

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS POR MEIO DE ENSAIOS
DE CISALHAMENTO DIRETO EM
EQUIPAMENTO DE GRANDES DIMENSÕES

Henrique Lembi Martins

Belo Horizonte

2006

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS POR MEIO DE ENSAIOS DE
CISALHAMENTO DIRETO EM EQUIPAMENTO DE
GRANDES DIMENSÕES**

Henrique Lembi Martins

Henrique Lembi Martins

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS POR MEIO DE ENSAIOS DE
CISALHAMENTO DIRETO EM EQUIPAMENTO DE
GRANDES DIMENSÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento

Linha de pesquisa: Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ferreira Simões

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2006

Aos meus queridos pais, que me deram todo o apoio antes e durante o curso de mestrado. Durante toda a minha vida, eles sempre me incentivaram ao estudo, à aquisição de cultura e novos conhecimentos, dando-me assistência durante toda a minha história acadêmica. Parte desta importante conquista de minha vida é devida a eles.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre esteve ao meu lado, dando-me força e inspiração.

À querida Raquel, que em momentos de grande dificuldade, soube me tranquilizar e me apoiou desde o início do curso de mestrado.

Ao Prof. Dr. Gustavo Ferreira Simões, exemplo de ética e competência, com quem adquiri muito conhecimento na área de geotecnia ambiental, além de ter estado presente em toda a pesquisa, dando importantes contribuições e apoio à realização deste trabalho.

Aos Departamentos DESA, ETG e EHR, que em função da qualificação de seus respectivos corpos docentes, proporcionam um curso de pós-graduação de excelente qualidade, contribuindo efetivamente ao desenvolvimento de novos temas e tecnologias, prestando, desta forma, um importante papel à sociedade.

À SLU (Superintendência de Limpeza Urbana) pelo suporte financeiro destinado à construção de parte do equipamento, bem como à bolsa de pesquisa, além de ter fornecido toda a estrutura disponível no aterro sanitário.

Ao gerente do aterro sanitário Heuder Pascele, que proporcionou as condições para a execução da presente pesquisa.

À Torneamentos Tecnobrás Ltda pela construção da caixa do referido equipamento.

Aos engenheiros Sérgio e Isaac do Departamento de Transporte da SLU, que demonstraram um grande interesse pela pesquisa, além de terem sido responsáveis pela elaboração do projeto do equipamento, bem como pelo acompanhamento de sua fase de execução.

Ao funcionário Walter pelo empenho em disponibilizar, em todos os momentos, funcionários de sua equipe para atender à presente pesquisa.

Aos funcionários José Carlos, Ademir e Cleir, responsáveis pela construção de parte do equipamento.

Ao funcionário Geraldo Dias pelo zelo que teve de guardar todos os acessórios necessários à realização dos ensaios;

Aos funcionários “Zezinho” e Edgar pela grande gentileza de levar o caminhão (integrante do equipamento) nos momentos de realização da fase de cisalhamento dos ensaios;

Ao engenheiro Cícero Antônio Catapreta pelas sugestões e solidariedade.

À técnica do laboratório de análises físico-químicas do aterro sanitário, Sofia, que além de ter sugerido idéias à execução da fase de amostragem, foi responsável pela atividade de estabelecimento do teor de umidade e fez parte da equipe responsável pela execução das fases de amostragem e moldagem dos corpos de prova.

Aos funcionários Atacil (“Fazendeiro”) e Geraldo Magela (“Sabará”) e a toda equipe de compostagem, que foram responsáveis pela execução das fases de amostragem e moldagem dos corpos de prova.

Ao funcionário Arnaldo pela gentileza disponibilizada para transportar o material necessário à montagem das amostras ao local dos ensaios.

Aos funcionários Geraldo Mendes, Luiz Carlos e Alessandra, que dentro de seus limitados quadros de empregados disponíveis, procuraram sempre fornecer as pessoas necessárias à realização dos ensaios.

Ao estagiário Fernando Henrique, que me ajudou com muita competência na realização de todos os ensaios.

À estagiária Aryanne pela gentileza e solidariedade.

A todos que contribuíram de forma direta e indireta à elaboração deste trabalho.

RESUMO

Nos últimos anos, no Brasil e no exterior, em função de uma maior rigidez da legislação ambiental, o projeto e a operação de instalações seguras para a disposição de RSU, como os aterros sanitários, têm demandado o desenvolvimento de novas tecnologias. Aliado a isto, a escassez de grandes áreas próximas aos centros urbanos para disposição de RSU tem induzido o processo de verticalização dos aterros sanitários e, conseqüentemente, um maior rigor nas análises de estabilidade desses empreendimentos. Nota-se, desta forma, a importância de estudar o comportamento mecânico dos resíduos, em especial, a resistência ao cisalhamento. O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o entendimento do comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos, por meio da construção de um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões e da realização de um programa experimental para avaliação da resistência dos resíduos sólidos urbanos. Os ensaios foram realizados em amostras com diferentes condições de composição, peso específico e umidade iniciais, e idade. Um dos objetivos específicos deste trabalho é verificar a validade do critério de ruptura de Mohr-Coulomb e avaliar qualitativamente a validade do modelo geotécnico proposto por Kolsch (1993 e 1995), o qual tem se mostrado mais apropriado para os resíduos sólidos urbanos. Além da descrição do equipamento desenvolvido, são apresentadas as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal, as envoltórias de resistência e a variação dos parâmetros de resistência com o deslocamento horizontal dos ensaios realizados. O comportamento de todas as amostras ensaiadas caracterizou-se por um contínuo ganho de resistência sem a identificação de ruptura. A presença de materiais fibrosos conferiu significativos ganhos de resistência, em relação às amostras sem fibras. Os valores dos parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo) situaram-se dentro da faixa apresentada na literatura. No que diz respeito à validade da envoltória de Mohr-Coulomb, constatou-se que as amostras cujas composições possuíam baixo percentual de materiais fibrosos apresentaram um critério de ruptura linear. Já as amostras cujas composições possuíam alto percentual de materiais fibrosos apresentaram uma tendência a um critério de ruptura bi-linear. O equipamento construído e utilizado nos ensaios e a metodologia empregada mostraram-se adequados.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos sólidos urbanos, aterros sanitários, mecânica dos resíduos, parâmetros de resistência, ensaio de cisalhamento direto.

ABSTRACT

In the last years, in Brazil and abroad, due to the increase of restrictions of the environmental legislation, the design and operation of safe facilities for municipal solid wastes disposal, such as the sanitary landfills, have demanded the development of new technologies. Additionally, the lack of areas for waste disposal near to urban centers has led to vertical expansions of the existing sanitary landfills and, consequently, more rigorous stability analyses. Thus, the study of the mechanical behavior of the wastes becomes very important, especially, the shear strength. The present work aims to contribute to the understanding of the mechanical behavior of municipal solid wastes, through the construction of a large dimension direct shear equipment and the accomplishment of an experimental program to evaluate the shear strength of municipal solid wastes. The tests were carried out in samples with different initial conditions of composition, unit weight and moisture content, and age. Specific objectives of this work are to verify the Mohr-Coulomb failure criteria validity and to evaluate qualitatively the model proposed by Kolsch (1993 and 1995), which has shown to be more appropriate for municipal solid wastes. Besides the description of the developed equipment, the curves of shear stress *versus* horizontal displacement, strength envelopes and strength parameters variation with horizontal displacement are presented. The behavior of all the tested samples was characterized by a continuous strength gain without failure identification. The presence of fibrous materials led to a significant strength increase in relation to the samples without fibers. The strength parameters values (friction angle and cohesive intercept) were located inside the range presented in the literature. In respect to the Mohr-Coulomb envelope validity, it was verified that the samples with low fiber contents presented a linear failure criterion. The samples with high fiber contents presented a trend of a bi-linear failure criterion. The equipment developed and used in the tests and the used methodology shown to be appropriate.

KEY WORDS: Municipal solid waste, sanitary landfills, waste mechanics, strength parameters, direct shear test.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
SUMÁRIO	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	7
2.1 OBJETIVO GERAL	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
3 REVISÃO DE LITERATURA	8
3.1 PESO ESPECÍFICO	8
3.2 COMPOSIÇÃO	15
3.3 TEOR DE UMIDADE	16
3.4 PERMEABILIDADE	19
3.5 COMPRESSIBILIDADE	23
3.6 RESISTÊNCIA	30
3.6.1 <i>Parâmetros de Resistência dos Resíduos e Análise de Estabilidade</i>	30
3.6.2 <i>Resistência ao cisalhamento</i>	31
3.6.3 <i>Ensaio de laboratório</i>	33
3.6.3.1 Ensaio de cisalhamento direto	33
3.6.3.2 Ensaio de compressão triaxial	39
3.6.4 <i>Ensaio de campo</i>	42
3.6.5 <i>Retroanálises</i>	45
3.6.6 <i>Envoltória de Resistência de RSU</i>	48
3.6.7 <i>Modelo Proposto por Kolsch (1993 e 1995)</i>	51
4 MATERIAL E MÉTODOS	57
4.1 DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO	57
4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	59
4.3 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	63
4.3.1 <i>Amostragem</i>	63
4.3.2 <i>Estabelecimento do teor de umidade</i>	67
4.3.3 <i>Moldagem dos corpos de prova</i>	67
4.3.4 <i>Adensamento</i>	68
4.3.5 <i>Cisalhamento</i>	69
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS	71
5.1 FASE DE CISALHAMENTO	71
5.1.1 <i>Ensaio 1</i>	71
5.1.2 <i>Ensaio 2</i>	74
5.1.3 <i>Ensaio 3</i>	77
5.1.4 <i>Ensaio 4</i>	80
5.1.5 <i>Ensaio 5</i>	83
5.1.6 <i>Ensaio 6</i>	85

5.2	COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS	88
5.2.1	<i>Ensaio 1 e 2: influência do peso específico inicial.....</i>	88
5.2.2	<i>Ensaio 2 e 5: influência da idade.....</i>	89
5.2.3	<i>Ensaio 3 e 4: influência da umidade em resíduos sem materiais fibrosos de grandes dimensões.....</i>	90
5.2.4	<i>Ensaio 5 e 6: influência da presença de materiais fibrosos de grandes dimensões em resíduos velhos</i>	91
5.2.5	<i>Ensaio 1 e 3: influência da presença de materiais fibrosos de grandes dimensões em resíduos frescos.....</i>	92
5.3	COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA ENTRE ENSAIOS	93
5.3.1	<i>Ensaio 1 e 2: influência do peso específico inicial.....</i>	93
5.3.2	<i>Ensaio 2 e 5: influência da idade.....</i>	94
5.3.3	<i>Ensaio 3 e 4: influência da umidade em resíduos sem materiais fibrosos de grandes dimensões.....</i>	95
5.3.4	<i>Ensaio 5 e 6: influência da presença de materiais fibrosos de grandes dimensões em resíduos velhos</i>	96
5.3.5	<i>Ensaio 1 e 3: influência da presença de materiais fibrosos de grandes dimensões em resíduos frescos.....</i>	97
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	98
6.1	CONSTRUÇÃO E DESEMPENHO DO EQUIPAMENTO	98
6.2	PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM E MOLDAGEM DAS AMOSTRAS	99
6.3	EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	100
6.4	RESULTADOS.....	101
6.5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
8	ANEXO	111
8.1	FASE DE ADENSAMENTO.....	111
8.1.1	<i>Ensaio 1</i>	111
8.1.2	<i>Ensaio 2</i>	112
8.1.3	<i>Ensaio 3.....</i>	113
8.1.4	<i>Ensaio 4.....</i>	114
8.1.5	<i>Ensaio 5.....</i>	115
8.1.6	<i>Ensaio 6.....</i>	116

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – VARIAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COM A PROFUNDIDADE (KAVAZANJIAN ET AL., 1995)	11
FIGURA 3.2 – VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE IN SITU DO RSU ESTUDADO, VALORES EM BASE SECA (CARVALHO, 1999).....	18
FIGURA 3.3 – CURVA TEÓRICA DE COMPRESSIBILIDADE DO RSU (GRISOLIA E NAPOLEONI, 1996).....	25
FIGURA 3.4 – MEDIDAS DE RECALQUES DE SUPERFÍCIE DE DIFERENTES ATERROS (KONIG E JESSBERGER, 1997).....	29
FIGURA 3.5 – PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE RSU (SIMÕES, 2004).....	31
FIGURA 3.6 – COMPORTAMENTO DO RESÍDUO – MODELO DE INTERAÇÃO ENTRE AS FORÇAS DE ATRITO E TRAÇÃO – (KOLSCH, 1995).....	53
FIGURA 3.7 – COMPORTAMENTO DO RESÍDUO – AUMENTO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO TOTAL DEVIDO ÀS FORÇAS DE TRAÇÃO (KOLSCH, 1995).....	53
FIGURAS 4.1 E 4.2 – EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO DESENVOLVIDO.....	58
FIGURA 4.3 – SISTEMA DE APLICAÇÃO DAS FORÇAS NORMAL E CISALHANTE.....	59
FIGURA 4.4 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO	59
FIGURAS 4.5 E 4.6 – SEGREGAÇÃO E ESTOCAGEM DE MATERIAIS.....	63
FIGURAS 4.7 E 4.8 – COLETA DA MATÉRIA ORGÂNICA	64
FIGURAS 4.9 E 4.10 – COLETA E SECAGEM DO COMPOSTO ORGÂNICO	65
FIGURAS 4.11 E 4.12 – PESAGEM DOS RESÍDUOS.....	65
FIGURAS 4.13 E 4.14 – HOMOGENEIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DOS ENSAIOS 1 E 2.....	66
FIGURAS 4.15 E 4.16 – HOMOGENEIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DOS ENSAIOS 3 E 4.....	66
FIGURAS 4.17 E 4.18 – QUARTEAMENTO E COLETA DE AMOSTRA	67
FIGURAS 4.19 E 4.20 – ESTABELECIMENTO DO TEOR DE UMIDADE	67
FIGURAS 4.21 E 4.22 – MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	68
FIGURAS 4.23 E 4.24 – FASE DE ADENSAMENTO.....	68
FIGURAS 4.25 E 4.26 – FASE DE CISALHAMENTO	69
FIGURAS 4.27 E 4.28 – LIMPEZA DO EQUIPAMENTO	70
FIGURAS 4.29 E 4.30 – MEDIÇÃO DO ATRITO DOS ROLETES	70
FIGURA 5.1 – CURVAS TENSÃO CISALHANTE <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 1).....	71
FIGURA 5.2 – ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 1).....	72
FIGURA 5.3 – VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO E INTERCEPTO COESIVO PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 1).....	73
FIGURA 5.4 – CURVAS TENSÃO CISALHANTE <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 2).....	75
FIGURA 5.5 – ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 2).....	75
FIGURA 5.6 – VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO E INTERCEPTO COESIVO PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 2).....	76
FIGURA 5.7 – CURVAS TENSÃO CISALHANTE <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 3).....	78
FIGURA 5.8 – ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 3).....	79

FIGURA 5.9 – VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO E INTERCEPTO COESIVO PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 3).....	80
FIGURA 5.10 – CURVAS TENSÃO CISALHANTE <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 4).....	81
FIGURA 5.11 – ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 4).....	82
FIGURA 5.12 – VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO E INTERCEPTO COESIVO PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 4).....	83
FIGURA 5.13 – CURVAS TENSÃO CISALHANTE <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 5).....	83
FIGURA 5.14 – ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 5).....	84
FIGURA 5.15 – VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO E INTERCEPTO COESIVO PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 5).....	85
FIGURA 5.16 – CURVAS TENSÃO CISALHANTE <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 6).....	86
FIGURA 5.17 – ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 6).....	87
FIGURA 5.18 – VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO E INTERCEPTO COESIVO PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 6).....	88
FIGURA 5.19 – CURVAS TENSÃO CISALHANTE <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIOS 1 E 2).....	89
FIGURA 5.20 – CURVAS TENSÃO CISALHANTE <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIOS 2 E 5).....	90
FIGURA 5.21 – CURVAS TENSÃO CISALHANTE <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIOS 3 E 4).....	91
FIGURA 5.22 – CURVAS TENSÃO CISALHANTE <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIOS 5 E 6).....	92
FIGURA 5.23 – CURVAS TENSÃO CISALHANTE <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIOS 1 E 3).....	93
FIGURA 5.24 – VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO PARA OS ENSAIOS 1 E 2.....	94
FIGURA 5.25 – VARIAÇÃO DO INTERCEPTO COESIVO PARA OS ENSAIOS 1 E 2.....	94
FIGURA 5.26 – VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO PARA OS ENSAIOS 2 E 5.....	95
FIGURA 5.27 – VARIAÇÃO DO INTERCEPTO COESIVO PARA OS ENSAIOS 2 E 5.....	95
FIGURA 5.28 – VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO PARA OS ENSAIOS 3 E 4.....	96
FIGURA 5.29 – VARIAÇÃO DO INTERCEPTO COESIVO PARA OS ENSAIOS 3 E 4.....	96
FIGURA 5.30 – VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO PARA OS ENSAIOS 5 E 6.....	96
FIGURA 5.31 – VARIAÇÃO DO INTERCEPTO COESIVO PARA OS ENSAIOS 5 E 6.....	96
FIGURA 5.32 – VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO PARA OS ENSAIOS 1 E 3.....	97
FIGURA 5.33 – VARIAÇÃO DO INTERCEPTO COESIVO PARA OS ENSAIOS 1 E 3.....	97
FIGURAS 8.1, 8.2 E 8.3 – CURVAS RECALQUE <i>VERSUS</i> RAIZ DO TEMPO (ENSAIO 1).....	112
FIGURAS 8.4, 8.5 E 8.6 – CURVAS RECALQUE <i>VERSUS</i> RAIZ DO TEMPO (ENSAIO 2).....	112
FIGURAS 8.7, 8.8 E 8.9 – CURVAS RECALQUE <i>VERSUS</i> RAIZ DO TEMPO (ENSAIO 3).....	113
FIGURAS 8.10, 8.11 E 8.12 – CURVAS RECALQUE <i>VERSUS</i> RAIZ DO TEMPO (ENSAIO 4).....	114
FIGURAS 8.13, 8.14 E 8.15 – CURVAS RECALQUE <i>VERSUS</i> RAIZ DO TEMPO (ENSAIO 5).....	115
FIGURAS 8.16, 8.17 E 8.18 – CURVAS RECALQUE <i>VERSUS</i> RAIZ DO TEMPO (ENSAIO 6).....	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – PESO ESPECÍFICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	12
TABELA 3.2 – VALORES DE COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE (CARVALHO, 1999).....	22
TABELA 3.3 – REVISÃO DOS MÉTODOS PARA MEDIR O COMPORTAMENTO CISALHANTE DO RSU DIXON E JONES (2005).....	32
TABELA 3.4 – RETROANÁLISES DE TALUDES DE ATERROS EXISTENTES	47
TABELA 4.1 – PROGRAMA EXPERIMENTAL	61
TABELA 4.2 – PROGRAMA EXPERIMENTAL – COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA	62
TABELA 5.1 – VALORES DE TENSÃO CISALHANTE EM FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE TENSÃO NORMAL E DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 1).....	73
TABELA 5.2 – VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO E COESÃO EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 1).....	73
TABELA 5.3 – VALORES DE TENSÃO CISALHANTE EM FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE TENSÃO NORMAL E DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 2).....	76
TABELA 5.4 – VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO E COESÃO EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 2).....	76
TABELA 5.5 – VALORES DE TENSÃO CISALHANTE EM FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE TENSÃO NORMAL E DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 3).....	79
TABELA 5.6 – VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO E COESÃO EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 3).....	79
TABELA 5.7 – VALORES DE TENSÃO CISALHANTE EM FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE TENSÃO NORMAL E DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 4).....	82
TABELA 5.8 – VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO E COESÃO EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 4).....	82
TABELA 5.9 – VALORES DE TENSÃO CISALHANTE EM FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE TENSÃO NORMAL E DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 5).....	84
TABELA 5.10 – VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO E COESÃO EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 5).....	85
TABELA 5.11 – VALORES DE TENSÃO CISALHANTE EM FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE TENSÃO NORMAL E DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 6).....	87
TABELA 5.12 – VALORES DO ÂNGULO DE ATRITO E COESÃO EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO HORIZONTAL (ENSAIO 6).....	87
TABELA 5.13 – COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS	88

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ASTM	American Society for Testing and Materials
ζ	ângulo de tração
b	largura
c'	coesão efetiva ou intercepto coesivo efetivo
CD	consolidado drenado
CPT	Cone Penetration Test
CU	consolidado não-drenado
d	altura
D	diâmetro
dh	variação na altura
EUA	Estados Unidos da América
FS	fator de segurança
h	altura
l	comprimento
N	número de golpes
ϕ'	ângulo de atrito efetivo
R^2	coeficiente de correlação
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SLU	Superintendência de Limpeza Urbana
SMLU	Secretaria Municipal de Limpeza Urbana
SPT	Standard Penetration Test
t	tempo
t_i	instante inicial
u	poro-pressão
Z	resistência à tração
σ	tensão normal total
τ	tensão cisalhante

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial, acompanhado de um acelerado processo de urbanização e aliado ao consumo crescente de produtos menos duráveis e descartáveis, ocasionou um aumento significativo da quantidade e da diversidade dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados, bem como de sua concentração espacial, agravando, assim, o desafio dos mesmos serem dispostos de forma segura e adequada.

No Brasil e no exterior, as técnicas de disposição utilizadas no passado, tais como, depósitos a céu aberto (vazadouros) ou lançamento em cursos d'água não têm sido mais permitidas, diante das legislações ambientais cada vez mais rígidas. Na última década, considerável atenção tem sido focada na geotecnia ambiental. A proteção do solo e das águas subterrâneas, assim como o tratamento de águas e solos contaminados, são assuntos que têm despertado grande interesse da comunidade acadêmica e importância junto à opinião pública.

Nesse contexto, o projeto e a operação de instalações seguras para a disposição de RSU, como os aterros sanitários, que é uma técnica de disposição de RSU ainda mundialmente muito empregada, têm demandado o desenvolvimento de novas tecnologias e conduzido à introdução de novos padrões de projeto. Novas regulamentações têm sido colocadas em vários países. Neste sentido, a legislação brasileira já apresenta uma série de decretos e portarias, que embora estejam longe de apresentar uma situação ideal e completa neste campo, auxiliam sobremaneira o direcionamento de algumas questões básicas para controle e a minimização de danos ambientais. Porém, Jucá (2004) afirma que nossas normas técnicas sobre aterros de resíduos sólidos foram elaboradas, em sua maioria, há duas décadas e praticamente não incorporam os conceitos mais recentes de geotecnia ambiental. No entanto, aspectos de geotecnia ambiental são aplicados atualmente a projetos de aterros de RSU, sendo primordiais na elaboração dos mesmos. Alguns desses podem ser destacados:

- Avaliação da estabilidade dos taludes das células, o que torna indispensável a identificação de modelos de comportamento, a determinação de propriedades mecânicas (parâmetros de resistência) dos diversos materiais envolvidos (revestimento de base, diques de contenção, camadas de cobertura e, principalmente, os resíduos) ;
- Avaliação dos recalques verticais e das movimentações horizontais das células, superficiais e em profundidade;

- Projeto de dispositivos para o revestimento de base (sintéticos ou naturais) objetivando evitar ou minimizar a contaminação do subsolo e das águas subterrâneas, gerando a necessidade do conhecimento dos mecanismos responsáveis pelo transporte de contaminantes em meios porosos e dos parâmetros associados;
- Projeto de sistemas de drenagem de líquidos percolados, exigindo o entendimento dos processos bio-físico-químicos que ocorrem no interior dos aterros e de todo o balanço hídrico dos sistemas de disposição de RSU;
- Projeto de sistemas de drenagem de gases gerados, envolvendo a identificação das etapas do processo de decomposição anaeróbia dos resíduos e do fluxo de gases no interior dos aterros;
- Projeto de sistemas de cobertura final e de dispositivos de drenagem superficial que minimizem a infiltração de água para o interior da massa de resíduos e evitem problemas de erosão.

Desta forma, o projeto de um aterro que era caracterizado apenas sob o ponto de vista sanitário, vem sendo substituído por um projeto global envolvendo também aspectos geotécnicos (Simões, 2004).

Além de um maior rigor da legislação ambiental, nos últimos anos, a escassez de grandes áreas próximas dos centros urbanos para disposição de RSU tem induzido a um interesse de autoridades locais na extensão da vida de aterros existentes, através do processo de verticalização. Segundo Howland e Landva (1992), a expansão vertical de aterros sanitários de RSU têm se tornado comum por três razões: a contínua necessidade para aterramento como parte do gerenciamento de resíduos sólidos; o fechamento ou a eliminação de lixões, em função de suas proteções ao meio ambiente serem inadequadas; e a grande dificuldade em implantar e licenciar novas instalações de gerenciamento de resíduos sólidos. As expansões verticais de instalações existentes evitam um número de problemas associados com o desenvolvimento de um novo local para disposição de resíduos.

Confirmando esta tendência, Kolsch (1993) afirma que devido ao contínuo aumento da quantidade de RSU e os problemas de selecionar locais adequados para construção de aterros sanitários, está tornando, cada vez mais, necessário otimizar os presentes métodos de disposição e fazer o melhor uso dos locais disponíveis. Gotteland et al. (1995) citam a dificuldade que a empresa responsável pelo gerenciamento de um aterro de RSU localizado

no sul da França teve para descobrir novos locais na região para disposição de RSU. Cowland et al. (1993) comentam sobre a escassez de espaço para construção de aterros sanitários em Hong Kong, fato que exigiu aumentar a capacidade dos aterros existentes por meio do alteamento destas estruturas. Nos EUA, por sua vez, existem várias empresas de gerenciamento de resíduos que têm elaborado e executado projetos de verticalização de aterros sanitários. Portanto, a necessidade de se conhecer o comportamento mecânico dos resíduos torna-se ainda maior, pois estas estruturas passam a atingir alturas maiores, exigindo avaliações de estabilidade mais rigorosas. Howland e Landva (1992) afirmam que um dos desafios de projeto oriundos dos processos de expansões verticais é a análise de estabilidade de aterros sanitários projetados com taludes mais íngremes e alturas maiores.

A avaliação da estabilidade dos aterros de disposição de RSU é feita a partir do conhecimento da geometria e dos níveis de poro-pressões (líquidos e gases) no interior da massa de resíduos, além da identificação dos parâmetros de resistência dos materiais envolvidos. Porém, observa-se, em todos os estudos realizados para a avaliação da resistência mecânica do RSU, uma grande variabilidade nos parâmetros, devida à elevada heterogeneidade dos RSU (função da composição, procedimentos operacionais, etc), mudanças das propriedades mecânicas dos resíduos com o tempo e às diferentes formas de obtenção dos parâmetros, se em campo, laboratório ou por meio de retroanálises. Com relação aos ensaios de campo e laboratório, ainda não existe uma normalização para a execução dos mesmos.

Um aspecto que deve ser mencionado, no que diz respeito à elaboração de projeto, é a adoção de critérios e parâmetros provenientes de países que apresentam resíduos de composições diferentes com procedimentos operacionais e condições geoambientais distintas (Carvalho, 1999). Tal fato pode ocasionar projetos inadequados à realidade brasileira, sob os pontos de vista ambiental, econômico e de segurança do empreendimento. Desta forma, a utilização de dados obtidos em condições diferentes daquelas de uma determinada localidade deve ser vista criteriosamente, reforçando a necessidade de realização de programas experimentais específicos e monitoramentos em campo.

Neste sentido, vários trabalhos vêm sendo realizados no Brasil, com o objetivo de investigar o comportamento geotécnico dos RSU e dos sistemas de disposição como um todo, por meio de ensaios de laboratório e de campo, do monitoramento de aterros existentes e da proposição de modelos de comportamento (Simões, 2004). Podem ser destacados os trabalhos que vêm

sendo desenvolvidos no aterro da Muribeca, em Recife; no aterro Bandeirantes, em São Paulo; no aterro de Brasília e no aterro de Belo Horizonte, onde extensos programas experimentais e de monitoramento têm contribuído significativamente para o entendimento do comportamento geotécnico dos RSU em condições brasileiras.

Com relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU, no Brasil existem poucas referências, sendo que uma delas é a do Aterro Bandeirantes, localizado na cidade de São Paulo (Carvalho, 1999). Porém, é importante esclarecer que estes valores obtidos referem-se às condições locais, ou seja, as condições climáticas, operacionais e de projeto, bem como a composição dos RSU são características do referido aterro. Portanto, a utilização dos mesmos parâmetros em outros aterros pode criar um falso resultado da análise de estabilidade, gerando uma estrutura aparentemente estável ou instável. Outros estudos foram realizados na determinação dos referidos parâmetros, podendo ser citados os de Fucale e Jucá (2002), Oliveira (2002), Lamare Neto (2004) e Fucale (2005).

Em relação à literatura internacional, o número de resultados de ensaios disponíveis é bem maior, porém eles apresentam uma apreciável gama de variação. Tomando-se como base inúmeros trabalhos da literatura, observam-se valores para o ângulo de atrito entre 10° e 53° e coesão entre 0 e 67 kPa. Em função desta dispersão de valores, uma estimativa confiável da resistência ao cisalhamento do RSU é difícil e, muitas vezes, conduz a resultados contraditórios em relação às reais condições de estabilidade de taludes observados no campo.

Diante do exposto, percebe-se que uma compreensão na mecânica dos resíduos é crucial para identificar potenciais aterros instáveis e evitar possíveis desastres. Grandes eventos de escorregamento de resíduos têm ocorrido devido à ruptura de aterros em diversos países durante os últimos anos (Kolsch e Ziehmman, 2004). Segundo os autores, o mais trágico caso publicado foi definitivamente o do aterro de Payatas nas Filipinas, em julho de 2000, enquanto que o mais recente foi o de Atenas, na Grécia, em março de 2003. Ambas rupturas originaram questões sobre a influência de diferentes condições climáticas ou variações em operação e composição dos resíduos no comportamento de um aterro.

Segundo Kolsch e Ziehmman (2004), a estabilidade de aterros de RSU é um dos maiores desafios da engenharia geotécnica na atualidade. A heterogênea composição desses materiais, obstáculos na determinação de parâmetros de resistência dos mesmos, e uma falta do conhecimento sobre os princípios da mecânica dos resíduos resultam em consideráveis

incertezas nos cálculos de estabilidade. É importante esclarecer que as propriedades físicas e mecânicas dos RSU são normalmente estudadas por meio da utilização dos mesmos conceitos desenvolvidos na mecânica dos solos. Entretanto, os resíduos possuem diferenças significativas em relação aos solos, existindo, desta forma, algumas limitações nessa aproximação.

Assim sendo, foi necessária a criação de uma nova ciência que permitisse um maior conhecimento do RSU, do ponto de vista geotécnico, surgindo, então, a Mecânica dos Resíduos. Esta, por sua vez, objetiva o estudo do comportamento dos sistemas de disposição de RSU durante a operação e após o fechamento, incluindo todos os seus componentes (revestimento, cobertura, sistemas de drenagem de líquidos percolados e de gases), além dos próprios RSU, envolvendo avaliação da estabilidade e da integridade das estruturas durante a construção e após o encerramento, e determinação das propriedades geotécnicas dos referidos materiais.

Constata-se, portanto, que o desafio da Engenharia atual, em especial da Engenharia Geotécnica, é imenso frente aos novos problemas advindos da disposição de RSU (Simões, 2004).

Dentro deste contexto, o presente trabalho propõe contribuir para uma melhor compreensão do comportamento mecânico dos resíduos. O texto está estruturado em seis capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma contextualização do assunto. No segundo, estão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos. Em seguida, no terceiro capítulo, está apresentada a revisão de literatura, onde são abordadas algumas propriedades físicas que têm influência direta na resistência ao cisalhamento, além das propriedades mecânicas, tais como compressibilidade e resistência ao cisalhamento. A primeira é mencionada de forma mais sucinta e a segunda, objetivo do trabalho, é abordada de forma mais detalhada, incluindo vários métodos para avaliação da resistência de diferentes composições de resíduos, bem como uma compilação da literatura de parâmetros de resistência ao cisalhamento para adoção em projetos de aterros sanitários, e finalizando, é apresentado um novo modelo geotécnico para resíduos sólidos desenvolvido pela comunidade científica da Alemanha.

No capítulo 4, está apresentado o programa experimental, o qual aborda todos os procedimentos necessários para realização dos ensaios de cisalhamento direto, incluindo desde a construção do equipamento e montagem das amostras até a execução dos ensaios

propriamente dita. No capítulo 5, são apresentados e analisados os resultados obtidos no programa experimental, bem como é realizada uma comparação dos resultados das diferentes amostras de resíduos investigadas. As principais conclusões da dissertação e sugestões para futuros estudos estão apresentadas no capítulo 6.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Contribuir para o entendimento da resistência dos resíduos sólidos urbanos (RSU) a partir da determinação de seus parâmetros de resistência, por meio de ensaio de cisalhamento direto em equipamento de grandes dimensões, em diversas condições de umidade, composição, densidade e idade.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um equipamento de grandes dimensões para ensaio de cisalhamento direto;
- Identificar envoltórias de resistência dos RSU para diferentes condições de umidade, densidade, composição e idade;
- Verificar a validade da envoltória de Mohr – Coulomb para os RSU;
- Propor um procedimento para realização de ensaios de cisalhamento direto em RSU.

3 REVISÃO DE LITERATURA

As principais propriedades mecânicas relacionadas com o comportamento geomecânico dos aterros sanitários são a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade. Estas, por sua vez, são dependentes da composição e das propriedades físicas, bem como da variação destas últimas com o tempo, em função dos estágios de degradação a que estão sujeitos os materiais.

Ressalta-se que a obtenção de parâmetros e a análise de estabilidade e deformabilidade dos aterros sanitários ainda carecem de modelos e métodos específicos que sejam aplicados a estes materiais. Até o presente momento, os procedimentos da mecânica dos solos são, na maioria das vezes, empregados para descreverem as propriedades do RSU mencionadas. Entretanto, esta abordagem pode não ser adequada em função das diferenças existentes entre os dois tipos de material, que serão apresentadas no decorrer deste capítulo.

Outro aspecto relevante diz respeito à elevada dispersão apresentada pelos parâmetros geotécnicos obtidos para os resíduos sólidos urbanos registrados na literatura, apresentando, algumas vezes, certas inconsistências. Tal fato explica-se pela variação na composição dos resíduos, além das diversas condicionantes que afetam as propriedades dos mesmos. Desta forma, deve-se sempre levar em consideração as condições de contorno em que foram obtidos os parâmetros apresentados (Konig e Jessberger, 1997).

Diante do exposto, será apresentada uma revisão incluindo além das propriedades geomecânicas, citadas no parágrafo anterior, algumas propriedades físicas bem como a composição, pois estas últimas têm uma influência direta em compressibilidade e resistência ao cisalhamento.

3.1 *Peso Específico*

Segundo Dixon e Jones (2005), o conhecimento do peso específico é exigido para todos os aspectos de projeto dos aterros de RSU e, portanto, é surpreendente que tão poucos estudos detalhados tenham sido realizados. Os valores de peso específico variam significativamente tanto entre diferentes locais quanto dentro de um mesmo local.

O peso específico dos resíduos é influenciado por uma série de fatores, dentre os quais podem ser destacados: a composição, o método de disposição, a forma de execução, as pressões do

material sobrejacente e a idade do resíduo, a qual está relacionada com o grau de decomposição do material. Dixon e Jones (2005) acreditam que o peso específico do resíduo é inicialmente muito mais dependente da composição do resíduo, da cobertura diária e do grau de compactação durante a disposição. Mas, como o resíduo se degrada, o peso específico passa a ser mais dependente da profundidade do aterro, do grau de decomposição e das condições climáticas.

A influência da composição gravimétrica nos valores do peso específico pode ser verificada pelo fato de resíduos com maior percentual de matéria orgânica apresentarem maior peso específico e resíduos com maior quantidade de papéis, papelão e plásticos possuírem menor peso específico. Normalmente, populações de maior poder aquisitivo geram resíduos de menor peso específico, acontecendo o contrário para populações de menor poder aquisitivo, devido ao maior percentual de matéria orgânica.

Lamare Neto (2004) ao analisar a composição gravimétrica do resíduo da cidade do Rio de Janeiro, constatou que os resíduos gerados em bairros mais pobres possuíam maior peso específico que aqueles gerados nas regiões mais nobres da cidade. Ressalta-se que a composição gravimétrica dos resíduos é influenciada também pelos hábitos da população e grau de desenvolvimento da mesma. Lamare Neto (2004) verificou que o peso específico dos resíduos reduziu de (2,50 kN/m³) em 1986 para (1,70 kN/m³) em 1998, no município do Rio de Janeiro. Segundo ele, esta redução se deveu ao desenvolvimento tecnológico, o qual tem proporcionado à produção de materiais mais leves, concluindo, portanto, que esta redução é uma tendência mundial.

