

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E DE  
MATERIAIS GRANULARES COM FIBRAS

Ademaro de Lamare Neto

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
CIVIL

Aprovado por:

---

Prof. Cláudio Fernando Mahler, D. Sc.

---

Prof. Maurício Ehrlich, D. Sc.

---

Prof. Fernando Artur Brasil Danziger, D. Sc.

---

Prof. Marcus Peigas Pacheco, Ph.D.

---

Prof. Alberto S. F. J. Sayão , Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2004

DE LAMARE NETO, ADEMARO

Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos

Urbanos e de Materiais Granulares [Rio de Janeiro] 2004

XXIV, 190 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.SC.,

Engenharia Civil, 2004)

Tese – Universidade Federal do Rio de

Janeiro, COPPE

1. Resistência ao Cisalhamento

2. Resíduos Sólidos Urbanos

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Cláudio Fernando Mahler pelo empenho, interesse e paciência com que conduziu este trabalho e, sobretudo, pela amizade demonstrada desde o primeiro momento.

Aos Professores Fernando Danziger e Maurício Ehrlich pelo apoio e conselhos nos momentos certos.

Ao Professor Willy Lacerda pelos comentários e importantes sugestões da minuta do trabalho.

À Prof<sup>a</sup> Delma Vidal e ao técnico Reinaldo do ITA pela inestimável colaboração e sugestões, sem o que este trabalho seria inviável.

Ao Prof<sup>o</sup> Alberto Sayão da PUC pelo empenho e boa vontade, possibilitando a execução de ensaios de cisalhamento, sem os quais este trabalho não poderia ser concluído.

Ao eng<sup>o</sup> William, responsável pelo Laboratório de Geotecnia da PUC, pela orientação valiosa na execução dos ensaios de cisalhamento.

Aos colegas da COPPE, particularmente o Antonio Calle, Abdul e Julio, pelo apoio em todos os momentos.

À minha esposa Cristina e às minhas filhas Renata e Flavia (Chalinha) para as quais não haveria palavras suficientes...

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D. Sc).

## RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E DE MATERIAIS GRANULARES COM FIBRAS

Ademaro de Lamare Neto

Março/2004

Orientador: Cláudio Fernando Mahler

Programa: Engenharia Civil

O objetivo principal deste trabalho é o de se estudar em laboratório o comportamento de materiais granulares contendo fibras de baixa rigidez, verificando a influência destas nas suas resistências ao cisalhamento. Neste sentido procurou-se avaliar a interação material granular - fibras em materiais com estas características submetidos a ensaios de cisalhamento direto em equipamentos convencional e especial (grandes dimensões), com o objetivo de se verificar uma provável analogia entre estes materiais e o lixo. Os materiais utilizados consistiram de amostras de areia misturadas, em percentuais variados, a pequenas tiras de plástico, obtidas de sacos de embalagem de supermercados e amostras do resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo, com diferentes tamanhos máximos de partículas. Paralelamente procedeu-se à mistura do mesmo resíduo do pré-tratamento do lixo a diferentes percentuais de areia, com a finalidade de se verificar as características do material assim obtido e a viabilidade de seu possível aproveitamento, por exemplo, como material de pavimentação.

Os resultados dos ensaios realizados, comparados àqueles disponíveis obtidos a partir de extensa revisão bibliográfica, mostraram que as fibras desempenham papel importante no comportamento mecânico destes materiais compostos. Esta influência é manifestada, sobretudo, no aumento dos valores dos parâmetros de resistência e das tensões de cisalhamento mobilizadas devido às forças de tração destas fibras.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D. Sc.).

SHEARING RESISTANCE OF URBAN SOLID WASTE AND GRANULAR MATERIALS  
WITH FIBERS

Ademaro de Lamare Neto

March / 2004

Advisor: Cláudio Fernando Mahler

Program: Civil Engineering.

This work's principal topic is the laboratory study of the behavior of granular materials containing fibers with little rigidity to find their influence on its parameters of shearing resistance. Accordingly, the purpose was to assess the interaction of granular material with fibers in materials with those characteristics undergoing direct shearing tests in conventional and special equipment (large dimensions), in order to confirm a likely analogy between these materials and the actual waste. The materials used were samples of sand mixed, at varying percentages, with small plastic strips from plastic supermarket bags and samples of the waste from the mechanical-biological pretreatment, with different maximum particle sizes. Parallel to this, the same residue from the waste pretreatment was mixed to different percentages of sand to confirm the characteristics of the material thus obtained and whether it could be used as a paving material.

The results of the tests, compared to those found in an extensive bibliographic review, showed that fibers play an important role in the behavior of those compound materials. This influence is evenmore apparent in the rise in values of the resistance parameters and shear stress mobilized due to the tensile force of these fibers.

## ÍNDICE

<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XXI</b>
<b>LISTA DE FOTOS.....</b>	<b>XXIV</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VI</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 - RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (LIXO).....</b>	<b>5</b>
2.1 - Introdução.....	5
2.2 - Classificação dos Resíduos Sólidos.....	5
2.2.1 - De acordo com a origem.....	5
2.2.1.1 - Resíduos Sólidos Urbanos.....	5
2.2.1.2 - Resíduos Sólidos dos Serviços de Saúde e Hospitalar.....	6
2.2.1.3 - Resíduos Sólidos Industriais.....	7
2.2.1.4 - Resíduos Sólidos Nucleares.....	7
2.2.1.5 - Resíduos Especiais.....	8
2.2.2 – De acordo com os componentes.....	8



2.2.2.1 - Materiais Inertes.....	8
2.2.2.2 - Materiais altamente deformáveis.....	8
2.2.2.3 - Materiais biodegradáveis.....	9
2.3 - Características Principais do Lixo.....	11
2.3.1 - Características Físicas.....	11
2.3.1.1 - Composição Física ou Gravimétrica.....	11
2.3.1.2 - Composição Granulométrica.....	16
2.3.1.3 - Temperatura.....	18
2.3.1.4 - Peso Específico.....	19
2.3.1.5 - Teor de Umidade.....	22
2.3.1.6 - Permeabilidade.....	25
2.3.2 - Características Químicas.....	28
2.3.2.1 - Poder Calorífico.....	28
2.3.2.2 - Potencial Hidrogeniônico.....	28
2.3.2.3 - Composição Química.....	28
2.3.2.4 - Relação Carbono / Nitrogênio.....	28
2.3.3 - Características Biológicas.....	28
2.3.4 - Características Mecânicas.....	29
2.3.4.1 - Resistência ao Cisalhamento.....	29
2.3.4.2 - Compressibilidade.....	51
<b>CAPÍTULO 3 - SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS (FIBROSSOLOS).....</b>	<b>57</b>
3.1 - Introdução.....	57
3.2 - Comportamento mecânico e mecanismos de ruptura.....	58
3.3 - Fatores que influenciam na resistência ao cisalhamento.....	62
<b>CAPÍTULO 4 - RESÍDUOS DO PRÉ-TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO DO LIXO.....</b>	<b>70</b>

4.1 - Introdução.....	70
4.2- Processos de Pré-tratamento mecânico- biológico do lixo.....	71
4.2.1 - Princípios Básicos.....	71
4.2.2 - Processo MBA – FABER AMBRA RECYCLING.....	73
4.3 - Características Principais.....	74
4.3.1 - Características Físicas.....	74
4.3.2 - Características Mecânicas.....	79
4.3.2.1 - Resistência ao Cisalhamento.....	79
4.3.2.2 - Compressibilidade.....	84

**CAPÍTULO 5 - ESTUDO EXPERIMENTAL DO EFEITO DAS FIBRAS NA  
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE MATERIAIS GRANULARES/RESÍDUO  
DO PRÉ-TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO DO LIXO.....89**

5.1 - Introdução.....	89
5.2 - Equipamentos de Ensaio.....	90
5.2.1 - Equipamento de Cisalhamento direto convencional.....	90
5.2.2 - Equipamento de Cisalhamento direto de grande porte.....	90
5.3 - Materiais Ensaçados.....	93
5.3.1 - Considerações Preliminares.....	93
5.3.2 - Mistura de areia e tiras de plástico.....	94
5.3.2.1 - Características dos materiais.....	94
5.3.2.2 - Procedimento de ensaio.....	95
5.3.3 - Resíduos do Pré-tratamento mecânico-biológico do lixo.....	101
5.3.3.1 - Características dos materiais.....	101
5.3.3.2 - Procedimento de ensaio.....	104
5.3.3.2.1 - Amostras de resíduo do pré-tratamento com diâmetro máximo de 3/4".....	104

5.3.3.2.2 - Amostras de resíduo do pré-tratamento com diâmetro máximo de 3/8".....	108
5.3.4 - Resíduos do Pré-tratamento mecânico-biológico do Lixo passando na peneira 3/4" + Areia.....	111
5.3.4.1 - Características dos materiais.....	111
5.3.4.2 - Procedimento de ensaio.....	112
<b>CAPÍTULO 6 – ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS.....</b>	<b>115</b>
6.1 – Introdução .....	115
6.2 – Amostras de areia + plástico.....	115
6.3 – Amostras de resíduo do pré-tratamento passando na peneira 3/4".....	120
6.4 – Amostras de resíduo do pré-tratamento passando na peneira 3/8".....	120
6.5 – Amostras de resíduo do pré-tratamento passando na peneira 3/4" + areia .....	122
<b>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS....</b>	<b>126</b>
6.1 - Conclusões.....	126
6.2 - Sugestões para Futuras Pesquisas.....	128
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>130</b>
<b>ANEXO 1 – Analylis of Municipal Landfill Stability Considering the Fibre Effect</b>	
– 5 th. Inernational Symposium on Enviromental Geotechnology and – Global Sustainable Development, Belo Horizonte, Brazil (2000).....	147
<b>ANEXO 2 - Shear Resistance of Mechanical Biological Pre-Treated Domestic Urban Waste, Ninth International Waste Management and Landfill</b>	

Symposium, Sardinia (2003).....163

**ANEXO 3** – Análise da Estabilidade do Vazadouro da Rua Duarte da Silveira

(Petrópolis), considerando o efeito das fibras – XXVII Congresso

Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre,

RGS (2000).....173

## LISTA DE SÍMBOLOS

- b - extensão do elemento (superfície de ruptura).
- $c'$  – coesão efetiva;
- c – coesão;
- $c_{mob}$  – coesão mobilizada;
- $c'_f$  – intercepto coesivo ou pseudo coesão devido as fibras;
- $D_{50}$  – diâmetro médio das partículas de solo;
- D – diâmetro médio das partículas;
- E – coeficiente de rigidez;
- F – força de tração na cunha da superfície de deslizamento;
- G - peso específico das partículas;
- h – profundidade da superfície da cunha de deslizamento;
- H – altura da amostra de solo;
- i – inclinação de “dentes”;
- k,  $k_f$  – coeficiente de permeabilidade;
- t – espessura da zona de cisalhamento;
- T – forças resistentes;
- U – grau de consolidação;
- VS – percentual de materiais voláteis;
- w – teor de umidade;
- $w_{ot}$  – teor de umidade ótimo;
- $\alpha$  - fator característico do material fibroso;
- $\alpha$  - ângulo da superfície de ruptura;
- $\varepsilon_a$  - deformação axial;
- $\varepsilon_v$  - deformação volumétrica;

$\gamma$  - peso específico;

$\gamma_A$  - peso específico seco;

$\gamma_s$  - peso específico seco máximo;

$\sigma$  - tensão normal;

$\sigma'$  - tensão normal efetiva;

$\sigma_1$  - tensão principal maior;

$\sigma_3$  - tensão principal menor;

$\tau$  - tensão cisalhante;

$\tau_{mob}$  - tensão cisalhante;

$\tau_{max}$  - tensão cisalhante máxima, resistência ao cisalhamento;

$\phi$  - ângulo de atrito;

$\phi_{mob}$  - ângulo de atrito mobilizado;

$\phi'$  - ângulo de atrito efetivo;

$\phi_r$  - ângulo de atrito residual;

$Z_{max}$  – parcela máxima da resistência ao cisalhamento devido as fibras;

$\xi$  - ângulo de tração devido as fibras.

*Obs: Alguns símbolos que aparecem em condições específicas estão devidamente justificadas em figuras constantes no texto ou no próprio texto.*

## LISTA DE FIGURAS.

### CAPÍTULO 2

- Fig. 2.1- Diagrama triangular para a classificação do lixo (Grisolia et al., 1995).
- Fig. 2.2 – Classificação dos RSU usando a carta de Schmertmann (Sánchez – Alcuturri et al, 1993).
- Fig. 2.3 - Distribuição granulométrica do lixo para diferentes idades (modificado de Jessberger, 1994).
- Fig. 2.4 – Faixa de variação granulométrica para o RSU (apud Carvalho, 1999).
- Fig. 2.5 – Modelo para o resíduo sólido urbano (Kockel, 1995).
- Fig. 2.6 – Variação da temperatura do RSU com a profundidade, aterro Ano Liossia, Atenas (Grécia) (Coumoulos et al., 1995).
- Fig. 2.7 – Variação da temperatura do RSU com a profundidade, aterro Muribeca, Recife (Brasil) (Mariano & Jucá, 1998).
- Fig. 2.8 - Peso específico x profundidade (Wiemer, 1982).
- Fig. 2.9 - Teor de umidade x profundidade (Blight et al., 1992).
- Fig. 2.10 - Variação do teor de umidade com a profundidade, aterro sanitário Bandeirantes (Carvalho, 1999).
- Fig. 2.11 - Curva tensão x deformação com a interação entre os componentes de atrito e de tração/coesão das fibras (Kolsch, 1993).
- Fig. 2.12 - Variação da resistência ao cisalhamento com a tensão normal - Contribuição das componentes de atrito e de tração/coesão das fibras (Kolsch, 1993).
- Fig. 2.13 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento do lixo para amostras com: (a) Baixos pesos específicos; (b) Altos pesos específicos (Del Greco et al., 1993).
- Fig. 2.14 – Envoltória de resistência do lixo (Knochemus et al & Van Impe, 1998).
- Fig. 2.15 – Diferentes tipos de corpos de prova de materiais artificiais com as propriedades da rocha (Patton, 1966).

Fig. 2.16 – Envoltórias de resistência típicas para baixas tensões normais (Patton, 1966).

Fig. 2.17 – Envoltórias de resistência de corpos de prova com diferentes inclinações de dentes (Patton, 1966).

Fig. 2.18 – Faixa recomendada para projetos – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do RSU (Singh & Murphy, 1990).

Fig. 2.19 – Faixa recomendada para projetos – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do RSU (Sánchez – Alcuturri et al, 1993).

Fig. 2.20 - Curvas tensão x deformação para diferentes tipos de lixo em ensaios triaxiais (a) e (b) Jessberger (1990) e (c) Jessberger e Kockel (1993).

Fig. 2.21 - Curvas ângulo de atrito x deformação para diferentes idades de lixo (Kockel, 1995).

Fig. 2.22 - Curvas coesão x deformação para diferentes idades de lixo (Kockel, 1995).

Fig. 2.23 – Curvas tensão x deformação do lixo, para amostras na umidade natural e saturadas (Vilar et al., 2002).

Fig. 2.24 – Curvas deformação volumétrica x deformação axial do lixo, para amostras na umidade natural e saturadas (Vilar et al., 2002).

Fig. 2.25 - Curvas tensão x deformação para diferentes materiais (Manassero et al., 1996).

Fig. 2.26 – Variação da coesão e do ângulo de atrito interno para diferentes profundidades e idades de decomposição do lixo (Caicedo et al., 2002)

Fig. 2.27 - Curvas ângulo de atrito x deformação para diferentes teores de fibras (Kockel & Jessberger, 1995).

Fig. 2.28 - Curvas coesão x deformação para diferentes teores de fibra (Kockel & Jessberger, 1995).

Fig. 2.29 - Curvas coesão x teor de umidade (Gabr et al., 1995).

Fig. 2.30 – Fases de compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos (Grisolia & Napoleoni, 1996).



Fig. 2.31 – Recalque total e anual de resíduos sólidos urbanos (Gandolla et al., 1994).

### **CAPÍTULO 3**

Fig. 3.1 - Mecanismos de ruptura em solos reforçados com fibras (fibro-solos) a diferentes orientações (Gray & Ohashi, 1983).

Fig. 3.2 – Modelo de comportamento para baixas tensões de confinamento (Hausmann -1976, referido por Mitchell & Villet 1987)

Fig. 3.3 – Modelo de comportamento para altas tensões de confinamento (Schlosser & Long, 1972).

Fig. 3.4 – Modelo de comportamento para altas tensões de confinamento (Yang, 1972 referendado por Mitchell & Villet, 1987)

Fig. 3.5 – Comportamento tensão – deformação de areia siltosa reforçada com fibras (Teodoro & Bueno, 1999).

Fig. 3.6 – Efeito das fibras na tensão confinante – areia siltosa (Teodoro & Bueno, 1999).

Fig. 3.7 – Influência da orientação dos elementos de reforço (Jewell & Wroth, 1987).

Fig. 3.8 – Influência da orientação dos elementos de reforço (Gigan et al., 1989) (apud Gomes, 1993).

Fig. 3.9 - Influência da rigidez das inclusões em solos reforçados (Jewell & Wroth, 1987).

Fig. 3.10 – Curvas tensão-deformação-variação volumétrica das matrizes não cimentadas (a) sem reforço; (b) reforçados com fibras de 12 mm; (c) reforçados com fibras de 36 mm (Consoli et al., 2000).

