos 10 cm de largura da sapata (Figura 38).

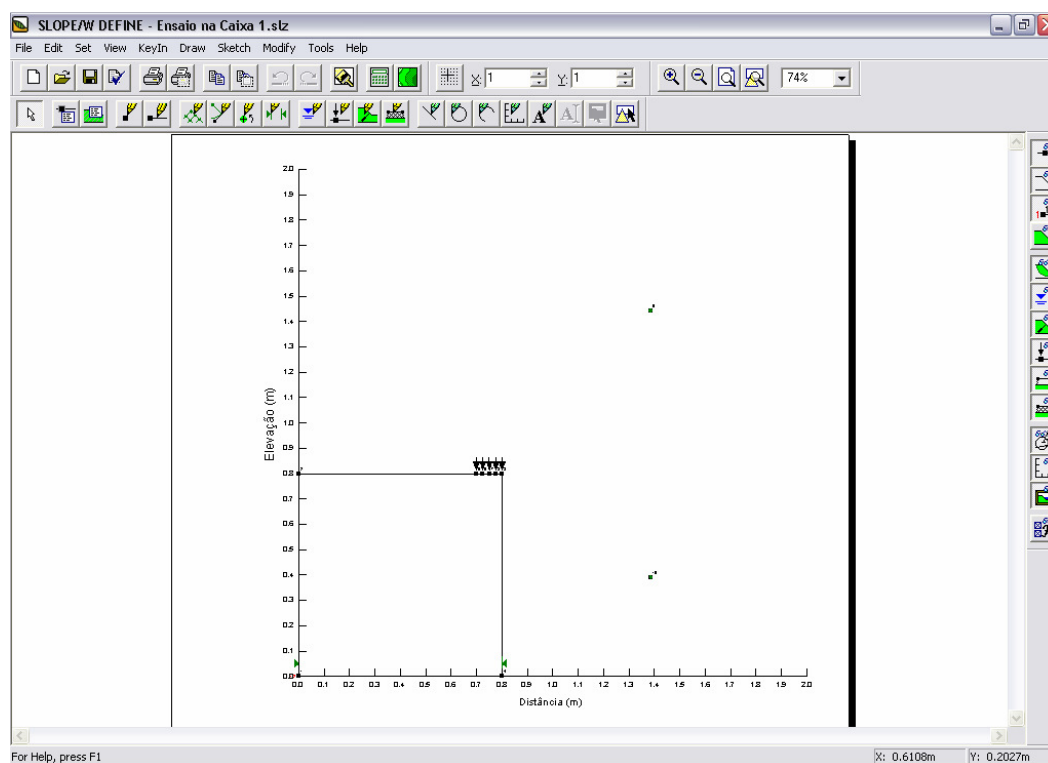


Figura 38 – Especificação das coordenadas e do carregamento no programa GEO-SLOPE.

- Arbitraram-se oito valores de coesão, 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35 e 40 kPa, para os três primeiros ensaios, com peso específico dos resíduos igual a 7 kN/m^3 .
- Determinou-se, por tentativas, o valor do ângulo de atrito, para cada valor de coesão arbitrada, de modo que o fator de segurança (F) pelo método de Bishop Simplificado, fosse igual a 1. (Figuras 39 e 40)
- Para os três últimos ensaios, com peso específico dos resíduos igual a 5 kN/m^3 , foram arbitrados valores de coesão entre 5 e 17 kPa, pois acima desses valores, o programa acusava não solução do fator de segurança por Bishop.

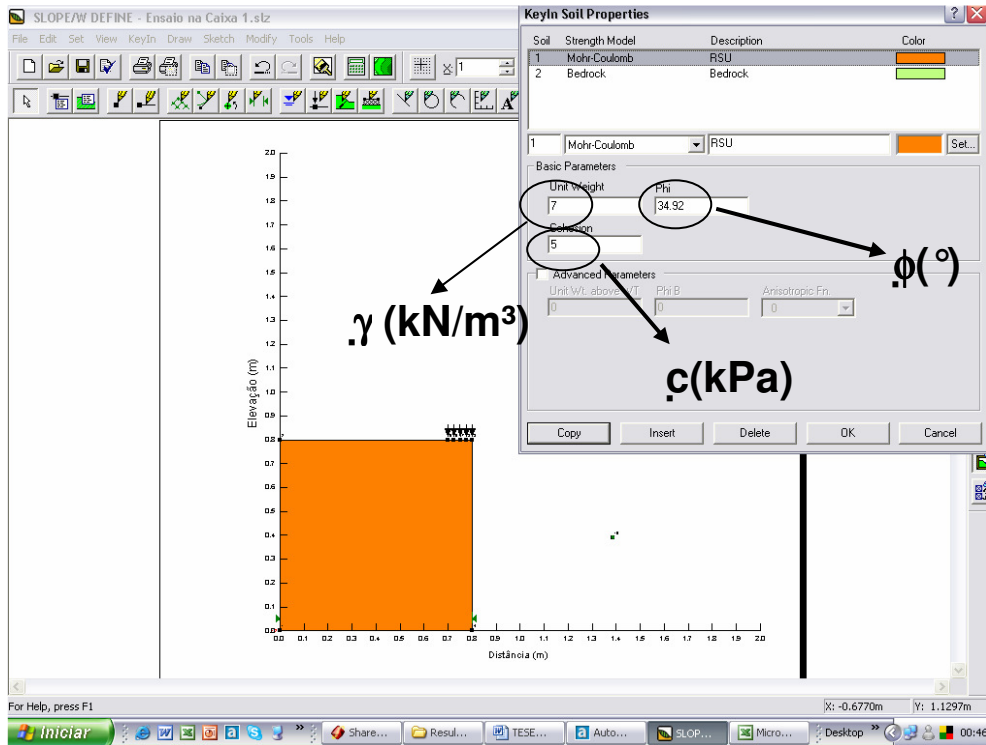


Figura 39 – Cálculo do ângulo de atrito por tentativas.

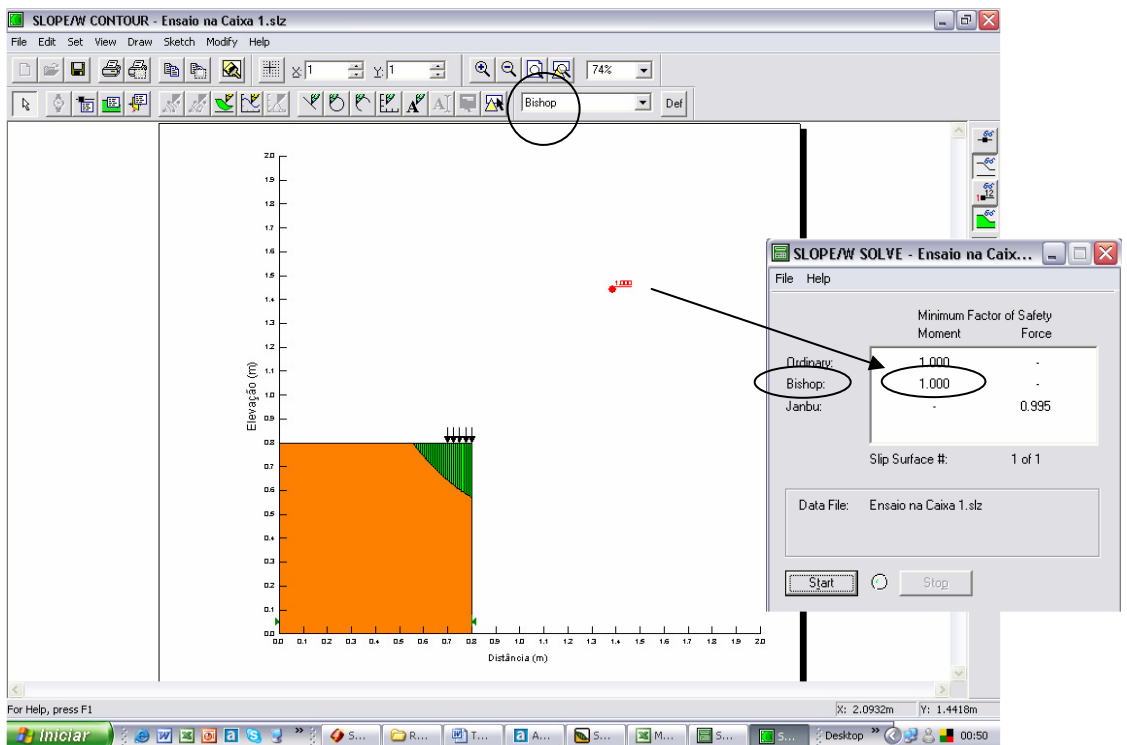


Figura 40 – Superfície de ruptura para fator de segurança F = 1.

4- APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo, apresentam-se inicialmente, as características das amostras ensaiadas. Em seguida, são apresentados e discutidos, os resultados obtidos nos ensaios de prova de carga e nos ensaios de estabilidade de talude.

Finalmente, são apresentadas algumas comparações entre as duas metodologias utilizadas para a obtenção dos parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos.

4.1 – Características das amostras ensaiadas.

Na Tabela 8, é apresentada a composição gravimétrica das amostras de RSU, utilizadas nos ensaios.

Tabela 8 – Composição gravimétrica da amostra de lixo.

MATERIAL	PESO TOTAL (Kg)	% em Peso
Matéria orgânica*	182,70	60,48
Papel e Papelão	37,90	12,55
Plásticos	39,80	13,17
Vidros	6,10	2,02
Alumínio	3,00	0,99
Metais Ferrosos	2,90	0,96
Borracha e Couro	2,70	0,89
Madeira	2,00	0,66
Trapo	8,90	2,95
Outros**	16,10	5,33
Total	302,10	100,00

*Restos de alimentos (frutas, verduras, folhas etc.); **Materiais de difícil classificação.

As amostras de RSU tinham a mesma composição em todos os ensaios, uma vez que o interesse da pesquisa foi de determinar os parâmetros de resistência, variando outras propriedades.

No Brasil, os resíduos sólidos urbanos apresentam um teor de matéria orgânica na faixa de 60% a 65%, além de 12% a 18% de papel e 8% a 12% de plásticos em geral. Assim, os resultados encontrados com a gravimetria da amostra, demonstraram-se coerentes com os resíduos brasileiros.

Nas Tabelas 9 e 10, são apresentadas as características das amostras de RSU, ensaiadas nos dois ensaios de prova de carga (manilhas), e nos seis ensaios de estabilidade de talude (caixa de madeira).

Tabela 9 – Características das amostras de RSU submetidas aos ensaios nas manilhas de concreto.

Índices	Amostra Ensaio 1	Amostra Ensaio 2
w (%)	91,11	90,83
γ (kN/m ³)	7,00	5,00
γ_d (kN/m ³)	3,66	2,62

w – teor de umidade; γ – peso específico natural; γ_d – peso específico seco.

Tabela 10 – Características das amostras de RSU submetidas aos ensaios na caixa de madeira.

Índices	Amostra Ensaio 1	Amostra Ensaio 2	Amostra Ensaio 3	Amostra Ensaio 4	Amostra Ensaio 5	Amostra Ensaio 6
w (%)	63,52	80,87	41,75	41,75	62,40	78,62
γ (kN/m ³)	7,00	7,00	7,00	5,00	5,00	5,00
γ_d (kN/m ³)	4,28	3,87	4,94	3,53	3,08	2,80

w – teor de umidade; γ – peso específico natural; γ_d – peso específico seco.

4.2 – Ensaios de capacidade de carga

4.2.1 – Primeiro ensaio ($\gamma = 7,0$ kN/m³)

Nas Figuras 41 a 50, apresentam-se as curvas recalque *versus* tempo, nas diversas etapas de carregamento do primeiro ensaio.

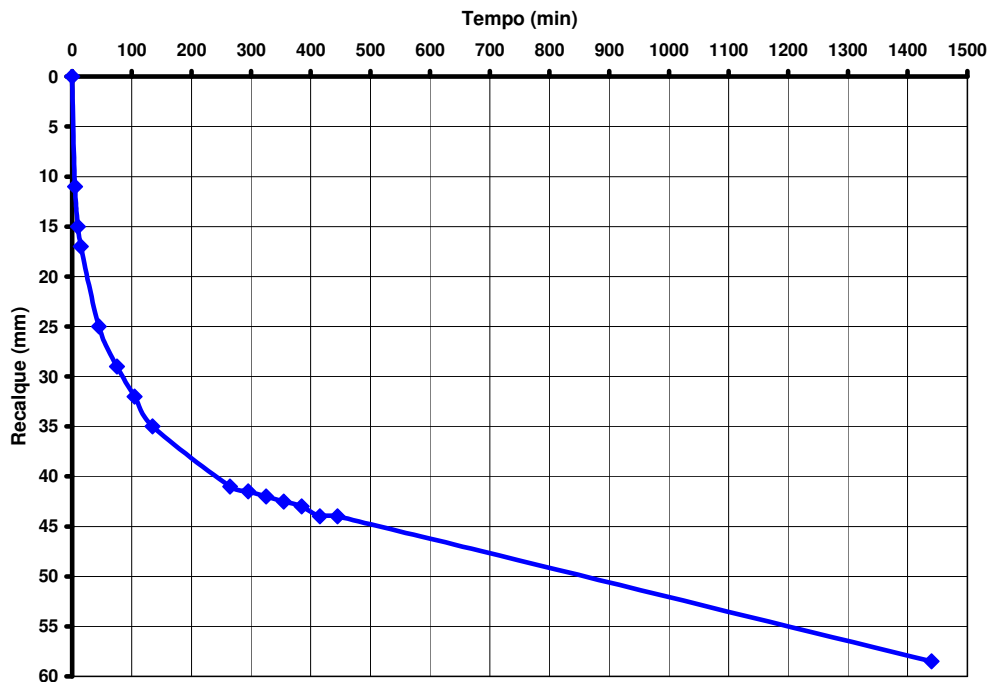


Figura 41 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 6,10 kN).

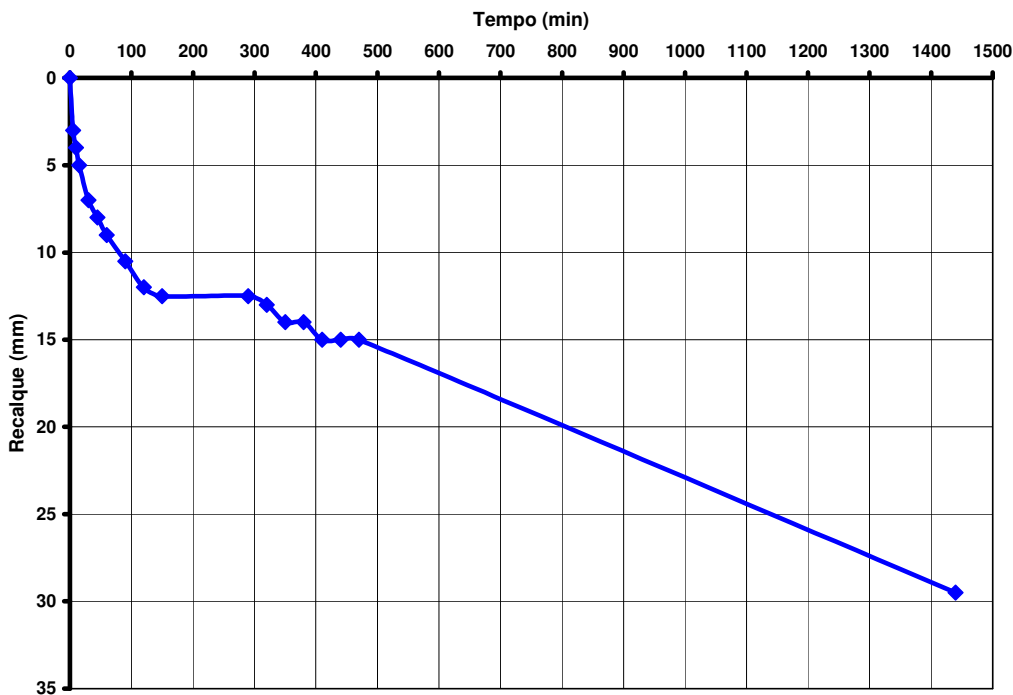


Figura 42 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 8,42 kN).

