

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS POR MEIO DE ENSAIOS DE
CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES**

ROBERTO DIAS CARDIM

ORIENTADOR: PEDRO MURRIETA SANTOS NETO, DSc.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM – 168/08

BRASÍLIA / DF: JUNHO DE 2008

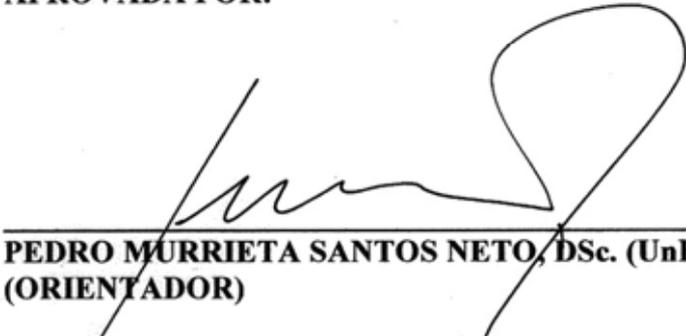
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS POR MEIO DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO
DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES**

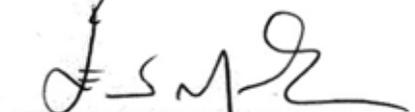
ROBERTO DIAS CARDIM

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

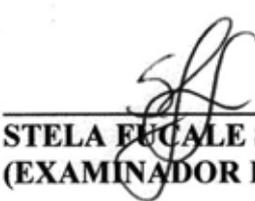
APROVADA POR:



**PEDRO MURRIETA SANTOS NETO, DSc. (UnB)
(ORIENTADOR)**



**ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**STELA FUCALE SUKAR, DSc. (UPE)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 30 de junho de 2008.

FICHA CATALOGRÁFICA

CARDIM, ROBERTO DIAS

Estudo da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por meio de Ensaios de Cisalhamento

Direto de Grandes Dimensões [Distrito Federal] 2008

xvi, 91p., 210mm x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2008)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1. Resíduos Sólidos Urbanos | 2. Resistência ao Cisalhamento |
| 3. Equipamento de Grandes Dimensões | 4. Cisalhamento Direto |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARDIM, R. D. (2008). Estudo da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por meio de Ensaios de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-168/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Roberto Dias Cardim

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por meio de Ensaios de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões.

GRAU / ANO: Mestre / 2008

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Roberto Dias Cardim
SQN 214, Bloco F, Apto 108 – Asa Norte
Brasília/DF - Brasil
CEP:70.873-060

Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso.
Não importam quais sejam os obstáculos e as dificuldades.
Se estivermos possuídos de uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los.

Buda

Dedicatória

À minha mãe, Marlene Dias Correia Cardim (i.m). Exemplo irretocável de fé, dedicação, amor, alegria e incansável esperança.

À minha esposa, Lana. Pelo companheirismo e toda a força nos momentos mais difíceis desta e de tantas outras jornadas.

Agradecimentos

A Deus, por toda a misericórdia, em sua plenitude me guiando pelos caminhos da Paz e do Bem.

A meus irmãos, Ricardo e Argeu, por acreditarem sempre em mim e nos meus sonhos. O incentivo e a presença incondicional de vocês foram fundamentais para que esta conquista se realizasse!

A meu pai, Nelton, por permitir desde muito cedo que eu tentasse alçar vôos mais altos.

Ao Prof. Pedro, por conduzir a orientação deste trabalho de maneira extremamente sóbria e competente.

Ao Mestre e Amigo, Professor Luís Aníbal, pelos incessantes exemplos de retidão, competência e dedicação. Por me ensinar que não podemos mudar os ventos, mas que podemos ajustar nossos lemes, rumo aos nossos objetivos.

Ao Professor Ennio Marques Palmeira, pelas importantíssimas contribuições dadas a este trabalho.

Ao Professor Luís Fernando Martins, pela constante atenção e disponibilidade para ajudar.

Ao amigo James Dean da Silva, por toda ajuda e amizade.

Ao amigo Eder Carlos Guedes dos Santos, pelos impagáveis momentos de alegria, pelo incentivo e pelos ensinamentos.

Às queridíssimas amigas Janaína Lima, Joseleide Silva, Maria Tâmara, Lorena Batista, Paôla Alves por todo o carinho e alegria.

À Professora Isabel, por toda ajuda e boa vontade para a viabilização dos ensaios.

À SLU/DF, pelo apoio dado para a coleta e descarte das amostras de resíduos sólidos.

A todos aqueles que, de qualquer maneira, interferiram positivamente para a realização desta pesquisa.

Resumo

A disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários constitui-se de uma prática mundialmente aceita como sendo segura e viável sob os aspectos econômicos, ambiental e técnico. Entretanto, o aumento das exigências visando a proteção ambiental e a estabilidade dos maciços, requer dos responsáveis técnicos um maior nível de conhecimento acerca das propriedades mecânicas dos materiais envolvidos.

Este trabalho apresenta um estudo das propriedades de resistência ao cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), com ênfase ao projeto e construção de um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões.

As amostras utilizadas na campanha de ensaios eram compostas de lixo fresco, oriundo de duas das dezenove Regiões Administrativas do Distrito Federal, e coletadas na Unidade de Tratamento de Lixo da avenida L4 Sul, em Brasília. Importante comentar que, apesar de coletadas numa estação de reaproveitamento, as amostras não passaram por qualquer tratamento.

Uma série de ensaios de cisalhamento foi realizada utilizando o equipamento construído, que por sua vez mostrou-se competente, conduzindo a resultados satisfatórios.

Os resultados dos ensaios demonstraram que não houve mobilização de picos de resistência, mesmo para deformações máximas de 50%. Os parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo) obtidos estão completamente inseridos numa zona de dados compilados da literatura por Sanchez-Alciturri *et al* (1993) para ensaios de laboratório.

Abstract

All over the world, landfill is recognized as a reliable and viable practice due to its economical, environmental and technical aspects. However, the increasing of the requirements concerning the environmental protection and the landfill stability demands from engineers a deeper knowledge on the mechanical properties of landfill materials.

Bearing in mind the above problem, it was constructed a large scale direct shear equipment with the purpose of investigate the mechanical properties of municipal solid waste (MSW).

The samples used in the experimental program consisted of fresh waste, supplied by 2 of 19 administrative region of Distrito Federal, which it was sampled in the waste treatment unit. It is important to attract attention to the fact that, although sampled in a treatment unit, the samples were not subjected to treatment.

The large scale direct shear equipment showed being competent in the carried out experiments showing satisfactory results.

The results revealed that the resistance peak was not mobilized, even for maximum strain of 50%. The resistance parameters (friction angle and cohesion) of samples are into the range reported by Sanchez-Alciturri et al (1993) to laboratory experiments using this material.

Sumário

	<i>Página</i>
1. Introdução	1
1.1. Considerações Gerais	1
1.2. Objetivos e Metodologia	3
1.3. Estrutura da Dissertação	4
2. Revisão Bibliográfica	6
2.1. Propriedades Físicas dos Resíduos Sólidos Urbanos	6
2.1.1. Composição Física do RSU	6
2.1.2. Umidade	10
2.1.3. Peso Específico	12
2.2. Propriedades Mecânicas dos resíduos Sólidos Urbanos	15
2.2.1. Introdução	15
2.2.2. Compressibilidade	16
2.2.2.1. Mecanismos dos Recalques	16
2.2.2.2. Magnitude e Velocidade dos Recalques	19
2.2.3. Resistência ao Cisalhamento	23
2.2.3.1. Ensaios de Cisalhamento Direto em Laboratório	28
2.2.3.2. Ensaios Triaxiais	34
2.2.3.3. Ensaios de Cisalhamento Direto <i>in situ</i>	41
2.2.3.4. Investigações de Campo e Retro-Análise de Dados	42
2.2.4. Envoltórias de Ruptura para Resíduos Sólidos Urbanos	44
3. Equipamento de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões	50
3.1. Considerações Iniciais	50
3.2. Especificações	50
3.2.1. Estrutura	53
3.2.2. Caixa de Cisalhamento	53
3.2.3. Mecanismos	55
3.2.4. Instrumentos	60
4. Metodologia dos Materiais e Ensaios	62
4.1. Introdução	62
4.2. Materiais	63
4.2.1. Amostragem	63
4.2.2. Caracterização das Amostras	65
4.2.2.1. Identificação	65
4.2.2.2. Teor de Umidade	66
4.2.2.3. Composição Gravimétrica	67
4.2.2.4. Distribuição dos Tamanhos de Partículas	68
4.3. Ensaios	69
4.3.1. Determinação do Atrito do Equipamento	69
4.3.2. Moldagem dos Corpos-de-Prova	69
4.3.3. Consolidação das Amostras	70

4.3.4. Cisalhamento Direto	72
5. Apresentação e Análise dos Resultados	73
5.1. Introdução	73
5.2. Ensaios de Cisalhamento Direto em Equipamentos de Grandes Dimensões	73
5.2.1. Ensaio 01	73
5.2.2. Ensaio 02	76
5.2.3. Ensaio 03	79
5.3. Considerações	82
6. Conclusões	85
6.1. Dos Ensaios	85
6.2. Dos Resultados	86
6.3. Sugestões para Trabalhos Futuros	87
Referências Bibliográficas	88

Lista de Figuras

	<i>Página</i>
Figura 2.1 – Diagrama triangular para a origem do lixo (Grisolia <i>et al</i> , 1995)	9
Figura 2.2 – Composição gravimétrica do RSU de Brasília (Junqueira, 2000)	9
Figura 2.3 – Peso específico para RSU compactados (Kavazanjian <i>et al</i> , 1995; modificada de Fasset, 1994)	14
Figura 2.4 – Curva teórica de compressibilidade do RSU (Grisolia & Napoleoni, 1996)	18
Figura 2.5 – Recalques total e anual em RSU (Gandolla <i>et al</i> , 1994)	19
Figura 2.6 – Modelo esquemático da composição dos RSU (König & Jessberger, 1997)	23
Figura 2.7 – Representação da curva tensão-deformação com interação entre as componentes de atrito e tração do RSU (Kolsch, 1993)	23
Figura 2.8 – Contribuição das componentes de atrito e coesão/tração em função da variação de tensão normal, na resistência ao cisalhamento dos RSU (Kolsch, 1993)	24
Figura 2.9 – Mobilização dos parâmetros de resistência em função das deformações axiais (Grisolia <i>et al</i> , 1995)	25
Figura 2.10 – Mobilização da coesão e ângulo de atrito com as deformações axiais, em função da presença de componentes plásticos na massa de lixo (König & Jessberger, 1997)	25
Figura 2.11 – Relação tensão-deformação para ensaios de cisalhamento direto em RSU (Manassero <i>et al</i> , 1996)	29
Figura 2.12 – Resultados de ensaios de cisalhamento direto para RSU de diferentes aterros do Canadá (Landva & Clark, 1990)	30
Figura 2.13 – Diagramas $\tau - \sigma$ para ensaios de cisalhamento direto em fardos de RSU: a) levemente compactado; b) fortemente compactado (DelGrecco & Oggeri, 1993).	32
Figura 2.14 – Mobilização dos parâmetros de resistência de RSU de diferentes idades a partir de ensaios triaxiais (König & Jessberger, 1997)	35
Figura 2.15 – Proposta de Walter (1992) <i>apud</i> Gonzalez (1995)	36
Figura 2.16 – Variação do intercepto de coesão com o teor de umidade (Gabr & Valero)	36

Figura 2.17 – Curvas de tensão-deformação obtidas por ensaios triaxiais em amostras fabricadas (Grisolia <i>et al</i> , 1995)	37
Figura 2.18 – Diagramas q x p' para diferentes níveis de deformação do resíduo sólido (Grisolia <i>et al</i> , 1995)	37
Figura 2.19 – Parâmetros de resistência para diferentes níveis de deformações, obtidos de ensaios triaxiais CD em corpos de prova de diferentes dimensões (Carvalho, 1999)	39
Figura 2.20 – Resultados típicos dos ensaios triaxiais tipo CU realizados em amostras do Aterro Sanitário Dona Juana, Bogotá (Caicedo <i>et al</i> , 2002)	40
Figura 2.21 – Variação dos parâmetros de resistência em função da deformação axial para amostras com 0 e 4 anos (Nascimento, 2007)	41
Figura 2.22 – Parâmetros de resistência para ensaios de laboratório (Singh & Murphy, 1990)	45
Figura 2.23 – Diagrama coesão <i>versus</i> ângulo de atrito com proposta da faixa recomendada para projetos (Singh & Murphy, 1990)	46
Figura 2.24 – Diagrama proposto para obtenção de parâmetros de resistência para projetos (Sanchez-Alciturri <i>et al</i> , 1993)	47
Figura 2.25 – Resultados de resistência ao cisalhamento, obtidos por vários autores (Kavazanjian <i>et al</i> (1995)	48
Figura 2.26 – Envoltórias de ruptura para RSU (Knochenmus <i>et al</i> , 1998)	48
Figura 3.1 – Vista frontal do equipamento	51
Figura 3.2 – Dimensões do equipamento	52
Figura 3.3 – Geometria dos elementos estruturais do equipamento: (a) Perfil “U” laminado original; (b) Perfil U combinado com chapa	53
Figura 3.5 – Macacos hidráulicos: (a) esforços normais; (b) esforços cisalhantes.	55
Figura 3.6 – Detalhes das roldanas	56
Figura 3.7 – (a) detalhes dos trens de roldanas; (b) trem de roldanas fixado à caixa	56
Figura 3.8 – Trilhos de rolamento: (a) vista frontal; (b) vista lateral	57
Figura 3.9 – Elementos de reação / fixação da porção superior da caixa de cisalhamento.	57
Figura 3.10 – Detalhes do elemento 1: (a) vista frontal; (b) vista lateral.	58
Figura 3.11 – Detalhes do elemento 2: (a) vista frontal; (b) vista lateral.	58
Figura 3.12 – Detalhes da mesa rolante; (a) posição inicial; (b) posição final.	59
Figura 3.13 – Sistema de coleta e condução de chorume	59

Figura 3.14 – Aplicação e medição de esforços normais	60
Figura 3.15 – Detalhes da célula de carga para a determinação de esforços cisalhantes	61
Figura 4.1 – Imagem aérea com destaque ao Plano Piloto de Brasília, Sudoeste e Cruzeiro.	63
Figura 4.2 – Galpão de recebimento de RSU: (a) coleta por caminhão basculante; (b) coleta por caminhão fechado; (c) homogeneização.	64
Figura 4.3 – Triagem dimensional das amostras	64
Figura 4.4 – Tonéis plásticos para acondicionamento e transporte das amostras	65
Figura 4.5 - Valores percentuais médios da composição gravimétrica da RSU estudado	67
Figura 4.6 – Lançamento do RSU na célula de cisalhamento	70
Figura 4.7 – Posicionamento da tampa de transmissão de esforços normais	71
Figura 4.8 – Consolidação da amostra.	71
Figura 5.1 – Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal de 0,5m (Ensaio 01)	73
Figura 5.2 – Envoltória de ruptura para diferentes níveis de deslocamento (Ensaio 1)	74
Figura 5.3 – Envoltórias lineares para diferentes níveis de deformação (Ensaio 1)	75
Figura 5.4 – Variação do ângulo de atrito e coesão em função dos deslocamentos horizontais (Ensaio 1)	76
Figura 5.5 – Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal de 50% (Ensaio 02)	77
Figura 5.6 - Envoltória de ruptura para diferentes níveis de deslocamento (Ensaio 2)	77
Figura 5.7 - Envoltórias lineares para diferentes níveis de deformação (Ensaio 2)	78
Figura 5.8 - Variação do ângulo de atrito e coesão em função dos deslocamentos horizontais (Ensaio 2)	79
Figura 5.9 - Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal de 50% (Ensaio 02)	80
Figura 5.10 - Envoltória de ruptura para diferentes níveis de deslocamento (Ensaio 3)	80
Figura 5.11 - Envoltórias lineares para diferentes níveis de deformação (Ensaio 3)	81
Figura 5.12 - Variação do ângulo de atrito e coesão em função dos deslocamentos horizontais (Ensaio 3)	82
Figura 5.13 – Envoltórias de ruptura para 50% de deformação (Ensaio 1, 2 e 3)	83
Figura 5.14 – Valores de c' e Φ' obtidos nos ensaios, plotados no diagrama proposto	84

por Sanchez-Alciturri *et al.*(1993).

Lista de Tabelas

	<i>Página</i>
Tabela 2.1 – Composição em percentagem de peso para diferentes cidades (Carvalho, 1999)	7
Tabela 2.2 – Porcentagens típicas e principais características dos componentes dos RSU de acordo com Sowers (1973)	10
Tabela 2.3 – Umidade dos componentes do RSU do aterro Bandeirantes (Carvalho, 1999)	11
Tabela 2.4 – Revisão de métodos para a determinação de parâmetros de resistência de RSU (Dixon <i>et al</i> , 2005)	27
Tabela 2.5 – Parâmetros de resistência de RSU apresentados por Turczynski (1988) para diferentes idades (Fucale, 2005).	29
Tabela 2.6 – Resultados de ensaios de cisalhamento direto em RSU resultante de pré-tratamento mecânico-biológico (de Lamare Neto, 2004)	33
Tabela 2.7 – Parâmetro de resistência (CD) das amostras de diferentes idades, sob deformação axial de 20% (Nascimento, 2007)	40
Tabela 2.8 - Parâmetro de resistência (CU) das amostras de diferentes idades, sob deformação axial de 20% (Nascimento, 2007)	41
Tabela 2.9 – Parâmetros de resistência obtidos por ensaios de cisalhamento direto <i>in situ</i>	42
Tabela 4.1 – Valores de teores de umidades das amostras	67
Tabela 4.2 – Distribuição dos Tamanhos das Partículas do RSU estudado	68
Tabela 5.1 – Tensões normais e cisalhantes atuantes para diferentes níveis de deformação	75
Tabela 5.2 – Parâmetros de resistência para diferentes graus de deformações (Ensaio 1)	75
Tabela 5.3 - Tensões normais e cisalhantes atuantes para diferentes níveis de deformação	78
Tabela 5.4 – Parâmetros de resistência para diferentes graus de deformações (Ensaio 2)	78
Tabela 5.5 - Tensões normais e cisalhantes atuantes para diferentes níveis de deformação	81
Tabela 5.6 – Parâmetros de resistência para diferentes graus de	81

deformações(Ensaio3)

Tabela 5.7 – Resumo dos parâmetros de resistência obtidos nos três ensaios

83

Introdução

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A disposição segura e viável dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tem se configurado em um grande desafio para os gestores de desenvolvimento das cidades, devido ao acréscimo em seu volume gerado e pelo aumento do potencial de contaminação. Práticas antigas de disposição de lixo, tais como acúmulo a céu aberto e lançamento em cursos de água, são hoje inaceitáveis sob o ponto de vista ambiental, sanitário e econômico. No Brasil, a solução mais comumente adotada é a da disposição do resíduo em aterros sanitários, por representar um método viável sob os aspectos técnico, ambiental e econômico.

O desenvolvimento sócio-econômico das sociedades bem como o crescimento demográfico que este implica, têm como uma das suas principais conseqüências o aumento da produção de resíduos gerados a partir das atividades desenvolvidas. A população mundial, hoje estimada em 6,7 bilhões de indivíduos, tende a ultrapassar a marca dos 9,2 bilhões nos próximos 40 anos, segundo o Departamento de Assuntos Sociais e Econômicos da ONU (UNDESA, 2007). Tal fato, aliado ao fluxo de migração de pessoas das zonas rurais para os grandes centros urbanos tem concorrido para o acréscimo da taxa de ocupação dos espaços, tornando-se com isso mais complicada a escolha de áreas apropriadas e que sejam próximas dos centros geradores para a disposição destes resíduos.

Neste cenário, os projetos de desenvolvimento urbano requerem melhor aproveitamento das áreas disponíveis, maior desempenho e menor custo de operação. A prática atualmente mais adotada é o alteamento das pilhas compactadas em aterros já existentes, e com isso tem-se aumentada a capacidade de armazenamento daquele espaço. Esta condição tem feito com que os projetos para prolongamento de vida útil dos aterros sanitários e as análises de estabilidade dos taludes de RSU sejam desenvolvidos mediante utilização de parâmetros determinados segundo métodos questionáveis ou por correlações empíricas, e em escala não representativa; ou até mesmo pela aplicação de parâmetros importados de outras localidades, subestimando

assim a importância das diferenças de características de composição, umidade e permeabilidade dentre outras características que exercem grande importância para a previsão de comportamento mecânico deste material.

A composição dos resíduos sólidos urbanos é extremamente heterogênea, podendo variar muito em tamanho das partículas e em reatividade com o meio. Existe ainda uma variação significativa dos percentuais dos principais componentes do lixo urbano de um centro gerador para outro. Tal diferenciação está relacionada com o grau de desenvolvimento econômico, tecnológico, cultural e sanitário dessas regiões, bem como com as práticas de reciclagem, incineração e os hábitos de desperdício da sociedade (Machado *et al.* 2005).

As principais propriedades mecânicas dos resíduos sólidos urbanos, compressibilidade e resistência, são fortemente influenciadas pela composição dos resíduos e também pelo comportamento de cada componente quando sujeito a diferentes condições de estocagem, exposição, drenagem etc. Dessa forma, a adoção de parâmetros importados para a representação das propriedades mecânicas dos resíduos sólidos pode incorrer em grave erro, podendo implicar em perdas humanas e materiais, bem como na degradação do meio ambiente.

Por sua vez, a determinação das propriedades geotécnicas dos RSU é um tanto complicada dado que: é considerável a dificuldade na obtenção de amostras representativas das condições *in situ*; não há normatização de procedimentos para amostragem e ensaios; são necessários estudos da influência do tempo de disposição nas propriedades do resíduo; são grandes as dificuldades de adaptação de métodos de ensaios tradicionais tanto em campo como em laboratório, dentre outras dificuldades.

Durante um longo período de tempo, poucos eram os trabalhos experimentais que buscaram estudar de maneira objetiva o comportamento mecânico dos RSU, sobretudo sob os aspectos de deformabilidade e resistência. Entretanto, nos últimos anos, graças a trabalhos realizados por Santos & Presa (1995), Carvalho (1999), Oliveira (2002), Tapahuasco (2005) dentre outros, muito se avançou no tocante ao estudo da deformabilidade dos maciços no Brasil.

Quanto ao estudo da resistência, ainda são poucas as referências que podem ser citadas por determinar parâmetros resistivos para resíduos sólidos urbanos, dentre os quais: Carvalho

(1999), Fucale & Jucá (2002), Oliveira (2002), de Lamare Neto (2004), Fucale (2005) e Martins (2006). Em todo o mundo o assunto tem sido abordado e uma grande quantidade de resultados tem sido publicada, porém apresentam grande faixa de dispersão de valores.

Dentro deste contexto, este trabalho se propõe a estudar o RSU oriundo de atividades humanas em duas das dezenove Regiões Administrativas do Distrito Federal, sob o ponto de vista da resistência ao cisalhamento por meio de ensaios de grandes dimensões, visando contribuir para uma melhor compreensão acerca do comportamento mecânico resistivo dos resíduos sólidos urbanos.

1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

Esta dissertação tem por objetivo a construção de um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões que possibilite estudar a resistência dos RSU, contemplando condições de escala compatíveis com as situações reais encontradas nos depósitos de resíduos.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental do Programa de Pós Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), em amostras coletadas na Unidade de Tratamento de Lixo da Asa Sul, visando a obtenção de dados de maneira mais aproximada o possível das condições em que os fenômenos mecânicos ocorrem no maciço, possibilitando assim uma interpretação segura dos resultados.

Dessa forma, os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- i) projetar e construir um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões;
- ii) compreender o comportamento mecânico do RSU estudado submetido ao ensaio de cisalhamento direto;
- iii) estabelecer comparação entre a resistência do material estudado nesta pesquisa e dados encontrados na literatura.

Para a obtenção dos objetivos acima descritos, estabeleceu-se metodologia na qual constavam os seguintes procedimentos:

- i) revisão bibliográfica, baseada nas publicações mais recentes acerca do tema proposto, em âmbito nacional e internacional;
- ii) preparação das amostras visando a reprodução mais realística possível das condições de confinamento das amostras nos corpos de aterros;
- iii) caracterização das amostras estudadas para posterior análise de influência nos resultados;
- iv) execução dos ensaios de cisalhamento direto das amostras;
- v) interpretação dos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto;
- vi) comparação dos resultados obtidos com os encontrados na literatura.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Buscando otimizar a compreensão do tema abordado, a apresentação da dissertação está dividida em seis capítulos, conforme descrição sucinta abaixo:

No Capítulo 1 é feita uma breve introdução sobre o tema, ressaltando a importância do estudo do comportamento dos resíduos sólidos urbanos sob condições de cisalhamento direto. Neste capítulo são também expostos de maneira sucinta, os objetivos principais da pesquisa e a metodologia adotada para a obtenção dos resultados.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, contemplando tanto conteúdo afim ao tema da dissertação quanto conceituações auxiliares, de grande valia para uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos na pesquisa, e que por isso se mostram pertinentes.

No Capítulo 3 são descritos os critérios de projeto e peculiaridades da construção e operação do equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões.

No Capítulo 4, são expostas as metodologias dos procedimentos utilizados para obtenção e manuseio e preparação das amostras, bem como dos ensaios realizados.

No Capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões quanto ao trabalho realizado, bem como recomendações para pesquisas futuras.

Revisão Bibliográfica

2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários visa seu confinamento de maneira que ocupem a menor área possível e que sejam reduzidos ao menor volume permissível. Para tanto, devem ser aplicados princípios da Engenharia Geotécnica tais como os relacionados com a resistência ao cisalhamento, compressibilidade, compactação e drenagem, que exigem o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas do resíduo a ser utilizado.

Em geral, para a determinação das propriedades dos resíduos urbanos são usados conceitos desenvolvidos para estudar o comportamento mecânico dos solos. Tal aplicação tende a apresentar uma grande dispersão dos parâmetros, ou até mesmo inconsistências, já que são inúmeras as diferenças entre os dois tipos de material.

Neste capítulo serão abordadas algumas das propriedades físicas dos resíduos sólidos (composição, peso específico, umidade, gravimetria) e suas implicações nas principais propriedades geotécnicas dos mesmos (compressibilidade e resistência ao cisalhamento).

2.1.1. COMPOSIÇÃO FÍSICA DO RSU

Assim como nos solos, os resíduos sólidos urbanos podem ser subdivididos em fases, sendo elas: sólida, líquida e gasosa. Entretanto, para os RSU há variação dos percentuais das fases com o tempo, em função dos processos de biodegradação. Então, o ponto básico para a compreensão do comportamento dos maciços de RSU é o conhecimento das interações existentes entre as três fases e as alterações destas com o tempo (Carvalho, 1999).

A composição dos resíduos sólidos urbanos é extremamente heterogênea, podendo variar muito em tamanho das partículas e em reatividade com o meio. Existe ainda uma variação significativa dos percentuais dos principais componentes do lixo urbano de um centro gerador para outro. Tal diferenciação está relacionada com o grau de desenvolvimento econômico, tecnológico, cultural e sanitário dessas regiões, bem como com as práticas de reciclagem, incineração e os hábitos de desperdício da sociedade (Machado *et al.* 2005). A Tabela 2.1 apresenta valores médios da variação de composição para diferentes cidades, conforme Carvalho (1999).

Tabela 2.1 – Composição em porcentagem de peso para diferentes cidades (Carvalho, 1999).

RSU	Cidade / País							
	Bangkok Tailândia	Pequim China	New York USA	Istambul Turquia	Atenas Grécia	Cochabamba Bolívia	Recife Brasil	São Paulo Brasil
Metal	1	1	5	2	4	1	2	5
Papel	25	5	22	10	19	2	15	14
Plástico	-	1	-	3	7	3	8	14
Borracha, couro e madeira	7	1	3	6	4	1	-	7
Têxteis	3	-	-	3	-	-	-	3
Mat. Org.	44	45	20	61	59	71	60	51
Vidro	1	1	6	1	2	1	2	1
Outros	19	46	46	14	5	21	13	5

Inicialmente, há predomínio de componentes sólidos, e segundo Santos & Presa (1995), o processo de degradação biológica transforma a matéria orgânica sólida inicial numa considerável quantidade de gases e líquidos. Estas alterações são dependentes do teor de umidade, conteúdo orgânico e das condições climáticas locais, mais especialmente da temperatura.