### **CAPÍTULO 4**

Fig. 4.1 – Redução do volume do aterro após pré-tratamento mecânico-biológico do lixo (Gomes, 1996).

Fig. 4.2 - Esquema operacional do sistema MBA - Faber Ambra (Faber Ambra Recycling, 1999).

Fig. 4.3 - Correlação entre o % de material volátil e o peso específico dos grãos (Schulhaase et al., 2001).

Fig. 4.4 – Perda de peso por unidade de volume do lixo, durante o período de pré-tratamento mecânico-biológico (Bidlingmaier et al., 1997).

Fig. 4.5 – Influência do peso específico e do tamanho das partículas na permeabilidade de resíduos pré-tratados (Ziehmann et al., 2003).

Fig. 4.6 – Coeficiente de permeabilidade em relação a pressão aplicada para diferentes tempos de pré-tratamento do resíduo do lixo (Von Felde et al., 1997).

Fig. 4.7 – Envoltórias de resistência do resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo para amostras com diferentes diâmetros máximos de partículas. (Fehrer, 2002)

Fig. 4.8 – Curvas carga-recalque (Scheelhaase et al., 2001).

Fig. 4.9 – Tempos de duração de recalques para um grau de consolidação  $U=95\%$ , em função da altura do aterro, coeficiente de permeabilidade e coeficiente de rigidez (Dach et al., 1997).

Fig. 4.10 – Recalques do resíduo do pré-tratamento mecânico e mecânico-biológico do lixo (Bidlingmaier et al., 1997).

Fig. 4.11 – Recalques do resíduo do pré-tratamento mecânico e biológico do lixo, para diferentes alturas (Bidlingmaier et al., 1997).

## **CAPÍTULO 5**

Fig. 5.1 - Esquema geral do equipamento de cisalhamento direto (Gomes, 1993).

Fig. 5.2 - Curvas tensões de cisalhamento x deformações horizontais e deformações volumétricas x deformações horizontais para a Amostra 1 (areia).

Fig. 5.3 - Curvas tensões de cisalhamento x deformações horizontais e deformações volumétricas x deformações horizontais para a Amostra 2 (areia + plásticos com 0,05% em peso).

Fig. 5.4 - Curvas tensões de cisalhamento x deformações horizontais e deformações volumétricas x deformações horizontais para a Amostra 3 (areia + plástico com 0,15% em peso).

Fig. 5.5 - Envoltórias para a Amostra 1 (areia).

Fig. 5.6 - Envoltórias para a Amostra 2 (areia + plástico com 0,05% em peso).

Fig. 5.7 - Envoltórias para a Amostra 3 (areia + plástico com 0,15% em peso).

Fig. 5.8 - Curvas tensões de cisalhamento x deformações horizontais para o resíduo do pré-tratamento do lixo (material passando na peneira 3/4").

Fig. 5.9- Envoltórias para o resíduo do pré-tratamento do lixo (material passando na peneira 3/4").

Fig. 5.10 - Curvas tensões de cisalhamento x deformações horizontais e deformações volumétricas x deformações horizontais para o resíduo do pré-tratamento do lixo (material passando na peneira 3/8").

Fig. 5.11 - Envoltórias para o resíduo do pré-tratamento do lixo (material passando na peneira 3/8").

Fig. 5.12 - Curvas tensões de cisalhamento x deformações horizontais para o resíduo do pré-tratamento do lixo (passando na peneira 3/4") + areia em diferentes percentuais.

## **CAPÍTULO 6**

Fig. 6.1 – Envoltórias para as amostras 1, 2 e 3, correspondentes à deformação horizontal de 7%.

Fig. 6.2 – Variação do teor de fibras com a tangente do ângulo de atrito ( $\text{tg } \phi'$ ) e o intercepto coesivo ( $c'_f$ ).

Fig. 6.3 – Curvas tensões de cisalhamento x deformações horizontais para as amostras 1, 2 e 3 para  $\sigma = 25 \text{ kPa}$ .

Fig. 6.4 - Curvas tensões de cisalhamento x deformações horizontais para as amostras 1, 2 e 3 para  $\sigma = 50$  kPa.

Fig. 6.5 - Curvas tensões de cisalhamento x deformações horizontais para as amostras 1, 2 e 3 para  $\sigma = 75$  kPa.

Fig. 6.6 - Curvas tensões de cisalhamento x deformações horizontais para as amostras 1, 2 e 3 para  $\sigma = 100$  kPa.

Fig. 6.7 – Envoltórias para a amostra do resíduo do resíduo do pré-tratamento do lixo (passando na peneira 3/8”) para tensões normais até 100 kPa.

Fig. 6.8 - Envoltórias para a amostra do resíduo do resíduo do pré-tratamento do lixo (passando na peneira 3/8”) para tensões normais entre 100 e 400 kPa.

Fig. 6.9 – Curvas tensões de cisalhamento x deformações horizontais para o resíduo do pré-tratamento do lixo, o resíduo do pré-tratamento do lixo + areia (com 20%) e a areia.

## LISTA DE TABELAS

### **CAPÍTULO 2**

Tabela 2.1 – Grupos/componentes da composição gravimétrica do lixo (COMLURB, 1999)

Tabela 2.2 – Composição percentual média em alguns países (Manassero et al., 1996).

Tabela 2.3 – Composição por área diferenciada no Rio de Janeiro (COMLURB, 1999).

Tabela 2.4 – Valores de pesos específicos em alguns bairros da cidade do rio de janeiro (Brito, 1999).

Tabela 2.5 – Valores do peso específico de aterros de resíduos sólidos no Brasil.

Tabela 2.6 – Umidade dos componentes do RSU do aterro sanitário Bandeirantes (Carvalho, 1999).

Tabela 2.7 – Valores de coeficiente de permeabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos (Konig & Jessberger, 1997).

Tabela 2.8 - Valores de coeficiente de permeabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Tabela 2.9 - Parâmetros de cisalhamento para o Lixo (Turczynski - 1988).

Tabela 2.10 - Parâmetros de cisalhamento para o lixo (Kaimoto & Cepollina, 1997).

### **CAPÍTULO 3**

Tabela 3.1 – Parâmetros de resistência da areia siltosa reforçada com fibras e sem reforço (Teodoro & Bueno, 1999).

Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios de compressão triaxial (Consoli et al., 2000).

### **CAPÍTULO 4**

Tabela 4.1 - Parâmetros de amostras do resíduo do pré-tratamento do lixo para diferentes idades (Scheelhaase et al., 2001).

Tabela 4.2 - Ensaio de Compactação Proctor (Klümper, 1998)

Tabela 4.3 - Ensaio de Compactação Proctor (Feher, 2002)

Tabela 4.4 – Parâmetros de resistência dos resíduos do pré-tratamento do lixo em função dos deslocamentos horizontais (Scheelhaase et al., 2001).

Tabela 4.5 – Parâmetros de Resistência do resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo em função do diâmetro máximo das partículas (Klümper, 1998).

Tabela 4.6 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento para o resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo (Fehrer, 2002).

Tabela 4.7 – Recalque anual específico em função de diferentes tipos de materiais de aterro (Bidlingmaier et al., 1997)

Tabela 4.8 – Ensaio de compressão com o resíduo do pré-tratamento do lixo (Scheelhaase et al., 2001)

## **CAPÍTULO 5**

Tabela 5.1 – Resumo dos ensaios realizados.

Tabela 5.2 - Relação de Amostras de areia + plástico.

Tabela 5.3 - Resumo dos resultados de ensaios de cisalhamento direto com areia + plástico.

Tabela 5.4 - Composição percentual do lixo nas leiras estudadas (Lima & Surluiga, 2000).

Tabela 5.5 - Análise Granulométrica do Resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo – Peneiramento grosso.

Tabela 5.6 - Análise Granulométrica do Resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo – Peneiramento fino.

Tabela 5.7 – Composição Granulométrica das Amostras ensaiadas.

Tabela 5.8 – Valores dos Índices de vazios – Amostra passando na peneira 3/4”.

Tabela 5.9 – Resumo dos Resultados de ensaios de cisalhamento direto com resíduo do pré-tratamento do lixo (material passando na peneira 3/4”).

Tabela 5.10 – Valores dos Índices de vazios – Amostra passando na peneira

Tabela 5.11 - Resumo dos resultados de ensaios de cisalhamento direto com resíduo do pré-tratamento do lixo (material passando na peneira 3/8")

Tabela 5.12 - Valores de tensão cisalhante para a mistura de resíduo do lixo (passando na peneira 3/4")+ areia.

## **CAPÍTULO 6**

Tabela 6.1 – Valores de tensões cisalhantes para o resíduo do lixo, a mistura de resíduo do lixo + areia em diferentes percentuais e a areia.

## **LISTA DE FOTOS**

### **CAPÍTULO 2**

Foto 2.1 – Talude sub-vertical de vazadouro de lixo da rua Duarte da Silveira (Petrópolis)

### **CAPÍTULO 3**

Foto 3.1 – Talude de solo reforçado – Sistema Texsol.

### **CAPÍTULO 4**

Foto 4.1 – Leira de resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo – Projeto Piloto na Usina de Compostagem da COMLURB em Jacarepaguá (Rio de Janeiro).

### **CAPÍTULO 5**

Foto 5.1 – Vista Frontal do equipamento de cisalhamento direto especial do ITA.

Foto 5.2 – Vista Lateral do equipamento de cisalhamento direto especial do ITA.



## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL

As taxas de crescimento da população mundial a partir do início do século XX, principalmente nos países em desenvolvimento, têm apresentado valores elevados. Assim, a população mundial hoje estimada em cerca de 6 bilhões de habitantes, mantida a tendência atual, deverá atingir a marca de 8 bilhões de habitantes nos próximos 30 anos. Por outro lado, os fluxos migratórios em direção aos centros urbanos, principalmente a partir do século passado, vem se intensificando de forma marcante, fazendo com que, atualmente, a população urbana mundial, exceto na África e Ásia, apresente percentuais médios de 75%, portanto, 3 vezes superiores ao da população rural. Estes fluxos migratórios vêm acarretando um elevado crescimento demográfico nas regiões metropolitanas, sobretudo nas grandes cidades dos países em desenvolvimento (Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1995).

Com o crescimento populacional das sociedades de consumo, tem-se como consequência o aumento da produção de resíduos. Por outro lado, a concentração da população em torno dos centros urbanos, cujos espaços disponíveis cada vez mais escasseiam, faz com que o manuseio e, principalmente, a disposição final destes resíduos se torne um problema de difícil solução. O fato é agravado uma vez que muitos dos componentes, como, por exemplo, os plásticos e metais, apresentam tempos de degradação elevados, de até cerca de 500 anos. Deve ser ainda destacado que o desenvolvimento da ciência e da tecnologia vem trazendo, também, alterações na composição destes resíduos, com a introdução de componentes como pilhas, baterias, lâmpadas fluorescentes, produtos químicos em geral, etc..., contendo elementos altamente nocivos à saúde. Em consequência, os riscos de poluição do solo, das águas de superfície e subterrâneas e do ar estão cada vez mais presentes, o que vem gerando a deterioração do meio-ambiente, com implicações na qualidade de vida das populações.

Deste modo a disposição final do lixo tem sido motivo, nos últimos anos, de uma grande preocupação. A escassez de espaços disponíveis faz com que os depósitos existentes se vejam obrigados a prolongar a sua vida útil, o que feito sem a técnica e os cuidados necessários pode acarretar conseqüências danosas e imprevisíveis. Nos países mais desenvolvidos, tomando-se como exemplo o caso da Alemanha, após o ano de 2005 o lixo só poderá ser depositado se comprovadamente inerte. Entre as alternativas para a inertização do lixo conhecidas, pode-se destacar os processos de pré-tratamento térmico ou mecânico-biológico que tem sido desenvolvidos e cada vez mais aplicados. Um exemplo de um destes processos existe no Brasil desde 1999 quando foi iniciado um Projeto piloto com a finalidade da pesquisa de um pré-tratamento mecânico–biológico do lixo, denominado AMBRA (Costa, 2002; Mahler, 2002 e Munich et al., 2001 e 2003).

Neste sentido torna-se importante o estudo das diversas características do resíduo após o pré-tratamento, seja para a sua disposição final em depósitos de forma segura ou para a utilização adequada como matéria prima em materiais da construção civil. De maneira a permitir resultados conclusivos, portanto, é necessário o conhecimento das características físicas e químicas do lixo fresco, assim como as propriedades mecânicas do material após o tratamento. Dentre estas propriedades, sem dúvida, os parâmetros de resistência são de grande importância. Este assunto, todavia, ainda é muito pouco estudado, existindo poucas referências mesmo na literatura internacional.

De acordo com os trabalhos publicados nos últimos 15 anos, principalmente na Alemanha, sabe-se hoje que as fibras presentes no lixo têm uma grande influência na sua resistência ao cisalhamento. Isto porque, apesar do lixo ser caracterizado como um material de constituição grosseira e comportamento granular, pode adquirir valores elevados de uma pseudo coesão devida ao efeito da resistência à tração de suas fibras. Efeito semelhante tem sido verificado quando se mistura aleatoriamente aos solos, fibras curtas naturais ou sintéticas, obtendo-se um material denominado

fibrossolo. Estas fibras proporcionam, de uma maneira geral, um aumento da resistência ao cisalhamento, principalmente devido às forças de tração proporcionadas que impõem ao solo um incremento considerável no seu intercepto coesivo.

Observa-se, portanto, que materiais de origem e natureza totalmente distintas como o lixo e os fibrossolos possuem comportamentos mecânicos análogos, basicamente devido à “notável” influência das fibras nas suas resistências ao cisalhamento. Um elo entre estes 2 tipos de materiais em referência seria o resíduo obtido do pré-tratamento mecânico – biológico do lixo. Isto porque, tratando-se de um material inerte que, de uma maneira geral, preserva as características do lixo do qual se originou, por outro lado apresenta aspectos que permitem considerá-lo como um fibrossolo.

O objetivo principal deste trabalho é o de se estudar os mecanismos de interação solo-fibra que são de grande importância no entendimento do comportamento mecânico, particularmente dos resíduos obtidos do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo. Para isso foram procedidos ensaios de laboratório com amostras de resíduos do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo e, também, com amostras de um fibrossolo com características semelhantes, obtido da mistura de areia e pequenas tiras de plástico com rigidez desprezível. Neste sentido procurou-se verificar a influência destas fibras no comportamento mecânico e nos parâmetros de resistência ao cisalhamento destes materiais, estabelecendo-se correlações entre os mesmos e, ainda, com o próprio lixo.

Assim, nos Capítulos 2, 3 e 4 é procedida uma revisão bibliográfica acerca do lixo, dos solos reforçados (fibrossolos) e do resíduo obtido do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo, com definições e caracterização dos principais parâmetros, comportamentos mecânicos e aspectos relacionados à resistência ao cisalhamento destes materiais.

No Capítulo 5 é apresentado o estudo que procurou avaliar a interação material granular - fibras, utilizando-se amostras de areia misturadas a pequenas tiras de

plástico em diferentes percentuais e amostras de resíduos do pré-tratamento do lixo com diferentes diâmetros máximos de partículas, submetidas a ensaios de cisalhamento direto em equipamentos convencional e especial (grandes dimensões). Paralelamente procedeu-se à mistura do mesmo resíduo do pré-tratamento do lixo a diferentes percentuais de areia, com a finalidade de se verificar as características do material assim obtido e a viabilidade de seu possível aproveitamento como material de construção ou pavimentação.

No Capítulo 6 é procedida uma avaliação global dos resultados dos ensaios obtidos no Capítulo anterior.

Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões obtidas da confrontação dos resultados dos ensaios realizados com aqueles disponíveis na literatura, observando-se as características e pontos em comum dos materiais pesquisados. Algumas sugestões são propostas para futuras pesquisas, envolvendo o resíduo do pré-tratamento mecânico biológico do lixo “in-natura” ou misturado a outros materiais visando o seu aproveitamento, principalmente como material de pavimentação de baixo custo.

## **CAPÍTULO 2 - RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (LIXO)**

### **2.1 - Introdução**

Os resíduos sólidos, popularmente conhecidos como lixo, são restos da atividade humana, tidos como imprestáveis, sem valor e que precisam ser “jogados fora”. Na realidade, este grupo é bastante amplo englobando, além dos materiais no estado sólido que o termo sugere, também os materiais no estado semi-sólido, tais como lodos e até líquidos, com particularidades e consistências tais que não seja possível o seu livre fluir. De acordo com a definição da ABNT em sua norma NBR-10004/87, resíduos sólidos são “resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos que resultam de atividades da comunidade, de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamentos de águas e esgotos, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água ou exijam para isto soluções técnicas e economicamente inviáveis em face a melhor tecnologia disponível”.

Do ponto de vista da Geotecnia os resíduos, de acordo com recomendações do GLR – Recommendations Geotechnic of Landfill (Knochenmus & Wojnarowicz, 1998 e König & Jessberger, 1997), podem ser classificados como materiais com “comportamento de solos” e como materiais com “comportamento diferente de solos”.

### **2.2- Classificação dos Resíduos Sólidos**

#### **2.2.1 - De acordo com a origem**

##### **2.2.1.1 - Resíduos Sólidos Urbanos**

Os resíduos sólidos urbanos constituem-se dos resíduos domiciliares, comerciais e públicos. Os resíduos domiciliares são aqueles produzidos nas residências, os resíduos comerciais são aqueles originados dos diversos

estabelecimentos comerciais e de serviço, tais como, supermercados, estabelecimentos bancários, lojas, bares, restaurantes, etc... e os resíduos públicos são aqueles originados da limpeza pública urbana, incluindo a varrição das vias públicas, limpeza de áreas de feiras livres, praias, córregos, terrenos, podas de árvores, etc...