Os componentes do RSU têm uma influência controladora no peso específico total da massa do referido material. Os componentes individuais do resíduo possuem uma larga faixa de pesos específicos de partícula e estes podem mudar com o tempo. Os componentes podem ter vazios dentro deles, além daqueles entre os componentes. Isto resulta numa significativa porcentagem de partículas de resíduo comportando-se diferentemente das partículas de solo, devido à sua alta compressibilidade (Dixon e Jones, 2005).

Os resíduos são formados por vários tipos de constituintes, e estes constituintes são freqüentemente porosos e não saturados. Como esses materiais são normalmente muito compressíveis, propriedades tais como peso específico e capacidade de campo devem ser determinadas como uma função da porosidade, as quais são função do método de disposição e

da pressão aplicada. Considerando que os resíduos possuem constituintes porosos, é necessário distinguir entre vazios intrapartículas e interpartículas. É totalmente possível, por exemplo, obter vazios intrapartículas parcialmente saturados e, ao mesmo tempo, vazios interpartículas secos para uma determinada amostra de resíduos (Landva e Clark, 1990).

Com relação ao método de disposição, pode-se considerar as características das camadas de cobertura dos resíduos. A espessura, bem como composição e o espaçamento das camadas de cobertura afetarão os valores de peso específico. Normalmente, quanto maior o volume de material de cobertura dentro da massa de resíduos, maior é o peso específico dos mesmos. Watts e Charles (1990) obtiveram um peso específico para RSU novos dispostos em um aterro sanitário na Inglaterra de $5,9 \text{ kN/m}^3$ e de $6,3 \text{ kN/m}^3$ para resíduos com a camada de cobertura.

Já sobre a forma de execução, destaca-se o método de compactação dos resíduos. Considerando que o RSU é um material particulado e uma larga proporção de componentes tem um alto índice de vazios e uma alta compressibilidade, os processos de compactação irão reduzir os vazios dentro de um componente individual assim como também os vazios entre os vários componentes (Dixon e Jones, 2005). O peso específico do resíduo compactado dependerá dos componentes do resíduo, da espessura da camada, do peso e do tipo de equipamento de compactação, do número de passadas do equipamento sobre o resíduo e a umidade. Entretanto, Marques (2001), ao construir uma célula experimental no Aterro Bandeirantes, localizado no Município de São Paulo, concluiu que o teor de umidade é o principal parâmetro controlador (de interferência) do processo de compactação dos resíduos sólidos urbanos, sendo que a influência da energia aplicada às camadas de resíduos (espessura das camadas, tipo e número de passadas do equipamento e inclinação do plano de compactação) teve menor importância no processo. Porém, Watts e Charles (1990) obtiveram um peso específico de $6,3 \text{ kN/m}^3$ para camadas de espessura de 2 m e de 8 kN/m^3 para camadas com espessura de 60 cm, considerando que o equipamento de compactação e o local de disposição eram os mesmos. Confirmando esta tendência, Dixon e Jones (2005) afirmam que uma camada com espessura de 50 cm a 1 m facilita o alcance da compactação, produzindo bons pesos específicos unitários. Segundo os autores, camadas de 2 a 3 m de espessura resultam numa compactação do tipo pobre a moderada.

Kavazanjian et al. (1995) propuseram um perfil de peso específico variando com a profundidade. Eles mostraram que o peso específico pode variar de valores de 6 kN/m^3 na superfície até cerca de 10 kN/m^3 em profundidades próximas de 40 m, a partir da qual tendem a se estabilizar. Eles também mostraram que resíduos dispostos em camadas de 2m de espessura e aqueles dispostos em camadas de 30 a 50 cm, houve uma diferença de 2 kN/m^3 nos valores de peso específico para resíduos na superfície, e esta diferença tende a diminuir até próximo de 40 m de profundidade, quando ela tende a se estabilizar.

Outro aspecto mencionado no início deste item, diz respeito às pressões do material sobrejacente, que estão diretamente ligadas com a profundidade. Quanto maior a profundidade, maiores serão as pressões sobrejacentes, promovendo um maior adensamento e compressão do maciço. Segundo Fassett et al. (1994), resíduos dispostos entre 10 e 20 m com baixa compactação, podem atingir um peso específico próximo ao de resíduos inicialmente bem compactados. Entretanto, o efeito da profundidade no peso específico é verificado até um determinado valor. Como já comentado, Kavazanjian et al. (1995) mostraram que o peso específico abaixo de profundidades de 40 a 45 m varia muito pouco, conforme pode ser observado na Figura 3.1.

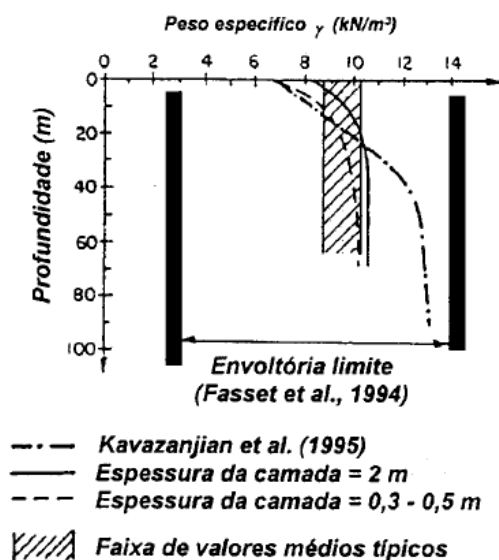


Figura 3.1 – Variação do peso específico de resíduos sólidos urbanos com a profundidade (Kavazanjian et al., 1995)

Oweis e Khera (1986) realizaram perfurações em um aterro sanitário localizado na Califórnia (EUA) e por meio da retirada de amostras de resíduos, obtiveram a variação do peso específico total e seco com a profundidade para resíduos novos e antigos. Os resultados

obtidos mostraram o aumento do peso específico com a profundidade e uma pequena diferença (acréscimo) do peso específico total dos resíduos novos em relação aos dos resíduos antigos, devida à presença de maior umidade nos primeiros. Além disso, ao constatarem que os pesos específicos secos eram praticamente iguais para os resíduos novos e antigos, concluíram que os resíduos mais recentes apresentavam maior umidade do que os antigos.

Como forma de ilustrar a dispersão de valores de peso específico, a Tabela 3.1, montada a partir de alguns dos dados apresentados por Marques (2001), apresenta valores médios para o peso específico de resíduos determinados por diversos autores. Através dela, observa-se uma larga faixa de valores que vão desde 3 kN/m³ para resíduos não compactados a 16 kN/m³ para resíduos bem compactados. Segundo König e Jessberger (1997) os pesos específicos obtidos para os RSU variam desde baixos valores como 3 kN/m³, para aterros não compactados a pobremente compactados, até valores como 17 kN/m³, para aterros com alto grau de compactação. Dependendo da composição e das características da disposição, pode-se obter valores acima de 18 kN/m³. Entretanto, Carvalho (1999) afirma que, de uma maneira geral, os valores médios situam-se entre 9 e 12 kN/m³.

Tabela 3.1 – Peso específico de resíduos sólidos urbanos

Características dos Resíduos	Peso Específico (kN/m³)	Referência
RSU não compactado	2,9	Schomaker (1972)
RSU medianamente compactado	4,7 a 5,9	
RSU bem compactado	8,8	
RSU pouco compactado	5,5 a 6,9	Sargunan et al. (1986)
RSU bem compactado	6,8 a 16,2	Landva e Clark (1986)
RSU bem compactado	5,4 a 8,0	Watts e Charles (1990)
RSU compactado	6,3 a 9,4	Oweis e Khera (1990)
RSU (sem relato sobre a compacidade dos materiais)	15,0	Richardson e Reynolds (1991)
RSU mal compactado	3,0 a 9,0	Fasset et al. (1994)
RSU medianamente compactado	5,0 a 8,0	
RSU bem compactado	9,0 a 10,5	
RSU (sem relato sobre a compacidade dos materiais)	10,0 a 15,0	Zonrberg et al. (1999)

No que diz respeito à determinação do peso específico, Landva e Clark (1990) afirmam que este parâmetro é difícil de ser obtido devido à natureza grosseira e irregular dos materiais dos resíduos. Desta forma, uma grande amostra de material é exigida. Normalmente, uma trincheira com volume de 10 m³ é suficiente. Este volume é suficiente para incluir alguns dos grandes constituintes pertencentes aos resíduos tais como, pneus, vigas, tábuas, entulhos de construção civil e outros (Landva e Clark, 1990). Entretanto os autores apontaram uma falha neste método, a qual está relacionada com a dificuldade de se evitar a presença de uma ou várias camadas de cobertura de solo na massa de resíduos.

Segundo Marques (2001), na determinação do peso específico in situ dos resíduos, além das dificuldades de execução, há a possibilidade de dispersão de resultados. As dificuldades freqüentes em avaliar o peso específico do RSU foram resumidas por Fassett et al. (1994) como: a separação da contribuição da cobertura de solo diária; a avaliação das mudanças no peso específico com o tempo e a profundidade; a maioria dos valores relatados reflete resíduos próximos ou na superfície; e a obtenção de dados no teor de umidade do resíduo.

Fassett et al. (1994) consideraram que os seguintes fatores devem ser registrados juntamente com os pesos específicos medidos: a composição de RSU incluindo a cobertura diária e o teor de umidade, o método e o grau de compactação, a profundidade na qual o peso específico foi medido e a idade do resíduo. A forma da medida do peso específico deve também ser registrada. Os valores podem ser dados como peso específico seco (a amostra poderia ter sido artificialmente seca), peso específico total (alguma umidade presente, porém o resíduo não se encontra saturado) e peso específico saturado. Na maioria dos estudos, é o peso específico total que é medido e relatado (Dixon e Jones, 2005).

Vários métodos têm sido empregados, dentre eles, tem-se métodos de determinação direta (trincheiras escavadas), conforme já mencionado, métodos não destrutivos (processos geofísicos e gravimétricos) e ensaios de campo (densímetros nucleares). Entretanto, Marques (2001) afirma que o método mais simples e confiável consiste no método da trincheira escavada. Gachet et al. (1998), depois de terem realizado uma avaliação da utilização dos métodos não destrutivos e de ensaios de campo, concluíram, após as análises dos resultados e dos procedimentos e custos envolvidos, que os métodos de determinação direta são mais fáceis de serem executados.

Este método consiste na escavação de uma trincheira, seguida da pesagem do material escavado. Logo após, preenche-se a trincheira devidamente impermeabilizada com água, obtendo-se, desta forma, o volume do material retirado da trincheira. Assim sendo, tem-se o peso específico do material através do quociente do peso obtido pelo volume determinado. Entretanto, esta técnica tem como desvantagens a limitação de profundidade, em torno de 4 m, além da impossibilidade de separar possíveis camadas de coberturas pertencentes à trincheira de ensaio, impossibilitando, desta forma, a obtenção de resultados em profundidades maiores (Gachet et al., 1998).

Catapreta et al. (2005) descrevem a metodologia empregada para a determinação do peso específico dos RSU dispostos no Aterro Sanitário de Belo Horizonte. Esse controle vem sendo realizado pelo registro topográfico semanal da frente de serviço associado à pesagem dos veículos na central de balanças. O número e as características dos equipamentos utilizados na compactação, bem como a inclinação das rampas de compactação e o número de passadas, também vêm sendo monitorados. Os valores observados, em sua maioria, situaram-se na faixa de 7 a 11 kN/m³, tendo sido observados valores mínimo de 5,90 kN/m³ e máximo de 14,2 kN/m³, sendo a média de 9,2 kN/m³. Pode ser notada uma grande variação dos valores observados, dentro da faixa mencionada. No entanto, devido à complexidade de execução dessa operação e os diversos fatores que podem influenciar na compactação dos resíduos, os valores apurados podem ser considerados satisfatórios, indicando um bom desempenho dos equipamentos empregados.

A idade também exerce um efeito direto nos valores de peso específico do RSU. Ao longo do tempo, a degradação dos componentes orgânicos resultará em perda de massa, mudanças no tamanho e alteração das propriedades mecânicas (compressibilidade e resistência ao cisalhamento). Ela também mudará a densidade de cada componente do RSU. Como a partícula de resíduo degrada, o índice de vazios reduz e então uma redução de volume acontece. Apesar de haver poucas medidas de campo no resíduo degradado, geralmente espera-se que a degradação resulta no aumento na densidade do resíduo, e então no peso específico (Dixon e Jones, 2005). Desta forma, é de se esperar que o resíduo velho apresente peso específico superior ao resíduo novo.

Em relação à influência do peso específico na resistência do RSU, diante de vários trabalhos publicados, podendo citar os de Carvalho (1999), Fucale e Jucá (2002), Fucale (2005), entre

outros, pode-se afirmar que resíduos com maior peso específico possuem maior resistência ao cisalhamento, demonstrando a grande importância de uma boa compactação sobre os resíduos durante a etapa de disposição final.

3.2 Composição

Os RSU constituem-se de uma mistura de resíduos principalmente de origens residencial e comercial, sendo formados por resíduos de alimentos e jardinagem, produtos de papel, plásticos, borracha, têxteis, madeira, cinzas e solos. Portanto, trata-se de um material heterogêneo cujo tamanho de suas partículas varia desde partículas de solo até grandes objetos, tais como resíduos de demolição. Dixon e Langer (2006), em função desta heterogeneidade dos resíduos e de uma carência do conhecimento do comportamento do resíduo como um material de engenharia, propõem que um rigoroso sistema de classificação seja exigido para ajudar a explicar o comportamento geomecânico de maciços de resíduos, como forma de agrupar resíduos com propriedades mecânicas similares e facilitar a troca e a interpretação das propriedades medidas.

Desta forma, torna-se difícil relacionar a influência da composição sobre a resistência dos resíduos. Em função da grande heterogeneidade do RSU bem como de sua variação de local para local, definir qual composição apresenta maior resistência é algo muito difícil.

Assim como os solos, o RSU é composto das fases sólida, líquida e gasosa. Trata-se de um meio multifásico, sendo que a fase sólida é não inerte e deformável, mas ela pode ser dividida em matéria inerte estável, matéria altamente deformável e matéria facilmente biodegradável. Entretanto, a grande diferença entre os dois tipos de material mencionados decorre da variação das três fases ao longo do tempo em função dos processos de biodegradação, que transformam a matéria orgânica (fase sólida) nas fases líquida (chorume) e gasosa (gás metano e outros).

Os diversos constituintes da fase sólida formam um arranjo poroso que pode estar ou não preenchido por líquidos e/ou biogás e pode, ainda, estar em processo constante de decomposição. Carvalho (1999) conclui que o ponto básico para a compreensão do comportamento geomecânico dos maciços de RSU é o conhecimento das interações existentes entre as três fases e as alterações destas com o tempo, ou seja, sua biodegradabilidade.

A composição do RSU varia de local para local e dentro de um mesmo local. Ela depende principalmente de fatores como: clima, estações do ano, dos hábitos e níveis de desenvolvimento econômico, tecnológico e sanitário de uma população. Observa-se que, em países desenvolvidos, o percentual de matéria orgânica é menor em relação aos países em desenvolvimento. Na Alemanha, por exemplo, por meio de políticas de reciclagem e pré-tratamento bem desenvolvidas, os resíduos dispostos nos aterros sanitários possuem uma composição com menor teor biodegradável e uma graduação mais uniforme.

3.3 Teor de Umidade

O teor de umidade do RSU depende da composição inicial, das condições climáticas locais, das condições operacionais, do grau de decomposição e do teor de matéria orgânica.

O teor de umidade é uma propriedade de grande interesse para geotecnia no que diz respeito à análise de estabilidade de aterros. Quanto maior o teor de umidade, maior será o desenvolvimento de poro pressões na massa de resíduos e, conseqüentemente, menor será a tensão efetiva desta massa, resultando em menores valores de resistência ao cisalhamento.

O teor de umidade do RSU pode ser analisado, considerando duas situações, ou seja, antes e depois de ser disposto no aterro sanitário. Na primeira situação, o teor de umidade dependerá da composição inicial do RSU, das formas de acondicionamento, armazenamento e coleta, e das condições climáticas locais. Já na segunda situação, a referida propriedade dependerá da primeira situação, dos procedimentos operacionais realizados no aterro sanitário, das condições climáticas, da taxa de decomposição biológica, da capacidade e funcionamento dos sistemas de drenagem de líquidos percolados e do sistema de recobrimento do aterro. No presente trabalho, serão abordados os fatores intervenientes para a segunda situação, além da composição inicial.

Com relação à composição inicial, quanto maior o percentual de matéria orgânica, maior será o teor de umidade do RSU. Segundo Knochenmus et al. (1998), o teor de umidade do RSU é basicamente o resultado de altas porcentagens de resíduos orgânicos, tais como resíduos alimentares, de jardim e poda. Landva e Clark (1990) afirmaram que, em geral, o teor de umidade parece aumentar com o aumento do teor de matéria orgânica, ao analisarem valores do teor de umidade e do teor de matéria orgânica de várias amostras de RSU obtidas em aterros do Canadá. Carvalho (1999), ao coletar amostras a partir de dois furos a trado

mecânico de grande diâmetro ($D=0,40$ m) realizados no Aterro Bandeirantes, município de São Paulo, observou diferenças significativas entre os diversos constituintes do RSU, como por exemplo, papel, madeira, têxteis e pasta orgânica apresentaram altos valores de umidade, em geral, acima de 50%, e componentes como vidro (6%) e pedra (12,6%) apresentaram menores valores de umidade.

Sobre os procedimentos operacionais realizados no aterro, um importante aspecto diz respeito às camadas de cobertura diária compostas de solo. Segundo Dixon e Jones (2005), elas resultam em corpos de resíduos altamente estruturados (ou seja, camadas horizontais de resíduos cobertas por camadas de cobertura de solos que normalmente possuem baixa permeabilidade), podendo causar grandes variações de umidade em todo o maciço de resíduos. A construção de camadas de cobertura diária utilizando solos de baixa permeabilidade, pode favorecer a formação de bolsões de líquidos, similares a lençóis empoleirados, entre essas camadas. Este fato acarretará o desenvolvimento de poro-pressões e, conseqüentemente, a redução da resistência ao cisalhamento do resíduo, podendo causar a ruptura de um aterro. Quando são utilizados solos permeáveis nas camadas de cobertura, a tendência é dos líquidos presentes migrarem para camadas mais baixas das células do aterro. Confirmando esta tendência, através de medidas realizadas no aterro de Pioneer Crossing na Pensilvânia (USA), Gabr e Valero (1995) constataram um aumento do teor de umidade com a profundidade, havendo uma variação de 30% próximo à superfície até 130% para camadas inferiores. Ao se analisar os resultados de teor de umidade obtidos por Carvalho (1999) em amostras coletadas a partir de dois furos a trado mecânico de grande diâmetro ($D = 0,40$ m) no Aterro Bandeirantes, pode-se observar na Figura 3.2, o aumento desta propriedade com a profundidade. Embora a autora tenha feito a análise com relação a grande variabilidade dos valores apresentados, ou seja, variando de 50% a maiores que 100%, fato que se deve, segundo ela, à heterogeneidade dos resíduos, percebe-se, de uma maneira geral, o aumento do teor de umidade com a profundidade.

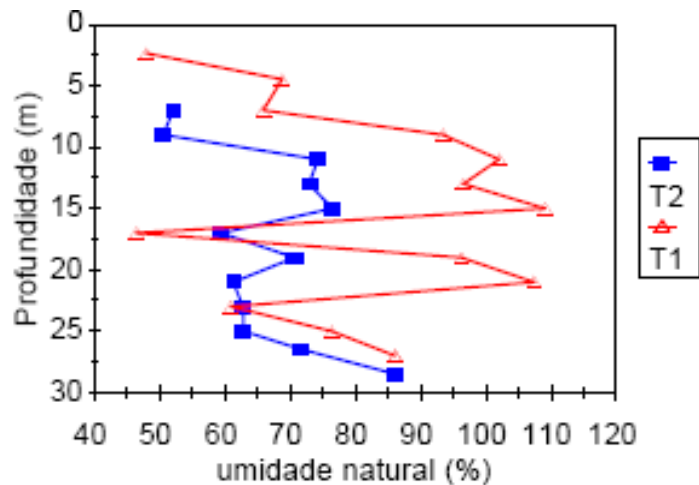


Figura 3.2 – Variação do teor de umidade in situ do RSU estudado, valores em base seca (Carvalho, 1999)

Em contrapartida, Coumoulos et al. (1995) observaram uma redução do teor de umidade com a profundidade, variando de 80% a 5 m de profundidade, até cerca de 40% para profundidade de 30 m. Diante destas contradições, percebe-se que é difícil definir um padrão de comportamento para todos aterros com relação à umidade. Em cada aterro, a composição do RSU, assim como os procedimentos operacionais e o funcionamento do sistema de drenagem são diferentes, ocasionando, desta forma, uma grande variação nos teores de umidade de aterro para aterro, dentro de um mesmo aterro, e em profundidades próximas, quando comparadas de aterro para aterro e dentro de um mesmo aterro.

Já sobre as condições climáticas, devem ser destacados os índices de precipitação e de evapotranspiração. Blight et al. (1992) ao realizarem ensaios para determinação do teor de umidade no aterro de Linbro em Johannesburg, na África do Sul, constataram uma grande variação desta propriedade em diferentes épocas do ano, ou seja, em outubro/88, obtiveram valores de 50% e, em novembro/90, após altos índices de precipitação, valores próximos de 100%.

Sobre a decomposição dos resíduos, amostras retiradas de ensaios do tipo SPT para determinação da resistência à penetração de RSU realizados por Fucale e Jucá (2002) nas Células 1 e 4 do Aterro de Aguazinha, região metropolitana de Recife, e em uma célula piloto do Aterro Metropolitano Centro, na região metropolitana de Salvador, mostraram que resíduos mais antigos possuem menor umidade. No primeiro aterro, para resíduos com idade de 12 anos, as amostras apresentaram valores médios de teor de umidade de 25% e no segundo aterro, para resíduos com idade de 1 ano, valores de 34%. Segundo os autores, os

valores do teor de umidade de 34% se devem ao fato dos resíduos apresentarem grande quantidade de matéria orgânica associada a uma baixa idade, 1 ano de deposição no período em que foi realizado o ensaio (1998), onde havia uma elevada atividade microbiológica.

Os sistemas de drenagem de líquidos e a cobertura final têm uma grande influência no teor de umidade de um maciço de RSU. O primeiro permite o transporte dos líquidos para fora do maciço e o segundo dificulta a penetração das águas pluviais para o interior do aterro sanitário. Sendo assim, ambos os sistemas têm grande importância na estabilidade de um aterro sanitário, pois possibilitam a redução do desenvolvimento de poro-pressões e, conseqüentemente, no aumento da resistência do maciço de RSU.

3.4 Permeabilidade

A permeabilidade dos resíduos é um importante parâmetro na avaliação da quantidade de líquidos lixiviados gerados e no dimensionamento dos sistemas de drenagem interna de um aterro sanitário. Além disso, ela condiciona a circulação de líquidos e gases dentro da massa de resíduos. Quanto menor a permeabilidade final da massa de resíduos, menores serão a circulação e liberação de líquidos produzidos (Oliveira, 2002). Este aspecto, por sua vez, interfere diretamente na estabilidade dos aterros sanitários, pois, quanto maior for o acúmulo de líquidos e gases na massa de resíduos, maiores serão os valores de poro-pressões geradas e, então, menor será a resistência do material em questão.

Outro aspecto relevante e de relação direta com o presente trabalho diz respeito à determinação da velocidade de um ensaio de cisalhamento direto. Esta velocidade é definida de forma que toda a poro-pressão desenvolvida seja dissipada, obtendo-se parâmetros de resistência efetivos. Portanto, quanto maior a permeabilidade dos resíduos, maior velocidade de cisalhamento poderá ser utilizada. Ressalta-se que o cálculo da velocidade do referido ensaio é feito, baseando-se na fase de adensamento.

A determinação da permeabilidade é feita em ensaios de laboratório e de campo, estes, por sua vez, podem ser realizados por meio da execução de furos e poços. Segundo Dixon e Jones (2005), existe informação limitada na literatura sobre a condutividade hidráulica dos resíduos medida em campo e, portanto, o entendimento atual é incompleto. Entretanto, as observações de campo do fluxo de fluidos em maciços de resíduos e extensos experimentos de grande escala em laboratório fornecem informações para uso em projeto.

A disposição dos resíduos em camadas e o uso de solo de cobertura diária (normalmente de baixa permeabilidade) resultam em maciços de resíduos constituídos por uma estrutura de camadas sub-horizontais e com a presença de finas partículas (papéis e plásticos) orientadas horizontalmente (Dixon e Jones, 2005). Tal fato resulta em propriedades hidráulicas anisotrópicas, com permeabilidade maior na direção horizontal. Lençóis empoleirados acima das camadas de cobertura são normalmente descobertos e o vazamento horizontal de líquidos suspensos em taludes de resíduos têm sido observados em muitos aterros (Dixon e Jones, 2005).

Além da estrutura dos resíduos formada, o segundo controle principal na permeabilidade é o nível de tensões (Dixon e Jones, 2005). Um estudo de permeabilidade dos resíduos foi apresentado por Powrie e Beaven (1999), usando uma câmara de compressão de grande dimensão. Eles concluíram que a condutividade hidráulica dos resíduos não-degradados poderia reduzir por mais de três ordens de magnitude devida à compressão proporcionada por um aterro de 60 m de altura, atingindo valores de aproximadamente 10^{-8} m/s.

Conforme citado por Chen e Chynoweth (1995), muitos fatores afetam a condutividade hidráulica dos solos, tais como: o tamanho das partículas, índice de vazios, composição, textura, grau de saturação, geometria do poro e propriedades do fluido do ensaio. Porém, não é possível caracterizar amostras de resíduos, baseando-se nestes fatores, devido à heterogeneidade destes materiais. Assim, estes pesquisadores determinaram a condutividade hidráulica do RSU sob vários graus de consolidação e com diferentes composições.

Pode-se dizer que os valores do coeficiente de permeabilidade do RSU variam em função da composição gravimétrica, peso específico e da idade, a qual está relacionada com o grau de decomposição do material. A faixa de valores típicos de coeficiente de permeabilidade apresentados na literatura está compreendida entre 10^{-8} e 10^{-4} m/s. Esta grande variação se deve às diferentes metodologias empregadas nos ensaios e aos diferentes pesos específicos dos resíduos oriundos de diversos locais de disposição final. Entretanto, apesar desta extensa faixa de valores, a grande maioria deles concentra-se entre 10^{-6} e 10^{-4} m/s, podendo estar associados com areias finas limpas, sendo que um valor de 10^{-5} m/s pode ser sugerido como uma primeira aproximação (Konig e Jessberger, 1997).

Porém, no caso de resíduos sólidos oriundos do Brasil, estes valores estão fora desta faixa, apresentando-se um pouco menores em relação aos da literatura internacional. Boscov e

Abreu (2000) afirmaram que provavelmente os resíduos sólidos brasileiros possuem coeficientes de permeabilidade mais baixos em relação aos da literatura internacional devido à sua diferente composição, a qual é composta por um alto teor de material putrescível. Em função de altos valores de pressões de gás registrados no Aterro Sanitário Bandeirantes (valores de até 170 kPa) por Kaimoto e Cepollina (1996), Boscov e Abreu (2000) questionaram a hipótese de Santos e Presa (1995), os quais consideraram os resíduos sólidos como materiais “livre drenantes”, ou seja, não desenvolveriam excessos de poro-pressão quando cisalhados.

Conforme já comentado, o peso específico é função da composição, método de disposição, forma de execução, pressões do material sobrejacente e idade do resíduo, a qual está relacionada com o grau de decomposição do material. Portanto, qualquer destes fatores intervenientes no peso específico irá afetar também a permeabilidade, pois esta é função do peso específico. A Tabela 3.2 apresenta valores de coeficientes de permeabilidade obtidos por diversos autores, relacionando este parâmetro com o peso específico e a metodologia empregada na realização dos ensaios.

Tabela 3.2 – Valores de coeficientes de permeabilidade (Carvalho, 1999).

Referência	Peso Específico (kN/m ³)	Coeficiente de permeabilidade (m/s)	Metodologia Utilizada
Fungaroli et al. (1979)	1,1 – 4	$1 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$	Determinação em lisímetros
Koriatas et al. (1983)	8,6	$3,15 \times 10^{-5} - 5,1 \times 10^{-5}$	Ensaio de laboratório
Oweis & Khera (1986)	6,45	1×10^{-5}	Estimativa de dados de campo
Oweis et al. (1990)	6,45	1×10^{-5}	Ensaio de bombeamento
	9,4-14	$1,5 \times 10^{-6}$	Ensaio de campo com carga variável
	6,3-14	$1,1 \times 10^{-5}$	Ensaio em poço
Landva & Clark (1990)	10,1-14,4	$1 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-4}$	Ensaio em poço
Gabr & Valero (1995)	-	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-5}$	Ensaio de laboratório
Blengino et al. (1996)	9-11	$3 \times 10^{-7} - 3 \times 10^{-6}$	Ensaio de campo em furos profundos (30-40m) e com carga variável
Manassero et al. (1990)	8-10	$1,5 \times 10^{-5} - 2,6 \times 10^{-4}$	Ensaio de bombeamento (15-20m em profundidade)
Beaven & Powrie (1995)	5-13	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-4}$	Ensaio de laboratório com pressão conf. de 0– 600kPa
Brandl (1990)	11-14	$7 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-5}$	Ensaio de campo com carga variável
	13-16	$5 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-7}$	Ensaio em poço
Brandl (1994)	9-12	$2 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-6}$	Ensaio de laboratório
	9-12	$5 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-5}$	
	13-17	$2 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-5}$	
Jessberger (1984)	RSU misturado c/ entulho	$1 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$ $3 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-5}$	Antes da comp. dinâmica Depois da comp. dinâmica
Jessberger (1984)	RSU misturado c/ entulho	$4 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-3}$ $1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-4}$	Antes da comp. dinâmica Depois da comp. dinâmica
Santos et al. (1998)	14-19	1×10^{-7}	Ensaio in situ em furo de sondagem
Blengino et al. (1996)	-	$3 \times 10^{-7} - 2,5 \times 10^{-6}$	Ensaio in situ em furo de sondagem

Com a análise dos dados da Tabela 3.2, percebe-se a redução da permeabilidade com o aumento do peso específico. Dentro deste contexto, alguns trabalhos de correlação dessas duas propriedades mencionadas podem ser citados. Landva e Clark (1990) realizaram ensaios de trincheiras em aterros de RSU de várias cidades do Canadá, obtendo coeficientes de 1×10^{-5} a 4×10^{-4} m/s, correspondentes a valores característicos de areias limpas. Os pesquisadores correlacionaram os referidos coeficientes com os pesos específicos, possibilitando constatar,

de uma maneira geral, uma diminuição da permeabilidade com o aumento do peso específico. Confirmando esta tendência, Aguiar (2001), ao realizar ensaios em campo com o permeâmetro de Guelph em duas leiras de resíduos sólidos, as quais foram submetidas ao processo de pré-tratamento mecânico e biológico, percebeu a diminuição da velocidade de percolação com o aumento da compactação causada pela degradação dos resíduos depositados em uma das leiras. Como já comentado, Chen e Chynoweth (1995) realizaram ensaios de condutividade hidráulica em resíduos sólidos urbanos sob vários níveis de compactação e diferentes composições, constatando que o coeficiente de permeabilidade dos resíduos diminuía com o aumento do peso específico. Os valores dos referidos coeficientes foram $9,6 \times 10^{-2}$, $7,3 \times 10^{-4}$ e $4,7 \times 10^{-5}$ cm/s para pesos específicos de 160, 320 e 480 kg/m³ respectivamente.

3.5 Compressibilidade

Segundo König e Jessberger (1997), os mecanismos que governam o recalque de resíduos sólidos urbanos são variados e complexos devido à heterogeneidade deste material, da deformabilidade das partículas e dos grandes vazios presentes inicialmente no aterro de resíduos. De acordo com Carvalho (1999), além da composição heterogênea dos constituintes, a degradação dos mesmos com o passar do tempo e a compressibilidade devido à sobrecarga são considerados pontos relevantes no comportamento peculiar dos RSU.

Em relação aos processos de degradação, eles são proporcionados por fenômenos físico-químicos e biológicos. Esses fenômenos são influenciados por fatores como, composição e umidade do resíduo, disponibilidade de nutrientes para crescimento microbológico, detalhes de projeto e de operação do aterro (compactação, existência da cobertura diária, drenagem) e condições climáticas favoráveis (Van Meerten et al., 1995). Ressalta-se que em função das transformações biológicas, os componentes sólidos do RSU transformam-se em gases, líquidos e sólidos inorgânicos e orgânicos relativamente inertes, ocasionando em uma redução no volume do material depositado.

Manassero et al. (1996) propuseram que o mecanismo de recalque em aterros sanitários pode ser representado pelas seguintes fases:

- Compressão mecânica resultante do re-arranjo e da quebra de elementos sólidos devido ao peso próprio do RSU e peso dos materiais de cobertura;

- Variação de volume causada pela migração de pequenas partículas para os vazios maiores (erosão e ravinamentos internos);
- Comportamento viscoso e fenômeno de consolidação envolvendo tanto o esqueleto sólido quanto as partículas individuais, ou seja, os componentes;
- Recalques causados pela biodegradação dos componentes orgânicos;
- Colapso dos componentes devido às mudanças físico-químicas tais como corrosão, oxidação e degradação dos componentes inorgânicos.

Como forma de representar esta subdivisão dos mecanismos de recalque, na Figura 3.3, é apresentada a curva teórica de compressibilidade proposta por Grisolia e Napoleoni (1996). Segundo os autores, os resíduos, assim como os solos, são meios multifásicos constituídos de elementos sólidos, líquidos e gasosos. Mas, existem diferenças essenciais entre esses dois materiais. Assim, eles consideram que a fase sólida do RSU pode-se dividir em três classes de materiais:

- Materiais inertes estáveis (metais, vidros, entulho), cujo comportamento pode ser assumido como o de um solo heterogêneo de granulação grossa;
- Materiais altamente deformáveis (fragmentos e caixas de papel, plásticos e têxteis) caracterizados por grandes recalques e comportamento anisotrópico;
- Materiais facilmente degradáveis (materiais orgânicos, vegetais, restos alimentares), os quais são submetidos por transformações físico-químicas, em curto espaço de tempo, ocasionando redução de volume e gerando gases e líquidos.

Após o lançamento, são poucos os contatos entre os materiais inertes estáveis e o RSU apresenta uma estrutura porosa que pode variar de forma e volume (Fase I). Quando submetidos a um carregamento, ocorre uma acentuada redução de volume dos materiais altamente deformáveis e deslocamento dos inertes estáveis (Fase II). Mantendo a carga constante, ocorrem deformações do tipo “*creep*” e transformações da matéria orgânica (Fase III), até que estabeleçam, no fim do processo, contatos diretos entre os elementos inertes estáveis.

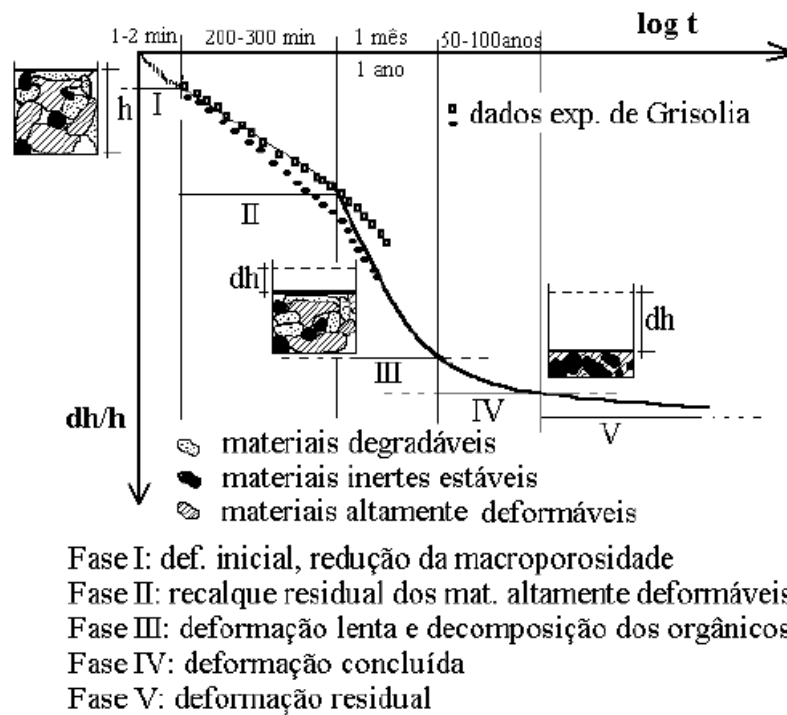


Figura 3.3 – Curva teórica de compressibilidade do RSU (Grisolia e Napoleoni, 1996).