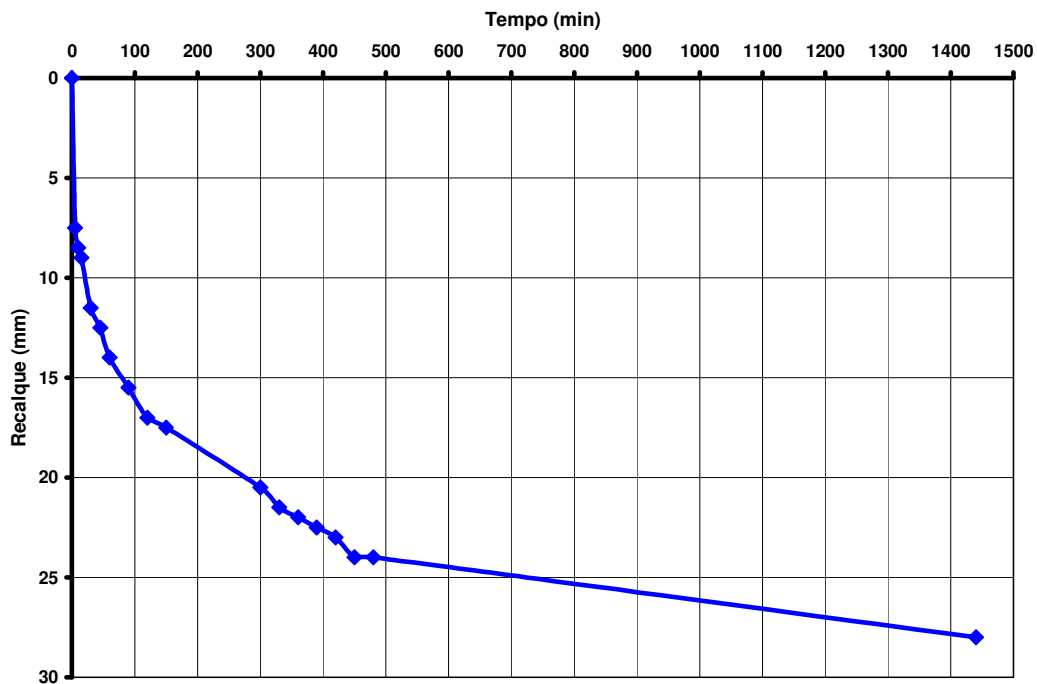


Figura 43 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 10,74 kN).

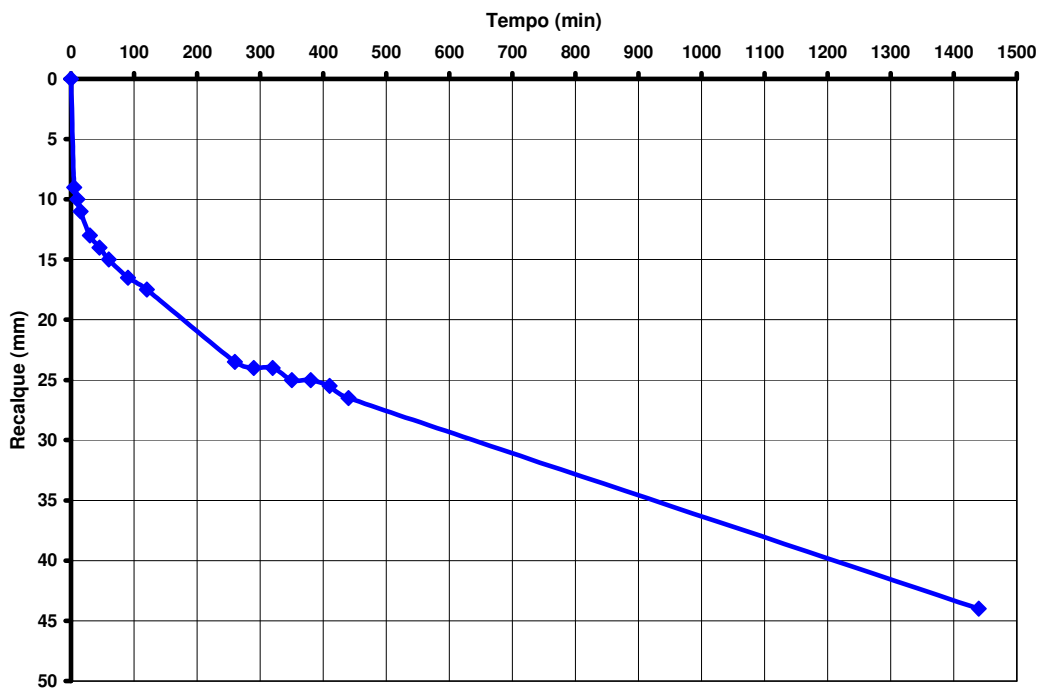


Figura 44 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 13,06 kN).

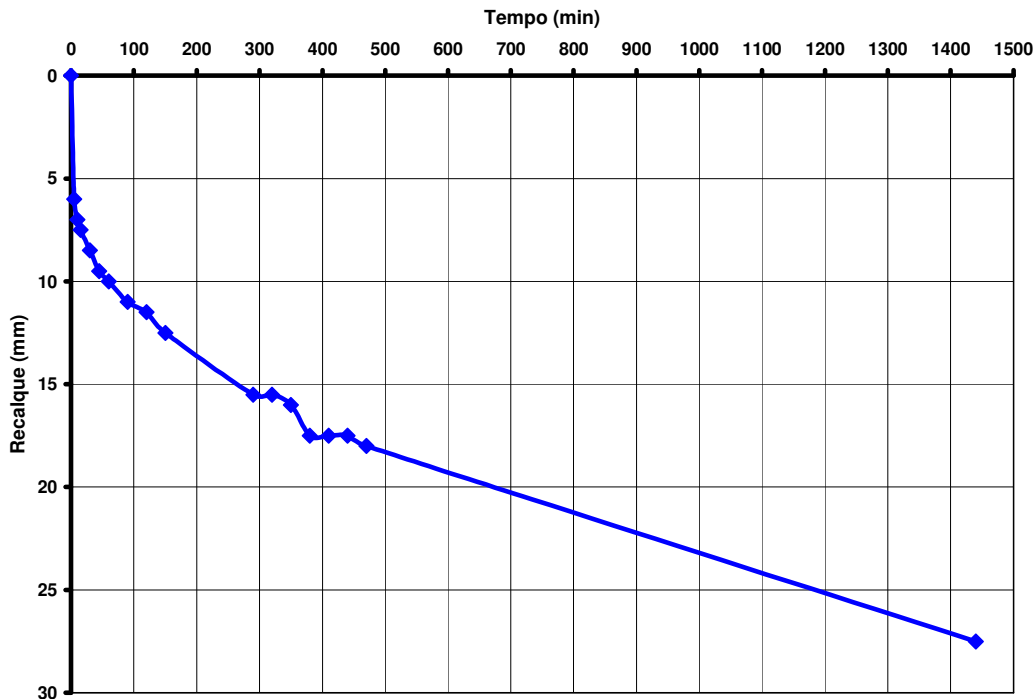


Figura 45 – Curva recalque (mm) versus tempo (min) (carga = 15,38 kN).

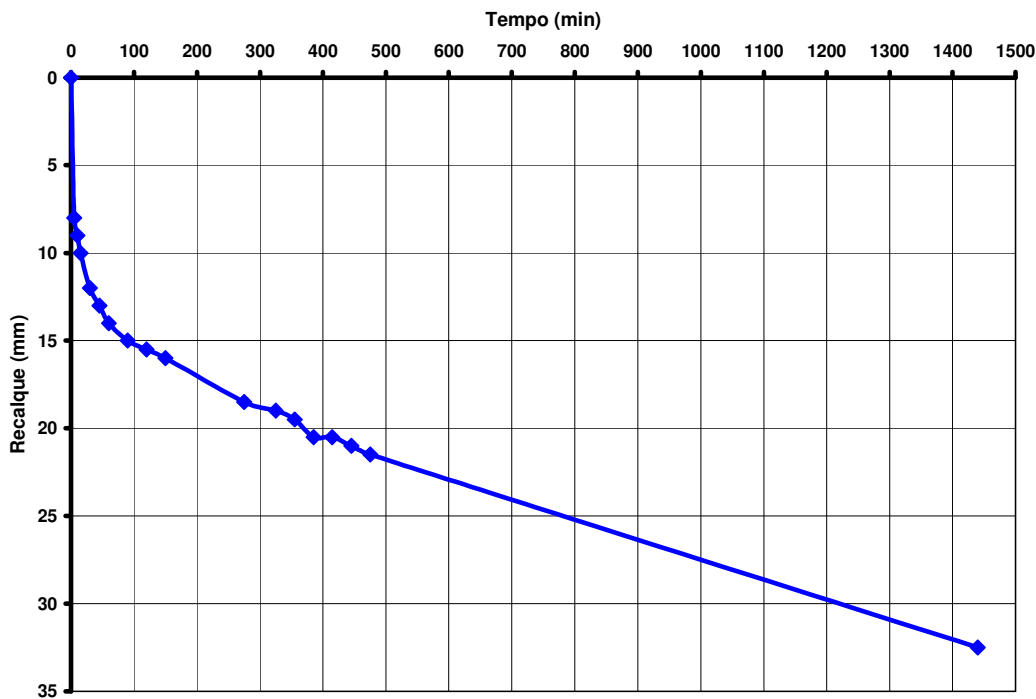


Figura 46 – Curva recalque (mm) versus tempo (min) (carga = 17,70 kN).

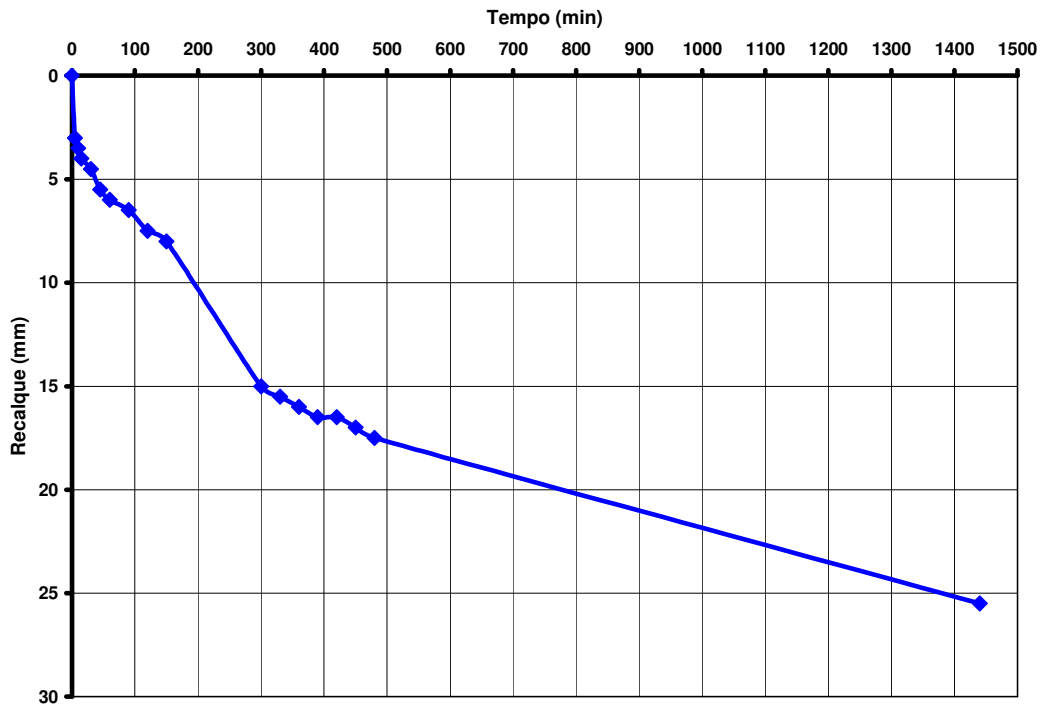


Figura 47 – Curva recalque (mm) versus tempo (min) (carga = 20,02 kN).

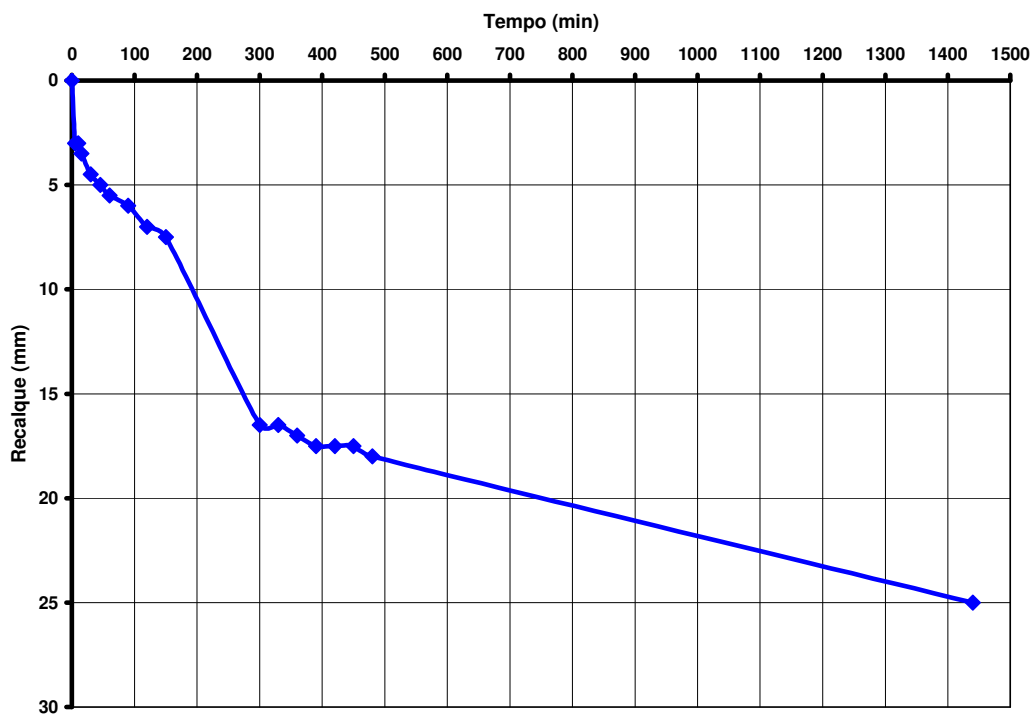


Figura 48 – Curva recalque (mm) versus tempo (min) (carga = 22,34 kN).

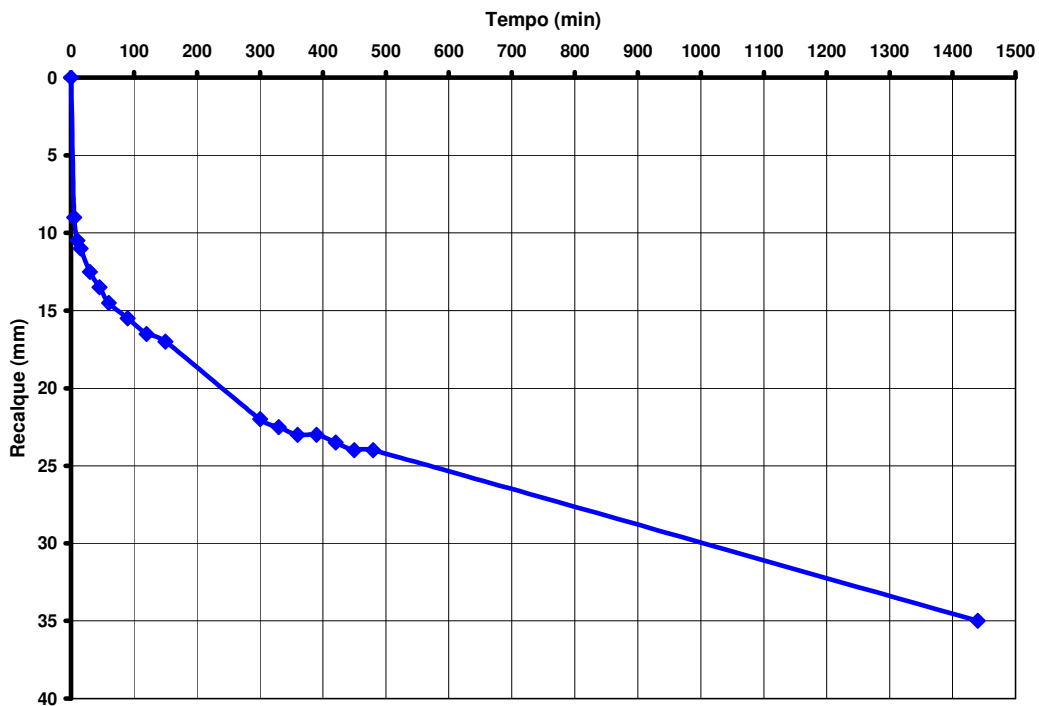


Figura 49 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 24,66 kN).