Assim sendo, os resíduos sólidos urbanos constituem-se basicamente de papel, papelão, vidro, latas, plásticos, galhos, restos de alimento, madeiras, etc..., além de pilhas, baterias, óleos de motor, tintas, pesticidas, produtos de limpeza, termômetros, lâmpadas, etc... Pela sua constituição, embora normalmente em pequenas concentrações, os resíduos sólidos urbanos contêm elementos altamente prejudiciais à saúde e ao meio-ambiente (metais pesados e substâncias químicas), além de micro-organismos que favorecem a transmissão de doenças infecto-contagiosas.

#### **2.2.1.2- Resíduos Sólidos de Serviços de Saúde e Hospitalar**

Os resíduos de serviços de saúde e hospitalar constituem os chamados resíduos sépticos, isto é, aqueles que potencialmente podem conter germes patogênicos. São produzidos em hospitais, clínicas, laboratórios, farmácias, clínicas veterinárias, clínicas odontológicas, etc...

De acordo com o estabelecido pela ABNT na Norma NBR 12808/87 – Resíduos de Serviços de Saúde, são divididos nas seguintes classes:

- **Classe A:** resíduos infectantes, tais como culturas, vacinas vencidas, sangue e hemoderivados, tecidos, órgãos, materiais perfucortantes, fluidos orgânicos;
- **Classe B:** resíduos especiais que incluem rejeitos radioativos, resíduos farmacêuticos e resíduos químicos;
- **Classe C:** resíduos comuns, oriundos de áreas administrativas, das limpezas de jardins, etc...

Esta última classe que se constitui nos chamados resíduos assépticos, normalmente são considerados como resíduos sólidos urbanos.

Os resíduos das classes A e B devem passar por tratamentos prévios por microondas visando a eliminação dos microorganismos ou incineração, antes de serem depositados em aterros. Estes e outros tipos de tratamento no Brasil, infelizmente, não fazem parte da rotina da maior parte dos estabelecimentos que prestam serviços de saúde.

### **2.2.1.3 - Resíduos Sólidos Industriais**

Os resíduos industriais são resultantes do processo de produção dos diversos ramos da indústria, tais como metalúrgica, química, petroquímica, papelreira, alimentícia, etc..., constituindo-se de cinzas, lodos, óleos, resíduos ácidos e alcalinos, metal ferroso e não ferroso, vidro, plástico, resíduos orgânicos, etc...

De acordo com o estabelecido pela ABNT na norma NBR 10004/87, podem ser divididos nas seguintes classes:

- **Classe I:** perigosos são aqueles que apresentam periculosidade ou são dotados de uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade;
- **Classe II:** não inertes - são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos Classe I (perigosos) ou de Classe III (inertes). Estes tipos de resíduos podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou insolubilidade em água;
- **Classe III:** inertes – são aqueles que não são decompostos prontamente, como é o caso de rochas, tijolos, vidros, plásticos e borrachas.

### **2.2.1.4 - Resíduos Sólidos Nucleares**

Os resíduos sólidos nucleares são gerados no ciclo dos combustíveis nucleares e nas aplicações na medicina, pesquisa e indústria, exigindo a necessidade de um manejo seguro e ambientalmente correto.

A utilização e manuseio de substâncias radioativas é de competência da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, podendo ser classificadas de acordo com a radiação emitida como de elevada toxicidade (Classe I), média toxicidade (Classes II e III) e baixa toxicidade (Classe IV).

#### **2.2.1.5 - Resíduos Especiais**

Os resíduos especiais são aqueles que por suas propriedades intrínsecas exigem tratamento diferenciado, dentre os quais podem ser destacados os pneus, pilhas, óleos lubrificantes, agrotóxicos, entre outros.

### **2.2.2 - De acordo com os componentes**

Do ponto de vista geotécnico este tipo de classificação apresenta-se como o mais adequado. Dentre as mais usuais pode-se destacar aquela proposta por Grisolia et al. (1995) consistindo de um diagrama triangular, no qual o lixo é dividido em três grupos principais, com diferentes comportamentos, sob o ponto de vista geomecânico:

#### **2.2.2.1 - Materiais inertes**

Os materiais inertes englobam vidros, metais, restos de construções, etc... cujas propriedades não variam significativamente com o tempo e, deste modo, pouco influenciam o comportamento global de um aterro de lixo;

#### **2.2.2.2 - Materiais altamente deformáveis**

Os materiais altamente deformáveis englobam plásticos, tecidos, borrachas, etc... que, quando submetidos a carregamento, sofrem recalques iniciais consideráveis que modificam profundamente a sua configuração inicial. Alguns deles podem



apresentar grandes deformações ao longo do tempo (creep) quando submetidos a cargas constantes. A influência destes materiais no comportamento global do aterro depende, em geral, da dimensão do elemento individual, da umidade e do nível de tensões;

### 2.2.2.3 - Materiais biodegradáveis

Os materiais biodegradáveis englobam alimentos, restos de vegetais, papéis, papelões, etc... que apresentam uma influência marcante nas propriedades físicas e mecânicas dos aterros de lixo, uma vez que podem sofrer uma grande variação na constituição e consistência em curto espaço de tempo. A sua deterioração provoca variações consideráveis na estrutura do material com a contração e formação de líquidos e gases.

Na Figura 2.1 é apresentado o diagrama triangular em referência, no qual foram plotados os dados de composição dos resíduos sólidos urbanos (RSU) de diferentes países e regiões.

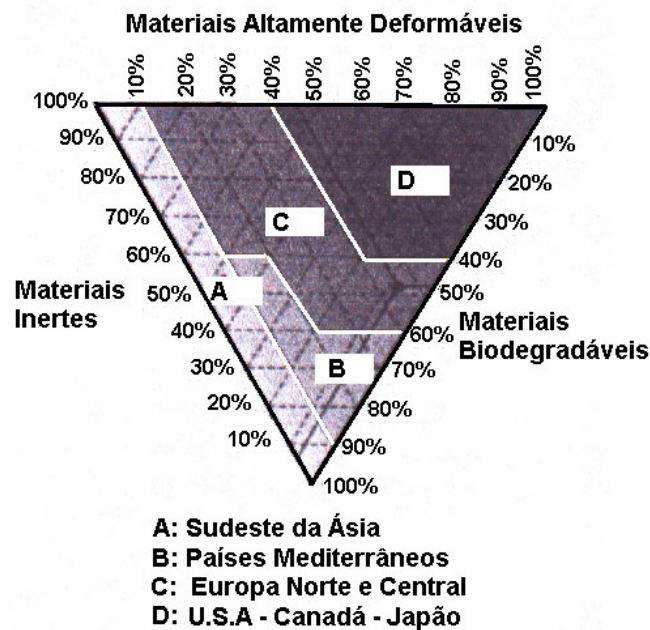
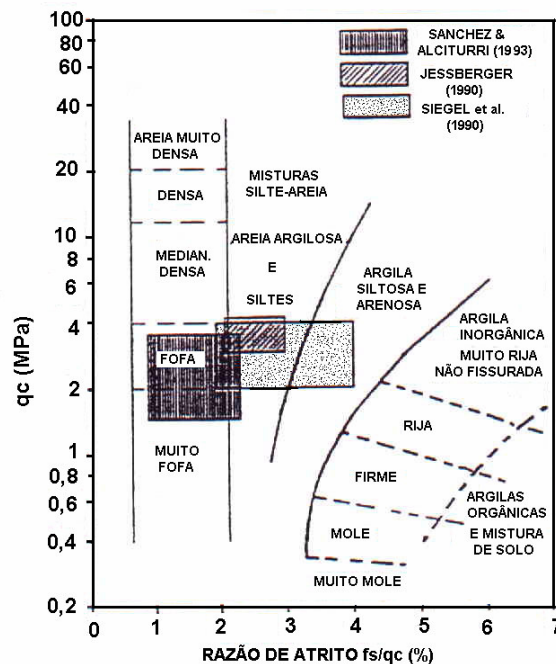


Fig.2.1- Diagrama triangular para a classificação do lixo (Grisolia et al., 1995)

Outra forma de classificação foi apresentada por Landva & Clark (1990), segundo a qual os resíduos sólidos urbanos são divididos em quatro grandes grupos:

- (a) Orgânicos putrescíveis (OP): correspondem aos resíduos alimentares, de jardinagem, de varrição e todos aqueles que apodrecem rapidamente;
- (b) Orgânicos não – putrescíveis (ON): correspondem aos papéis, madeiras, couros, plásticos, borrachas, tintas, óleos e graxas.
- (c) Inorgânicos degradáveis (ID): correspondem basicamente a metais;
- (d) Inorgânicos não-degradáveis (IN): correspondem aos vidros, cerâmicas, solos minerais, cinzas e entulhos de construção.

Resultados de ensaios de cone (CPT) obtidos para o resíduo sólido por Sanchez-Alciturri (1993), Jessberger (1990) e Siegel et al. (1990) e plotados na Carta de Schmertmann (Sanchez-Alciturri et al., 1993), de acordo com o apresentado na Fig. 2.2, permitem classificar o resíduo sólido urbano com características variando entre areia fofa e argila siltosa e arenosa.



**Fig. 2.2 - Classificação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) usando a Carta de Schmertmann (Sánchez- Alciturri et al., 1993).**

## 2.3 - Características Principais do Lixo

### 2.3.1 - Características Físicas

#### 2.3.1.1 - Composição Física ou Gravimétrica

A composição física ou gravimétrica define o percentual dos diversos componentes presentes no lixo, sendo dividido pela COMLURB (Companhia de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro) nos grupos constantes da Tabela 2.1, abaixo:

**Tabela 2.1 - Grupos/componentes da composição gravimétrica do lixo (COMLURB-1999)**

GRUPO	COMPONENTE
Papel	Papel
	Papelão
Plástico	Plástico duro
	Plástico filme
Vidro	Vidro claro
	Vidro escuro
Orgânico	Matéria orgânica
	Agregado fino
Metal	Metal ferroso
	Metal não ferroso
Inerte	Pedra
	Louça/cerâmica
Outros	Folha
	Madeira
	Borracha
	Pano/trapo
	Couro
	Ossos

A composição gravimétrica normalmente espelha o nível de renda da população. Deste modo, é de se esperar que regiões mais ricas apresentem, por exemplo, um menor percentual de material orgânico, em consequência de uma menor manipulação de alimentos, isto é, maior utilização de alimentos semi-prontos. Em

contra-partida, os percentuais de vidro tendem a ser mais elevados, uma vez que é maior o consumo de supérfluos, tais como bebidas finas e produtos de delicatessen. Esta tendência, todavia, nem sempre pode ser observada, uma vez que os dados disponíveis muitas vezes foram obtidos a partir de metodologias ou épocas de coleta distintas o que pode influenciar os resultados, com conclusões nem sempre coerentes. Para melhor exemplificar as considerações acima é apresentado nas Tabelas 2.2 e 2.3, respectivamente, a composição gravimétrica do lixo em alguns países e em alguns bairros de diferente poder aquisitivo da cidade do Rio de Janeiro.

**Tabela 2.2 - Composição percentual média em alguns países (Manassero et al., 1996)**

Cidade / País	Composição em peso (%)							
	Metal	Papel	Plástico	Couro, galhos e borracha	Tecido	Material putrecível	Vidros	Outros
<b>Bangkok Tailândia</b>	1	25	-	7	3	44	1	19
<b>Beijing China</b>	1	5	1	1	-	45	1	46
<b>Nairobi Quênia</b>	3	12	5	-	-	74	4	2
<b>N. York USA</b>	5	22	-	3	-	20	6	44
<b>Istambul Turquia</b>	2	10	3	6	3	61	1	14
<b>Genebra Suíça</b>	2,5	31	9,5	4	5	28	9	11
<b>Atenas Grécia</b>	4	19	7	4	-	59	2	5
<b>Cochabamba Bolívia</b>	1	2	3	1	-	71	1	21
<b>Wollangong Austrália</b>	3	16	20	-	-	58	2	1

**Tabela 2.3 - Composição por área diferenciada no Rio de Janeiro (COMLURB, 1999)**

Bairro	Composição em peso (%)						
	Vidro	Metal	Plástico	Papel	Mat. orgânico	Mat. inerte	Outros
<b>Centro</b>	3,54	2,59	23,72	23,56	42,37	1,28	2,94
<b>Rocinha</b>	2,27	2,10	19,29	11,60	64,66	0,00	0,08
<b>Leblon</b>	9,06	2,31	18,60	28,09	39,55	1,57	0,82
<b>Tijuca</b>	2,97	2,18	19,96	28,91	42,82	1,87	1,29
<b>Piedade</b>	1,93	2,84	20,38	19,41	54,79	0,00	0,65
<b>Penha</b>	3,61	2,19	16,84	18,93	57,02	0,35	1,06
<b>Pavuna</b>	3,15	3,01	16,52	14,60	58,75	0,12	3,85
<b>Barra</b>	6,85	2,12	24,40	25,03	40,19	0,14	1,27
<b>Sta. Cruz</b>	2,62	1,94	17,05	18,87	58,91	0,12	0,49

(a) Percentual de matéria orgânica.

A porcentagem de matéria orgânica contida no lixo é um dos parâmetros que melhor espelha o poder aquisitivo da população. Assim, áreas de renda mais alta, normalmente, apresentam % de matéria orgânica muito inferiores às de renda mais baixa. Este, por exemplo, é o caso no Rio de Janeiro (Quadro 2.3) para os bairros da Barra da Tijuca e Leblon (rendas médias mais altas) em comparação com a Rocinha e a Pavuna (rendas médias mais baixas). Em conseqüência, aumentos do % da matéria orgânica tendem a representar uma melhoria do poder aquisitivo das áreas de menor renda, resultado de uma maior manipulação de alimentos nas residências e, contrariamente, uma perda no poder aquisitivo das áreas de maior renda, pela menor utilização de embalagens (alimentos semi-prontos), menor freqüência a restaurantes, etc...

(b) Porcentagem de papel/papelão

A porcentagem de papel/papelão tem sofrido uma redução significativa ao longo dos anos em razão oposta ao plástico, isto é, utilização cada vez menor em embalagens além do aumento da reciclagem antes da mistura com o lixo domiciliar. No Rio de Janeiro observam-se maiores percentuais para os bairros de rendas mais altas, o que pode ser explicado pela tendência do maior aproveitamento para fins de comercialização (reciclagem) nos bairros ou distritos de rendas mais baixas.

(c) Porcentagem de vidro

A porcentagem de vidro ao longo dos anos no Rio de Janeiro tem apresentado pequenas variações considerando-se a população total do município. Isto porque, apesar do percentual de vidro sofrer variações apreciáveis em função do momento econômico, isso só acontece nas áreas de maior poder aquisitivo, principal consumidora de supérfluos como bebidas finas e produtos de delicatessen. Da mesma forma que o referido para o material orgânico pode-se tomar como exemplo no Rio de Janeiro os bairros da Barra da Tijuca e Leblon (rendas médias mais altas) e a Rocinha e a Pavuna (rendas médias mais baixas). Nos locais de rendas mais altas os percentuais de vidro são consideravelmente superiores aos verificados nos locais de rendas mais baixas.

(d) Porcentagem de metal

A porcentagem de metal (ferroso e não ferroso) mostra uma clara tendência de redução ao longo dos últimos anos. Isto pode ser explicado em grande parte pela cada vez maior reciclagem na fonte, principalmente de latas de alumínio. Na cidade de São Paulo em 1996, por exemplo, de acordo com Calderoni (1998), estes percentuais de reciclagem atingiram 70%.

(e) Plásticos

A porcentagem do plástico tem sofrido um aumento significativo ao longo dos anos decorrente da sua utilização cada vez maior em embalagens (sacolas de supermercados, por exemplo) numa área de alimentos prontos e semi-prontos, em substituição ao papel/papelão.

A importância do conhecimento da composição física principalmente naquelas características que direta ou indiretamente podem influenciar o comportamento do lixo nos aspectos ligados a resistência ao cisalhamento, pode ser exemplificada pelos percentuais de matéria orgânica e de plásticos, panos / trapos.

O percentual de matéria orgânica está diretamente vinculado ao teor de umidade, a permeabilidade e ao peso específico da massa de lixo. Assim, no Brasil onde o percentual de material orgânico está na ordem de 50%, em comparação com os Estados Unidos e os países da Europa cujos percentuais normalmente não atingem os 30%, temos teores de umidade mais elevados e valores inferiores para os coeficientes de permeabilidade e pesos específicos da massa de lixo.

Os plásticos e panos/trapos que constituem os principais componentes fibrosos do lixo, como já referido, influenciam o comportamento da massa do lixo, normalmente caracterizado como um material predominantemente granular, conferindo-lhes valores de uma pseudo coesão muitas vezes elevados. É importante ressaltar que esta pseudo coesão devido às fibras não guarda nenhuma relação com a coesão definida para os solos argilosos, devido as forças eletroquímicas de atração das partículas.

A composição física ou gravimétrica do resíduo sólido urbano, uma vez lançado no aterro, tende a se alterar ao longo do tempo em função da deterioração da matéria orgânica. De acordo com Carvalho (1999) para amostras coletadas a diferentes profundidades, em 2 furos de sondagem a trado no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo pode-se concluir, por exemplo, que o percentual de matéria orgânica quimicamente oxidável (cerca de 12%) indica que o lixo encontra-se em um estágio avançado de degradação, mas ainda com presença de materiais de grandes dimensões como plásticos, madeiras, metais, etc...