De acordo com Grisolia & Napoleoni (1996) a fase sólida constituinte dos RSU pode ser dividida em três classes: os materiais orgânicos, os materiais inertes estáveis e os inertes deformáveis. A parte orgânica (restos de alimentos, podas, papéis) é susceptível à biodegradação e é a maior responsável pelas transições de fases num maciço. O material inerte dimensionalmente estável (vidros, metais, resíduos de construção e demolições, solo, etc) tem comportamento mecânico semelhante aos solos granulares e conferem resistência ao atrito entre partículas. Plásticos, borrachas e fibras têxteis formam um grupo de material inerte, porém que apresenta alta deformabilidade quando sujeito a carregamentos, bem como influenciam sobremaneira na umidade do material devido à capacidade que estes materiais têm de reter fluidos.

Tais diferenciações de natureza física e química destes materiais, bem como dos percentuais na composição gravimétrica do RSU de uma região para outra, acabam por tornar complicada a elaboração de projetos de aterros sanitários. Desta forma, Dixon & Langer (2006) defendem a criação de um sistema de classificação criterioso dos resíduos a serem dispostos, de maneira que se possam agrupar materiais com mesmas propriedades mecânicas. Com isso torna-se possível a troca de informações e interpretações de propriedades medidas.

Landva & Clark (1990) propuseram uma forma de classificação dos elementos sólidos de um maciço, dividindo-os em quatro grupos:

- I. Orgânicos Putrescíveis (OP) – diz respeito a materiais que têm tendência ao rápido apodrecimento, tais como restos de alimentos, raízes, resíduos de poda e jardinagem, etc;
- II. Orgânicos não Putrescíveis (ON) – correspondem aos materiais de origem orgânica, mas que necessitam de um tempo maior para sua completa degradação. Exemplos: borracha, couro, papeis, tintas, plásticos, etc;
- III. Inorgânicos Degradáveis (ID) – esta classe está basicamente compreendida pelos metais;
- IV. Inorgânicos não Degradáveis (IN) – os materiais aqui agrupados (cerâmicas, vidros, solos, entulho de construção, etc) são ditos inertes e possuem muito baixo potencial de decomposição.

Há uma grande concordância entre pesquisadores de que a composição gravimétrica do RSU espelha o nível de renda da população, e é de se esperar que regiões mais ricas gerem um menor percentual em massa de material orgânico, haja visto que é grande o consumo de alimentos semi-prontos e processados. Por sua vez, é maior a geração de resíduos de vidro e plásticos, decorrentes do consumo de supérfluos: bebidas, conservas e outros.

Grisolia *et al.* (1995) apresentaram um diagrama para dados de composição gravimétrica para diferentes países e regiões, vide Figura 2.1:

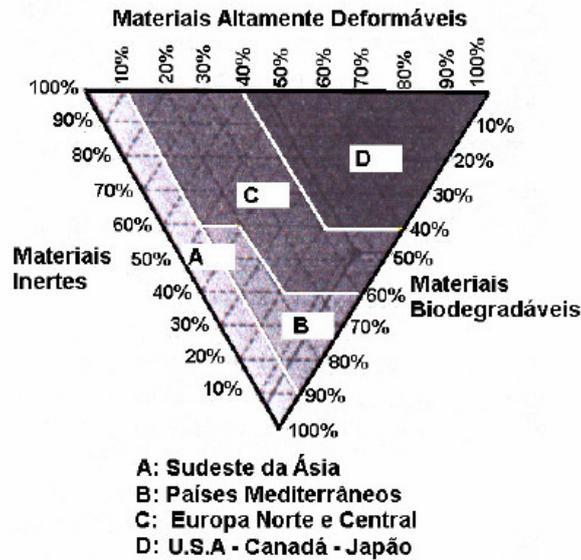


Figura 2.1 – Diagrama triangular para a origem do lixo (Grisolia *et al.* 1995)

O conhecimento da composição física dos resíduos é de fundamental importância, pois condiciona o comportamento global do aterro. A Figura 2.2 apresenta dados da composição gravimétrica do RSU de Brasília:

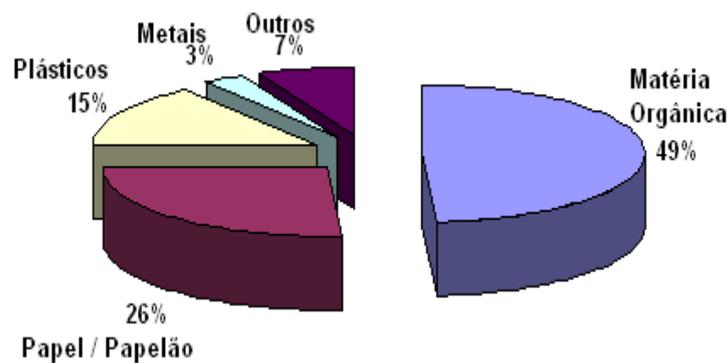


Figura 2.2 – Composição gravimétrica do RSU de Brasília (Junqueira, 2000)

O percentual de matéria orgânica está diretamente vinculado ao teor de umidade, à permeabilidade e ao peso específico da massa de lixo (de Lamare Neto, 2004). Plásticos, panos e trapos, couro, borrachas dentre outros materiais, constituem-se em componentes fibrosos, afetando diretamente o comportamento do maciço quanto à resistência ao cisalhamento, pois conferem valores elevados de “falsa coesão”. Já a presença de materiais inertes e dimensionalmente estáveis como entulhos e solo proporcionam ao RSU resistência ao atrito entre as partículas.

A Tabela 2.2 mostra um arranjo típico de percentuais de constituição dos resíduos sólidos urbanos e suas principais características, de acordo com Sowers (1973).

Tabela 2.2 – Percentagens típicas e principais características dos componentes dos RSU (Sowers, 1973)

Material	Porcentagem (em peso)	Característica
Resíduos orgânicos	10 – 20	Úmido, fermenta e degrada rapidamente, compressível, baixa resistência
Papel e pano/trapos	10 – 40	Seco a úmido, degrada, queima, compressível
Resíduos de poda	10 – 20	Úmido, fermenta, degrada, queima
Plásticos	1 – 2	Seco, compressível, resistente à degradação, mas susceptível à queima
Instrumentos de metal	5 – 15	Seco, corrosível, triturável
Metal maciço	1	Seco, levemente corrosível, rígido
Borracha	5 – 10	Seco, elástico, pode ser queimado, compressível, resistente à degradação
Vidro	5 – 15	Seco, triturável, compressível, resistente à degradação
Madeira de demolição	0 – 5	Seco, triturável, compressível, degradável, queima
Entulho	0 – 10	Úmido, triturável, erodível, resistente à degradação
Cinzas e escória	0 – 5	Úmido, compressível, quimicamente ativo, parcialmente solúvel

2.1.2. UMIDADE

O teor de umidade (w) do RSU depende da composição inicial do material, das condições climáticas locais, do processo de operação dos aterros, da taxa de decomposição biológica, da capacidade e funcionamento dos sistemas de coleta de líquidos percolados e do sistema de *liner* do recobrimento (Carvalho, 1999).

Landva & Clark (1990) e Knochenmus (1998) preconizam que quanto maior o percentual de matéria orgânica no interior da massa de lixo, maiores teores de umidade serão observados. Estudando o aterro sanitário Bandeirantes, em São Paulo, Carvalho (1999) constatou que o teor de umidade pode variar muito entre dois pontos distintos, e por isso, recomenda a confecção de perfis de umidade *versus* profundidade.

Entretanto, independentemente de variações de profundidade entre pontos superficiais distintos, podem ocorrer bolsões de umidade nos maciços, decorrentes da presença de

materiais tais como plásticos, borracha, papéis, papelões, couros, madeira, dentre outros, que retêm ou até mesmo absorvem líquidos em sua estrutura. Sendo então, também aconselhável a obtenção de amostras representativas para a determinação da umidade da massa de lixo.

Diversos autores propõem diferentes maneiras de obter o teor de umidade das amostras de resíduo sólido. De uma maneira geral, em Geotecnia, o teor de umidade dos RSU é obtido baseado na relação entre as massas de água e massa seca, submetendo-se a amostra ao secamento em estufa, a no máximo 70°C. A submissão de amostras a temperaturas superiores a 70°C tende acarretar queima de matéria orgânica, e com isso pode-se descaracterizar o material ensaiado.

Contudo, Tchonobanoglous *et al.* (1993) defende que a determinação dos teores de umidade dos resíduos sólidos pode também ser realizada tomando-se por base a massa úmida da amostra, tal qual é usado na Agronomia. Outro procedimento, este com maior aceitação no meio ambiental, é a determinação da umidade volumétrica (θ_w), que relaciona os volumes de água e volume de sólidos, ao invés das massas.

Vale salientar que diferentes procedimentos geram diferentes resultados de umidade das amostras de lixo. Carvalho (1999) apresentou uma comparação entre valores de umidade para material proveniente do aterro Bandeirantes, segundo metodologias de ensaios diferentes, tal como se pode observar na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Umidade dos componentes do RSU do aterro Bandeirantes (Carvalho, 1999)

Componente	Teor de Umidade (%)	
	Base Seca	Base Úmida
Metais	19,6	16,4
Papel	74,8	42,8
Vidro	5,9	5,7
Plástico	41,5	29,3
Borracha	24,5	19,6
Têxteis	55,0	35,5
Pedra	12,6	11,2
Madeira	69,8	41,1
Pasta orgânica	47,0	32,0

Apesar das diferenças de propostas para obtenção do índice de umidade, é consenso geral a importância da concentração de fluidos na massa de resíduo para a decomposição da mesma,

e suas implicações no comportamento mecânico, sob o ponto de vista principalmente, dos recalques e resistência ao cisalhamento.

Analisando dados de ensaios realizados no aterro Bandeirantes, em São Paulo, Carvalho (1999) verificou que à medida que os pontos de coleta se tornavam mais profundos, maiores os teores de umidade encontrados para tais amostras. Deve-se registrar que, Coumolous *et al.* (1995), estudando o aterro de Atenas, verificaram que a concentração de fluidos diminuía com o acréscimo de profundidade.

Fucale & Jucá (2002), em estudos realizados em aterros das regiões metropolitanas de Recife e de Salvador, verificaram uma variação da umidade do RSU em função da idade do aterro, de onde concluíram que, para massas com maior idade, os valores de umidade tendem ao decréscimo.

Diante de tantas divergências, e sabendo-se que as propriedades físicas e mecânicas dos resíduos são variáveis em função de diversos fatores tais como constituição, condições iniciais de deposição, condições climáticas, métodos de operação do aterro, especificação de cobertura, dispositivos de drenagem, dentre outros, não se pode estabelecer uma regra para a variação de umidade dos aterros sanitários, sobretudo pela complexidade e heterogeneidade do material envolvido.

2.1.3. PESO ESPECÍFICO

Uma das características determinantes no comportamento geotécnico de qualquer aterro é o estado de tensões induzido pelo peso próprio dos materiais que o constituem. Desta forma, torna-se incoerente o estudo do comportamento mecânico de qualquer material aterrado sem que seja conhecido seu peso específico.

O peso específico do RSU pode ser determinado como sendo a relação entre o peso e o volume da massa de resíduo, conforme demonstrado na expressão 2.1.

$$\gamma = \frac{P_t}{V_t} \quad (2.1)$$

onde:

P_t = massa total da amostra

V_t = volume total da amostra

Assim como para outras propriedades físicas, o peso específico (γ) do RSU também é variável em função de condições de composição, estocagem, taxa de degradação da matéria orgânica, estado de compactação, profundidade, etc.

Segundo Martins (2006), quanto maior a percentagem de matéria orgânica na massa de lixo, maior o seu peso específico. Fato verificado por de Lamare Neto (2004), que ao analisar a composição gravimétrica do resíduo sólido proveniente de várias regiões da cidade do Rio de Janeiro, constatou que para regiões mais pobres os resíduos apresentavam maior peso específico que o gerado nas porções mais nobres da cidade. Como já visto anteriormente, o desenvolvimento econômico implica em maior consumo de alimentos processados e semi-prontos, descartáveis, embalagens, etc., o que diminui o percentual de material de origem orgânica no lixo gerado.

Deve-se observar que o peso específico dos RSU é variável, afinal o mesmo é composto de vários tipos diferentes de materiais, que tendem a apresentar alterações ao longo do tempo de disposição.

Vários autores defendem que o grau de compactação do aterro exerce função essencial sobre a condição de peso específico do RSU. Tal afirmativa encontra grande aceitação uma vez que o resíduo sólido urbano é constituído de material com elevado índice de vazios e de alta compressibilidade. Manassero *et al.* (1996) e König & Jessberger (1997) apresentam valores de pesos específicos para diferentes graus de compactação que vão desde 3kN/m³ a 17kN/m³, porém os valores médios situam-se em torno de 9 a 12 kN/m³. Ao estudar os efeitos da compactação na compressibilidade do RSU do aterro Bandeirantes, Marques (2001) verificou que o teor de umidade da massa de lixo é o principal agente controlador nos processo de compactação dos aterros de RSU.

Em contrapartida, Fasset *et al.* (1994) verificaram que camadas de resíduos fracamente compactadas, quando situadas a profundidades entre 10m e 20m, adquirem peso específico

semelhante às camadas inicialmente bem compactadas. Wiemer (1982), Kavazanjian *et al.* (1995) e König & Jessberger (1997), advogam que o peso específico do RSU tende a aumentar com a profundidade para aterros mais antigos, porém os acréscimos deixam de ser significativos para grandes profundidades, tal como pode ser observado na Figura 2.3 . Esta afirmação se baseia na bioconsolidação do RSU e na compressão devido à sobrecarga imposta pelas camadas superiores.

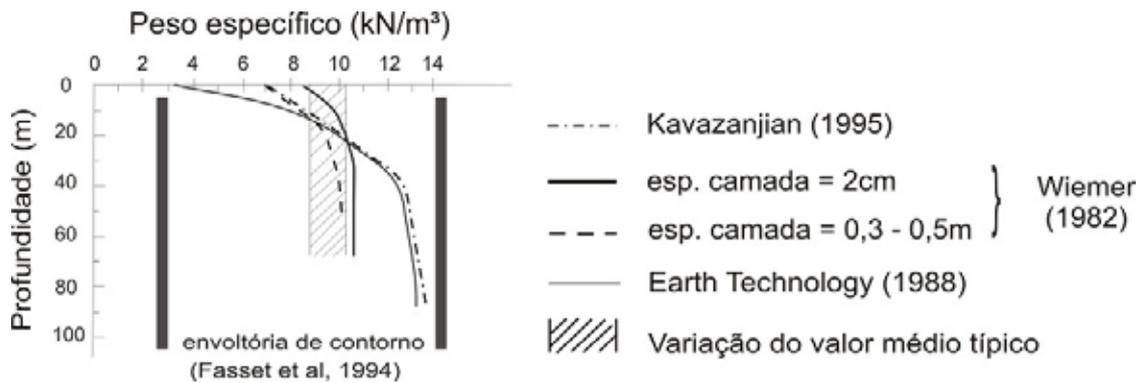


Figura 2.3 – Peso específico para RSU compactados (Kavazanjian *et al.*, 1995; modificada de Fasset, 1994)

Uma técnica muito comum em Geotecnia para a determinação de peso específico *in situ*, se constitui na abertura de poços ou trincheiras no maciço compactado, a partir do qual se procede a pesagem do material retirado. Em seguida, a cava é revestida com uma manta sintética e impermeável para que se possa preencher a cava com água. Com os dados de pesagem e volume, utilizando a Equação 2.1 determina-se o peso específico de campo do maciço.

Landva & Clark (1990), Gotteland *et al.* (1995) e Gonzalez (1995) alertam para as dificuldades na obtenção de bons parâmetros para peso específico de resíduos sólidos urbanos, dada a natureza heterogênea e irregular dos materiais constituintes do lixo. Para Landva & Clark (1990), os poços devem ter suas dimensões determinadas de maneira que eliminem influências da heterogeneidade bem como dos vazios entre partículas; e sugerem como representativas, cavidades com 10m³. Porém, como ressalta Gonzalez (1995), e até mesmo os autores da proposta, existe a dificuldade na aplicação da recomendação na medida em que se torna difícil evitar que uma ou mais camadas de cobertura sejam envolvidas.

No tocante à influência do peso específico do RSU na resistência ao cisalhamento, Carvalho (1999), Fucale & Jucá (2002) e Fucale (2005) concluem que estas grandezas estão relacionadas de maneira diretamente proporcional, ou seja, para resíduos com maiores índices de peso específico, são esperados valores mais significativos para resistência.

2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

2.2.1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da atualidade para a Engenharia Geotécnica se constitui em aproveitar melhor os poucos espaços disponíveis para a construção de aterros sanitários, e isto tem invariavelmente conduzido a projetos mais ousados com relação à inclinação de seus taludes. Segundo Santos & Presa (1995), esses avanços exigem, dentre outros requisitos, conhecimentos da geotecnia clássica, aplicáveis a qualquer outro tipo de obra da Engenharia Geotécnica, tais como: escolha de sítios, projeto, construção, operação, monitoramento, instrumentação e observação do comportamento mecânico das obras.

Knochenmus *et al.* (1998) definem que as principais propriedades mecânicas a serem consideradas para o estudo da estabilidade de taludes de resíduos são a compressibilidade e a resistência ao cisalhamento. Por sua vez, estas propriedades sofrem influências das variações ocorridas dentro de um maciço em função da decomposição, da idade do resíduo, condições de estocagem, drenagem, dentre outras.

Segundo Fucale (2005), a interpretação dos resultados dos ensaios em resíduos sólidos continua sujeita a muitas incertezas devido à falta de um modelo conceitual de referência do comportamento deste material. Devido à grande complexidade que envolve a natureza e o comportamento dos resíduos, ainda hoje, as propriedades mecânicas dos RSU são avaliadas, tanto em laboratório como em campo, segundo métodos originalmente desenvolvidos para solos.

2.2.2. COMPRESSIBILIDADE

2.2.2.1. MECANISMOS DOS RECALQUES

A compressibilidade do RSU se constitui num importante fator a ser considerado para a previsão das movimentações dos maciços compactados. A previsão de recalques das massas de lixo permite uma melhor avaliação de desempenho dos elementos que fazem parte da estrutura de um aterro (camadas de cobertura, sistemas de coleta de gases e fluidos, reforço, drenagem superficial, caixas de passagem, poços de inspeção). Ademais, a quantificação da deformabilidade das massas de lixo auxilia num importante aspecto do gerenciamento dos resíduos sólidos, que é a melhoria das estimativas de vida útil dos aterros, uma vez que permite calcular a capacidade volumétrica adicional de armazenamento que os recalques geram.

O resíduo depositado se transforma devido à ação integrada de processos físico-químicos e biológicos. As modificações biológicas desempenham um papel sensível, atuando sobre os resíduos putrescíveis, de degradação mais fácil, tais como restos de verduras, frutas, carnes, folhas, e, em certa medida, sobre os resíduos de celulose, tais como papéis, cartões, papelões e madeira (Santos & Presa, 1995).

Como principais agentes da degradação da matéria que compõe o RSU, Van Meerten *et al.* (1995) citam: a idade do resíduo, a composição gravimétrica, a umidade, o teor de matéria orgânica, a temperatura e a disponibilidade de nutrientes para o crescimento microbiológico, e os detalhes de projeto para construção e operação do aterro, tais como compactação, especificações de cobertura diária e final, sistemas de drenagem e coleta de gases.

A matéria orgânica, inicialmente sólida, sofre ação microbiológica, o que provoca sua transformação em uma grande quantidade de gases metano (CH₄), gás carbônico (CO₂), ácido sulfídrico (H₂S), amoníaco (NH₃), dentre outros gases; e uma menor quantidade de líquido (chorume). Gandolla *et al.* (1994) defendem que cerca de 25% da massa total do depósito é transformada em biogás.

A massa de gás gerada é coletada, criando no maciço uma estrutura meta-estável. A submissão a carregamentos estáticos (peso das camadas superiores do aterro) ou dinâmicos

(vibrações), juntamente com a percolação de fluidos, ocasionam o colapso da estrutura porosa e conseqüentemente a redução do volume total.

Deve-se salientar que a degradação por ação biológica ocorre sob duas condições: a aeróbia, e a anaeróbia, ou seja, com presença ou não de oxigênio. A transformação aeróbia (com presença de oxigênio) é mais rápida, ao passo que a degradação anaeróbia (sem presença de oxigênio) é mais lenta. Fatos verificados por Tapahuasco (2005) que, ao avaliar os recalques de células experimentais construídas no Aterro do Jockey Clube de Brasília com diferentes materiais para camada de cobertura (argila compactada e entulho de construção), constatou que as células cobertas com entulho de construção, que possibilitavam a aeração do resíduo confinado, apresentavam maiores deslocamentos verticais que os observados nas células cobertas com material argiloso compactado.

A fase líquida, gerada em função da degradação biológica da matéria orgânica presente no lixo, também contribui para a redução de volume do maciço uma vez que, inicialmente há a conversão de material sólido em líquido, e este por sua vez desloca-se, aumentando a porosidade do meio. Em segundo lugar, ao percolar, este líquido pode ocasionalmente, solubilizar partículas e conduzi-las, depositando-as em vazios maiores.

Sowers (1973), Gandolla *et al.* (1994), Santos & Presa (1995), Manassero *et al.* (1996) apresentaram seqüências de fatores que, segundo os autores, favorecem os mecanismos geradores de recalques em aterros, e estes podem ser descritos, de maneira resumida como sendo:

- Re-arranjo estrutural decorrente do peso próprio e da ação de sobrecargas de camadas sobrejacentes do aterro e dos materiais de cobertura;
- Perda de massa para o exterior do depósito, sobretudo pela fuga de gases;
- Migração de fragmentos, solubilizados em água infiltrada ou em chorume, e depositados em vazios maiores dentro da massa de lixo;
- Transformações físico-químicas causadas por processos de corrosão, oxidação e degradação dos componentes inorgânicos;
- Dissipação da pressão neutra de líquidos e gases.

Vale então ressaltar que são muitas as diferenças que regem os mecanismos de recalques nos solos e nos resíduos. Assim sendo, não se deve lançar mão das premissas da Mecânica dos Solos Clássica para a previsão de recalques em resíduos sem as devidas adaptações necessárias.

Grisolia & Napoleoni (1996) propuseram uma curva teórica subdividida em fases, capaz de explicar os mecanismos controladores do recalque em depósitos de RSU, como pode ser observado na Figura 2.4.

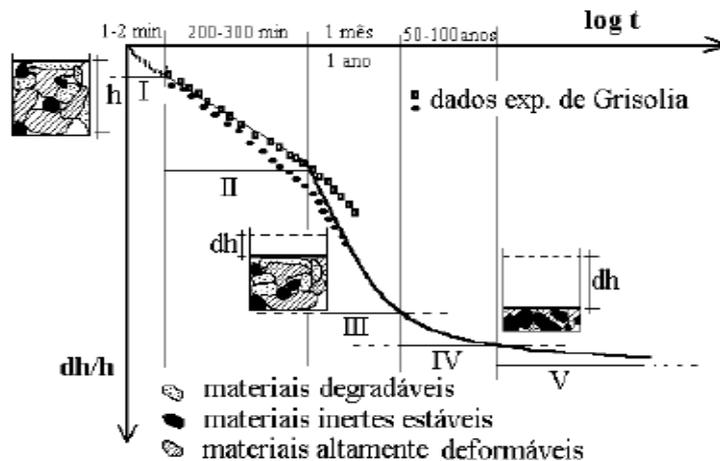


Figura 2.4 – Curva teórica de compressibilidade do RSU (Grisolia & Napoleoni, 1996)

As fases representadas podem assim ser descritas:

- Fase I – Deformação inicial, redução da macroporosidade
- Fase II – Recalque residual dos materiais altamente deformáveis
- Fase III – Deformação lenta e decomposição da matéria orgânica
- Fase IV – Deformação concluída
- Fase V – Deformação residual

Grisolia & Napoleoni (1996) defendem ainda que os depósitos de RSU recalcam cerca de 10 a 30% somente sob a ação de seu peso próprio, e que cerca de 90% dos recalques totais esperados ocorrem nos dez primeiros anos após o fechamento do aterro. Gandolla *et al.* (1994), confirmaram tais afirmações quando realizaram ensaios em células experimentais, conforme pode ser observado na Figura 2.5.

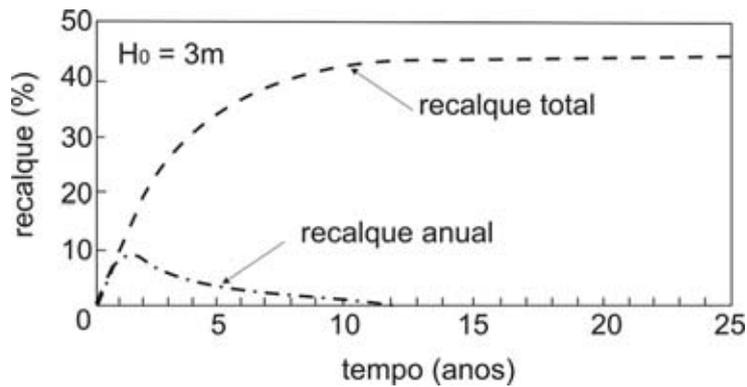


Figura 2.5 – Recalques total e anual em RSU (Gandolla *et al.* 1994)

2.2.2.2. MAGNITUDE E VELOCIDADE DOS RECALQUES

Sowers (1973), pioneiramente, apresentou um modelo para análise quantitativa da magnitude e velocidade dos recalques em aterros de RSU. Após isto, inúmeros pesquisadores deram seguimento aos estudos acerca do tema, apresentando modelos alternativos, baseados principalmente na observação e monitoramento dos recalques, a fim de construir uma base de dados capaz de sustentar novos modelos. Entretanto, ainda hoje, sua proposta continua sendo bastante utilizada por conta da aceitabilidade dos resultados obtidos e relativa simplicidade do método.

Hoje, na literatura, é possível encontrar diversos tipos de modelos utilizados para estimar o grau de deformação dos maciços de resíduo sólido urbano. Segundo Nascimento (2007), a maioria dos modelos existentes pode ser dividida nas seguintes categorias:

- modelos de consolidação, que se utilizam da Teoria do Adensamento Unidimensional de Terzaghi para a previsão dos recalques;
- modelos que se apóiam na descrição do processo reológico;
- modelo de biodegradação, onde a degradação da matéria orgânica provoca redução de volume da massa de resíduos, podendo ser avaliada por modelos de geração de gás;
- modelos baseados em regressões logarítmicas, hiperbólicas, bi-linear, multilinear, etc., baseadas em dados de campo.

De maneira muito semelhante à Teoria do Adensamento Unidimensional de Terzaghi, utilizada para o estudo dos recalques totais em solos, os recalques em resíduos podem ser divididos em três etapas, a saber:

- i. Compressão inicial – efeito relacionado à sobrecarga inicial causada pelo despejo de material, bem como dos processos de compactação. Ocorre imediatamente após a aplicação da sobrecarga.
- ii. Compressão primária – esta etapa de compressão dos RSU está relacionada com a redução de volume que a massa de lixo apresenta quando há a drenagem dos líquidos presentes no interior do aterro.
- iii. Compressão secundária – o mecanismo que rege esta etapa do recalque nos RSU se baseia nos processos de degradação que se desenvolvem no interior da massa de lixo.

A magnitude dos recalques em aterros, decorrentes de solicitações mecânicas (recalques inicial e primário) podem ser aferidas através expressão 2.2, que é muito conhecida pela Engenharia Geotécnica para a determinação dos recalques em solos normalmente adensados:

$$\Delta H_1 = \frac{H_0}{(1 + e_0)} \cdot C_c \cdot \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta \sigma_v}{\sigma'_{v0}} \quad (2.2)$$

onde:

ΔH_1 – recalque da camada de espessura H_0

e_0 – índice de vazios inicial

C_c – Coeficiente de compressão

σ'_{v0} – pressão vertical inicial

$\Delta \sigma_v$ – acréscimo de pressão vertical

Importante notar que o coeficiente C_c não está propriamente ligado ao trecho da reta virgem e sugere que quanto maiores os teores de matéria orgânica, maiores os valores encontrados para o índice.