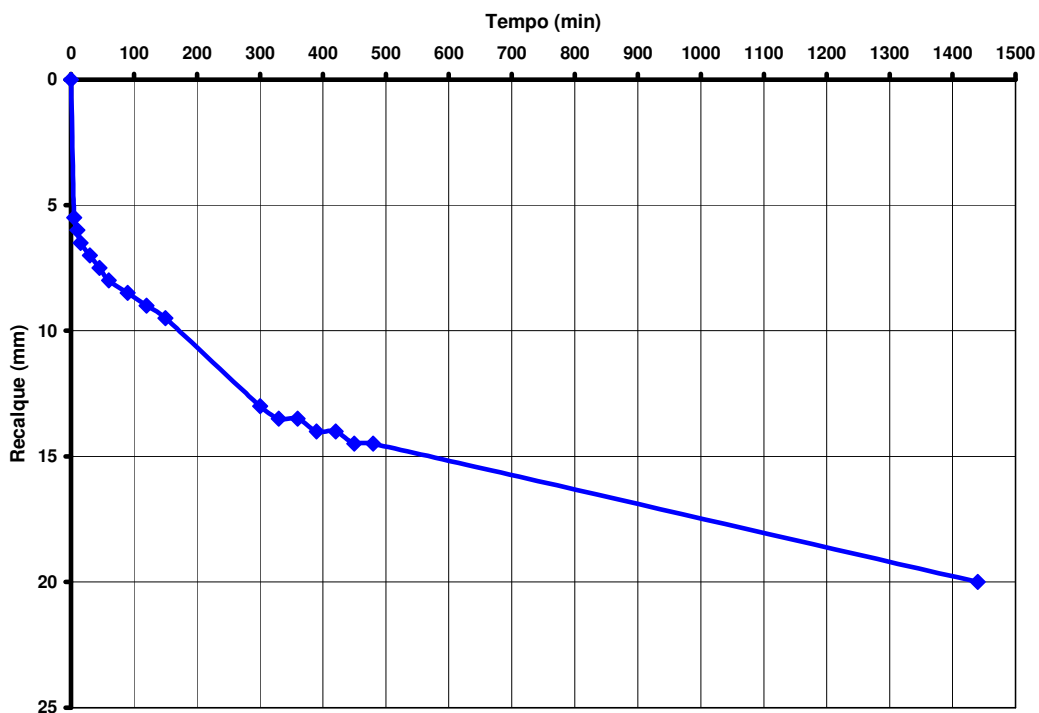


Figura 50 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 26,98 kN).

Nas Figuras 41 a 50 pode-se observar o seguinte:

- A duração de todas as etapas de carregamento foi de 24 horas;

- Em todas as etapas ocorreu um recalque imediato de, no mínimo, 20%, do recalque total medido no final da etapa;
- Com poucas exceções, as curvas obtidas nas diversas etapas foram razoavelmente suaves;
- Ao final das 24 horas, em todas as etapas, ainda existia uma clara tendência de os recalques continuarem;
- Não se observa uma aceleração de recalques à medida que o carregamento aumenta, indicando que a prova de carga estaria se aproximando da ruptura.

Na Figura 51, é apresentada a curva recalque *versus* tempo de todos os carregamentos, de uma forma geral, obtida com o primeiro ensaio. Mais uma vez, não se observa que os recalques estão aumentando, indicando proximidade da ruptura.

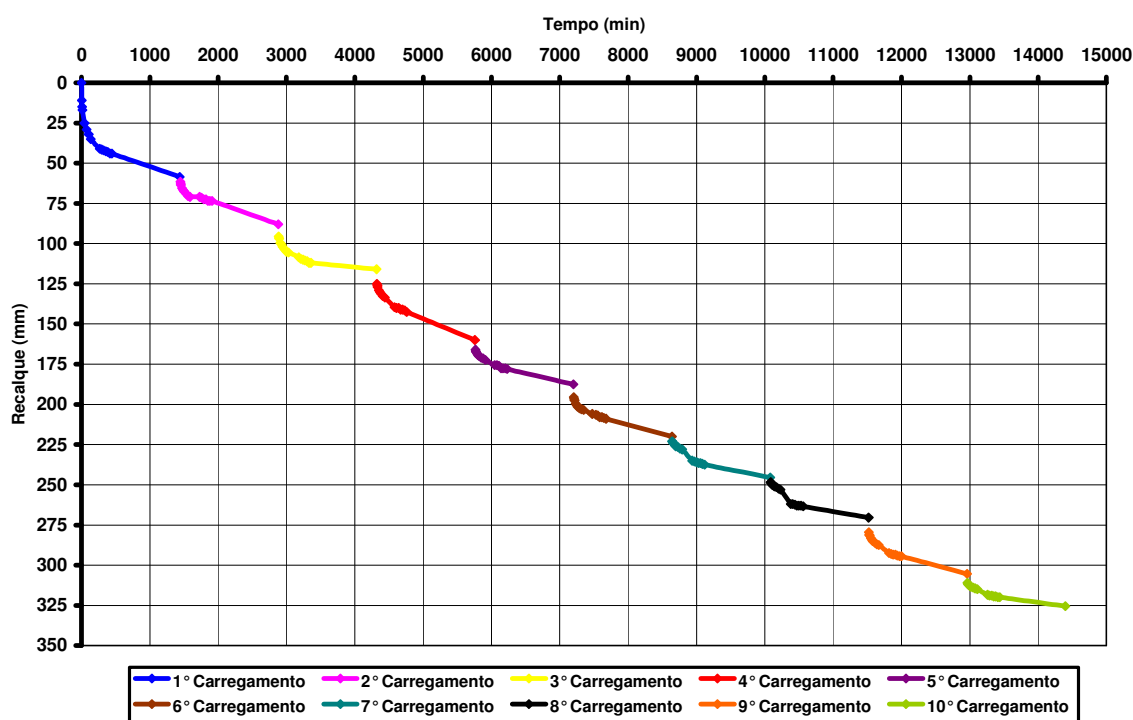


Figura 51 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) do 1° ensaio ($\gamma = 7,0 \text{ kN/m}^3$).

Na Tabela 11 apresentam-se os dados completos do carregamento aplicado, e os recalques acumulados no primeiro ensaio. Na Figura 52 apresenta-se a curva tensão versus deformação obtida no ensaio.

Tabela 11 – Dados completos e acumulados do 1º ensaio.

Carga (kN)	Tensão (kPa)	Recalque (mm)	Deformação (%)
0,00	0,00	0,00	0,00
6,10	303,49	58,50	6,50
8,42	418,83	88,00	9,78
10,74	534,17	116,00	12,89
13,06	649,51	160,00	17,78
15,38	764,85	187,50	20,83
17,70	880,20	220,00	24,44
20,02	995,54	245,50	27,28
22,34	1110,88	270,50	30,06
24,66	1226,22	305,50	33,94
26,98	1341,56	325,50	36,17
15,38	764,85	318,00	35,33
2,20	109,42	292,00	32,44

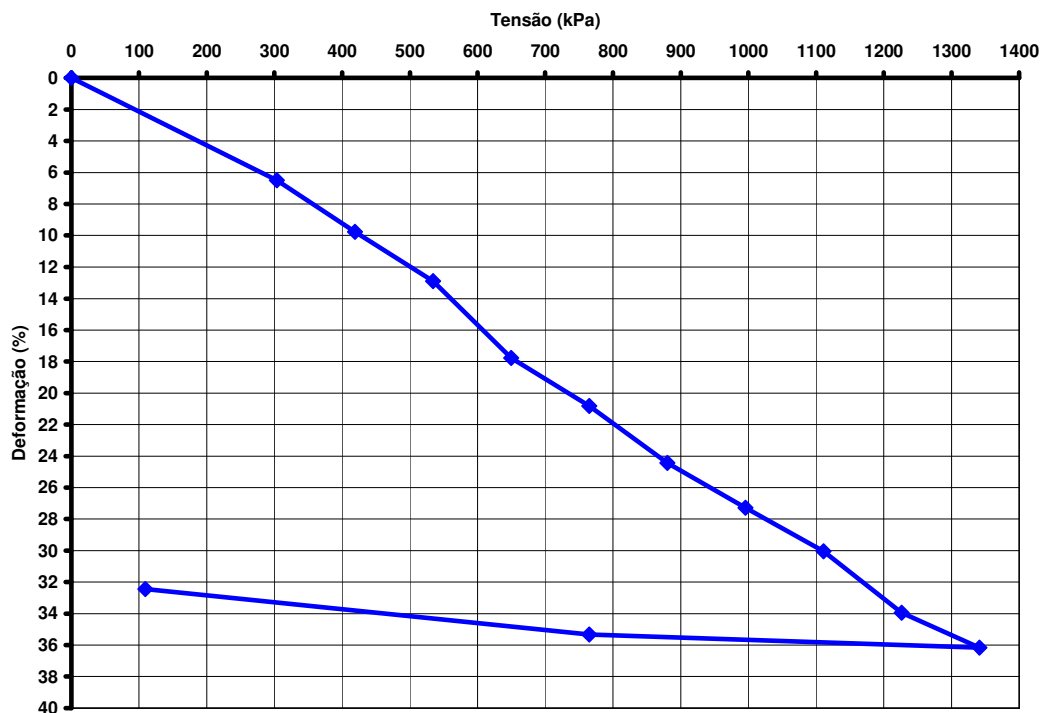


Figura 52 – Curva tensão (kPa) versus deformação (%) do 1º ensaio.

Como se pode observar na Figura 52, a curva tensão *versus* deformação dos RSU, não apresenta uma tensão de ruptura definida. Por esse motivo foram determinados, por retro-análise, valores de ângulo de atrito para cada deformação correspondente às diversas etapas de carregamento e para oito valores de coesão arbitrados (0; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35 e 40 kPa), utilizando a equação de TERZAGHI (1943) para capacidade de carga, como descrito no item 3.4.1.

A Tabela 12 apresenta os parâmetros de resistência, ϕ ($^{\circ}$) e c (kPa), para as 10 etapas de carregamento do ensaio.

Tabela 12 – Parâmetros de resistência obtidos no primeiro ensaio.

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA									
Etapas de carregamento	Tensão q_u (kPa)	Coesão (kPa)							
		5	10	15	20	25	30	35	40
		ϕ°	ϕ°	ϕ°	ϕ°	ϕ°	ϕ°	ϕ°	ϕ°
1°Carreg.	303,49	34,66	27,20	21,84	17,59	14,01	10,90	8,14	5,64
2°Carreg.	418,83	37,74	31,06	26,22	22,37	19,12	16,29	13,78	11,51
3°Carreg.	534,17	39,88	33,74	29,26	25,69	22,67	20,04	17,70	15,59
4°Carreg.	649,51	41,50	35,76	31,55	28,19	25,34	22,87	20,66	18,67
5°Carreg.	764,85	42,78	37,36	33,37	30,17	27,47	25,11	23,01	21,11
6°Carreg.	880,20	43,84	38,68	34,87	31,80	29,21	26,95	24,94	23,11
7°Carreg.	995,54	44,73	39,79	36,13	33,18	30,68	28,51	26,56	24,81
8°Carreg.	1110,88	45,50	40,74	37,21	34,36	31,95	29,84	27,96	26,26
9°Carreg.	1226,22	46,17	41,58	38,16	35,40	33,06	31,01	29,19	27,54
10°Carreg.	1341,56	46,76	42,32	39,00	36,31	34,04	32,05	30,27	28,66

Na Figura 53 apresenta-se a relação entre os parâmetros de resistência e o nível de deformação obtido com o ensaio realizado. Observa-se que, supondo $c = 10$ kPa e $\phi = 28^\circ$, conforme recomendado por AZEVEDO (2005), a deformação correspondente é da ordem de 7%, consideravelmente baixa para RSU.

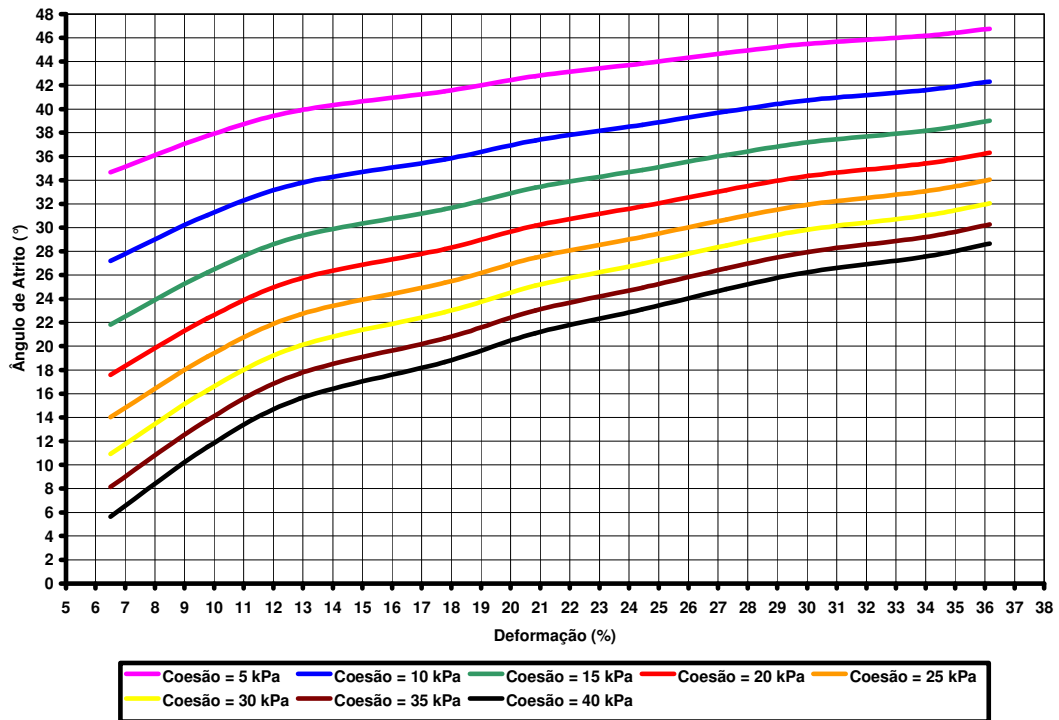


Figura 53 – Parâmetros de resistência em função da deformação obtida no 1º ensaio.

OLIVEIRA (2002) relata que as curvas tensão x deformação típicas de RSU, apresentadas por CARVALHO (1999), exibem ganho contínuo de resistência (Figura 9) sem apresentar um patamar de ruptura. Nesses casos tem sido comum a obtenção dos parâmetros para uma dada deformação (15 a 20%).

A Figura 54 apresenta a relação entre os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito), para quatro valores de deformação (10; 15; 17 e 20%).

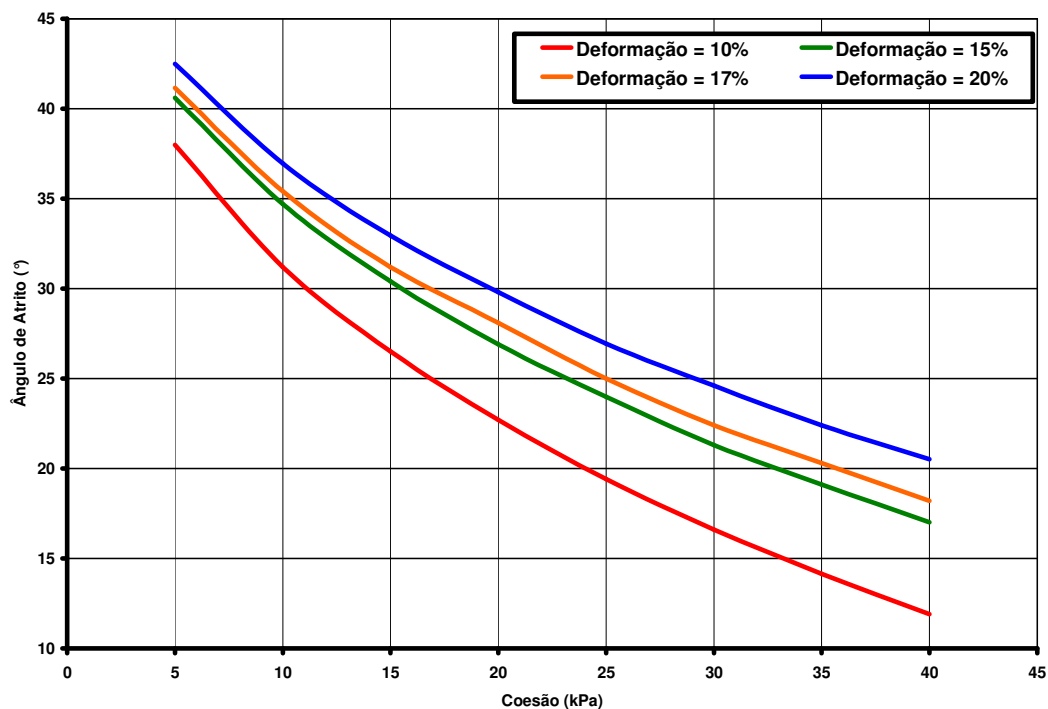


Figura 54 – Parâmetros de resistência em função de quatro níveis de deformação (1º ensaio – $\gamma = 7 \text{ kN/m}^3$).

Observa-se na Figura 54, que para deformações entre 15% a 20%, para coesão $c = 10 \text{ kPa}$, o valor do ângulo de atrito ϕ é da ordem de 35° . Portanto, os valores recomendados por AZEVEDO (2005) estariam a favor da segurança.

4.2.2 – Segundo ensaio ($\gamma = 5,0 \text{ kN/m}^3$)

Nas Figuras 55 a 60, apresentam-se as curvas recalque *versus* tempo, nas diversas etapas de carregamento do segundo ensaio.