### 2.3.1.2 - Composição Granulométrica

A massa do lixo pode ser caracterizada como um material de comportamento predominantemente granular com elevados percentuais de frações grosseiras (tamanho correspondente ao pedregulho), com as partículas finas (< 0,075 mm) correspondendo a uma fração inferior a 20%.

Ao longo do tempo, conforme pode ser observado na Figura 2.3 (Jessberger, 1994) em que são apresentadas as curvas granulométricas de resíduos sólidos urbanos com idades variando entre 8 meses e 15 anos, o percentual de materiais com granulagem mais fina tende a aumentar como resultado da biodegradação do material orgânico.

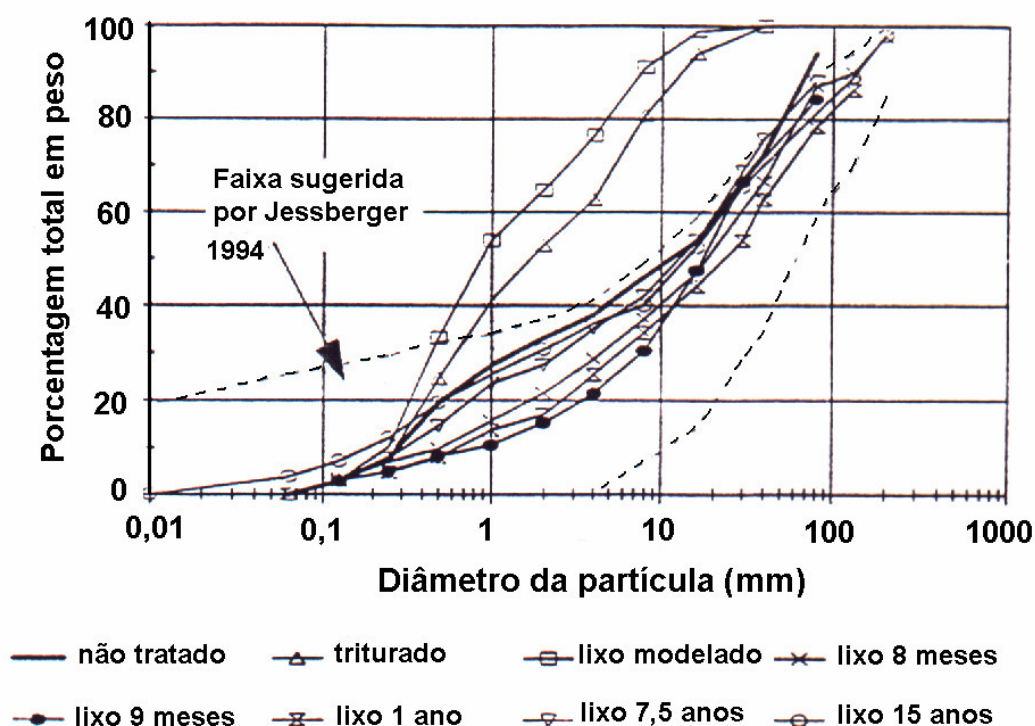


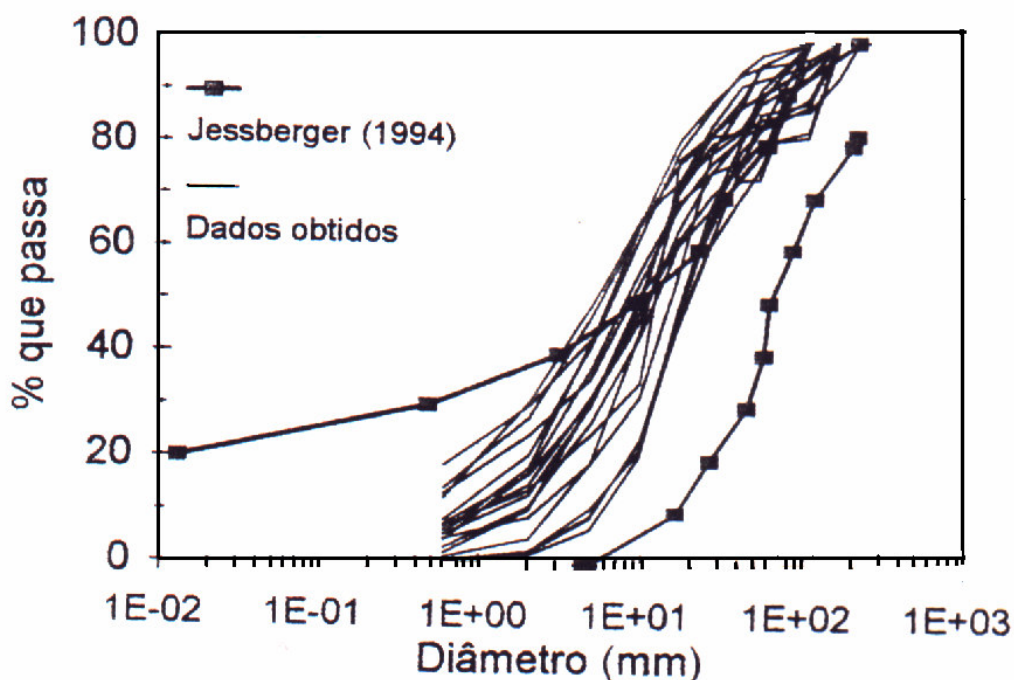
Fig. 2.3 - Distribuição Granulométrica do Lixo para diferentes idades (modificado de Jessberger, 1994)

Esta tendência pode ser acentuada caso o sistema de drenagem interna do aterro seja eficiente, com a saída dos efluentes líquidos (chorume) e gasosos gerados



pela decomposição do material orgânico. Caso contrário, isto é, quando a drenagem interna for ineficiente ou inexistente, a dificuldade de eliminação dos efluentes poderá gerar regiões com massas orgânicas muito moles ou mesmo regiões granulares com comportamentos heterogêneos no que se refere à capacidade de retenção e percolação destes efluentes (gases e líquidos).

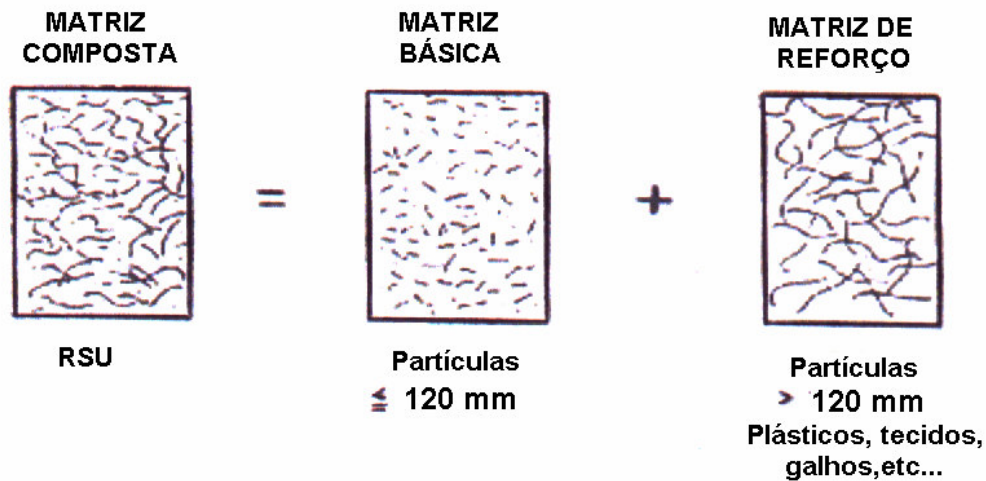
Esta variação da distribuição granulométrica dos resíduos sólidos urbanos ao longo do tempo pode também ser observada em estudo desenvolvido por Carvalho (1999), no aterro sanitário Bandeirantes. De acordo com tal estudo, amostras coletadas em furos a trado, com idades de cerca de 15 anos, apresentaram uma distribuição que, pela maior incidência de partículas finas, não se enquadra dentro da faixa de variação típica para os resíduos sólidos urbanos, apresentada por Jessberger (1994), conforme verificado na Figura 2.4, apud Carvalho (1999).



**Fig. 2.4 - Faixa de variação granulométrica para o resíduo sólido urbano (RSU) (apud Carvalho, 1999)**

De acordo com o modelo proposto por Kockel (1995), conforme Fig. 2.5 o lixo pode ser caracterizado, a exemplo dos solos reforçados com fibras, como um material

composto dividido em 2 componentes: uma matriz básica com grãos finos e médios (diâmetro < 120 mm) e uma matriz de reforço (fibras), compreendendo plásticos, panos, galhos, etc... (diâmetro > 120 mm).



**Fig. 2.5 - Modelo para o resíduo sólido urbano (Kockel, 1995)**

### 2.3.1.3 – Temperatura

As temperaturas dos aterros de resíduos sólidos urbanos normalmente variam entre 30º e 60º, com valores crescentes com a profundidade até profundidades entre 5 e 10 m, quando tendem a se estabilizar. Este também é o limite das profundidades, a partir das quais as temperaturas no interior do aterro não são, aparentemente, afetadas pelas variações sazonais da temperatura ambiente, de acordo com o que pode ser verificado em estudos de Coumoulos et al. (1995) (Fig. 2.6) e Mariano & Jucá (1998) (Fig. 2.7).

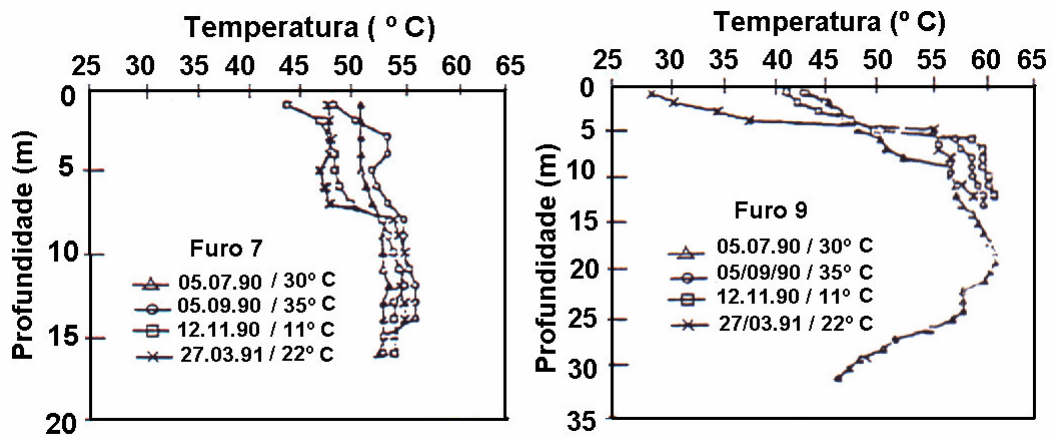


Fig.2.6- Variação da temperatura do RSU com a profundidade. Aterro Ano Liossia, Atenas (Grécia) (Coumoulos et al., 1995) (apud Carvalho,1999)

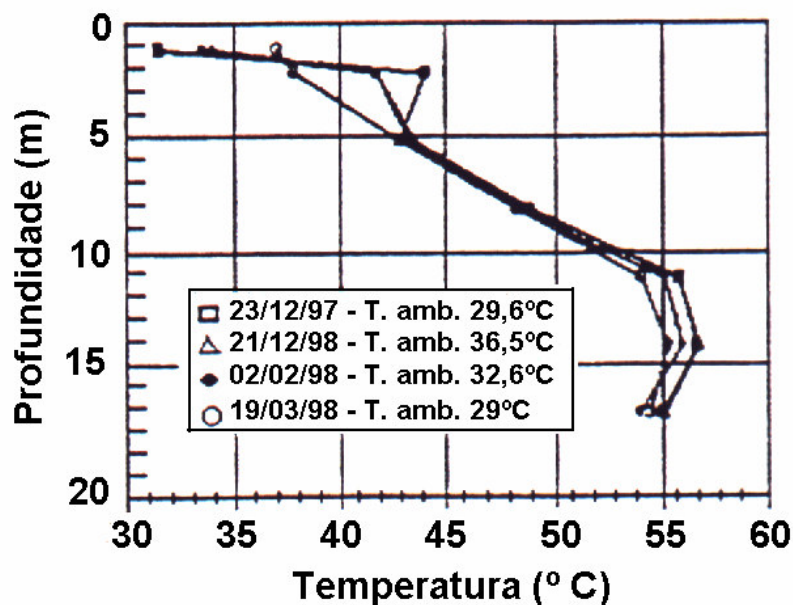


Fig. 2.7- Variação da temperatura do RSU com a profundidade, Aterro da Muribeca, Recife (Brasil) ( Mariano & Jucá, 1998) (apud Carvalho,1999)

#### 2.3.1.4 - Peso Específico

O peso específico ( $\gamma$ ) representa a relação entre o peso e o volume unitário na massa de resíduos. O seu valor sofre grande variação de acordo com a etapa considerada, isto é, desde a geração até o destino final nos aterros, de modo que a sua determinação deve ser feita em cada uma destas etapas ou conforme objetivo a que se prestará.

O valor do peso específico está diretamente ligado à composição gravimétrica dos resíduos sólidos. Assim, quanto maior a quantidade de componentes leves como papel, papelão e plásticos ou quanto menor a quantidade de lixo úmido (matéria orgânica) menor será o seu valor. Isto significa dizer que as áreas de maior poder aquisitivo (maior quantidade de supérfluos) tendem a apresentar em relação às áreas de menor poder aquisitivo (maior quantidade de matéria orgânica), pesos específicos com menores valores, conforme demonstrado para alguns bairros do Rio de Janeiro na Tabela 2.4, a seguir:

**Tabela 2.4 - Valores do peso específico do lixo em alguns bairros da cidade do Rio de Janeiro (Brito, 1999)**

<b>Bairro</b>	<b>Peso específico - <math>\gamma</math> (kgf/m<sup>3</sup>)</b>
Leblon	129,89
Copacabana	143,63
Centro	158,95
Botafogo	168,18
Vila Isabel	176,06
Santa Cruz	194,56
Campo Grande	196,99
Bangu	205,53

Por outro lado, tem-se observado para a cidade do Rio de Janeiro uma tendência de redução do peso específico aparente do lixo, com valores variando em torno de 250 kgf/m<sup>3</sup> em 1986 e 170 kgf/m<sup>3</sup> em 1998. Esta variação poderia ser atribuída, a princípio, a um aumento do poder aquisitivo da população. Na realidade, porém, esta tendência é mundial e decorre do desenvolvimento tecnológico que vem

introduzindo materiais cada vez mais leves, com a conseqüente diminuição do valor do peso específico do lixo.

Além da composição gravimétrica, o peso específico é influenciado pela espessura da camada de cobertura (argilosa) diária e, também, pelo método executivo do aterro. Geralmente apresenta valores crescentes com a profundidade em conseqüência da compressão e consolidação da massa de lixo devido à sobrecarga das camadas superiores. Wiemer (1982), conforme apresentado na Figura 2.8 e Kvazanjian (1995) demonstram que o peso específico pode variar de valores de 6 kN/m<sup>2</sup> na superfície até cerca de 12 kN/m<sup>2</sup> à profundidades em torno de 40 m, a partir da qual tendem a se estabilizar.



**Fig. 2.8 - Peso específico x profundidade (Wiemer, 1982)**

Quanto ao método executivo do aterro, a variação do peso específico é fortemente influenciada pela espessura da camada de lixo e pelo equipamento utilizado na sua compactação. Watts & Charles (1990) relatam que para um aterro sanitário na Inglaterra compactado com um rolo de aço de 21 t, valores variando de 6,3 kN/m<sup>3</sup> para camadas de 2 m de espessura até 8 kN/m<sup>2</sup> para camadas de

espessuras mais reduzidas. O grau de compactação igualmente é fator preponderante no valor do peso específico, podendo-se afirmar que, de uma maneira geral, os valores encontrados podem variar de 3 a 7 kN/m<sup>3</sup> para aterros com o material simplesmente espalhado, até valores de 9 a 13 kN/m<sup>3</sup> quando aplicado uma compactação controlada, utilizando-se tratores de esteira ou rolos compactadores apropriados.

Para o caso dos aterros de resíduos sólidos no Brasil os pesos específicos, tomando-se como base os poucos dados disponíveis, conforme verificado na Tabela 2.5, apresentam valores na mesma ordem de grandeza daqueles fornecidos pela literatura internacional.

**Tabela 2.5: Valores do peso específico de aterros de resíduos sólidos no Brasil.**

<b>Autor</b>	<b>Peso Específico (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Local/Condições</b>
Kaimoto & Cepolina, 1997	5 a 7	Resíduos novos, não decompostos e pouco compactados
	9 a 13	Resíduos após compactação com tratores de esteira ou rolo compactador e após a ocorrência de recalques
Santos & Presa, 1995	7	Resíduos recém lançados
	10	Resíduos após a ocorrência de recalques
Mahler & Iturri, 1998	10,5	Seção do aterro sanitário do Sítio São João com 84m de desnível e 10 meses de alteamento
Benvenuto & Cunha, 1991	10	Condição drenada
	13	Condição saturada

### 2.3.1.5 - Teor de Umidade

O teor de umidade ( $w$ ) dos resíduos sólidos urbanos é usualmente representado, da mesma forma que na Mecânica dos Solos, como uma relação entre

a massa de água e a massa seca. De acordo com o preconizado por Tchonobanoglous et al. (1993) esta representação pode ser feita, também, considerando-se a massa úmida, tal como na Agronomia.