Em relação aos fatores intervenientes na magnitude dos recalques devido ao peso próprio do RSU e às sobrecargas, segundo Edil et al. (1990), eles são inúmeros e influenciados por diversos fatores, incluindo: peso específico e índice de vazios iniciais do resíduo, conteúdo orgânico, altura do aterro e sobrecargas adicionais, história de tensões durante a operação e após o fechamento do aterro, nível e flutuação dos líquidos no interior da massa do aterro, fatores ambientais como umidade, temperatura e gases, presentes ou gerados no interior do aterro.

Huitric (1981) definiu três modos de recalque para RSU que se seguem:

- consolidação (variação da tensão efetiva);
- contração (decomposição da matéria orgânica);
- compactação (sobrecarga).

O termo consolidação se refere ao recalque resultante da drenagem dos materiais saturados recém depositados sob aplicação da sobrecarga. Já o termo contração, refere-se ao processo pelo qual, os sólidos orgânicos e úmidos são gradativamente decompostos e convertidos em dióxido de carbono e metano, resultando numa correspondente redução de volume do aterro.

E o termo compactação é definido como a reorientação dos sólidos para uma configuração mais densa, devida à gradual perda da rigidez dos sólidos, oriundos do *creep* dos sólidos sob sobrecarga ou da decomposição sólida. É sugerido que tais sólidos de resíduo poderiam inicialmente formar ligações entre os vazios, mas entrariam em colapso mais tarde, fato que poderia ser considerado potencialmente o mais significativo aspecto de recalque de aterros sanitários.

Os valores de recalque de um maciço de RSU devido somente à ação do peso próprio variam entre 10 a 40% da altura original do aterro, dependendo do tipo de resíduo e do grau de compactação alcançado no momento da disposição. Apesar da elevada compressibilidade do maciço de resíduos ser problemática, ela permite o aumento da vida útil do aterro através de adicionais deposições, gerando um benefício para o gerenciamento de resíduos de um município.

Sowers (1973) sugeriu que o recalque de RSU é similar ao da turfa. Após um rápido e imediato recalque, um recalque adicional é acompanhado pela ausência ou por um pequeno desenvolvimento de excessos de poro-pressão. Contudo, ao contrário dos depósitos de turfa, a compressão secundária do RSU inclui uma significativa componente de decomposição biológica. A taxa de recalque secundário geralmente depende da quantidade de água disponível no aterro, considerando que a água é necessária para facilitar a decomposição do resíduo.

Os recalques de RSU são normalmente calculados baseando-se nas expressões da teoria do adensamento unidimensional, onde a compressão total é dividida em compressão inicial, primária e secundária. A compressão inicial ou imediata, a qual é quantificada pela teoria da elasticidade, está associada à compressão dos vazios e dos constituintes por ação das cargas impostas e pelo processo de operação dos aterros. Já a compressão primária, analisada pela teoria clássica de Terzaghi, é devida à drenagem dos líquidos existentes no interior do aterro. Por último, a compressão secundária é, em parte, proveniente da degradação físico-química e biológica que ocorre no aterro. Os recalques nesta fase seguem uma relação linear com o logaritmo do tempo, de modo similar ao fenômeno de compressão secundária observado em solos.

Segundo Grisolia e Napoleoni (1996), a compressão imediata depende da composição do resíduo e de sua forma de disposição. Entretanto, sua avaliação é difícil, pois existe uma

grande dificuldade de acompanhar e interpretar os dados obtidos durante a fase de construção dos aterros sanitários. De acordo com os autores, a interpretação das medidas torna-se possível após a conclusão do aterro.

Com relação ao recalque de longo prazo, ele depende, principalmente, da taxa de biodegradação e do comportamento viscoso dos resíduos. A taxa de decomposição, por sua vez, depende de inúmeros parâmetros, incluindo o grau de compactação dos resíduos no aterro (Knochenmus et al., 1998). Embora a compactação dos resíduos proporcione uma redução significativa nos recalques, ela pode reduzir a taxa de recalque no tempo, pois a diminuição da porosidade promovida pelo efeito da compactação pode reduzir o potencial das reações biológicas.

Sendo assim, percebe-se que a determinação da compressibilidade dos resíduos é algo complexo, envolvendo variáveis de difícil quantificação. Entretanto, tem-se utilizado os conceitos da teoria clássica de adensamento para avaliar o comportamento de tal material. Porém, a dificuldade no emprego dessa teoria está em determinar os parâmetros requeridos na análise, pois, como já mencionado, os resíduos constituem-se num material heterogêneo e com presença de materiais de grandes dimensões, exigindo, assim, o emprego de equipamentos de ensaios de dimensões maiores.

Desta forma, a compressibilidade pode ser determinada a partir de ensaios de laboratório, ensaios de campo e em monitoramento de aterros existentes. Entretanto, os ensaios de laboratório e de campo não possibilitam a inclusão de todos os aspectos relativos aos mecanismos responsáveis pelas deformações. De uma maneira geral, esses ensaios apenas descrevem o recalque mecânico (mudança da tensão efetiva e sobrecarga) e os recalques devidos à degradação do RSU não são considerados ou são apenas, parcialmente considerados (Konig e Jessberger, 1997). Tal fato é explicado em função da ocorrência de fatores biológicos e físico-químicos exigirem condições ideais e propícias, além de um tempo muito longo, superior aos necessários para completar esses ensaios (Grisolia e Napoleoni 1996). Sendo assim, conclui-se que o monitoramento de campo possibilita estudar o processo de compressibilidade do RSU de uma forma mais real, pois as medidas de campo consideram todos os fatores e interações existentes na fase de recalque.

Em relação a ensaios de laboratório realizados para estimativa de recalque do RSU, eles são, normalmente, executados em células de adensamento de grande diâmetro, podendo citar os

trabalhos realizados por Landva e Clark (1990) e Jessberger e Kockel (1993). Gabr e Valero (1995) empregaram uma célula de adensamento convencional para estimativa de recalques de RSU.

Jessberger e Kockel (1993) ensaiaram amostras de RSU de 15 anos oriundas de aterros da Alemanha, utilizando uma célula de compressão confinada de grande dimensão ($D=1\text{m}$). O peso específico seco das amostras variou entre 7 e 10 kN/m^3 e foram, inicialmente, pré-carregadas com 25 kN/m^3 . Posteriormente, aplicaram-se, por vários dias, as cargas de 50, 100, 200, 400 e 650 kPa. Diante das curvas recalque *versus* tempo, foi identificada uma compressão inicial durante os primeiros 10 a 30 segundos após a aplicação das cargas, seguida por um aumento mais lento da compressão da amostra.

Konig e Jessberger (1997) apresentaram vários resultados oriundos das curvas de recalques de superfície com o tempo de diferentes aterros, os quais podem ser visualizados na Figura 3.4. As medidas referem-se a aterros localizados na Europa e América do Norte com resíduos de diferentes composições. O tempo zero corresponde ao final do período de operação do aterro e os recalques foram definidos como relações adimensionais entre os recalques medidos e a altura do aterro no final do período de operação. As curvas indicam uma mudança da taxa de recalque com o logaritmo do tempo. Segundo os autores, a taxa de recalque muda aproximadamente entre 200 a 650 dias após o final do processo de operação do aterro e não foi notada, para estágios finais de observação (10.000 dias), nenhuma mudança da taxa de recalque. A mudança da taxa de recalque relacionada com o logaritmo do tempo foi atribuída aos processos de biodegradação e degradação físico-química do resíduo. Tais processos necessitam de algum tempo para começarem efetivamente a ocorrer, estando de acordo com o fato de que a produção de gás no aterro se inicia após algum tempo de disposição.

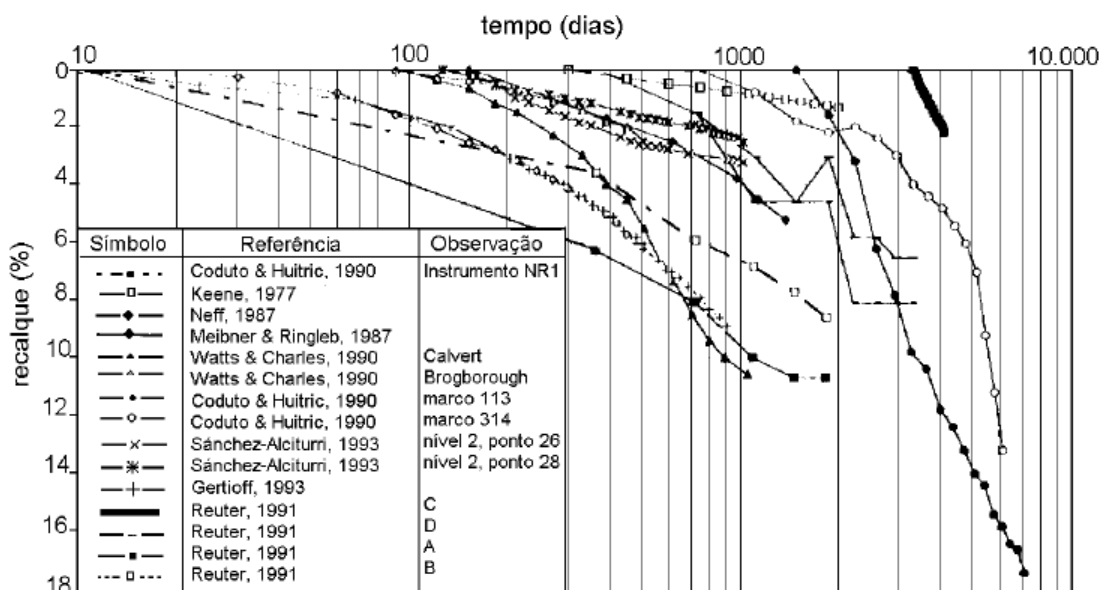


Figura 3.4 – Medidas de recalques de superfície de diferentes aterros (Konig e Jessberger, 1997).

Como já abordado, a compressibilidade dos resíduos pode ser avaliada também por meio de ensaios de campo, podendo destacar os ensaios de prova de carga sobre placa (usadas em camadas mais superficiais) e os ensaios pressiométricos (usados em profundidade maiores). Entretanto, de acordo com Knochenmus et al. (1998), os resultados de ensaios de campo bem como suas correlações podem não refletir os valores reais da compressibilidade do RSU.

No caso específico dos ensaios de prova de carga sobre placa, eles são normalmente executados nas camadas de cobertura do RSU (topo do aterro) ou nas camadas superficiais após a remoção da camada de recobrimento. Segundo Knochenmus et al. (1998), a limitação dos ensaios de prova de carga sobre placa está relacionada com a pequena zona de influência, atingindo, na maioria das vezes, somente a parte superior da camada de RSU, podendo, assim, dar resultados não representativos do conjunto. Desta forma, Landva e Clark (1990) recomendaram para aterros sanitários, o uso de provas de carga lenta sobre placa de maiores dimensões (da ordem de 1m), em função da grande deformabilidade e heterogeneidade do RSU. Com o aumento do tamanho da placa, torna-se possível atingir uma maior zona de influência, abrangendo uma maior profundidade na camada de resíduo. Em relação à aplicação lenta da carga, possibilita-se desenvolver as deformações do tipo “*creep*” (compressão secundária), as quais são mais significativas para esse tipo de material.

3.6 Resistência

3.6.1 Parâmetros de Resistência dos Resíduos e Análise de Estabilidade

Para avaliar as condições de segurança de um aterro são realizadas as análises de estabilidade, as quais são baseadas nos métodos clássicos da teoria do equilíbrio limite. Estes métodos baseiam-se na hipótese de haver equilíbrio em uma massa de RSU na iminência de entrar em um processo de escorregamento. De posse das forças atuantes conhecidas, são determinadas, por meio das equações de equilíbrio, as tensões cisalhantes induzidas, obtendo-se, desta forma, a resistência ao cisalhamento do material em questão. Na execução destas análises, torna-se necessário o conhecimento da geometria da superfície do aterro, definida a partir de levantamentos planialtimétricos atualizados, parâmetros geomecânicos dos materiais envolvidos (parâmetros de resistência, usualmente coesão e ângulo de atrito, e peso específico) e conhecimento das condições de poro-pressões nos líquidos e gases no interior dos maciços.

Entretanto, o grande problema da realização da análise de estabilidade de um aterro decorre da dificuldade de se obterem parâmetros de resistência de RSU (coesão e ângulo de atrito). Tal dificuldade, segundo Fucale e Jucá (2002), se deve a vários fatores tais como:

- Heterogeneidade e variação do RSU para diferentes locais;
- Dificuldade de obtenção de amostras representativas das condições de campo;
- Inexistência, de maneira geral, de procedimentos de amostragem e ensaios padrões para os resíduos;
- Mudança das propriedades dos resíduos com o tempo.

Além disso, como já comentado, atualmente os procedimentos clássicos da mecânica dos solos são utilizados na obtenção dos parâmetros e na realização das análises de estabilidade e deformabilidade dos aterros sanitários. Porém, importantes diferenças de comportamento, tais como elevado índice de vazios, implicando em significativa compressibilidade volumétrica, partículas de distintas naturezas, processo de decomposição com o tempo, resultando em autoconsolidação, e variação das propriedades dos materiais com o tempo reforçam a necessidade da busca de modelos de análise próprios.

3.6.2 Resistência ao cisalhamento

Segundo König e Jessberger (1997), a resistência ao cisalhamento do RSU apresentada na literatura, incluindo os trabalhos de Pagotto e Rimoldi (1987), Landva e Clark (1990), Richardson e Reynolds (1991), Withiam et al. (1995) e Gabr e Valero (1995), varia consideravelmente. O ângulo de atrito varia de 10° a 53°, enquanto a coesão varia de 0 a 67 kPa. Esta larga dispersão de dados de ensaio torna difícil estimar exatamente a resistência ao cisalhamento. Kavazanjian et al. (1995) afirmam que muitos dos baixos valores que se enquadram nesta faixa de dados apresentada são totalmente contraditórios em relação às observações de campo de taludes estáveis de aterros de resíduos. Os autores propõem uma reavaliação crítica dos dados disponíveis de resistência ao cisalhamento de RSU.

Como forma de ilustrar essa dispersão de dados, Simões (2004) montou uma coletânea de pares de parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito) obtidos da literatura, apresentada na Figura 3.5. Nela, estão apresentados, conjuntamente, os resultados de estudos de retroanálise, de ensaios realizados em campo e em laboratório.

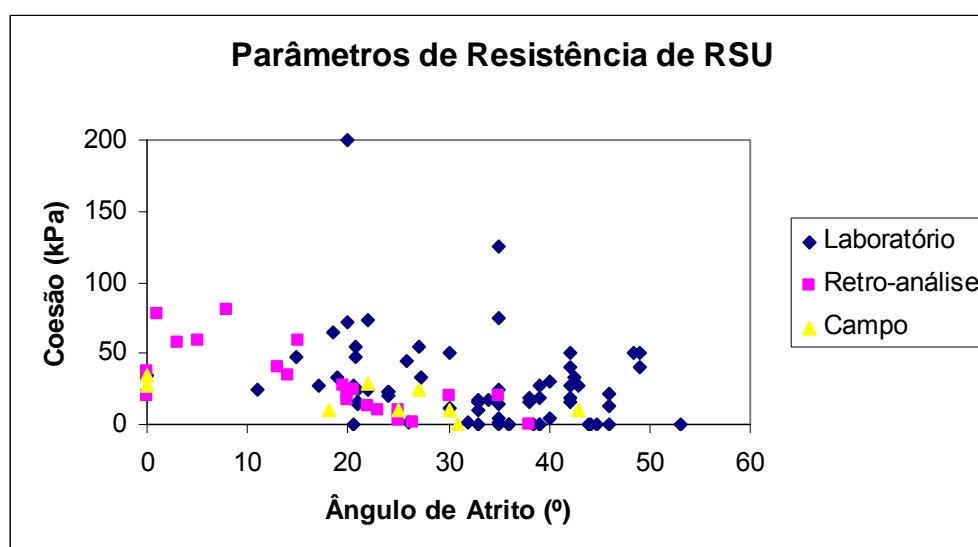


Figura 3.5 – Parâmetros de Resistência de RSU (Simões, 2004)

É importante ressaltar que esta larga dispersão se deve às diferentes composições de RSU utilizadas nos vários ensaios, bem como o ensaio utilizado, os diferentes tipos de equipamentos empregados nos ensaios, além de uma ausência de procedimentos padronizados na realização destes ensaios.

Segundo Kavazanjian (2003), é difícil e caro obter parâmetros de resistência representativos e confiáveis para o RSU (grande tamanho de partícula, heterogeneidade, controle da estrutura, etc). Portanto, é preferível obter valores de estudos de campo.

Os parâmetros de resistência de RSU são usualmente determinados a partir de ensaios de laboratório (cisalhamento direto e triaxial) em dispositivos de grandes dimensões, ensaios de campo ou por meio de retroanálises, com base em dados e registros de monitoramento. Dixon e Jones (2005) elaboraram uma tabela que apresenta um resumo das vantagens e desvantagens associadas com aproximações atuais disponíveis para obtenção da informação do comportamento resistente dos RSU.

**Tabela 3.3 – Revisão dos métodos para medir o comportamento cisalhante do RSU
Dixon e Jones (2005)**

	Método de medida	Comentários	Referências
Campo	Retroanálise de rupturas de talude	Informação adequada raramente disponível (poro-pressão, forma e posição da superfície de ruptura)	Koerner e Soong (2000)
	Retroanálise de experimentos de talude cortado	Grandes deformações observadas, mas sem rupturas	Singh e Murphy (1990), Cowland et al. (1993)
	Retroanálise de taludes estáveis existentes	A variável composição do RSU significa que a experiência passada não é um caminho para desempenho futuro	Gotteland et al. (2002)
	Ensaio de cisalhamento direto de campo	Dificuldades de execução e os resultados são relacionados a baixos níveis de tensão	Jessberger e Kockel (1993)
	SPT, CPT e ensaio de palheta	Não há relação clara entre a resistência à penetração e a resistência ao cisalhamento dos RSU. Poderia fornecer informação em materiais degradados semelhantes a solos	-
Laboratório	Compressão triaxial	Amostras deformadas, resistências ao cisalhamento de pico não obtidas devido à compressão e densificação da amostra	Jessberger (1994), Grisolia et al (1995b)
	Cisalhamento direto	Exigência de grandes equipamentos, amostras deformadas e grandes deslocamentos exigidos para mobilizar a resistência ao cisalhamento de pico	Kolsch (1995), Gotteland et al. (2001)
	Cisalhamento simples	Exigência de grandes equipamentos, amostras deformadas e informação útil na rigidez cisalhante (usado em análises sísmicas)	Kavazanjian et al. (1999)

3.6.3 Ensaios de laboratório

Em função da heterogeneidade do RSU, bem como do tamanho de suas partículas, os ensaios de laboratório são executados em equipamentos de grandes dimensões com a finalidade de possibilitar o emprego de amostras que sejam representativas.

Segundo König e Jessberger (1997), a principal limitação de ensaios de laboratório surge da dificuldade em obter amostras contendo uma representativa distribuição granulométrica e composição. Dixon e Jones (2005) comentam que os resultados de ensaios de laboratório devem ser vistos com uma certa cautela. A amostra de resíduo é deformada e então a sua estrutura é perdida, grandes partículas podem ter sido removidas ou processadas e a densidade de campo e o estado de tensões podem não ter sido reproduzidas.

Com relação aos tipos de ensaios de laboratório, os mais utilizados são os ensaios de cisalhamento direto e os ensaios de compressão triaxial.

3.6.3.1 Ensaio de cisalhamento direto

Landva et al. (1984, 1990) realizaram ensaios de cisalhamento direto com amostras oriundas de aterros do Canadá. As dimensões da caixa do equipamento de cisalhamento eram de 434 x 287 mm e a velocidade de cisalhamento utilizada para os ensaios foi de 1,5 mm/minuto. Em dois ensaios, eles obtiveram valores de ângulo de atrito variando entre 24° e 41° e valores de coesão entre 0 e 23 kPa. Segundo os autores, esta larga faixa de parâmetros de resistência cisalhante é possível em aterros de resíduos. Eles concluem que a resistência ao cisalhamento de RSU é altamente variável, pois dependem do tipo de material envolvido. No caso específico do aterro de Edmonton, os autores concluíram que o baixo valor de ângulo de atrito de 24° se deveu a uma grande quantidade de plásticos finos presentes no resíduo. Eles concluíram que as partículas alongadas e fibrosas tendiam a se alinhar na direção do plano de cisalhamento, a qual era perpendicular à direção da tensão normal. Então, eles realizaram ensaios de cisalhamento direto exclusivamente para sacolas plásticas empilhadas horizontalmente, permitindo o escorregamento ao longo do plano de cisalhamento. Os autores obtiveram um valor de ângulo de atrito para tal material de 9°, confirmando que grandes concentrações de materiais plásticos tendem a diminuir o ângulo de atrito.

Siegel et al. (1990) executaram ensaios adensados drenados com amostras provenientes de um aterro em Monterey Park, na Califórnia, em caixas cisalhantes circulares com diâmetro de 13

cm e alturas com valores de 7,6 a 10,2 cm. As amostras foram retiradas em várias profundidades, variando de 9,4 a 24,4 m, sendo que, mesmo em profundidades iguais, as amostras tinham composições e comportamentos diferentes. Os autores concluíram que em função da variabilidade do resíduo, determinar ângulos de atrito e interceptos coesivos utilizando o critério de “Mohr-Coulomb” para cada amostra individualmente parecia ser inapropriado. Os autores apresentaram duas interpretações de envoltórias de “Mohr-Coulomb”. Uma interpretação considera todas as amostras de ensaios e a outra desconsidera as amostras que contêm grandes frações de solo. Nas duas interpretações, o intercepto coesivo foi assumido como zero. Foram obtidos valores de 39° e 53° em termos de ângulo de atrito.

Benson e Othman (1992) desenvolveram estudos de laboratório com o objetivo de investigar as propriedades hidráulicas e mecânicas de um composto compactado oriundo de uma mistura de RSU e lodo de estação de tratamento. A finalidade do estudo foi determinar se o composto compactado tinha propriedades desejáveis de uma barreira hidráulica a ser utilizada em camadas de revestimento e de cobertura final de aterros sanitários. Segundo os autores, uma barreira hidráulica não deve somente ter baixa condutividade hidráulica, mas deve ser também fisicamente estável. A barreira hidráulica deve ter resistência ao cisalhamento suficiente para resistir a escorregamentos nos taludes e ter resistência à tração suficiente para prevenir rachaduras devido aos recalques surgidos.

Uma das aplicações dos ensaios de laboratório foi determinar a resistência ao cisalhamento do composto compactado. Tal propriedade foi medida com ensaios de cisalhamento direto. Sendo assim, uma amostra de composto foi compactada num teor de umidade de 44%, usando um esforço de compactação do tipo “Proctor modificado”. Depois de retirar a amostra do molde de compactação, esta foi cortada em três amostras, as quais foram aparadas para ajustá-las num anel de cisalhamento direto de diâmetro de 0,064 m. As amostras foram então colocadas em uma caixa de cisalhamento cheia de água e consolidada com pressões de 14,41 e 69 kPa. O cisalhamento foi então conduzido numa velocidade muito baixa para evitar a geração de poro-pressões.

Concluídos os ensaios, a envoltória de resistência de Mohr – Coulomb obtida dos ensaios de cisalhamento direto apresentou um ângulo de atrito de 61° e coesão de 20 kPa. O ângulo de atrito do material ensaiado foi muito maior do que é normalmente esperado para as argilas compactadas, para as quais, os valores tendem a uma faixa de 20 a 30°. Segundo os autores,

devido ao seu alto ângulo de atrito, o composto compactado apresentou resistência suficiente para resistir a rupturas em taludes típicos de aterros. Apesar do alto ângulo de atrito parecer excessivo, ângulos similares têm sido observados para a turfa fibrosa, um material com características compatíveis às do composto. A causa provável do alto ângulo de atrito foi a presença de fibras de plástico, borracha e arame que agem como reforço na zona cisalhante. Estas fibras se entrelaçam no composto e como um resultado disto, aumentam a resistência ao cisalhamento. Quando as amostras foram examinadas após a conclusão do ensaio, fibras quebradas foram visíveis. Foram também observadas inflexões nas curvas de tensão – deformação que foram provavelmente causadas pelo rasgamento ou afrouxamento das fibras resistentes ao cisalhamento.

Del Greco e Oggeri (1993) realizaram ensaios em fardos de RSU com dimensões de 40 x 50 x 60 cm (b x l x h), pesando 50 kg cada um. O equipamento utilizado era constituído de um pórtico de reação ancorado em uma base de concreto, o qual possibilitava a reação da carga vertical sobre os fardos e, dotado também por uma parede de concreto que promovia a força de reação horizontal nestes fardos. As cargas foram aplicadas, utilizando-se macacos hidráulicos manuais equipados com manômetros. Ressalta-se que na execução dos ensaios, foram utilizados dois fardos sobrepostos, desta forma, o plano de ruptura ocorreu entre as suas superfícies de contato. As tensões normais aplicadas variaram de 0,1 a 0,6 kgf/cm², alcançando um valor máximo de 1 kgf/cm². Os referidos ensaios foram executados para pesos específicos de 0,5 kgf/dm³ e 0,7 kgf/dm³. Para o primeiro, foram obtidos valores de 0,16 kgf/cm² e 21° de coesão e ângulo de atrito respectivamente, e, para o segundo, valores de 0,24 kgf/cm² e 22°, demonstrando o aumento dos parâmetros de resistência com o aumento do peso específico.

Segundo o autor, alguns aspectos são similares ao comportamento de resultados de ensaios clássicos da geotecnia. A coesão aparente foi manifestada sobre tensões verticais mais altas. Em baixos níveis de tensão normal, o ângulo de atrito teve um valor mais alto, enquanto que em níveis altos de tensão normal, as asperezas na superfície de contato foram igualadas e o escorregamento ocorreu em condições de atrito residual. Os relativos baixos valores de ângulo de atrito poderiam ser explicados pela quantidade de materiais plásticos nos fardos ensaiados.

Gabr e Valero (1995), conforme já citado anteriormente, realizaram um programa de investigação geotécnica conduzido para avaliar as propriedades de engenharia de amostras de

resíduos sólidos velhos retiradas do aterro de Pioneer Crossing, na Pensilvânia. Dentro deste programa, foram realizados ensaios de cisalhamento direto e de compressão triaxial. Em relação ao primeiro, as amostras foram compactadas em uma caixa de cisalhamento circular de diâmetro de 63,5 mm e altura de 23 mm. Durante o ensaio, uma velocidade de cisalhamento foi estimada através do adensamento das amostras sob uma tensão normal definida. Esta velocidade teve o objetivo de permitir a dissipação do excesso de poro-pressão durante a fase de cisalhamento. Como exemplo, para uma tensão normal de 69 kPa, foi adotada uma velocidade de 0,024 mm/minuto. Os referidos ensaios mostraram um ganho de resistência com os deslocamentos horizontais sem haver pico de resistência. Os valores efetivos de coesão e ângulo de atrito medidos foram avaliados para 5 e 10% de deslocamentos horizontais. Em um gráfico apresentado pelos autores, no qual estão presentes pares de parâmetros de resistência obtidos por eles e por outros autores, constatou-se que para 5% de deslocamento, a coesão e o ângulo de atrito foram de aproximadamente 17 kPa e 21° respectivamente. Para um deslocamento horizontal de 10%, estes valores aumentaram para 20 kPa e 32,7°, aproximadamente. Por meio desses ensaios, constataram que os valores de ângulo de atrito aumentaram com os níveis de deslocamento, enquanto que a coesão permaneceu praticamente constante.

Edinçliler et al. (1996) realizaram ensaios de cisalhamento direto com RSU obtido de um aterro localizado no sudeste de Wisconsin, EUA. O equipamento utilizado possuía uma caixa circular de 30cm de diâmetro. Os resultados obtidos dos ensaios levaram a um valor de ângulo de atrito de 41° e uma coesão de 24 kPa. Uma observação importante foi que, apesar de terem sido utilizadas amostras de diferentes idades e de diferentes locais do aterro, os parâmetros de resistência não sofreram alterações. Foram realizados também, ensaios em amostras retiradas de camadas diárias de cobertura compostas por solo. Estes ensaios apresentaram um valor de 42° para o ângulo de atrito e coesão nula.

Jones et al. (1997) apresentaram resultados de ensaios de cisalhamento direto em amostras de RSU. Através de dados apresentados em um gráfico ângulo de atrito *versus* deslocamento cisalhante, observou-se que o ângulo de atrito mobilizado para tensões normais entre 100 e 400 kPa aumentou de 7°, para deslocamento de 5 mm, para um valor entre 27° e 30°, para deslocamento de 30 mm. Através do referido gráfico, observou-se a dependência do parâmetro de resistência do RSU na magnitude da tensão normal assim como também em relação aos deslocamentos cisalhantes. Segundo Pelkey et al. (2001), a dependência dos

parâmetros de resistência cisalhante na magnitude da tensão normal resulta da natureza curva da envoltória de ruptura. Este comportamento é similar à resistência ao cisalhamento de solos granulares, onde a redução no ângulo de atrito mobilizado com a tensão normal crescente é também registrada. Segundo o autor, as recomendações de Van Impe (1998) em parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU como uma função da tensão normal são também devidas à natureza curva da envoltória de ruptura.

Van Impe e Bouazza (1998) apresentaram os dados de ensaio de cisalhamento em fardos de RSU. Para uma tensão normal de 18 kPa, um ângulo de atrito mobilizado de 19° foi registrado para um deslocamento cisalhante de 65 mm. Este ângulo mobilizado aumenta para 38°, considerando um deslocamento cisalhante de 130 mm. Estes dados indicaram que a resistência ao cisalhamento mobilizada dos fardos de RSU é também fortemente dependente do deslocamento cisalhante, similar às amostras de RSU.

Após ter ocorrido um grande escorregamento de resíduos em 1997, no Aterro Sanitário de Dona Juana, localizado em Bogotá, Colômbia, Caicedo et al. (2002) realizaram inúmeros estudos no referido aterro com o objetivo de compreender e caracterizar as propriedades do RSU. Foram realizados ensaios de campo e de laboratório para atingir o objetivo mencionado. Um aspecto importante destes ensaios diz respeito ao efeito da decomposição na resistência mecânica dos resíduos. Os resíduos frescos apresentaram valores de resistência maiores em relação aos resíduos velhos. Neste item, será abordado o ensaio de cisalhamento direto e os demais ensaios serão apresentados posteriormente em seus respectivos itens. No caso específico dos ensaios de cisalhamento direto, foram utilizadas amostras de RSU retiradas diretamente do escorregamento mencionado, ocorrido na Zona II do Aterro Sanitário de Dona Juana. As dimensões da caixa do equipamento foram de 30 x 30 x 20 cm (b x l x h). Os resultados dos ensaios forneceram aproximadamente 27 kPa e 24° de coesão e ângulo de atrito respectivamente.

Lamare Neto (2004) realizou ensaios de cisalhamento direto em equipamentos convencional com dimensões de 100 x 100 x 70 mm (b x l x h) e de grandes dimensões, 250 x 400 x 200 mm (b x l x h). No primeiro, ele realizou ensaios para amostras de resíduos oriundos do pré-tratamento mecânico-biológico do RSU com granulometria inferior a 3/8 de polegada. No segundo, uma das composições utilizadas consistia de resíduos oriundos do pré-tratamento mecânico-biológico do RSU com granulometria inferior a 3/4 de polegada. Na primeira

amostra, utilizando-se tensões normais de 25, 50, 75, 100, 200 e 400 kPa, ele obteve valores de coesão de 7, 10 e 12 kPa e de ângulo de atrito de 35, 36 e 37° para deslocamentos horizontais de 4, 7 e 10% respectivamente. Já na segunda, com o emprego de tensões de 25, 50, 75 e 100 kPa, obteve-se valores de coesão de 3, 4,5 e 6 kPa e de ângulo de atrito de 25, 37 e 42° para deslocamentos horizontais de 4, 7 e 10% respectivamente.

Fucale (2005) também realizou ensaios de cisalhamento direto em equipamentos convencional (100 x 100 x 30 mm) e de média escala (300 x 300 x 150 mm). Em seu trabalho, a autora teve o objetivo principal de avaliar a influência dos componentes de reforço na resistência do RSU. No caso do equipamento convencional, as amostras eram oriundas de resíduos com idades entre 12 a 15 anos do aterro sanitário de Ihlenberg, na Alemanha. Para esta situação, foram definidas duas composições diferentes. A primeira era denominada de “Matriz básica”, na qual a quantidade de fibras era inferior a 2% do peso total da amostra. Já a segunda, denominada de “Matriz básica reforçada”, possuía 3,5% de fibras em relação ao peso total da amostra, cujas dimensões variavam entre 5 a 10 mm de largura e 15 a 30 mm de comprimento.

Em relação ao equipamento de média escala, foram realizados ensaios com resíduos oriundos dos aterros sanitários de Ihlenberg e de Buchen, ambos na Alemanha. Para o primeiro, foram utilizadas amostras denominadas de “Matriz básica” (partículas com dimensões inferiores a 8 mm), “Matriz composta” (partículas com dimensões inferiores a 30 mm, tendo em sua composição 3% de fibras) e “Matriz composta reforçada” que é o resultado da adição de 5% de fibras plásticas na matriz composta, definida anteriormente. Para o aterro de Buchen, foram ensaiadas amostras denominadas de “Matriz básica” (partículas com dimensões inferiores a 8 mm), “Matriz composta 1” (dimensões das partículas menores que 40 mm, sendo que a composição possuía 20 % de fibras) e “Matriz composta 2”, a qual diferenciava-se da matriz composta 1 pelo fato de apresentar 10% de fibras em sua composição. Como forma de apresentar alguns valores de parâmetros de resistência, nos ensaios com o equipamento convencional, para a matriz básica reforçada do aterro de Ihlenberg, com 20% de deslocamento horizontal (20 mm), obteve-se uma coesão próxima de 26,8 kPa e um ângulo de atrito de 37,4°, para tensões normais de 100, 200, 300 e 500 kPa. Já a matriz básica, apresentou uma coesão de 23,3 kPa e ângulo de atrito de 38,3° para tensões normais de 100, 200 e 300 kPa.

Segundo a autora, se fossem possíveis maiores deslocamentos horizontais, seria provável que os valores mais elevados de resistência provocariam alguma diferença entre os dois materiais, principalmente no que diz respeito ao aumento da coesão, que seria devido à incorporação dos elementos de reforço.

Em relação aos ensaios com equipamento de média escala, para a matriz básica do mesmo aterro, obteve-se uma coesão de 29,7 kPa e um ângulo de atrito de 42,5°; considerando que a envoltória de ruptura foi gerada pelas tensões cisalhantes máximas com as respectivas tensões normais de 100 e 200 kPa. A tensão normal de 50 kPa foi descartada em função do valor de tensão cisalhante não ter sido coerente. Para a matriz composta, obteve-se 29,6 kPa de coesão e 46,1° de ângulo de atrito, considerando que a envoltória foi gerada com valores de tensões cisalhantes para um deslocamento horizontal de 20% com tensões normais de 50, 100, 200 e 300 kPa.

3.6.3.2 Ensaio de compressão triaxial

Dixon e Jones (2005) afirmam que muitos dos estudos apresentados na literatura têm usado os ensaios de compressão triaxial. Entretanto, Kavazanjian (2001) apresentou uma avaliação detalhada em relação ao referido ensaio e concluiu que o mesmo não é uma técnica apropriada para medir a resistência ao cisalhamento do RSU. A dificuldade de causar a ruptura cisalhante nos ensaios de laboratório tem conduzido a resistência ao cisalhamento ser relacionada a níveis de deformação específica (ou seja, diferentes parâmetros de resistência são dados para cada nível de deformação específica). Embora esta aproximação tenha algum mérito se usada em projeto para tentar controlar deformações específicas no corpo do resíduo, ela pode conduzir a uma confusão e então um grande cuidado deve ser tomado em aplicar tais valores. Assim, Dixon e Jones (2005) concluem que a mais apropriada técnica de laboratório é o ensaio de cisalhamento direto, apesar das considerações referentes à aplicabilidade dos ensaios de laboratório discutida anteriormente, ela ainda se aplica.

Jessberger e Kockel (1991) realizaram ensaios triaxiais em RSU com idades de 3 e 7,5 anos. Nestes ensaios, uma resistência de pico não foi alcançada para nenhuma das amostras, mesmo para deformações axiais maiores que 20%. Embora os autores tenham realizado ensaios adicionais, variando a idade e o estado de decomposição (resíduos variando de 9 meses a 15 anos) com o objetivo de descobrir a relação entre a resistência ao cisalhamento e a idade do

resíduo, eles concluem que o número de ensaios foi pequeno para possibilitar uma interpretação apropriada dos resultados.