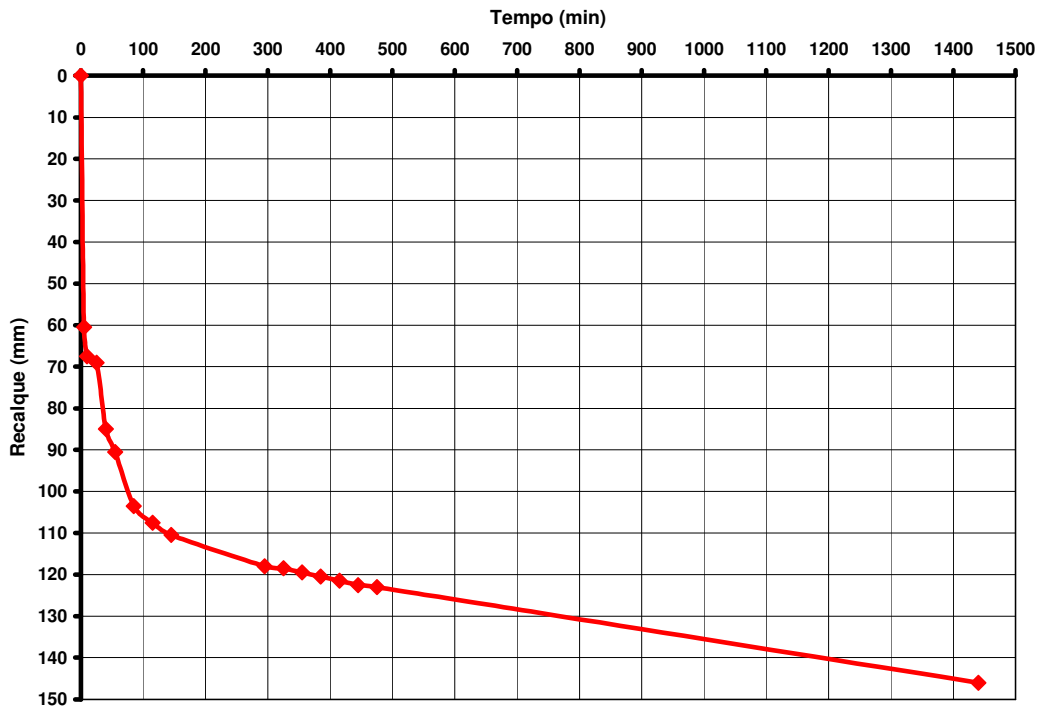


Figura 55 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 6,10 kN).

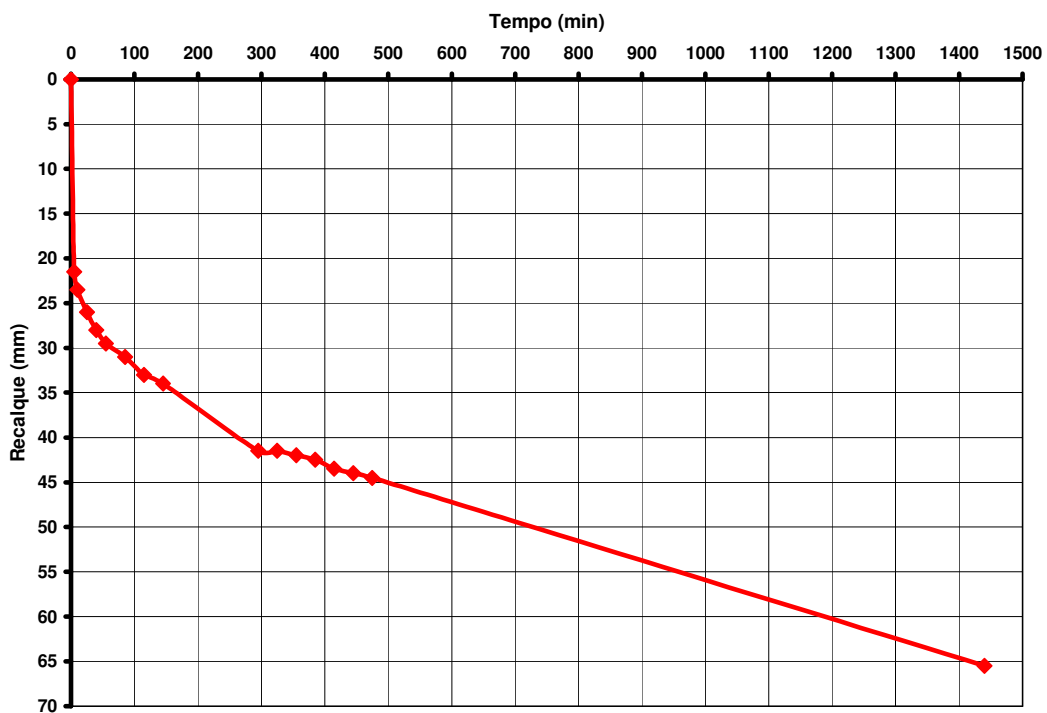


Figura 56 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 8,42 kN).

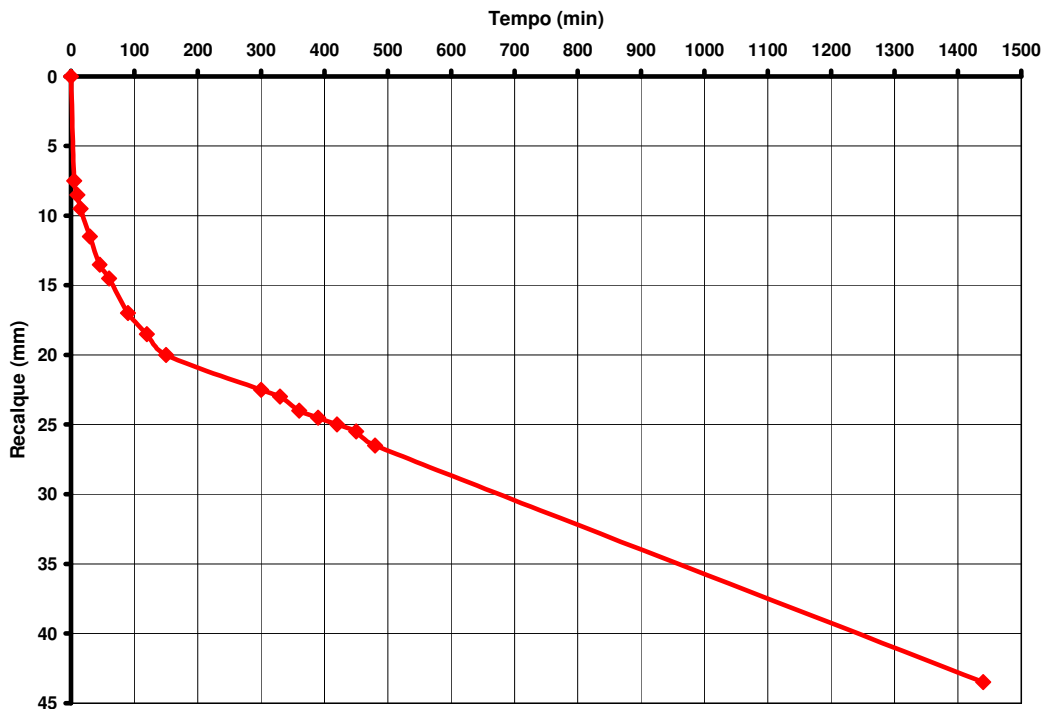


Figura 57 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 10,74 kN).

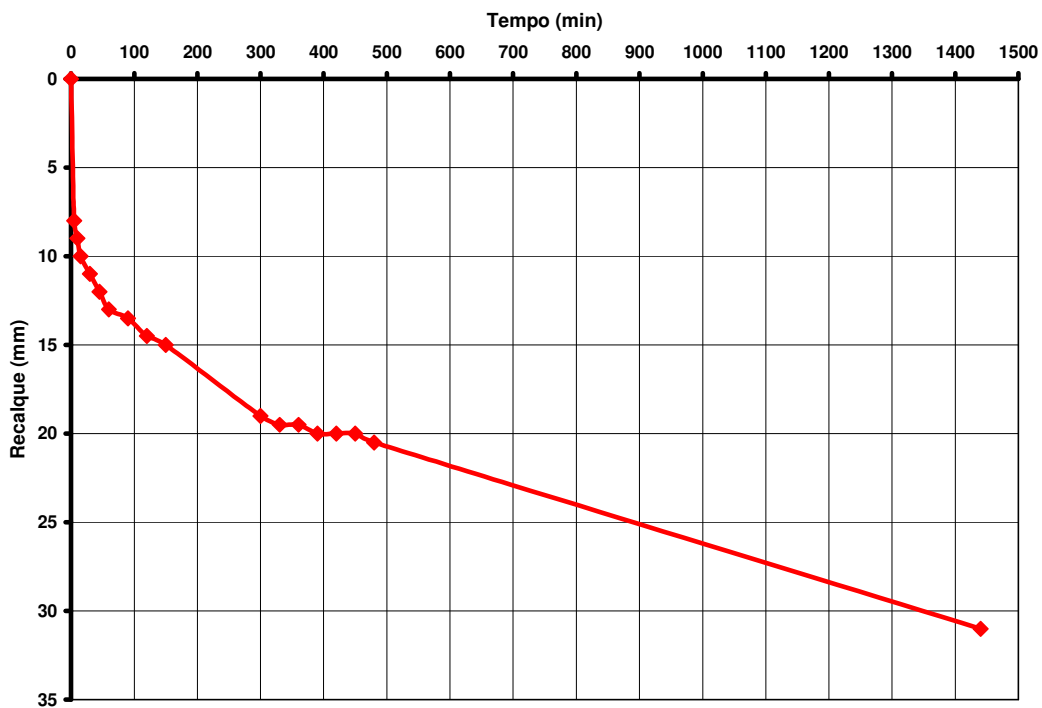


Figura 58 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 13,06 kN).

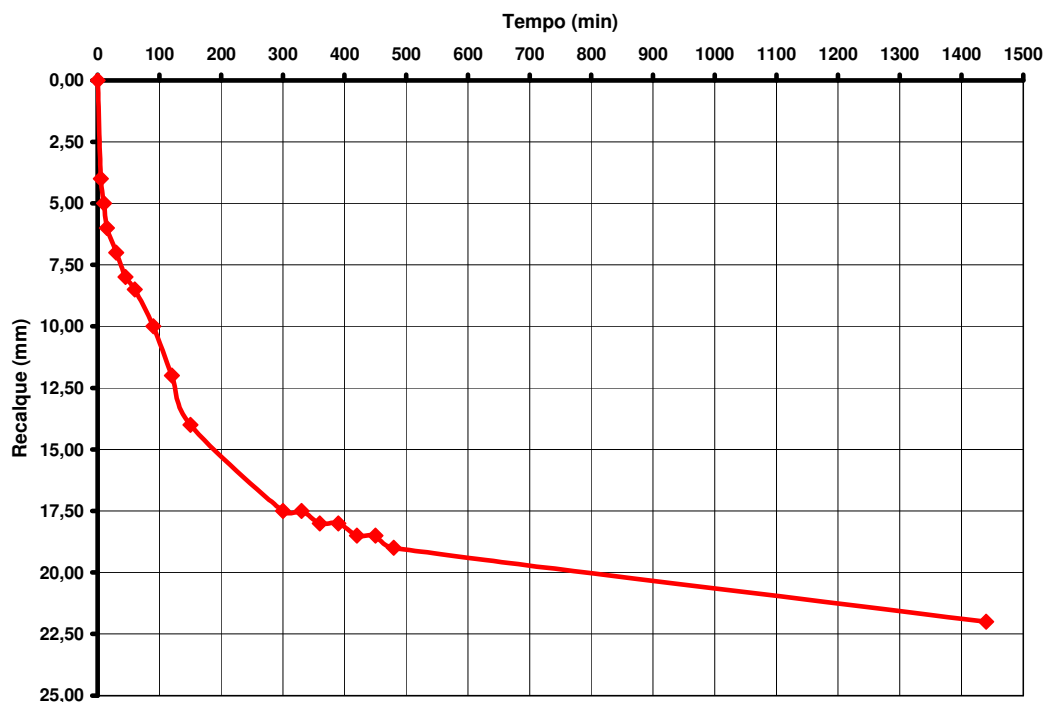


Figura 59 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 15,38 kN).

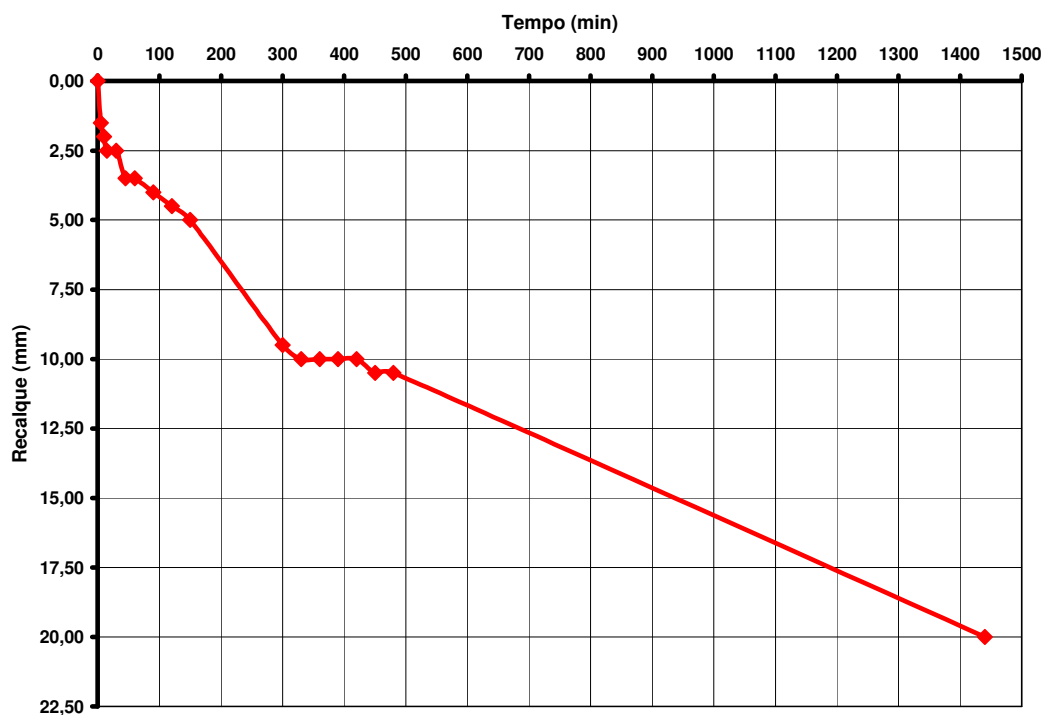


Figura 60 – Curva recalque (mm) *versus* tempo (min) (carga = 17,70 kN).

Na Figura 61, é apresentada a curva recalque *versus* tempo de todos os carregamentos, de uma forma geral, obtida com o segundo ensaio.

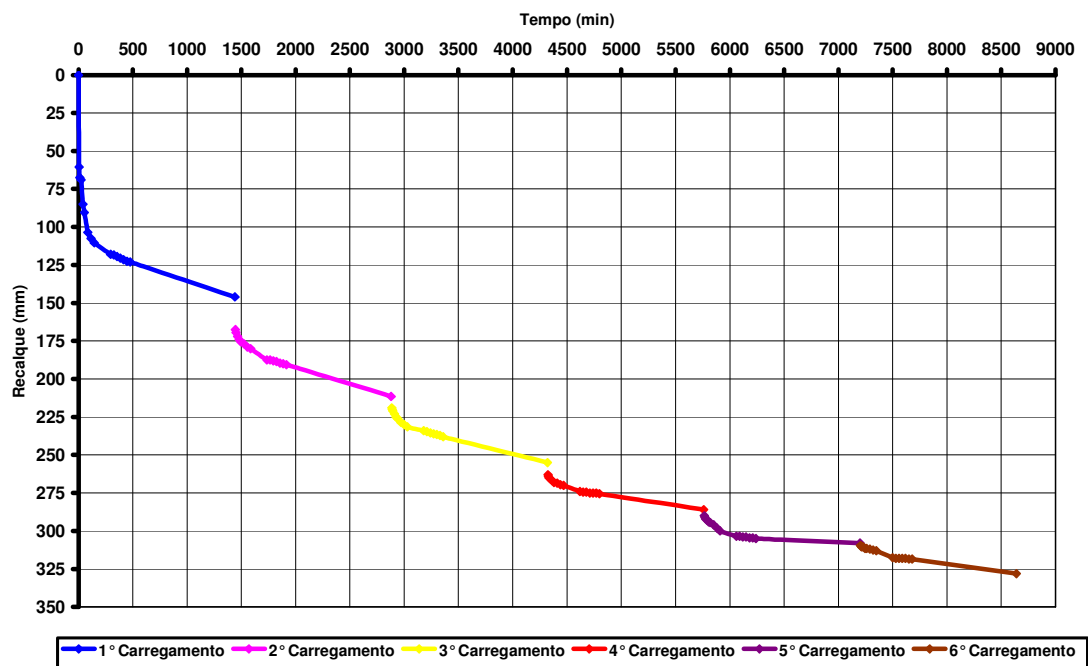


Figura 61 – Curva recalque (mm) versus tempo (min) do 2º ensaio ($\gamma = 5,0 \text{ kN/m}^3$).