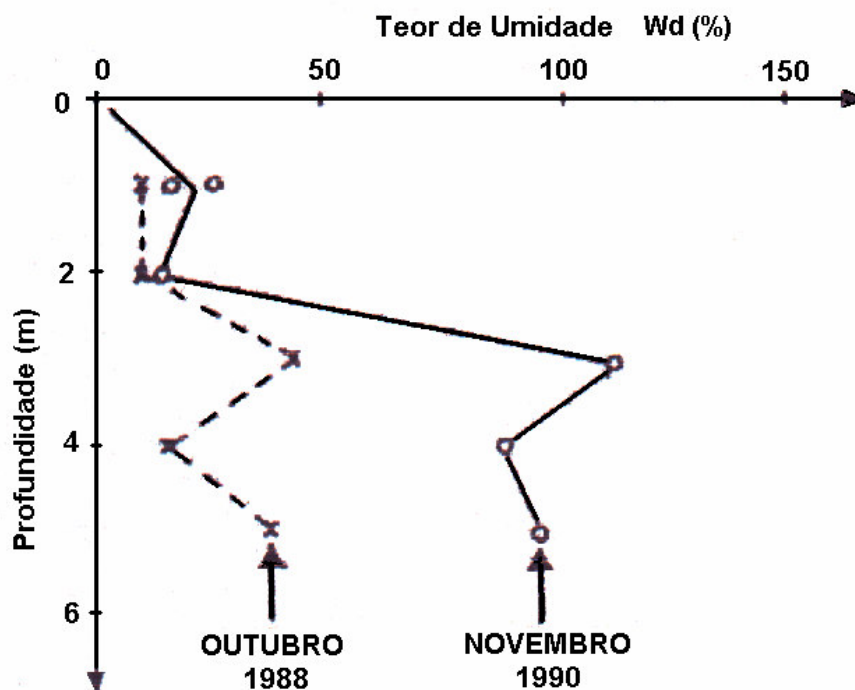
O teor de umidade do lixo depende de uma série de fatores, incluindo a composição granulométrica inicial, as condições climáticas, o grau de decomposição biológica e o próprio funcionamento do sistema de drenagem interno do aterro para a coleta de efluentes líquidos (chorume) e gasosos. A composição gravimétrica ou mais particularmente, conforme já referido, maiores percentuais de material orgânico correspondem a teores de umidade mais elevados no lixo (Landva & Clark, 1990) e Knochenmus (1998). De acordo com Carvalho (1999), com base em amostras coletadas no aterro sanitário Bandeirantes, estas diferenças no teor de umidade são marcantes entre os diversos componentes do resíduo, conforme apresentado na Tabela 2.6.

**Tabela 2.6: Umidade dos componentes do resíduo sólido urbano (RSU) do aterro sanitário Bandeirantes (Carvalho, 1999)**

Componentes	Teor de Umidade - w (%)	
	Massa de água / Massa seca	Massa de água / Massa 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

As condições climáticas, isto é, os índices de precipitação e de evapotranspiração podem contribuir para grandes variações no teor de umidade. Conforme

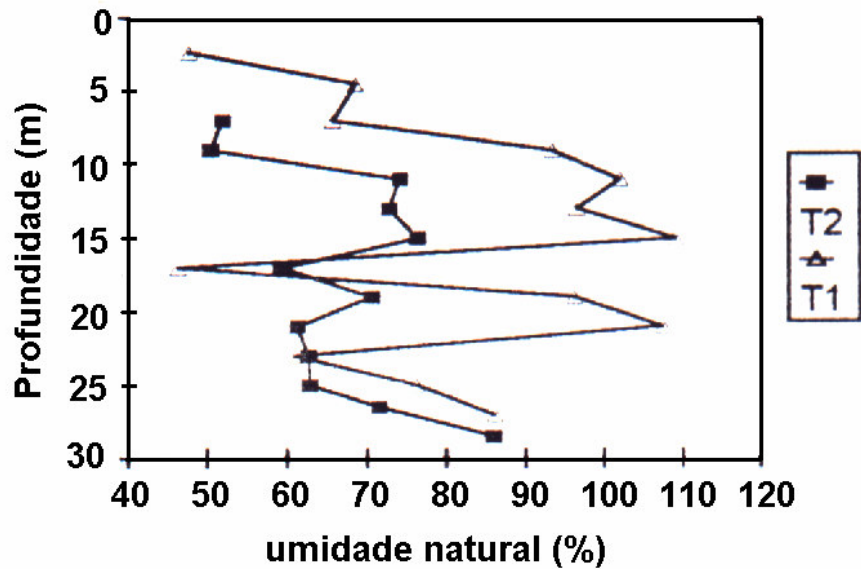
relatado, por exemplo, por Blight et al. (1992) para o aterro de Linbro em Johannesburg - África do Sul, os teores de umidade entre as profundidades de 3 a 5 m praticamente duplicaram quando comparados os valores medidos em outubro/88 (cerca de 50%) e novembro/90 (cerca de 100%), este último após uma precipitação excepcional (Fig.2.9).



**Fig. 2.9 - Teor de umidade x profundidade (Blight et al., 1992)**

A heterogeneidade do lixo, por outro lado, pode produzir zonas com intensa variação de umidade, normalmente com uma tendência de aumento com a profundidade, conforme observado por Gabr & Valero (1995), com valores de 30% próximo à superfície e 130% para profundidades de cerca de 20 m. No Brasil tal constatação pode, também, ser feita com base nos resultados apresentados por Carvalho (1999), obtidos de amostras coletadas em 2 furos à trado no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo (Fig. 2.10).





**Fig. 2.10 - Variação do teor de umidade com a profundidade, aterro sanitário Bandeirantes (Carvalho, 1999)**

Existem casos, porém, conforme apresentado por Coumoulos et al. (1995) para o aterro de Ano Liossia, em Atenas (Grécia) que a umidade do lixo se reduz com a profundidade, com valores superiores a 60% para profundidades de até 15 m e de cerca de 40% para profundidades de 30 m.

#### **2.3.1.6 - Permeabilidade**

O conhecimento do coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) é de fundamental importância para a concepção e o dimensionamento dos sistemas de drenagem interna de chorume e gás nos aterros de resíduos sólidos urbanos. Os valores encontrados para o coeficiente de permeabilidade, conforme pode ser verificado na Tabela 2.7, com dados compilados de vários autores por König & Jessberger (1997), predominantemente estão compreendidos entre  $10^{-4}$  m/s e  $10^{-6}$  m/s, faixa compatível com as areias finas e limpas, o que vem corroborar o conceito quanto ao comportamento granular (média permeabilidade) dos resíduos sólidos urbanos.

**Tabela 2.7: Valores de coeficientes de permeabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos (Konig & Jessberger, 1997)**

Referência	Peso Específico $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de permeabilidade k (m/s)	Método de Ensaio
Fungaroli & Steiner (1979)	1,1 – 4	$1 \times 10^{-5}$ - $2,0 \times 10^{-4}$	Determ. em lisímetros
Koriatas et al (1983)	8,6	$3,15 \times 10^{-5}$ - $5,1 \times 10^{-5}$	Ensaio de laboratório
Oweis & Khera (1986)	6,45	$1 \times 10^{-5}$	Estimativa de dados de campo
Oweis et al. (1990)	6,45	$1 \times 10^{-5}$	Ensaio de bombeamento
	9,4 – 14	$1,5 \times 10^{-6}$	Ensaio de campo com carga variável
	6,3 – 9,4	$1,1 \times 10^{-5}$	Ensaio em poço
Ladva & Clark (1990)	10,1 – 14,4	$1 \times 10^{-5}$ - $4 \times 10^{-4}$	Ensaio em poço
Gabr & Valero (1995)	-	$1 \times 10^{-7}$ - $1 \times 10^{-5}$	Ensaio de laboratório
Blengino et al (1996)	9 – 11	$3 \times 10^{-7}$ - $3 \times 10^{-6}$	Ensaio de campo em furos profundos (30 – 40m) e com carga variável
Manassero (1990)	8 – 10	$1,5 \times 10^{-5}$ - $2,6 \times 10^{-4}$	Ensaio de bombeamento (15–20m em profundidade)
Beaven & Powrie (1995)	5 – 13	$1 \times 10^{-7}$ - $1 \times 10^{-4}$	Ensaio de laboratório com pressão confinada de 0 – 600 KPa
Brandt (1990)	11 – 14	$7 \times 10^{-6}$ - $2 \times 10^{-5}$ (compact. rolo)	Ensaio de campo com carga variável
	13 – 16	$5 \times 10^{-6}$ - $3 \times 10^{-7}$ (compact.dinâmica)	Ensaio em poço
Brandt (1994)	9 – 12	$2 \times 10^{-5}$ - $1 \times 10^{-6}$	Ensaio de laboratório
	9 – 12	$5 \times 10^{-4}$ - $3 \times 10^{-5}$ (pré-tratado)	
	13 – 17	$2 \times 10^{-6}$ - $3 \times 10^{-5}$ (muito compactado)	
Jessberger (1984)	RSU misturado com entulho	$1 \times 10^{-8}$ - $10^{-3}$	Antes da compactação dinâmica
		$3 \times 10^{-8}$ - $1 \times 10^{-5}$	Após a compactação Dinâmica
Jessberger (1984)	RSU misturado com entulho	$4 \times 10^{-6}$ - $4 \times 10^{-3}$	Antes da compactação dinâmica
		$1 \times 10^{-7}$ - $1 \times 10^{-4}$	Após a compactação Dinâmica

A permeabilidade sofre influência da composição gravimétrica do lixo e, também, do método executivo do aterro, isto é, o grau de compactação aplicado. Esta influência pode ser verificada, por exemplo, pela expressão proposta por Del Greco et al. (1993) correlacionando o coeficiente de permeabilidade (k, em cm/s) com o peso específico natural do lixo fresco ( $\gamma$ , em tf/m<sup>3</sup>) abaixo apresentada:

$$k = 10^{-(\gamma + 0,2) / 0,425} \dots\dots\dots(2.1)$$

Por outro lado, seria de se esperar para o caso dos aterros no Brasil, em função dos maiores percentuais de matéria orgânica encontrada na composição do lixo, valores inferiores para os coeficientes de permeabilidade em relação aos apresentados na literatura internacional. Isto de fato pode ser constatado tomando-se como base estudos de Cepollina et al. (1994) a partir de testes de rebaixamento de poço de grande diâmetro (50 cm) e profundidade (30 m) e da abertura de valas de investigação em maciços com elevados percentuais de matéria orgânica, com cerca de 12 anos de deposição em São Paulo. De acordo com estes estudos foram obtidos valores da ordem de 10<sup>-7</sup> m/s para o coeficiente de permeabilidade (k). Estudos posteriormente desenvolvidos por Mariano & Jucá (1998), Santos et al. (1998) e Carvalho (1999), a partir de ensaios “in situ” em furos de sondagens, confirmam esta tendência, conforme valores apresentados na Tabela 2.8.

**Tabela 2.8: Valores de coeficientes de permeabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos no Brasil**

<b>Referência</b>	<b>Peso Específico <math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Coeficiente de Permeabilidade k (m/s)</b>	<b>Método de Ensaio</b>
Ehrlich et al. (1994)	8	$10^{-5}$	Ensaio in situ em furo de sondagem
Mariano & Jucá (1998)		$1,89 \times 10^{-8} - 4,15 \times 10^{-6}$	Ensaio in situ em furo de sondagem
Santos et al (1998)	14 - 19	$1 \times 10^{-7}$	Ensaio in situ em furo de sondagem
Carvalho (1999)	8 - 15	$5 \times 10^{-8} - 8 \times 10^{-6}$	
Aguiar (2001)		$9,39 \times 10^{-7} - 1,09 \times 10^{-6}$	Permeâmetro Guelph

### **2.3.2 - Características Químicas**

#### **2.3.2.1 - Poder Calorífico**

Indica a capacidade potencial de um material desprender determinada quantidade de calor quando submetido à queima, sendo o seu conhecimento fundamental para o dimensionamento das instalações de incineração.

#### **2.3.2.2 - Potencial Hidrogeniônico (pH)**

Indica o teor de acidez ou alcalinidade dos resíduos. O seu valor está relacionado com a velocidade de degradação e estabilização da matéria orgânica, sendo o seu conhecimento útil para o planejamento e projetos relacionados à destinação final do lixo.

#### **2.3.2.3 - Composição Química**

Tem por objetivo a determinação dos teores de cinzas, matéria orgânica, carbono, nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo, resíduo mineral total, resíduo mineral solúvel e gorduras. O seu conhecimento é importante, principalmente quando se

estudam processos de tratamento aplicáveis ao lixo ou a forma mais adequada de destinação final.

#### **2.3.2.4 - Relação Carbono/ Nitrogênio**

Indica o grau de decomposição da matéria orgânica do lixo nos processos de tratamento/disposição final.

#### **2.3.3 - Características Biológicas.**

São representadas pela população microbiana e agentes patogênicos presentes nos resíduos sólidos. O seu conhecimento, juntamente com as características químicas, permitem que sejam selecionados os métodos de tratamento e disposição mais adequados, com o desenvolvimento, por exemplo, de inibidores de cheiro e de retardadores/aceleradores de decomposição da matéria orgânica, normalmente aplicados no interior de veículos de coleta e para a recuperação de áreas degradadas.

#### **2.3.4 - Características Mecânicas**

##### **2.3.4.1 - Resistência ao Cisalhamento**

###### **(a) Considerações Gerais.**

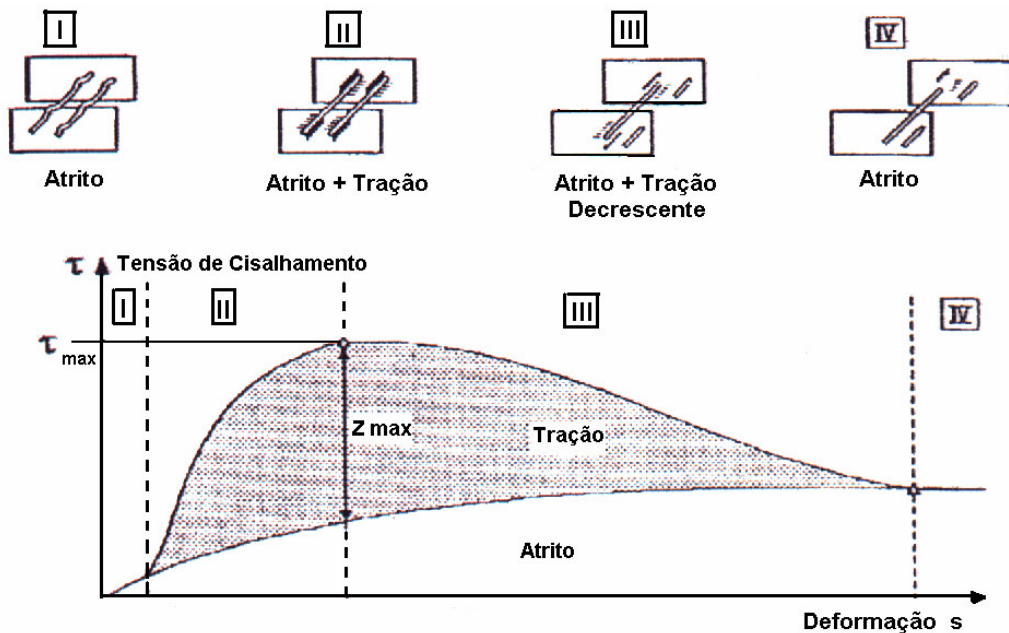
Os depósitos de lixo de uma maneira geral apresentam comportamentos, principalmente no que se refere à resistência ao cisalhamento, que se assemelham em alguns aspectos aos maciços em solo reforçado com fibras. Isto porque podem ser caracterizados como uma estrutura composta, resultado da associação de dois componentes de naturezas essencialmente distintas e funções complementares.

Assim, conforme ilustrado na Foto 2.1 (vazadouro de lixo da rua Duarte da Silveira em Petrópolis), é comum observar-se em depósitos de lixo taludes sub-verticais que podem atingir alturas elevadas, devido ao efeito de uma pseudo-coesão advinda do reforço das fibras.