Sowers (1973) preconiza que os recalques gerados por solicitações mecânicas ocorrem num período curto (um a dois meses após a aplicação do carregamento), pois a elevada permeabilidade dos RSU não permite o surgimento de excesso de poropressão. Depois de

concluídas as fases iniciais de deslocamentos verticais, inicia-se a compressão secundária do material. Segundo o mesmo, esta parcela dos recalques estaria relacionada à ação combinada da compressão mecânica e das alterações físico-químicas e biológicas do resíduo.

Para a determinação matemática do fenômeno, propôs a seguinte expressão:

$$\Delta H_2 = \frac{H_0}{(1 + e_0)} \cdot C_\alpha \cdot \log \frac{t + \Delta t}{t} \quad (2.3)$$

onde

ΔH_2 – recalque da camada de espessura H_0

e_0 – índice de vazios inicial

C_α – Coeficiente de compressão secundária

t – tempo

O coeficiente C_α está relacionado ao índice de vazios inicial do processo, bem como às condições favoráveis à biodegradação. É um parâmetro de difícil determinação dado a complexidade em se determinar e_0 e de estabelecer as condições de decomposição.

Carvalho (1999) advoga que a dificuldade em empregar a proposta de Sowers (1973) está relacionada à obtenção de C_c , C_α e e_0 , haja vista a heterogeneidade e a presença de materiais de grandes dimensões, sendo, portanto necessária à aplicação de ensaios e equipamentos de grandes dimensões, para a determinação de parâmetros confiáveis.

Em suma, as expressões propostas buscam fornecer ferramentas para a estimativa de recalques em RSU, de maneira que se obtenha a previsão dos recalques totais pela soma das parcelas. Não obstante, nenhuma dessas expressões permite prever colapsos associados a combustões, vibrações importantes, fluxos torrenciais e não disciplinados de águas superficiais, ascensões descontroladas de níveis d'água, instabilizações localizadas de taludes, variações notáveis de sucção, especialmente no que tange à previsão das velocidades associadas (Santos & Presa, 1995).

2.2.3. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Atualmente, as soluções mais utilizadas para melhorar o aproveitamento de aterros já existentes se constituem no alteamento das pilhas compactadas. Ao mesmo tempo, a busca pelo melhor aproveitamento das poucas áreas disponíveis para a instalação de novos aterros sanitários tem exigido projetos que contemplem taludes cada vez mais íngremes. Para tanto, as avaliações das condições de segurança demandam o conhecimento dos comportamentos de tensão-deformação e da resistência do RSU.

No estágio atual de conhecimento do comportamento dos resíduos sólidos, podem-se considerar aceitáveis os conceitos teóricos importados da Mecânica dos Solos clássica na interpretação de dados de ensaios com RSU. Desta maneira, os conceitos de ângulo de atrito (ϕ') e de intercepto coesivo (c') são normalmente utilizados, e determinados segundo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Muito embora os RSU apresentem comportamento mecânico diferente dos solos, muitos autores têm reconhecido o método como útil no estudo da resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos.

As principais propriedades mecânicas dos resíduos sólidos urbanos são fortemente influenciadas pela composição e estado de alteração do resíduo, bem como pelo comportamento mecânico de cada componente (Knochenmus *et al.* 1998).

Com relação às propriedades de resistência, mesmo com diferenças na composição, idade e estado de alteração, o RSU apresenta um comportamento bastante peculiar que o distingue dos outros materiais geotécnicos, pois sua curva tensão-deformação não apresenta pico de ruptura, mesmo para grandes deformações (König & Jessberger, 1997).

Kockel (1995), citado por König & Jessberger (1997), propõe um modelo da composição matricial dos resíduos sólidos urbanos. Este modelo contempla a estrutura física dos RSU como sendo constituída por duas matrizes: uma matriz básica, composta de material fino e granular, que apresenta comportamento friccional; e uma matriz de reforço, caracterizada pela ação de componentes fibrosos (plásticos, couros, papéis, papelões, tecidos, etc) resistentes à tração.

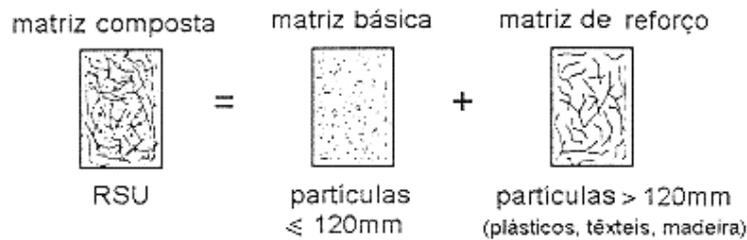


Figura 2.6 – Modelo esquemático da composição dos RSU (König & Jessberger,1997)

A estrutura do RSU, composta pela associação das duas matrizes, confere à massa de lixo um comportamento resistivo muito semelhante ao apresentado pelos maciços de solo reforçados com fibras: até certo ponto, à medida que as deformações evoluem, o material tende a se apresentar mais resistente.

A interação entre as forças de atrito e de tração dentro de uma massa de resíduo sujeita ao cisalhamento é representada na Figura 2.7:

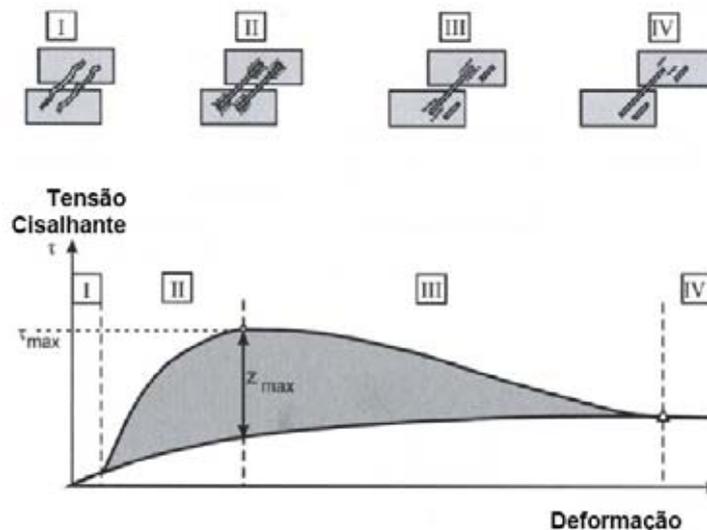


Figura 2.7 – Representação da curva tensão-deformação com interação entre as componentes de atrito e tração do RSU (Kölsch, 1993)

Kölsch (1993) explica que, para pequenas deformações (FASE I) há apenas a mobilização das forças de atrito. À medida que as deformações aumentam, as fibras passam a ser tracionadas (FASE II) e a parcela das forças de tração aumentam até um valor máximo ($z_{máx}$) correspondente à resistência à tração das fibras e/ou da interação com o restante do lixo. Em seguida, há a redução gradativa da contribuição das forças de tração (FASE III), até que se

atinga o ponto a partir do qual a resistência ao cisalhamento do resíduo é devida tão somente às componentes de atrito (FASE IV).

De acordo com Kölsch (1993), a resistência ao atrito aumenta linearmente com o acréscimo de tensão normal. Por sua vez, a resistência às forças de tração, que é exercida pelas fibras, é dependente do grau de interação das mesmas com a massa de lixo, ou seja, só passa a ser mobilizada a partir de um determinado nível de tensão normal atuante.

Na Figura 2.8 é possível notar que existe um nível de tensão normal (σ_1) a partir do qual há uma deflexão ascendente da envoltória de resistência. Tal alteração se deve à mobilização da resistência à tração imposta pelas fibras presentes na massa de RSU. Os valores de resistência ao cisalhamento aumentam até um nível de tensão (σ_2), correspondente à resistência à tração das fibras e/ou ruptura do “ancoramento” das mesmas. A seguir, verifica-se que há outra deflexão na curva, proveniente da diminuição da influência das fibras na resistência ao cisalhamento (σ_3) até que o comportamento friccional passe a regular o mecanismo de ruptura do maciço (σ_4).

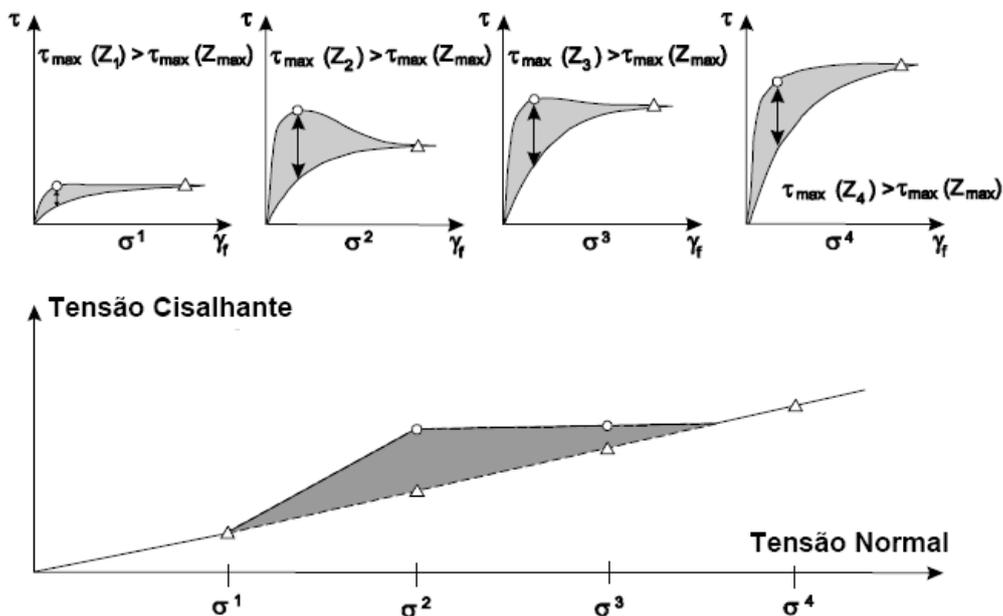


Figura 2.8 – Contribuição das componentes de atrito e coesão/tração em função da variação de tensão normal, na resistência ao cisalhamento dos RSU (Kölsch, 1993)

Grisolia *et al.* (1995) apresentam variações dos parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos em função dos níveis de deformações axiais, conforme pode ser observado na Figura

2.9. Inicialmente há a predominância do efeito friccional no comportamento resistivo do material, ao passo que, à medida que ocorrem acréscimos nos valores de deslocamento relativo entre as caixas, os valores de ângulo de atrito tendem à estabilização. Então, a coesão assume fundamental importância na resistência ao cisalhamento do material, sobretudo para valores de deformação axial superiores a 20%.

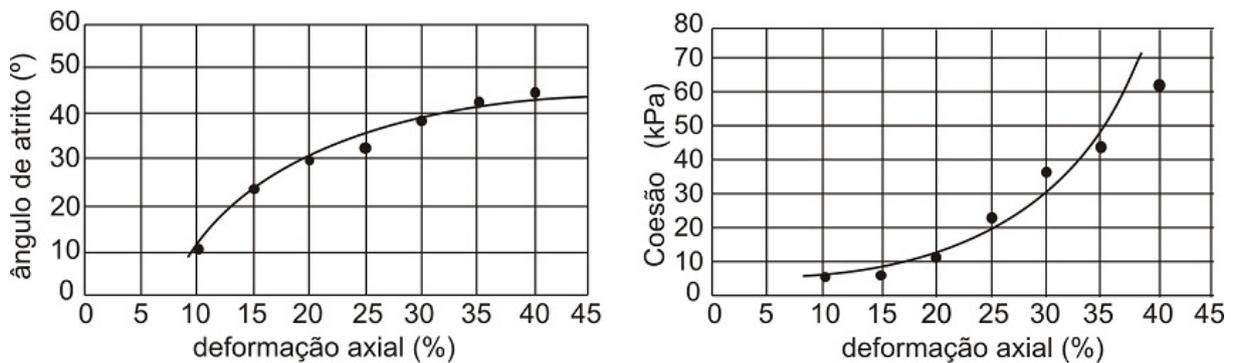


Figura 2.9 – Mobilização dos parâmetros de resistência em função das deformações axiais. (Grisolia *et al.* 1995)

De acordo com o que pode ser observado na Figura 2.10, König & Jessberger (1997) ao estudar os parâmetros de resistência para os RSU, verificaram que a maior ou menor presença de componentes plásticos nas amostras ensaiadas influenciava no valor do intercepto coesivo para grandes deformações, porém nenhuma significância foi encontrada quando o objeto de estudo era o ângulo de atrito do resíduo.

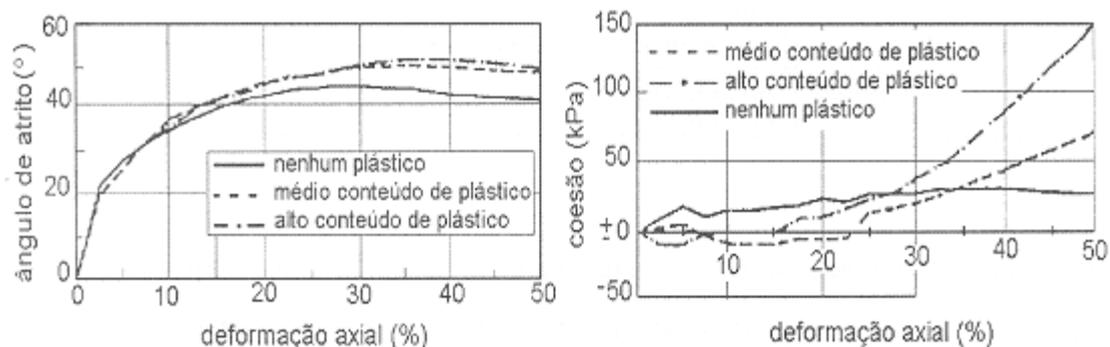


Figura 2.10 – Mobilização da coesão e ângulo de atrito com as deformações axiais, em função da presença de componentes plásticos na massa de lixo. (König & Jessberger, 1997)

Comumente são utilizados conhecimentos originários da Mecânica dos Solos para a determinação das propriedades dos resíduos sólidos. Todavia, Gonzalez (1995), Manassero *et al.* (1996), König & Jessberger (1997), dentre outros, alertam para as diferenças marcantes entre os dois tipos de materiais. Dixon *et al.* (2005) defendem que muito cuidado deve ser

tomado ao se transferir para os RSU os conhecimentos acumulados acerca do comportamento dos solos, uma vez que os resíduos contêm partículas altamente compressíveis, que suportam grandes deformações de tração e que podem ter suas características alteradas com o tempo.

Da mesma maneira que em solos, a resistência dos resíduos sólidos urbanos aparentemente aumenta com o incremento de tensão normal. Porém, devido ao seu alto teor de matéria orgânica e sua estrutura fibrosa, os resíduos sólidos se comportam mais como um solo orgânico fibroso do que simplesmente como um solo. Em consequência disso, os fatores que devem afetar os parâmetros de resistência dos resíduos são (Gonzalez, 1995):

- teor de matéria orgânica e fibras;
- idade e grau de decomposição dos resíduos sólidos;
- época em que se construiu o aterro;
- esforço de compactação, composição e quantidade de solo de cobertura.

Segundo Howland & Landva (1992), a resistência dos resíduos sólidos é de caráter puramente friccional, porém Mitchell & Mitchell (1992) advogam que embora não haja uma “coesão verdadeira” decorrente da ação das fibras nos maciços de RSU, é razoável a inclusão da componente coesiva nas avaliações de resistência ao cisalhamento. Os mesmos se baseiam no fato de que cortes praticamente verticais em aterros permanecem estáveis por longos períodos.

Em termos gerais, a resistência ao cisalhamento dos RSU é determinada por meio de ensaios *in situ* (cisalhamento direto, SPT, CPT), ensaios de laboratório (cisalhamento direto e triaxial) e por retro-análise de dados de campo. Poucos trabalhos atualmente têm sido publicados sobre esta propriedade dos RSU e de acordo com Knochenmus (1998), as informações acerca dessa propriedade dos RSU são em muitas vezes contraditórias. Fucale (2005) entende que a interpretação dos resultados dos ensaios em resíduos sólidos continua sujeita a muitas incertezas devido à falta de um modelo conceitual de referência do comportamento deste material.

A Tabela 2.4 apresenta uma revisão dos métodos mais usuais para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos, bem como alguns comentários acerca das vantagens e desvantagens de cada método.

Tabela 2.4 – Revisão de métodos para a determinação de parâmetros de resistência de RSU (Dixon *et al.* 2005)

Local do Ensaio	Método de Determinação	Comentários	Referências
Campo	Retro-análise de ruptura de taludes	Informações adequadas raramente disponíveis	Benvenuto & Cunha (1991) Kavazanjian <i>et al.</i> (1995) Van Impe <i>et al.</i> (1996) Koener & Soong (2000) Oliveira (2002)
	Retro-análise de ensaios de corte em taludes	Observadas grandes deformações, porém sem apresentar ruptura	Singh & Murphy (1990) Cowland <i>et al.</i> (1993)
	Retro-análise de taludes estáveis	Alterações na composição do resíduo fazem com que as experiências passadas não sirvam de guia para desempenhos futuros	Gotteland <i>et al.</i> (2002)
	Cisalhamento Direto <i>in situ</i>	Dificuldades na execução e resultados relacionados a baixos níveis de tensão. Custos relativamente altos.	Richardson & Reynolds (1990) Jessberger & Kockel (1993) Del Greco & Oggeri (1993) Withian <i>et al.</i> (1995) Gotteland <i>et al.</i> (1995)
	SPT, CPT e Vane Test	Relação não muito clara entre a resistência à penetração e a resistência ao cisalhamento dos RSU, no caso do SPT e CPT. Estrutura de composição e condições de drenagem do RSU comprometem a qualidade dos resultados obtidos pelo equipamento. Palhetas muito pequenas em relação às dimensões dos componentes do RSU.	Sowers (1968) Cartier & Baldit (1983) Siegel <i>et al.</i> (1990) Sanchez-Alciturri <i>et al.</i> (1993) Coumoulos <i>et al.</i> (1995) Bouazza <i>et al.</i> (1996) Jucá <i>et al.</i> (1997)
Laboratório	Compressão Triaxial	Realização do ensaio com amostras deformadas. Não há a observação de resistência de pico devido à alta compressão e densificação da amostra.	Singh & Murphy (1990) Jessberger & Kockel (1993) Jessberger (1994) Grisolia <i>et al.</i> (1995) Kockel & Jessberger (1995) Gabr & Valero (1995) Grisolia & Napoleoni (1996) Manassero <i>et al.</i> (1996) König & Jessberger (1997) Knochenmus <i>et al.</i> (1998) Van Impe (1998) Wojnarowicz <i>et al.</i> (1998) Carvalho (1999) Caicedo <i>et al.</i> (2002) Zekkos (2005) Machado <i>et al.</i> (2005) Nascimento (2007) Zekkos <i>et al.</i> (2007)
	Cisalhamento Direto	Ensaio realizado em amostras deformadas. Requer equipamentos de grande porte para o fornecimento de dados representativos. São necessários grandes deslocamentos para mobilizar resistência de pico.	Landva & Clark (1990) Siegel <i>et al.</i> (1990) Van Impe (1993) Brandl (1995) Gabr & Valero (1995) Kölsch (1995) Gotteland <i>et al.</i> (2001) Fucile (2005) Martins (2006)
	Cisalhamento Simples	Ensaio realizado em amostras deformadas. Requer equipamentos de grande porte para o fornecimento de dados representativos. Informação útil do módulo de rigidez cisalhante.	Kavazanjian <i>et al.</i> (1999)

Nota: Algumas referências podem ser encontradas no trabalho original

2.2.3.1. ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO EM LABORATÓRIO

Na busca pelo conhecimento das propriedades resistivas dos resíduos, o ensaio de cisalhamento direto em laboratório tem sido comumente usado por pesquisadores em todo o mundo. Estes ensaios são, em geral, realizados sobre amostras deformadas, coletadas em aterros sanitários, e em muitas vezes, em escala não representativa. König & Jessberger (1997) afirmam que a maior limitação na realização destes ensaios consiste na dificuldade em se obter amostras de boa qualidade no tocante à distribuição dos tamanhos das partículas e à representatividade, tanto da composição do material coletado, quanto das dimensões dos equipamentos utilizados nos ensaios.

Manassero *et al.* (1996) consideram que os ensaios de cisalhamento direto de laboratório não reproduzem o real comportamento do resíduo no corpo do aterro, porém aceitam o método como uma aproximação inicial para a elaboração de procedimentos mais exatos.

Além da sua utilização na determinação dos parâmetros de resistência (c' e Φ'), os ensaios de cisalhamento direto em laboratório para RSU têm tido várias aplicações: obtenção de parâmetros de resistência na superfície de contato entre resíduos e geossintéticos (Del Greco & Oggeri, 1993); determinação de parâmetros de resistência para diferentes idades das amostras (Landva *et al.* 1984; Landva & Clark, 1987); verificação da influência dos componentes de reforço (Fucale, 2005), avaliação da resistência de resíduos pré-tratados (de Lamare Neto, 2004) dentre outros.

Landva *et al.* (1984), Landva & Clark (1987), determinaram parâmetros de resistência para resíduos de diferentes idades, e constataram que as amostras apresentavam resistência mais baixa quando re-ensaiados após um ano de decomposição. Segundo os autores, as maiores variações ficaram por conta do ângulo de atrito, que para o resíduo novo apresentavam valores de 38° a 42° e após um ano passaram a apresentar 33°. Menor alteração foi verificada quando o parâmetro estudado era a coesão, passando de valores iniciais entre 16 e 19kPa para 16kPa. Uma possível explicação para os fenômenos é o fato de que a parcela de atrito interno nos RSU seja fornecida por componentes biodegradáveis e que após um ano estes tenham tido suas características fortemente alteradas, o que não ocorre de maneira expressiva nos componentes fibrosos para o período de tempo adotado.

Turczynski (1988) citado por Fucale (2005), também estudando os efeitos do envelhecimento na resistência dos maciços de resíduos, verificou quedas significativas para os parâmetros de atrito e coesão dos detritos ensaiados. Os valores obtidos podem ser vistos na Tabela 2.5:

Tabela 2.5 – Parâmetros de resistência de RSU apresentados por Turczynski (1988) para diferentes idades (Fucale, 2005).

IDADE (anos)	Φ' (°)	c' (kN/m ²)
0 (resíduo novo)	38 – 40	40 – 50
3	35	15
5	32	12
14	26	10

Vários estudos já contemplaram ensaios de cisalhamento direto em amostras de resíduos sólidos em laboratório, e parece ser consenso geral a não observação de picos de resistência para os gráficos tensão-deformação, independentemente das variações de composição do resíduo, idade e estado de alteração. As curvas geralmente apresentam ganho de resistência com o acréscimo das deformações, como pode ser observado na Figura 2.11:

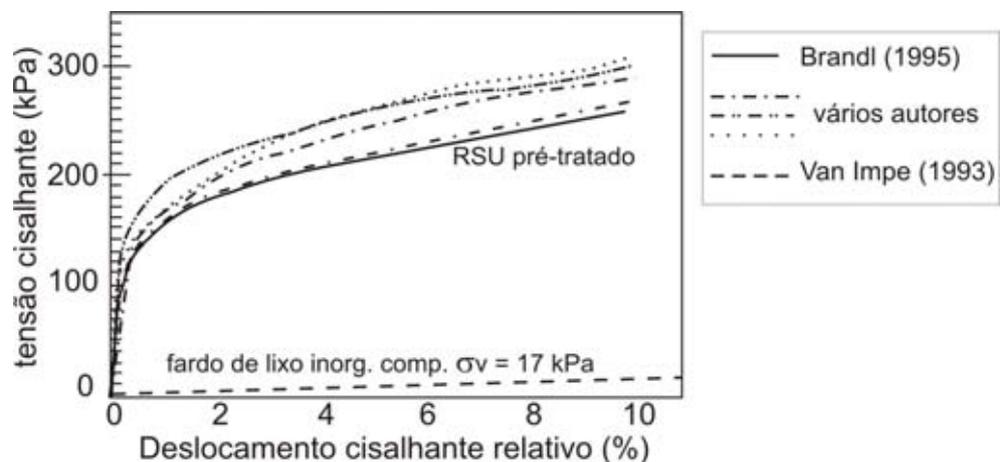


Figura 2.11 – Relação tensão-deslocamento para ensaios de cisalhamento direto em RSU (Manassero *et al.* 1996)

Diante da não observação de picos de resistência e devido à ocorrência de grandes deformações, os ensaios de resistência em resíduos sólidos (cisalhamento direto e compressão triaxial) determinam os parâmetros resistentes em função de níveis de deformações considerados admissíveis. Fucale (2005) entende que tais parâmetros não servem como

indicadores absolutos de resistência, mas simplesmente referem-se a uma condição específica de deformação.

Em geral, para a determinação dos parâmetros de resistência de RSU, têm sido considerados níveis de deformações entre 10% e 15%; excepcionalmente encontram-se dados referidos a deformações de 20%.

Landva & Clark (1990) realizaram ensaios de cisalhamento direto de laboratório, em amostras provenientes de aterros do Canadá. As dimensões da caixa de cisalhamento eram de 287mm x 434mm, e a velocidade dos deslocamentos era constante e igual a 1,5 mm/minuto. A Figura 2.12 apresenta os resultados obtidos:

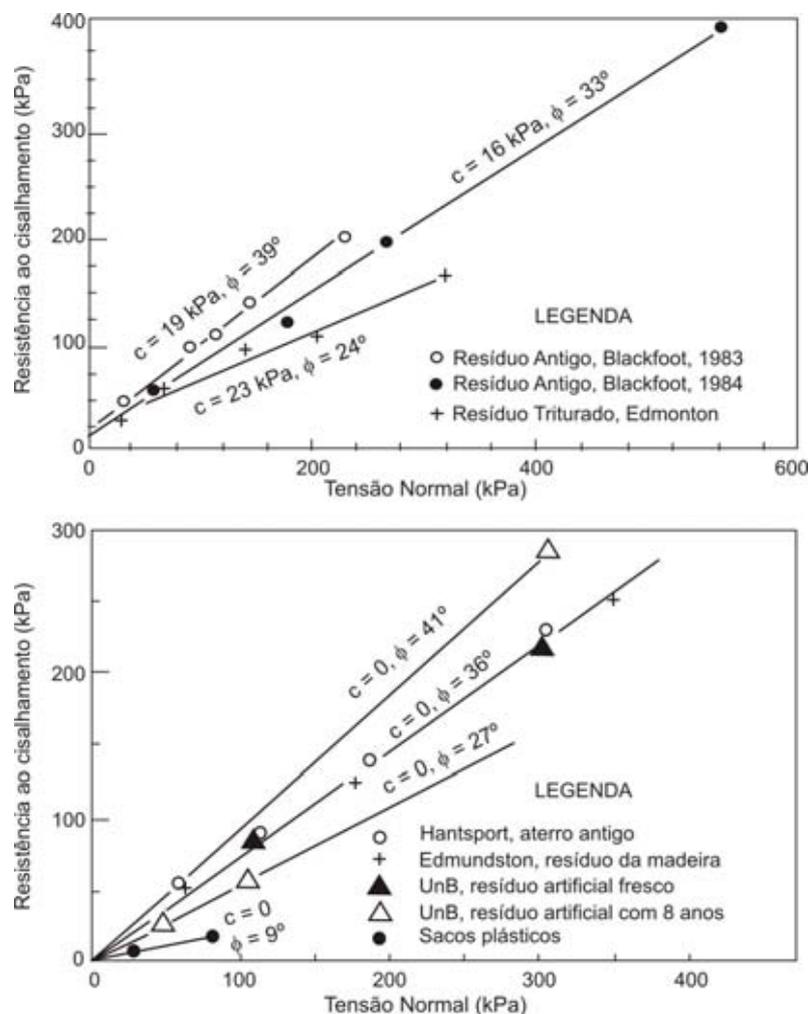


Figura 2.12 – Resultados de ensaios de cisalhamento direto para RSU de diferentes aterros do Canadá (Landva & Clark, 1990)

De acordo com a Figura 2.12, para amostras com natureza granular e fibrosa, pode-se notar que:

- foram encontrados valores de ângulo de atrito variando entre 24° e 41°, e valores de coesão entre 0 e 23kPa;
- verifica-se tendência à redução de parâmetros quando analisados os dados referentes aos ensaios de 1983 e 1984;
- para o resíduo triturado, oriundo do aterro Edmonton, o ângulo de atrito determinado foi inferior ao resíduo mais antigo.