Na Tabela 13 apresentam-se os dados completos do carregamento aplicado, bem como os recalques acumulados no segundo ensaio e na Figura 62 apresenta-se a curva tensão versus deformação.

Tabela 13 – Dados completos e acumulados do 2º ensaio.

Carga (kN)	Tensão (kPa)	Recalque (mm)	Deformação (%)
0,00	0,00	0,00	0,00
6,10	303,49	146,00	16,22
8,42	418,83	211,50	23,50
10,74	534,17	255,00	28,33
13,06	649,51	286,00	31,78
15,38	764,85	308,00	34,22
17,70	880,20	328,00	36,44
2,20	109,42	310,00	34,44

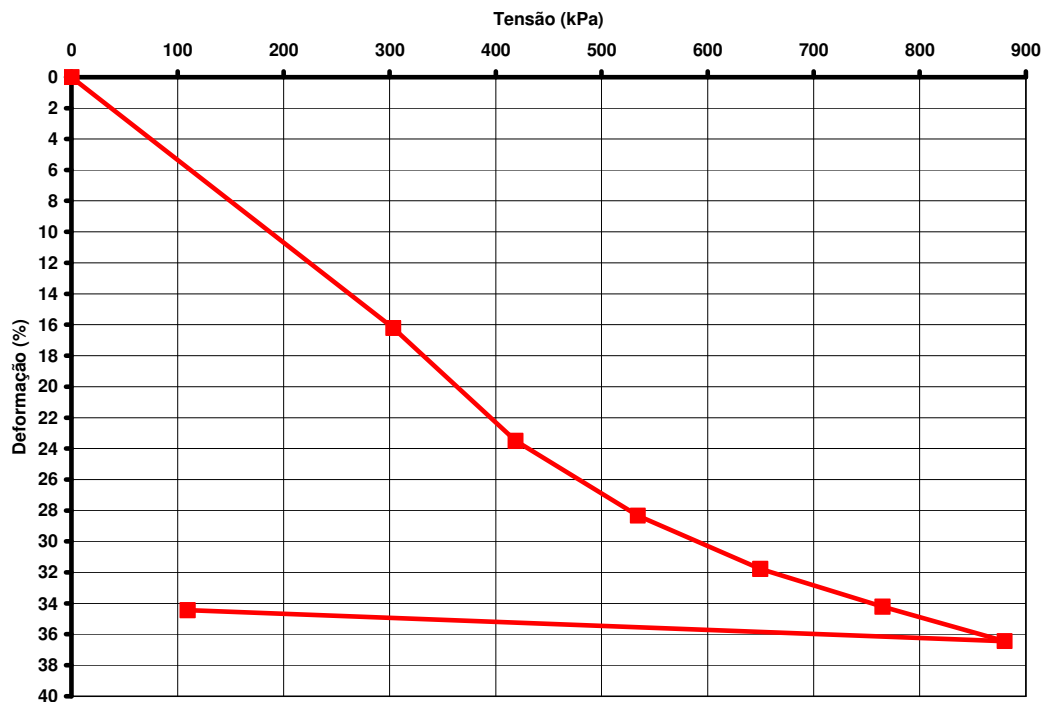


Figura 62 – Curva tensão (kPa) versus deformação (%) do 2º ensaio.

Todas as observações feitas no primeiro ensaio permanecem válidas para o segundo experimento. Mais uma vez, não se evidenciou que à medida que o carregamento aumentava, a sapata estivesse se aproximando da condição de ruptura. Por esse motivo também foram determinados valores de ângulo de atrito para cada nível de deformação das diversas etapas de carregamento e para oito valores de coesão arbitrados (0; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35 e 40 kPa). Fez-se isso, como no primeiro experimento, por retro-análise, utilizando a equação de TERZAGHI (1943) para capacidade de carga, como descrito no item 3.4.1.

A Tabela 14 apresenta os parâmetros de resistência, ϕ ($^{\circ}$) e c (kPa), para as 6 etapas de carregamento do ensaio realizado.

Tabela 14 – Parâmetros de resistência obtidos no segundo ensaio.

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA									
Etapas de carregamento	Tensão q_u (kPa)	Coesão (kPa)							
		5	10	15	20	25	30	35	40
		ϕ°	ϕ°	ϕ°	ϕ°	ϕ°	ϕ°	ϕ°	ϕ°
1°Carreg.	303,49	34,89	27,28	21,88	17,61	14,02	10,91	8,14	5,64
2°Carreg.	418,83	38,01	31,16	26,27	22,39	19,14	16,30	13,79	11,51
3°Carreg.	534,17	40,17	33,85	29,32	25,72	22,69	20,06	17,71	15,60
4°Carreg.	649,51	41,81	35,89	31,63	28,23	25,37	22,89	20,68	18,68
5°Carreg.	764,85	43,11	37,50	33,45	30,22	27,50	25,13	23,03	21,12
6°Carreg.	880,20	44,17	38,82	34,95	31,86	29,25	26,98	24,96	23,13

Na Figura 63 apresenta-se a relação entre os parâmetros de resistência e o nível de deformação obtido com o ensaio realizado. Neste caso observa-se que para $c = 10$ kPa e $\phi = 28^\circ$ a deformação correspondente é igual a 17%, da ordem das que se evidenciam em aterros sanitários.

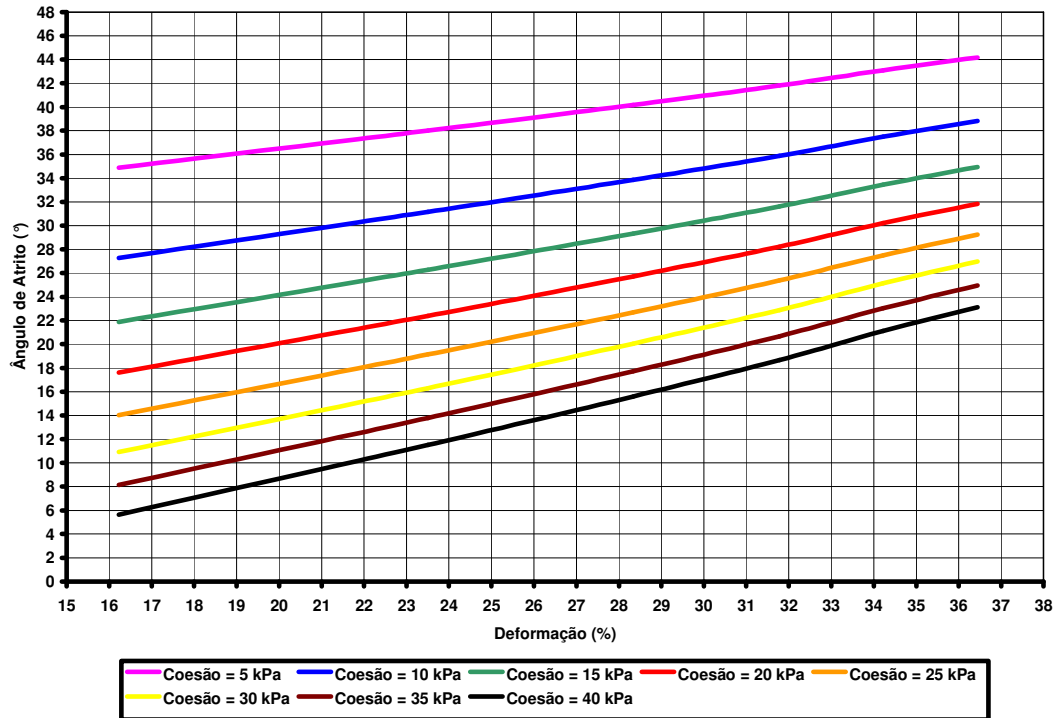


Figura 63 – Parâmetros de resistência em função da deformação obtida no 2° ensaio.

De forma análoga à realizada no primeiro ensaio, fez-se uma análise dos parâmetros de resistência para valores de deformação entre 15 a 20%.

Na Figura 64 apresenta-se a relação entre os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito), para dois valores de deformação (17 e 20%).

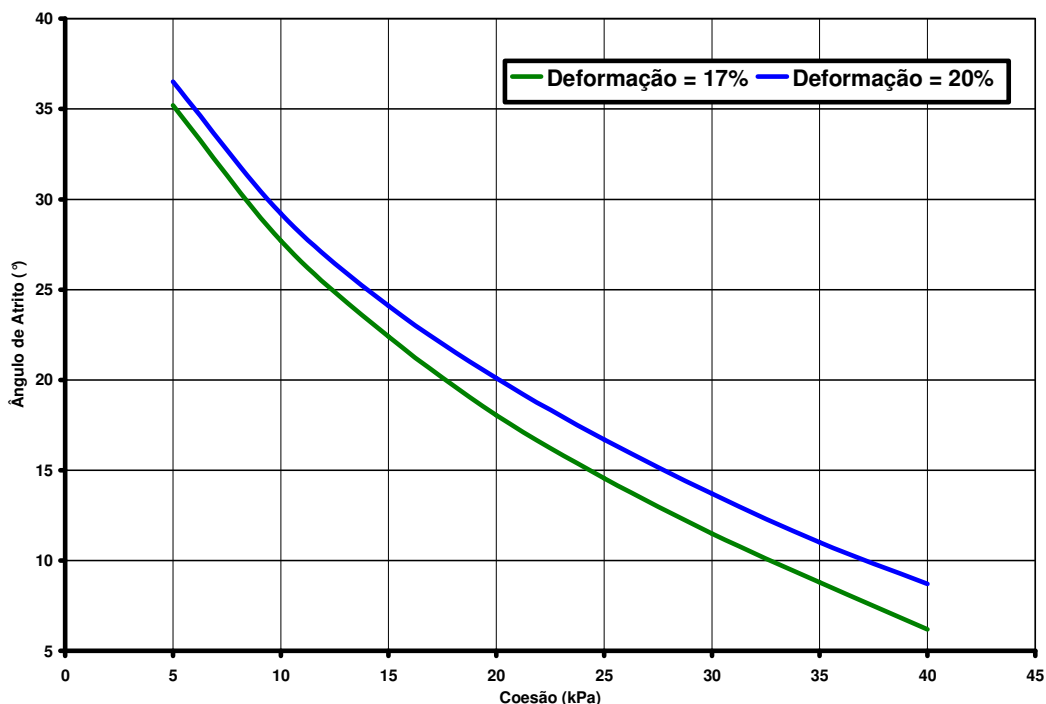


Figura 64 – Parâmetros de resistência em função de dois níveis de deformação.

Observa-se na Figura 64, em que os RSU foram ensaiados com um peso específico menor, que para uma deformação de 17% (entre 15-20%), o valor do ângulo de atrito ϕ obtido para coesão $c = 10$ kPa (valor típico usado em projetos de aterros sanitários), é aproximadamente igual a 28° . Portanto, a adoção destes valores ainda se mostra adequada, apesar de menos segura que quando os resíduos estão mais compactados.

4.2.3 – Comparação entre os dois ensaios de prova de carga.

Na Figura 65 apresentam-se as curvas recalque *versus* tempo, para os dois ensaios realizados nas manilhas de concreto e, na Figura 66, é apresentada uma comparação entre as curvas tensão *versus* deformação, obtidas nos dois ensaios. Em ambas pode-se observar que, para uma mesma tensão aplicada, o recalque é bem maior no segundo ensaio, em que o peso específico dos resíduos foi igual a 5 kN/m^3 .

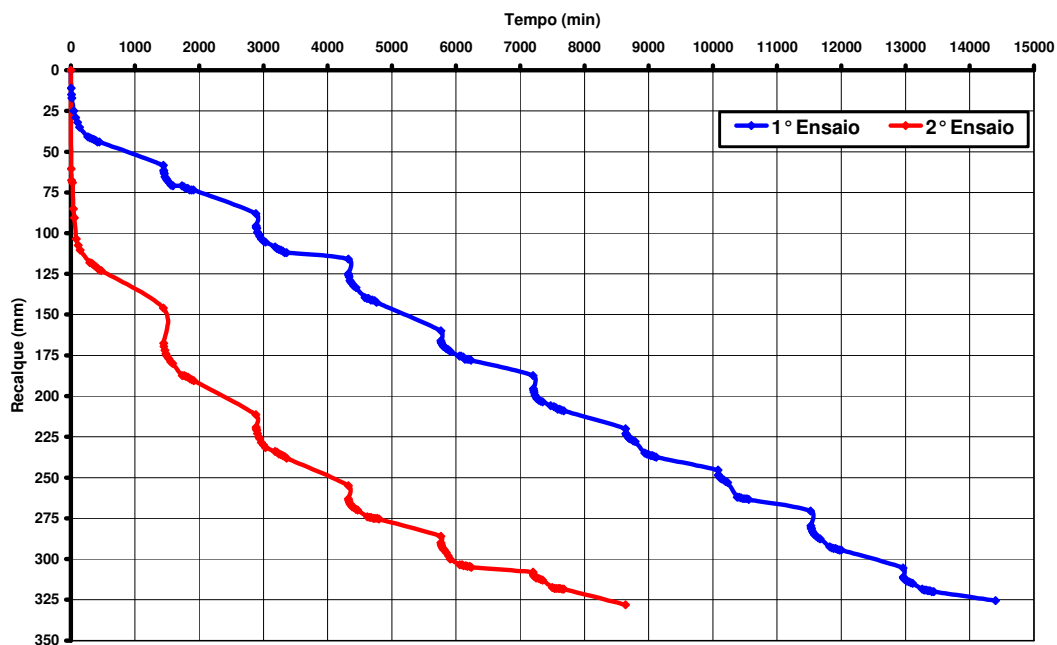


Figura 65 – Comparação entre as curvas recalque *versus* tempo, obtida nos dois ensaios.

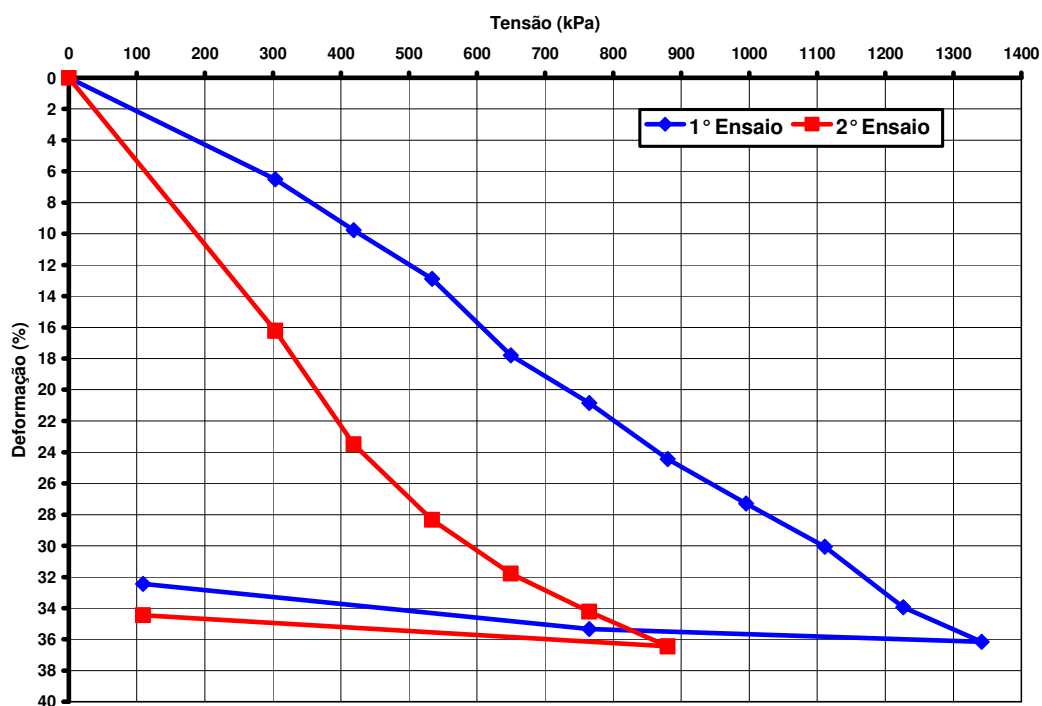


Figura 66 – Comparação entre as curvas tensão *versus* deformação obtida nos dois ensaios.

A Figura 67 apresenta uma comparação entre os parâmetros de resistência obtidos nos dois ensaios, em função de quatro valores de deformação.

Observa-se na Figura 67, que quanto maior a deformação, maiores são os valores de ângulo de atrito (ϕ), para uma mesma coesão (c) e mesmo peso específico.