Kockel e Jessberger (1995) realizaram ensaios triaxiais na matriz de um RSU misturado com quantidades variáveis de plástico. O RSU consistia de uma mistura de resíduos, de 1 a 3 anos, obtidos de uma trincheira de ensaio aberta em um aterro de RSU. A matriz foi obtida pela remoção dos elementos de reforço tais como plástico e têxteis do resíduo. O restante era uma matriz semelhante a solos contendo partículas menores que 12 cm. O tamanho das partículas da matriz era então, reduzida por trituração. Os autores mostraram que a resistência ao cisalhamento da matriz era principalmente de fricção e tinha um ângulo de atrito variando de 42° a 49°, o qual foi mobilizado em deformações maiores (>20%). Eles também sugeriram que a componente coesiva da resistência (41kPa a 51kPa) era devida à tensão desenvolvida nos componentes de reforço, como se o resíduo fosse um solo reforçado.

Como já comentado anteriormente, Gabr e Valero (1995) realizaram ensaios do tipo CU (consolidados não-drenados) com e sem medida de poro-pressão em amostras retiradas do aterro Pioneer Crossing, na Pensilvânia. Nos ensaios em que não houve medida de poro-pressão, foi utilizado um corpo de prova de 70 mm de diâmetro e 152 mm de altura. Já, nos ensaios em que houve medida de poro-pressão, o corpo de prova possuía 76 mm de diâmetro e 305 mm de altura. Para os ensaios sem medida de poro-pressão, com peso específico seco variando entre 7,4 a 8,2 kN/m³, os valores de coesão diminuíram de aproximadamente de 100 kPa, com umidade de 55%, para 40 kPa, com umidade de 72%. Vale dizer que os valores de coesão foram obtidos pelo critério de ruptura de “Mohr-Coulomb”, assumindo um ângulo de atrito igual a zero. Em relação aos ensaios com medida de poro-pressão, estes foram usados para avaliar os parâmetros de resistência efetiva aparente. As amostras utilizadas tinham um peso específico seco de 7,4 a 7,5 kN/m³. Os resultados obtidos pelos autores apresentaram um ângulo de atrito de 34° e coesão de 16,8 kPa para um nível de deformação de 20%.

Grisolia et al. (1995) executaram ensaios do tipo CD (consolidado drenado) em amostras de 65 cm de altura e 25 cm de diâmetro. As amostras foram artificialmente reconstruídas contendo em sua composição 6% de madeira e tecido, 32% de papel, 8% de plástico, 32% de entulho e 22% de matéria orgânica. O teor de umidade das amostras foi mantido em torno de 40% e seu peso específico encontrou-se numa faixa compreendida entre 6 e 7,4 kN/m³. As amostras ensaiadas reproduziram as condições de um resíduo que se encontrava no estado

fresco. As tensões confinantes aplicadas foram de 50, 100 e 300 kPa. Segundo os autores, os ensaios realizados mostraram que o comportamento do RSU é fortemente influenciado pelas deformações. Assim sendo, os parâmetros de resistência são apresentados como sendo função dos níveis de deformação. Desta forma, o ângulo de atrito variou entre 15° e 25° para deformações entre 10% e 15% da altura inicial da amostra e aumentou progressivamente na faixa de 30° a 40° para deformações entre 20% e 35%. Já, a coesão variou fortemente com o grau de deformação. Para deformações em torno de 10%, o referido parâmetro esteve entre 2 e 3 kPa, subindo para 10 kPa entre 10 e 20% de deformação e atingindo valores acima de 50 kPa para deformações de 35%.

Carvalho (1999) realizou ensaios dos tipos CD e CU com amostras coletadas do sub-aterro AS-2 localizado no Aterro Sanitário Bandeirantes, município de São Paulo. Nos ensaios do tipo CD realizados em corpos de prova de 150 mm x 300 mm (diâmetro x altura), foram obtidos ângulo de atrito de cerca de 27° e coesão variando de 42 a 55 kPa para deformações axiais de 20%. Já para corpos de prova de 200 mm x 400 mm, o ângulo de atrito foi da ordem de 21° e coesão de 45 a 60 kPa. Segundo a autora, as dimensões dos corpos de prova parecem ter influenciado nos resultados de resistência ao cisalhamento. Os corpos de prova de menor dimensão apresentaram maior resistência que os corpos de prova de maior dimensão. Com relação aos ensaios do tipo CU, verificou-se que o comportamento de resistência do RSU foi bastante influenciado pelo desenvolvimento de altas poro-pressões positivas, cujos valores máximos estavam próximos ao da tensão de confinamento da amostra. Os valores da trajetória efetiva do ensaio não-drenado posicionaram-se, em geral, acima da envoltória drenada, dificultando a interpretação dos resultados em termos de tensões efetivas.

Como já citado no item de ensaio de cisalhamento direto, Caicedo et al. (2002) realizaram outros tipos de ensaio no Aterro Sanitário de Dona Juana, sendo abordado neste item, o de compressão triaxial do tipo CU com medidas de poro-pressão. As amostras utilizadas tinham 30 cm de diâmetro e 60 cm de altura. Os resultados dos ensaios forneceram uma coesão de 45 kPa e 14° de ângulo de atrito. Segundo os autores, a forma da curva “Tensão desviadora x Deformação” confirmou os resultados de trabalhos anteriores. O material ensaiado não apresentou pico de ruptura para deformações acima de 15%, tendo sido constatado o contrário, ou seja, houve um contínuo enrijecimento do material.

3.6.4 Ensaios de campo

Em relação aos ensaios de campo (SPT, CPT e Vane Test), a execução, na maioria das vezes, é difícil devido à presença de materiais rígidos. A presença de materiais como madeira, metal, pedra, dentre outros, provoca grandes picos na resistência, desvio das hastes dos equipamentos e avarias nos amostradores, paletas e ponteiros (Fucale e Jucá, 2002). Além disso, as amostras obtidas destes tipos de ensaios não são representativas diante da heterogeneidade e do tamanho das partículas de RSU. Vale dizer também que não há correlações publicadas entre a resistência destes materiais e o número de golpes para os ensaios do tipo SPT (Mitchell e Mitchell, 1992). Dixon e Jones (2005) afirmam que as técnicas de campo para medir a resistência ao cisalhamento até o presente são inadequadas e não confiáveis.

Gerber (1991), após a ruptura de um aterro localizado nos EUA, desenvolveu uma série composta de doze ensaios de densidade de grande escala (8 m^3) em RSU e obteve um peso específico médio de 16 kN/ m^3 . Com o objetivo de medir a resistência ao cisalhamento do RSU, ele construiu uma caixa quadrada de cisalhamento de 1,5 m. As tensões normais foram aplicadas com grandes blocos de concreto. Seis ensaios de cisalhamento direto de grande escala foram realizados em diferentes locais. Os ensaios apresentaram uma coesão de 25 kPa e um ângulo de atrito de 27° . O autor afirmou que grandes deformações foram necessárias para mobilizar resistência no resíduo. Ele também declarou que é necessário reduzir a resistência do resíduo usada nos cálculos de estabilidade do talude para garantir que as deformações específicas não sejam excessivamente incompatíveis.

Cowland e Gabay (1993) executaram um estudo geotécnico no Aterro Sanitário de Shuen Wan, em Hong Kong, com o objetivo de medir a densidade do RSU e estimar a sua resistência ao cisalhamento. Para tanto, foi escavada uma trincheira vertical de 5,9 m de profundidade no maciço de resíduos. Em seguida, trincheiras laterais foram escavadas até os finais da trincheira principal, de forma que se obtivesse um grande bloco para ser utilizado como amostra. A intenção era de carregar este bloco de modo que fosse causado o seu escorregamento, ou seja, a ruptura da amostra de RSU. Entretanto, em função da dificuldade de se carregar o bloco, decidiu-se escavar trincheiras ao seu redor tão profundas quanto possível e então, monitorar as suas deformações. O comportamento do bloco foi monitorado por duas fileiras de medidores de recalques instalados no topo do bloco. Contudo, a trincheira não rompeu, mas as deformações foram registradas e uma análise de tensões foi realizada.

Assim, uma análise da trincheira para uma faixa de potenciais ângulos de plano de ruptura, gerou uma faixa de valores efetivos de coesão e ângulo de atrito, sendo que aqueles que eram mais coerentes com as observações de campo, geraram um par de parâmetros de 4 kPa de coesão e 56° de ângulo de atrito. Considerando a presença de materiais fibrosos no bloco de resíduos, os autores optaram em adotar um critério de ruptura bilinear e, para o segundo estágio deste critério, obtiveram uma coesão de 10 kPa e ângulo de atrito de 25°. Ressalta-se que o peso específico do resíduo considerado foi de 1,4 t/m³.

Withiam et al. (1995) implementaram programas de investigação para caracterizar e monitorar os comportamentos do solo e do RSU no aterro sanitário de Dekorte Park, localizado na cidade de Kearny, em Nova Jersey. Dentro deste programa, eles realizaram ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões no interior da massa de resíduo, usando uma caixa de aço bipartida de 1,5m x 1,5m x 1,5m. A caixa de cisalhamento foi colocada sobre um bloco solto de resíduo relativamente indeformado escavado a uma profundidade de 1,5m abaixo da superfície dos resíduos. As amostras foram preparadas por meio de escavação, utilizando-se uma escavadeira, transformando-as em blocos de resíduos, os quais foram, em seguida, moldados com ferramentas manuais. Na seleção das amostras, foram tomados os devidos cuidados de forma a garantir que o solo de cobertura não estivesse incluído no material a ser testado. Com relação ao sistema de forças, a força horizontal foi aplicada na parte superior da caixa, usando um cabo amarrado a um guincho mecânico. Já a força normal foi aplicada usando um sistema de blocos de madeira e pesos de concreto. As tensões normais aplicadas variaram entre 0 e 21 kPa, utilizando um procedimento de estágio múltiplo. Este método consistia da aplicação da tensão cisalhante para a mesma amostra em níveis de tensão normal que eram aumentados de forma progressiva até que a amostra se aproximasse da ruptura. Esclarecendo melhor este método, para cada nível de tensão aplicado, o ensaio era interrompido no momento da amostra atingir a ruptura e então, a caixa do equipamento era deslocada para sua posição inicial e reiniciava o ensaio com outro nível de tensão. Desta forma, as possíveis variações de composição de amostras devido ao uso de diferentes amostras para cada ensaio foram eliminadas. O referido ensaio forneceu uma coesão de 10 kPa e um ângulo de atrito de 30°.

Coumoulos et al. (1995) realizaram uma extensa investigação geotécnica no principal aterro de Atenas, em Ano Liossia, na qual incluíram ensaios do tipo SPT em RSU. Com os gráficos obtidos nos ensaios, os autores concluíram que a resistência do resíduo aumenta com a

profundidade, de 25 golpes a 5 m para 65 golpes a 25 m de profundidade. Além disso, pode ser notado que a maioria dos resultados de SPT situou-se entre os valores de 10 e 80 golpes.

Carvalho (1999) realizou ensaios dos tipos SPT e CPT no sub-aterro AS-2 localizado no Aterro Sanitário Bandeirantes, município de São Paulo. No caso do SPT, verificou-se que a resistência à penetração (N) do amostrador aumentou com a profundidade. O SPT médio foi cerca de 7 golpes para as camadas mais superficiais e alcançou 12 golpes para as camadas mais profundas (10 – 30m). Esses valores permitiram estimar, uma faixa de variação de 26° – 32° para o ângulo de atrito, empregando correlações propostas para solos arenosos ou coesão entre 90 – 150 kPa, empregando correlações para solos argilosos. Com relação ao ensaio CPT, as resistências de ponta e lateral medidas no ensaio de penetração do cone, apresentaram valores típicos entre 2500 – 7500 kPa e entre 100 – 400 kPa, respectivamente. Os valores típicos obtidos permitiram estimar uma faixa de variação de 29° – 33° para o ângulo de atrito efetivo, utilizando correlações existentes para solos arenosos ou coesão entre 45 – 120 kPa, empregando correlações para solos argilosos.

Gomes et al. (2002) realizaram um grande número de ensaios de campo e de laboratório no Aterro Sanitário de Santo Tirso, em Portugal. Um dos ensaios foi do tipo CPT. No primeiro furo executado, os valores mais freqüentes de resistência de ponta estavam na faixa de 1 a 6 MPa. Já, no segundo, os valores mais freqüentes situaram-se entre 3 e 10 MPa. A resistência média de ponta para o primeiro furo foi de 5 MPa e para o segundo foi de 7,5 MPa, demonstrando uma tendência de aumento com a profundidade para ambas situações. Já, as resistências laterais médias foram de 0,11 MPa e 0,09 MPa para os primeiro e segundo furos respectivamente. Considerando a validade do ábaco de Schmertmann para o RSU, segundo os autores, poderia ser concluído que o resíduo do referido aterro comportaria como um material granular. Seguindo o mesmo pensamento, as relações empíricas desenvolvidas para solos, baseadas em resistência de ponta, foram usadas para estimar o ângulo de atrito e o módulo de deformação do resíduo. No caso do ângulo de atrito, os valores variaram de 28° a 35° para o primeiro furo e de 32° a 37° para o segundo.

Caicedo et al. (2002), conforme já relatado, executaram, no aterro de Dona Juana, ensaios de cisalhamento de grande escala em amostras indeformadas de resíduos com 90 cm de diâmetro. O ensaio foi desenvolvido em quatro estágios. Inicialmente, a amostra era moldada em um local específico do aterro sanitário e então, as duas partes da caixa de cisalhamento

eram instaladas sobre a amostra. Em seguida, uma estrutura instrumentada para aplicação de carga era instalada no local. Esta estrutura permitia a aplicação das tensões cisalhante e normal. Durante o ensaio, uma tensão normal era aplicada e mantida constante. A força cisalhante era progressivamente aplicada, aumentando a carga para a tensão máxima, a qual foi tipicamente obtida para 6 cm de deslocamento horizontal. As tensões normais para o ensaio foram de 6, 13, 56 e 117 kPa. A partir do gráfico tensão cisalhante versus tensão normal, os autores obtiveram uma coesão de 78 kPa e ângulo de atrito de 23°.

Fucale e Jucá (2002) realizaram ensaios do tipo SPT no aterro da Muribeca, em Recife (PE), aterro de Aguazinha, em Olinda (PE), Lixão do Roger, em João Pessoa (PB) e Aterro Metropolitano, Salvador (BA). Os valores de resistência à penetração (SPT) obtidos na célula 1 do aterro da Muribeca, nas células 1 e 4 do aterro de Aguazinha e no lixão do Roger apresentaram-se baixos e típicos de resíduos sólidos antigos (2 a 10 golpes), onde a decomposição da matéria orgânica estava bastante avançada. Os resultados de SPT mostraram também que os mesmos não variaram significativamente com a profundidade, apresentando-se praticamente constante dentro de uma determinada faixa de valores. Os resultados de SPT obtidos na célula 4 do aterro da Muribeca e na célula piloto do aterro Metropolitano Centro apresentaram-se mais altos, típicos de resíduos mais recentes, com tendência de crescimento com a profundidade. Os ensaios de penetração dinâmica (SPT) indicaram variabilidade dos resultados em função da heterogeneidade do RSU. De uma maneira geral, estes ensaios mostraram que em resíduos sólidos antigos, os valores de resistência são baixos e mantêm-se praticamente constantes com a profundidade; já em resíduos sólidos recentes, estes valores são um pouco mais elevados e apresentaram uma tendência de acréscimo com a profundidade.

3.6.5 Retroanálises

Com relação aos dados de retroanálises, os parâmetros de resistência são obtidos por meio de equações de equilíbrio, conforme comentado anteriormente. Nestas equações, determina-se um fator de segurança para a estrutura, em questão, através do quociente entre o somatório dos esforços resistentes e o somatório dos esforços atuantes. No caso de retroanálises, o procedimento é feito de forma inversa, adota-se um fator de segurança igual a 1 (um) e com o conhecimento do somatório dos esforços atuantes, obtêm-se os parâmetros de resistência oriundos do somatório dos esforços resistentes. Porém, em função do valor do fator de segurança adotado, estes parâmetros são considerados conservadores para situações em que a

estrutura do aterro sanitário é estável, ou seja, fator de segurança maior do que 1 (um). Além disso, o estudo de retroanálise busca obter somente os parâmetros de resistência do RSU, e não o entendimento de seu comportamento mecânico – um dos objetivos desta pesquisa.

Segundo König e Jessberger (1997), um cuidado especial deve ser tomado ao usarem parâmetros de resistência obtidos de retroanálises. Há um grande número de combinações de parâmetros de resistência ao cisalhamento que satisfazem o equilíbrio (uma equação e duas variáveis desconhecidas), desta forma a solução não pode ser precisamente obtida. Além disso, é importante ter em mente que, geralmente, retroanálises não são relacionadas para observações de condições de ruptura, quando realizadas em campo. Devido a isto, o fator de segurança tem de ser estimado (uma equação e três incógnitas). Howland e Landva (1992) propuseram uma aproximação gráfica para analisar os resultados obtidos de retroanálises com o objetivo de determinar a mais provável combinação de resistência cisalhante.

Outro aspecto sobre retroanálise é abordado por Kavazanjian (2003). O autor afirma que as retroanálises de rupturas de taludes de aterro, de taludes cortados verticalmente e de taludes estáveis existentes podem fornecer informações da resistência ao cisalhamento de uma grande massa de resíduo, mas dados de entrada de baixa qualidade tornam tais análises problemáticas e normalmente não confiáveis.

Pagotto e Rimoldi (1987) apresentaram ensaios de placa realizados em um aterro de RSU em Modena, na Itália. Por meio da retroanálise destes ensaios, eles obtiveram uma coesão de 29 kPa e um ângulo de atrito de 22°. Ressalta-se que não foram dados detalhes das propriedades dos resíduos bem como da metodologia do ensaio.

Benvenuto e Cunha (1991) realizaram uma retroanálise a partir do escorregamento ocorrido no sub-aterro AS-1 do aterro sanitário Bandeirantes, município de São Paulo, obtendo valores de 13,5 kPa e 22° para coesão e ângulo de atrito respectivamente. Segundo Boscov e Abreu (2000), este deslizamento ocorrido constituiu um marco para a alteração dos parâmetros utilizados nas análises de estabilidade. Os referidos valores tornaram referência para estudos posteriores. Porém, como já colocado no início deste trabalho, é importante esclarecer que estes valores obtidos referem-se às condições locais, ou seja, as condições climáticas, operacionais e de projeto, bem como a composição dos RSU são características do referido aterro. Portanto, a utilização dos mesmos parâmetros em outros aterros pode criar um falso resultado da análise de estabilidade, gerando uma estrutura aparentemente estável ou instável.

Howland e Landva (1992) realizaram uma retroanálise de um projeto de expansão vertical de um aterro sanitário localizado em Nova York. Com este estudo, eles obtiveram uma coesão de 10 kPa e um ângulo de atrito de 23°. A seleção dos parâmetros para os resíduos foi baseada principalmente nos resultados de retroanálises de ruptura de aterros de RSU e de ensaios de carga de grande escala apresentados na literatura. Dentro deste estudo, foram considerados os valores de resistência oriundos de ensaios de cisalhamento direto executados em campo e em laboratório. Entretanto, estes valores foram maiores em relação àqueles oriundos dos resultados de retroanálise. Sendo assim, os autores concluíram que a envoltória de ruptura definida pelo referido par de parâmetros refletia os dados de resistência retrocalculados e era, portanto, consistente com a análise de estabilidade desenvolvida.

Kavazanjian et al. (1995) calcularam parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU por meio de retroanálises em quatro aterros sanitários existentes nos EUA. Utilizando o método das fatias de “Bishop Modificado” e assumindo uma coesão de 5 kPa, os autores obtiveram os respectivos valores de ângulo de atrito, os quais estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 3.4 – Retroanálises de taludes de aterros existentes

Aterro Sanitário	Inclinação Média		Inclinação Máxima		Resistência do Resíduo, (ϕ)		
	Altura (m)	Inclinação (H:V)	Altura (m)	Inclinação (H:V)	FS = 1,0	FS = 1,1	FS = 1,2
Lopez Canyon, CA	120	2,5:1	35	1,7:1	25°	27°	29°
Oll, CA	75	2:1	20	1,6:1	28°	30°	34°
Babylon, NY	30	1,9:1	10	1,25:1	30°	34°	38°
Private Landfill, OH	40	2:1	10	1,2:1	30°	34°	37°

Eles mostraram que os taludes nestes aterros têm permanecido estáveis por até 15 anos, sem deformação excessiva ou outros sinais de instabilidade. Conseqüentemente, os fatores de segurança eram certamente bem maiores do que 1 e provavelmente maiores do que 1,3. Sendo assim, tomando uma decisão conservadora, os autores concluíram que seria razoável adotar um fator de segurança de 1,2. Então, com o objetivo de desenvolver a avaliação da resistência ao cisalhamento do RSU para uso em análises de estabilidade de aterros de resíduos, os autores utilizaram dados de resistência obtidos por Pagotto e Rimoldi (1987), Landva e Clark

(1990) e Richardson e Reynolds (1991) e os obtidos nos estudos de retroanálise dos aterros apresentados na tabela, e plotaram-nos, em um gráfico “Tensão Normal x Tensão Cisalhante”. Por meio de uma regressão linear destes dados e adotando um critério de ruptura bilinear, os autores obtiveram um ângulo de atrito nulo e uma coesão de 24 kPa para tensões normais abaixo de 30 kPa e para tensões normais acima deste valor, eles obtiveram um ângulo de atrito de 33° e coesão nula.

Kaimoto e Cepollina (1996), a partir da análise do histórico de poro-pressões de gás e chorume e do comportamento de estabilidade do maciço, proveniente de um plano de monitoramento instalado após o deslizamento do Aterro Bandeirantes, mencionado anteriormente, reavaliaram os parâmetros de resistência do RSU, obtendo 16 kPa de coesão e 22° de ângulo de atrito para resíduos com disposição superior a 2 anos submetidos a drenagem interna mais intensa e 16 kPa e 28° para resíduos com disposição inferior a 2 anos submetidos a uma intensa drenagem interna.

3.6.6 Envoltória de Resistência de RSU

Como já abordado, os parâmetros de resistência são obtidos por meio das teorias da Mecânica dos Solos. Sendo assim, a resistência ao cisalhamento do RSU é usualmente definida, usando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, conforme equação 3.3.

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad \text{Equação 3.3}$$

em que:

τ = tensão cisalhante no plano de ruptura, por ocasião da ruptura;

c' = coesão efetiva ou intercepto coesivo efetivo;

σ = tensão normal total no plano de ruptura, por ocasião da ruptura;

u = poro-pressão;

ϕ' = ângulo de atrito efetivo.

Os parâmetros de resistência que definem a envoltória de ruptura são o ângulo de atrito (ϕ) e o intercepto coesivo (c). Segundo Dixon e Jones (2005), o intercepto coesivo pode denotar a real coesão entre as partículas, mas é frequentemente uma função de um ou mais dos seguintes aspectos: a curvatura da envoltória de ruptura, a variação entre amostras, erros de

medida, ou uma indicação da resistência à tração. Portanto, é comum definir o parâmetro (c) como a coesão aparente ou o intercepto coesivo.

Contudo, é importante ressaltar que os ensaios de cisalhamento direto realizados no presente trabalho para obter os referidos parâmetros podem, segundo Kolsch (1993), não ser adequados para representar o real comportamento do RSU.

Conforme o modelo geotécnico proposto por Kolsch (1993 e 1995), o comportamento do RSU seria similar ao de solos reforçados. Nele, os materiais fibrosos presentes no RSU são capazes de incorporar forças de tração e transmiti-las fora da zona de deformação. Assim, a resistência ao cisalhamento total é composta do atrito no plano de cisalhamento e da força de tração das fibras. Cabe ressaltar que o referido critério de ruptura será descrito no presente trabalho. Dentro deste mesmo raciocínio, de acordo com Jessberger et al. (1995) e König e Jessberger (1997), o comportamento de resistência que o RSU apresenta, para grandes deformações, pode ser comparado ao comportamento de solos reforçados. Os componentes fibrosos do RSU, como plásticos, têxteis, papel e papelão, podem agir como reforço da mistura e, portanto, contribuem para o ganho de intercepto de coesão ou de resistência, como acontece em solo reforçado.

Dessa maneira, o RSU pode ser considerado como um material composto, constituído por duas componentes: uma matriz básica formada pelas partículas de granulação fina a média, que apresentam comportamento de atrito e a outra, a matriz de reforço, constituída pelos componentes fibrosos do RSU. Assim sendo, conforme o mencionado, percebe-se que o critério de ruptura para os RSU não é exatamente o mesmo para os solos, como comentado, anteriormente, podendo ser inadequado.

Howland e Landva (1992) afirmam que o RSU comporta-se similarmente a uma turfa fibrosa, devido ao seu alto índice de matéria orgânica e a sua natureza fibrosa.

Diante do exposto, percebe-se a importância de se constatar a validade do critério de ruptura de “Mohr Coulomb” para este tipo de material.

Fasset et al. (1994) colocam outras questões referentes ao comportamento mecânico dos RSU, além da incerteza da validade do critério de ruptura mencionado. Como o RSU pode resistir a

largas deformações sem se romper? Em quais deformações os dados de resistência são relevantes?

Singh e Murphy (1990) apresentaram resultados de ensaios triaxiais em amostras de RSU. Depois de resistirem a deformações superiores a de 30%, as tensões continuaram aumentando com ausência da indicação da aproximação de um valor assintótico. Durante os ensaios de carga realizados pelos autores em Monterey Park, Califórnia (EUA), um talude de aterro sobrecarregado resistiu a largas deformações, mas nenhum plano de ruptura ocorreu.

Confirmando essa tendência de comportamento dos RSU, Carvalho (1999) realizou análises de curvas tensão-deformação típicas, obtidas de ensaios de cisalhamento direto com esses materiais, apresentadas por vários autores, concluindo que houve um ganho contínuo de resistência com o aumento da deformação medida e nenhuma delas apresentou pico de resistência. Singh e Murphy (1990) concluíram que uma envoltória de Mohr-Coulomb para resistência de RSU pode ser inapropriada, pois os mesmos sofrem grandes deformações sem caracterizar a ruptura. Ainda segundo os autores, a observação de taludes estáveis em aterros de RSU sugere que ruptura pelos taludes de resíduos pode não ser um aspecto crítico para um projeto de aterros.

Esta situação pode mudar drasticamente, quando líquidos estão envolvidos. Koerner e Soong (2000) apresentaram casos históricos de dez grandes rupturas de aterros. Todas elas foram associadas com a presença de líquidos na massa de resíduos, existência de interfaces entre materiais de revestimento (impermeabilização) e resíduos, ou solos de fundação de baixa resistência. As superfícies de ruptura dentro da massa de resíduo eram geralmente parciais. É importante esclarecer que este tipo de comportamento mecânico apresentado por ausência de pico de ruptura foi verificado nos diversos ensaios citados nesta revisão.

Kavazanjian et al. (1995) reconhecem que fatores tais como a compressibilidade do RSU e a compatibilidade de deformação devem ser consideradas no momento de utilizarem parâmetros de resistência para análises de equilíbrio limite.

Dixon e Jones (2005) afirmam que até o presente momento, existe uma limitada informação no comportamento resistente dos RSU em campo. O critério de ruptura de Mohr-Coulomb utilizado para solos e materiais particulados é normalmente usado para os resíduos, que são materiais bastante distintos, conforme comentado anteriormente. Segundo os autores, cuidado

deve ser tomado quando aplicarem a experiência do comportamento resistente de solos para o estudo do RSU. Os resíduos contêm partículas que são compressíveis, podem sustentar largas deformações de tração (ou seja, plásticas) e podem mudar com o tempo (ou seja, através da degradação). Sendo assim, percebe-se a necessidade de se buscar um modelo que represente a real resistência dos resíduos.

De acordo com Dixon e Jones (2005), a pesquisa realizada por Kolsch (1995) teve o objetivo de avaliar a contribuição do reforço promovido pelas fibras do RSU na resistência ao cisalhamento. Os resultados obtidos ajudaram a explicar situações como a da estabilidade de cortes íngremes feitos na massa de resíduos e das profundas trincas de tração observadas, que se formam no maciço de resíduos sob certas circunstâncias. Porém, os autores entendem que mais investigações, para quantificar a contribuição da resistência à tração, são exigidas antes que o referido modelo seja usado rotineiramente em projetos.

3.6.7 Modelo Proposto por Kolsch (1993 e 1995)

Segundo Fucile (2005), o modelo proposto por Kolsch consiste no estado atual da arte em uma análise mais realística da capacidade de carga de aterros sanitários.

Kolsch (1993) declarou que os modelos geotécnicos de projeto baseados em métodos da mecânica dos solos não são adequados para registrar as características de resistência dos RSU, pois existem grandes diferenças entre este material e o solo. O autor considerou que para um prognóstico de estabilidade de longo prazo, devem ser desenvolvidos novos métodos para um projeto geotécnico preciso que inclua todos os componentes do aterro. Desta forma, dentro de um projeto de pesquisa promovido pela Organização de Pesquisa Alemã (Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG), foi iniciada a investigação do comportamento mecânico de RSU em 1991.

Em ensaios de cisalhamento direto realizados por Kolsch, foi provado que os materiais fibrosos não coesivos são capazes de incorporar forças de tração. Isto prova a capacidade do resíduo formar taludes íngremes ou até mesmo verticais, os quais permanecem estáveis por vários meses. Segundo o autor, ao analisar uma curva tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal, foi constatado que a partir de uma tensão normal de 200 kPa, os materiais fibrosos passaram a ser mobilizados. Diante disto, foi concluído que as fibras do resíduo ensaiado em

tensão normal mais baixa incorporam menos forças de tração em função de sua falta de ancoragem. Além disso, ao analisar o gráfico tensão cisalhante *versus* tensão normal, o autor constatou inflexões na envoltória de resistência, havendo uma relação descontínua entre as tensões cisalhante e normal.

Como forma de comprovar o efeito dos materiais fibrosos na resistência ao cisalhamento do RSU, o autor definiu destruir os materiais fibrosos por meio da redução destes em pequenos pedaços. Então, ao analisar o gráfico tensão cisalhante *versus* tensão normal, foi constatada uma relação contínua entre as tensões normal e cisalhante, obtendo uma envoltória linear, sem inflexões agudas. Portanto, o autor concluiu que a incorporação das forças de tração nos sólidos fibrosos aponta para um aumento da tensão cisalhante em determinadas faixas de tensão normal, conduzindo assim para uma correlação descontínua entre as tensões normal e cisalhante, descrita pelas inflexões agudas da envoltória de ruptura. Esta correlação descontínua de tensão foi descoberta por várias vezes anteriormente, em ensaios de cisalhamento do RSU e em ensaio de compressão triaxial tanto com RSU quanto com areia reforçada.

Baseado no conhecimento sobre o comportamento de carga do resíduo fibroso e de outros materiais fibrosos, o autor obteve através dos ensaios de compressão triaxial e cisalhamento direto, o modelo de carga apresentado nas figuras 3.6 e 3.7.

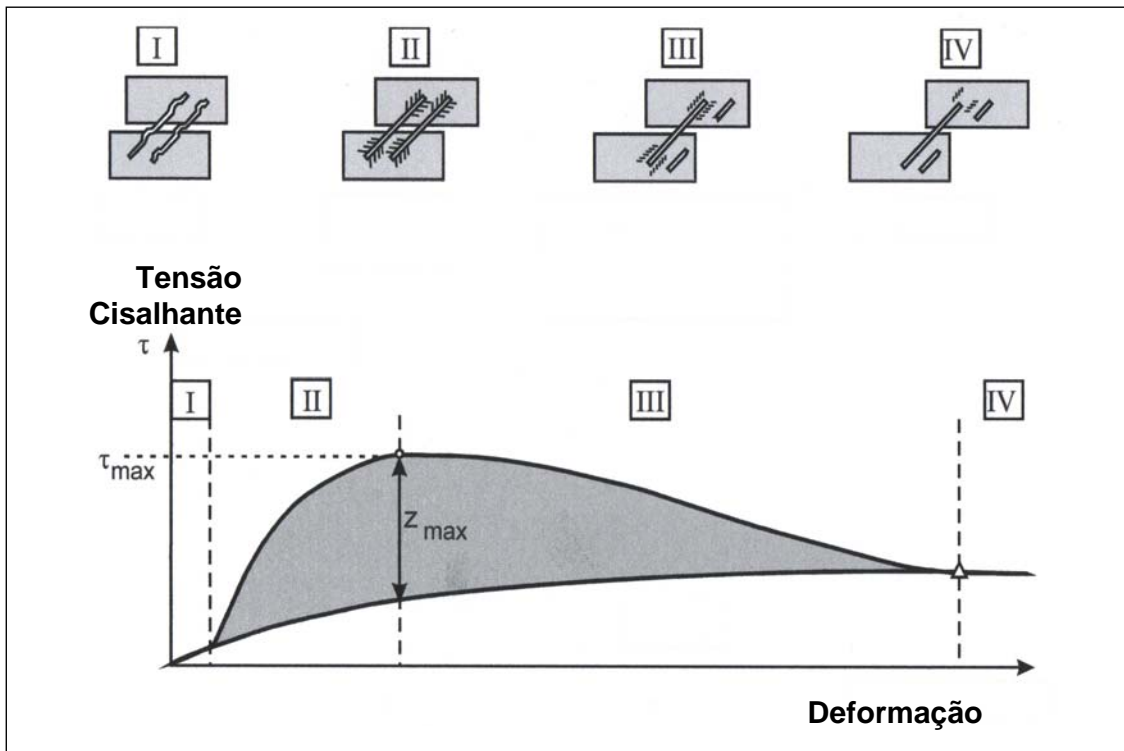


Figura 3.6 – Comportamento do resíduo – Modelo de interação entre as forças de atrito e tração – (Kolsch, 1995).

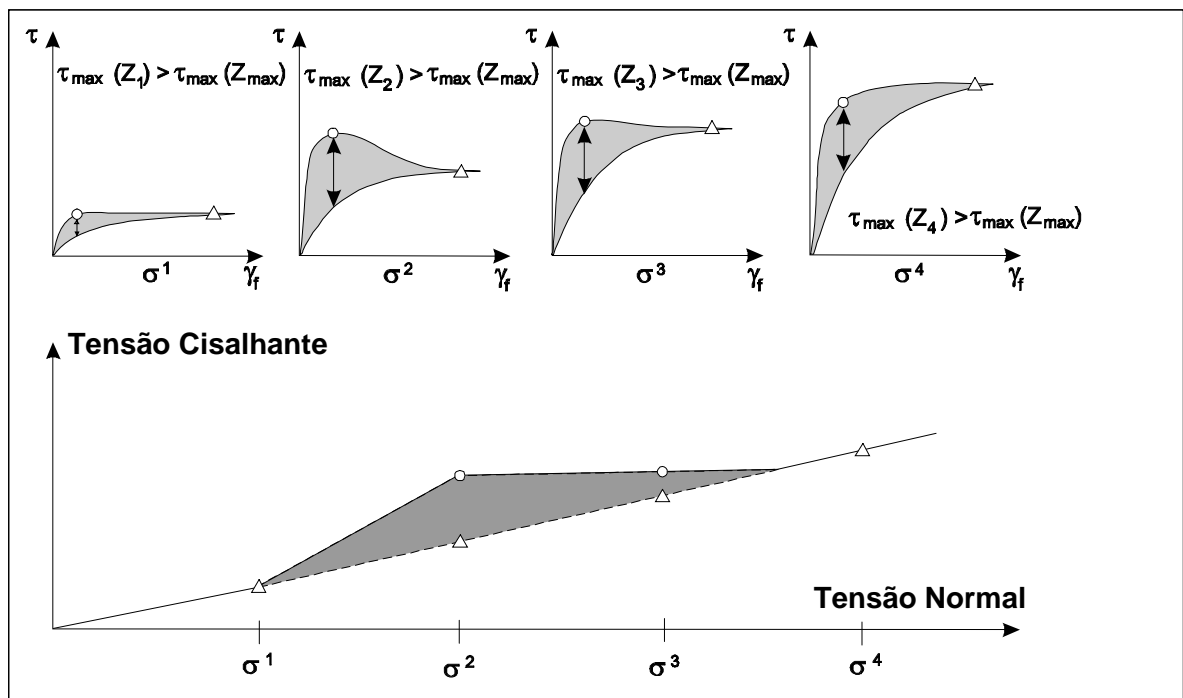


Figura 3.7 – Comportamento do resíduo – Aumento da resistência ao cisalhamento total devido às forças de tração (Kolsch, 1995).