Estudando as influências da composição do lixo nos resultados obtidos para o aterro de Edmonton, os autores chegaram á conclusão de que o baixo valor de ângulo de atrito encontrado (24°) é função do alto teor de material plástico presente nas amostras ensaiadas. Segundo os autores, as fibras tendiam a se alinhar na direção do plano de cisalhamento. Diante disso, realizaram ensaios de cisalhamento direto em amostras de sacos plásticos empilhados horizontalmente, de onde obtiveram um valor de 9° para o ângulo de atrito.

Landva & Clark (1990) concluem que grandes concentrações de material plástico influenciam na redução do atrito interno das massas de lixo, e que a resistência ao cisalhamento é altamente dependente dos tipos de materiais envolvidos. Ademais, mesmo verificando redução dos parâmetros obtidos nos ensaios de 1984 frente aos realizados em 1983, os autores defendem que não há nenhuma evidência direta de que a resistência ao cisalhamento é significativamente modificada com o tempo.

Siegel *et al* (1990) realizaram ensaios de cisalhamento direto em amostras do aterro Monterey Park, na Califórnia. A “caixa cisalhante” era circular com 130mm de diâmetro e alturas variáveis, de 76 a 102mm. Foram encontrados valores para Φ' variando de 39 a 53°, e admitiu-se não haver coesão. Os resultados obtidos foram considerados inapropriados, e os autores consideram que falhas na amostragem do resíduo e a má adaptação do equipamento contribuíram para a não representatividade dos dados.

Benson & Othman (1992) obtiveram valores de ângulo de atrito e coesão de, respectivamente, 61° e 20kPa, para amostras de RSU compactadas com energia de compactação do tipo Proctor Modificado. Segundo os autores, a presença de materiais tais quais plástico, borracha e arame influenciaram os resultados obtidos.

Del Grecco & Oggeri (1993) realizaram ensaios de cisalhamento direto em fardos de RSU compactados, sobrepostos dois a dois. Cada fardo pesava aproximadamente 50kg e tinham dimensões aproximadas de 400mm x 500mm x 600mm.

Os valores obtidos para tensão normal e tensão cisalhante estão expostos na Figura 2.13. Para baixos níveis de tensão normal, verifica-se que um maior valor de ângulo de atrito é mobilizado. Os autores atribuem o fato à presença de asperezas na superfície de cisalhamento, e segundo os mesmos, ao serem submetidas a níveis maiores de tensão normal as amostras nivelavam as asperezas e o cisalhamento ocorriam sob condição de atrito residual.

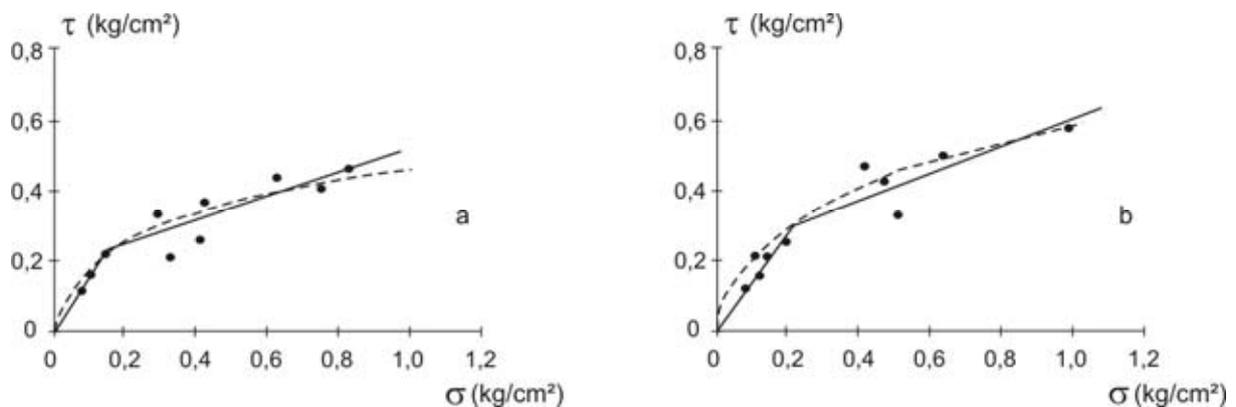


Figura 2.13 – Diagramas $\tau - \sigma$ para ensaios de cisalhamento direto em fardos de RSU: a) levemente compactado; b) fortemente compactado (Del Grecco & Oggeri, 1993).

Gabr & Valero (1995), usando resíduos com alto grau de degradação (15 a 30 anos de deposição) do aterro Pioneer Crossing – Pensilvânia, realizaram ensaios de cisalhamento direto e compressão triaxial, e verificaram que as amostras apresentaram acréscimos de ângulo de atrito para deslocamentos crescentes, ao passo que a coesão se mantinha constante. As medidas de Φ' variaram entre 20,5° e 39°; e a coesão de 0 a 27,5kPa. Os autores atribuem a dispersão dos dados: à diferença de idade dos resíduos, à composição física do lixo, ao tamanho das partículas e à densidade das amostras.

Edinçliler *et al.* (1996) realizaram ensaios de cisalhamento direto, utilizando RSU de um aterro localizado a sudeste do estado de Wisconsin, nos Estados Unidos. O cisalhamento foi realizado por meio de uma caixa circular, com 300mm de diâmetro. Foram utilizadas amostras de diferentes idades e locais do aterro. Os valores de c' e Φ' médios apresentados foram de, respectivamente, 24kPa e 41°. Os autores chamam à atenção, para o fato de que mesmo sendo utilizadas amostras de diferentes idades e oriundas de diferentes locais do aterro, os parâmetros de resistência medidos não apresentaram diferenças significativas.

Van Impe & Bouazza (1998) realizaram uma investigação de resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos por meio de análise da interação entre o ângulo de atrito e os deslocamentos provocados, sob tensão normal constante. Os autores confirmaram a dependência que os deslocamentos cisalhantes provocam na resistência dos RSU. Os valores obtidos para o ângulo de atrito dos fardos ensaiados oscilaram entre 19° e 38° para deslocamentos de respectivamente, 65mm e 130mm.

Caicedo *et al.* (2002), após um grande escorregamento ocorrido no Aterro Sanitário Doña Juana em Bogotá, Colômbia, desenvolveram uma grande campanha de investigação para a determinação das condições em que se deu o deslizamento da massa de lixo, e quais seriam as suas causas. A investigação contemplava ensaios de cisalhamento direto e ensaios de compressão triaxial. O equipamento de cisalhamento direto permitia o cisalhamento de amostras com dimensões 300mm x 300mm x 200mm, retiradas do exato local onde ocorreu o escorregamento. Os valores apresentados como resultado da campanha de ensaios de cisalhamento direto são, aproximadamente, 24° para ângulo de atrito e 26 kPa de coesão.

De Lamare Neto (2004), estudando o comportamento geotécnico de RSU resultante de pré-tratamento mecânico e biológico realizou ensaios de cisalhamento direto em equipamento de grande porte, em que as amostras eram moldadas em uma caixa de dimensões 400mm x 250mm x 100mm. Os ensaios consistiam em cisalhar corpos de prova com diferentes granulometrias (materiais passantes nas peneiras 3/4” e 3/8”) e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Resultados de ensaios de cisalhamento direto em RSU resultante de pré-tratamento mecânico-biológico (de Lamare Neto, 2004)

Parâmetros	Material passante na peneira 3/4”			Material passante na peneira 3/8”		
	Deslocamento Horizontal (%)			Deslocamento Horizontal (%)		
	4	7	10	4	7	10
ϕ'	25°	37°	42°	35°	36°	37°
c'	3,0	4,5	6,0	7,0	10,0	11,0
τ (para $\sigma = 100\text{kPa}$)	47	77	92	70	92	112

A busca pelo conhecimento acerca do comportamento mecânico dos resíduos pré-tratados vem aumentando em todo o mundo, confirmando uma tendência ao melhor aproveitamento

dos resíduos gerados. De acordo com De Lamare Neto (2004), o processo visa à estabilização do lixo bruto pela degradação da matéria orgânica existente. Para tanto, são partes do tratamento mecânico do RSU a separação, a classificação, a homogeneização, a moagem, o peneiramento e a aglomeração.

Fucale (2005), estudando a influência das componentes de reforço na resistência ao cisalhamento dos RSU, realizou ensaios de cisalhamento direto em equipamentos convencionais e de média escala. Os resíduos eram provenientes dos aterros sanitários de Ihlenberg e de Buchen, na Alemanha e as amostras eram preparadas de acordo com o percentual de fibras em sua composição. Foram apresentados como resultados para deslocamentos de 20% em ensaios realizados nas amostras de resíduo velho do aterro de Ihlenberg, valores de ângulo de atrito e coesão: 42,5° e 29,7 kN/m² respectivamente, para a matriz básica; 46° e 30 kN/m² para as amostras que receberam adição de 3,0% de fibras em sua composição.

2.2.3.2. ENSAIOS TRIAXIAIS

Assim como no ensaio de cisalhamento direto, o ensaio de compressão triaxial utiliza amostras de dimensões reduzidas, e resultados obtidos por este ensaio demonstram que o RSU pode sofrer grandes deformações, excedendo 15% a 20%, sem mobilizar tensões cisalhantes de pico (Carvalho, 1999).

Uma vez que os ensaios não definem com clareza as condições de ruptura, os parâmetros de resistência são determinados para níveis admissíveis de deformação, sendo valores entre 15% e 20% os mais adotados. Grisolia *et al.* (1995) e König & Jessberger (1997) preconizam que a apresentação dos resultados de ensaios triaxiais, se feita empregando as trajetórias de tensões, facilitam a interpretação dos resultados, uma vez que pelos pontos da trajetória podem-se traçar diversas envoltórias de resistência, para diferentes deformações.

König & Jessberger (1997) realizaram ensaios de compressão triaxial em resíduos com idades variando entre 9 meses e 20 anos, com a finalidade de avaliar a influência do tempo de disposição do lixo na sua resistência. A partir da Figura 2.14, percebe-se que é grande a variação dos parâmetros com as deformações.

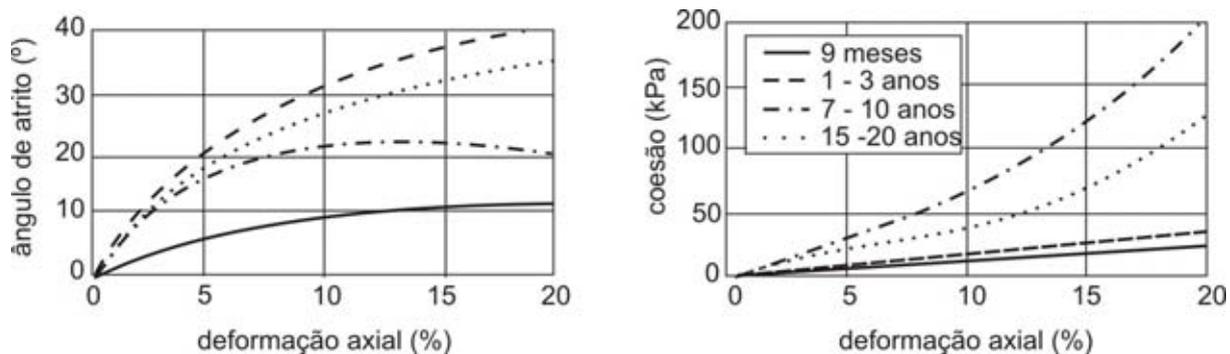


Figura 2.14 – Mobilização dos parâmetros de resistência de RSU de diferentes idades a partir de ensaios triaxiais (König & Jessberger, 1997)

De acordo com os autores, não há evidências claras de que a resistência tenha sido afetada pela idade das amostras. Ademais, acrescentam que o valor limite para o ângulo de atrito é geralmente mobilizado para deformações axiais menores que 20%, e que não se pôde observar nenhum valor limite para a coesão.

Muito se discute, e no entanto, não há dados conclusivos a respeito das variações de resistência com a idade do aterro. Por sua vez, Walter (1992) citado por Gonzalez (1995), apresenta uma avaliação qualitativa do comportamento de resistência e densidade em função do tempo de aterramento, conforme mostrado na figura 2.15 .

Gonzalez (1995) afirma que a redução da resistência ao cisalhamento, principalmente da coesão, é resultado da degradação físico-química e biológica que ocorrem no RSU, ocasionando o enfraquecimento do efeito de reforço, e que após concluído o período de degradação da matéria orgânica, o aumento da densidade do material tende a acarretar um melhor entrosamento entre partículas, resultando em melhoria das propriedades de resistência. Entenda-se por efeito de reforço, o acréscimo de resistência conferido não só pelas fibras presentes na massa de lixo, mas também, pelo grau de interação destas com o restante do material que o envolve.

Por sua vez, König & Jessberger (1997), Carvalho (1999), Machado *et al.* (2002), Machado *et al.* (2006) e Nascimento (2007) em experimentos realizados em RSU de diferentes idades, não verificaram nenhuma evidência clara de que a resistência ao cisalhamento das amostras tenha sido significativamente alterada pela degradação do resíduo.

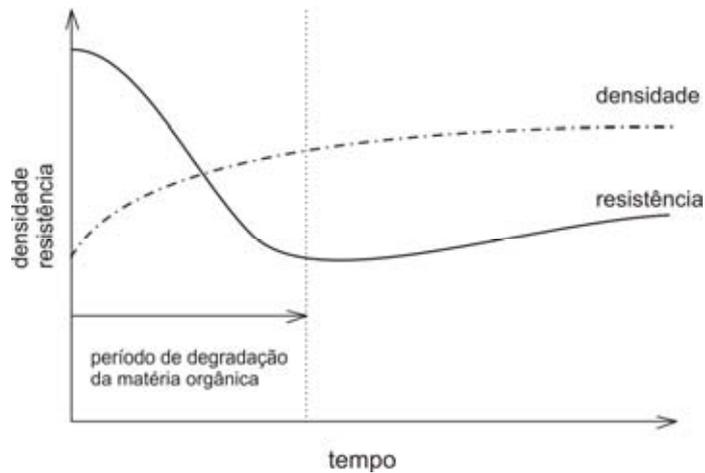


Figura 2.15 – Proposta de Walter (1992) citado por Gonzalez (1995)

Gabr & Valero (1995), Manassero *et al.* (1996) e König & Jessberger (1997) advogam que quando o efeito de reforço deixa de existir ou se faz menos intenso, o teor de umidade na massa de lixo passa a exercer um papel fundamental no seu comportamento resistente. Ensaaios triaxiais realizados por Gabr & Valero (1995), em resíduos com idades variando entre 15 e 30 anos de deposição, mostraram que houve redução do intercepto coesivo quando aumentado o teor de umidade, como pode ser observado na Figura 2.16.

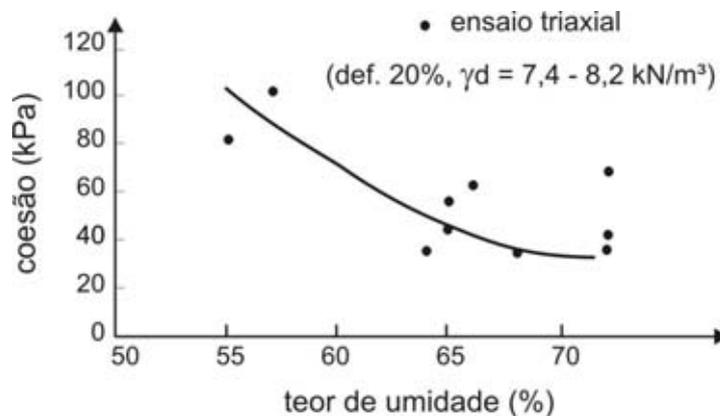


Figura 2.16 – Variação do intercepto de coesão com o teor de umidade (Gabr & Valero, 1995)

Grisolia *et al.* (1995) realizaram ensaios triaxiais em amostras de RSU fabricadas em laboratório e compactadas manualmente. Os ensaios contemplavam três tensões de confinamento (50, 100 e 300 kPa) e as curvas de tensão-deformação obtidas estão representadas na Figura 2.17. Para valores elevados de deformação, as curvas apresentaram inflexão ascendente, o que segundo Manassero *et al.* (1996) e Knochenmus *et al.* (1998) sugere um enrijecimento do material.

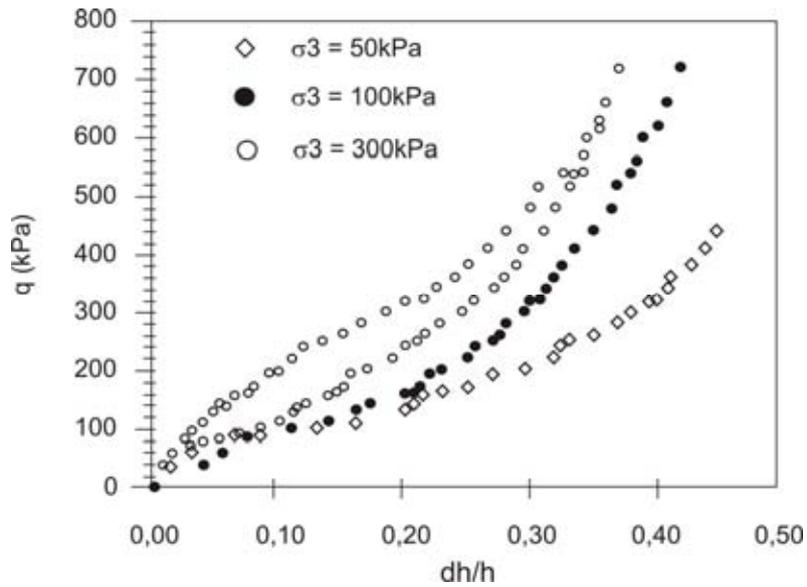
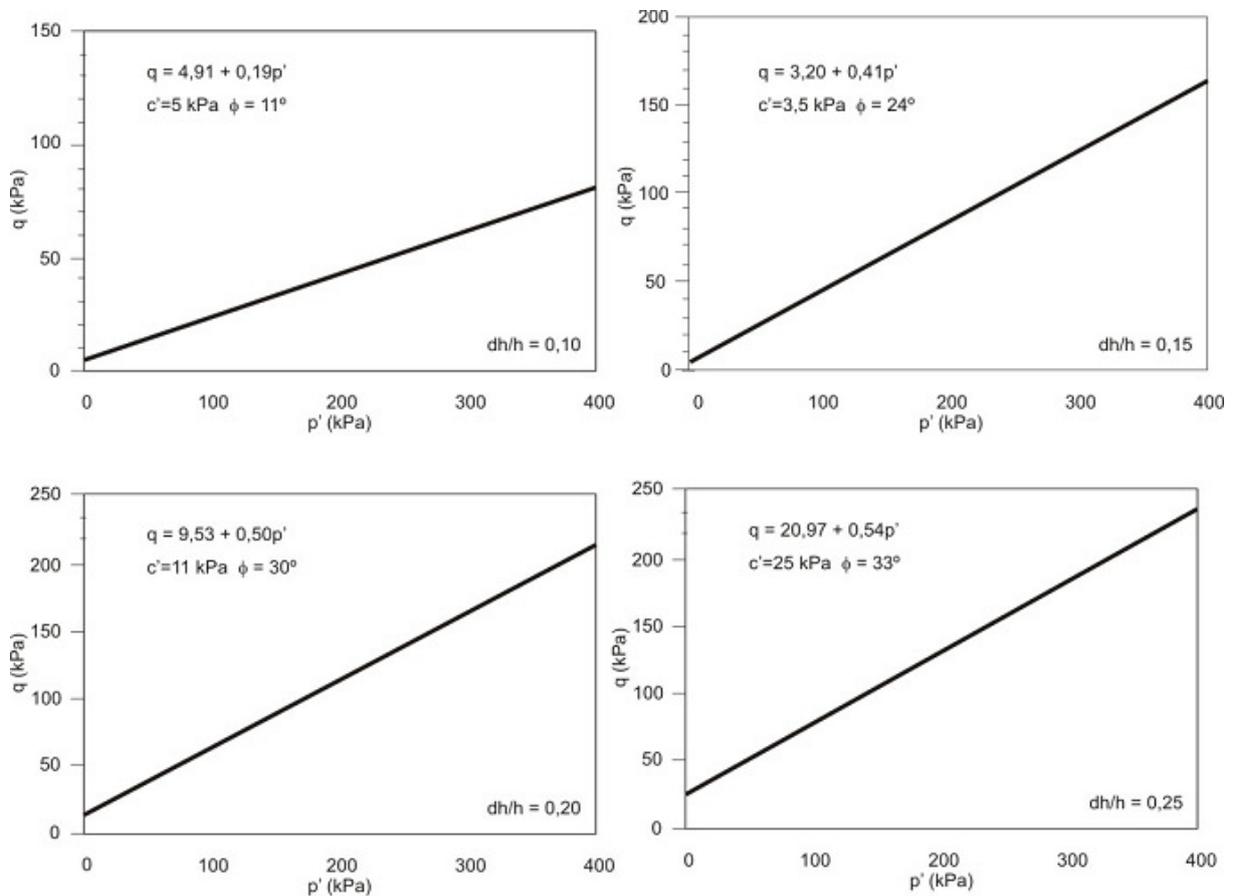


Figura 2.17 – Curvas de tensão-deformação obtidas por ensaios triaxiais em amostras fabricadas (Grisolia *et al.* 1995)

Na Figura 2.18 são apresentados diagramas $q \times p'$, onde podem ser observadas as variações dos parâmetros de resistência (c' e Φ') para diferentes níveis de deformações axiais, e em cada caso, a melhor reta de ajuste da envoltória de resistência.



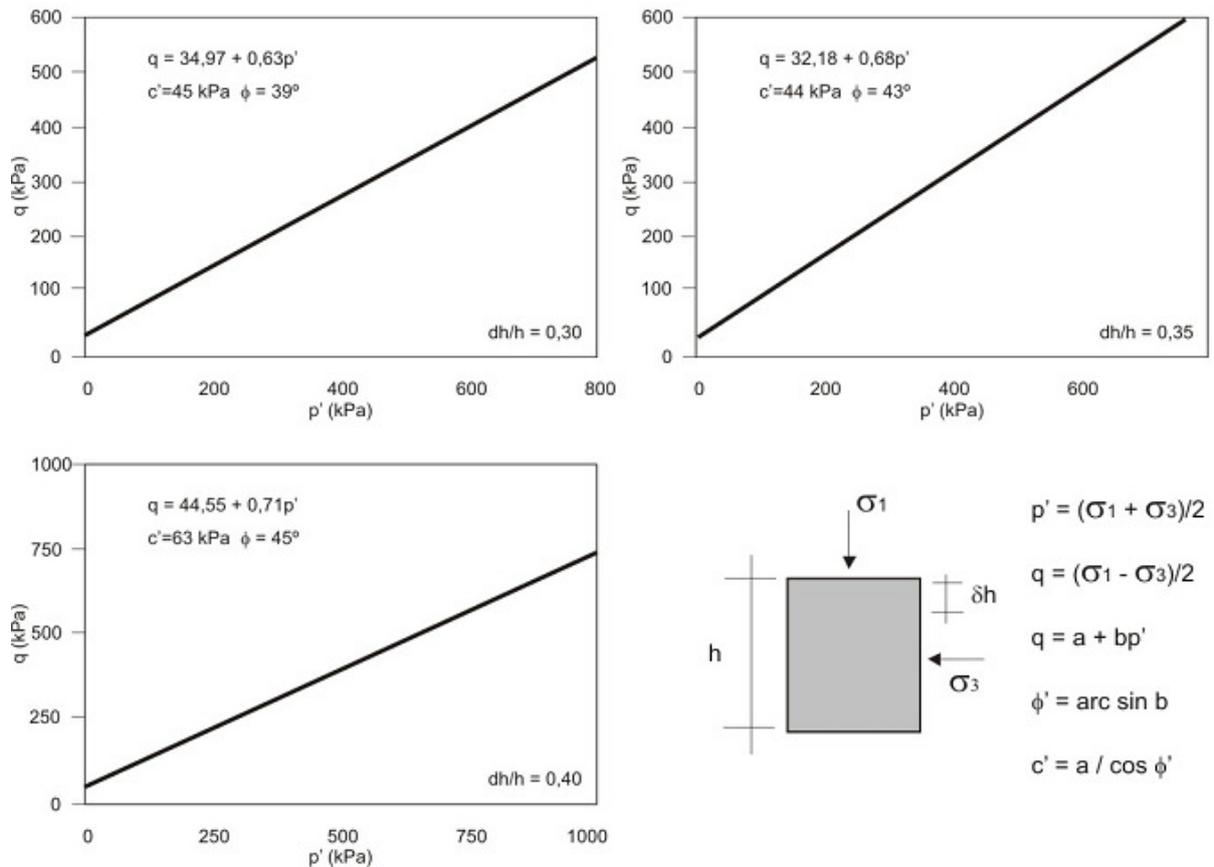


Figura 2.18 – Diagramas $q \times p'$ para diferentes níveis de deformação do resíduo sólido (Grisolia *et al.* 1995)

Carvalho (1999) realizou ensaios consolidados drenados (CD) e consolidados não-drenados (CU) em amostras retiradas por gradagem do Aterro Bandeirantes (São Paulo). Os ensaios foram realizados em câmaras com dimensões 150mm x 300mm e 200mm x 400mm (diâmetro x altura).

Foi constatado que o RSU enrijece com o aumento das deformações. Nos ensaios tipo CD, os parâmetros de resistência obtidos a partir de amostras válidas, apontavam para uma deformação de 20%, $\phi' = 27^\circ$ e variação de c' entre 42 e 55 kPa, para os corpos de prova de 15x30cm. Já para os corpos de prova moldados com 20x40cm, o ângulo de atrito encontrado foi da ordem de 21° e a coesão variando de 45 a 60kPa (Figura 2.19).

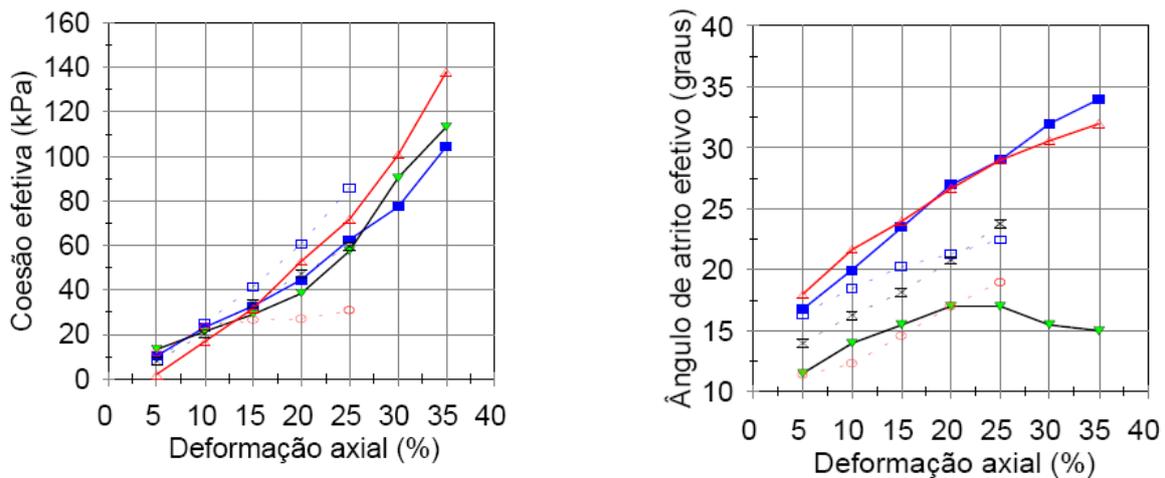


Figura 2.19 – Parâmetros de resistência para diferentes níveis de deformações, obtidos de ensaios triaxiais CD em corpos de prova de diferentes dimensões (Carvalho, 1999)

Carvalho (1999) acrescenta que as diferenças de dimensões dos corpos de prova parecem influenciar nos resultados, uma vez que as amostras de menor dimensão apresentaram resultados até 40% maiores que os encontrados para as amostras maiores.