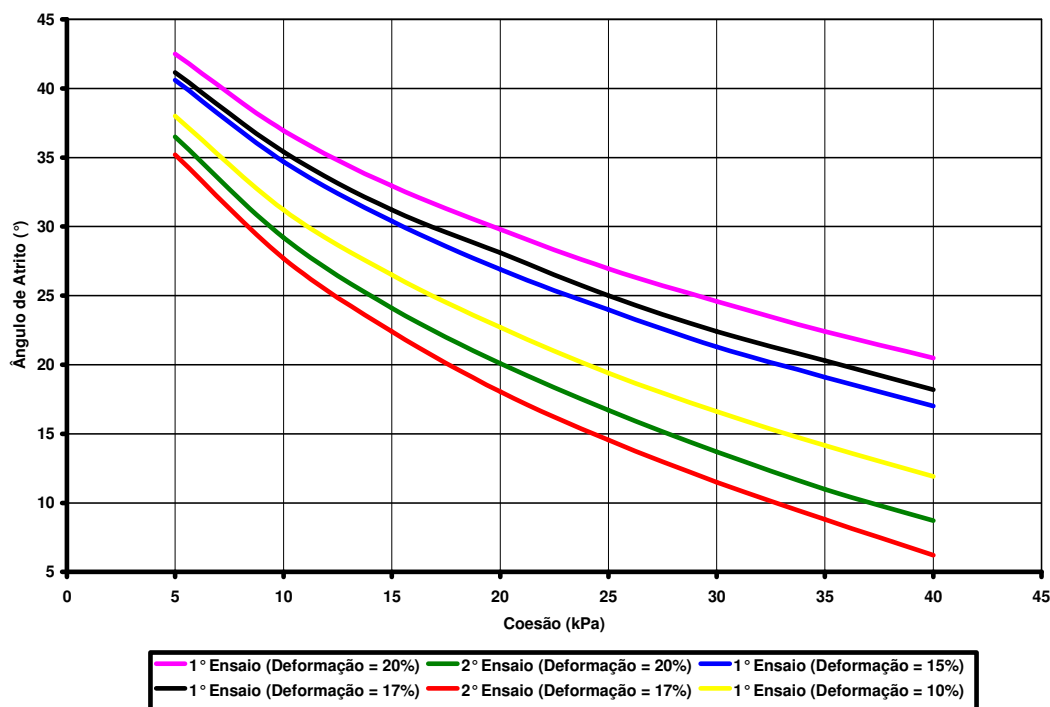


Figura 67 – Comparação entre os parâmetros de resistência em função da deformação e do peso específico dos RSU.

Observa-se também na Figura 67, que os valores de ângulo de atrito encontrados no ensaio realizado com peso específico igual a 5 kN/m^3 , são inferiores em relação aos valores encontrados no ensaio realizado com peso específico igual a 7 kN/m^3 , isso para uma mesma deformação e uma mesma coesão (kPa).

4.3 – Ensaio de estabilidade de talude.

Os resultados encontrados nos seis ensaios realizados na caixa de madeira, simulando um talude de lixo, foram divididos em dois itens. No primeiro são tratados os três ensaios realizados com peso específico dos RSU igual a 7 kN/m³, variando-se o teor de umidade. No segundo, tratam-se os três ensaios realizados com peso específico dos resíduos igual a 5 kN/m³, também com diferentes teores de umidade.

4.3.1 – Ensaio com peso específico igual a 7 kN/m³.

Na Figura 68 apresentam-se as curvas tensão *versus* deslocamento dos três primeiros ensaios, em função do teor de umidade.

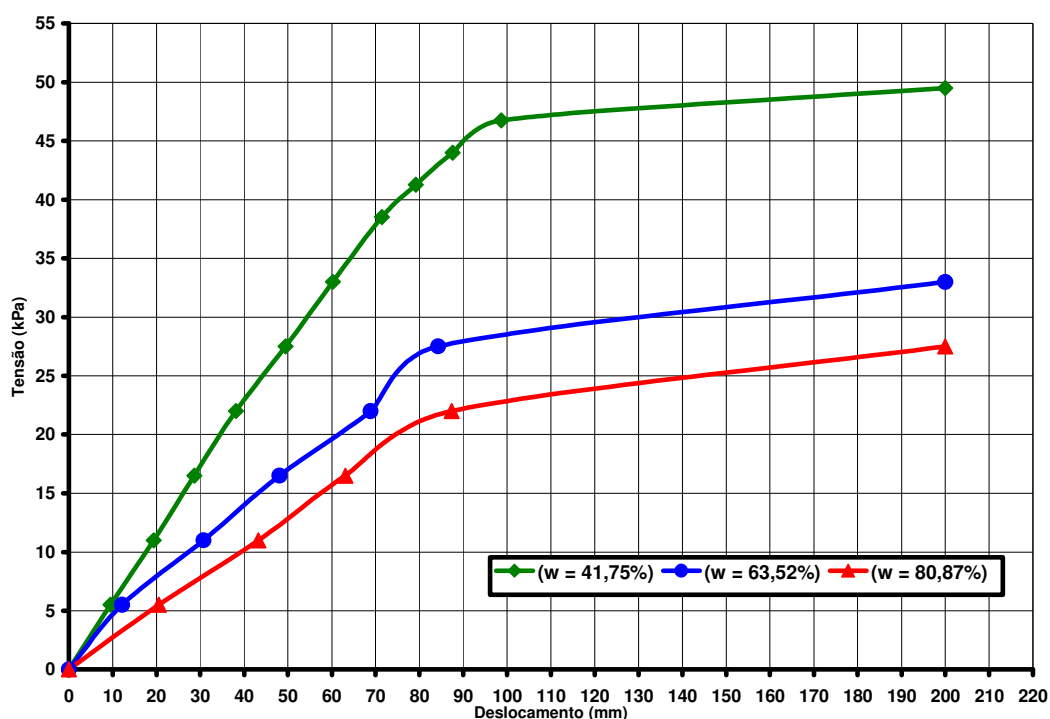


Figura 68 – Curvas tensão *versus* deslocamento em função do teor de umidade ($\gamma = 7 \text{ kN/m}^3$).

Na Figura 68 constata-se, como era esperado, que quanto maior a umidade dos resíduos, menor é a tensão de ruptura encontrada.

Na Tabela 15 e na Figura 69 são apresentados os valores dos parâmetros de resistência obtidos com os três primeiros ensaios, usando a metodologia descrita no Capítulo 3.

Tabela 15 – Parâmetros de resistência obtidos nos três primeiros ensaios.

Parâmetros de Resistência ($\gamma = 7 \text{ kN/m}^3$)			
Coesão (kPa)	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio
	(w = 63,52%)	(w = 80,87%)	(w = 41,75%)
Ângulo de Atrito (°)			
5	36,80	36,50	36,90
10	34,30	33,70	35,45
15	31,63	30,67	33,92
20	28,75	27,32	32,35
25	25,55	23,80	30,70
30	22,25	20,10	28,88
35	18,80	16,05	27,10
40	14,90	11,70	25,25

Observa-se na Tabela 15, que quanto maior a umidade, menor é o ângulo de atrito obtido para um mesmo valor de coesão.

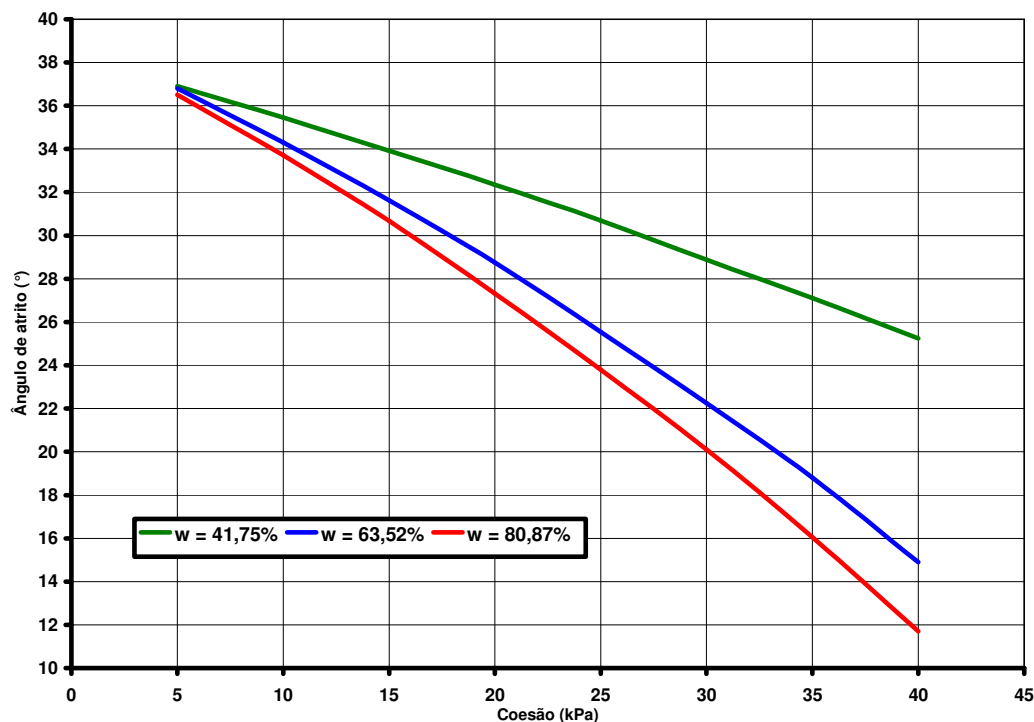


Figura 69 – Parâmetros de resistência em função do teor de umidade ($\gamma = 7 \text{ kN/m}^3$).

Pode-se observar, tanto na Tabela 15, quanto na Figura 69, que para os valores de coesão entre 5 a 15 kPa, os valores de ângulo de atrito calculados são bem próximos, independentemente do teor de umidade dos resíduos, sendo que para coesão igual a 5 kPa, os ângulos de atrito são praticamente iguais.

4.3.2 – Ensaios com peso específico igual a 5 kN/m^3 .

Na Figura 70 apresentam-se as curvas tensão *versus* deslocamento dos três últimos ensaios, em função do teor de umidade.

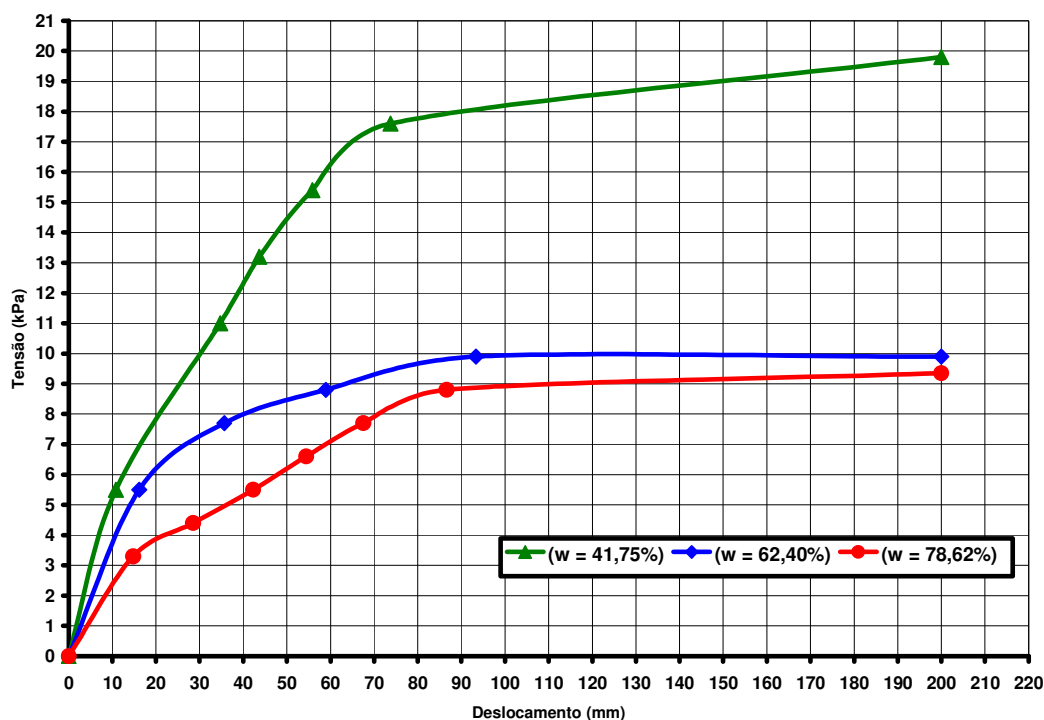


Figura 70 – Curvas tensão *versus* deslocamento em função do teor de umidade ($\gamma = 5 \text{ kN/m}^3$).

Pode-se observar também na Figura 70, que quanto maior a umidade dos resíduos, menor é a tensão de ruptura encontrada. Além disso, observa-se que as tensões de ruptura encontradas no 5º e 6º ensaios, cujos teores de umidade são iguais a 62,40% e 78,62% respectivamente, foram bem próximas, apesar de uma diferença de umidade em torno de 16%. No entanto, comparando-se com a tensão de ruptura encontrada no 4º ensaio ($w = 41,75\%$), esse valores foram bastante inferiores.

Os parâmetros de resistência também foram obtidos de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 3. No entanto, os valores de coesão arbitrados não foram iguais em todos os ensaios, uma vez que o método de Bishop não apresentava solução para valores de coesão acima de 30 kPa no 4º ensaio, acima de 16,58 kPa no 5º ensaio e acima de 14,13 kPa no 6º ensaio.

Na Tabela 16, são apresentados os valores dos parâmetros calculados, enquanto que na Figura 71 os mesmos resultados são apresentados graficamente.

Tabela 16 – Parâmetros de resistência obtidos nos três últimos ensaios.

Parâmetros de Resistência ($\gamma = 5 \text{ kN/m}^3$)			
Coesão (kPa)	4° ensaio	5° ensaio	6° ensaio
	(w = 41,75%)	(w = 62,40%)	(w = 78,62%)
Ângulo de Atrito (°)			
5,00	36,60	33,20	28,37
10,00	31,68	22,40	15,10
14,13	27,05	11,10	0,80
15,00	26,00	8,33	-
16,58	24,05	3,00	-
20,00	19,35	-	-
25,00	11,90	-	-
30,00	3,44	-	-

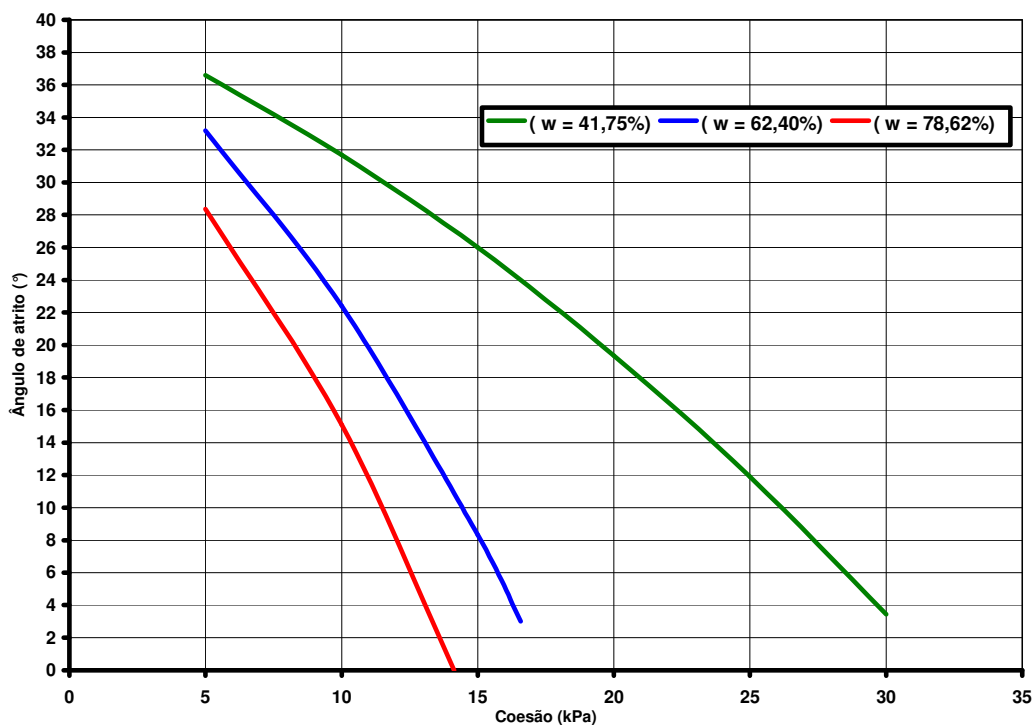


Figura 71 – Parâmetros de resistência em função do teor de umidade ($\gamma = 5 \text{ kN/m}^3$).