O modelo de carga considera que os materiais fibrosos são capazes de incorporar forças de tração e transmiti-las fora da zona de deformação. Além disso, o modelo considera que o desenvolvimento das forças de tração nas fibras, tendo o mesmo efeito que um reforço, depende da ancoragem das fibras, isto significa que ele depende da tensão normal. Desta forma, existe uma relação linear entre as tensões normal e de tração que pode ser descrita por um ângulo de forças internas de tração, representado pela letra “ ζ ”. Sendo assim, a resistência ao cisalhamento total é composta do atrito no plano de cisalhamento e da força de tração das fibras.

Dependendo da transmissão da força nas fibras, a qual aumenta com a tensão normal e depende da resistência à tração das fibras, a resistência cisalhante total numa determinada faixa de tensão normal é maior do que a resistência devida ao atrito. Em função de existir uma correlação linear entre a resistência de atrito e a tensão normal descrita por um ângulo de atrito interno \emptyset , uma não-linear, ou seja, uma descontínua correlação entre a resistência cisalhante total e a tensão normal resulta na força de tração das fibras.

A Figura 3.6 apresenta o modelo de uma interação potencial de atrito e forças de tração durante uma deformação cisalhante de um material fibroso sob tensão normal constante. Durante a deformação, somente as forças de atrito surgem no início (fase 1). Com o aumento da deformação (fase 2), as fibras passam a ser ativadas e a força de tração cresce (efeito semelhante ao de reforço). Excedendo a resistência à tração ou a ancoragem, as fibras são rompidas ou escorregadas da ancoragem (fase 3). Neste caso, o máximo da tensão cisalhante é alcançado. Com o avanço da deformação, a tensão cisalhante decai e tem-se somente a resistência de atrito (fase 4).

A medida do atrito é determinada pela tensão normal e seu aumento é linear de acordo com o aumento da tensão normal (ângulo de atrito interno). A resistência à tração aumenta com a tensão normal, pois a transmissão das forças de tração é desenvolvida (melhorada) através de uma firme ancoragem das fibras. A incorporação das forças de tração nas fibras está restrita a resistência à tração das fibras, existindo, dessa forma, uma determinada tensão normal, onde o valor da força à tração alcança um nível máximo. Várias interações de atrito e de forças de tração dependentes das diferentes condições de tensão normal resultam deste mecanismo.

A Figura 3.7 apresenta a interação das forças de tração e de atrito para várias tensões normais. Nesta figura, os círculos indicam os locais de máxima força de tração, os triângulos marcam

os locais de máximo atrito em uma determinada tensão normal. Na mais baixa tensão normal σ_1 , tem-se somente baixas forças de tração (baixa ancoragem). Em alta tensão normal, as forças de tração nas fibras aumentam (ancoragem firme), até que elas atinjam um valor máximo a uma tensão normal σ_2 . Em altas tensões normais ($\sigma \geq \sigma_2$), somente a componente de atrito da resistência ao cisalhamento total aumenta. Dependendo das proporções entre forças de atrito e tração, a resistência ao cisalhamento total é determinada pelas forças de tração ($\sigma_1 \leq \sigma \leq \sigma_4$) ou pelas forças de atrito (σ_4). Na faixa de tensão normal ($\sigma_1 \leq \sigma \leq \sigma_4$), onde a resistência ao cisalhamento total é determinada pelas forças de tração, a envoltória linear de cisalhamento apresenta uma quebra, a qual é característica dos materiais fibrosos. A magnitude e extensão desta quebra dependem das propriedades do material (resistência das fibras e características do atrito).

Outro aspecto relevante colocado pelo autor diz respeito aos vários problemas existentes para investigar o comportamento suporte do resíduo sólido urbano fibroso. Os principais problemas são:

- os resultados dos ensaios de compressão triaxial e cisalhamento direto não descrevem o comportamento de suporte, porque nestes arranjos de ensaio, a anisotropia do resíduo não é suficientemente registrada;
- as características de suporte dos diferentes componentes de material serão influenciadas pelos processos biológicos, químicos e físicos dentro de um aterro. Então, a proporção entre as forças de atrito e tração está constantemente mudando.

Como uma consequência disto, o autor decidiu distinguir as investigações entre as componentes de atrito e tração. Desta forma, numa primeira fase, foi utilizado o ensaio de cisalhamento direto convencional para medir a propriedade de atrito do RSU, cujo material de reforço foi destruído e para resistência à tração, foi desenvolvido um equipamento em caráter de teste, no qual utilizou-se um resíduo similar ao RSU. Já numa segunda fase, o referido equipamento para ensaio de tração foi adaptado para um tamanho maior, cujas dimensões foram de 3 x 1 x 1,5 m (l x b x h). E, complementando, com a finalidade de medir a resistência dos resíduos devido à parcela de atrito, foi desenvolvido um equipamento de cisalhamento direto, cujas dimensões eram 2 x 1 x 1,5 m (l x b x h).

Os primeiros resultados dos ensaios mencionados não serão apresentados, uma vez que o objetivo principal deste item é apresentar o modelo geotécnico que represente a resistência ao

cisalhamento do RSU, considerando a parcela referente à tração das fibras presentes no material em questão. Entretanto, como forma de demonstrar a importância deste modelo e comprovar que o mesmo consiste no estado atual da arte em relação à resistência de resíduos, será apresentado um caso específico de aplicabilidade do referido modelo no Aterro Sanitário de Ihlenberg, localizado na Alemanha.

Como é exigida pelas regulamentações técnicas da Alemanha, a análise de estabilidade para um aterro sanitário deve ser feita uma vez por ano. Assim sendo, ao ser realizada em 2001, obteve-se um fator de segurança de 1,21, um pouco menor que o exigido, que é de 1,3. Desta forma, o órgão ambiental daquele país exigiu o fechamento do aterro. Como resultado, 400.000 m³ de volume potencial de aterro foi perdido, pois o aterro possuía 45 m de altura, sendo que a altura de projeto era de 70 m.

No ano de 2003, foram realizados estudos avançados de estabilidade para o Aterro de Ihlenberg (Kolsch e Ziehmann, 2004). Dentro deste estudo, foram realizados ensaios de tração sob carregamento normal. Diante dos resultados, foi obtido um ângulo interno de tensão de tração (ζ) de 14° e uma coesão de 21 kPa, sendo que o valor para o parâmetro “ ζ ” é típico para resíduos velhos, enquanto que para os resíduos frescos, o valor deste ângulo é de 35°. Ressalta-se que o ângulo de atrito da matriz básica destes resíduos ensaiados, obtido pelo ensaio de cisalhamento direto, foi de 25°. Considerando um maciço de resíduos de 30 m, (tensão normal = 360 kPa), o efeito do reforço gerou uma coesão total de 111 kPa, resultante de 90 kPa da coesão das fibras ($360 \times \tan 14^\circ$) e 21 kPa de coesão aparente. Portanto, ao ser considerado o efeito de reforço dos materiais fibrosos, percebe-se um grande aumento na resistência cisalhante total dos resíduos.

Na análise de estabilidade do referido aterro, foram utilizados estes valores e, então, o fator de segurança obtido foi de 1,44, somente por considerar o efeito de reforço dos materiais fibrosos. A análise que obteve o fator de segurança de 1,21 foi baseada nas teorias da mecânica dos solos. Desta forma, as autoridades competentes reabriram o aterro em novembro de 2003. Diante do exposto, nota-se o benefício que foi gerado à sociedade, ao considerar um novo modelo geotécnico de resistência de resíduos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR 040, localizada no município de Belo Horizonte, MG. Os ensaios realizados com resíduos seguiram os mesmos procedimentos adotados para solos, entretanto as dimensões do equipamento são diferentes.

4.1 *Desenvolvimento do equipamento de cisalhamento*

Para a realização dos ensaios de cisalhamento foi desenvolvido um equipamento de grandes dimensões, cuja caixa destinada à moldagem das amostras de resíduos possui seção de 4900 cm² (70 x 70 cm) e altura total de 50 cm. Ressalta-se que a referida caixa é bipartida, ou seja, ela é dotada de uma parte inferior com 20 cm de altura e de uma superior com 30 cm, existindo entre elas uma distância de 1 cm como forma de evitar o atrito entre caixas e uma conseqüente alteração dos valores dos parâmetros de resistência medidos. Como o RSU é um material de alta compressibilidade, a caixa superior foi construída com altura maior para permitir que após a fase de adensamento, a amostra atingisse altura equivalente em ambas caixas, inferior e superior. Entretanto, dependendo da composição da amostra ensaiada e do nível de tensão normal aplicado, foi necessário o alteamento desta caixa, obtendo-se amostras com alturas maiores, ou a redução da altura das amostras. Na apresentação dos resultados de adensamento, em anexo, serão abordadas as situações em que foi necessário o aumento ou a redução da altura das amostras.

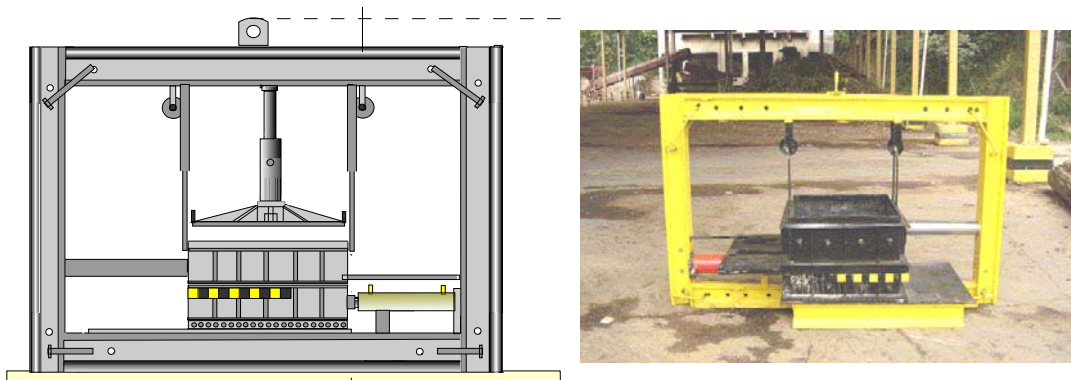
Conforme abordado por Dixon e Jones (2005), as dimensões ideais do equipamento para este tipo de ensaio seriam de, no mínimo, 1 x 1 x 1 m. Entretanto, do ponto de vista construtivo, o equipamento ficaria caro. Além disso, com exceção do equipamento de cisalhamento direto desenvolvido por Kolsch (1995), cujas dimensões eram 2 x 1 x 1,5 m, os ensaios de cisalhamento direto em laboratório apresentados na literatura não apresentaram equipamentos com dimensões maiores em relação àquelas apresentadas neste trabalho. Sendo assim, foi concluído que as dimensões da caixa mencionadas, anteriormente, seriam suficientes para atender os objetivos da pesquisa.

Esta etapa abrangeu as fases de projeto, construção, calibração dos manômetros utilizados nos registros das tensões normal e cisalhante, e realização de ensaios para teste do equipamento. Nesta última fase, foi obtida uma importante conclusão. Inicialmente, os pesos específicos das

amostras de resíduos seriam de 5 e 10 kN/m³, representando assim, as situações do resíduo mal compactado e bem compactado respectivamente. Entretanto, na fase de adensamento do ensaio de teste, foi observado que a amostra de RSU praticamente atingiu o plano de cisalhamento, impedindo a continuidade do ensaio. Desta forma, optou-se por trabalhar com amostras de pesos específicos de 8 e 10 kN/m³.

A Figuras 4.1 e 4.2 apresentam o equipamento construído, o qual é formado por:

- um pórtico de reação constituído por trilhos soldados;
- uma base soldada ao pórtico, constituída por uma chapa de aço com espessura de 10 mm e por duas vigas. Esta base tem como objetivos dar estabilidade ao pórtico, sustentação à caixa, a qual será apresentada em seguida, e proporcionar o deslizamento do trem de roletes que também será mencionado a seguir;
- um trem de roletes lubrificados que permite o deslocamento da parte inferior da caixa sobre a base com atrito reduzido;
- uma caixa bipartida executada em chapas de aço com espessura de 5 mm para acondicionamento da amostra;
- uma tampa executada em chapa de aço com espessura de 5 mm dotada por oito enrijecedores, os quais têm o objetivo de distribuir uniformemente a tensão normal sobre as amostras ensaiadas;
- dois sistemas de aplicação de tensões normal e cisalhante, constituídos de macacos hidráulicos manuais.



Figuras 4.1 e 4.2 – Equipamento de cisalhamento direto desenvolvido

No sistema de aplicação da tensão cisalhante, o macaco hidráulico ilustrado na Figura 4.1 era acionado a partir de uma linha retirada de um comando de um caminhão dotado de sistema

hidráulico, ilustrado na Figura 4.3. A pressão de trabalho do referido sistema podia variar até 170 bar, aproximadamente.

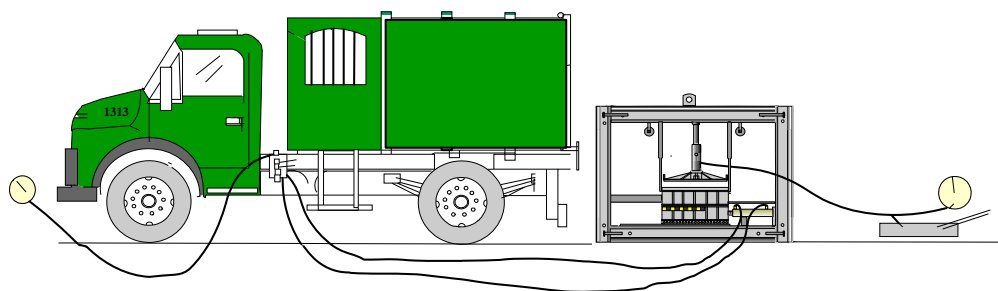


Figura 4.3 – Sistema de aplicação das forças normal e cisalhante

A Figura 4.4 apresenta o princípio de funcionamento do equipamento.

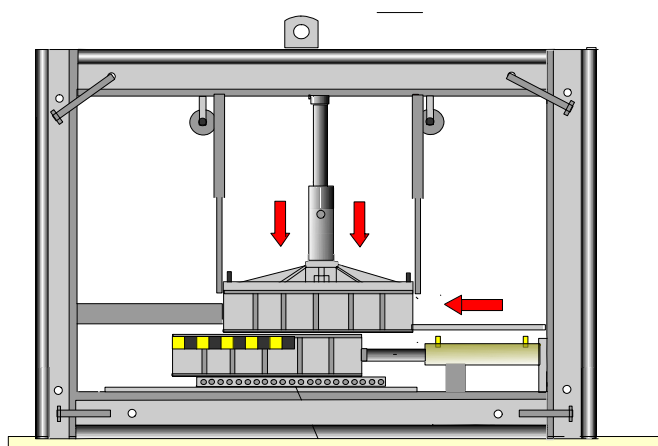


Figura 4.4 – Princípio de funcionamento do equipamento

4.2 Programa experimental

O programa experimental foi definido em função das seguintes variáveis:

- Composição gravimétrica:
 - a) Típica de Belo Horizonte, denominada BH;
 - b) Típica de Belo Horizonte, substituindo a fração orgânica putrescível por resíduos pré-tratados mecânica e biologicamente (composto orgânico). Esta composição, denominada BH, objetivou simular o comportamento de resíduos em elevado estado de degradação;

- c) 75 % de matéria orgânica putrescível e 25% de uma mistura de solo e entulho de construção civil. Esta composição, denominada BH sem fibras, objetivou avaliar a influência dos materiais fibrosos de grandes dimensões no comportamento dos resíduos frescos;
- d) 75 % de resíduos pré-tratados mecânica e biologicamente (composto orgânico) e 25% de uma mistura composta por solo e entulho de construção civil. Esta composição, denominada BH sem fibras, objetivou avaliar a influência dos materiais fibrosos de grandes dimensões no comportamento dos resíduos velhos.
- Peso específico aparente úmido inicial: 8 e 10 kN/m³;
 - Teor de umidade (base úmida) natural e inferior ao natural.
 - Idade: fresco e velho, que foram simuladas a partir da utilização da fração orgânica putrescível e submetida ao processo de compostagem, respectivamente;
 - Nível de tensões normais: 50, 100 e 200 kPa.

O programa experimental foi executado conforme a Tabela 4.1. Foram realizados seis ensaios completos, cada um com três amostras, de modo a possibilitar a obtenção das envoltórias de resistência dos RSU.

Tabela 4.1 – Programa Experimental

Ensaio	Amostra	Composição	Idade	Umidade (base úmida) por amostra (%)			Peso Específico (kN/m ³)
				50 kPa	100 kPa	200 kPa	
1	1-3	BH (a)	Fresco	Natural			10
				-	-	68,64	
2	4-6	BH (a)	Fresco	Natural			8
				68,76	70,15	65,68	
3	7-9	BH s/ Fibra (c)	Fresco	Natural			10
				68,11	72,31	66,03	
4	10-12	BH s/ Fibra (c)	Fresco	Inferior ao natural			10
				57,34	59,26	58,24	
5	13-15	BH (b)	Velho	Natural			8
				49,18	50,64	66,73	
6	16-18	BH s/ Fibra (d)	Velho	Natural			8
				28,61	28,78	25,13	

A composição denominada “Típica de Belo Horizonte” se baseou no “Relatório Final da Caracterização dos Resíduos Sólidos de Belo Horizonte”, realizada pela SMLU (Secretaria Municipal de Limpeza Urbana) no ano de 2004, conforme a Tabela 4.2. Como forma de facilitar a montagem das amostras, houve uma redução do número de componentes na composição “Típica de Belo Horizonte”.

Esta simplificação da composição merece alguns esclarecimentos. No caso de metal ferroso e metal não ferroso, vidro reciclável e vidro não reciclável, devido aos baixos percentuais e aos riscos de trabalhar com estes tipos de resíduos, eles foram desconsiderados. Já a espuma, o isopor, a cerâmica, o resíduo perigoso doméstico, de serviço de saúde e os automotivos, seus percentuais são muito baixos e a dificuldade de encontrá-los na massa de resíduos coletada na frente de serviço do aterro sanitário era grande. Diante disto, optou-se por não considerá-los também. A categoria “Madeira, tecido, borracha e couro” foi substituída por “Tecido e couro”, pois a moldagem de fragmentos de madeira é difícil e a presença de fragmentos de borracha na massa de resíduos é muito rara. Com relação à categoria “rejeitos”, conforme o relatório elaborado pela SMLU, a sua denominação refere-se a todos os componentes da massa triada que, em função do seu estado de fragmentação e mistura, não foi possível separá-los por tipo. Os materiais não contemplados na relação das categorias pesquisadas também

foram incluídos nesse grupo. Assim, em função do solo estar presente na massa de resíduos, optou-se por considerá-lo, substituindo a categoria “rejeitos”.

Tabela 4.2 – Programa Experimental – Composição Gravimétrica

Componentes	Composição SMLU (% em peso úmido)	Componentes	Composição Típica de Belo Horizonte (% em peso úmido)
Resíduos Alimentares	40,55	Resíduos Alimentares	55
Fezes	4,22	-	-
Resíduos de Banheiro	7,77	-	-
Total	52,54	-	-
Podas	9,05	Podas	12
Papelão	1,13	-	-
Papel fino	4,99	-	-
Embalagem Longa Vida	1,10	-	-
Papel misto	2,31	-	-
Total	9,53	Papel e Papelão	10
Plástico filme	2,35	-	-
Plástico rígido	2,46	-	-
PET	1,14	-	-
Plástico filme (sujo)	4,93	-	-
Total	10,88	Plástico	11
Metal ferroso	1,75	-	-
Metal não ferroso	0,54	-	-
Total	2,29	-	-
Vidro reciclável	2,63	-	-
Vidro não reciclável	0,22	-	-
Total	2,85	-	-
Entulho	2,85	Entulho	3
Espuma, isopor, cerâmica	0,65	-	-
Madeira, tecido, borracha, couro	4,04	Tecido e couro	4
Total	7,54	-	-
Resíduo Perigoso Doméstico	0,18	-	-
Resíduo de Serviço de Saúde	0,27	-	-
Resíduos Automotivos	0,26	-	-
Total	0,71	-	-
Rejeitos	4,60	Solo	5
Total Geral	100,00	Total Geral	100,00

4.3 Execução dos Ensaios

A execução dos ensaios consistiu nas fases de amostragem, estabelecimento do teor de umidade, moldagem dos corpos de prova, adensamento e cisalhamento.

4.3.1 Amostragem

Na fase de amostragem, para os ensaios 1 e 2, as amostras foram montadas, seguindo a composição “Típica de Belo Horizonte” (SMLU, 2004). Para tanto, foram coletadas amostras da frente de operação do aterro.

Na execução desta fase, após a coleta e transporte dos resíduos, estes eram dispostos em um galpão coberto, e, logo após, fazia-se a sua triagem e a estocagem das frações referentes a plástico, papel, papelão e materiais têxteis em caçambas e tambores (Figuras 4.5 e 4.6). As frações correspondentes aos resíduos de construção civil e solo foram coletadas em uma área específica do aterro sanitário, onde os referidos materiais são estocados. Já a matéria orgânica putrescível foi coletada no pátio de compostagem, antes do tratamento (Figuras 4.7 e 4.8). Vale dizer que foi coletada somente a quantidade suficiente para cada ensaio. Desta forma, evitava-se o armazenamento de matéria orgânica, minimizando maus odores, além de agilizar a montagem das amostras, uma vez que a triagem deste tipo de material demanda um tempo bem maior que a dos demais. Sendo assim, para ambos os ensaios, foi possível utilizar amostras com composições semelhantes.



Figuras 4.5 e 4.6 – Segregação e Estocagem de materiais



Figuras 4.7 e 4.8 – Coleta da matéria orgânica

Para os ensaios 3 e 4, tanto a coleta da matéria orgânica quanto a da mistura solo e entulho seguiram o mesmo procedimento mencionado para os ensaios 1 e 2. Entretanto, no que diz respeito a controle de umidade, é importante destacar alguns detalhes executivos. Para os ensaios 1, 2 e 3, após o caminhão dispor a matéria orgânica no pátio de compostagem em forma de leira, esta era aberta por meio de uma pá carregadeira, a qual, em seguida, homogeneizava e comprimia a massa de resíduos, buscando obter valores de umidade próximos em toda a sua extensão. Logo após, a matéria orgânica era coletada. Já, para o ensaio 4, para o qual foi estipulado um teor de umidade inferior ao natural, objetivando avaliar a influência da umidade na resistência dos resíduos, após a disposição da matéria orgânica, esta era coletada na parte superior da leira, onde o teor de umidade encontrava-se mais baixo.

E, por último, os ensaios 5 e 6 seguiram os procedimentos utilizados nos ensaios 1 e 2 e ensaios 3 e 4, respectivamente. Porém, a matéria orgânica foi substituída pelo resíduo pré-tratado mecânica e biologicamente no setor de compostagem do aterro sanitário, reproduzindo de certa forma um resíduo velho. É importante destacar a dificuldade encontrada para adotar a umidade natural do composto orgânico às amostras. No mês de março de 2006, ocorreram chuvas na maior parte dos seus dias. Em função disto, as leiras de composto orgânico passaram a ter uma umidade superior daquela em seu estado natural. Sendo assim, foi necessário dispor o composto orgânico em finas camadas sobre o pátio de compostagem até que o referido material atingisse a umidade desejada (natural), através de sua exposição ao sol (Figuras 4.9 e 4.10).



Figuras 4.9 e 4.10 – Coleta e secagem do composto orgânico

Após a fase de coleta e estocagem, os resíduos eram pesados em uma balança calibrada, de forma a garantir os percentuais de cada constituinte, e homogeneizados com a finalidade de evitar diferentes zonas de comportamento dentro da caixa do equipamento. Na realização da pesagem dos resíduos, foram utilizados tambores de 100 L de volume, cujas taras eram conhecidas, porém estas foram conferidas. As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam a pesagem dos resíduos.



Figuras 4.11 e 4.12 – Pesagem dos resíduos

A homogeneização dos resíduos foi feita de forma diferente para cada ensaio. Nos ensaios 1 e 2, em função da presença de grandes componentes como podas e materiais têxteis e do grande volume de plásticos (todos estes de difícil manuseio), a homogeneização foi feita por intermédio da pá carregadeira (Figuras 4.13 e 4.14).



Figuras 4.13 e 4.14 – Homogeneização das amostras dos ensaios 1 e 2

Nos ensaios 3 e 4, a homogeneização foi feita manualmente. Inicialmente, lançava-se solo e entulho sobre o piso do galpão da compostagem e espalhava-o, de forma a obter-se uma área suficiente para receber toda a matéria orgânica. Então, a matéria orgânica era disposta sobre a mistura solo-entulho, a qual absorvia grande parte da umidade do material orgânico. Em seguida, fazia-se a mistura manual com auxílio de pá e enxada. Os ensaios 5 e 6 foram homogeneizados da mesma forma que os ensaios 1 e 2, e 3 e 4, respectivamente. As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam a homogeneização das amostras dos ensaios 3 e 4.



Figuras 4.15 e 4.16 – Homogeneização das amostras dos ensaios 3 e 4

Destaca-se que durante os dias de forte chuva, evitava-se a homogeneização e moldagem dos resíduos, pois havia a possibilidade de molhar as amostras de resíduos e conseqüentemente alterar seus teores de umidade. Além disto, nos dias de ventos fortes, não era adequado realizar estas atividades também, pois os materiais mais leves como plásticos e papéis eram levados pelo vento para fora do galpão, onde se realizavam os ensaios. Entretanto, em função da falta de tempo, as referidas atividades tinham de ser realizadas. Desta forma, conclui-se que o galpão para realização dos ensaios deve ser fechado e ao mesmo tempo, bem ventilado, evitando-se a ocorrência de maus odores.

4.3.2 Estabelecimento do teor de umidade

Concluída a fase de amostragem, era realizado o quarteamento das amostras de cada ensaio e então, retirava-se uma amostra de 2 kg de resíduos, os quais eram acondicionados em sacos plásticos hermeticamente fechados, identificados e enviados para determinação do teor de umidade (Figuras 4.17 e 4.18). O teor de umidade era determinado pelo Laboratório de Análises físico-químicas, localizado na própria Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR 040. As amostras eram submetidas a uma temperatura de 105° em estufa durante um período de 24 horas (Figuras 4.19 e 4.20). Os valores de teor de umidade apresentados na Tabela 1 referem-se à umidade em base úmida.



Figuras 4.17 e 4.18 – Quarteamento e coleta de amostra



Figuras 4.19 e 4.20 – Estabelecimento do teor de umidade

4.3.3 Moldagem dos corpos de prova

Durante a moldagem dos corpos de prova, para os ensaios 1, 2, 5 e 6, os resíduos foram dispostos em camadas de 10 cm e submetidos inicialmente à compactação, por meio de soquetes manuais. Nos ensaios 1 e 2, quando a caixa do equipamento era totalmente preenchida sem a utilização de toda a massa de resíduo necessária, fazia-se uso de dois macacos hidráulicos, apresentados na Figura 4.22, de forma a possibilitar a moldagem do material restante. Esta última etapa da fase de moldagem era trabalhosa, além de exigir muita

atenção, pois qualquer descuido poderia acarretar em um acidente de trabalho. Para os ensaios 3 e 4, os resíduos foram dispostos diretamente na caixa sem o auxílio de compactação.



Figuras 4.21 e 4.22 – Moldagem dos corpos de prova

4.3.4 Adensamento

Durante a fase de adensamento, foram medidos em uma régua graduada em milímetros, os deslocamentos verticais em função do tempo (Figura 4.23). Para cada nível de tensão normal aplicado, tem-se um deslocamento vertical, o qual varia com o tempo.

Cabe comentar que em função da impossibilidade de adensar e cisalhar uma amostra no mesmo dia, no final do turno da tarde, o macaco hidráulico utilizado para aplicação da tensão normal era substituído por uma trava de madeira, conforme apresentada na Figura 4.24, de modo a possibilitar a permanência da tampa da caixa na posição da última leitura realizada a cada dia. Vale dizer também, que se cobria o equipamento com lona plástica após a última leitura do dia, evitando-se que uma eventual chuva molhasse o mesmo e, conseqüentemente, as amostras.



Figuras 4.23 e 4.24 – Fase de adensamento

4.3.5 Cisalhamento

Após o adensamento dos resíduos, foi realizada a fase de cisalhamento, a qual pode ser visualizada na Figura 4.26. Para tanto, fez-se necessário o uso do sistema hidráulico do caminhão com o objetivo de acionar o macaco hidráulico responsável pelo deslocamento da caixa inferior do equipamento, apresentada anteriormente. Durante esta fase, foram necessárias duas pessoas na operação do equipamento. Uma delas se responsabilizava pela operação do sistema de aplicação de força cisalhante bem como de sua leitura registrada no manômetro, conforme pode ser visto na Figura 4.25. A outra pessoa tinha a função de manter a tensão normal constante, além de registrar o tempo a cada 5 mm de deslocamento. A velocidade média do ensaio foi de 2 mm/min.

Concluída esta fase, o sistema hidráulico do caminhão era desativado e o dispositivo para aplicação da tensão normal era guardado. Em seguida, retirava-se a amostra de resíduos pela extremidade superior da caixa com auxílio de pá e enxada, e então, fazia-se a limpeza do equipamento (Figuras 4.27 e 4.28).

Outro aspecto a ser destacado refere-se à medição do atrito entre os roletes e a sua superfície de deslizamento. Embora estes componentes tenham sido lubrificados, foram realizados os registros das tensões cisalhantes suficientes para iniciar o deslocamento da caixa vazia em cada nível de tensão normal definido anteriormente. As Figuras 4.29 e 4.30 apresentam o procedimento mencionado.



Figuras 4.25 e 4.26 – Fase de cisalhamento



Figuras 4.27 e 4.28 – Limpeza do equipamento



Figuras 4.29 e 4.30 – Medição do atrito dos roletes

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os gráficos da fase de cisalhamento com suas respectivas análises separadamente e então, serão apresentados os gráficos que representam as comparações entre os ensaios, seguidos de seus devidos comentários. Os gráficos relativos à fase de adensamento são apresentados no Anexo.

5.1 Fase de Cisalhamento

Antes de iniciar as análises dos resultados de cada ensaio, sentiu-se a necessidade de esclarecer que não será apresentada nenhuma comparação entre os resultados obtidos nesta pesquisa e aqueles registrados na literatura especializada em termos de valores de parâmetros de resistência. Tal fato se justifica em função de ter sido concluído que tal comparação torna-se impossibilitada, uma vez que os ensaios foram realizados com diferentes metodologias, bem como variadas composições de resíduos. Portanto, as comparações apresentadas referem-se ao comportamento de resistência do RSU, ou seja, elas são qualitativas e não quantitativas.

5.1.1 Ensaio 1

As curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal estão apresentadas na Figura 5.1.

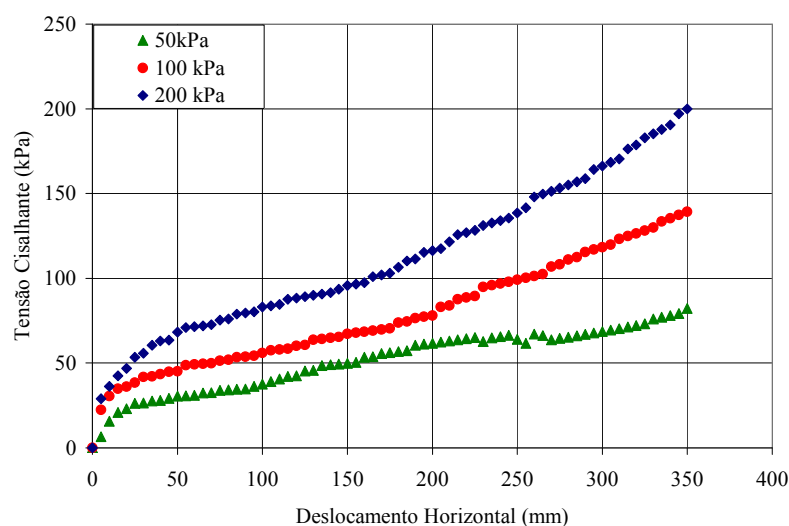


Figura 5.1 – Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Ensaio 1)

As curvas apresentadas na Figura 5.1 demonstram que houve um ganho contínuo de resistência do material com o aumento dos deslocamentos horizontais e nenhuma delas apresentou pico de resistência. Este aspecto, conforme já mencionado anteriormente, é característico de resíduos que possuem em sua composição materiais fibrosos tais como para este caso específico, papelão, plásticos, tecidos e podas. Mesmo para o nível de tensão mais baixo, onde a ancoragem dos materiais fibrosos é baixa, no deslocamento horizontal máximo (50%), não foi possível perceber a ruptura da amostra. Tem-se a impressão que os valores de resistência ao cisalhamento tenderiam a aumentar para as três curvas. Certamente, os materiais fibrosos presentes nas amostras não foram totalmente mobilizados. Sendo assim, percebe-se que para atingir a ruptura destes materiais, seria necessário realizar o ensaio de resistência à tração conforme citado por Kolsch (1993 e 1995).

Diante do exposto, a envoltória de ruptura será apresentada em função de diferentes níveis de deslocamento horizontal, pois até para o deslocamento máximo, não houve ruptura para nenhuma das amostras. Ressalta-se que as envoltórias de ruptura foram geradas, considerando a validade do critério de Mohr-Coulomb, assim como às dos demais ensaios a serem apresentados. A Figura 5.2 apresenta as envoltórias de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal e a Tabela 5.1 apresenta os valores de resistência ao cisalhamento em função da tensão normal e dos deslocamentos horizontais.

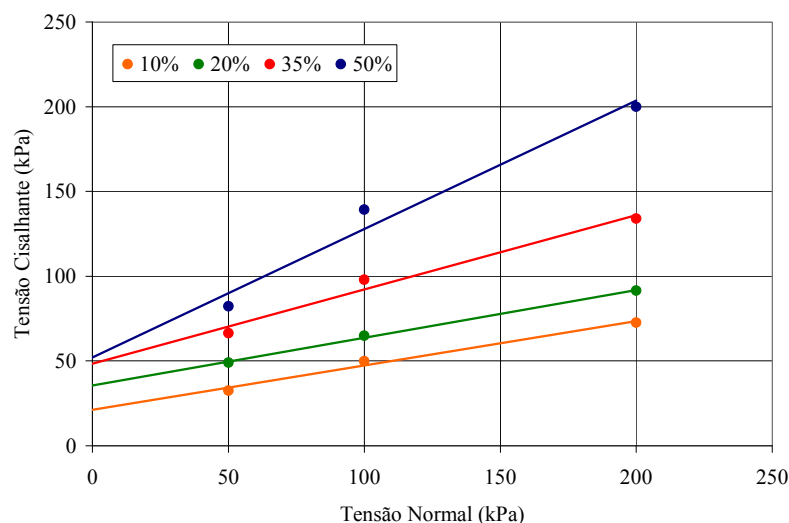


Figura 5.2 – Envoltórias de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 1)

Tabela 5.1 – Valores de tensão cisalhante em função de diferentes níveis de tensão normal e deslocamento horizontal (Ensaio 1)

Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante para diferentes níveis de deslocamento (kPa)			
	10%	20%	35%	50%
50	32,6	48,9	66,4	82,3
100	49,9	64,8	98,0	139,3
200	72,6	91,6	134,0	199,9

Com relação aos parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo), eles são apresentados na Tabela 5.2 como forma de avaliar a natureza da resistência dos resíduos (se atrito ou coesão) ao longo do deslocamento horizontal.

Tabela 5.2 – Valores do ângulo de atrito e coesão em função dos diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 1)

Parâmetros de Resistência	Deslocamento Horizontal (%)			
	10	20	35	50
ϕ'	14,6	15,7	23,7	37,2
c'	21,2	35,6	48,4	52,0
R2	0,99	0,99	0,98	0,97

A Figura 5.3 permite uma melhor visualização da variação dos parâmetros de resistência com o deslocamento horizontal.