Os ensaios CU realizados revelaram que as tensões seguem a mesma tendência geral apresentada pelo ensaio tipo CD, ou seja, aumentam continuamente com o acréscimo das deformações axiais. Observou-se também que a poropressão gerada durante a realização dos ensaios era tão elevada que em alguns casos obtinham-se baixos valores de tensão efetiva de confinamento. A autora apresentou como resultado para amostra em umidade natural, segundo TTE (trajetória de tensões efetivas), $\Phi' = 43^\circ$ e $c' = 33\text{kPa}$, aproximadamente.

Caicedo *et al.* (2002) realizaram ensaios CU com medição de poropressão em amostras recolhidas da Zona II do Aterro Sanitário Doña Juana, em Bogotá, Colômbia. Os resultados típicos dos ensaios estão dispostos na Figura 2.20. Ressalva-se que os níveis de deformação adotados são, em geral, menores que 15% e que até este patamar as amostras não apresentaram pico de ruptura.

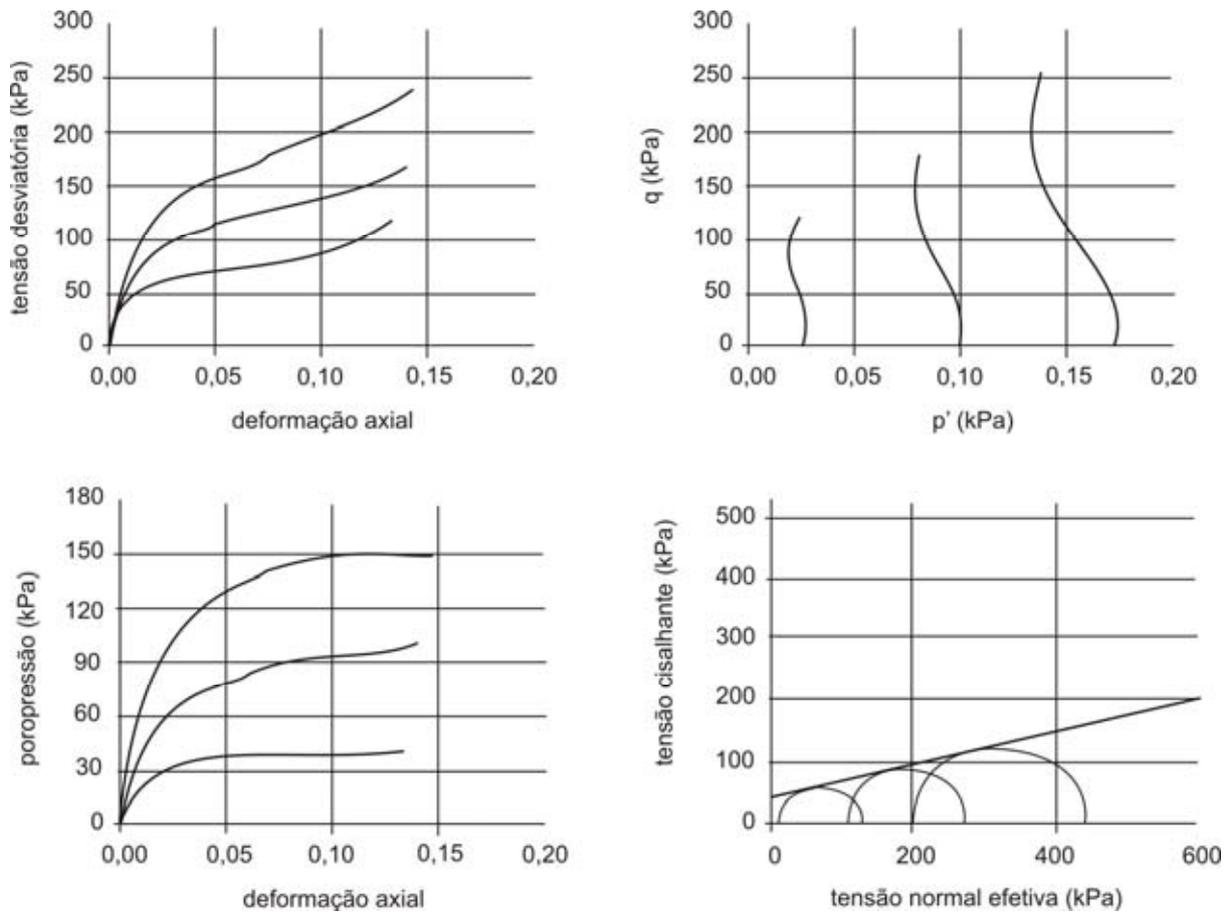


Figura 2.20 – Resultados típicos dos ensaios triaxiais tipo CU realizados em amostras do Aterro Sanitário Dona Juana, Bogotá (Caicedo *et al*, 2002)

Nascimento (2007) realizou ensaios CD e CU de grandes dimensões ($d = 50\text{cm}$ e $h = 100\text{cm}$) em resíduos de diferentes idades, coletados no Aterro Metropolitano Centro, em Salvador. Os corpos de prova foram consolidados com tensões de confinamento efetivas de 50, 100 e 200kPa e a velocidade de cisalhamento foi de 0,8mm/min. Os valores de ângulo de atrito e coesão para deformação axial de 20%, obtidos nos ensaios CD e CU são mostrados na Tabela 2.7 e Tabela 2.8.

Tabela 2.7 – Parâmetros de resistência (CD) das amostras de diferentes idades, sob deformação axial de 20% (Nascimento, 2007)

Idade da Amostra (anos)	Parâmetros	
	c' (kPa)	Φ' (°)
0 (resíduo novo)	25,8	27,1
4	4,6	34,9

Tabela 2.8 - Parâmetros de resistência (CU) das amostras de diferentes idades, sob deformação axial de 20% (Nascimento, 2007)

Idade da Amostra (anos)	Trajetória	Parâmetros	
		c (kPa)	Φ (°)
0 (resíduo novo)	Total	0	24,9
	Efetiva	0	57,7
4	Total	0	29,3
	Efetiva	0	66,0

Comparando os resultados dos ensaios CD e CU, verifica-se um grande aumento dos valores de ângulo de atrito, e redução para os valores de coesão.

Apesar de ter comprovado decréscimo dos parâmetros resistivos (c' e Φ') para as amostras de diferentes idades (Figura 2.21), o autor considera que não foi possível observar a influência do processo de decomposição na resistência ao cisalhamento do RSU estudado, entretanto afirma que há acréscimo de resistência com o aumento do peso específico. Os ensaios não drenados mostraram grande desenvolvimento de poropressão, que provocaram distorções nas envoltórias efetivas, conduzindo a ângulos de atrito maiores que os obtidos em ensaios drenados.

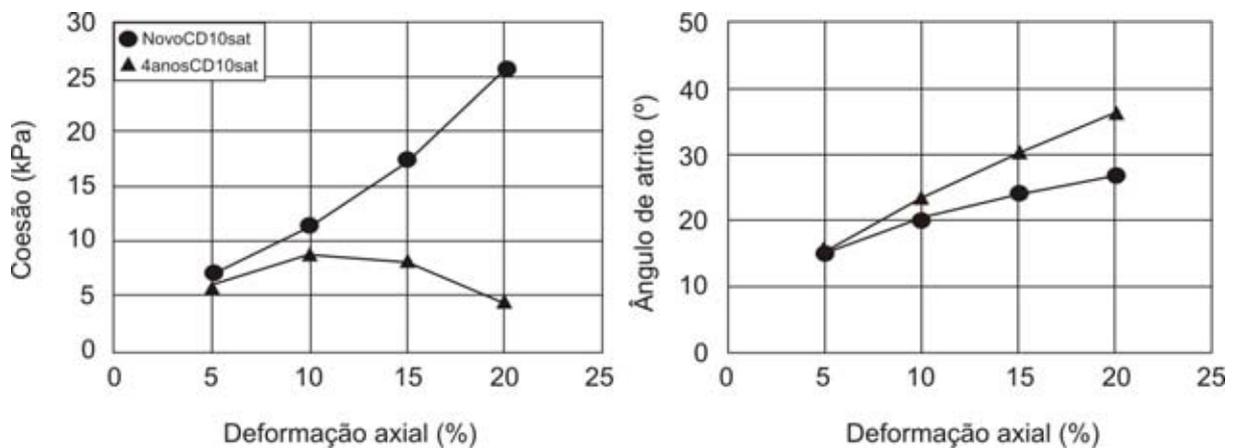


Figura 2.21 – Variação dos parâmetros de resistência em função da deformação axial para amostras com 0 e 4 anos (Nascimento, 2007)

2.2.3.3. ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO IN SITU

Ensaio de cisalhamento direto de grande dimensões *in situ* têm sido desenvolvidos na tentativa de determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos. Singh & Murphy (1990), Richardson & Reynolds (1991), Gotteland *et al.* (1995), Withiam *et al.* (1995), Mazzucato *et al.* (1999) citado por Fucale (2005), Caicedo *et al.* (2002),

apresentam resultados para estes ensaios. Entretanto, observa-se uma grande faixa de variação devido às diferentes características e composições do lixo, ao formato das caixas de cisalhamento, às dimensões adotadas, às faixas de aplicação de tensões normais, dentre outras causas. A Tabela 2.9 exibe uma revisão dos principais parâmetros publicados por estes autores.

Tabela 2.9 – Parâmetros de resistência obtidos por ensaios de cisalhamento direto *in situ*

Fonte	Observações	Parâmetros	
		c' (kPa)	ϕ' (°)
Richardson & Reynolds (1991)	Seção de cisalhamento (1,5m x 1,5m); peso específico do material em torno de 15 kN/m ³ ; aplicação de tensão normal por blocos de concreto atingindo entre	10,0	18 – 43
Gotteland <i>et al.</i> (1995)	Seção de cisalhamento (1,0m x 1,0m); amostras deformadas e indeformadas; deslocamento máximo empregado de 35%	10,0	25
Whithiam <i>et al.</i> (1995)	Seção de cisalhamento (1,5m x 1,5m); amostras indeformadas e localizadas 1,5m abaixo da superfície do aterro; aplicação de tensão normal mediante pesos de concreto e madeira; tensão cisalhante obtida por tração de cabos de aço presos a uma retro-escavadeira.	10,0	30
Mazzucato <i>et al.</i> (1999), citado por Fucale (2005)	Caixa de cisalhamento cilíndrica (d = 810mm e h = 440mm); amostras deformadas e indeformadas; aplicação de tensão normal por pistão (peso estático); peso específico do material de aproximadamente 7,0 kN/m ³ ; verificação de tensão de pico para amostras indeformadas sob altas tensões normais.	22 – 24	17 – 18
Caicedo <i>et al.</i> (2002)	Caixa de cisalhamento cilíndrica (d = 900mm); amostras indeformadas e com 1 ano de deposição; aplicação de tensão normal por macaco hidráulico; verificação de tensão de pico para 60mm de deslocamento relativo das caixas.	78	23

2.2.3.4. INVESTIGAÇÕES DE CAMPO E RETRO-ANÁLISE DE DADOS

Diante das dificuldades de determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos *in situ*, é comum encontrar na literatura técnica especializada (Siegel *et al.*, 1990; Sanchez-Alciturri *et al.*, 1993; Coumoulos *et al.*, 1995; Carvalho, 1999; Fucale &

Jucá, 2002; Oliveira, 2002), tentativas de estimar tais valores por intermédio de correlações com resultados obtidos por ensaios de campo, tais como SPT, CPT e Vane Test.

A aplicabilidade dos ensaios do tipo Vane Test é muito questionada, uma vez que a estrutura de composição e as condições de drenagem do RSU comprometem a qualidade dos resultados obtidos pelo equipamento, que fornece melhores resultados para condição não drenada de materiais homogêneos.

A investigação tipo SPT é uma técnica bastante criticada pelo empirismo do tratamento dos seus dados. A especificação de parâmetros obtidos pela utilização de correlações entre o número de golpes e a resistência ao cisalhamento dos RSU têm pouco crédito, uma vez que não existem estudos publicados que comprovem a eficácia de tais relações.

Observa-se na literatura que, para RSU os valores de N_{SPT} se situam em torno de 7 golpes para as camadas mais superficiais, e 12 golpes para camadas mais profundas. Valores acima de 20 golpes são interpretados como sendo o esforço necessário para ultrapassar interseções de materiais mais resistentes, tais como borrachas, madeiras, metais, couros etc.

Assim como para os ensaios tipo SPT, os picos de resistência à penetração apresentados pelos ensaios CPT estão referidos à presença de objetos rígidos, e estes valores tendem a crescer com a profundidade da perfuração. Outra particularidade comum é a ocorrência de deflexão das hastas durante a execução dos ensaios. Carvalho (1999) apresenta, para ensaios CPT, faixa de variação de valores de resistência lateral entre 56 a 1056 kPa, enquanto que os valores de resistência de ponta variavam de 1200 a 18000 kPa.

A definição dos parâmetros de resistência por retro-análise de dados de campo é em geral, baseada em ensaios de carregamento de placas ou similares. Benvenuto & Cunha (1991) apresentam resultados obtidos por retro-análise de dados de campo baseados no escorregamento do sub-aterro AS-1 do Aterro Sanitário Bandeirantes, São Paulo. Os valores de ângulo de atrito interno situam-se em torno de 22° e os valores de coesão em 13,5 kPa. Foram detectados coeficientes de poropressão (r_u) da ordem de 0,6, o que indica ineficiência ou inexistência dos sistemas de coleta de líquidos e gases.

Manassero *et al.* (1996) preconizam que os resultados obtidos por retro-análise não podem ser obtidos de maneira precisa, uma vez que a equação da resistência ao cisalhamento, que é função de duas variáveis, pode ser satisfeita por infinitos pares de combinações que satisfazem as condições de equilíbrio. Os resultados obtidos por retro-análise, segundo alguns autores, representam o contorno inferior da resistência de campo, sendo portanto um método conservativo de obtenção dos valores de resistência.

Oliveira (2002) ao realizar retro-análise dos dados de um talude do Aterro Controlado de Canabrava, em Salvador, concluiu que, para que houvesse a ruptura no interior da massa de lixo (FS = 1,067), seriam necessários valores de coesão inferiores a 2 kPa para uma faixa de variação do ângulo de atrito de 15°, ou seja, valores bem abaixo dos comumente encontrados.

Acrescenta que é improvável que rupturas ocorram em superfícies de cisalhamento passando exclusivamente por maciços de RSU, e que estas se dão em zonas de contato entre materiais distintos, principalmente decorrentes da inexistência ou ineficiência dos sistemas de drenagem. Afirma ainda que, para o caso estudado a ruptura se deu no contato resíduo-solo, enquanto este último encontrava-se saturado, resultado de um longo período chuvoso. Determinou coesão nula na interface dos materiais e um valor de ângulo de atrito mobilizado de aproximadamente 20°.

2.2.4. ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA PARA RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Desde que se iniciaram os estudos acerca do comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos, muitos autores têm publicado valores para os parâmetros de resistência ao cisalhamento, obtidos por ensaios de laboratório, de campo e por retro-análises, segundo as teorias da Mecânica dos Solos. Dessa forma, a resistência ao cisalhamento dos RSU é definida mais comumente, através do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, conforme representado na expressão 2.4.

$$\tau = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg}\phi' \quad (2.4)$$

onde:

τ = tensão cisalhante mobilizada na ruptura

c' = coesão efetiva ou intercepto coesivo

σ = tensão normal ao plano de ruptura

u = poropressão

ϕ' = ângulo de atrito interno efetivo

Tem-se encontrado valores para ângulo de atrito variando entre 10° e 53° , enquanto as variações dos valores de intercepto coesivo oscilam entre 0 e 67 kPa (König & Jessberger, 1997; Knochenmus *et al.* 1998).

A representação de resultados de parâmetros de resistência obtidos para RSU em diagramas coesão *versus* ângulo de atrito se fez muito usual, sendo Singh & Murphy (1990) os primeiros a usar esta representação. Na Figura 2.22 são apresentados resultados de ensaios de laboratório obtidos por diversos autores.

Baseando-se em dados disponíveis até então, de ensaios de laboratório, campo e retro-análises, os referidos autores compilaram num mesmo diagrama estes resultados e propuseram uma faixa recomendada para a elaboração de projetos (Figura 2.23).

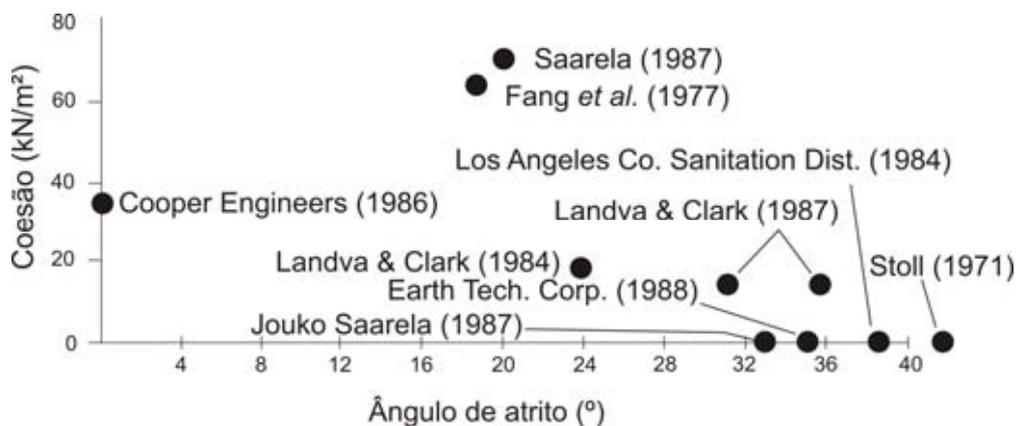


Figura 2.22 – Parâmetros de resistência para ensaios de laboratório (Singh & Murphy, 1990)

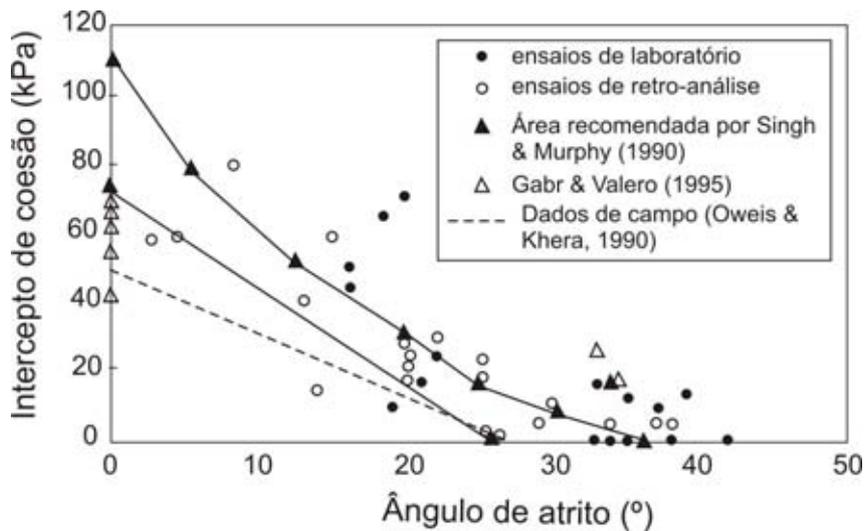


Figura 2.23 – Diagrama coesão *versus* ângulo de atrito com proposta da faixa recomendada para projetos (Singh & Murphy, 1990)

Pode-se observar que é grande a dispersão dos dados apresentados, o que dificulta a estimativa da resistência dos RSU. Mesmo assim, segundo Sanchez-Alciturri *et al.* (1993) algumas tendências podem ser observadas e concluem que:

- há mobilização de valores expressivos de ângulo de atrito, em sua maioria entre 25° e 35°;
- nenhuma observação para valores abaixo de $\Phi = 17^\circ$, com exceção dos valores apresentados por Gabr & Valero (1995), os quais foram obtidos em ensaios UU;
- ensaios de laboratório apresentaram grande variabilidade para dados de coesão, entretanto há concentração de pontos abaixo de 60 kPa, com ocorrência de valores nulos;

A partir das observações feitas Sanchez-Alciturri *et al.* (1993) propuseram um novo diagrama, como pode ser visto na Figura 2.24. A obtenção de parâmetros para projetos deve ser feita mediante a escolha de um par de pontos que atenda à condição de permanência dentro da área hachurada do gráfico. Segundo os autores, esta área coincide, de maneira grosseira, com a proposta de Singh & Murphy (1990).

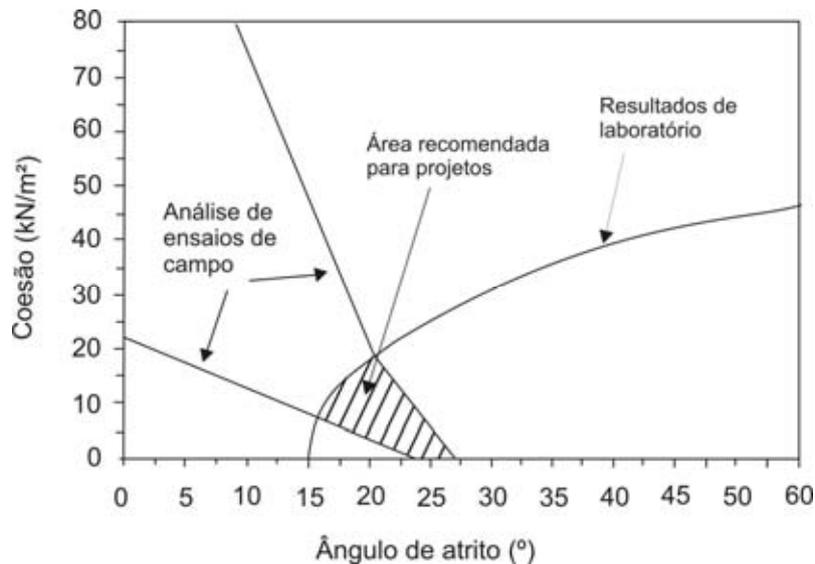


Figura 2.24 – Diagrama proposto para obtenção de parâmetros de resistência para projetos (Sanchez-Alciturri *et al.* 1993)

Sanchez-Alciturri *et al.* (1993), Manassero *et al.* (1996), König & Jessberger (1997), Knochenmus *et al.* (1998) alertam para os cuidados que devem ser observados na tomada de dados destes diagramas para aplicação direta em projetos. Como dito anteriormente, nestes diagramas estão compilados dados de ensaios diferentes, realizados sob metodologias distintas, e em muitas vezes assumindo condições que não refletem as reais características dos resíduos.

De uma maneira geral, o modelo de envoltória bi-linear que é característico dos solos reforçados também é aplicado por diversos autores para o estudo da resistência de resíduos sólidos urbanos. De Lamare Neto (2004) defende que este modelo encontra grande aceitação uma vez que permite determinar e descrever as duas parcelas de resistência do lixo separadamente: para baixos níveis de deformação e para altos níveis de deformação.

Partindo deste princípio, Kavazanjian *et al.* (1995) ajustaram uma envoltória linear-curvada, baseando-se em dados de resistência obtidos por ensaios de cisalhamento direto (campo e laboratório), ensaios de carregamento de placas e retro-análise de dados de campo, conforme pode ser observado na Figura 2.25, onde se nota a ocorrência de duas zonas distintas, A e B. Na Zona A, correspondente a baixos níveis de tensão normal, são observados valores elevados para ângulos de atrito e valores menores para coesão; ao passo que na Zona B, correspondente a níveis mais altos de tensão normal, são observados valores menores de ângulo de atrito e valores mais significativos de coesão.

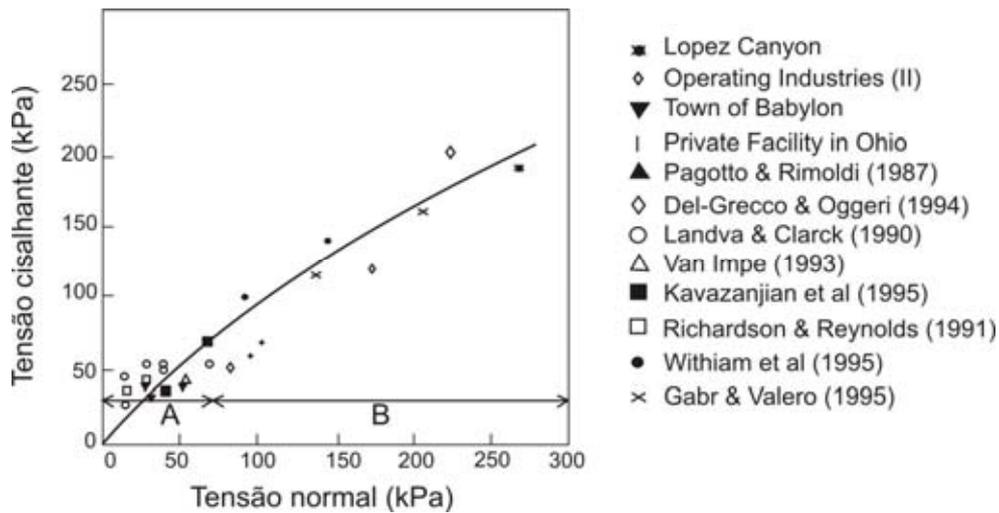


Figura 2.25 – Resultados de resistência ao cisalhamento, obtidos por vários autores (Kavazanjian *et al.* (1995))

Knochenmus *et al.* (1998), baseando-se nas propostas de Kavazanjian *et al.* (1995) e Van Impe *et al.* (1998), apresentaram um gráfico composto duas envoltórias de ruptura (Figura 2.26). De acordo com a proposta de Kavazanjian *et al.* (1995), o comportamento da massa de resíduos pode ser considerado como sendo puramente coesivo ($\Phi = 0$; $c = 24\text{kPa}$), para tensões normais menores que 30kPa. Para valores de tensão normal que excedam os 30kPa, o resíduo passa a ser considerado como não coesivo ($c = 0$; $\Phi = 33^\circ$). Segundo Knochenmus *et al.* (1998) a proposta de Van Impe *et al.* (1996) admitia uma envoltória tri-linear, onde para tensões normais inferiores a 20kPa o RSU é puramente coesivo ($\Phi = 0$; $c = 20\text{kPa}$) e não coesivo ($c' = 0$; $\Phi = 38^\circ$) para tensões normais entre 20kPa e 60kPa. Para tensões normais superiores a 60kPa, ($c' \geq 20 \text{ kPa}$; $\Phi = 30^\circ$).

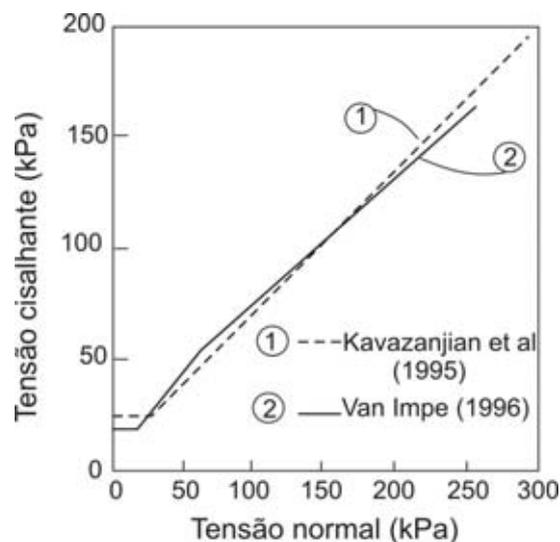


Figura 2.26 – Envoltórias de ruptura para RSU (Knochenmus *et al.*, 1998)

Presume-se que a grande variabilidade nos parâmetros de resistência dos RSU tenha origem em sua heterogeneidade, na idade e em seu grau de processamento, no nível de deformação escolhido nos ensaios, no processo de escolha de amostras representativas e no tipo de ensaio realizado (Machado *et al.* 2006). Em virtude disto, muito cuidado há que se ter quando da avaliação e utilização dos dados compilados na literatura, em projetos que envolvam resíduos sólidos urbanos.