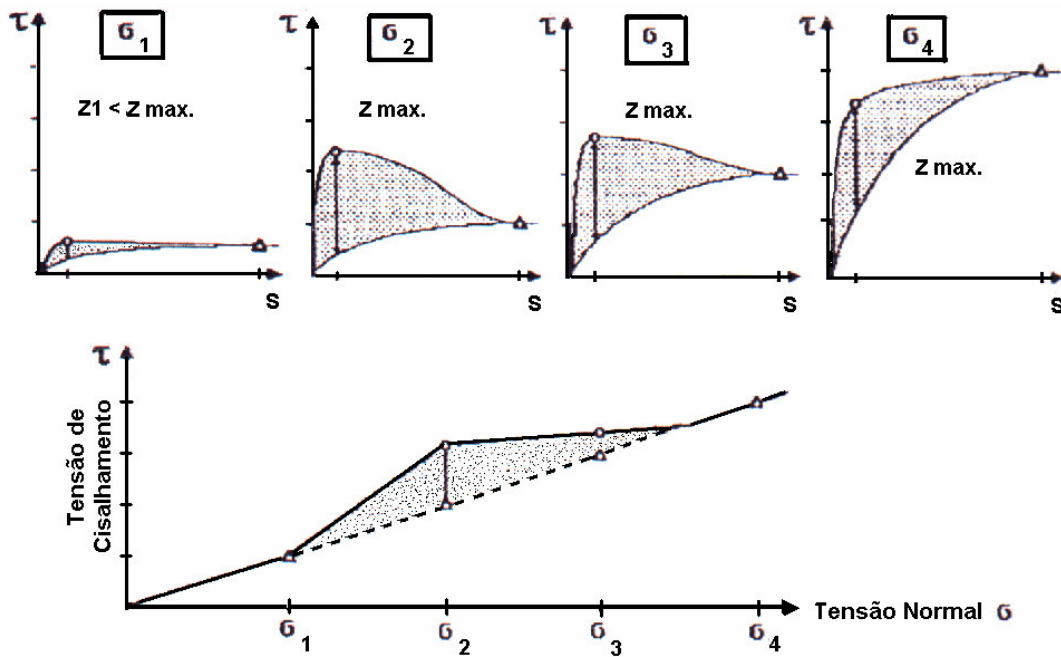
**Foto 2.1 - Talude sub-vertical no vazadouro de lixo da rua Duarte da Silveira, em Petrópolis.**

De acordo com modelo proposto por Kolsch (1993) os materiais fibrosos (plásticos, panos/trapos, etc...) presentes na composição do lixo seriam capazes de criar forças de tração que dependeriam do vínculo das fibras com a massa do lixo, isto é, seriam função da tensão normal atuante. Deste modo a resistência ao cisalhamento seria composta por duas parcelas distintas: a 1ª referentes às forças de atrito no plano de cisalhamento e a 2ª referente as forças de tração das fibras ou pseudo coesão devido as fibras. A interação entre essas duas parcelas está representada na curva tensão x deformação da Fig. 2.11 (Kolsch - 1993).



**Fig. 2.11 - Curva tensão x deformação com a interação entre as componentes de atrito e de tração / coesão das fibras (Kolsch, 1993)**

Esta curva mostra que para pequenas deformações (Fase 1) existe apenas a mobilização das forças de atrito; à medida que as deformações vão aumentando e as fibras começam a ser tracionadas (fase 2), a parcela das forças de tração aumenta até atingir um valor máximo correspondente à resistência a tração ou vínculo das fibras com a massa do lixo. A partir deste valor máximo ( $Z_{\text{máx.}}$ ) entra-se na Fase 3 com a redução gradativa da parcela das forças de tração até atingir a Fase 4 onde a resistência ao cisalhamento se limitaria à parcela devida ao atrito. A parcela de resistência devida ao atrito aumenta linearmente com o aumento da tensão normal, ao passo que a parcela devida às forças de tração das fibras, conforme apresentado na Fig. 2.12 (Kolsch, 1993), só contribui efetivamente na resistência ao cisalhamento a partir de um determinado valor de tensão normal ( $\sigma_1$ ), com esta contribuição crescendo até um valor máximo ( $\sigma_2$ ), a partir do qual tende a decrescer ( $\sigma_3$ ), até se anular. Assim, a contribuição de cada uma dessas parcelas na resistência ao cisalhamento do lixo variará de acordo com a tensão normal atuante, além naturalmente da deformação, conforme já referido anteriormente.



**Fig. 2.12 - Variação da resistência ao cisalhamento com a tensão normal - Contribuição das componentes de atrito e de tração / coesão das fibras (Kolsch, 1993)**

De modo a caracterizar separadamente cada uma das parcelas referidas, Kolsch (1993) desenvolveu equipamento destinado exclusivamente à medição das forças de tração das fibras. As forças de atrito foram determinadas através de ensaios de cisalhamento direto após a redução das partículas do lixo, eliminando deste modo o efeito das fibras.

A partir dessa metodologia, Mahler et al. (1998) propõem para o cálculo da força de tração devida às fibras, em uma provável superfície de deslizamento, a seguinte expressão:

$$F = \alpha \cdot \gamma \cdot h \dots\dots\dots(2.2)$$

onde: F = força de tração na cunha da possível superfície de deslizamento;

$\alpha$  = fator característico do material fibroso, variando de 0,1 a 0,3;

$\gamma$  = peso específico do lixo (tf/m<sup>3</sup>).

h = profundidade da superfície de deslizamento (m).



Ziehmman (1999) propõe a expressão abaixo para o cálculo da estabilidade de taludes, utilizando-se o Método de Bishop (DIN 4086), na qual as forças resistentes (T) foram acrescidas de um termo (em negrito) que representa a resistência à tração devida às fibras:

$$T = G.tg\phi + c.b + \mathbf{G.tg \xi .sen(1,5\alpha)} / 1/\eta . sen \alpha . tg\phi + cos \alpha \dots\dots\dots(2.3)$$

onde: G = peso do elemento (kN).

$\xi$  = ângulo de tração.

c = coesão (kN/m<sup>2</sup>).

$\phi$  = ângulo de atrito ( °)

$\alpha$  = superfície de ruptura ( °).

b = extensão do elemento (m).

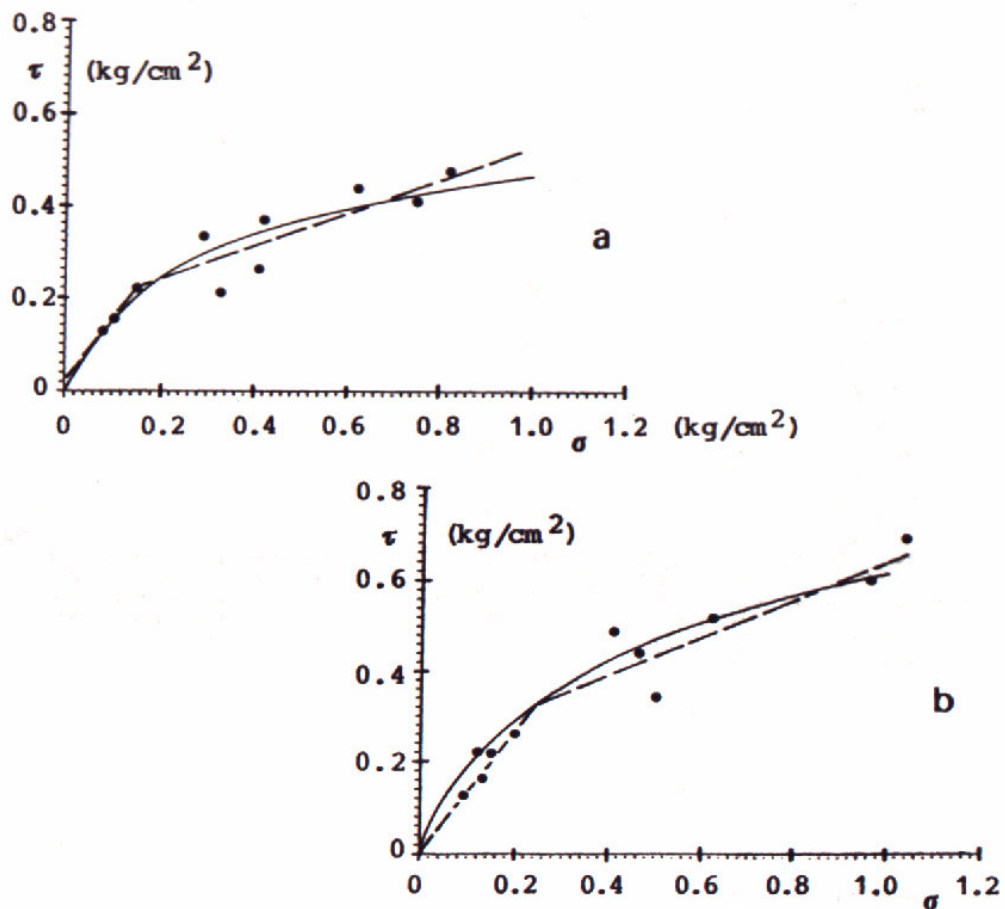
$\eta$  = fator de segurança.

De acordo com o modelo proposto por Kockel (1995), o lixo pode ser dividido em dois componentes distintos: uma matriz básica com grãos finos e médios (diâmetro < 120 mm), responsável pela resistência a compressão e ao cisalhamento e uma matriz de reforço (fibras), compreendendo plásticos, panos, galhos, etc... (diâmetro > 120 mm), caracterizados por elevadas resistências à tração e a flexão. A interação entre estas duas componentes do lixo, a exemplo dos solos reforçados com fibras de uma maneira geral, proporciona uma melhoria significativa das características mecânicas da estrutura global.

### **(b) Envoltórias de Resistência ao Cisalhamento**

De uma maneira geral, o modelo de envoltória bilinear que é característico dos solos reforçados, também é aceito e preconizado por diversos autores para o caso do lixo. Del Greco & Oggeri (1993) desenvolveu estudos a partir de ensaios de cisalhamento direto com amostras de lixo com diferentes graus de compactação, de

maneira a atingir baixos e altos valores de pesos específicos, cujas envoltórias de resistência são apresentadas na Fig. 2.13.



**Fig. 2.13 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento do lixo para amostras com: (a) Baixos pesos específicos; (b) Altos pesos específicos (Del Greco et al., 1993)**

De acordo com o que concluiu existem 2 possibilidades de interpolação para a obtenção das envoltórias de resistência das amostras em referência. Para baixos níveis de tensão normal verificam-se os maiores valores do ângulo de atrito, conseqüência das asperezas na superfície de cisalhamento, enquanto que para altos níveis de tensão normal estas asperezas são niveladas e o deslizamento se desenvolve em uma condição de atrito residual. Estes aspectos, segundo os mesmos autores, guardam uma certa analogia com o efeito de dilatância e da existência de uma coesão aparente das discontinuidades ásperas das massas de rocha.

Para Kolsch (1995) a envoltória de resistência, para baixas tensões normais, possui uma inclinação mais íngreme, representando o efeito conjugado do atrito e do reforço das fibras. Para tensões normais maiores e uma vez atingido o ponto da resistência máxima a tração destes elementos do reforço, esta componente da resistência total é perdida e a inclinação da envoltória cai abruptamente, passando a representar apenas a parcela referente ao atrito.

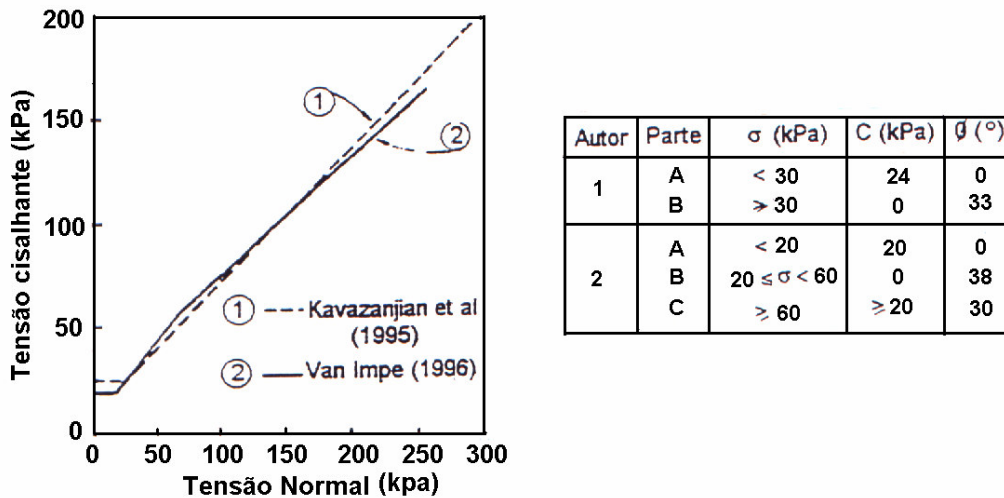
Ziehmman (1999 e 2001) se refere ao modelo bilinear como o que melhor representa a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos, uma vez que com este modelo é possível determinar e descrever as duas parcelas da resistência ao cisalhamento do lixo separadamente. Deste modo sugere que para o cálculo da estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos seja utilizado o modelo bilinear sempre que uma das condições abaixo se aplicar:

- (a) O percentual de partículas maiores que 120 mm for superior a 10% (em peso) e a espessura de cada camada depositada no aterro for inferior a 1 m;
- (b) Não for possível estimar realisticamente a deformação de diferentes partes do aterro;
- (c) A espessura das camadas depositadas no aterro for inferior a 50 cm e o resíduo sólido urbano conter partículas maiores que 40 mm.

Para efeito prático, conforme apresentado na Figura 2.14, pode-se destacar as seguintes proposições para envoltórias de resistência do lixo:

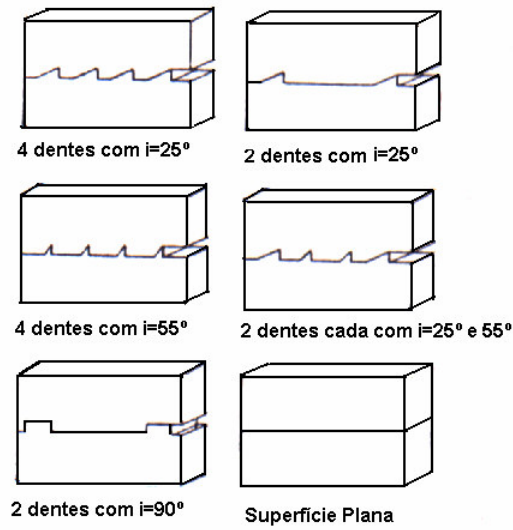
- (a) Kavazanjian et al. (1995) sugere a adoção de uma envoltória de resistência bilinear, com o lixo considerado um material puramente coesivo ( $c = 24$  kPa) para tensões normais ( $\sigma$ ) de até 30 kPa e, deste valor em diante, como um material não coesivo com um ângulo de atrito interno igual a  $33^\circ$ ;
- (b) Van Impe et al. (1996) sugere a adoção de uma envoltória de resistência tri-linear, com o lixo considerado um material puramente coesivo ( $c = 20$  kPa) para tensões normais de até 20 kPa, um material não coesivo ( $\phi' = 38^\circ$ ) para

tensões normais entre 20 e 60 kPa e um material com ambas as componentes de coesão e atrito ( $c > 20$  kPa e  $\phi' = 30^\circ$ ) para tensões normais superiores a 60 kPa.



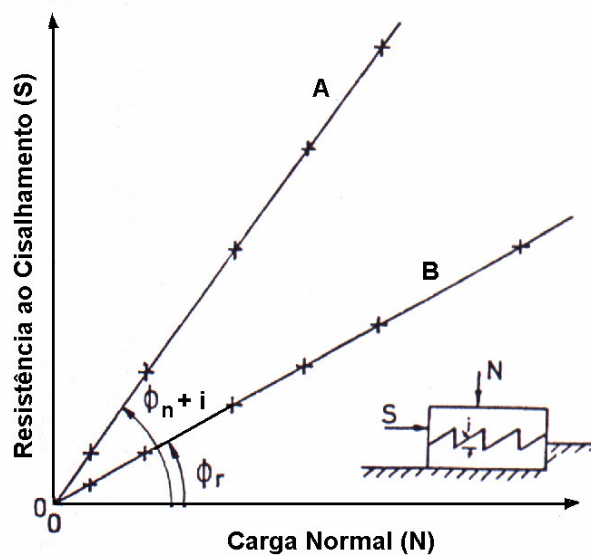
**Fig. 2.14 - Envoltória de resistência do lixo (Kavazanjian et al. & Van Impe, 1998)**

Este modelo de envoltória de resistência bilinear é característico, também, no caso das rochas, de acordo com estudos desenvolvidos inicialmente por Patton (1966). Estes estudos consistiram, basicamente, da execução de ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova moldados a partir de materiais artificiais com as propriedades da rocha, cada um dos quais com características distintas, de modo a criar diferentes tipos de superfícies no plano de cisalhamento. Assim, cada uma das metades dos corpos de prova foram moldadas com “dentes” com diferentes inclinações e espaçamentos, procurando reproduzir os diversos tipos de irregularidades de uma superfície rochosa real, conforme representado na Fig. 2.15.



**Fig. 2.15 - Diferentes tipos de corpos de provas de materiais artificiais com as propriedades da rocha (Patton, 1966)**

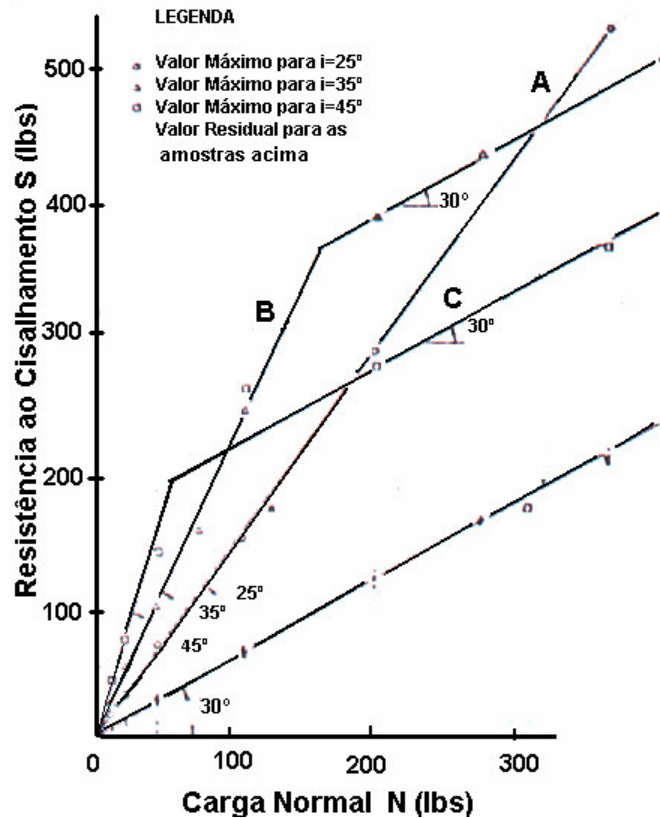
As envoltórias de resistência típicas obtidas para ensaios com corpos de prova com diferentes inclinações de dentes para baixas tensões normais são apresentadas na Figura 2.16.