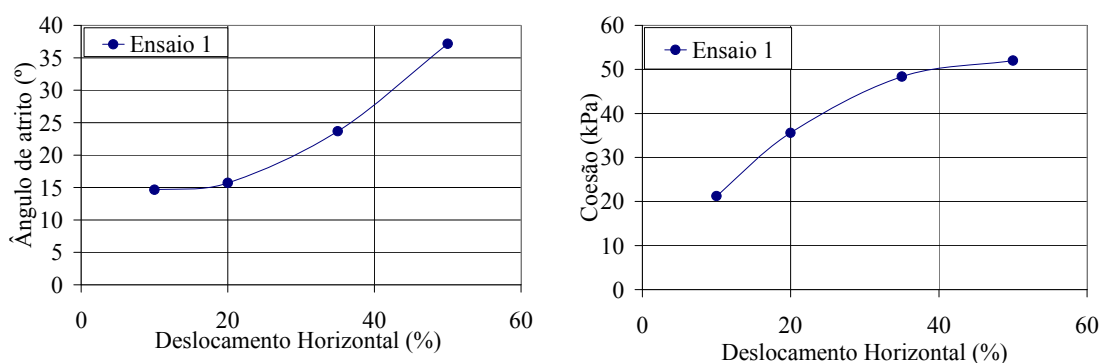


Figura 5.3 – Variação do ângulo de atrito e intercepto coesivo para diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 1)

De acordo com a Figura 5.3, nota-se um aumento do ângulo de atrito ao longo do deslocamento horizontal, sendo que a partir de 20% de deslocamento, este aumento é mais proeminente. Já o intercepto coesivo, a partir de 10% de deslocamento, percebe-se um significativo aumento em seus valores e em torno de 50%, há uma tendência de estabilização

destes valores. Entretanto, segundo Konig e Jessberger (1997), a partir de 20% de deslocamento, quase todo o atrito estaria mobilizado e o intercepto coesivo estaria começando a ser ativado, contradizendo os resultados da Figura 5.3. Porém, de acordo com os resultados obtidos por Fucale (2005) com amostras de RSU denominadas de “Matriz composta reforçada”, constatou-se que para o deslocamento máximo (no caso 20%), o ângulo de atrito apresentava uma tendência de aumento caso o deslocamento fosse superior a 20%. E, a coesão, a partir de 10% de deslocamento, começou a diminuir, contradizendo as conclusões de Konig e Jessberger (1997) e a do presente trabalho. Portanto, conclui-se que padronizar o comportamento mecânico do RSU é um pouco falho, pois cada pesquisa é feita de uma determinada forma. A composição das amostras bem como as condições de umidade, tipo de ensaio e equipamento empregado, e os procedimentos operacionais utilizados para cada pesquisador não são os mesmos. Até o presente momento, não existe um ensaio padronizado para medir a resistência do RSU. Sendo assim, qualquer comparação que se faça, torna-se difícil. Como já colocado, neste capítulo, em relação a valores de parâmetros de resistência, não será apresentado nenhum comparativo em relação a outras pesquisas realizadas dentro deste assunto.

Baseando-se na Tabela 5.2, por meio das regressões realizadas para obtenção das envoltórias de ruptura, conclui-se que os resultados apresentados foram bons. Percebe-se pela Figura 5.1, que existe uma coerência de valores de tensão cisalhante entre as três curvas apresentadas, com exceção do deslocamento horizontal de 50%, onde a curva referente à tensão normal de 50 kPa não demonstra uma coerência com a curva referente à tensão normal de 100 kPa.

Analisando sob o ponto de vista dos coeficientes de correlação obtidos, observa-se que a envoltória de Mohr-Coulomb mostrou-se adequada. No entanto, para níveis de deslocamento maiores (35 e 50%) verifica-se, na Figura 5.2, uma tendência a um critério bi-linear, tal como previsto por Kolsch (1993 e 1995). No entanto, a aplicação desse modelo não foi realizada devido ao número reduzido de ensaios. Os resultados sugerem, no caso específico da coesão, que parte dela deveu-se à mobilização parcial das fibras à tração.

5.1.2 Ensaio 2

As curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal estão apresentadas na Figura 5.4.

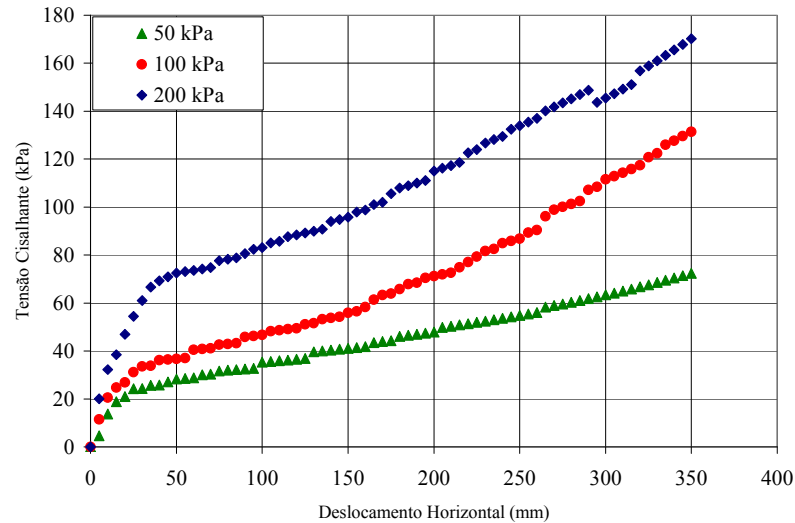


Figura 5.4 – Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Ensaio 2)

As curvas apresentadas na Figura 5.4 apresentam o mesmo comportamento das curvas da Figura 5.1, ou seja, ganho contínuo de resistência do material com o aumento dos deslocamentos horizontais e ausência de pico de resistência. Da mesma forma ocorrida no ensaio 1, tem-se a impressão que os valores de resistência ao cisalhamento tenderiam a aumentar para as três curvas.

A Figura 5.5 apresenta as envoltórias de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal e a Tabela 5.3 apresenta os valores de resistência ao cisalhamento em função da tensão normal e dos deslocamentos horizontais.

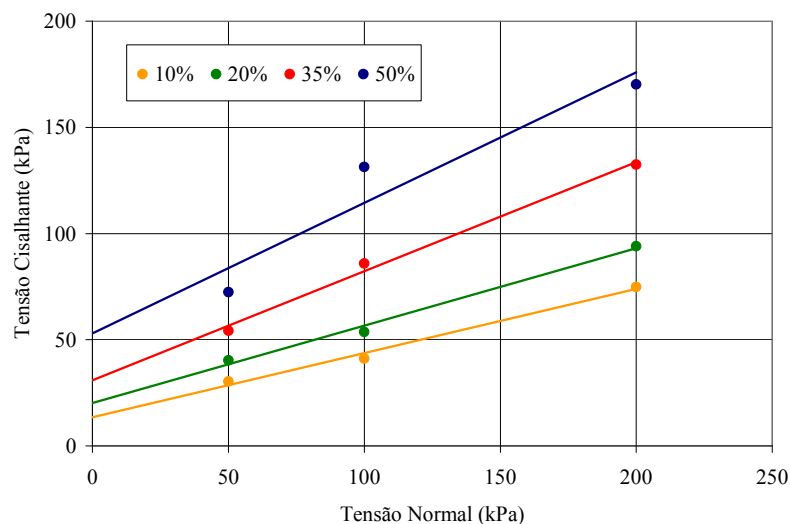


Figura 5.5 – Envoltórias de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 2)

Tabela 5.3 – Valores de tensão cisalhante em função de diferentes níveis de tensão normal e deslocamento horizontal (Ensaio 2)

Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante para diferentes níveis de deslocamento (kPa)			
	10%	20%	35%	50%
50	30,4	40,3	54,2	72,4
100	41,1	53,7	85,9	131,4
200	74,8	94,0	132,5	170,2

Os parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo) estão apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores do ângulo de atrito e coesão em função dos diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 2)

Parâmetros de Resistência	Deslocamento Horizontal (%)			
	10	20	35	50
ϕ' (°)	16,8	20,0	27,2	31,6
c' (kPa)	13,5	20,2	30,9	53,0
R^2	0,99	0,99	0,99	0,91

A Figura 5.6 permite uma melhor visualização da variação dos parâmetros de resistência com o deslocamento horizontal.

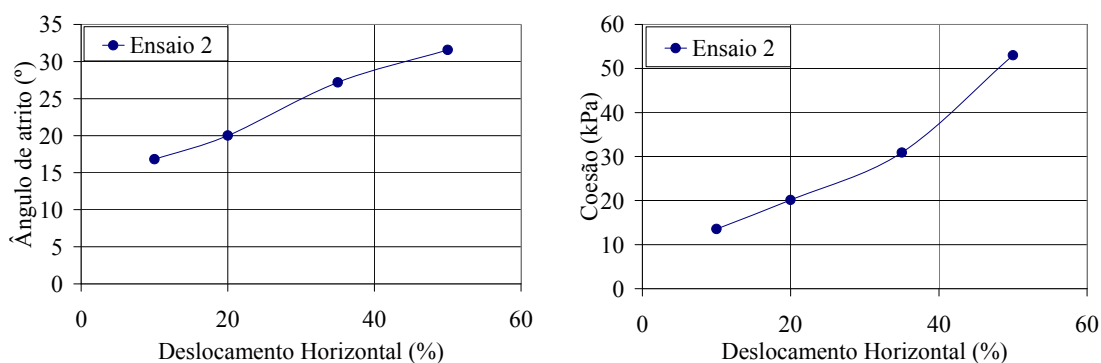


Figura 5.6 – Variação do ângulo de atrito e intercepto coesivo para diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 2)

De acordo com a Figura 5.6, nota-se um aumento do ângulo de atrito ao longo do deslocamento horizontal, sendo que a partir de 20% de deslocamento, este aumento é mais evidente, e para o deslocamento de 50%, tem-se a impressão de uma tendência de estabilização. Conforme comentado para o ensaio 1, esta tendência deveria ocorrer em torno

de 20% de deslocamento, segundo König e Jessberger (1997). Mas, como comentado anteriormente, esta padronização do comportamento mecânico do RSU é algo falho. Já o intercepto coesivo, a partir de 20% de deslocamento, percebe-se um significativo aumento em seus valores sem haver uma tendência de estabilização, mesmo acima de 50% de deslocamento, confirmando o comportamento de resíduos contendo materiais fibrosos, apresentado por König e Jessberger (1997).

Baseando-se na Tabela 5.4, através das regressões realizadas para obtenção das envoltórias de ruptura, conclui-se que a maioria dos resultados apresentados foram bons. Percebe-se pela Figura 5.4, que existe uma coerência de valores de tensão cisalhante entre as três curvas apresentadas, com exceção do deslocamento horizontal de 50%, onde a curva referente à tensão normal de 50 kPa não demonstra uma coerência com a curva referente à tensão normal de 100 kPa.

Analisando pelo ponto de vista dos coeficientes de correlação obtidos, observa-se que a envoltório de Mohr-Coulomb mostrou-se adequada. No entanto, para níveis de deslocamento maiores (35 e 50%) verifica-se, na Figura 5.5, uma tendência a um critério bi-linear, tal como previsto por Kolsch (1993 e 1995). No entanto, a aplicação desse modelo não foi realizada devido ao número reduzido de ensaios. Os resultados sugerem, no caso específico da coesão, que parte dela deveu-se à mobilização parcial das fibras à tração.

5.1.3 Ensaio 3

As curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal estão apresentadas na Figura 5.7.

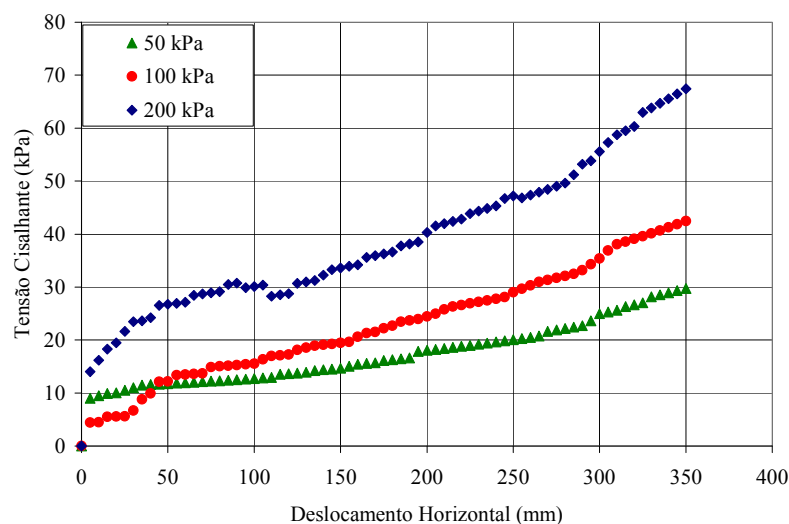


Figura 5.7 – Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Ensaio 3)

Da mesma forma ocorrida para os ensaios 1 e 2, as curvas apresentadas na Figura 5.7 mostram um ganho contínuo de resistência do material com o aumento dos deslocamentos horizontais e ausência de pico de resistência. É possível identificar também que os valores de resistência ao cisalhamento tenderiam a aumentar para as três curvas. Embora a composição das amostras destes ensaios não devesse apresentar materiais plásticos, papelão, tecidos e podas, isto não quer dizer que ela não possuísse materiais fibrosos, porém a porcentagem é bem menor em relação à composição das amostras dos ensaios 1, 2 e 5.

Fucale (2005) ao realizar ensaios de cisalhamento direto de média escala (300 x 300 x 150 mm) com amostras de composição denominada “Matriz básica” (percentual em peso de material fibroso inferior a 2%), objetivando medir e analisar apenas as propriedades de atrito do material, sem o efeito das fibras, constatou um pouco do efeito de reforço para a amostra ensaiada na tensão de 50 kPa. Portanto, o fato das curvas apresentadas na Figura 5.7 não apresentarem pico de resistência está justificado. Entretanto, ressalta-se que era esperada a presença de pico de ruptura nas amostras, pois o percentual de materiais fibrosos era baixo.

A Figura 5.8 apresenta as envoltórias de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal e a Tabela 5.5 apresenta os valores de resistência ao cisalhamento em função da tensão normal e dos deslocamentos horizontais.

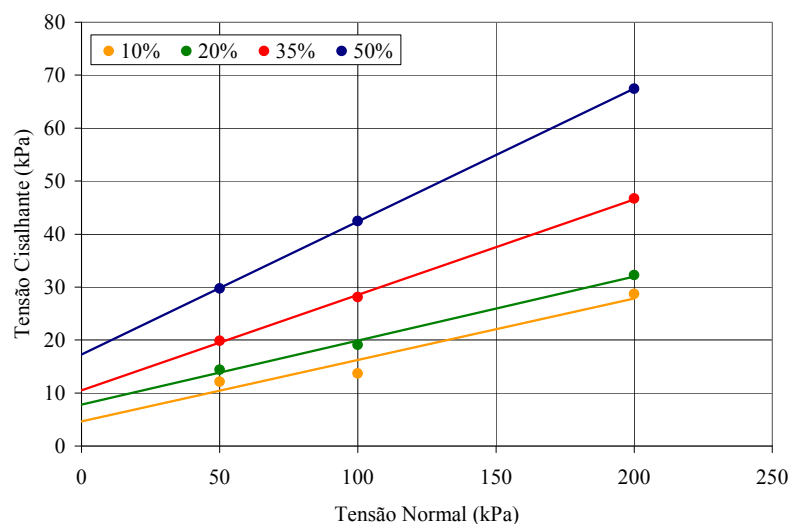


Figura 5.8 – Envoltórias de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 3)

Tabela 5.5 – Valores de tensão cisalhante em função de diferentes níveis de tensão normal e deslocamento horizontal (Ensaio 3)

Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante para diferentes níveis de deslocamento (kPa)			
	10%	20%	35%	50%
50	12,1	14,4	19,8	29,7
100	13,7	19,1	28,1	42,4
200	28,7	32,3	46,7	67,4

Os parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo) estão apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Valores do ângulo de atrito e coesão em função dos diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 3)

Parâmetros de Resistência	Deslocamento Horizontal (%)			
	10	20	35	50
ϕ' (°)	6,6	6,9	10,2	14,1
c' (kPa)	4,6	7,8	10,5	17,2
R^2	0,94	0,99	1	1

A Figura 5.9 permite uma melhor visualização da variação dos parâmetros de resistência com o deslocamento horizontal.

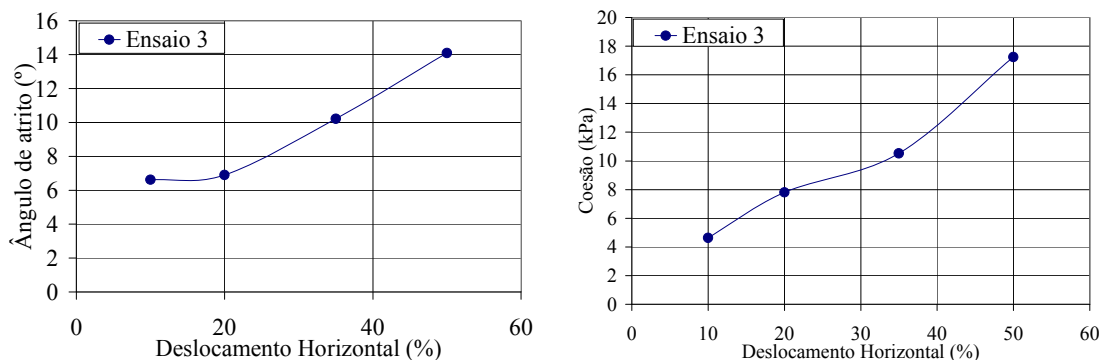


Figura 5.9 – Variação do ângulo de atrito e intercepto coesivo para diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 3)

De acordo com a Figura 5.9, nota-se um aumento do ângulo de atrito a partir de 20% de deslocamento e a coesão aumentando desde 10% de deslocamento, comprovando que, embora a composição do ensaio 3 tenha um percentual de material fibroso menor em relação aos ensaios 1, 2 e 5, isto não indica a ausência deste tipo de material em sua composição.

Baseando-se na Tabela 5.6, através das regressões realizadas para obtenção das envoltórias de ruptura, conclui-se que a maioria dos resultados apresentados foram bons. Percebe-se pela Figura 5.7, que existe uma coerência de valores de tensão cisalhante entre as três curvas apresentadas, com exceção do deslocamento horizontal de 10%, onde a curva referente à tensão normal de 50 kPa não demonstra uma coerência com a curva referente à tensão normal de 100 kPa.

5.1.4 Ensaio 4

As curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal estão apresentadas na Figura 5.10.

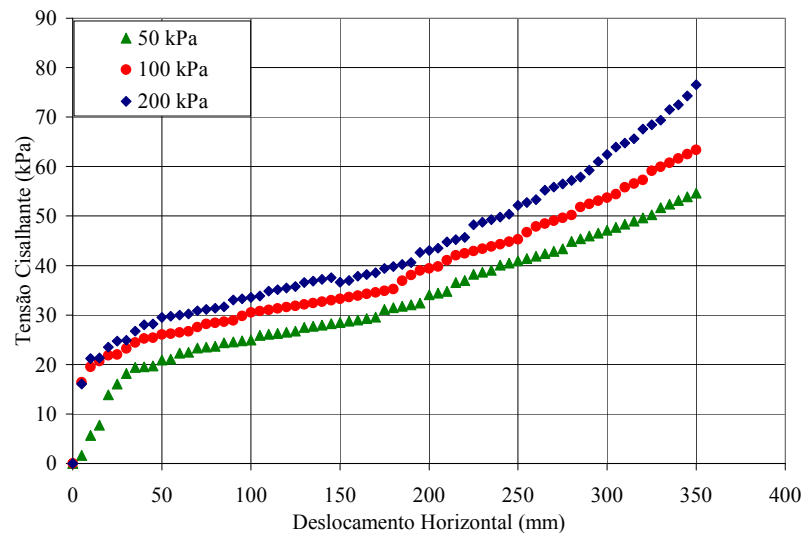


Figura 5.10 – Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Ensaio 4)

Nota-se, novamente, que as curvas apresentadas na Figura 5.10 mostram um ganho contínuo de resistência do material com o aumento dos deslocamentos horizontais e ausência de pico na sua resistência, comprovando-se, desta forma, a presença de materiais fibrosos em sua composição. Outro aspecto a ser considerado diz respeito à pequena diferença entre os valores de tensão cisalhante apresentados pelas curvas referentes às tensões normais de 100 e 200 kPa. Esta pequena diferença se deveu provavelmente a um maior teor de umidade da amostra submetida à tensão normal de 200 kPa em relação às demais amostras do ensaio 4. Embora, os teores de umidade calculados em laboratório para as três amostras do referido ensaio sejam semelhantes, visualmente, durante os ensaios, percebia-se que a amostra ensaiada com tensão normal de 200 kPa estava mais úmida em relação às amostras submetidas aos outros níveis de tensões. Desta forma, conclui-se que o controle do teor de umidade é uma tarefa difícil de ser obtida, porém de grande importância, pois, diante dos ensaios realizados, percebeu-se que pequenas diferenças de teores de umidade são suficientes para alterar significativamente os valores de resistência.

A Figura 5.11 apresenta as envoltórias de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal e a Tabela 5.7 apresenta os valores de resistência ao cisalhamento em função da tensão normal e dos deslocamentos horizontais.

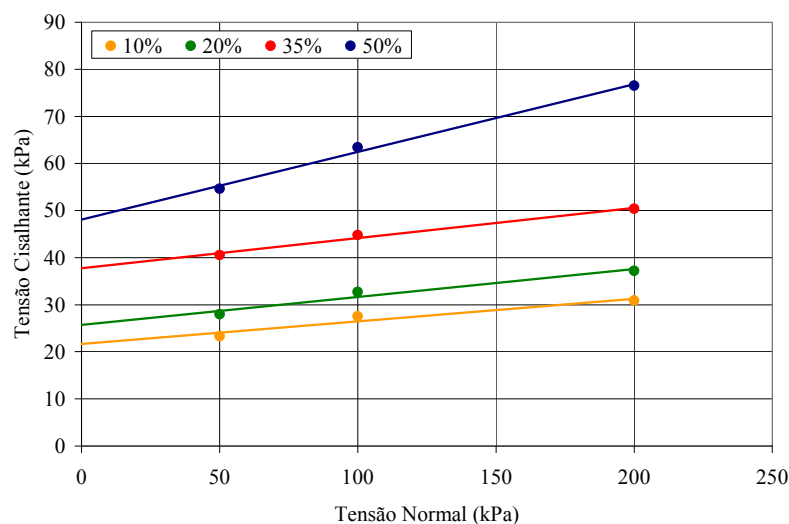


Figura 5.11 – Envoltórias de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 4)

Tabela 5.7 – Valores de tensão cisalhante em função de diferentes níveis de tensão normal e deslocamento horizontal (Ensaio 4)

Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante para diferentes níveis de deslocamento (kPa)			
	10%	20%	35%	50%
50	23,3	28,0	40,5	54,6
100	27,5	32,7	44,8	63,4
200	30,9	37,2	50,4	76,5

Os parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo) estão apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Valores do ângulo de atrito e coesão em função dos diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 4)

Parâmetros de Resistência	Deslocamento Horizontal (%)			
	10	20	35	50
ϕ' (°)	2,7	3,4	3,7	8,2
C' (kPa)	21,7	25,7	37,7	48,1
R^2	0,94	0,96	0,99	0,99

A Figura 5.12 permite uma melhor visualização da variação dos parâmetros de resistência com o deslocamento horizontal.

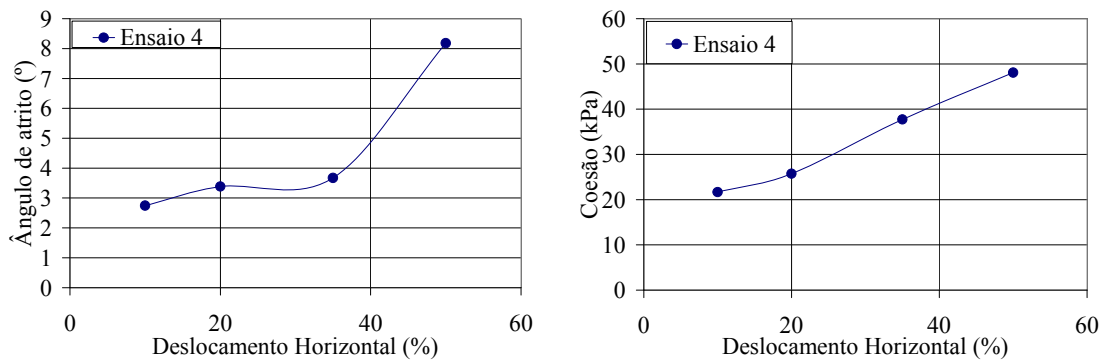


Figura 5.12 – Variação do ângulo de atrito e intercepto coesivo para diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 4)

Na Figura 5.12, notam-se aumentos significativos do ângulo de atrito a partir de 35% de deslocamento e da coesão a partir de 20% de deslocamento, comprovando mais uma vez que, embora a composição das amostras do ensaio 4 não devesse apresentar materiais fibrosos, isto não indica a ausência deste tipo de material nelas.

5.1.5 Ensaio 5

As curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal estão apresentadas na Figura 5.13.

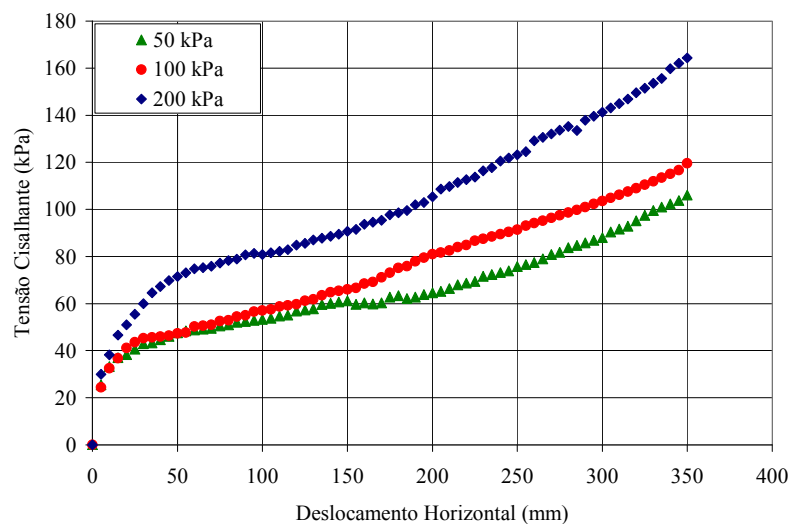


Figura 5.13 – Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Ensaio 5)

Em função do alto percentual de materiais fibrosos nas amostras deste ensaio, as curvas da Figura 5.13 apresentaram, conforme a literatura, um ganho contínuo de resistência do material com o aumento dos deslocamentos horizontais e ausência de pico de resistência. Assim como ocorrido nos ensaios anteriores, tem-se a impressão que os valores de resistência ao

cisalhamento tenderiam a aumentar para as três curvas. De forma semelhante ao ensaio 4, nota-se uma incoerência nos valores de tensão cisalhante entre as curvas referentes às tensões normais de 50 kPa e 100 kPa para uma faixa de deslocamento de 0 a 20%, aproximadamente. A partir deste valor, constata-se uma coerência de valores entre as duas curvas. Esta incoerência pode ter ocorrido em função de uma pequena diferença na composição das amostras referentes às duas tensões normais em questão. Mesmo que tenha existido um controle na montagem das amostras, é muito difícil montar amostras idênticas, sempre existirá alguma diferença.

A Figura 5.14 apresenta as envoltórias de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal e a Tabela 5.9 apresenta os valores de resistência ao cisalhamento em função da tensão normal e dos deslocamentos horizontais.

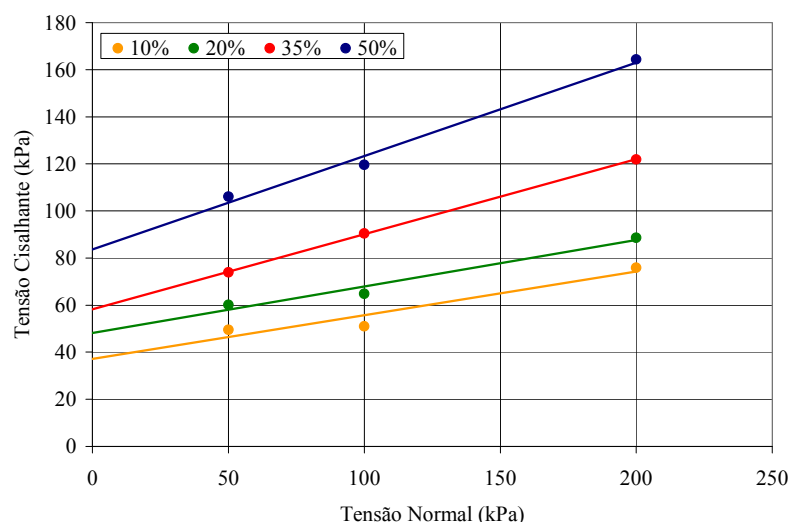


Figura 5.14 – Envoltórias de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 5)

Tabela 5.9 – Valores de tensão cisalhante em função de diferentes níveis de tensão normal e deslocamento horizontal (Ensaio 5)

Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante para diferentes níveis de deslocamento (kPa)			
	10%	20%	35%	50%
50	49,6	60,1	74,0	106,0
100	51,0	64,8	90,4	119,5
200	75,9	88,6	121,8	164,3

Os parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo) estão apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Valores do ângulo de atrito e coesão em função dos diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 5)

Parâmetros de Resistência	Deslocamento Horizontal (%)			
	10	20	35	50
ϕ' (°)	10,5	11,1	17,7	21,6
c' (kPa)	37,1	48,2	58,3	83,7
R^2	0,92	0,97	1	0,99

A Figura 5.15 permite uma melhor visualização da variação dos parâmetros de resistência com o deslocamento horizontal.

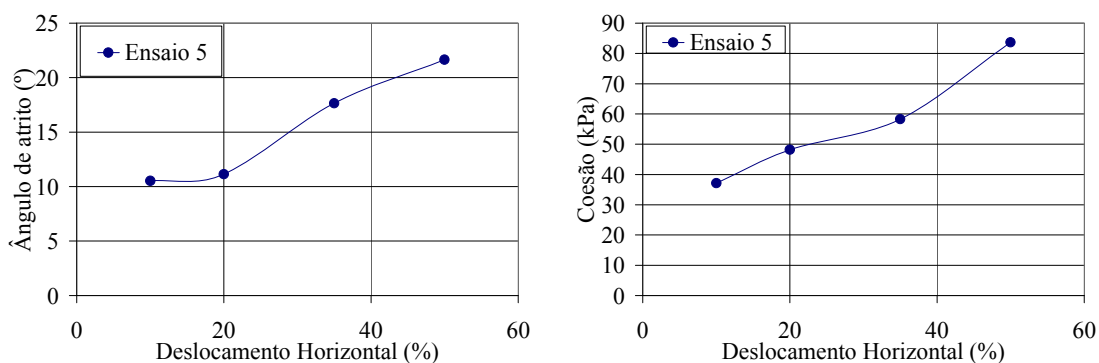


Figura 5.15 – Variação do ângulo de atrito e intercepto coesivo para diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 5)

Através da Figura 5.15, nota-se aumentos significativos do ângulo de atrito a partir de 20% de deslocamento e da coesão a partir de 10% de deslocamento.

Baseando-se na Tabela 5.10, através das regressões realizadas para obtenção das envoltórias de ruptura, conclui-se que os resultados apresentados foram bons.

5.1.6 Ensaio 6

As curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal estão apresentadas na Figura 5.16.

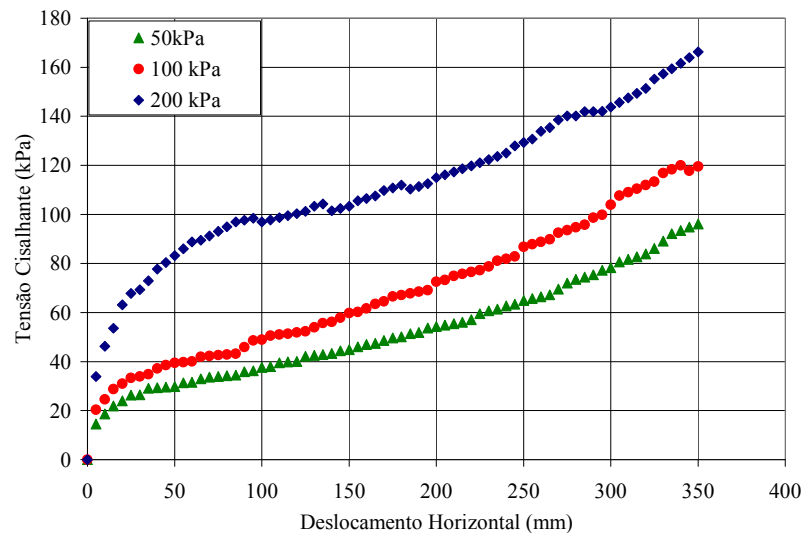


Figura 5.16 – Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Ensaio 6)

Da mesma forma que os demais ensaios, as curvas apresentadas na Figura 5.16 mostram que houve um ganho contínuo de resistência do material com o aumento dos deslocamentos horizontais sem a presença de pico de resistência, dando uma impressão também que os valores de resistência ao cisalhamento tenderiam a aumentar para as três curvas. Embora a composição das amostras deste ensaio fosse formada de composto orgânico (resíduo tratado mecânica e biologicamente), solo e entulho de construção civil, havia também a presença de materiais fibrosos, fato que impediu a ruptura das amostras. Os referidos materiais fibrosos estavam presentes no composto orgânico, pois 40% de sua composição era constituída de podas. Embora as podas tivessem suas dimensões reduzidas através de um processo de trituração, foi percebida uma considerável quantidade de podas com comprimentos superiores a 10 cm. De qualquer forma, assim como nos ensaios 3 e 4, era esperado que estas amostras apresentassem pico de resistência.

A Figura 5.17 apresenta as envoltórias de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal e a Tabela 5.11 apresenta os valores de resistência ao cisalhamento em função da tensão normal e dos deslocamentos horizontais.

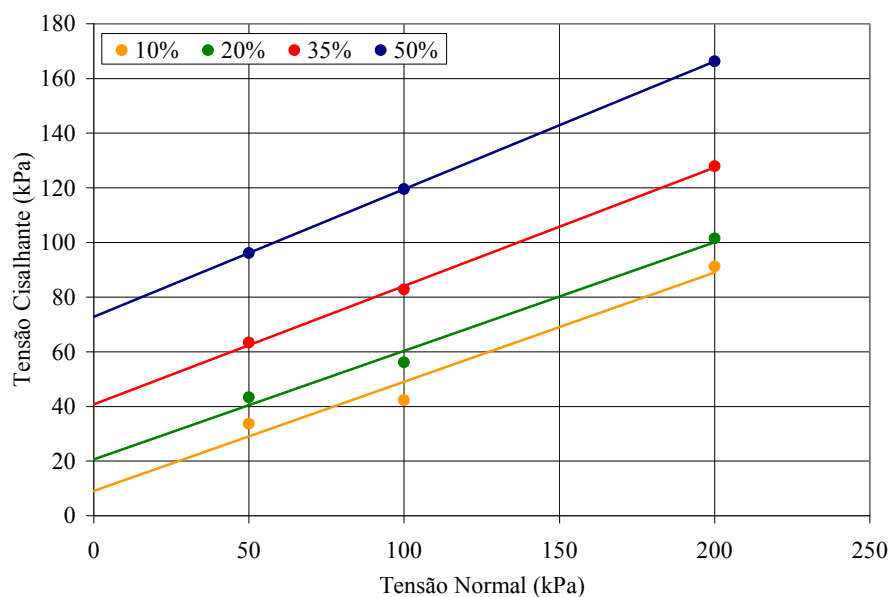


Figura 5.17 – Envoltórias de ruptura para diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 6)

Tabela 5.11 – Valores de tensão cisalhante em função de diferentes níveis de tensão normal e deslocamento horizontal (Ensaio 6)

Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante para diferentes níveis de deslocamento (kPa)			
	10%	20%	35%	50%
50	33,7	43,3	63,3	96,2
100	42,2	56,2	82,8	119,5
200	91,3	101,4	127,9	166,3

Os parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo) estão apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Valores do ângulo de atrito e coesão em função dos diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 6)

Parâmetros de Resistência	Deslocamento Horizontal (%)			
	10	20	35	50
ϕ' (°)	21,8	21,7	23,4	25,1
c' (kPa)	9,1	20,7	40,8	72,8
R^2	0,96	0,99	0,99	1

A Figura 5.18 permite uma melhor visualização da variação dos parâmetros de resistência com o deslocamento horizontal.