Equipamento de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para que a pesquisa pudesse ser realizada, foi desenvolvido um equipamento para os ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões em resíduos sólidos urbanos. De maneira geral, as diretrizes que basearam a elaboração do projeto do equipamento estão relacionadas às adotadas para os ensaios em solos.

A idéia inicial era construir um equipamento de grande porte, que permitisse avançar na avaliação do comportamento resistivo dos RSU sob grandes deslocamentos, e que posteriormente, mediante algumas poucas adaptações, pudesse ser usado para a execução de ensaios *in situ*, em amostras indeformadas.

O equipamento possui como dimensões externas 2,40 x 1,00 x 2,00m (comprimento, largura e altura), aproximadamente 4.850kg, e foi projetado para permitir que o deslocamento relativo das caixas seja de 50%. Por questões puramente de ordem prática, a porção inferior da caixa de cisalhamento é a que sofrerá os deslocamentos, ao passo que a porção superior estará fixa, não permitindo quaisquer movimentações, sejam verticais ou horizontais.

3.2. ESPECIFICAÇÕES

Para a execução dos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões, foi concebido, como esquema básico inicial para o equipamento, o apresentado nas Figuras 3.1 e 3.2.

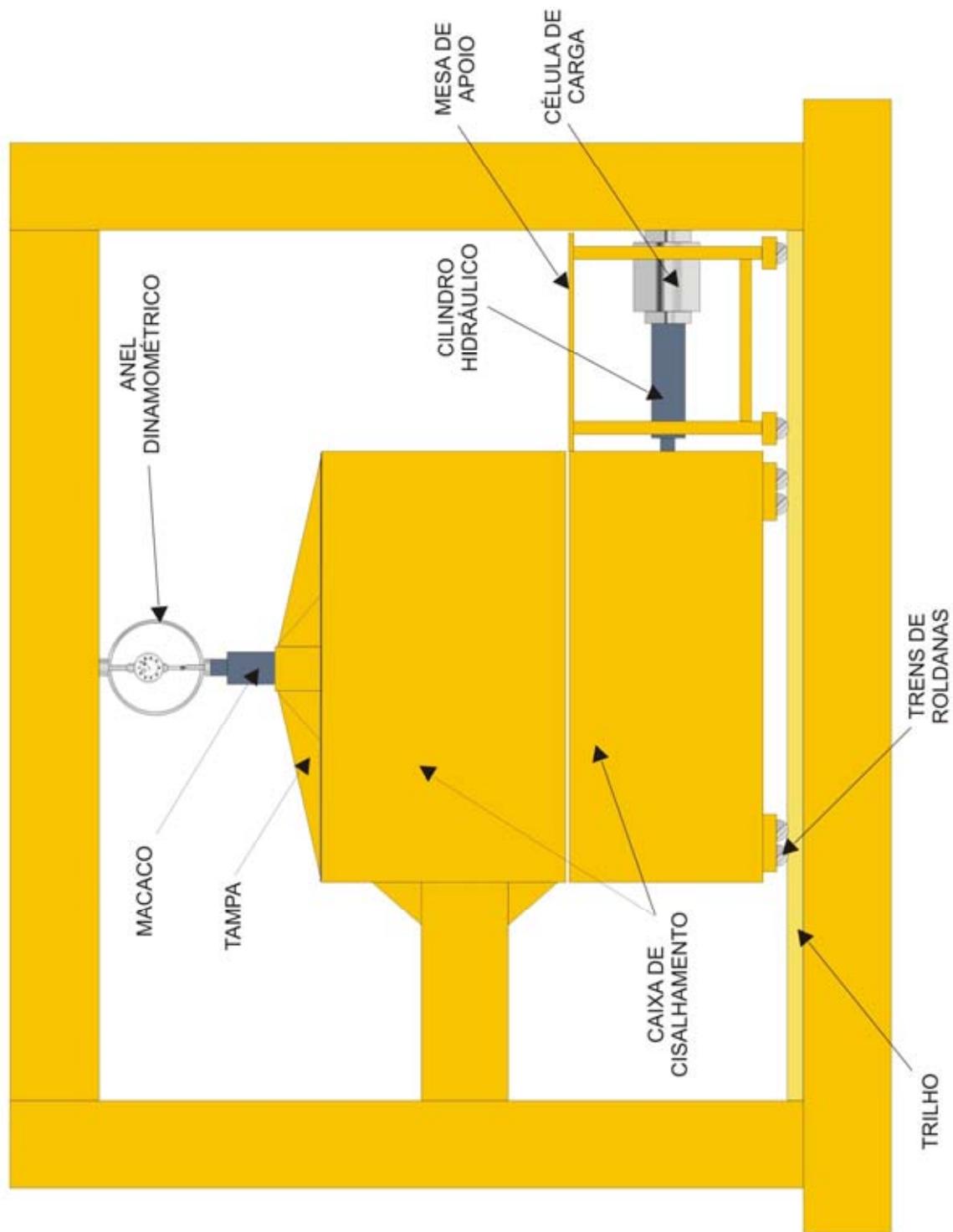


Figura 3.1 – Vista frontal do equipamento

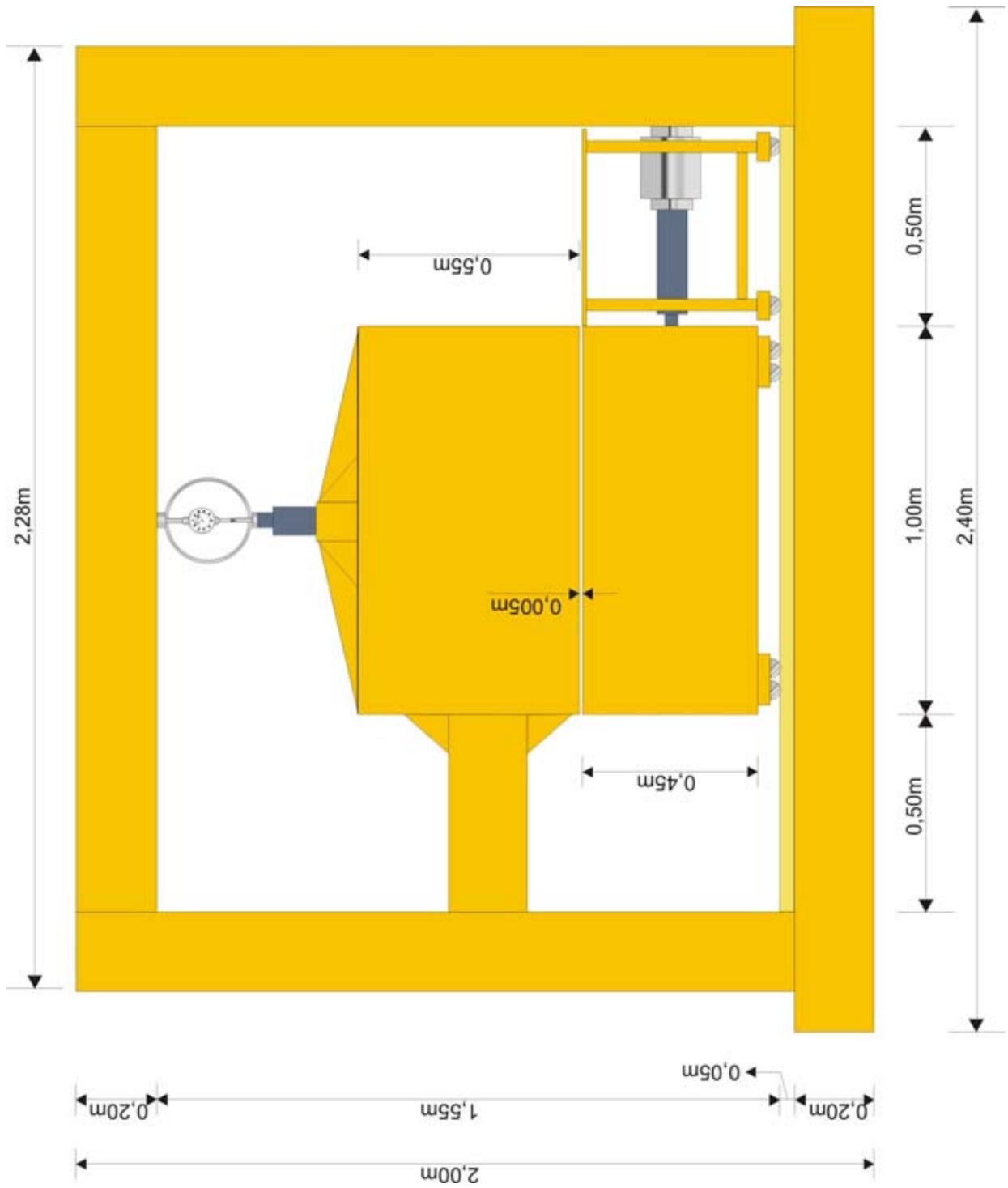


Figura 3.2 – Dimensões do equipamento

De maneira simplificada, podemos subdividi-lo em: estrutura, caixa de cisalhamento, mecanismos acessórios e instrumentos.

3.2.1. ESTRUTURA

A parte estrutural do equipamento, compreendida pela base de apoio e o pórtico de esforços, foi confeccionada utilizando-se perfis metálicos estruturais de aço (viga U de abas paralelas), com bitola de 8” ($h = 203,2\text{mm}$; $b_f = 57,4\text{mm}$). Para aumentar a rigidez do conjunto, e conseqüentemente diminuir as deflexões quando da aplicação das forças necessárias à realização dos ensaios, foram acoplados aos perfis, mediante solda contínua tipo MIG, chapas metálicas com espessura 5/16” (aproximadamente 8mm). A Figura 3.3 explicita tais configurações dos perfis.

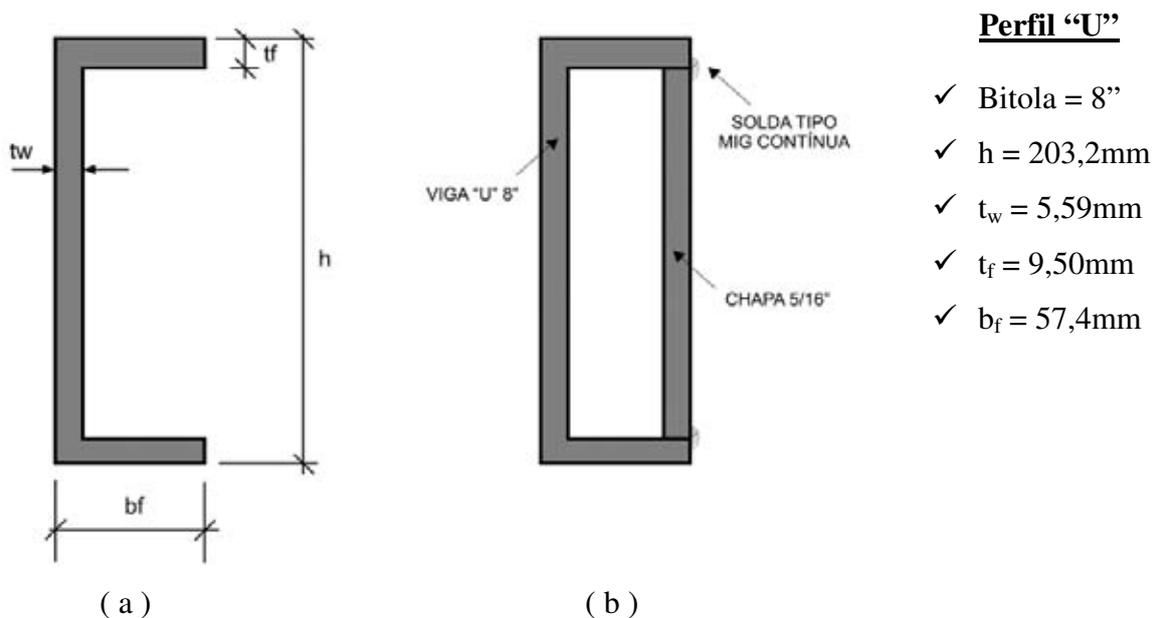


Figura 3.3 – Geometria dos elementos estruturais do equipamento: (a) Perfil “U” laminado original; (b) Perfil U combinado com chapa

3.2.2. CAIXA DE CISALHAMENTO

A caixa de cisalhamento tem como dimensões internas totais 1,0 x 1,0 x 1,0m, o que segundo Dixon *et al.* (2005) representa a situação ideal para a avaliação das características do material ensaiado, sobretudo pela heterogeneidade do mesmo.

Em sua fabricação, foram utilizadas chapas de aço com espessuras de aproximadamente 8mm (5/16”) nas faces laterais e aproximadamente 10mm (3/8”) na chapa de fundo. Esta, dotada de 16 furos com diâmetro de 25mm para facilitar o escoamento de chorume, haja visto que os ensaios serão executados segundo condição drenada.

Nas faces laterais da caixa, foram implantados travamentos horizontais e nervuras verticais, ambos compostos de chapas com espessura de 8mm, para impedir que a caixa deforme quando sujeita aos esforços de compressão normal e cisalhante. Com a mesma finalidade, abaixo da chapa de fundo da caixa, foram colocadas nervuras cruzadas, espaçadas de 25cm, com espessuras de 10mm.

A porção inferior da caixa tem altura igual a 45cm e a porção superior 55cm. Esta diferença encontra justificativa na alta compressibilidade que o RSU apresenta quando sujeito a carregamentos. Dessa forma, após a estabilização dos recalques devidos à aplicação dos esforços verticais, as alturas das camadas de resíduo tornam-se equivalentes.

A transmissão dos esforços normais às amostras é feita através de uma “tampa” metálica, dotada de um mecanismo de distribuição de esforços. Esta distribuição se dá por meio de elementos rígidos, que estão fixados ao ponto de aplicação da força normal e à chapa de contato com o RSU, como pode ser observado na Figura 3.4.



(a)



(b)

Figura 3.4 – Tampa de distribuição de esforços normais: (a) vista superior; (b) vista lateral

Na construção desta peça foram usadas chapas de aço com espessura de 10mm para a face de contato e nervuras de distribuição, chapas de 8mm nos travamentos de borda e chapas de 7/8”

(22,2mm) para a confecção de um cubo central, que serve de apoio para aplicação da força normal.

Entre as porções inferior e superior da caixa de cisalhamento, foi mantida uma distância de 5mm de maneira a evitar o atrito entre as bordas, e conseqüentemente anular a possibilidade de interferência nos dados de resistência ao cisalhamento medidos.

Para impedir deslocamentos durante a consolidação das amostras, foram realizados furos concêntricos nos travamentos de borda das caixas, por onde são fixados seis parafusos com dimensões 9/16" x 2" com porcas.

3.2.3. MECANISMOS

Para garantir um melhor desempenho do equipamento, bem como a funcionalidade do conjunto, foram inseridos no projeto alguns elementos que visaram assegurar a viabilidade de realização da pesquisa, em curto prazo. Dessa forma, os procedimentos foram programados para serem simples, porém, sem que houvesse perda de qualidade dos resultados.

A aplicação dos esforços normais e cisalhantes é realizada mediante uso de macacos hidráulicos, por bombeamento manual. Um macaco hidráulico do tipo garrafa com capacidade máxima de 20 toneladas é responsável por comprimir verticalmente a amostra [Figura 3.5 (a)]. Já o esforço cisalhante é resultado da ação de um cilindro hidráulico com capacidade máxima de 500 kN [Figura 3.5 (b)].



(a)



(b)

Figura 3.5 – Macacos hidráulicos: (a) esforços normais; (b) esforços cisalhantes.

O deslocamento da porção inferior da caixa de cisalhamento é resultado da ação de oito roldanas, dispostas duas a duas, em quatro trens. Cada uma das roldanas tem diâmetro de 3” (76,2mm) e possuem canal de rolamento em V, conforme mostrado na Figura 3.6.



Figura 3.6 – Detalhes das roldanas (3”)



(a)



(b)

Figura 3.7 – (a) detalhes dos trens de roldanas; (b) trem de roldanas fixado à caixa

Estes trens foram fixados à chapa de fundo da caixa e correm sobre dois trilhos soldados à base do equipamento. Os perfis metálicos utilizados para a confecção dos trilhos de rolamento foram cantoneiras L (2½” x 1/4”). Detalhes dos trilhos podem ser observados na Figura 3.8.



(a)



(b)

Figura 3.8 – Trilhos de rolamento: (a) vista frontal; (b) vista lateral

Os elementos 1 e 2 da Figura 3.9 são responsáveis pela reação aos esforços decorrentes da aplicação da tensão cisalhante, bem como servem para garantir o espaçamento de 5mm previsto entre as porções inferior e superior da caixa de cisalhamento.

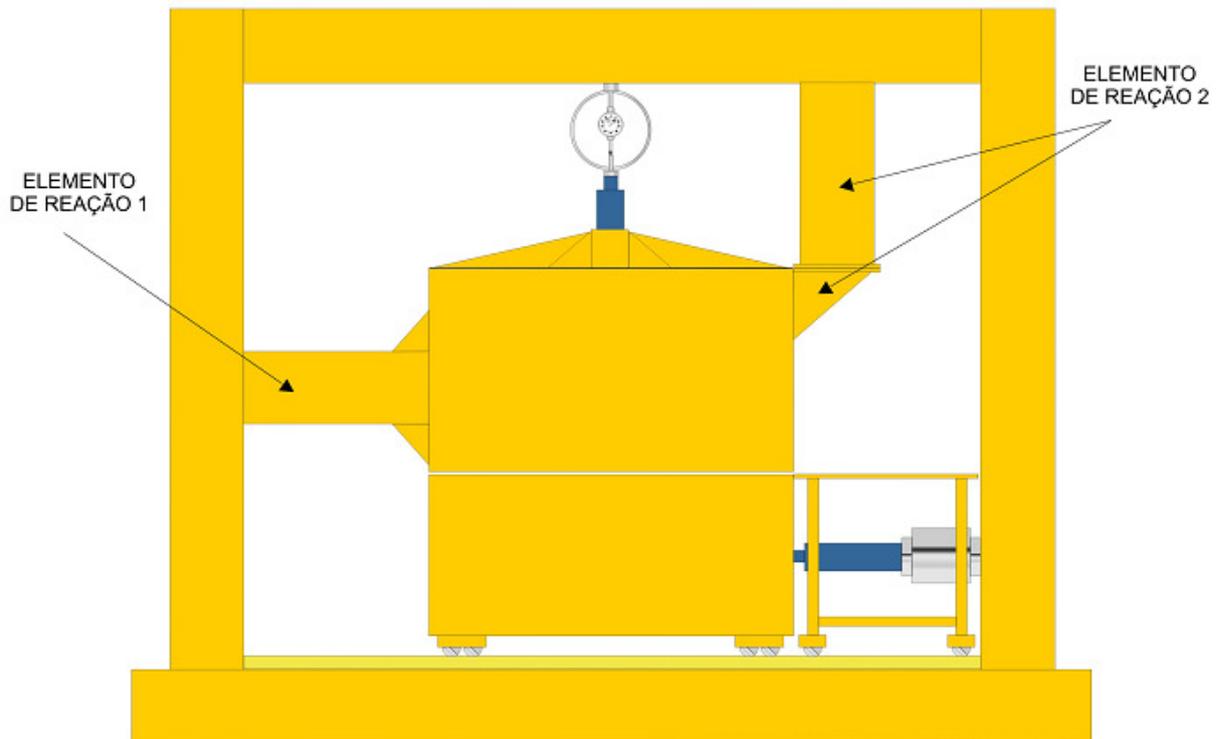


Figura 3.9 – Elementos de reação / fixação da porção superior da caixa de cisalhamento.

Inicialmente, só o elemento 1 estava previsto, porém testes realizados ainda durante a fase de confecção do equipamento evidenciaram a necessidade do elemento 2, dado que:

- As dimensões e o peso da porção superior favoreciam o seu desnivelamento, e com isso não estaria assegurada a condição de afastamento vertical entre as porções;
- As dimensões da caixa e os níveis de esforços cisalhantes esperados poderiam provocar rotação horizontal da porção superior da caixa.

As Figuras 3.10 e 3.11 mostram detalhes dos elementos de reação.



(a)



(b)

Figura 3.10 – Detalhes do elemento 1: (a) vista frontal; (b) vista lateral.



(a)



(b)

Figura 3.11 – Detalhes do elemento 2: (a) vista frontal; (b) vista lateral.

Uma vez instalados os elementos de reação 1 e 2, e tomando-se por base a configuração geométrica dos perfis metálicos utilizados, a estrutura do equipamento é capaz de suportar esforços normais e cisalhantes de até 500kN, respectivamente, sem deformação.

Uma mesa rolante assume a função de impedir a queda do material confinado na porção superior da caixa de cisalhamento, quando já houver deslocamento relativo significativo (Figura 3.12). Alguns detalhes são descritos a seguir:

- Esta mesa é também dotada de roldanas e deve ser posicionada junto à porção inferior da caixa de cisalhamento, sobre os trilhos;
- O cilindro hidráulico responsável pela aplicação da tensão cisalhante atua diretamente sobre a mesa, que estando contígua à caixa, transmite totalmente os esforços;
- Tanto a caixa quanto a mesa deslocam-se concomitantemente, sem que haja espaçamento entre elas.



(a)



(b)

Figura 3.12 – Detalhes da mesa rolante; (a) posição inicial; (b) posição final.

Um outro mecanismo adotado está referido à coleta de chorume. Uma lona vinílica impermeável, dotada de ilhoses e presa a ganchos metálicos fixados na base do equipamento, coleta e conduz o fluido até um recipiente, que o acumula (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Sistema de coleta e condução de chorume

Para garantir que não haja fuga de material durante os ensaios, e que somente o chorume escoe pelos orifícios, uma manta de espaçador geossintético é colocada no fundo da caixa.

3.2.4. INSTRUMENTOS

Conforme já comentado, desde a concepção do equipamento, a idéia era a de que o mesmo pudesse, mediante poucas adaptações, ser utilizado para realizar ensaios de campo em amostras indeformadas. Para tanto, deveria ter a propriedade de ser facilmente mobilizado e desmobilizado de acordo com as necessidades de campo. Assim, seus dispositivos de inferência de dados também não poderiam fugir a esta regra, e por isso são leves e de fácil instalação.

As tomadas de dados dos esforços normais são feitas com o emprego de um anel dinamométrico com capacidade para 50kN, instalado no contato entre o êmbolo do macaco hidráulico e a viga de reação do pórtico, tal como pode ser observado na Figura 3.14 .



Figura 3.14 – Aplicação e medição de esforços normais

Uma vez que os deslocamentos (verticais e horizontais) são grandes, acabam por inviabilizar o emprego de extensômetros na determinação dos deslocamentos. Dessa forma, são medidos por régua devidamente calibrada, a partir das suas faces.

Uma célula de carga eletrônica, instalada entre o cilindro hidráulico e um dos pilares do pórtico de reação, coleta os dados de carregamentos horizontais, que podem ser visualizados no display do seu leitor (Figura 3.15).



Figura 3.15 – Detalhes da célula de carga para a determinação de esforços cisalhantes

Metodologia dos Ensaios e Materiais

4.1. INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento da pesquisa e realização dos ensaios propostos, foram coletadas amostras de resíduo sólido urbano em uma das usinas de compostagem do Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal, localizada na avenida L4 Sul de Brasília.

A finalidade desta Unidade de Tratamento de Lixo (UTL) é a produção de adubo orgânico a partir do lixo gerado em 5 das 19 Regiões Administrativas do Distrito Federal, e o produto final é utilizado no ajardinamento e manutenção de praças, parques e jardins públicos.

A UTL L4 Sul recebe mensalmente cerca de 12.000 toneladas de lixo, o que corresponde a 20% do total produzido no DF.

Uma cooperativa de catadores, com 200 pessoas atuando na unidade, é responsável por separar o material seco (reciclável) do material úmido (orgânico). Desta operação, cerca de 6 mil toneladas de material reciclável é coletado por mês, ao passo que aproximadamente 5,2 mil toneladas de resíduo orgânico úmido é aproveitado no processo de compostagem. O restante do material não aproveitado é direcionado para o Aterro do Jockey Clube de Brasília, localizado na Via Estrutural.

Para que houvesse maior controle das amostras e menor dispersão de dados, as origens do RSU coletado foram restritas a duas Regiões Administrativas, sendo elas a do Sudoeste e do Cruzeiro, ambas localizadas a, respectivamente, 7 km e 10 km do centro de Brasília.

A Figura 4.1 apresenta uma imagem aérea com destaque às áreas envolvidas.



Figura 4.1 – Imagem aérea com destaque ao Plano Piloto de Brasília, Sudoeste e Cruzeiro

4.2. MATERIAIS

4.2.1. AMOSTRAGEM

O RSU oriundo das R.A.'s escolhidas era despejado num galpão de recebimento e previamente homogeneizado com o uso de uma pá carregadeira, para garantir que amostras das duas R.A.'s seriam coletadas (Figura 4.2).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.2 – Galpão de recebimento de RSU: (a) coleta por caminhão basculante; (b) coleta por caminhão compactador; (c) homogeneização.

Em seguida fazia-se uma triagem para retirada de materiais que pudessem, de alguma forma, atrapalhar a execução dos ensaios e/ou interferir nos dados, tais como pneus, colchões, cadeiras, chapas metálicas e de madeira de maiores dimensões, etc (Figura 4.3).



Figura 4.3 – Triagem dimensional das amostras

Uma vez realizada a triagem, o RSU era acondicionado em tonéis plásticos e transportados até o local de realização dos ensaios, o Laboratório de Geotecnia Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), na Asa Norte.

Os tonéis plásticos utilizados para acondicionamento e transporte das amostras são dotados de sistema de vedação por alça e borracha, conforme mostrado na Figura 4.4, o que garante a manutenção dos teores de umidade bem como a segurança na locomoção e manuseio.



Figura 4.4 – Tonéis plásticos para acondicionamento e transporte das amostras

4.2.2. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Dado que os estudos com resíduos sólidos são ainda incipientes, e que as características mecânicas dos RSU não estão bem definidas, a caracterização das amostras consiste em uma etapa de grande importância para o estudo das suas propriedades, uma vez que comparações entre resultados só podem ser feitas entre materiais de características semelhantes. Assim sendo, a seguir serão expostas as principais informações acerca dos materiais coletados e ensaiados durante a campanha experimental da pesquisa.

4.2.2.1. IDENTIFICAÇÃO

Como já comentado no Capítulo 2, o comportamento mecânico do resíduo é função das propriedades de cada um dos seus componentes e do grau de influência que cada uma das

partes constituintes do maciço exerce no todo. Dessa forma, a identificação e descrição do material auxiliam sobremaneira à interpretação e análise das propriedades do material.

Dados de origem, coleta, idade, estrutura e estado das amostras investigadas são apresentados abaixo:

- ORIGEM: residencial, comercial, escolas, indústrias e repartições públicas;
- COLETA: feita por caminhões fechados e caçambas;
- IDADE: fresco
- ESTRUTURA: mistura úmida, constituída basicamente por partículas sólidas e pastosas, sem excessos de fluidos;
- ESTADO: resíduo sem pré-tratamento, com baixo grau de decomposição;
- OBSERVAÇÕES GERAIS: coleta das amostras realizada em período não chuvoso, temperatura média dos dias de coleta de 27°C, umidade relativa do ar entre 30% e 60%.

Complementarmente à caracterização das amostras, procederam-se os ensaios laboratoriais descritos a seguir.

4.2.2.2. TEOR DE UMIDADE

Antes e após cada ensaio de cisalhamento direto, era feita a determinação do teor de umidade da amostra ensaiada. A determinação do teor de umidade das amostras esteve pautada na condição de base seca, sendo calculada pela expressão:

$$w (\%) = \frac{m_{úmida} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 \quad (4.1)$$

onde:

$w (\%)$ = teor de umidade da base seca em valores percentuais

$m_{úmida}$ = massa úmida (inicial)

m_{seca} = massa seca (final)

Para a obtenção da massa seca da amostra, a mesma era submetida à temperatura de 60°C, em estufa, por um período de 24 horas. A Tabela 4.1 apresenta os resultados de teores de umidade obtidos antes e após a realização de cada ensaio.