**Fig. 2.16 - Envoltórias de resistência típicas para baixas tensões normais (Patton, 1966)**

De acordo com o que pode ser observado, a envoltória A representa os valores de resistência máximos obtidos, enquanto a envoltória B representa os valores de resistência residual correspondentes a grandes deslocamentos. Considerando-se que o ângulo de atrito residual ( $\phi_r$ ) é aproximadamente igual ao ângulo de atrito ( $\phi_n$ ) para corpos de prova com superfícies planas (sem dentes), pode-se concluir que o ângulo de atrito da envoltória A é igual a ( $\phi_n + i$ ). Isto é, esta envoltória engloba 2 diferentes tipos de resistência: o 1º referido ao valor da resistência de atrito externa no plano de cisalhamento e o 2º correspondente à resistência interna (“coesão”) dos dentes. Esta resistência de “coesão” dos dentes para cada tensão normal corresponde, portanto, à diferença de resistências entre as envoltórias de resistências máximas (A) e residual (B). Este efeito pode ser considerado como análogo ao que ocorre com o lixo, sendo que neste caso as fibras presentes corresponderiam aos dentes da superfície rochosa.

Em prosseguimento ao mesmo estudo foram efetuados 3 séries de ensaios com corpos de prova com inclinações de dentes ( $i$ ) iguais a 25º (envoltória A), 35º (envoltória B), 45º (envoltória C), obtendo-se as envoltórias de resistência representadas na Fig. 2.17. Na mesma figura a envoltória D foi obtida a partir da resistência residual ao cisalhamento com os corpos de prova em referência.



**Fig. 2.17 - Envoltórias de resistência de corpos de prova com diferentes inclinações de dentes (Patton, 1966)**

De acordo com o que pode ser observado, as envoltórias apresentam, nos seus trechos iniciais, inclinações aproximadamente iguais a  $\phi_n + i$ . As inclinações de seus 2º trechos para as envoltórias B e C correspondem aproximadamente ao valor de  $\phi_r$ . A explicação para isso vem do fato de que, a partir de um determinado valor da tensão normal, com a ruptura dos dentes, a resistência ao cisalhamento corresponderá tão somente ao valor da parcela referente ao atrito. Para o caso da envoltória A este valor da tensão normal não chegou a ser atingido. Deste modo, pode-se concluir que o ponto (tensão normal) de transição ou mudança de declividade da envoltória seria função da inclinação dos dentes.

Existem, todavia, controvérsias quanto à adoção deste modelo de envoltória de resistência bilinear para o caso do lixo. Dentre os autores que contestam este modelo pode-se destacar Jessberger et al. (1995), para os quais o ponto de variação de inclinação da envoltória de resistência não pode ser caracterizado uma vez que, ao contrário dos solos reforçados com fibras, o lixo apresenta elementos distintos de reforço com diferentes resistências à tração e comportamentos tensão x deformação.

### **(c) Parâmetros de resistência do lixo**

Os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito interno) adotados no cálculo da estabilidade de taludes de depósitos de resíduos sólidos urbanos (lixo) têm sido estudados com mais acurácia, principalmente, nos últimos dez anos. Dado porém, a complexidade do problema, o assunto é susceptível a muitas discussões e interpretações.

A obtenção destes parâmetros normalmente é feita através de ensaios de laboratório (triaxiais e cisalhamento direto), com equipamentos de grande porte, utilizando-se amostras re-moldadas ou retro-análises, com base em observações das condições de ruptura verificadas no campo e, ainda, métodos “in-situ” como ensaios de Palheta (Vane Test), sondagens à percussão (SPT), cone ou piezocone, pressiométricos ou penetração dinâmica. Mais recentemente, tem sido desenvolvidos equipamentos (caixas de grande porte) para ensaios de cisalhamento direto no campo com amostras indeformáveis (amostras superficiais).

No caso dos ensaios de laboratório, a maior dificuldade encontrada se refere à coleta e obtenção de amostras representativas em função da composição muito heterogênea e com elementos de grandes dimensões presentes no lixo. Além disso, a necessidade de equipamentos (triaxial e cisalhamento direto) de porte, com dimensões compatíveis (no mínimo 5 a 10 vezes superiores a partícula de maior diâmetro do lixo) e proteção adequada quanto à corrosão e segurança dos operadores contribuem para a elevação dos custos destes ensaios. Neste aspecto, de acordo com



Carvalho (1999), as dimensões dos corpos de prova parecem influenciar os resultados de resistência ao cisalhamento, conforme comprovado em ensaios triaxiais do tipo CD com o lixo coletado no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo. Os resultados destes ensaios apresentaram valores de ângulo de atrito de cerca de 27° e coesão variando de 42 a 55 kPa para corpos de prova de 15 x 30 cm e ângulo de atrito de cerca de 21° e coesão entre 45 e 60 kPa para corpos de prova de 20 x 40 cm. Assim, os corpos de prova com menores dimensões tenderam a apresentar maiores valores de resistência.

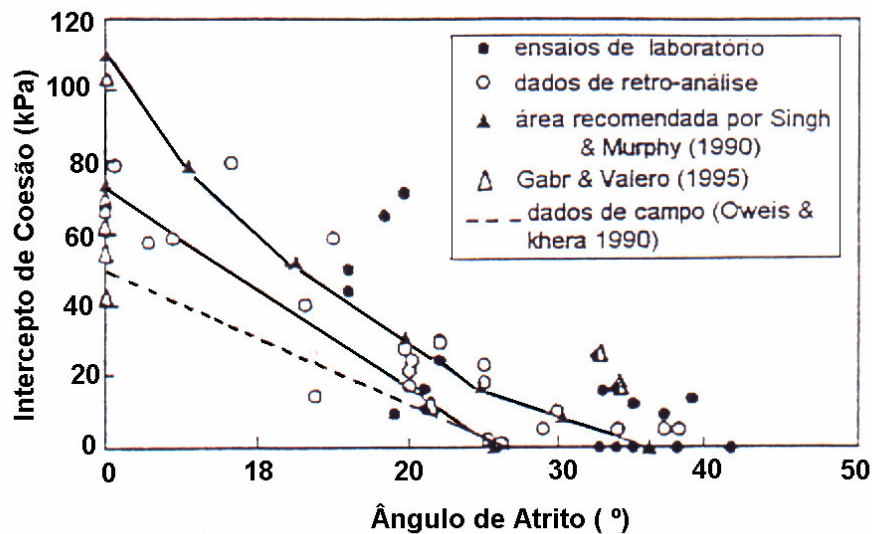
Para as retro-análises as maiores dificuldades se referem ao fato de sempre existir uma infinidade de combinações de parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) que satisfazem as condições de equilíbrio e, também, as próprias incertezas quanto aos reais mecanismos de ruptura ocorridos no campo o que pode conduzir a escolha de parâmetros inadequados. Neste sentido, Howland & Landva (1992) propuseram um método gráfico para análise dos resultados, obtido a partir de retro-análises, de modo a determinar a mais provável combinação dos parâmetros de resistência do lixo.

Para os ensaios “in-situ” do tipo palheta (Vane Test), sondagens à percussão (SPT), cone ou piezocone, pressiométricos e penetração dinâmica as maiores dificuldades e limitações se referem à presença de grandes obstáculos ao longo do perfil do aterro, fazendo com que os resultados sejam de difícil interpretação. Normalmente os resultados obtidos tem um caráter qualitativo, indicando, por exemplo, camadas com baixas ou menores resistências ao longo do perfil investigado.

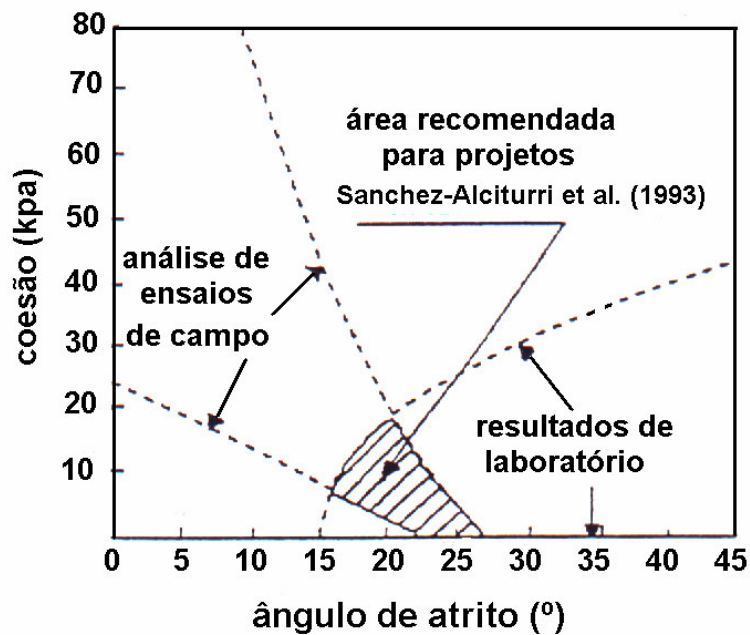
Por estas razões, o número de ensaios disponíveis mesmo na literatura internacional é relativamente pequeno e apresenta-se com uma apreciável gama de variação, que segundo Singh & Murphy (1990), se deve a diversos fatores, tais como as próprias ambigüidades de terminologias quanto às características do lixo e as diferentes condições do material e tipos de ensaios realizados.

Tomando-se como base os trabalhos de Pagott & Rinoldi (1987), Landva & Clark (1990), Singh & Murphy (1990), Richardson & Reynolds (1991), Withiam et al. (1994), Gabr & Valero (1995) e Kockel (1995), verificam-se valores para o ângulo de atrito entre 10° e 53° e coesão entre 0 e 67 kPa. Em função desta dispersão de valores, uma estimativa confiável da resistência ao cisalhamento do lixo é difícil e, muitas vezes, conduz a resultados contraditórios em relação às reais condições de estabilidade de taludes observado no campo.

Deste modo, tem sido usual a apresentação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do lixo, obtidos por diferentes métodos e autores, em gráficos do tipo coesão (c) x ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), estabelecendo-se uma faixa recomendada para projetos. Como exemplo destas faixas pode-se citar aquelas propostas por Singh & Murphy (1990) e por Sánchez – Alciturri et al. (1993), apud Carvalho (1999), apresentadas nas Figuras 2.18 e 2.19, respectivamente.



**Fig. 2.18 - Faixa recomendada para projetos - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do resíduo sólido urbano (Singh & Murphy, 1990)**

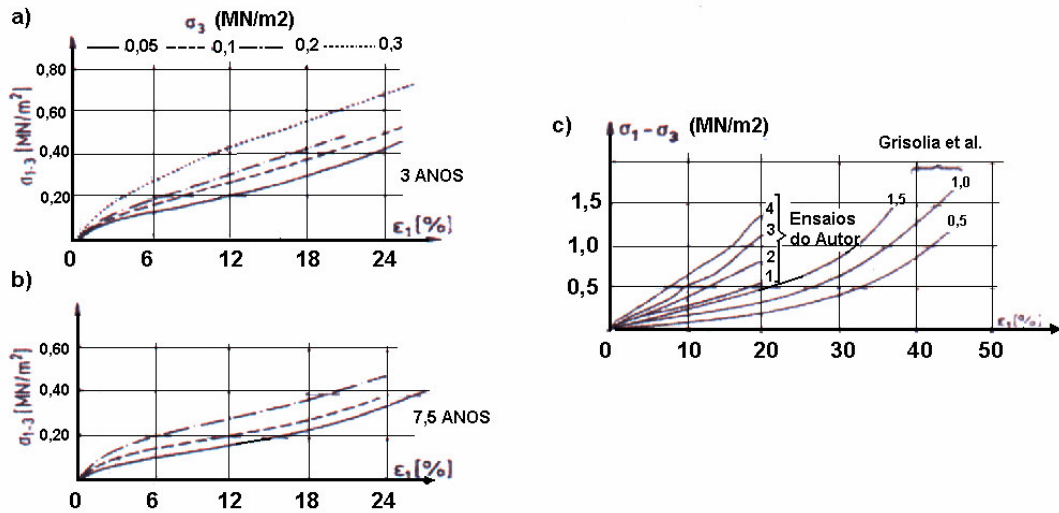


**Fig. 2.19 - Faixa recomendada para projetos - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do resíduo sólido urbano (Sánchez – Alciturri et al., 1993)**

De acordo com Ziehmman (1999) a resistência ao cisalhamento total dos resíduos sólidos urbanos é dividida em 2 diferentes tipos de resistência: a 1ª corresponde ao cisalhamento e, a exemplo dos solos, resulta do atrito entre as partículas, sendo expresso pelo ângulo de atrito  $\phi$  e a 2ª corresponde a resistência à tração das fibras, sendo expresso pelo ângulo de tração  $\xi$ .

Em ensaios realizados em equipamento especialmente desenvolvido pelo mesmo autor com variadas amostras de resíduos sólidos urbanos, o ângulo de atrito  $\phi$  se situou normalmente entre 30° e 40°, enquanto a coesão mostrou-se sempre inferior a 40 kN/m², com a maioria dos ensaios apresentando um valor de cerca de 15 kN/m². Não foi observado nenhuma relação entre a resistência ao cisalhamento e o tipo de resíduo sólido urbano (diretamente depositados, pré-tratados ou antigos). Para o ângulo de resistência à tração  $\xi$  os valores variaram de 0° a mais de 40°, dependendo do tipo de lixo considerado. Assim, para o lixo depositado diretamente o valor médio obtido foi de 35°, enquanto para o lixo com pré-tratamento mecânico-biológico este valor, influenciado pela redução do tamanho das partículas, foi de cerca de 15°.

Por outro lado, de acordo com Jessberger (1990) e Jessberger & Kockel (1993) com base em resultados de ensaios triaxiais com diâmetro de 300 mm (Fig. 2.20) geralmente não existe um ponto definido de ruptura, observando-se uma tendência de enrijecimento do lixo com a deformação.



**Fig. 2.20 - Curvas tensão x deformação de diferentes tipos de lixo em ensaios triaxiais - (a) e (b) – Jessberger, 1990 e (c) Jessberger & Kockel, 1993.**

Quanto a variação dos parâmetros de resistência em função das deformações, estudos efetuados por Jessberger (1990), Jessberger & Kockel (1993), Reutner (1995) e Kockel (1995) demonstram que, em geral, o valor limite do ângulo de atrito é mobilizado para deformações máximas de 20%. Para a coesão a mobilização só começa a se acentuar para deformações superiores a 10%, com o seu valor tendendo a crescer indefinidamente com a deformação, não sendo possível caracterizar um máximo. As Fig, 2.21 e 2.22 apresentadas abaixo, obtidas de Kockel (1995) ilustram o acima referido:

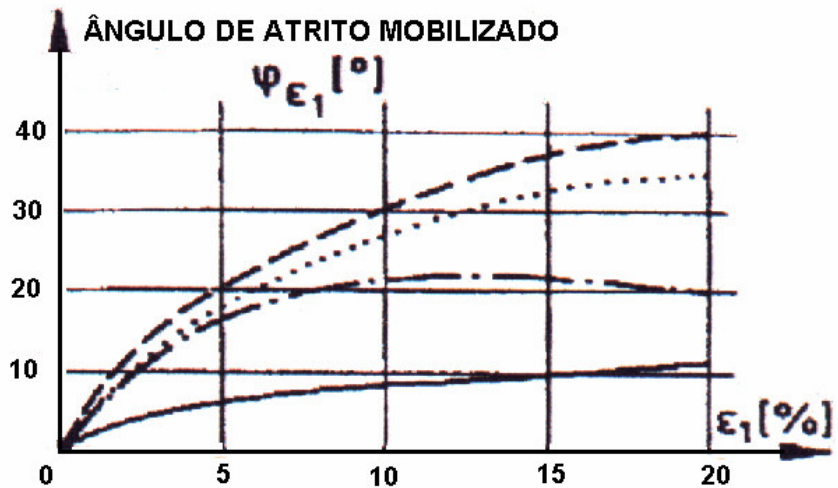


Fig. 2.21 - Curvas ângulo de atrito x deformação para diferentes idades do lixo (Kockel, 1995)