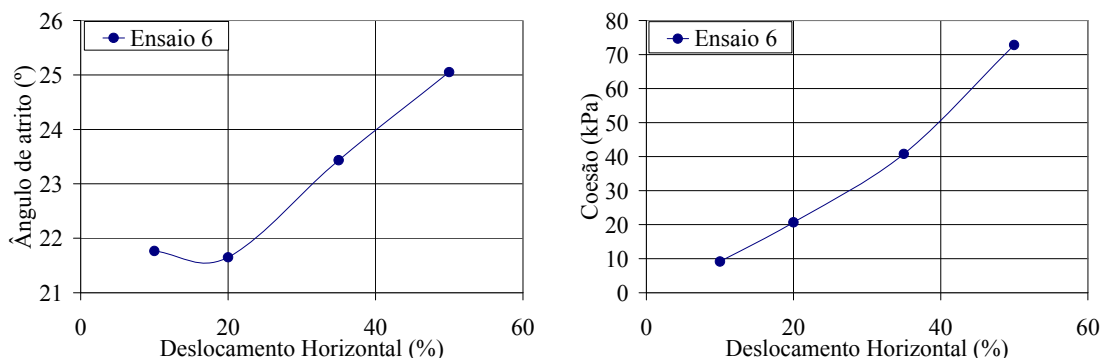


Figura 5.18 – Variação do ângulo de atrito e intercepto coesivo para diferentes níveis de deslocamento horizontal (Ensaio 6)

Através da Figura 5.18, nota-se aumentos do ângulo de atrito a partir de 20% de deslocamento e da coesão a partir de 10% de deslocamento.

Baseando-se na Tabela 5.12, através das regressões realizadas para obtenção das envoltórias de ruptura, conclui-se que os resultados apresentados foram bons.

5.2 Comparação Entre os Ensaios

Neste item, serão apresentadas comparações entre os ensaios realizados. A Tabela 5.13 sumariza as comparações entre resultados bem como seus objetivos.

Tabela 5.13 – Comparação entre ensaios

Ensaios	Objetivos
1 e 2	Avaliar a influência do peso específico na resistência dos resíduos
2 e 5	Avaliar o efeito da idade na resistência dos resíduos
3 e 4	Avaliar o efeito da umidade na resistência dos resíduos
5 e 6	Avaliar o efeito das fibras nos resíduos de idade “Velha”
1 e 3	Avaliar o efeito das fibras nos resíduos de idade “Fresca”

As Figuras 5.19 a 5.23 apresentam todos os comparativos entre os ensaios.

5.2.1 Ensaios 1 e 2: influência do peso específico inicial

Conforme apresentado na Figura 5.19, é possível identificar uma pequena diferença entre os valores de resistência ao cisalhamento para os dois valores de peso específico inicial. Conforme citado por diversos autores, assim como em solos, a resistência ao cisalhamento do

RSU aumenta com o aumento do peso específico inicial. Seguindo esta tendência, as composições com maior peso específico apresentaram maiores resistências ao cisalhamento, embora no nível de tensão normal de 200 kPa, os comportamentos foram, em sua maior parte, semelhantes. Somente a partir de deslocamentos superiores a 250 mm, podem ser observados valores maiores de tensão cisalhante para amostra de peso específico de 10 kN/m³.

Cabe dizer que apesar de ter sido adotado um mesmo procedimento para a montagem das amostras, isto não implica que elas sejam idênticas, pois cada fração constituinte da composição “BH” é muito heterogênea, podendo variar de amostra para amostra. Este aspecto pode ter sido responsável pela pequena diferença nas resistências das amostras realizadas com tensão normal de 200 kPa.

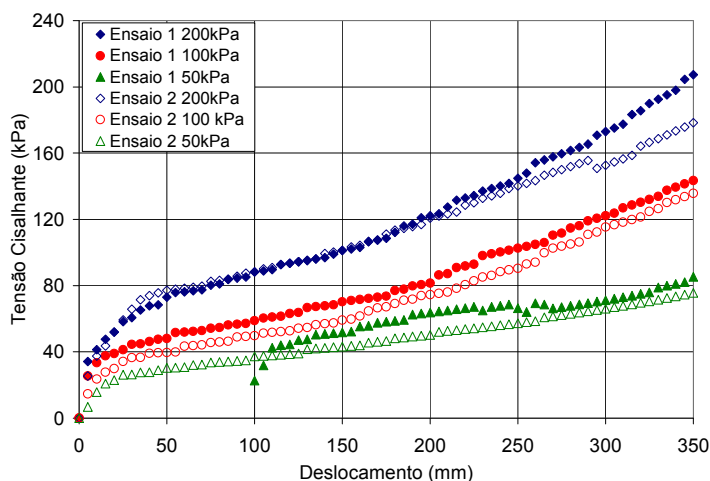


Figura 5.19 – Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Ensaios 1 e 2)

5.2.2 Ensaio 2 e 5: influência da idade

Conforme a Figura 5.20, com exceção das curvas referentes à tensão de 50 kPa, percebe-se pouca variação nos valores de tensão cisalhante. Entretanto, é importante ressaltar que as seis curvas apresentadas representam resíduos que se encontram no seu estado natural de umidade. Em função de ter sido utilizado o composto orgânico para o ensaio 5 em substituição à matéria orgânica putrescível (ensaio 2), foram observados teores de umidade mais baixos no ensaio 5. Portanto, tal fato sugere que as amostras do ensaio 2 teriam resistências maiores em relação às amostras do ensaio 5, caso as umidades para ambos os ensaios fossem as mesmas. Confirmando esta tendência, Fucale (2005) ao realizar ensaios de cisalhamento direto com a matriz básica de RSU, constatou que as amostras cuja umidade encontrava-se no ramo úmido

da curva de compactação apresentaram resistência ao cisalhamento inferior às amostras cuja umidade se encontrava na umidade ótima.

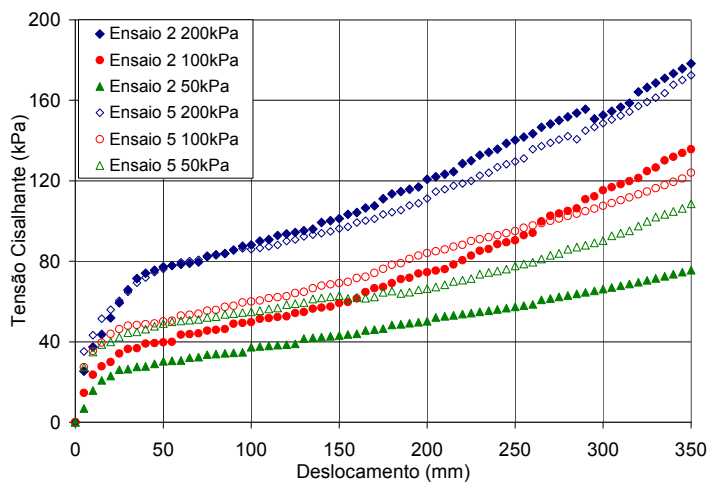


Figura 5.20 – Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Ensaios 2 e 5)

5.2.3 Ensaios 3 e 4: influência da umidade em resíduos sem materiais fibrosos de grandes dimensões

Conforme pode ser observado na Figura 5.21, ficou clara a influência da umidade nos valores de tensão cisalhante. As amostras do ensaio 3, cujos teores de umidade situaram-se numa faixa de 66% a 72%, apresentaram valores de resistência menores em relação às amostras do ensaio 4, cujos teores de umidade encontravam-se na faixa de 57% a 59%. Somente nas amostras cujos ensaios foram executados com tensão normal de 200 kPa, a diferença nos valores de tensão cisalhante foi menor. Esta pequena diferença se deveu provavelmente a um maior teor de umidade da amostra do ensaio 4 em relação à faixa mencionada. Embora, o teor de umidade calculado em laboratório ter situado na referida faixa, visualmente percebia-se que o resíduo estava mais úmido em relação aos outros níveis de tensão.

Desta forma, conclui-se que o controle do teor de umidade é uma tarefa difícil de ser obtida, porém de grande importância, pois através dos ensaios, percebeu-se que pequenas diferenças de teor de umidade são suficientes para alterar significativamente os valores de resistência.

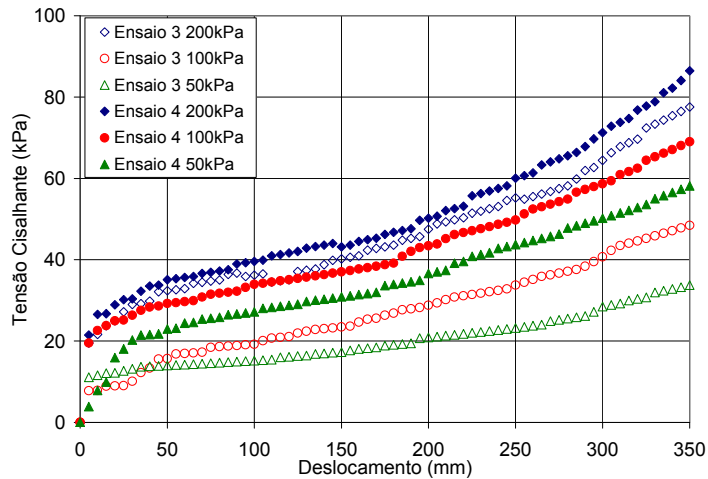


Figura 5.21 – Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Ensaios 3 e 4)

5.2.4 Ensaios 5 e 6: influência da presença de materiais fibrosos de grandes dimensões em resíduos velhos

De uma maneira geral, conforme a Figura 5.22, percebe-se uma pequena diferença entre as curvas dos ensaios 5 e 6, não possibilitando, desta forma, constatar o efeito de reforço dos materiais fibrosos presentes nas amostras do ensaio 5. Tal fato pode ser explicado em função dos teores de umidade dos referidos ensaios. As amostras do ensaio 6 apresentaram teores de umidade entre 25% e 29%, enquanto que para as amostras do ensaio 5, estes valores situaram entre 49% e 67%. Diante do exposto, conclui-se que, caso as amostras de ambos os ensaios apresentassem teores de umidade semelhantes, as amostras do ensaio 5 apresentariam valores de resistência superiores às do ensaio 6, seguindo assim, uma coerência com a literatura. Ressalta-se que para confirmar o efeito de reforço dos materiais fibrosos, no próximo item, serão apresentados os gráficos que descrevem a variação dos parâmetros de resistência com o deslocamento horizontal.

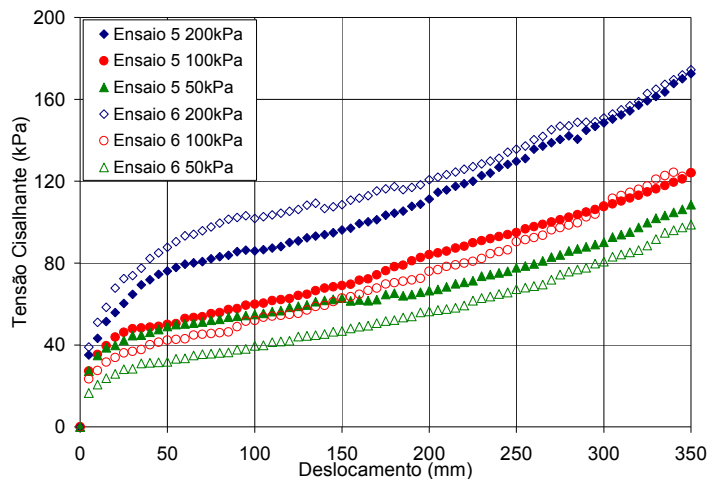


Figura 5.22 – Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Ensaios 5 e 6)

5.2.5 Ensaios 1 e 3: influência da presença de materiais fibrosos de grandes dimensões em resíduos frescos

As curvas apresentadas na Figura 5.23 permitem concluir que as grandes diferenças nos valores de tensão cisalhante entre os ensaios devem-se principalmente à presença dos materiais fibrosos nas amostras do ensaio 1, mas também a um menor teor de umidade encontrado para este ensaio. Em função de ter sido empregada a mesma composição e a mesma metodologia de moldagem de corpo de prova e de amostragem para determinação de teor de umidade às amostras dos ensaios 1 e 2, conclui-se que as amostras do ensaio 1 possuíam teores de umidade similares as das amostras do ensaio 2. Ressalta-se que o único teor de umidade medido para uma das amostras do ensaio 1 (68,64%) situou-se na faixa de teor de umidade apresentada às amostras do ensaio 2 (65,68% a 70,15%). Diante do exposto, apesar dos teores de umidade das amostras do ensaio 1 poderem ser considerados próximos aos das amostras do ensaio 3 (66% a 72%), visualmente era fácil perceber que as amostras deste ensaio possuíam teor de umidade um pouco maior, resultando em menores valores de tensão cisalhante. Entretanto, em função da diferença apresentada nos valores de tensão cisalhante entre os ensaios 1 e 3 ser consideravelmente grande, conclui-se que essa foi devida à presença dos materiais fibrosos presentes nas amostras do ensaio 1. Assim sendo, o comportamento mecânico do RSU similar ao de solos reforçados, conforme citado na literatura (Kolsch, 1995; Manassero et. al., 1996; dentre outros), pode ser verificado na Figura 5.23, pois, para cada nível de tensão normal aplicado, as amostras do ensaio 1 (amostras com

presença de materiais fibrosos) apresentaram maiores valores de tensão cisalhante em relação às amostra do ensaio 3.

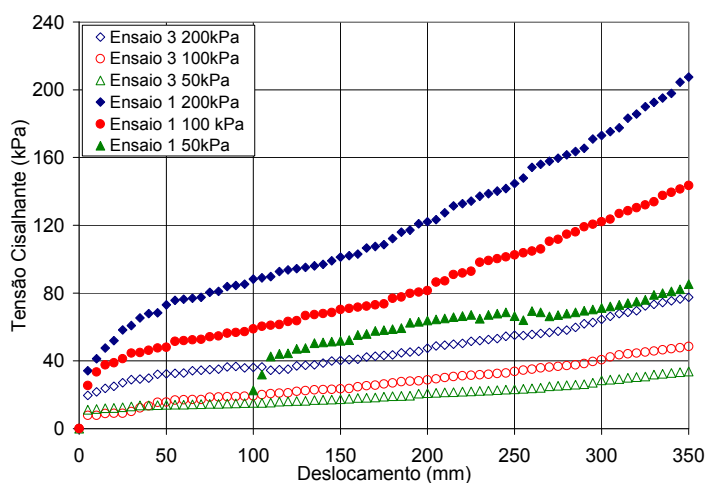


Figura 5.23 – Curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Ensaios 1 e 3)

5.3 Comparação dos parâmetros de resistência entre ensaios

5.3.1 Ensaios 1 e 2: influência do peso específico inicial

As Figuras 5.24 e 5.25 apresentam as comparações dos parâmetros de resistência entre os ensaios 1 e 2. Baseando-se nelas, somente a partir de 40% de deslocamento horizontal, o ângulo de atrito para o ensaio 1 torna-se maior em relação ao ensaio 2. Segundo Kolsch (1995), o aumento do peso específico resulta no aumento do ângulo de atrito. Para o caso em questão, devida à heterogeneidade do RSU, este padrão de comportamento pode não ocorrer. Em relação ao intercepto coesivo, somente com 50% de deslocamento, que os valores para ambos ensaios igualaram-se, ou seja, durante todo o deslocamento, o intercepto coesivo para o ensaio 1 apresentou-se maior em relação ao do ensaio 2. Entretanto, Kolsch (1995) afirma que o peso específico do RSU não interfere nos valores do intercepto coesivo. Sendo assim, esta diferença de valores para o referido parâmetro pode ser devido às diferenças das fibras utilizadas para cada ensaio. Como já comentado, mesmo tendo havido um controle na montagem das amostras, é muito difícil, utilizar materiais idênticos às amostras de cada ensaio.

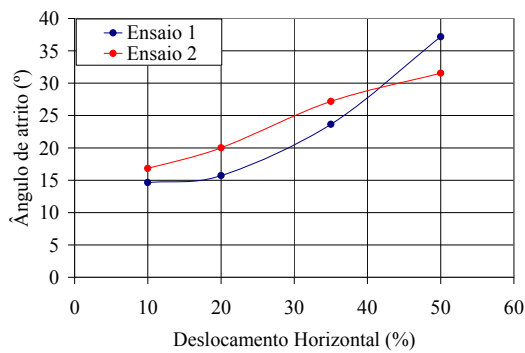


Figura 5.24 – Variação do ângulo de atrito para os ensaios 1 e 2

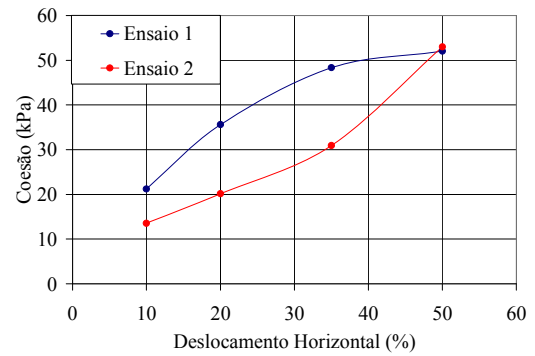


Figura 5.25 – Variação do intercepto coesivo para os ensaios 1 e 2

5.3.2 Ensaios 2 e 5: influência da idade

As Figuras 5.26 e 5.27 apresentam as comparações dos parâmetros de resistência entre os ensaios 2 e 5. Diante das figuras apresentadas, percebe-se que o ângulo de atrito para o ensaio 2 apresentou-se maior em relação ao do ensaio 5, ao longo de todo o deslocamento horizontal. Desta forma, nota-se uma certa incoerência nos resultados apresentados, pois as amostras de ambos ensaios apresentam o mesmo peso específico, entretanto o teor de umidade médio para o ensaio 2 foi de 68,20% contra 55,52% para o ensaio 5. Tal fato sugere que a composição das amostras do ensaio 2 conferiu-lhes maior resistência ao cisalhamento.

Com relação ao intercepto coesivo, para o ensaio 5, este parâmetro apresentou valores superiores ao do ensaio 2, ao longo de todo o deslocamento. Kolsch (1995) ao realizar ensaios de tração em amostras de lixo com diferentes umidades, constatou que a amostra com menor umidade apresentou maior resistência à tração. Segundo o autor, como um resultado do alto teor de umidade e conseqüentemente de uma maior poro-pressão, além da tensão normal nas fibras diminuir, um simples efeito de escorregamento entre as fibras pode surgir. Para o caso em questão, considerando que não há desenvolvimento de poro-pressão, o maior teor de umidade apresentado às amostras do ensaio 2 pode ter ocasionado um maior escorregamento entre suas fibras em relação às fibras presentes nas amostras do ensaio 5.

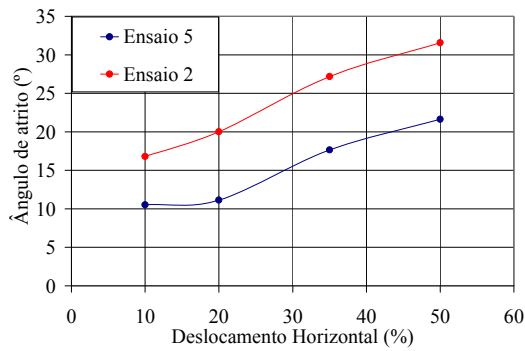


Figura 5.26 – Variação do ângulo de atrito para os ensaios 2 e 5

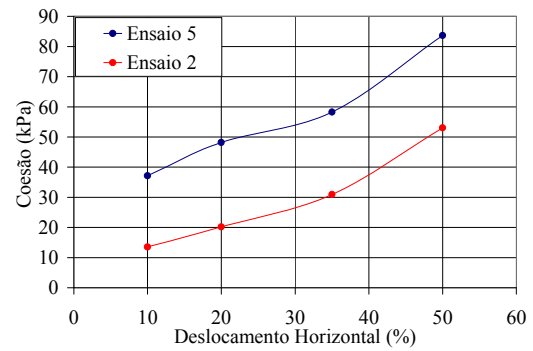


Figura 5.27 – Variação do intercepto coesivo para os ensaios 2 e 5

5.3.3 Ensaios 3 e 4: influência da umidade em resíduos sem materiais fibrosos de grandes dimensões

As Figuras 5.28 e 5.29 apresentam as comparações dos parâmetros de resistência entre os ensaios 3 e 4. Pelas figuras, percebe-se que o ângulo de atrito para o ensaio 3 apresentou-se maior em relação ao ensaio 4 durante todo o deslocamento horizontal. Considerando que ambas as amostras possuem o mesmo peso específico e teoricamente a mesma composição, o ensaio 4 deveria apresentar maiores valores de ângulo de atrito, pois o teor de umidade era menor. Ressalta-se que o teor de umidade médio do ensaio 4 é de 58,28% contra 68,82% para o ensaio 3.

Com relação ao intercepto coesivo, nota-se que o ensaio 4 apresentou valores superiores aos do ensaio 3 durante todo o deslocamento horizontal. Em função de um menor teor de umidade para o ensaio 4, o intercepto coesivo tende a ser maior, porém, esta grande diferença apresentada não se justifica. Os valores para o referido parâmetro situaram-se próximos aos apresentados pelo ensaio 1, sendo que a composição desse ensaio possuía um teor de fibras bem superior ao do ensaio 4. Sendo assim, provavelmente, a curva tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal referente à tensão normal de 200 kPa apresentada na Figura 5.39 não está coerente com as demais curvas, podendo ter sido a responsável pelos altos valores de coesão. Conforme já citado, Dixon e Jones (2005) afirmam que o intercepto coesivo pode denotar a real coesão entre as partículas, mas é frequentemente função da variação entre amostras, erros de medida ou uma indicação da resistência à tração.

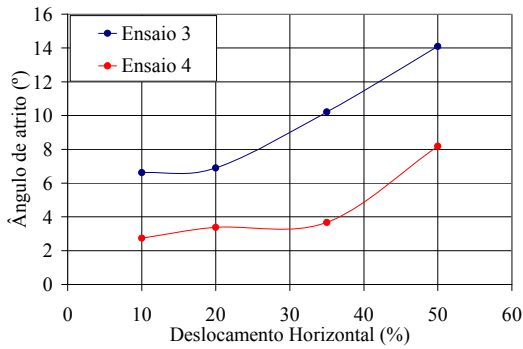


Figura 5.28 – Variação do ângulo de atrito para os ensaios 3 e 4

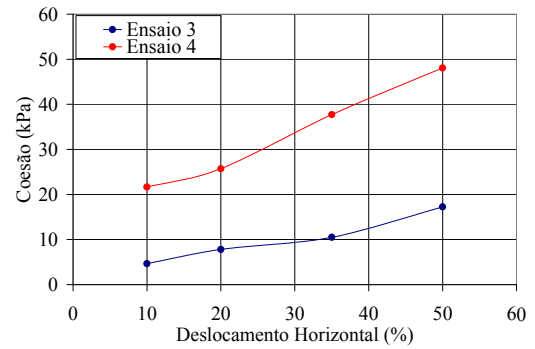


Figura 5.29 – Variação do intercepto coesivo para os ensaios 3 e 4

5.3.4 Ensaios 5 e 6: influência da presença de materiais fibrosos de grandes dimensões em resíduos velhos

As Figuras 5.30 e 5.31 apresentam as comparações dos parâmetros de resistência entre os ensaios 5 e 6. Diante das figuras, nota-se valores de ângulo de atrito maiores para o ensaio 6 ao longo de todo o deslocamento horizontal, demonstrando coerência, pois o referido ensaio possui um teor de umidade médio bem inferior ao do ensaio 5, ou seja, 27,51% contra 55,52% respectivamente. Em relação ao intercepto coesivo, mesmo o ensaio 5 possuindo maior teor de umidade, a porcentagem de materiais fibrosos é bem maior em relação ao ensaio 6, conferindo, desta forma, maior resistência à tração às amostras do ensaio 5. Sendo assim, o ensaio 5 apresentou maiores valores de intercepto coesivo em relação ao ensaio 6, durante todo o deslocamento realizado.

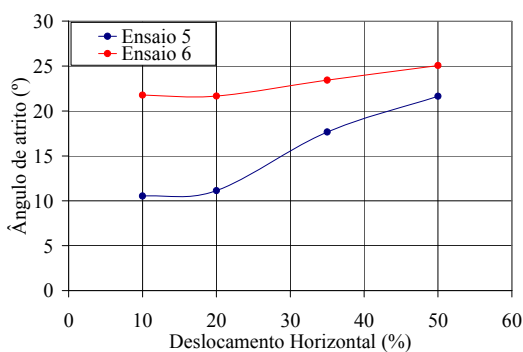


Figura 5.30 – Variação do ângulo de atrito para os ensaios 5 e 6

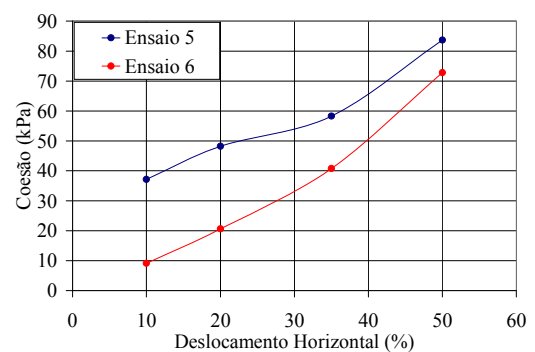


Figura 5.31 – Variação do intercepto coesivo para os ensaios 5 e 6

5.3.5 Ensaios 1 e 3: influência da presença de materiais fibrosos de grandes dimensões em resíduos frescos

As Figuras 5.32 e 5.33 apresentam as comparações dos parâmetros de resistência entre os ensaios 1 e 3. Notam-se valores de ângulo de atrito maiores para o ensaio 1 ao longo de todo deslocamento realizado, contradizendo, de certa forma, o que foi colocado por Kolsch (1995), o qual afirma que o referido parâmetro é devido à matriz básica do RSU, ou seja, aquela que não possui fibras. Sendo assim, o ensaio 3 deveria apresentar valores maiores para este parâmetro, pois o percentual de fibras é menor, ou seja, o percentual de materiais que conferem atrito a uma amostra de RSU é maior para o ensaio 3.

Conforme já mencionado, Landva et al. (1984) concluíram que quanto maior o percentual de materiais fibrosos nas amostras de RSU, menor será o ângulo de atrito. Sendo assim, esta incoerência se deve, provavelmente, aos diferentes teores de umidade, embora os teores médios de umidade para os ensaios 1 e 3 foram respectivamente 68,20% e 68,82%. Entretanto, na realização dos ensaios, foi percebido, visualmente, que as amostras do ensaio 3 encontravam-se mais úmidas, podendo-se verificar tal constatação através dos gráficos de adensamento, apresentados em anexo. Em relação ao intercepto coesivo, o ensaio 1 apresentou valores bem maiores durante toda fase de cisalhamento, demonstrando coerência, pois o referido ensaio tinha um percentual de materiais fibrosos maior, além de possuir menor umidade, ocasionando em uma maior tensão normal nas fibras e um menor efeito de escorregamento entre elas, promovendo conseqüentemente, maior resistência à tração às amostras do ensaio 1.

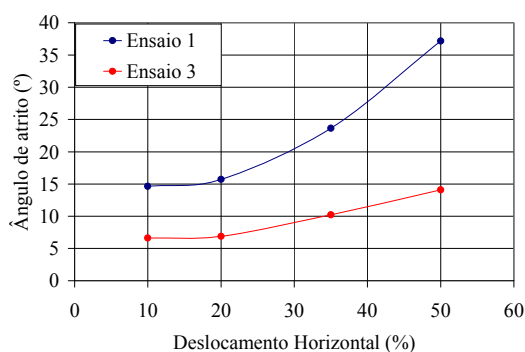


Figura 5.32 – Variação do ângulo de atrito para os ensaios 1 e 3



Figura 5.33 – Variação do intercepto coesivo para os ensaios 1 e 3

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Construção e Desempenho do Equipamento

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que o equipamento atendeu aos objetivos apresentados. A sua utilização permitiu obter as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamentos horizontais, na fase de cisalhamento, sendo possível avaliar as envoltórias de ruptura para todos os ensaios. Embora o equipamento tenha apresentado um desempenho adequado, o mesmo apresentou pontos negativos, que serão apresentados posteriormente. Em relação aos pontos positivos, pode-se destacar:

- As dimensões do equipamento permitiram o acondicionamento de amostras representativas de RSU, uma vez que estas eram constituídas pela maior parte dos componentes presentes nos resíduos sólidos urbanos típicos;
- O equipamento como um todo se mostrou resistente a todos os esforços atuantes. Tanto o pórtico quanto a caixa não apresentaram nenhum indício de ruptura em suas respectivas estruturas;
- Os sistemas de aplicação das tensões normal e cisalhante permitiram a execução dos ensaios para as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa (valores empregados dentro da faixa utilizada pela literatura especializada);
- A operação do equipamento é bastante simplificada;
- O custo de construção do equipamento é relativamente baixo ao se comparar com outros equipamentos de grandes dimensões.

Entretanto, durante a realização dos ensaios, foram percebidos alguns pontos negativos, podendo-se destacar:

- A altura da caixa impossibilitou que fossem aplicadas tensões normais acima de 200 kPa. Durante a realização da fase de adensamento, notou-se que para algumas amostras, foi necessário o alteamento da caixa, utilizando-se, dependendo do tipo da amostra, 5, 10 ou 15 cm além de sua altura original. Entretanto, mesmo utilizando uma altura total de 65 cm para caixa (valor máximo permissível), constatou-se que não seria possível a realização de ensaios com tensões normais superiores a 200 kPa;

- O sistema de aplicação da tensão cisalhante não era automático, dificultando a manutenção da velocidade dos ensaios constante e, conseqüentemente, diminuindo a precisão durante o registro dos valores de tensão cisalhante;
- O instrumento de medição da tensão cisalhante era pouco preciso para situações de baixos valores de tensão;
- O registro das tensões cisalhantes ao longo do deslocamento horizontal deve ser feito por meio de sensores e não por intermédio de uma régua milimetrada, pois tal fato compromete a precisão da coleta de dados;
- O equipamento não permitiu que fossem realizadas as leituras referentes aos deslocamentos verticais das amostras durante o cisalhamento destas, o que poderia fornecer informações sobre a eventual contração e/ou dilatação durante o cisalhamento.

6.2 Procedimento de Amostragem e Moldagem das Amostras

Os procedimentos de amostragem e moldagem foram satisfatórios, atendendo aos objetivos. Em relação à amostragem, o procedimento adotado teve o objetivo de permitir que fossem avaliados os diferentes níveis de tensão para cada ensaio, propiciando a montagem das envoltórias de ruptura. Embora a amostragem empregada não tenha permitido simular as condições de campo, pois se trata de amostras deformadas cujas estruturas são perdidas, ela garantiu que as três amostras utilizadas para cada ensaio apresentassem composições muito semelhantes. Desta forma, foi descartada a hipótese de uma amostra submetida a uma maior tensão normal apresentar menor resistência ao cisalhamento em relação àquela submetida a uma menor tensão normal.

Ressalta-se que na possibilidade de se coletar amostras no próprio maciço de resíduos de forma aleatória, corre-se o risco de obter três amostras com composições diferentes para o ensaio a ser realizado, impossibilitando, assim, a avaliação da influência da tensão normal na resistência ao cisalhamento.

Outro aspecto importante diz respeito à homogeneização das amostras. Embora durante este processo, parte da umidade das amostras era perdida pelo contato direto com o piso do local dos ensaios, o processo de homogeneização empregado evitou a presença de diferentes zonas de comportamento dentro da caixa do equipamento. Visualmente, após a homogeneização das amostras, percebia-se que as mesmas tinham um aspecto de uma massa homogênea.

Entretanto, sentiu-se uma dificuldade em se manter um controle de umidade às amostras. Com exceção dos ensaios 1 e 2, houve grande dificuldade em manter valores de umidade semelhantes às três amostras de cada ensaio. Além disso, estabelecer o teor de umidade das amostras ensaiadas foi também difícil. Em algumas situações, percebia-se que determinada amostra apresentava maior umidade em relação à outra do mesmo ensaio. Entretanto, no estabelecimento deste índice, os ensaios apresentavam a mesma umidade. Desta forma, conclui-se que o procedimento para estabelecer o teor de umidade não foi totalmente adequado.

Com relação à moldagem das amostras, o procedimento adotado mostrou ser adequado. No caso específico dos ensaios 1 e 2, cujas amostras possuíam grandes volumes de plásticos, papéis, papelão e podas, ou seja, materiais de difícil compactação, a metodologia empregada possibilitou a moldagem dessas amostras para pesos específicos de 10 e 8 kN/m³ respectivamente, os quais podem ser considerados relativamente altos.

6.3 Execução dos Ensaios

Em relação à execução da fase de adensamento, encontrou-se uma dificuldade no que diz respeito à interrupção das leituras referentes aos deslocamentos verticais. No final de cada dia de um ensaio, encerrava-se o adensamento e então, instalava-se uma trava para evitar a descompressão da amostra. Entretanto, no dia seguinte, ao retomar o adensamento, o recalque que deveria ocorrer no intervalo de interrupção, ocorria no dia seguinte, no momento da reaplicação da tensão normal.

Ressalta-se que o dispositivo de aplicação da tensão normal era desmontado no final de cada dia de ensaio e remontado no início do dia seguinte. Tal fato gerou descontinuidades nas curvas recalque *versus* tempo, apresentadas em anexo, dificultando as suas análises. Sendo assim, conclui-se que o ideal é realizar as fases de adensamento e cisalhamento no mesmo dia.

Notou-se que, de uma maneira geral, oito horas são suficientes para aproximar do término da fase de adensamento. Como eram exigidas três horas na execução da fase de cisalhamento, seria necessária uma estrutura mínima no local dos ensaios para sua realização no período da noite.

Já com relação à execução da fase de cisalhamento, sentiu-se uma dificuldade de compatibilizar as leituras das tensões cisalhantes com os deslocamentos horizontais. Para tanto, foi necessário treinar as duas pessoas responsáveis à execução desta fase, de forma que houvesse uma sincronia entre elas. Tal fato impossibilitava a substituição de uma destas pessoas por uma outra sem que esta passasse pelo treinamento.

6.4 Resultados

Devido aos problemas observados durante a fase de adensamento das amostras, os parâmetros de compressibilidade não foram obtidos.

Em relação ao comportamento mecânico do RSU, percebe-se que, para todas as amostras, as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal não apresentaram picos de resistência definidos, nem mesmo para o máximo deslocamento de 35 cm, correspondente a 50% do deslocamento total. Observou-se uma tendência de crescimento da tensão cisalhante com o aumento dos deslocamentos. Desta forma, conclui-se que a condição de ruptura não foi alcançada por nenhuma das amostras ensaiadas.

Sendo assim, conforme já comentado, os parâmetros de resistência foram definidos com base em critérios de deformação, ou taxa de deslocamento. Contudo, a grande questão diz respeito a qual nível de deformação, deve-se considerar a “ruptura” das amostras. Portanto, conclui-se que avaliar a resistência ao cisalhamento do RSU, baseando-se no critério de Mohr-Coulomb, é uma difícil tarefa.

Desta forma, para se atingir a ruptura das amostras de RSU, deve-se executar o ensaio de tração para a matriz composta e o de cisalhamento direto para a matriz básica, conforme colocado por Kolsch (1993 e 1995). No caso da matriz composta, os materiais fibrosos necessitam de grandes níveis de deslocamento horizontal para que eles possam ser tracionados. Ressalta-se que a ativação das fibras não depende somente da carga aplicada, mas também de sua deformação.

Com relação aos valores de parâmetros de resistência, conclui-se que todos eles estão dentro do gráfico da Figura 3.5, inclusive os valores referentes ao máximo nível de deslocamento.

No que diz respeito à influência de alguns fatores na resistência do RSU, pode-se tirar algumas conclusões que se seguem.

Diante dos resultados dos ensaios 1 e 2, foi possível constatar o efeito do peso específico na resistência dos resíduos. De uma maneira geral, as amostras do ensaio 1 (maior peso específico) apresentaram maior resistência ao cisalhamento. E, conforme o apresentado nas Figuras 5.2 e 5.5, nota-se que as envoltórias de ruptura referentes aos níveis de deslocamento horizontal de 35% e 50%, valores de deslocamento em que os materiais fibrosos são mobilizados, tendem a seguir um critério de ruptura bi-linear, similar ao apresentado por Kolsch (1993 e 1995). Entretanto, para confirmar tal afirmação, seria necessário submeter outra amostra a um nível de tensão maior que os aplicados, de forma que se obtenha mais um ponto para definição da envoltória de ruptura.

Em relação aos ensaios 2 e 5, tem-se a impressão que caso as amostras de ambos ensaios tivessem a mesma umidade, as amostras do ensaio 2 teriam maior resistência ao cisalhamento, comprovando que os resíduos novos apresentam maiores valores de resistência em relação aos resíduos antigos. E no que diz respeito ao ensaio 5, assim como apresentado nas Figuras 5.8 e 5.11, através da Figura 5.14, com exceção da envoltória de ruptura referente ao deslocamento de 10%, as demais demonstram um critério de ruptura linear, conforme o proposto por Mohr-Coulomb para solos. Entretanto, em função das amostras do referido ensaio possuírem materiais fibrosos em sua composição, as mesmas deveriam apresentar um critério de ruptura bilinear, similar ao proposto por Kolsch (1993 e 1995). Tal fato sugere que a incoerência existente nos valores de tensão cisalhante entre as curvas referentes às tensões normais de 50 e 100 kPa para uma faixa de deslocamento de 0 a 20% pode ter contribuído à formação de envoltórias de ruptura do tipo linear, ou seja, Mohr-Coulomb.