Tabela 4.1 – Valores de teores de umidades das amostras

ENSAIO	AMOSTRA	w antes (%)	w depois (%)
Envoltória 01	1	310,1	210,2
	2	288,9	199,8
	3	305,4	201,4
Envoltória 02	1	279,1	186,2
	2	277,5	179,1
	3	277,0	180,0
Envoltória 03	1	265,5	189,7
	2	280,8	192,7
	3	274,3	185,4

4.2.2.3. COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

A composição gravimétrica do resíduo estudado era determinada a cada coleta. Para tanto, dada a grande variedade de materiais encontrados, estes foram divididos em grupos principais e então pesados. Os grupos principais adotados foram: papéis e papelões, plásticos, matéria orgânica e finos, metais, têxteis, vidros e materiais diversos (borracha, madeira, resíduo de construção e demolição).

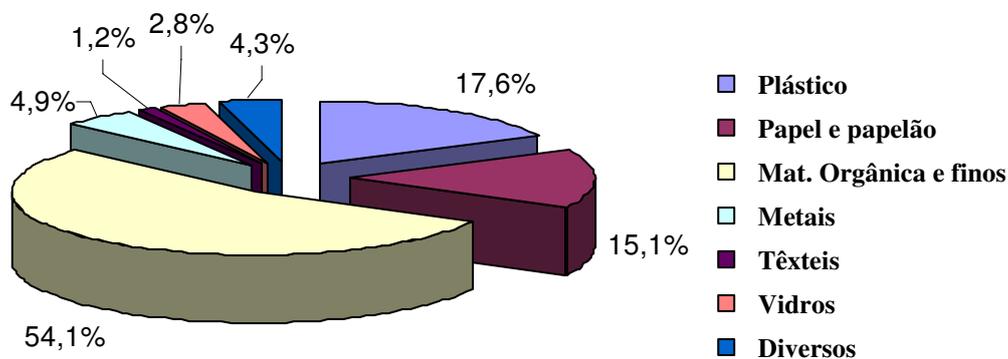


Figura 4.5 - Valores percentuais médios da composição gravimétrica da RSU estudado

Vale a pena salientar que a determinação da composição gravimétrica das amostras era realizada antes que se iniciassem os ensaios de cisalhamento direto, ou seja, os dados aqui apresentados correspondem à composição gravimétrica do resíduo em seu estado natural.

4.2.2.4. DISTRIBUIÇÃO DOS TAMANHOS DE PARTÍCULAS

A cada ensaio de cisalhamento direto, porções de 5 kg de amostra eram retiradas aleatoriamente para a caracterização dos tamanhos das partículas.

Dadas as dificuldades em se realizar ensaios de granulometria mediante peneiramento e sedimentação em RSU, a determinação dos tamanhos das partículas era feita segundo medição direta da maior dimensão dos elementos da amostra com o uso de uma régua milimetrada.

Após a aferição de suas dimensões, as partículas eram agrupadas de acordo com intervalos pré-estabelecidos de medidas, e posteriormente cada subgrupo era pesado para valoração do percentual em relação ao peso total da amostra. Os resultados médios obtidos para cada ensaio encontram-se na Tabela 4.2 abaixo:

Tabela 4.2 – Distribuição dos Tamanhos das Partículas do RSU estudado

Diâmetro (mm)	Percentagem em massa (%)
< 20	16,52
20 – 30	0,31
30 – 40	0,22
40 – 50	0,56
50 – 60	1,67
60 – 70	4,66
70 – 80	3,80
80 – 90	9,72
90 – 100	14,56
> 100	47,98

4.3. ENSAIOS

4.3.1. DETERMINAÇÃO DO ATRITO DO EQUIPAMENTO

Antes da realização do primeiro ensaio de cisalhamento, foi feita a determinação do atrito do equipamento, que consistiu em registrar as tensões horizontais suficientes para iniciar o deslocamento da porção inferior da caixa de cisalhamento, quando esta estava sujeita a níveis diferentes de carregamento normal.

O procedimento retornou como resultado para o atrito do equipamento o valor de $\phi_{eq} \approx 0,806$, o que, diante das dimensões do ensaio e dos níveis de tensões envolvidos, foi considerado como desprezível.

4.3.2. MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

Alguns cuidados tiveram que ser adotados antes da realização de cada ensaio. Tais medidas tinham por objetivo assegurar a funcionalidade do equipamento, bem como o controle dos dados com vistas à qualidade dos resultados. Eram observados: as condições de rolamento da porção inferior da caixa de cisalhamento e da mesa de apoio; a pesagem de cada um dos tonéis e o reaperto dos parafusos de fixação das porções superior e inferior da caixa de cisalhamento.

A moldagem dos corpos-de-prova constituía-se no lançamento do resíduo diretamente à caixa de cisalhamento em cinco camadas aproximadamente iguais (Figura 4.6), e da compactação manual pelo uso de um pilão.

O pilão utilizado para a compactação das camadas de amostras era composto por uma base quadrada pesando 34kg, confeccionada em concreto, e uma haste tubular metálica. Eram aplicados 80 golpes por camada, com queda de uma altura aproximada de 50cm, distribuídos em toda a seção da caixa.



Figura 4.6 – Lançamento do RSU na célula de cisalhamento

Foi adotado para a campanha de ensaios o peso específico da amostra como sendo de aproximadamente 6kN/m^3 , sendo portanto, necessários para a determinação de cada um dos pontos da envoltória, aproximadamente 550kg de material. Esta condição de confinamento está relacionada com um nível intermediário de compactação e que reproduz o que costumeiramente se observa nos aterros sanitários brasileiros.

O controle do grau de compactação das amostras era realizado mediante relação entre a massa de material compactado e o respectivo volume associado. Cabe informar que o processo de apiloamento das amostras, por si só, não era suficiente para atingir os níveis de compactação desejados, sendo portanto necessário o posicionamento da tampa da caixa de cisalhamento sobre as camadas finais para aplicação de cargas variadas, até que a relação desejada entre a massa de material e o volume ocupado na caixa de cisalhamento fosse atingida.

4.3.3. CONSOLIDAÇÃO DAS AMOSTRAS

Concluída a compactação, dava-se início à fase de adensamento da amostra. Uma talha manual instalada num pórtico móvel possibilitava a movimentação e posicionamento da tampa de transmissão de esforços normais.



Figura 4.7 – Posicionamento da tampa de transmissão de esforços normais

Após este procedimento, eram instalados o macaco hidráulico e o anel dinamométrico. Para cada nível de tensão normal aplicado era registrado o respectivo deslocamento vertical. Cada grupo de ensaio foi submetido a três estágios de carregamento de tensão normal ao plano de cisalhamento: 15, 30 e 50 kN/m²; sem reaproveitamento de material rompido.



Figura 4.8 – Consolidação da amostra.

Níveis mais altos de tensão normal não foram aplicados dado que:

- elevados níveis de tensão normal tendem a acarretar deformações verticais exageradas, dada a compressibilidade do material;
- tensões elevadas conduzem a grandes deslocamentos horizontais nos ensaios de cisalhamento em RSU, podendo inviabilizar a execução dos ensaios pelo equipamento.

4.3.4. CISALHAMENTO DIRETO

Para o cisalhamento dos corpos de prova foi definida como sendo a velocidade média do ensaio, o equivalente a 3mm/min.

Durante o cisalhamento, eram anotados os deslocamentos ocorridos e a respectiva tensão cisalhante a cada intervalo de 2 minutos, sem descuidar da manutenção dos esforços normais.

Importante comentar que se fizeram necessárias correções de área para a apresentação e análise dos resultados de cisalhamento, haja vista que o equipamento submetia as amostras a grandes deformações.

Uma outra implicação dos elevados deslocamentos horizontais está relacionada ao comprimento do êmbolo do cilindro hidráulico, que atingia no máximo 22cm. A partir deste nível de deformação o ensaio era interrompido e travas metálicas eram instaladas de forma a impedir o regresso da porção inferior da caixa. Ao mesmo tempo, o êmbolo do cilindro era recolhido e com o uso de calços o ensaio era retomado.

Foram também observadas rotações na tampa durante o cisalhamento das amostras que, entretanto, não foram evitadas, uma vez que interfeririam no rearranjo das tensões no interior da amostra, conduzindo a resultados irreais.

Apresentação e Análise dos Resultados

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, estão apresentados os resultados e as devidas análises acerca dos ensaios de cisalhamento direto em equipamento de grandes dimensões, realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental da Universidade de Brasília.

5.2. ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO EM EQUIPAMENTO DE GRANDES DIMENSÕES

5.2.1. ENSAIO 01

A Figura 5.1 apresenta as curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal relativo, obtidas do Ensaio 01.

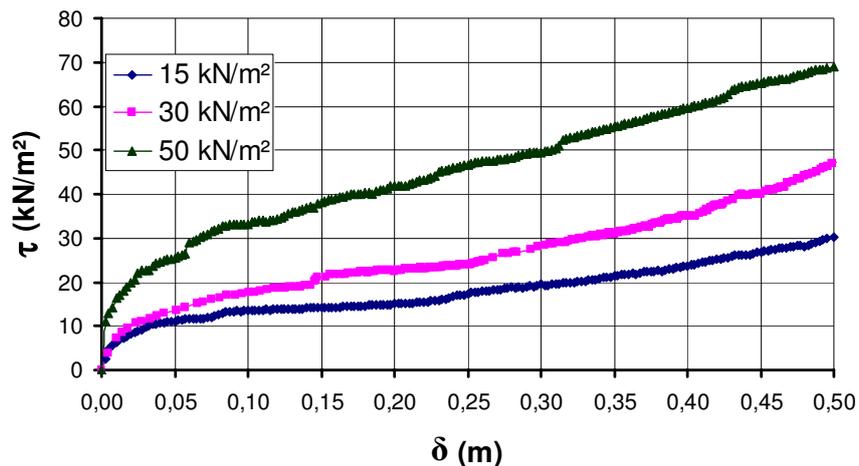


Figura 5.1 – Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal de 0,5m (Ensaio 01)

As curvas apresentam acréscimo contínuo da resistência para crescentes deslocamentos horizontais. Nota-se também que não houve mobilização de picos de resistência.

A não observação de mobilização de picos de resistência se faz coerente com as características mecânicas dos resíduos sólidos urbanos, e a presença de materiais fibrosos, tais como plásticos, papelões, têxteis, borrachas, etc. influenciam sobremaneira neste comportamento.

Assim sendo, as envoltórias de ruptura apresentadas na Figura 5.2 foram concebidas a partir da condição básica da validade do critério de Mohr-Coulomb, e considerando diferentes níveis de deslocamento horizontal, uma vez que não houve ruptura do material ensaiado.

Foram considerados os valores de tensão cisalhante mobilizado para cada estágio de deslocamento, sendo eles 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. A Figura 5.2 apresenta esses resultados:

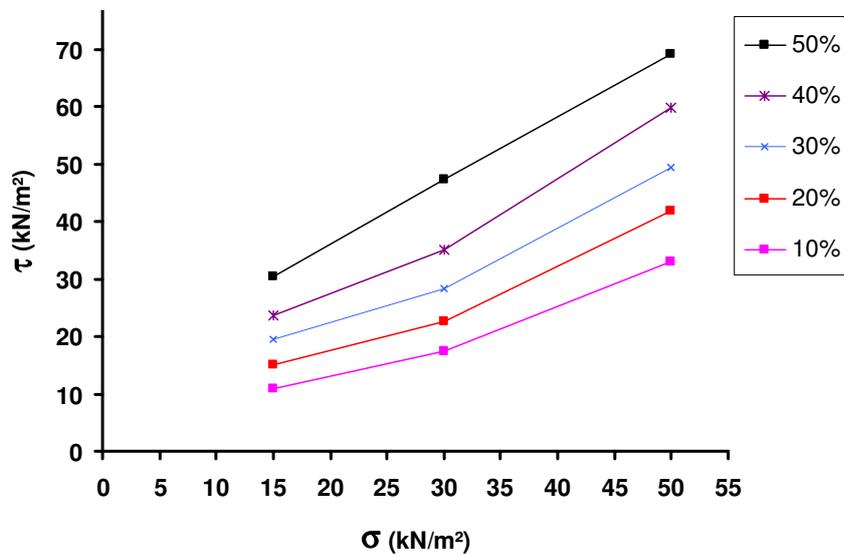


Figura 5.2 – Envoltória de ruptura para diferentes níveis de deslocamento (Ensaio 1)

Pode-se verificar que ocorreu bi-linearidade da envoltória para todos os níveis de deformações considerados, tal como previsto por Kölsch (1993), com tendência ao incremento do valor do ângulo de atrito no segundo trecho da curva.

A Tabela 5.1 apresenta as tensões envolvidas para os diferentes estágios de deslocamentos.

Tabela 5.1 – Tensões normais e cisalhantes atuantes para diferentes níveis de deformação

Tensão Normal (kN/m ²)	Tensão Cisalhante para Diferentes Níveis de Deslocamentos (kN/m ²)				
	10%	20%	30%	40%	50%
15	13,56	15,00	19,43	23,73	30,38
30	17,52	22,50	28,41	35,00	47,27
50	33,05	41,80	49,44	59,64	69,05

Utilizando-se o método dos mínimos quadrados, foram plotadas envoltórias lineares de ruptura (Figura 5.3) e seus principais resultados em termos de parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo) são apresentados na Tabela 5.2.

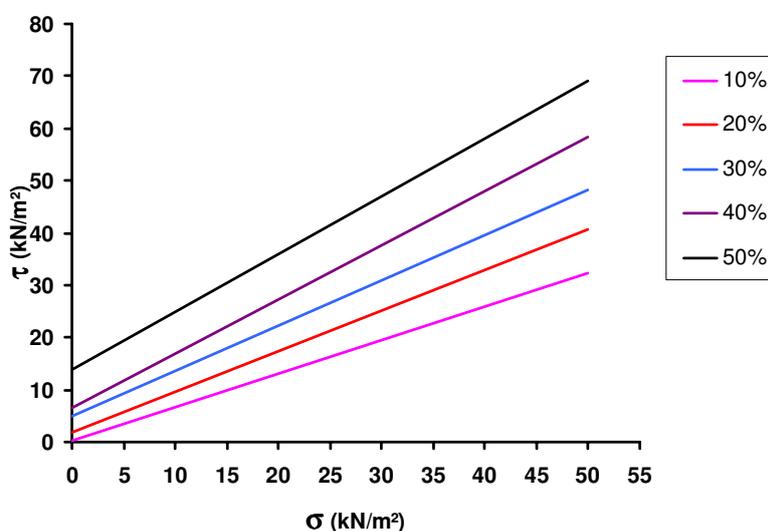


Figura 5.3 – Envoltórias lineares para diferentes níveis de deslocamento (Ensaio 1)

Tabela 5.2 – Parâmetros de resistência para diferentes graus de deslocamento (Ensaio 1)

Parâmetros de Resistência	Deslocamentos Horizontais Relativos				
	10%	20%	30%	40%	50%
c'	0,30	2,79	4,94	9,61	13,94
Φ'	33,22	38,63	41,67	46,68	47,78
R ²	0,9799	0,9825	0,9893	0,9934	0,9999

A Figura 5.4 explicita a variação do comportamento dos parâmetros de resistência em função do grau de deformação da amostra.

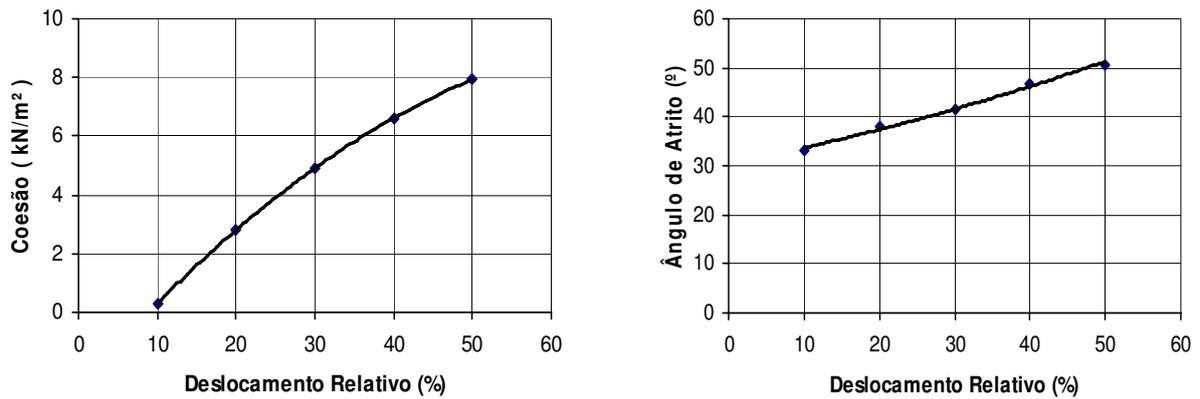


Figura 5.4 – Variação da coesão e ângulo de atrito em função dos deslocamentos horizontais (Ensaio 1)

De acordo com o exposto na Figura 5.4, pode-se notar que os valores de coesão aumentam com os deslocamentos. Já em termos de ângulo de atrito, verifica-se que seus valores aumentam para deslocamentos crescentes, quase que linearmente, sem apresentar indícios de estabilização.

O comportamento mecânico observado para as amostras ensaiadas está em consonância com os dados publicados por Fucale (2005) e Martins (2007), mas, por sua vez, discordam das conclusões previstas por König & Jessberger (1997), onde segundo os autores, para deslocamentos de 20% haveria a mobilização de quase todo o ângulo de atrito, e a partir deste nível de deformação os valores de intercepto coesivo começariam a ser mobilizados de maneira mais pronunciada.

5.2.2. ENSAIO 02

A Figura 5.5 mostra as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal, obtidas do Ensaio 02.

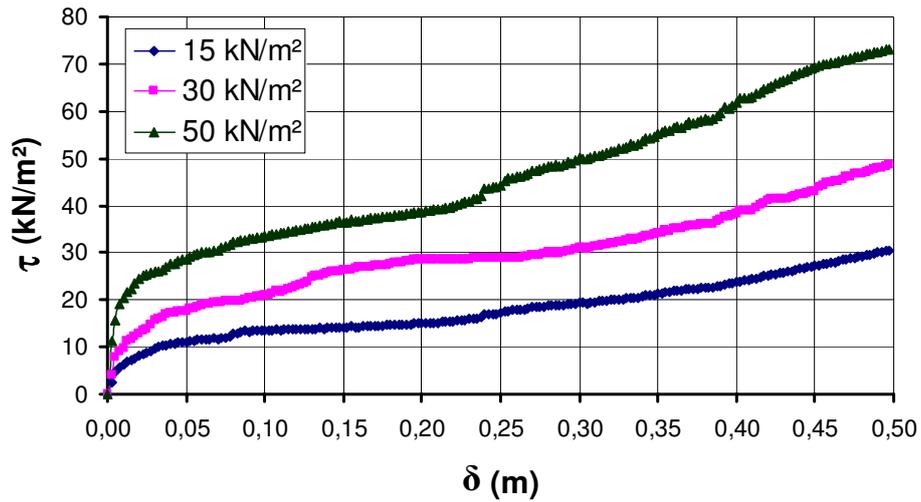


Figura 5.5 – Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal de 50% (Ensaio 02)

As curvas apresentadas na Figura 5.5 apresentam o mesmo comportamento das curvas apresentadas para o Ensaio 1, ou seja, ganho contínuo de resistência do material com o incremento de deslocamentos horizontais e não observação de picos de resistência.

Da maneira análoga ao observado para o Ensaio 1, as curvas indicam que haveriam acréscimos de resistência caso as amostras fossem submetidas a níveis maiores de deslocamentos.

A Figura 5.6 apresenta as envoltórias de ruptura para diferentes graus de deslocamentos, e a Tabela 5.3 apresenta as tensões envolvidas para os diferentes estágios de deslocamentos.

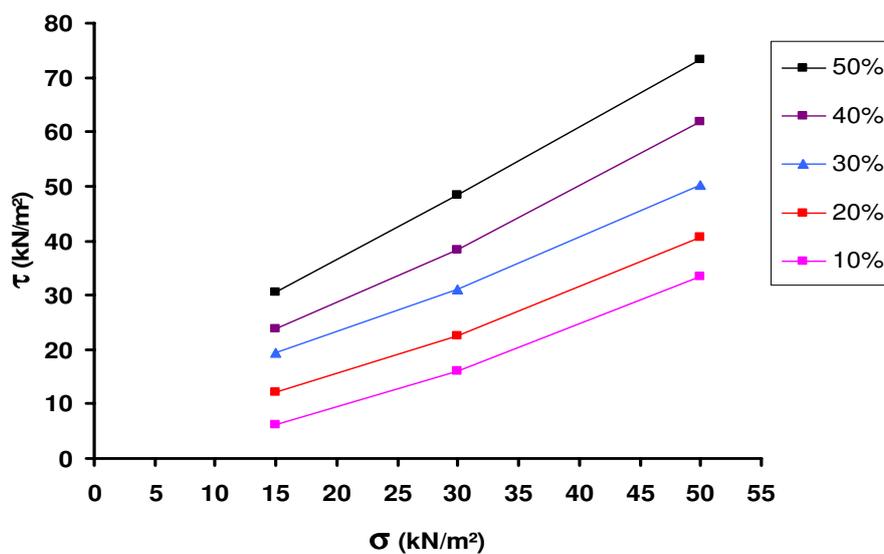


Figura 5.6 - Envoltória de ruptura para diferentes níveis de deslocamento (Ensaio 2)

Assim como para o Ensaio 1, pode-se verificar que ocorreu bi-linearidade da envoltória para todos os níveis de deslocamentos considerados, tal como previsto por Kölsch (1993), com tendência ao incremento do valor do ângulo de atrito no segundo trecho da curva.

Tabela 5.3 - Tensões normais e cisalhantes atuantes para diferentes níveis de deformação

Tensão Normal (kN/m ²)	Tensão Cisalhante para Diferentes Níveis de Deslocamentos (kN/m ²)				
	10%	20%	30%	40%	50%
15	6,16	12,08	19,43	23,73	30,51
30	15,96	22,57	31,09	38,40	48,54
50	33,50	40,70	50,13	61,92	73,23

A Figura 5.7 apresenta as envoltórias lineares de ruptura, e os principais resultados em termos de parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo) do Ensaio 2 são apresentados na Tabela 5.4.

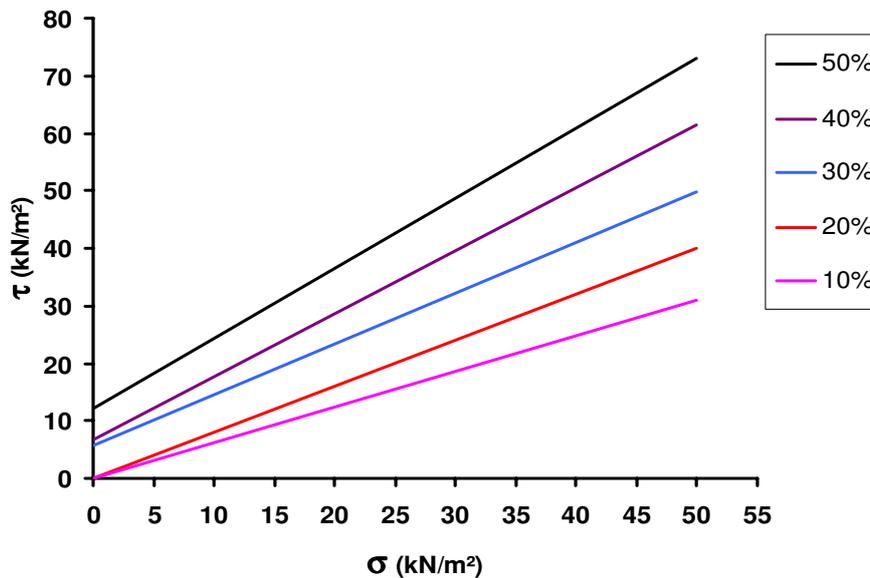


Figura 5.7 - Envoltórias lineares para diferentes níveis de deslocamentos (Ensaio 2)

Tabela 5.4 – Parâmetros de resistência para diferentes graus de deslocamento (Ensaio 2)

Parâmetros de Resistência	Deslocamentos Horizontais Relativos				
	10%	20%	30%	40%	50%
c'	0,00	0,93	5,64	6,65	12,09
ϕ'	33,82	38,50	41,66	47,87	50,72
R^2	0,9390	0,9950	0,9969	0,9974	0,9999

Importante comentar que a envoltória linear para 10% de deslocamento relativo gerou como resultado, um valor negativo para c' , o que é impossível. Assim sendo, a envoltória obtida por

regressão linear teve de ser modificada, de modo a apresentar coesão nula. Por este motivo, o valor de R^2 não se fez tão satisfatório.

A seguir, a Figura 5.8 apresenta a variação dos parâmetros de resistência (c' e Φ') para o Ensaio 2.

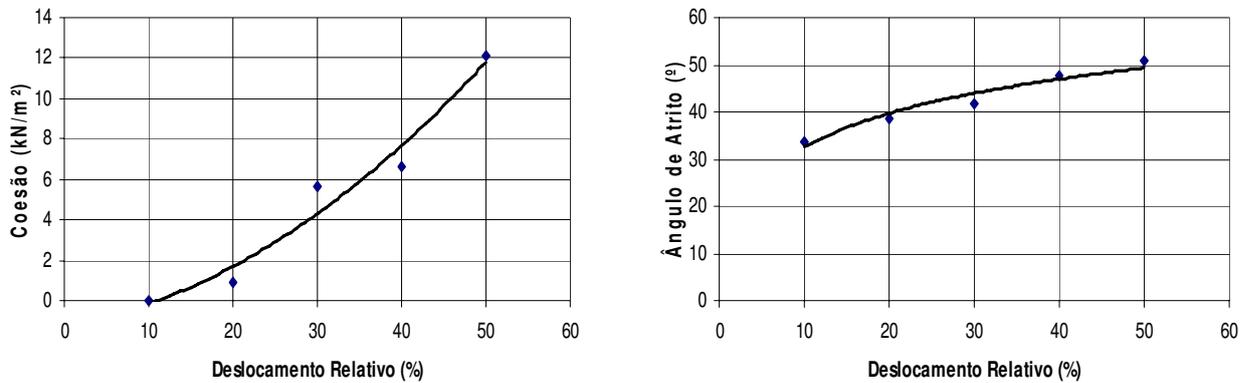


Figura 5.8 - Variação da coesão e ângulo de atrito em função dos deslocamentos horizontais (Ensaio 2)

De acordo com a Figura 5.8, vê-se que os valores ângulo de atrito aumentam para acréscimos de deslocamentos horizontais, apresentando, entretanto, indicações de estabilização para deslocamentos relativos maiores que 50%.

Os valores de intercepto de coesão, por sua vez, apresentam-se crescentes, sobretudo para níveis de deslocamentos maiores que 20%. Não apresenta indícios de estabilização, mesmo para deformações maiores que 50%, o que sugere a mobilização do efeito de reforço causado pela presença de fibras resistentes à tração no material.

5.2.3. ENSAIO 03

A Figura 5.9 apresenta as curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal relativo, obtidas do Ensaio 03.

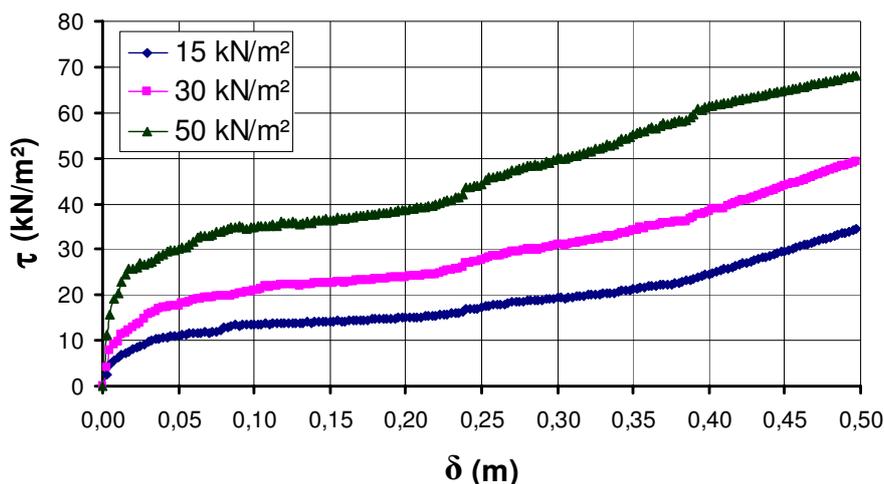


Figura 5.9 - Curvas de tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal de 50% (Ensaio 03)

As curvas apresentadas na Figura 5.9 apresentam o mesmo comportamento das curvas apresentadas para os Ensaio 1 e 2, ou seja, ganho contínuo de resistência do material com o incremento de deslocamentos horizontais e não observação de picos de resistência.