Apesar de as tensões de ruptura, no 5° e 6° ensaios, terem sido próximas, os valores de ângulo de atrito calculados foram bastante diferentes em função do teor de umidade e da coesão arbitrada, ao contrário do que ocorreu nos ensaios realizados com peso específico igual a 7 kN/m³. Esse fato pode ser explicado pela diferença dos comprimentos L1 e L2 da superfície de ruptura, medidos após os ensaios. (Tabela 17)

Tabela 17 – Comprimentos L1 e L2 medidos nos ensaios.

Ensaio	w (%)	γ (kN/m ³)	L1 (cm)	L2 (cm)
1	63,52	7	25	24
2	80,87	7	26	25
3	41,75	7	27	27
4	41,75	5	30	32
5	62,40	5	26	28
6	78,62	5	29	30

4.3.3 – Comparação dos ensaios de estabilidade de talude

Nas Figuras 72 e 73 apresentam-se respectivamente, uma comparação entre as curvas tensão *versus* deslocamento e uma comparação entre os parâmetros de resistência encontrados, em função do teor de umidade e do peso específico dos resíduos.

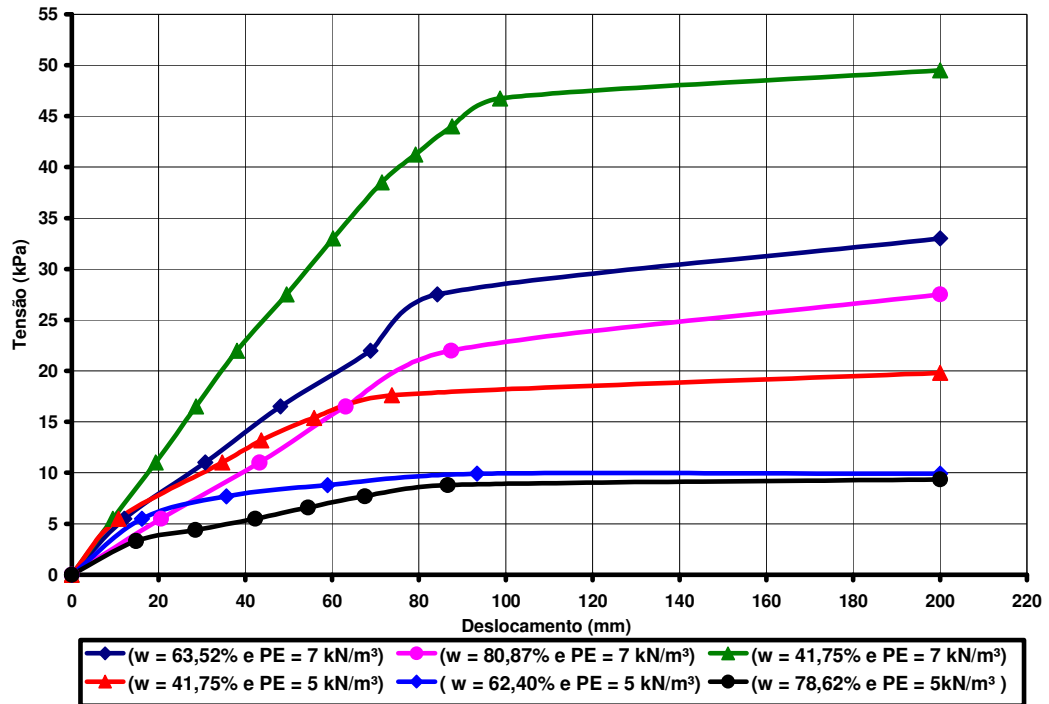


Figura 72 – Comparação entre as curvas tensão *versus* deslocamento.

Observa-se na Figura 72, que para valores de umidade praticamente iguais, a tensão de ruptura é menor nos ensaios realizados com peso específico igual a 5 kN/m³, além disso, quanto maior a umidade, menor é a resistência dos resíduos.

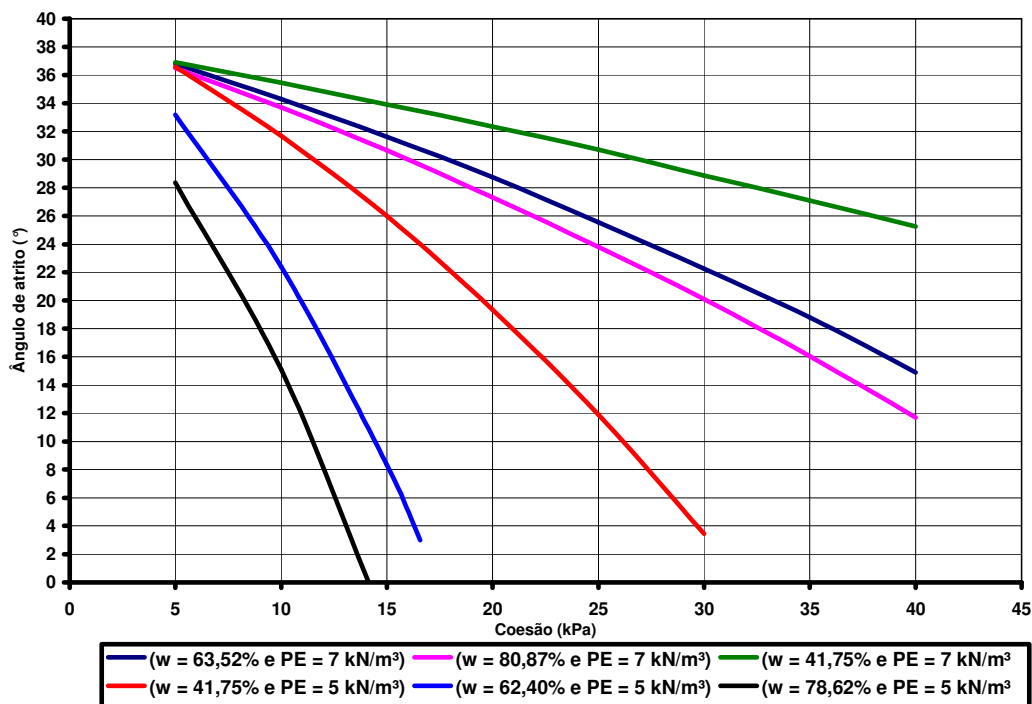


Figura 73 – Comparação entre parâmetros de resistência calculados.

Da mesma maneira, na Figura 73, observa-se que para valores de umidade praticamente iguais, os parâmetros de resistência são menores nos ensaios realizados com peso específico igual a 5 kN/m³.

4.4 – Comparação dos parâmetros de resistência dos ensaios de prova de carga com os ensaios de estabilidade de talude.

Os ensaios de prova de carga foram realizados com um teor de umidade dos resíduos em torno de 90%, enquanto que os ensaios de estabilidade de talude foram realizados com teor de umidade abaixo de 80%.

Para uma melhor comparação dos parâmetros obtidos nos ensaios, extrapolaram-se, utilizando-se linhas de tendência das curvas, valores de ângulos de atrito (ϕ), para um teor de umidade $w = 90\%$, com base nos parâmetros obtidos nos ensaios de estabilidade de talude, para diferentes teores de umidade e peso específico igual a 7 kN/m³. (Figura 74).

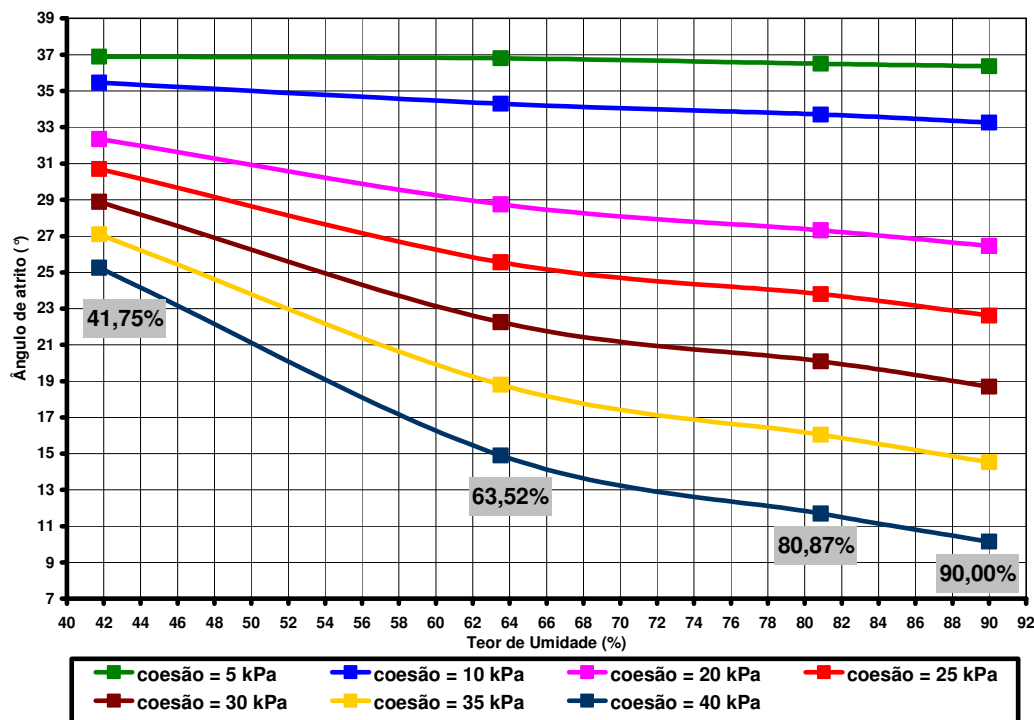


Figura 74 – Extrapolação dos parâmetros obtidos para $w = 90\%$ ($\gamma = 7 \text{ kN/m}^3$).

As curvas apresentadas na Figura 74, vêm a reforçar que para valores de coesão entre 5 a 10 kPa, houve pouca variação do ângulo de atrito em função do teor de umidade. Do mesmo modo, pode-se observar também, que os parâmetros de resistência variam menos para valores de umidade em torno de 40%, enquanto que para umidade em torno de 90% essa variação é bem maior.

Assim, pode-se comparar os parâmetros obtidos nos ensaios de estabilidade de talude, por extrapolação, referentes a $w = 90\%$, com os parâmetros obtidos nos ensaios de prova de carga, para deformações iguais a 10%; 12%; 15% e 17% (Figura 75).

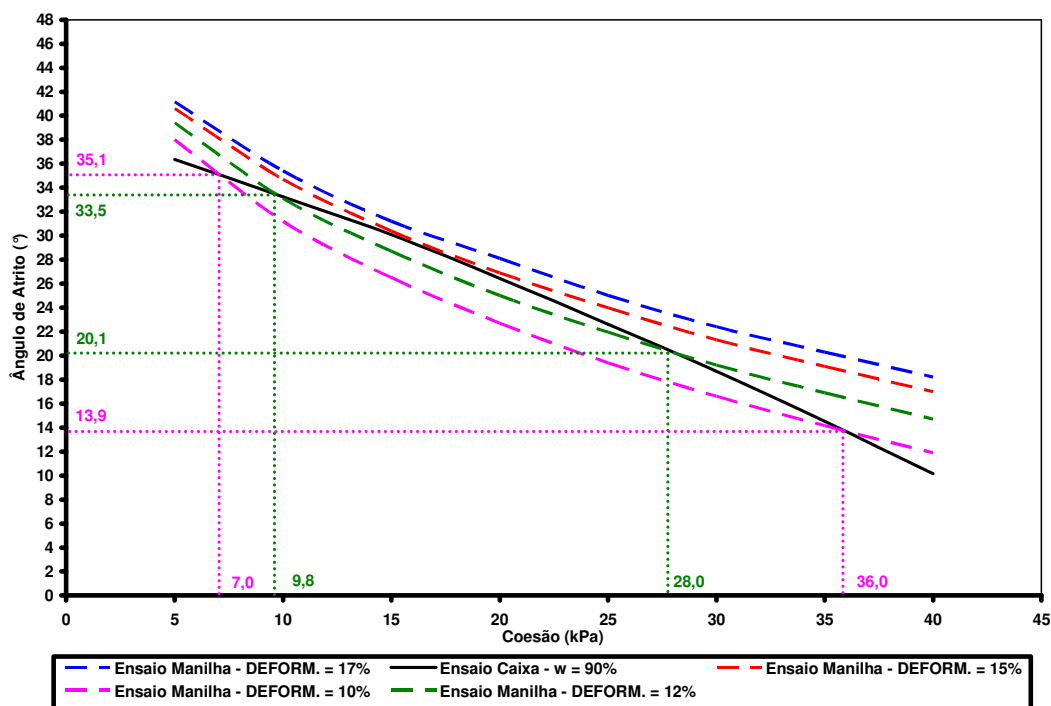


Figura 75 – Comparação dos parâmetros de resistência calculados nos dois tipos de ensaio ($\gamma = 7 \text{ kN/m}^3$).

Na Figura 75 as curvas referentes às deformações de 15% e 17%, obtidas nos ensaios de capacidade de carga, não possuem pontos em comum com a curva referente a $w = 90\%$, obtida nos ensaios de estabilidade de talude. No entanto, a curva referente à deformação de 10%, possui dois pontos em comum ($c = 7,0 \text{ kPa}$; $\phi = 35,1^\circ$ e $c = 36,0$; $\phi = 13,9^\circ$) com a curva referente à umidade de 90%.

Além desses pontos, a curva referente à deformação de 12%, toca a curva referente à umidade de 90% no ponto $c = 9,8 \text{ kPa}$ e $\phi = 33,5^\circ$, e no ponto $c = 28,0 \text{ kPa}$ e $\phi = 20,1^\circ$.

Os valores encontrados são bem coerentes com os da literatura, uma vez que valores de coesão determinados por outros autores variam entre 10 a 12 kPa e ângulos de atrito na faixa de 30° a 35° .

Para os resíduos com peso específico igual a 5 kN/m^3 , não se obteve parâmetros de resistência em comum entre os dois tipos de ensaio realizados. Esse fato pode ser observado na Figura 77, em que foram comparados os parâmetros encontrados nos ensaios de prova de carga,

referentes a deformação de 17%, com os parâmetros encontrados, por extrapolação (Figura 76), nos ensaios de estabilidade de talude, referentes a $w = 90\%$.

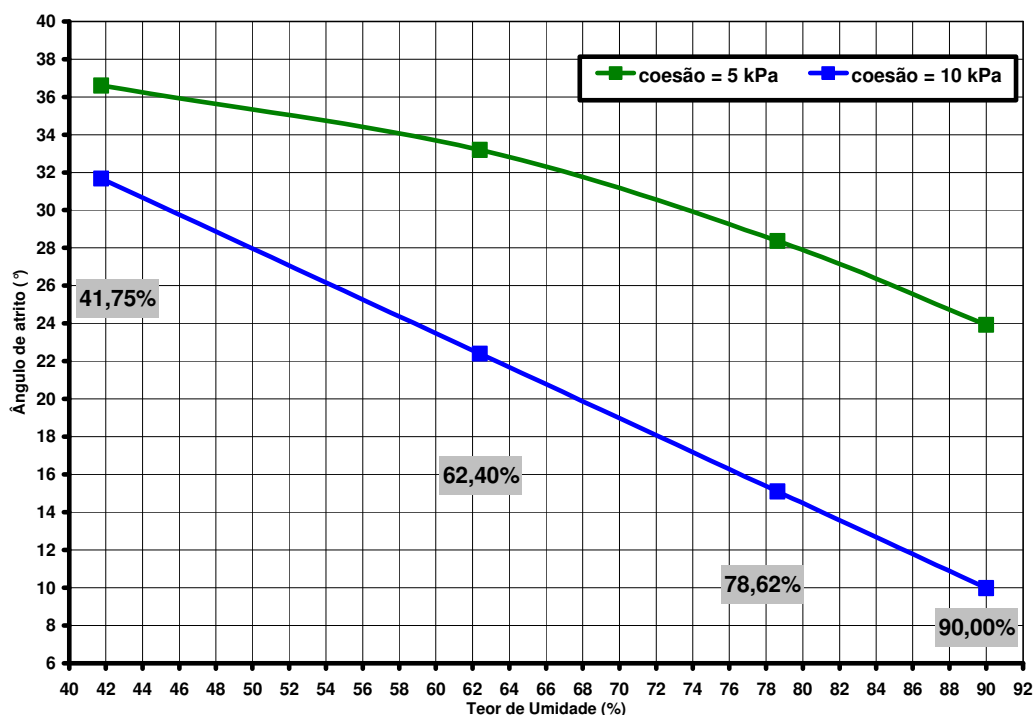


Figura 76 – Extrapolação dos parâmetros obtidos para $w = 90\%$ ($\gamma = 5 \text{ kN/m}^3$).

Observa-se na Figura 76, que a extrapolação dos parâmetros obtidos para $w = 90\%$, foi feita apenas para dois valores de coesão (5 e 10 kPa), uma vez que no ensaio de estabilidade de talude, não se encontrou valores de coesão maior que 10 kPa, para todos os valores de umidade.