Sobre os ensaios 3 e 4, as amostras do primeiro ensaio apresentaram menores valores de resistência em função de seus maiores teores de umidade, constatando que quanto maior o teor de umidade, menor a resistência ao cisalhamento. Ainda dentro deste assunto, percebeu-se a influência da umidade na resistência do RSU em outras situações, nas quais o objetivo não era o de avaliar a influência da umidade.

Outro aspecto importante é que o controle da umidade nas amostras de RSU é uma difícil tarefa, porém de grande importância, pois pequenas variações nesta propriedade são suficientes para alterar os valores de resistência ao cisalhamento. E, diante do apresentado nas

Figuras 5.8 e 5.11, com exceção das envoltórias de ruptura referentes ao deslocamento de 10%, as demais mostraram, para os níveis de tensões normais utilizados, a validade do critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Já nos ensaios 5 e 6, mais uma vez, em função dos teores de umidade serem diferentes para ambos os ensaios, não foi possível afirmar que as amostras com maiores concentrações de fibras apresentariam maiores valores de resistência. Entretanto, percebe-se que se os teores de umidade fossem os mesmos, as amostras do ensaio 5 apresentariam maior resistência. E, no que diz respeito ao ensaio 6, assim como apresentado nas Figuras 5.8, 5.11 e 5.14, através da Figura 5.17, com exceção da envoltória de ruptura referente ao deslocamento de 10%, as demais demonstram, para os níveis de tensões normais utilizados, a validade do critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

E, por último, nos ensaios 1 e 3, ficou claro que a maior concentração de materiais fibrosos nas amostras do ensaio 1 conferiu-lhes maior resistência ao cisalhamento. Ressalta-se que em função de um menor teor de umidade para estas amostras, tal fato contribuiu também para elas apresentassem maiores valores de resistência. Mas certamente, esta diferença de umidade era pequena, então o fator preponderante foi realmente a maior presença de fibras nas amostras do ensaio 1. Sendo assim, conclui-se que os materiais fibrosos são responsáveis pelos altos valores de resistência medidos em ensaios com resíduos sólidos urbanos, como também pela estabilidade observada em diversos taludes de lixo.

Com relação à variação dos parâmetros de resistência com o deslocamento horizontal, não se constatou o comportamento esperado conforme a literatura especializada. Como já relatado, o ângulo de atrito teria de ser quase todo mobilizado em torno de 20% de deslocamento, fato que não ocorreu, na maioria dos ensaios, este parâmetro passou a ter seus valores aumentados exatamente a partir de 20 % de deslocamento e não atingiu uma estabilização para o deslocamento máximo de 50%. Somente para o ensaio 6, este parâmetro demonstrou uma tendência de estabilização em seus valores, sendo necessários maiores deslocamentos para se comprovar tal constatação. Já em relação ao intercepto coesivo, este parâmetro apresentou aumento nos seus valores até para o deslocamento máximo de 50%, seguindo, desta forma, o comportamento típico apresentado na literatura. Somente para o ensaio 1, houve uma tendência de estabilização para o referido parâmetro. Porém, seriam necessários maiores deslocamentos para se confirmar tal fato. Cabe ressaltar que no caso das amostras dos ensaios

3, 4 e 6, o intercepto coesivo deveria apresentar uma tendência de estabilização ao longo do deslocamento horizontal em função da pequena quantidade de materiais fibrosos. Além disto, no caso específico das amostras 4 e 6, o referido parâmetro apresentou valores relativamente altos. Para o deslocamento máximo, estes valores foram respectivamente 48,1 e 72,8 kPa.

Em síntese, diante do apresentado, conclui-se que a presente pesquisa atendeu os objetivos definidos. As envoltórias de resistência dos RSU para diferentes condições de umidade, densidade, composição e idade foram traçadas.

No que diz respeito à validade da envoltória de Mohr-Coulomb para os RSU, constatou-se que as amostras cujas composições possuíam baixo percentual de materiais fibrosos (ensaios 3, 4 e 6) apresentaram um critério de ruptura linear, conforme o esperado. Já as amostras cujas composições possuíam alto percentual de materiais fibrosos (ensaios 1, 2 e 5), com exceção das amostras do ensaio 5, apresentaram uma tendência a um critério de ruptura bi-linear.

O procedimento proposto para realização de ensaios de cisalhamento direto em RSU permite que estes sejam realizados com sucesso. Porém, o presente trabalho pode ser considerado como um estudo introdutório sobre o assunto. Através dele, foi possível conhecer um pouco mais sobre o comportamento referente à resistência do RSU e permitiu obter uma ordem de grandeza referente aos valores de parâmetros de resistência. Entretanto, diante da complexidade do assunto, uma continuidade neste trabalho deve ser feita.

6.5 Sugestões para trabalhos futuros

- As envoltórias de ruptura devem ser definidas em função de quatro pontos e não somente de três, pois, desta forma, seria possível comprovar se as envoltórias são do tipo linear ou bilinear conforme o critério de ruptura proposto por Kolsch (1993 e 1995);
- Amostras com outras composições devem ser ensaiadas. Diferentes concentrações de materiais fibrosos devem ser utilizadas nas amostras de RSU de forma que se conclua qual a proporção entre matriz básica e matriz fibrosa que proporcionará maior resistência;
- No caso das amostras dos ensaios 3, 4 e 6, devem ser removidas as pequenas quantidades de materiais fibrosos presentes. Se tal procedimento for feito e não for constatado o pico de resistência nos gráficos tensão cisalhante *versus* tensão normal, um rigoroso controle de granulometria deve ser feito, simulando as dimensões máximas das partículas para os

ensaios, de modo que se descubra a dimensão máxima que pode ser empregada para que não ocorra um comportamento mecânico caracterizado pela ausência de pico de ruptura. Conforme já comentado, segundo Fucale (2005), no caso específico de uma amostra denominada de matriz básica, submetida a uma tensão normal de 50 kPa, cuja composição não possuía materiais fibrosos e cujas dimensões das partículas eram inferiores a 8 mm, apresentou, ainda, um pouco do efeito de reforço;

- Diferentes idades dos resíduos devem ser utilizadas nas amostras de forma que se conclua em qual fase de degradação dos resíduos, eles apresentam maior ou menor resistência, possibilitando análises de estabilidade mais detalhadas;
- Em relação à umidade, é interessante também utilizar as umidades de saturação e de capacidade de campo;
- Nos comparativos entre ensaios, especificamente naqueles em que houve o objetivo de constatar a influência da idade e da presença dos materiais fibrosos na resistência do RSU, deve-se buscar procedimentos para que estes ensaios sejam realizados com o mesmo teor de umidade, possibilitando constatar unicamente o efeito de cada fator mencionado;
- Criar uma estrutura de apoio de pessoal que possibilite a realização das fases de adensamento e cisalhamento do ensaio em um único dia, verificando com convicção, o tempo necessário para a fase de adensamento;
- Aumentar a precisão do instrumento de medição da tensão cisalhante, pois para tensão normal de 50 kPa, tinha-se pouca precisão para medir os baixos valores de tensão cisalhante;
- Criar um dispositivo automático de aplicação de força cisalhante, melhorando a precisão da coleta de dados;
- Criar um equipamento para realização dos ensaios de tração das amostras contendo materiais fibrosos, pois o ensaio de cisalhamento direto não permitiu ativar totalmente as fibras presentes no RSU;
- Utilizar o equipamento construído para esta pesquisa, somente para ensaiar as amostras referentes à matriz básica. Desta forma, torna-se possível verificar exclusivamente o parâmetro ângulo de atrito e então, constatar a validade do critério de ruptura proposto por Kolsch (1993 e 1995).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A.B. *O emprego do permeâmetro de guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura*. 2001. 67 f. Dissertação de mestrado – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- BENSON, C.H.; OTHMAN, M.A. Hydraulic and Mechanical Characteristics of a compacted municipal solid waste compost. *Waste Management e Research*, 11(2), p127-142, 1993.
- BENVENUTO, C.; CUNHA, M.A. Escorregamento em massa de lixo no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo, SP. In: *Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos*, 2., 1991, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABMS, v. 2, p. 55–66.
- BLIGHT, G. E.; BALL, J. M.; BLIGHT, J. J. Moisture and suction in sanitary landfills in semiarid areas. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, 118(6), 1992.
- BOSCOV, M.E.G.; ABREU, R.C. Aterros Sanitários. In: *Previsão de desempenho versus comportamento real*. São Paulo: ABMS/NRSP, 2000. p. 7-44.
- CAICEDO, B.; YAMIN, L.; GIRALDO, E.; CORONADO, O. Geomechanical properties of municipal solid waste in Doña Juana sanitary landfill. In: *Int. Congress on Environmental Geotechnics*, 4., 2002, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rio de Janeiro: 2002, v. 1, p. 177-182.
- CARVALHO, M.F. *Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos*. 1999. 300 f. Tese de doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- CATAPRETA, C.A.A., SIMÕES, G.F.; BATISTA, H. P., OLIVEIRA, A. F. G., OLIVEIRA L. C. M. Influência da umidade e fatores operacionais na compactação de resíduos sólidos urbanos no aterro sanitário de Belo Horizonte, MG. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23., 2005, Campo Grande, MS. *Anais...* Rio de Janeiro: ABES, 2005.
- CHEN, T.; CHYNOWETH, D.P. Hydraulic conductivity of compacted municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 1995, v.51, p. 205-212.
- COUMOULOS, D.G.; KORYALOS, T.P.; METAXAS, I.L.; GIOKA, D.A. The main landfill of Athens – geotechnical investigation. In: *International Landfill Symposium*, 5., 1995, Cagliari, Sardinia. *Proceedings...* Cagliari: CISA, 1995.
- COWLAND, J. W.; TANG, K. Y.; GABAY, J. Density and strength properties of Hong Kong refuse. In: *International Landfill Symposium*, 4., 1993, Cagliari, Sardinia. *Proceedings...* Cagliari: CISA, 1993.
- DEL GRECO, O.; OGGERI, C. Geotechnical parameters of sanitary wastes. In: *International Landfill Symposium*, 4., 1993, Cagliari, Sardinia. *Proceedings...* Cagliari: CISA, 1993.
- DIXON, N; JONES, D.R.V. Engineering Properties of Municipal Solid Waste. *Geotextiles and Geomembranes*, 2005, v.23, p. 205–233.
- DIXON, N; LANGER, U. Development of a MSW classification system for the evaluation of mechanical properties. *Waste Management*, 2006, v.26, p. 220-232.
- EDIL, T.B.; RANGUETTE, V.J.; WUELLNER, W.W. Settlement of municipal refuse. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D., (Ed.) *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, Philadelphia: 1990. p. 225-239.

- EDINCLILER, A; BENSON, C.H.; EDIL, T.B. *Shear strength of municipal solid waste*. Environmental Geotechnics Report 96-2. Geotechnical Engineering Program, Department of Civil e Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, U.S.A., 1996. 65p.
- FASSETT, J.B.; LEONARDS, G.A.; REPETTO, P.C. Geotechnical properties of municipal solid wastes and their use in landfill design. In: *Waste Technical Conference – WasteTech '94*, 1994, Charleston. *Proceedings...* Charleston, 1994.
- FUCALE, S.P.; JUCÁ, J.F.T. Estudo da resistência à penetração dinâmica (SPT) em aterros de resíduos sólidos urbanos. In: *Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 28., 2002, México. *Proceedings...* México: AIDIS, 2002.
- FUCALE, S.P. *Influência dos componentes de reforço na resistência de resíduos sólidos urbanos*. 2005. 217 f. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.
- GABR, M. A.; VALERO, S. N. Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste. *Geotechnical Testing Journal*, 1995, v.18, n.2, p. 241-251.
- GACHET, C.; LEMARÉCHAL, D.; GOTTELAND, P.; PRUDHOMME, B. In situ household refuse density measurement protocol. In: *International Congress on Environmental Geotechnics*, 3., 1998, Lisbon. *Proceedings...* Lisbon, 1998.
- GERBER, R. (1991). *CWS Slide Investigation Report* (apud Edincliler et al, 1996).
- GOMES, C.; ERNESTO, A.; LOPES, M.L.; MOURA C. (2002). Sanitary landfill of Santo Tirso – municipal waste physical, chemical and mechanical properties. In: *Int. Congress on Environmental Geotechnics*, 4, 2002, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rio de Janeiro: 2002, v.1, p. 255-261.
- GOTTELAND, P.; LEMARÉCHAL, D.; RICHARD, P. Analysis and monitoring of the stability of a domestic waste landfill. In: *International Landfill Symposium*, 5., 1995, Cagliari, Sardinia. *Proceedings...* Cagliari: CISA, 1995.
- GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; TANCREDI, G. The use of triaxial tests for the mechanical characterization of MSW. In: *International Landfill Symposium*, 5., 1995, Cagliari, Sardinia. *Proceedings...* Cagliari: CISA, 1995.
- GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q. Geotechnical characterization of municipal solid waste: Choice of Design Parameters. In: *International Congress on Environmental Geotechnics*, 2., 1996, Osaka. *Proceedings...* Osaka, 1996.
- HOWLAND, J.D.; LANDVA, A O. Stability analysis of a municipal solid waste landfill. In: *Stability and Performance of Slope and Embankments – ASCE*, Geotechnical Special Publication, n. 31, 1992.
- HUITRIC, R. 1981. Sanitary Landfill Settlement Rates. Technical University of Berlin.
- JESSBERGER, H.L.; KOCKEL, R. Mechanical properties of waste materials. In: *Conferenze di Geotecnica di Torino*, 15., 1991, Turin. *Proceedings...* Turin: Società Ingegneri e Architetti in Torino, 1991.
- JESSBERGER, H. L.; KOCKEL, R. Determination and assessment of the mechanical properties of waste materials. In: *International Landfill Symposium*, 4., 1993, Cagliari, Sardinia. *Proceedings...* Cagliari: CISA, 1993.

- JESSBERGER, H. L.; SYLLWASSCHY, O.; KOCKEL, R. Investigation of waste body-behaviour and waste-structure-interaction. In: *International Landfill Symposium*, 5., 1995, Cagliari, Sardinia. *Proceedings...* Cagliari: CISA, 1995.
- JONES, R.; TAYLOR, D.; DIXON, N. Shear strength of waste and its use in landfill stability analysis. In: *Conference on Geoenvironmental Engineering*, 1997, Cardiff. *Proceedings...* Cardiff, 1997.
- JUCÁ, J.F.T. Destinação final dos resíduos sólidos no Brasil: Situação atual e perspectivas. In: *Seminário sobre Resíduos Sólidos*, 2., 2004, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABGE, 2004.
- KAIMOTO, L.S.A; CEPOLLINA, M. Considerações sobre alguns condicionantes e critérios geotécnicos de projeto e executivos de aterros sanitários. In: *Simpósio Internacional da Qualidade Ambiental*, 1996, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: ABES, 1996.
- KAVAZANJIAN, E. Jr.; MATASOVIC, N., BONAPARTE, R.; SCHMERTMANN, G.R. Evaluation of MSW properties for seismic analysis. In: *International Conference Geoenvironment 2000*, 1995, New Orleans, Louisiana. ASCE Special Publication 46, 1995.
- KAVAZANJIAN, E. Mechanical properties of municipal solid waste. In: *International Waste Management and Landfill Symposium*, 8., 2001, Cagliari, Sardinia. *Proceedings...* Cagliari: CISA, 2001.
- KAVAZANJIAN, E. Evaluation of MSW properties using field measurements. In: Koerner, R.M., Koerner, G.R., Hsuan, Y., Ashley, M.V. (Eds.). *Geosynthetic Research Institute Conference, Hot Topics in Geosynthetics – IV*, 17, 2003, *Proceedings...* (apud Dixon e Jones, 2005).
- KNOCHENMUS, G.; WOJNAROWICZ, M.; VAN IMPE. Stability of municipal solid wastes. In: *International Congress on Environmental Geotechnics*, 3., 1998, Lisbon. *Proceedings...* Lisbon, 1998.
- KOCKEL, R.; JESSBERGER, H.L. Stability evaluation of municipal solid waste slopes. In: *ECSMFE*, 11., 1995, Copenhagen. *Proceedings...* Copenhagen: Danish Geotechnical Society, 1995.
- KOERNER, R.M., SOONG, T.-Y. Stability assessment of ten large landfill failures. In: *Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems using Geosynthetics*, *Proceedings of Sessions of Geo Denver 2000*, 2000, *ASCE Geotechnical Special Publication n.103*, pp.1–38.
- KOLSCH, F. The bearing behaviour of domestic waste and related consequences for stability. In: *International Landfill Symposium*, 4., 1993, Cagliari, Sardinia. *Proceedings...* Cagliari: CISA, 1993.
- KOLSCH, F. Material values for some mechanical properties of domestic waste. In: *International Landfill Symposium*, 5., 1995, Cagliari, Sardinia. *Proceedings...* Cagliari: CISA, 1995.
- KOLSCH, F; ZIEHMANN, G. Landfill stability: Risks and challenges. *Waste Management World*, 2004, v.4, n. 3, p. 55-60.
- KONIG, D.; JESSBERGER, H.L. *Waste mechanics*. Special Report of the TC5 Technical Committee on Waste Mechanics, Hamburg, Germany, 1997, p.35-76.

- LAMARE NETO, A. *Resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos e de materiais granulares com fibras*. 2004. 190 f. Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- Landva, A.O.; Clark, J.I.; Weisner, W.R.; and Burwash, W.J. Geotechnical Engineering and Refuse Landfills. In: *National Conference on Waste Management in Canada*, 6, 1984, Vancouver. *Proceedings...*, Vancouver, 1984.
- LANDVA, A. O.; CLARK, J. I. Geotechnics of waste fills. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D. (Ed.) *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, Philadelphia: 1990. p. 86-103.
- MANASSERO, M; VAN IMPE, W.F.; BOUAZZA, A. Waste disposal and containment. In: *International Congress on Environmental Geotechnics*, 2., 1996, Osaka. *Proceedings...* Osaka, 1996.
- MARQUES, A.C.M. *Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos*. 2001. 469 f. Tese de doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- MITCHELL, R.A.; MITCHELL, J.K. Stability evaluation of waste landfills. In: *Stability and Performance of Slope and Embankments*. ASCE Geotechnical Special Publication, n. 31, v. 2, p. 1151-1187, 1992.
- OLIVEIRA, D.A.F. *Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos*. 2002. 173 f. Dissertação de mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.
- OWEIS, I.S.; KHERA, R. Criteria for geotechnical construction of sanitary landfills. In: *International Symposium on Environmental Geotechnology*, 1., 1986, Allentown, USA. *Proceedings...* Allentown, 1986.
- PAGOTTO, A; RIMOLDI, P. Design and construction of a geogrid reinforced embankment over waste material. In: *GEOSYNTHETICS 87*, 1987, New Orleans, LA. *Proceedings...* New Orleans: IFAI, 1987.
- PELKEY, S.A.; VALSANGKAR, A.J.; LANDVA A. Shear displacement dependent strength of municipal solid waste and its major constituent. *Geotechnical Testing Journal*, 2001, v. 24, n. 4, p. 381–390.
- POWRIE, W.; BEAVEN, R.P. (1999). Hydraulic properties of household waste and implications for landfills. *Proc. Institution of Civil Engineering, Geotechnical Engineering*, London, v.137, October, p.235-247.
- RICHARDSON, G.; REYNOLDS, D. Geosynthetic consideration in a landfill on compressible clays. In: *GEOSYNTHETICS 91*, 1991, Atlanta, GA. *Proceedings...* Atlanta: IFAI, 1991.
- SANTOS, L. A. O.; PRESA, E. P. Compressibilidade de aterros sanitários controlados. In: *Simpósio Sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos*, 3., 1995, Ouro Preto, MG. *Anais...* Ouro Preto: ABMS, 1995.
- SIEGEL, R.A.; ROBERTSON, R.J.; ANDERSON, D.G. Slope stability investigations at a landfill in southern California. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D., (Ed.) *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, Philadelphia: 1990. p. 259-284.

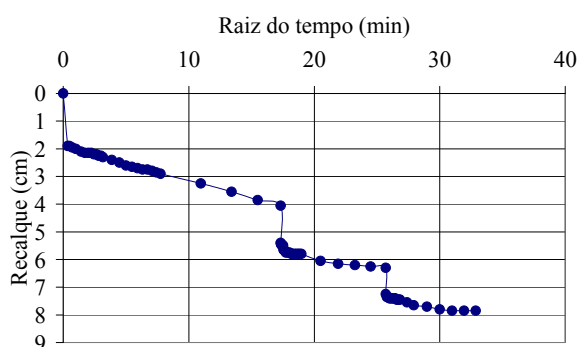
- SIMÕES, G.F. *Avaliação da estabilidade de taludes de aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos utilizando análises probabilísticas*. Relatório Final de Projeto de Pesquisa. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2004.
- SINGH, S.; MURPHY, B. Evaluation of the stability of sanitary landfills. In: LANDVA, A.; KNOWLES, D., (Ed.) *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, Philadelphia: 1990. p. 240-258.
- SMLU – Secretaria Municipal de Limpeza Urbana. *Caracterização dos Resíduos Sólidos Domiciliares de Belo Horizonte*. Belo Horizonte: SMLU, 2004.
- SOWERS, G.F. Settlement of waste disposal fills. In: *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 8., 1973, Moscou. *Proceedings...* Moscou, 1973.
- VAN IMPE, W. F. AND BOUAZZA, A. Large Shear Tests on Compacted Bales of Municipal Solid Wastes. *Soils and Foundations*, 1998, v. 38, n. 3, p. 199–200 (apud Pelkey et. al., 2001).
- VAN IMPE, W. F. Environmental Geotechnics: TC 5 Activities, State of Art. In: *International Congress on Environmental Geotechnics*, 3., 1998, Lisbon. *Proceedings...* Lisbon, 1998.
- VAN MEERTEN, J.J.; SELLMEJER, J.B.; PEREBOOM, D. Prediction of landfill settlements. In: *International Landfill Symposium*, 5., 1995, Cagliari, Sardinia. *Proceedings...* Cagliari: CISA, 1995.
- WATTS, K.S.; CHARLES, J.A. Settlement of recently placed domestic refuse landfills. *Proc. Institution of Civil Engineering*, London, 1990, part 1, v. 88, p. 971-993.
- WITHIAN, J.L.; TARVIN, P.A.; BUSHELL, T.D.; SNOW, R.E.; GERMANN, H.W. Prediction and performance of municipal landfill slope. In: *International Conference Geoenvironment 2000*, 1995, New Orleans, Louisiana. ASCE Special Publication 46, 1995.

8 ANEXO

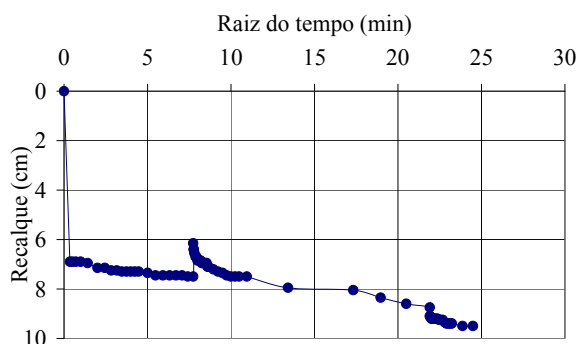
8.1 Fase de Adensamento

Para cada ensaio, foram utilizadas três amostras com diferentes níveis de tensão normal. Os resultados apresentados seguem uma ordem crescente de tensões, ou seja, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. As Figuras 8.1 a 8.18 apresentam as curvas recalque *versus* raiz do tempo para os seis ensaios realizados.

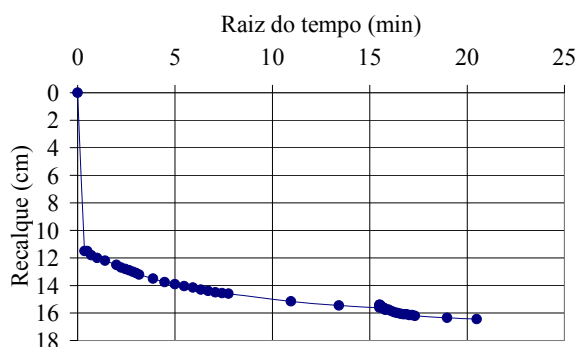
8.1.1 Ensaio 1



Tensão Normal 50 kPa



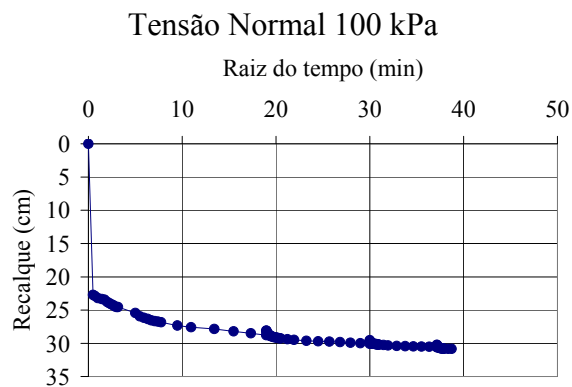
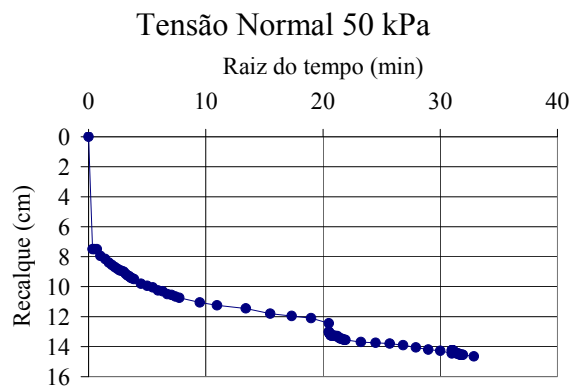
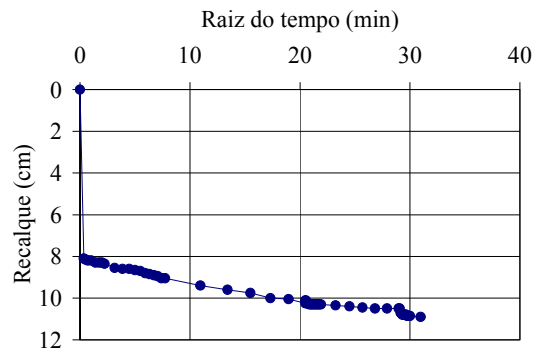
Tensão Normal 100 kPa



Tensão Normal 200 kPa

Figuras 8.1, 8.2 e 8.3 – Curvas recalque versus raiz do tempo (Ensaio 1)

8.1.2 Ensaio 2

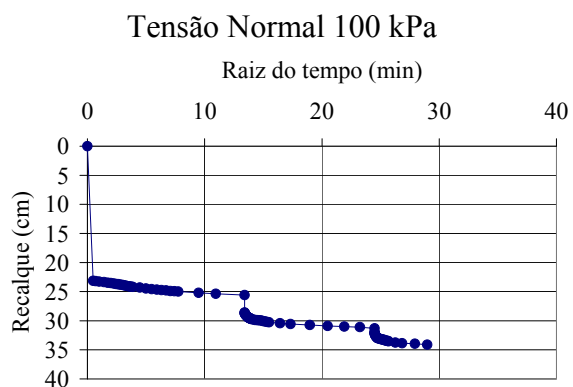
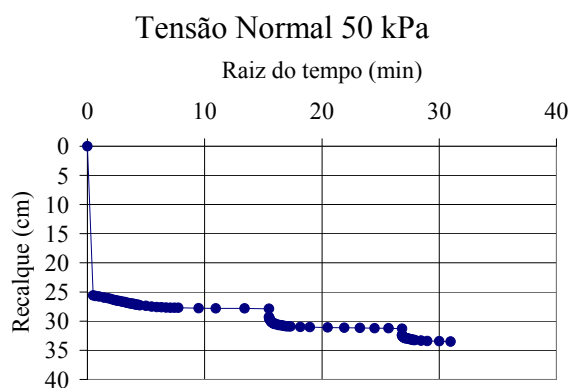
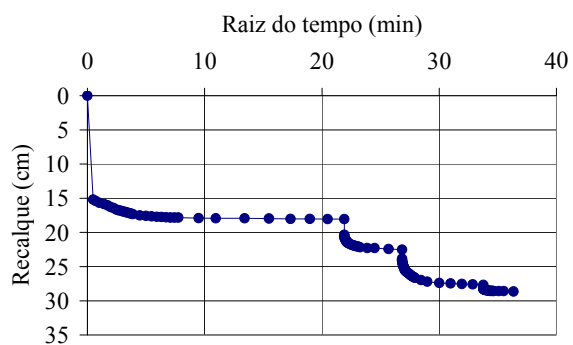


Tensão Normal 200 kPa

Figuras 8.4, 8.5 e 8.6 – Curvas recalque versus raiz do tempo (Ensaio 2)

Conforme mencionado no capítulo 4, as amostras submetidas aos níveis de tensão normal de 100 e 200 kPa tiveram suas alturas iniciais aumentadas para 55 e 65 cm respectivamente.

8.1.3 Ensaio 3

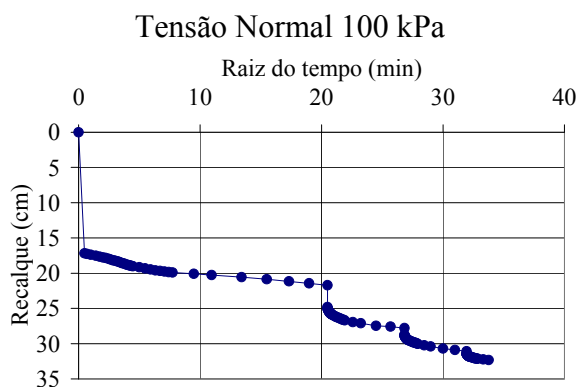
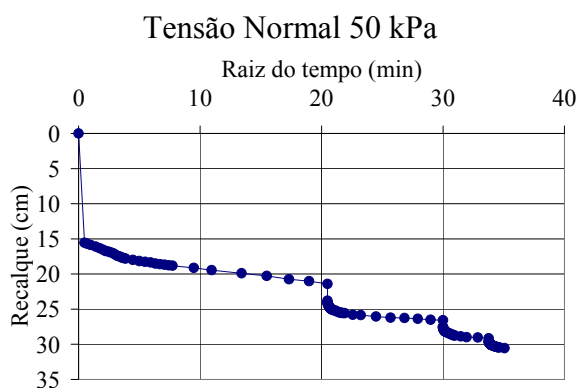
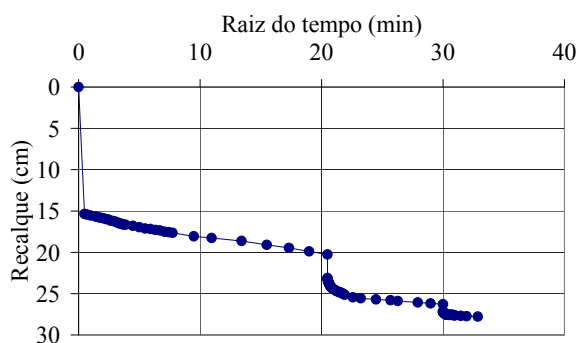


Tensão Normal 200 kPa

Figuras 8.7, 8.8 e 8.9 – Curvas recalque *versus* raiz do tempo (Ensaio 3)

Conforme mencionado no capítulo 4, todas as amostras do ensaio 3 tiveram suas alturas iniciais aumentadas para 65 cm.

8.1.4 Ensaio 4

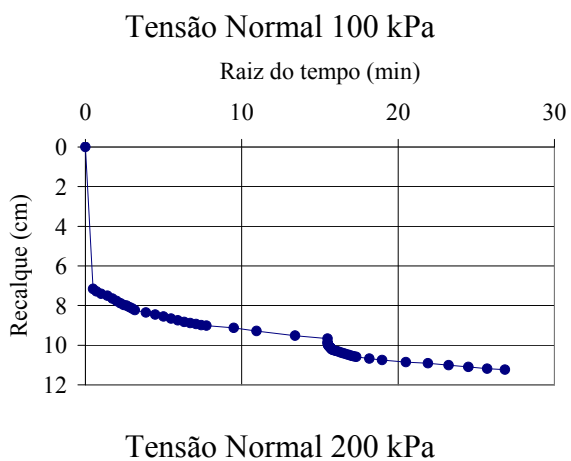
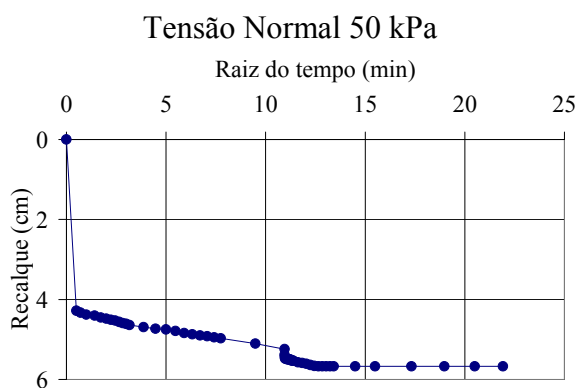
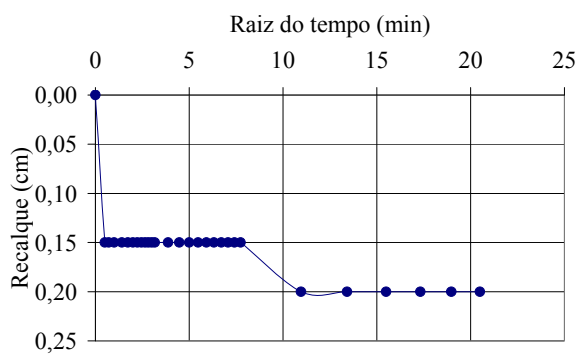


Tensão Normal 200 kPa

Figuras 8.10, 8.11 e 8.12 – Curvas recalque *versus* raiz do tempo (Ensaio 4)

Conforme mencionado no capítulo 4, todas as amostras do ensaio 4 tiveram suas alturas iniciais aumentadas para 65 cm.

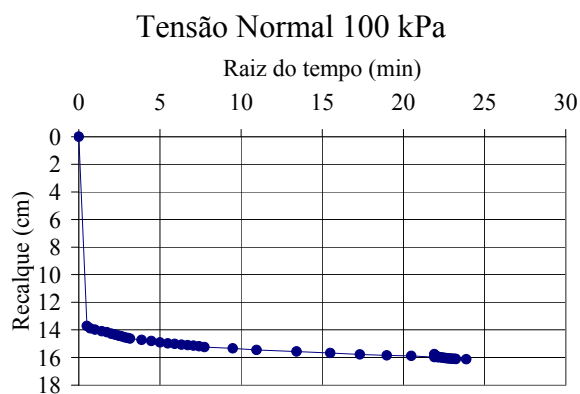
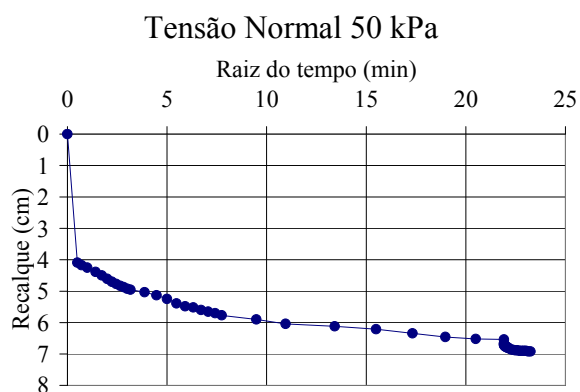
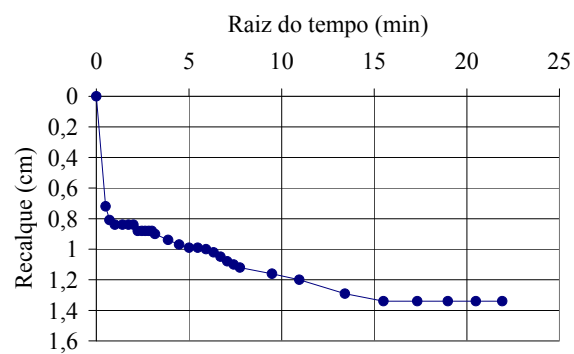
8.1.5 Ensaio 5



Figuras 8.13, 8.14 e 8.15 – Curvas recalque *versus* raiz do tempo (Ensaio 5)

Conforme mencionado no capítulo 4, todas as amostras do ensaio 5 tiveram suas alturas iniciais reduzidas para 45 cm.

8.1.6 Ensaio 6



Tensão Normal 200 kPa

Figuras 8.16, 8.17 e 8.18 – Curvas recalque *versus* raiz do tempo (Ensaio 6)

Conforme mencionado no capítulo 4, as amostras submetidas aos níveis de tensão normal de 50 e 100 kPa tiveram suas alturas iniciais reduzidas para 45 cm.