Da maneira análoga ao observado para os Ensaio 1 e 2, as curvas indicam que haveriam acréscimos de resistência caso as amostras fossem submetidas a níveis maiores de deformação.

A Figura 5.10 apresenta as envoltórias de ruptura para diferentes graus de deslocamentos, e a Tabela 5.5 apresenta as tensões envolvidas para os diferentes estágios de deslocamentos.

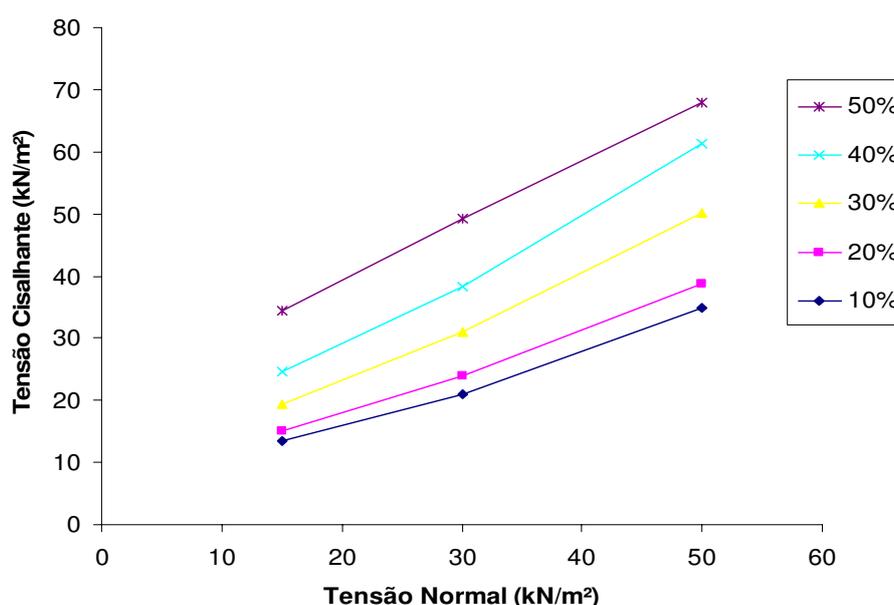


Figura 5.10 - Envoltória de ruptura para diferentes níveis de deslocamento (Ensaio 3)

Assim como ocorrido para os Ensaios 1 e 2, pode-se verificar que ocorreu bi-linearidade da envoltória para todos os níveis de deformações considerados, tal como previsto por Kólsh (1993), com tendência ao incremento do valor do ângulo de atrito no segundo trecho da curva.

Tabela 5.5 - Tensões normais e cisalhantes atuantes para diferentes níveis de deformação

Tensão Normal (kN/m ²)	Tensão Cisalhante para Diferentes Níveis de Deslocamentos (kN/m ²)				
	10%	20%	30%	40%	50%
15	13,56	15,00	19,43	24,60	34,44
30	20,90	24,00	31,09	38,40	49,32
50	34,97	38,70	50,13	61,41	67,96

A Figura 5.11 apresenta as envoltórias lineares de ruptura, e os principais resultados em termos de parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo) do Ensaio 2 são apresentados na Tabela 5.6.

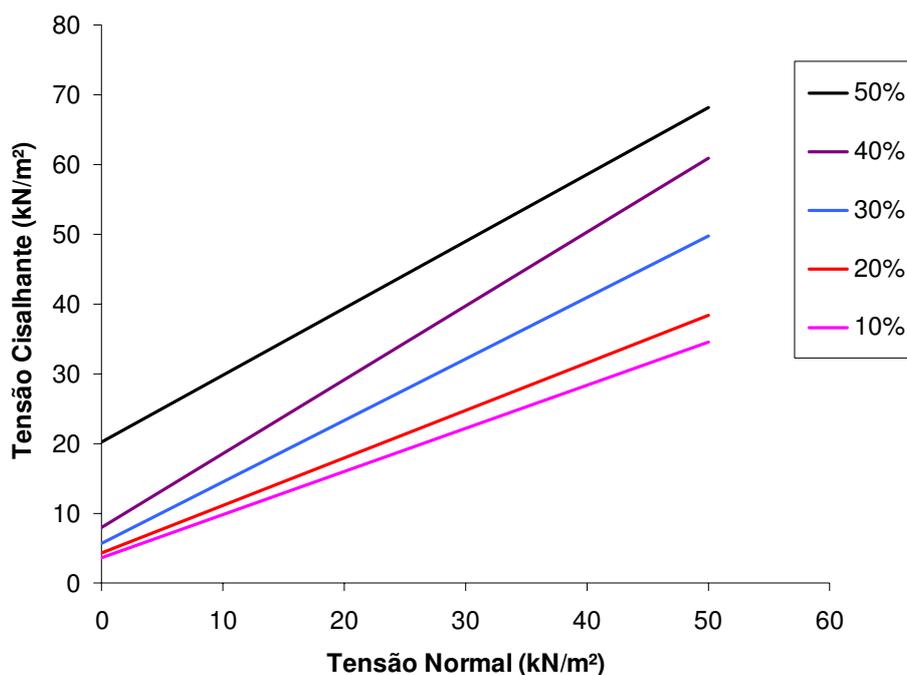


Figura 5.11 - Envoltórias lineares para diferentes níveis de deslocamento (Ensaio 3)

Tabela 5.6 – Parâmetros de resistência para diferentes graus de deslocamento (Ensaio 3)

Parâmetros de Resistência	Deslocamentos Horizontais Relativos				
	10%	20%	30%	40%	50%
c'	3,61	4,35	5,64	8,65	20,29
Φ'	28,10	34,49	41,66	44,28	43,63
R^2	0,9906	0,9969	0,9969	0,9963	0,9997

A seguir, a Figura 5.12 apresenta a variação dos parâmetros de resistência (c' e Φ') para o Ensaio 3.

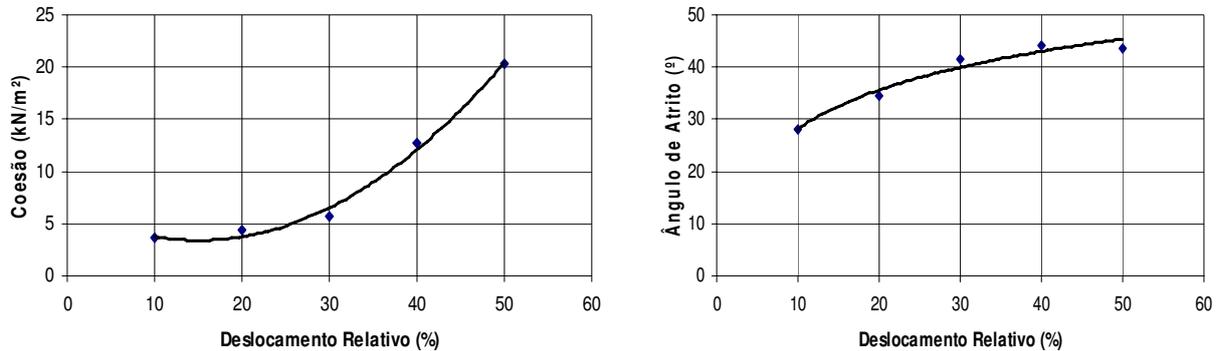


Figura 5.12 - Variação da coesão e ângulo de atrito em função dos deslocamentos horizontais (Ensaio 3)

De acordo com a Figura 5.12, vê-se que os valores ângulo de atrito aumentam quando ocorrem acréscimos de deslocamentos horizontais, apresentando, entretanto, indicações de estabilização para deformações maiores que 50%.

Os valores de intercepto de coesão, por sua vez, apresentam-se crescentes sobretudo, para níveis de deslocamentos maiores que 30%. Não apresenta indícios de estabilização, mesmo para deformações maiores que 50%, o que sugere a mobilização do efeito de reforço causado pela presença de fibras resistentes à tração no material.

5.3. CONSIDERAÇÕES

O critério de ruptura utilizado para a determinação dos parâmetros de resistência do resíduo sólido estudado foi o critério de Mohr-Coulomb, e tais valores estão referidos aos graus de deslocamentos relativos impostos às amostras.

As envoltórias de ruptura foram obtidas mediante o uso do artifício matemático da regressão linear. A Tabela 5.7 apresenta o resumo dos parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, contemplando diferentes graus de deslocamentos.

Tabela 5.7 – Resumo dos parâmetros de resistência obtidos nos três ensaios

ENSAIOS	Parâmetros de Resistência	Deslocamentos Horizontais Relativos				
		10%	20%	30%	40%	50%
1	c'	0,30	2,79	4,94	6,61	7,94
	ϕ'	33,23	38,63	41,67	46,68	47,78
	R^2	0,9399	0,9725	0,9793	0,9834	0,9999
2	c'	0,00	0,93	5,64	6,65	12,09
	ϕ'	33,82	38,50	41,66	47,87	50,72
	R^2	0,9390	0,9950	0,9969	0,9974	0,9999
3	c'	3,61	4,35	5,64	12,65	20,29
	ϕ'	28,10	34,49	41,66	44,28	43,63
	R^2	0,9906	0,9969	0,9969	0,9963	0,9997

De maneira geral, pode-se afirmar que os resultados obtidos foram bons e que apresentam entre si, certa coerência. A Figura 5.13 apresenta as envoltórias de ruptura obtidas para 50% de deformação das amostras.

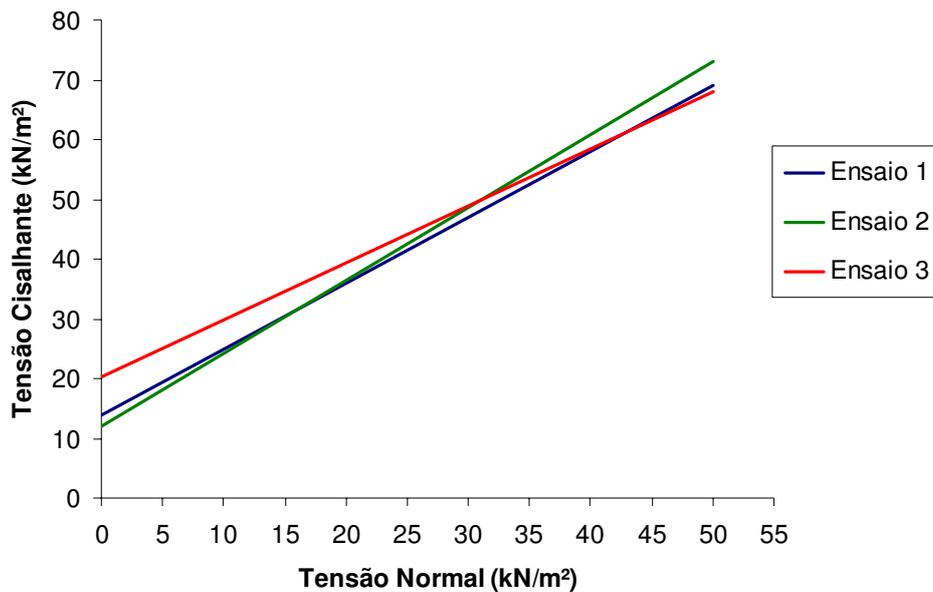


Figura 5.13 – Envoltórias de ruptura para 50% de deslocamento relativo (Ensaios 1, 2 e 3)

Os resultados obtidos de c' e ϕ' foram plotados no diagrama proposto por Sanchez-Alciturri *et al.*(1993) para a utilização de parâmetros em projetos, tal como pode ser visto na Figura 5.14.

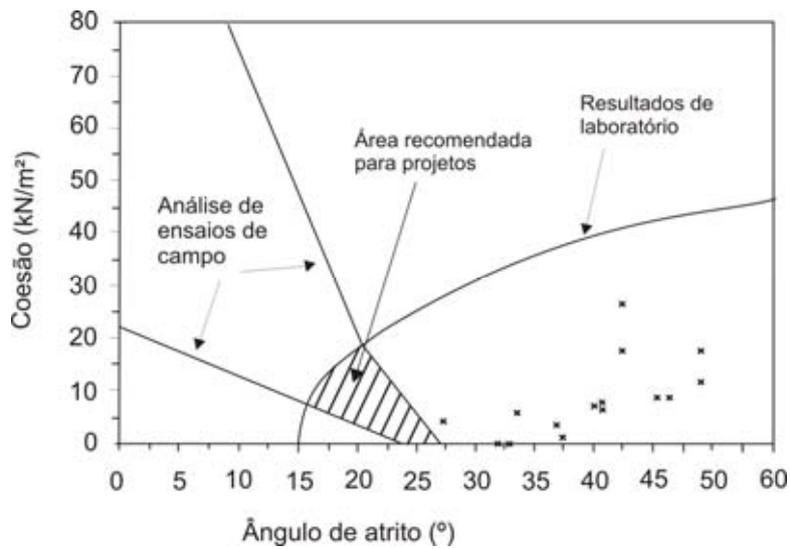


Figura 5.14 – Valores de c' e Φ' obtidos nos ensaios, plotados no diagrama proposto por Sanchez-Alciturri *et al.*(1993).

Nota-se que, apesar de os resultados não estarem inseridos na área recomendada para projetos, todos os dados encontram-se inseridos na faixa de valores que compilam resultados de ensaios de laboratório em RSU.

Percebe-se também aproximação aos valores encontrados por Singh & Murphy (1990). Gabr & Valero (1995), König & Jessberger (1997) e Fucale (2005).

Conclusões

6.1. DOS ENSAIOS

Diante da experiência acumulada e dos resultados obtidos, pode-se afirmar que o equipamento atendeu aos objetivos propostos, não apresentando nenhum sinal de deformação ou rompimento dos perfis por conta das tensões a que foi submetido, e proporcionando bons resultados para todos os ensaios realizados, até mesmo os da fase de testes do equipamento.

Pode-se dizer que, uma vez montado, a operação do equipamento é bem simples.

As dimensões do equipamento possibilitaram a realização de ensaios em amostras representativas, sem que houvesse a necessidade de pré-tratamento do RSU.

A estrutura de reação do equipamento é capaz de suportar cargas verticais da ordem de 500 kN sem apresentar deformações excessivas.

Como aspectos negativos do equipamento percebidos durante a operação do mesmo, destacam-se:

- por ser robusto e pesado, a operação do equipamento exige mecanismos compatíveis com tais características, o que torna sua montagem dificultada. Entretanto, a utilização de talhas e pórticos rodantes auxiliam sobremaneira na execução desta tarefa;
- os sistemas de aplicação dos esforços normais e cisalhantes são manuais, o que torna mais difícil controlar as velocidades de aplicação das cargas;
- as magnitudes dos deslocamentos (verticais e horizontais) acabaram por inviabilizar a utilização de sensores para suas determinações;
- durante a fase de cisalhamento, os ensaios tinham de ser periodicamente interrompidos e reiniciados, devido ao fato de que o êmbolo do cilindro hidráulico utilizado não contemplava os comprimentos requeridos. Dessa forma, eram necessários calços de

travamento para impedir o retrocesso da porção inferior da caixa de cisalhamento. Este processo gerou descontinuidades pontuais nas curvas de tensão *versus* deslocamento.

- o adensamento das amostras se fez um tanto trabalhoso, dado que, uma vez sendo a aplicação do esforço manual e não constante, era necessário aguardar que a tensão estabilizasse para aplicação de novo esforço e/ou início do ensaio de cisalhamento.

A realização dos ensaios em laboratório favoreceu a campanha experimental dado que não era necessário desmontar os sistemas de aplicação de esforços e de medição ao final de cada dia, o que deve acontecer na campanha de ensaios *in situ*.

A restrição da coleta de amostras a duas Regiões Administrativas conduziu a amostras com características bem semelhantes, facilitando a análise dos dados obtidos.

Apesar da semelhança entre as composições das amostras, estas apresentaram grande variação dos teores de umidade, o que acarretou alguma variação dos parâmetros medidos.

6.2. DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos podem ser considerados como sendo bons, e a envoltória de Mohr-Coulomb se mostrou adequada para pequenas e médias deformações. Entretanto, para níveis maiores de deformações, as envoltórias se apresentavam com feição bi-linear, tal como proposto por Kölsch (1993).

Em nenhum dos ensaios realizados houve a observação de picos de resistência nas curvas de tensão-deformação, mesmo para deslocamentos relativos de 50cm, o que corresponde a 50% de deformação das amostras.

Em relação ao teor de umidade das amostras, ficou evidente, para o caso do Ensaio 1, que a maior concentração de fluidos nas amostras conduziram a valores mais baixos de resistência.

Com relação ao ângulo de atrito, os valores encontrados para a deformação máxima de 50cm variaram entre 43,63° e 50,72°, apresentando indícios de estabilização após os 50% de deslocamento relativo das amostras.

Já em relação ao intercepto de coesão, os valores se apresentaram tal como tipicamente encontrado na literatura, apresentando-se crescente, sobretudo para níveis maiores de deformação. Seus valores para deslocamento relativo máximo de 50% situaram-se entre 13,94 kN/m² e 20,29 kN/m².

Mesmo para 50% de deslocamento relativo não foi possível mobilizar a resistência de ruptura das fibras presentes nas amostras de RSU.

O alto teor de materiais fibrosos tais como plásticos, papéis, papelões, têxteis, etc. contribuíram para a apresentação de bi-linearidade das envoltórias para grandes deformações.

6.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- i. Realizar ensaios com níveis maiores de tensão vertical, aproximando o ensaio das situações reais de carregamentos em aterros sanitários;
- ii. A determinação de envoltórias com mais de três pontos pode ser uma importante ferramenta para avaliar o alinhamento das envoltórias de ruptura dos resíduos sólidos para grandes solicitações;
- iii. Realizar ensaio com amostras de resíduos com diferentes idades para fins de comparação de parâmetros e avaliação dos efeitos do envelhecimento do lixo;
- iv. Utilizar dados de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões para a determinação de estabilidade de taludes de RSU e comparações com casos reais de ruptura, mediante retro-análises;
- v. Realizar ensaios de cisalhamento que possibilitem submeter as amostras a níveis maiores ainda de deslocamentos relativos, tal como o ensaio com “ring-shear”, de maneira que as fibras presentes nas amostras possam ser totalmente mobilizadas;
- vi. Automatização dos sistemas de aplicação de esforços verticais e horizontais e aquisição de dados, com o objetivo reduzir o risco de falhas humanas e suas interferências nos resultados.

Referências Bibliográficas

Benson, C.H., Othman, M.A. (1992). Hydraulic and Mechanical Characteristics of a compacted municipal solid waste compost. *Waste Management and Research*, Vol. 11, 127-142.

Benvenuto, C.; Cunha, M.A. (1991). Escorregamento em massa de lixo no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo, SP. *Anais do II Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos*, vol. 2, 55–66.

Caicedo, B., Yamin, L., Giraldo, E., Coronado, O. (2002). Geomechanical properties of municipal solid waste in Doña Juana sanitary landfill. *Proc. 4th Environmental Geotechnics – 4th ICEG*, Rio de Janeiro, de Melo e Almeida (eds), Rio de Janeiro, Vol. 1, 177-182.

Carvalho, M.F. (1999). *Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 300p.

Coumoulos, D.G., Koryalos, T.P., Metaxas, I.L., Gioka, D.A. (1995). The main landfill of Athens – geotechnical investigation. *Proc. 5th International Landfill Symposium*, Sardinia, S. Margherita de Pula, CISA, Cagliari.

Del Grecco, O., Oggeri, C. (1993). Geotechnical Parameters of Sanitary Wastes. *IV International Landfill Symposium – Sardinia’93*. S. Margherita di Pula, Italy, 1421-1431.

Dixon, N., Langer, U. (2006). Development of a MSW classification system for the evaluation of mechanical properties. *Waste Management*, V. 26, 220-232.

Dixon, N., Russel, D., Jones, V. (2005). Engineering properties of municipal solid waste. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 23, nº3, 205–233.

Edinçliler, A., Benson, C. H., Edil, T. B. (1996). Shear strength of municipal solid waste. Geotechnical Engineering Program, Department of Civil e Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison Wisconsin 53706, U.S.A., 65p. *Environmental Geotechnics Report 96-2*.

Fasset, J. B., Leonards, G. A., Repetto, P.C. (1994). Geotechnical properties of municipal solid wastes and their use in landfill design. In: *WASTE TECHNICAL CONFERENCE – WASTETECH ’94*, 1994, Charleston, 32 p.

Fucale, S.P. (2005). *Influência dos componentes de reforço na resistência de resíduos sólidos urbanos*. Tese de Doutorado, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 215p.

Fucale, S.P., Jucá, J.F.T. (2002) Estudo da resistência à penetração dinâmica (SPT) em aterros de resíduos sólidos urbanos. Proc. XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Cancun, México.

Gabr, M. A., Valero, S. N. (1995). Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 18, nº 2, 241-251.

Gandola, M., Dugnani, L., Bressi, G., Acaia, C. (1994). The determination of subsidence effects at municipal solid waste disposal sites. Proc. Simpósio Internacional de Destinação do Lixo, Salvador, Bahia, no prelo, 17p.

Gonzalez, J. H. P. (1995). Comportamiento geotecnico de vertederos controlados de residuos solidos urbanos. Tesis Doctoral. Escuela técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidade de Cantabria, Santander, Espana, 587p.

Gotteland, P.; Lemaréchal, D.; Richard, P. (1995). Analysis and monitoring of the stability of a domestic waste landfill. Proc., 5th International Landfill Symposium - Sardinia 95, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, CISA, 777-787.

Grisolia, M., Napoleoni, Q., (1996). Geotechnical characterization of municipal solid waste: choice of design parameters. Proc. of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, A.A. Balkema, 5-8 november, V.2: 641-646.

Grisolia, M., Napoleoni, Q., Tancredi, G., (1995). The use of triaxial tests for the mechanical characterization of MSW. Proc. 5th International Landfill Symposium, Sardinia, S. Margherita di Paula, Cagliari, Italy. CISA, 761-768.

Howland, J. D., Landva, A. O. (1992). Stability analysis of a municipal solid waste landfill. Geotechnical Special Publication, nº 31, Proc. Stability and Performance of Slopes and Embankments – II , ASCE, New York, vol. 2, 1216-1231.

Junqueira, F. F. (2000). Análise do comportamento de resíduos sólidos urbanos e sistemas dreno-filtrantes em diferentes escalas, com referência ao aterro do Jockey Clube – DF. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 289p.

Kavazanjian, E., Matasovic, N., Bonaparte, R., Schmertmann, G. R. (1995). Evaluation of MSW properties for seismic analysis. Proc., International Conference Geoenvironment 2000, New Orleans, Louisiana, ASCE Special Publication 46, vol. 2, 1126-1141.

Knochenmus, G., Wojnarowicz, M., Van Impe (1998). Stability of municipal solid waste. In Proc. of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, Sêco e Pinto (ed), Balkema, Rotterdam, ISBN 905809006x, Vol. 3, 977-1000.

Kölsch, F. (1993). The bearing behaviour of domestic waste and related consequences for stability. Proc., 4th International Landfill Symposium - Sardinia 93, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy. CISA, 1393-1410.

König, D., Jessberger, H.L. (1997). Waste Mechanics. Proc., 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Special Report of the TC5 Technical Committee on Waste Mechanics, Hamburg, Germany, 35-76.

de Lamare Neto, A., (2004). Resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos e de materiais granulares com fibras, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 190p.

Landva, A. O., Clark, J. I., (1990). Geotechnics of waste fill. Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 86-103.

Landva, A. O., Clark, J. I., (1987). Geotechnical testing of wastefill. Report submitted to the London Institute of Civil Engineers.

Landva, A. O., Clark, J. I., Weisner, W. R., Burwash, W. J., (1984). Geotechnical engineering and refuse landfills. Proc. 6th National Conference on Waste Management, British Columbia, Vancouver, Canada.

Machado, S. L., Carvalho, M. F., Dourado, K. A., Nascimento, J. F. (2006). Estudo do efeito do envelhecimento na resistência ao cisalhamento de amostras de resíduo sólido urbano. In: XIII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba, Paraná, vol. 3. 1419-1424.

Machado, S.L. , Carvalho, M.F. , Nascimento, J.C.F. , Dourado, K.A. (2005). Estudo do Comportamento Mecânico dos Resíduos Sólidos Urbanos Sob a Influência da Biodegradabilidade, XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, 1-8.

Machado, S.L., Carvalho, M. F., Vilar, O. M. (2002). Constitutive model for municipal solid waste. Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, New York, Vol. 128, nº11, 940-951.

Manassero, M., Van Impe, W.F., Bouazza, A. (1996). Waste disposal and containment. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 2., Osaka, Japan, v.3, 1425-1474.

Martins, H.L. (2006). Avaliação da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto em equipamento de grandes dimensões. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Ambiental/UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 116p.

Mitchell, R.A., Mitchell, J.K. (1992). Stability evaluation of waste landfills. Geotechnical Special Publication, nº 31, Proc. Stability and Performance of Slopes and Embankments – II , ASCE, New York, vol. 2, 1152-1187.

Nascimento, J. C. F. (2007). Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 154p.

- Oliveira, D. A. F. (2002). Estabilidade de Taludes de Maciços de Resíduos Sólidos Urbanos. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 154p.
- Richardson, G., Reynolds, D. (1991). Geosynthetic consideration in a landfill on compressible clays. Proceedings of Geosynthetics 91, Atlanta, GA, Industrial Fabrics Association Internacional, St. Paul, MN, vol.2, 507-516.
- Sanchez-Alciturri, J. M., Palma, J., Sagasetta, C., Canizal, J. (1993). Mechanical properties of wastes in a sanitary landfill. Proc. International Conference Green'93, Waste Disposal by Landfill, Sarsby (ed), Balkema, Rotterdam, 357-363.
- Santos, L. A. O., Presa, E. P., (1995). Compressibilidade de aterros sanitários controlados. III Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos, REGEO, Ouro Preto, Minas Gerais, 577-591.
- Siegel, R. A., Robertson, R. J., Anderson, D. G. (1990). Slope stability investigations at a landfill in southern California. In: Landva, A.; Knowles, D., (Ed.) Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, ASTM STP1070, Philadelphia, 259-284.
- Singh, S., Murphy, B. (1990). Evaluation of the stability of sanitary landfills. In: Landva, A.; Knowles, D., eds. Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, ASTM STP 1070, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 240-258.
- Sowers, G. F., (1973). Settlement of waste disposal fills. Proc. 8th International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering, Moscou, Russia, vol. 2, 207-210.
- Tapahuasco, W. F. C. (2005). Avaliação de modelos de previsão de recalques dos resíduos sólidos urbanos do aterro do Jockey Clube de Brasília. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 138p.
- Tchonobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., (1993). Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill Inc, 978p.
- Van Impe, W. F., Bouazza, A. (1998). Large Shear Tests on Compacted Bales of Municipal Solid Wastes, Soils and Foundations, Vol. 38, No. 3, 199–200.
- Van Meerten, J. J., Seelmejer, J. B., Pereboom, D. (1995). Prediction of landfill settlements. Proc. International Landfill Symposium, vol.5, Cagliari, Sardinia, CISA, Italy.
- Weimer, K. (1982). Qualitative und quantitative Kriterien zur Bestimmung der Dichte von Abfällen in geordneten Deponien. Dissertation, TU Berlin, 189p.
- Withian, J. L., Tarvin, P. A., Bushell, T. D., Snow, R. E., Germann, H. W. (1995). Prediction and performance of municipal landfill slope. Proc. International Conference Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication 46, ASCE, New Orleans, Louisiana, vol.2, 1005-1019.