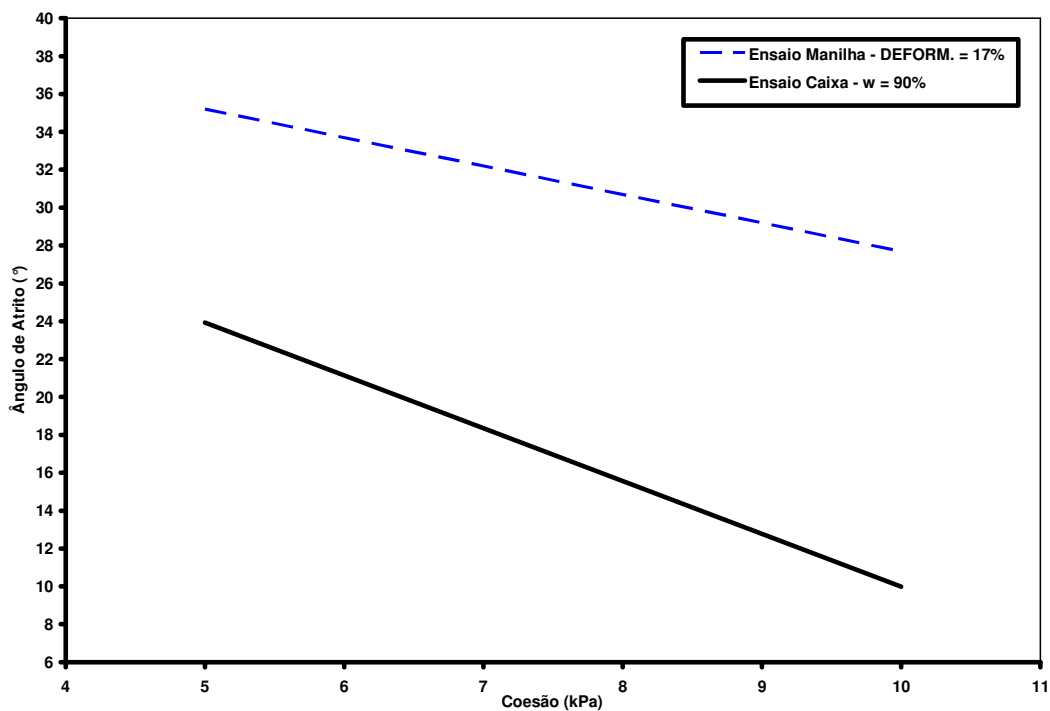


Figura 77 – Comparação dos parâmetros de resistência calculados nos dois tipos de ensaio ($\gamma = 5 \text{ kN/m}^3$)

Pode-se observar na Figura 77, que houve uma grande diferença entre os parâmetros de resistência encontrados nos dois tipos de ensaio, sendo que no ensaio de prova de carga (ensaio nas manilhas), esses parâmetros são mais coerentes.

5- CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 – Conclusões.

Neste trabalho, procurou-se estudar os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos, através de ensaios de grandes dimensões. Primeiramente, desenvolveu-se um equipamento para realização de ensaios de capacidade de carga com base na célula de compressão confinada desenvolvida por LORETO (2003), em que os parâmetros de resistência foram determinados por retro-análise, através da equação de equilíbrio limite desenvolvida por TERZAGHI (1943). Em seguida, realizaram-se ensaios de prova de carga num pequeno talude de lixo, tendo-se determinado os parâmetros de resistência com base numa retro-análise da superfície de ruptura obtida nos ensaios, utilizando o programa SLOPE/W e o método tradicional de Bishop Simplificado.

As principais conclusões encontradas no trabalho foram as seguintes:

- Em relação à composição gravimétrica dos RSU, conclui-se que os resultados alcançados estão coerentes com os valores encontrados para RSU brasileiros.
- O equipamento desenvolvido nesse trabalho para realização de ensaios de prova de carga mostrou-se adequado, pois, apesar dos resultados não terem mostrado uma tensão de ruptura definida, trabalhos anteriores sobre resistência de RSU encontrados na literatura também não apresentaram um patamar de ruptura bem definido.
- Os ensaios de prova de carga realizados na manilha com os RSU mantendo a mesma umidade (90%) mostraram, como era esperado, que a resistência dos RSU aumenta com o peso específico e a compressibilidade diminui.
- Os parâmetros de resistência determinados nos ensaios de prova de carga foram coerentes com os apresentados na literatura, uma vez que para uma deformação igual a 17% e um peso específico dos RSU igual

a 7 kN/m^3 , encontrou-se, para $c = 10 \text{ kPa}$, comumente utilizado em projetos de aterros sanitários, um ângulo de atrito $\phi = 35,40^\circ$. Adotou-se uma deformação igual a 17%, pois segundo OLIVEIRA (2002), costuma-se determinar os parâmetros de resistência para deformações entre 15 a 20%, quando não se obtém uma curva tensão *versus* deformação com um patamar de ruptura definido. Para uma deformação igual a 17%, considerando uma coesão $c = 10 \text{ kPa}$, o ângulo de atrito encontrado para o ensaio realizado com peso específico dos resíduos igual a 5 kN/m^3 foi $27,70^\circ$. Esses parâmetros são praticamente iguais aos recomendados por AZEVEDO (2005) para serem adotados em projetos de aterros sanitários, $\phi = 28^\circ$ e $c = 10 \text{ kPa}$. No entanto, como nos projetos de aterros sanitários, considera-se que os resíduos estejam com peso específico de 7 kN/m^3 , conclui-se que a adoção desses valores é bastante favorável à segurança.

- O equipamento desenvolvido, para realização de ensaios de prova de carga num talude de lixo, também se apresentou eficiente, uma vez que se puderam calcular os parâmetros de resistência por retro-análise de estabilidade de talude através do método de Bishop Simplificado, de forma simples e rápida usando um programa computacional.
- As curvas tensão *versus* deslocamento mostraram que as tensões de ruptura obtidas nesses ensaios foram menores para os resíduos com maior teor de umidade. Além disso, os ensaios realizados com peso específico dos resíduos igual a 5 kN/m^3 , apresentaram tensões de ruptura inferiores aos ensaios realizados com peso específico igual a 7 kN/m^3 , independentemente do teor de umidade. Logo, a umidade e o peso específico, são de extrema importância para se analisar a resistência dos RSU, uma vez que quanto maior a umidade e menor o peso específico, menor foram os parâmetros de resistência obtidos.
- Os parâmetros de resistência, obtidos com os ensaios de estabilidade de talude, foram bastante coerentes com os apresentados na literatura. Para os ensaios realizados com peso específico de 7 kN/m^3 , os ângulos de atrito encontrados foram bastante próximos para valores de coesão entre 5 a 10 kPa, sendo que para $c = 5 \text{ kPa}$, os valores de ϕ

encontrados, em função da umidade, foram praticamente iguais, variando entre $36,5^\circ$ a $36,9^\circ$. Já para $c = 10$ kPa, os ângulos de atrito calculados variaram entre $33,70^\circ$ a $35,45^\circ$, em função da umidade. Para os ensaios realizados com peso específico igual a 5 kN/m³, variando a umidade entre 40 a 80%, os ângulos de atrito encontrados para uma coesão de 5 kPa, variaram entre $28,37^\circ$ a $36,6^\circ$, e para uma coesão de 10 kPa, os valores de ϕ variaram entre $15,10^\circ$ a $31,68^\circ$.

- Houve uma grande diferença entre os parâmetros encontrados nos ensaios de estabilidade de talude com peso específico igual a 5 kN/m³. Nesses ensaios, os valores de L1 e L2 medidos foram bem diferentes em cada um dos três ensaios. Essas diferenças não ocorreram entre os três primeiros ensaios realizados com o peso específico igual a 7 kN/m³.
- Fazendo-se uma comparação entre os dois tipos de ensaios, através de uma superposição de resultados e para um peso específico dos resíduos igual a 7 kN/m³, obteve-se parâmetros de resistência bem próximos dos encontrados na literatura e nos ensaios separadamente. Este fato vem a comprovar que as duas metodologias utilizadas neste trabalho, para a determinação dos parâmetros de resistência dos RSU, foram eficientes, principalmente no ponto de vista de ensaios de grandes dimensões.
- Por fim conclui-se que, diante dos resultados encontrados nesta tese, a adoção de parâmetros de resistência, $c = 12$ kPa e $\phi = 30^\circ$, um pouco maiores dos sugerido por AZEVEDO (2005) e bem próximos da envoltória proposta por VAN IMPE (1998) e KAVAZANJAN *et al.* (1995), parecem adequados para serem usados em projetos de estabilidade de taludes de RSU.

5.2 – Sugestões.

Com o desenvolvimento deste trabalho, algumas sugestões para futuros trabalhos podem ser apontadas:

- O sistema de leitura dos recalques para os ensaios de prova de carga (ensaio nas manilhas), pode ser melhorado com a adaptação dos relógios medidores de deslocamento, utilizados nos ensaios de estabilidade de talude realizados na caixa de madeira, melhorando assim a precisão e o acompanhamento dos recalques com o tempo.
- Acompanhamento dos recalques com o tempo nos ensaios na caixa de madeira, aumentando o intervalo dos estágios de carregamento.
- Sugere-se a realização de mais ensaios de prova de carga (ensaio nas manilhas) e mais ensaios de estabilidade de talude (ensaio na caixa), para diversos teores de umidade das amostras e para valores de peso específico dos resíduos maiores que 7 kN/m^3 e menores que 5 kN/m^3 . Além disso, sugerem-se ensaios variando a composição gravimétrica dos resíduos, estudando o comportamento de cada material contido no lixo, bem como ensaios com lixo de diferentes idades, determinando assim parâmetros de resistência em função da idade dos resíduos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCITURRI, J. M. S. **Comportamiento geotécnico de vertederos de residuos urbanos.** Seminário sobre aspectos geotécnicos do projeto e construção de aterros de resíduos. LNEC, Lisboa, Portugal, 2000. pp. 1-22.
- AZEVEDO, R. F. **Notas de aula, disciplina CIV 639 – Projetos de Aterros Sanitários.** Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Viçosa, 2005.
- AZEVEDO, R. F.; RIBEIRO, A. G. C.; AZEVEDO, I. D. **Determination of Municipal Solid Waste Strength Parameters Using a Large Dimension Lisimeter Test.** In: Simpósio Internacional de Tecnologias e Tratamento de Resíduos Sólidos, 2006, Rio de Janeiro - RJ. 2006. pp. 1-8.
- BENVENUTO, C. & CUNHA, M.A. **Escorregamento em Massa de Lixo no Aterro Sanitário Bandeirantes em São Paulo.** In: II Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos – REGEO'91, novembro 1991, Rio de Janeiro - RJ. 2006. pp. 55-66.
- BOWLES, J. E. **Foudation, analysis and design.** 4. ed. Singapore: McGraw-Hill Book, 1988. 1216 p.
- CAQUOT, A., KÉRISEL, J. **Sur lê terme de surface dans lê calcul dès fondations em milineu pulvérulent.** In: International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, 3, 1953, Zürich. Proceedings... Zürich: [s.n.], 1953. v. 1, pp. 336-337.
- CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos.** Tese de doutorado. 300 p. Escola de Engenharia de São Carlos/USP. São Paulo, 1999.

- DE BEER, E. E. **Bearing capacity and settlement of shallow foundations on sand.** In: Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundations, 1967, Duke. Proceedings..., Duke: Duke University, 1967. pp. 15-34.
- EDINCLILER, A.; BENSON, C. H. & EDIL, T. B. **Shear strength of municipal solid waste.** Interim Report – Year 1. University of Wisconsin Madison, Environmental Geotechnics Report 96-2, Fevereiro, 1996, 65 p.
- ENGECORPS - **Corpo de Engenheiros Consultores** (1996). Rel: 064-SSO-NOD-B173. Estado da Arte dos Aterros Sanitários - Parte II, abril, 233p.
- FEDA, J. **Research on the bearing capacity of loose soil.** In: International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, 5, 1961, Paris. Proceedings..., Paris: [s.n.], 1961. v. 1, pp 635-642.
- GERBER, R. **CWS slide investigation report.** 1991.
- HOWLAND, J. & LANDVA, A. **Stability analysis of a municipal solid waste landfill.** Stability and Performance of Slope and Embankments – II, ASCE Geotechnical Special Publication, n. 31, pp. 1216 – 1231, 1992.
- IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – Lixo.** 2002. Na Publicação pp. 283-315. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/27032002pnsb.shtm>>. Acesso em: 10/02/2007.
- JESSBERGER, H. & KOCKEL, R. **Mechanical properties of waste materials.** In: XV CGT, Conferenze di Geotecnia di Torino, Torino, 1991, pp. 1 – 40.
- JUCÁ, J.F.T.; CABRAL, J. J. P. S.; MONTEIRO, V. E. D.; SANTOS, S. M. & PERRIER Jr., G. S. **Geotechnics of a municipal solid waste landfill.** In

- Recife, Brazil. Proceedings of the International Symposium on Recent Development in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, Brazil, 1997, pp. 429-436.
- KAVAZANJIAN, E.; MATASOVIC, N.; BONAPARTE, R. & SCHMERTMAM, G. R. **Evaluation of MSW properties for seismic analysis. Geoenvironment 2000: Characterization, Containment, Remediation, and performance in Environmental Geotechnics**, ASCE GSP 46, Y. B. Acar e D. E. Daniel (eds), New Orleans, 1995, Vol. 2, pp. 1126 – 1142.
- LANDVA, A. & CLARK, J. **Geotechnical Testing of Wastefill**. In: 39th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, Ontario, 1986. Proceedings of the 39th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, Ontario, 1986, pp. 371 – 385.
- LANDVA, A. O. & CLARK, J. **Geotechnics of Waste Fills** - Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, (ed), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, p.86 - 103.
- LOPES, G. S. **Execução e Análise de uma Prova de Carga Direta em Verdadeira Grandeza em Solo Residual de Gnaiss**. Dissertação Mestrado, 172 p. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – 1997.
- LORETO, A. S. **Desenvolvimento de um Equipamento para Avaliação da Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso do Aterro Sanitário de Viçosa - MG**. Dissertação Mestrado, 82 p. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – 2003.
- LUNDGREN, H.; MORTENSEN, K. **Determination by the theory of plasticity of the bearing capacity of continuous footings in sand**. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3, 1953, Zürich. Proceedings... Zürich: [s.n.], 1953. v. 1, p 409.

- MCBEAN, E.A. *et al.* **Solid waste landfill engineering and design.** Prentice- Hall, New Jersey, USA, 1995.
- MEYERHOFF, G. G. **The ultimate bearing capacity of foundations.** Geotechnique, London, v.2, n° 4, p. 301-332, 1951.
- OLIVEIRA, F. J. P. Aterro Sanitário de Santo Amaro - **Estudo de Estabilidade Visando o Aumento da Capacidade de Deposição.** II Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos - REGEO'91 - v.2, Rio de Janeiro / RJ, novembro 1991, p.351-366.
- OLIVEIRA, D. A. F. **Estabilidade de Taludes de Maciços de Resíduos Sólidos Urbanos.** Dissertação de Mestrado, G.DM-095^a/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2002, Brasília, DF, 155 p.
- PRANDTL, L. **Über die eindringungsfestigkeit plastischer baustoffe und die festigkeit von schneiden.** Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, [S.L.], v.1, n° 1, p. 15-20, 1921.
- PRODAM. **Lixo Problema: Solução – Destinação Final Aterro Sanitário.** São Paulo: Limpurb, Dez/1999. 7p.
- REISSNER, H. **Zum erddruckproblem.** In: International Conference of Applied Mechanics, 1, 1924, Delft. Proceedings..., Delft: [s.n], 1924. p. 295-311.
- RICHARDSON, G. & REYNOLDS, D. **Geosynthetic considerations in a landfill on compressible clays.** In. Geosynthetics'91 Conference, Atlanta, 1991. Proceedings of the Geosynthetics'91 Conference, Industrial Fabrics Association International, St. Paul, 1991, pp. 507 – 598.
- SINGH, S. & MURPHY, B. J. **Evaluation of Slope Stability of Sanitary Landfills. Geotechnics of Waste Fills** - Theory and Practice, ASTM STP

1070, Arvid Landva, G. David Knowles, (ed), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp.240 - 258.

SOWERS, G.F. **Foundation Problems in Sanitary Landfills**. Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, v.4, pp. 103-116.

TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1943. 510 p.

VAN IMPE, W. F. **Environmental geotechnics**: ITC 5 activities. State of the art. Proceedings of the third International Congress on Environmental Geotechnics, 1998, Lisbon, Portugal, pp. 1163-1187.

VERBRUGGE, J. C. **La geomecanique des dechets menagers**. Faculte des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, 2000, pp. 1-79.

WITHIAM, J. *et al.* **Prediction and performance of municipal landfill slope**. Geoenvironment 2000: characterization, containment, remediation, and performance in environmental geotechnics, ASCE GSP No. 46, Y. B. Acar e D. E. Daniel (eds), New Orleans, 1995, pp. 1005 – 1019.