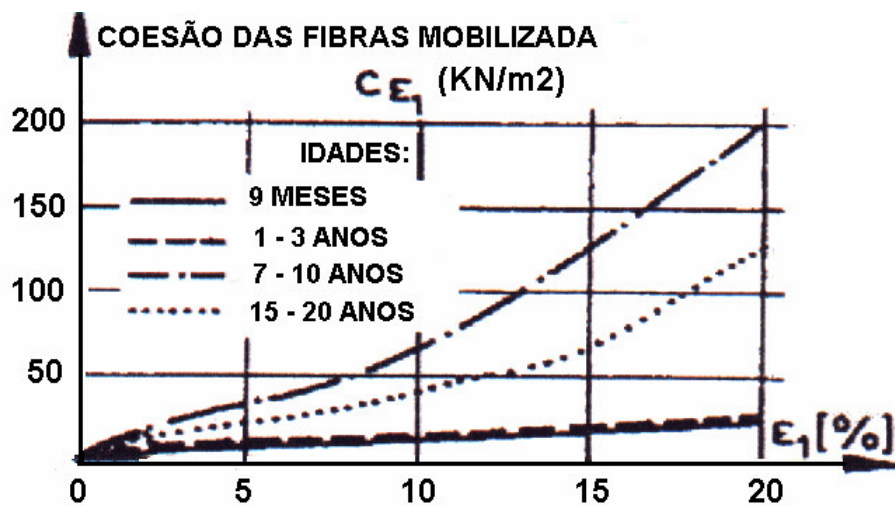
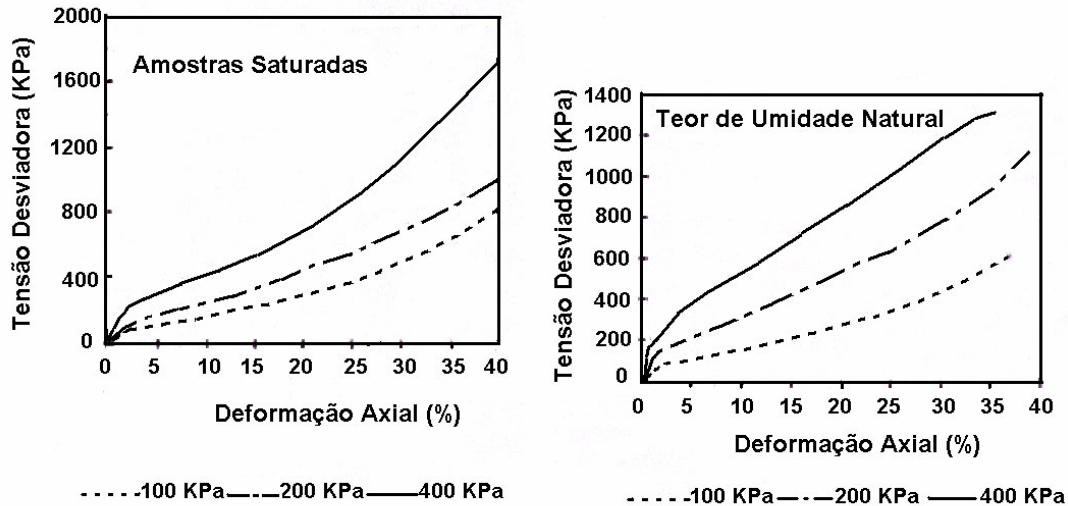


Fig. 2.22 - Curvas coesão x deformação para diferentes idades do lixo (Kockel, 1995)

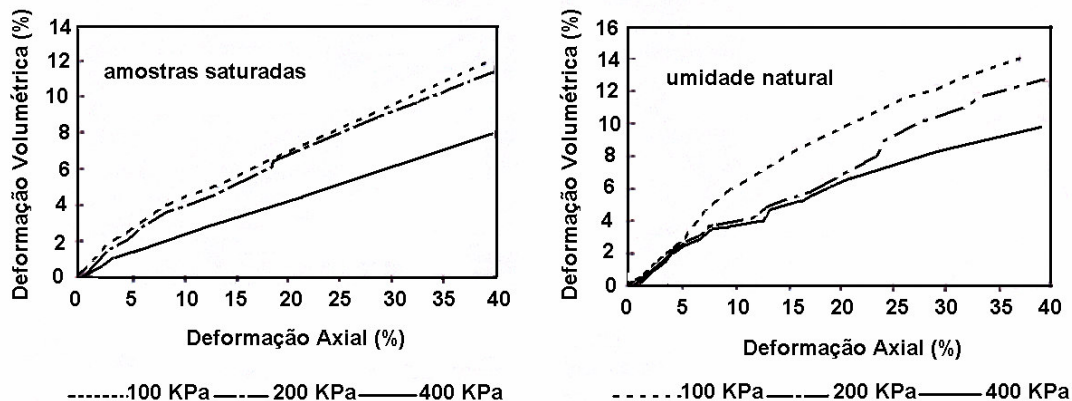
Este comportamento tem sido comprovado por diversos autores, podendo-se citar, mais recentemente, Vilar & Carvalho (2002) que procederam a ensaios triaxiais drenados com amostras compactadas moldadas na umidade natural e saturadas, obtidas do aterro sanitário Bandeirantes (São Paulo), com as principais conclusões abaixo apresentadas:

- As curvas tensão x deformação (Fig. 2.23) apresentam-se semelhantes, mostrando um aumento contínuo da tensão desviadora ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) com a deformação axial ( $\epsilon_a$ ), sem atingir, contudo, um valor característico assintótico ou de pico;



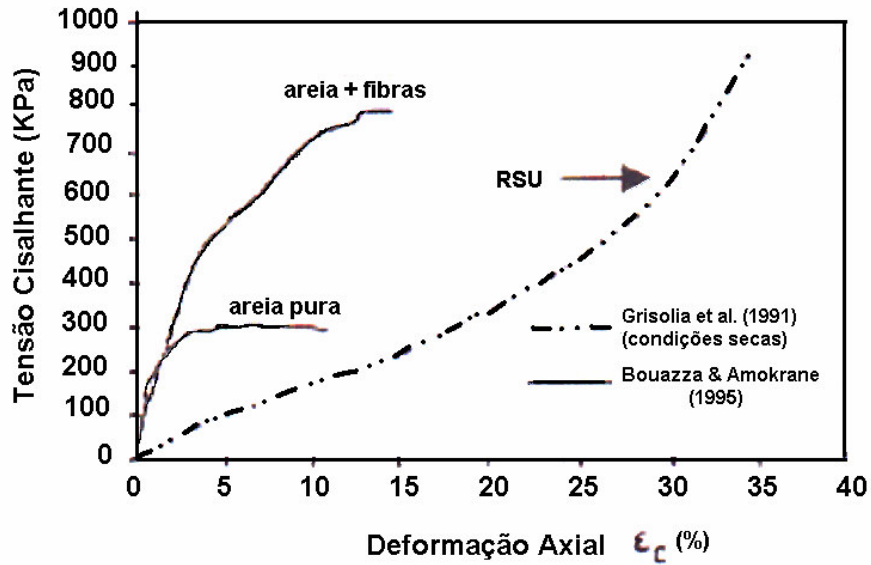
**Fig. 2.23 - Curvas tensão x deformação do lixo, para amostras na umidade natural e saturadas (Vilar & Carvalho, 2002)**

- As curvas das deformações volumétricas x deformações axiais (Fig. 2.26) mostram um decréscimo das deformações volumétricas ( $\epsilon_v$ ), com o aumento das tensões confinantes.



**Fig. 2.24 - Curvas deformação volumétrica x deformação axial do lixo, para amostras na umidade natural e saturadas (Vilar & Carvalho, 2002)**

O fato de não poder ser caracterizado um ponto de resistência de pico para o lixo, contrariamente ao que ocorre com os materiais granulares e com os materiais granulares reforçados com fibras, conforme demonstrado por Manassero et al. (1996) na Fig. 2.25, faz com que, atualmente, seja usual se definir os parâmetros de resistência do lixo com base em critérios de deformação.



**Fig. 2.25 - Curvas tensão x deformação para diferentes materiais (Manassero et al., 1996)**

Uma dificuldade adicional quanto aos parâmetros de resistência do lixo diz respeito ao relativo desconhecimento de suas variações ao longo do tempo. Sabe-se que para aterros com elevado percentual de matéria orgânica e deficiência ou mesmo inexistência de sistemas de drenagem interna para os efluentes líquidos (chorume) e gasosos, o que é o caso típico do Brasil, existe uma tendência de redução desses valores. Esta redução de acordo com dados apresentados por Turczynski (1988) e citados por Kockel (1995) para aterros sanitários europeus está representada na Tabela 2.11 a seguir:

**Tabela 2.11: Parâmetros de cisalhamento para o Lixo (Turczynski - 1988)**

<b>Idade (anos)</b>	<b><math>\phi'</math> (°)</b>	<b><math>c'</math> (kN/m<sup>2</sup>)</b>
Novo	38° - 40°	40 – 50
3	35°	15
5	32°	12
15	26°	10

Como pode ser observado, a variação dos parâmetros de resistência ao longo do tempo é mais marcante nos valores da coesão. Esta constatação vai de encontro às conclusões de Maisonville (1997), conforme citação de Mahler et al. (1998), de que as fibras tornam-se menos resistentes com o tempo.

Caicedo et al. (2002) em ensaios executados no aterro de Doña Juana (Bogotá – Colômbia), a diferentes profundidades e com o lixo com idades de decomposição distintas, utilizando um tipo de sonda pressiométrica especialmente desenvolvido, chega a conclusões aparentemente contrárias àquelas sugeridas por Turczynski (1988) e Maisonville (1997). De acordo com o que pode ser observado na Fig. 2.26, o valor da coesão tende a se manter constante, sendo pouco influenciado pelo grau de decomposição do lixo. Por outro lado, os valores do ângulo de atrito interno sofrem apreciável redução, quando comparados os lixos com menor idade (Zona II) e os de maior idade de decomposição (Zona Mansion).



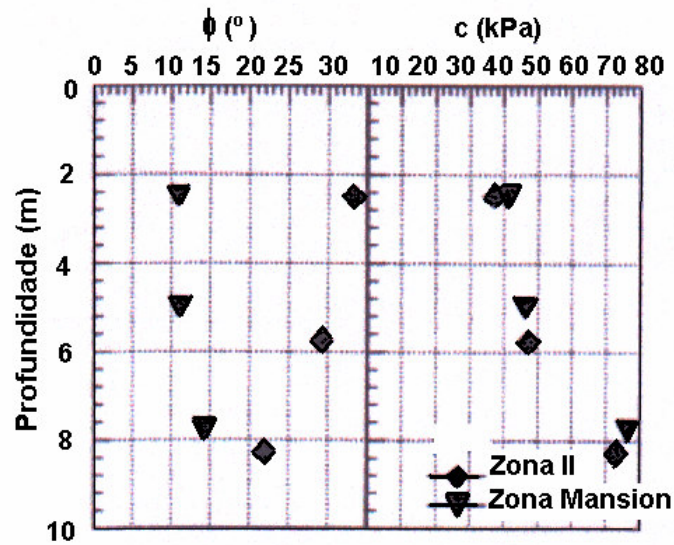


Fig. 2.26 - Variação da coesão e do ângulo de atrito interno para diferentes profundidades e idades de decomposição do lixo (Caicedo et al., 2002)

De acordo com o observado por Kockel & Jessberger (1995) o ângulo de atrito interno praticamente não sofre a influência do teor de fibras (plásticos, panos/trapos, etc...) presentes na massa do lixo (Fig. 2.27). A coesão, ao contrário, tem o seu valor fortemente condicionado aquele teor (Fig.2.28).

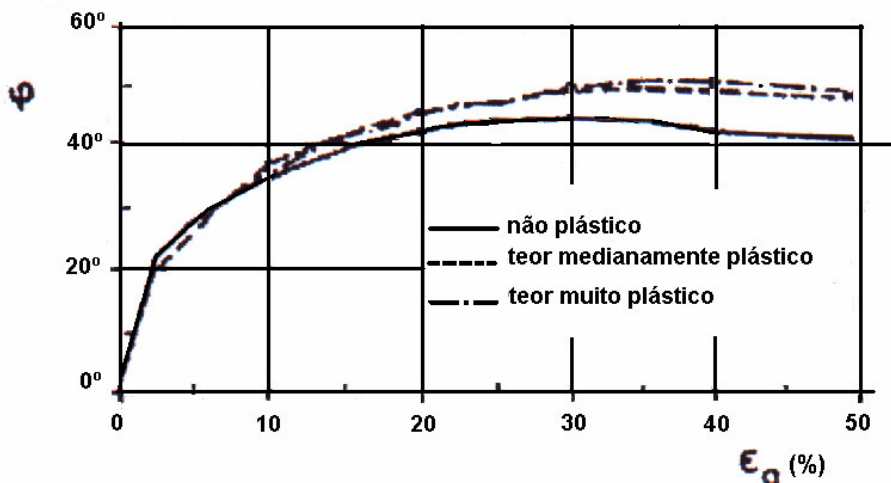
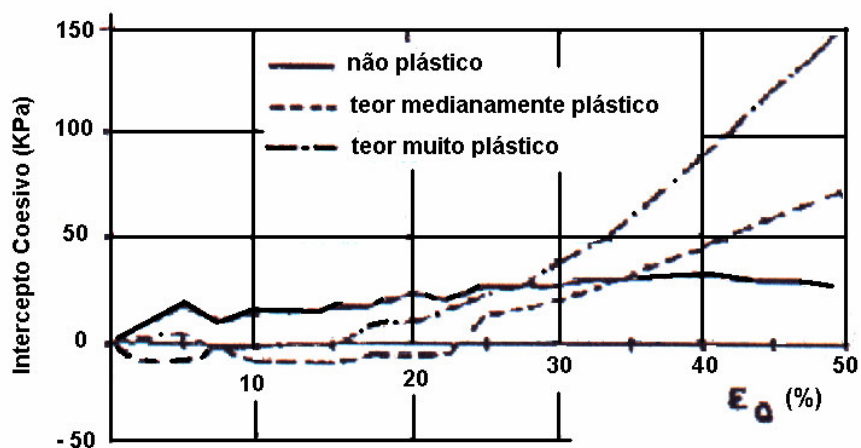


Fig. 2.27 - Curvas ângulo de atrito x deformação para diferentes teores de fibra (Kockel & Jessberger, 1995)



**Fig. 2.28 - Curvas coesão x deformação para diferentes teores de fibras (Kockel & Jessberger, 1995)**

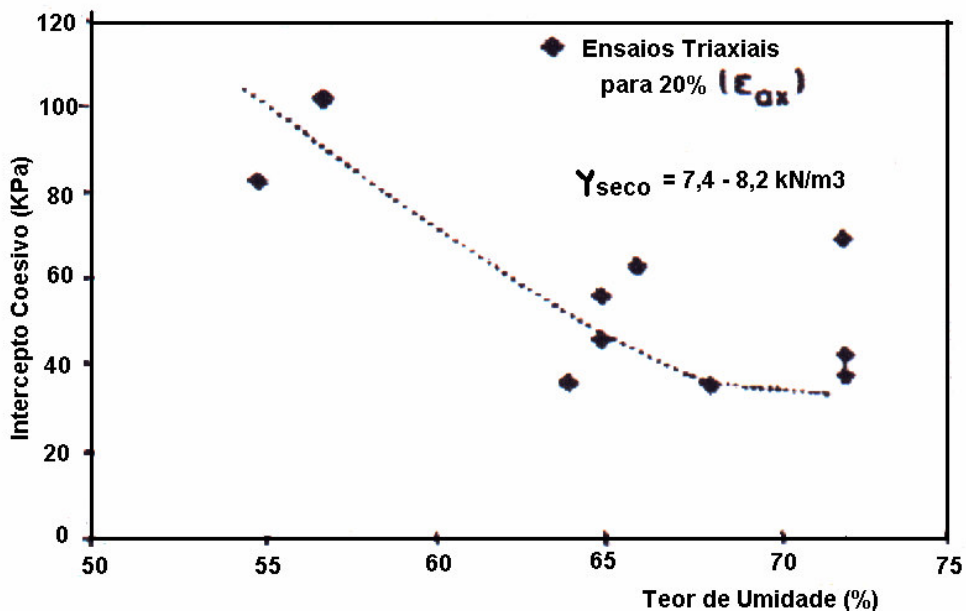
Ainda sobre o assunto, Kavazanjan et al. (1999) realizou ensaios de cisalhamento direto com amostras de grande diâmetro (457 mm) remoldadas em laboratório, com a finalidade de verificar a influência na resistência ao cisalhamento do % de solo e materiais com “comportamento de solo” presentes na composição do lixo. De acordo com o concluído, a variação do % destes materiais influencia apenas nos valores do ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ), permanecendo constante o valor da coesão ( $c'$ ).

No Brasil estudos desenvolvidos por Kaimoto & Cepollina (1997), considerando-se retroanálises efetuadas em deslizamento ocorrido no sub-aterro AS-1 do Aterro Sanitário Bandeirantes em 1991, mediante condições de elevadas pressões neutras nas células superficiais, resultaram na obtenção dos seguintes parâmetros de resistência: coesão ( $c'$ ) = 13,5 kPa e ângulo de atrito ( $\phi'$ ) = 22°. O mesmo estudo, tendo como base um histórico dos valores das pressões internas medidas de acordo com um plano de monitoramento instalado, conduziu aos resultados constantes da Tabela 2.12 a seguir:

**Tabela 2.12: Parâmetros de cisalhamento para o lixo (Kaimoto & Cepollina, 1997)**

Discriminação	$\phi'$ ( $^{\circ}$ )	$c'$ (kPa)
Lixos antigos e drenagem insatisfatória	22 $^{\circ}$	13,5
Lixos com disposição superior a 2 anos, associados a uma drenagem interna mais intensa	22 $^{\circ}$	16
Lixos recentes com disposição inferior a 2 anos, submetidos a uma intensa drenagem interna	28 $^{\circ}$	16

Um aspecto importante a considerar se refere à variação dos parâmetros de resistência em função do teor de umidade. Segundo Gabr & Valero (1995), conforme demonstrado na Fig. 2.29, para teores de umidade variando entre 55 e 70%, os valores da coesão podem sofrer reduções consideráveis passando de cerca de 100 kPa para 40 kPa.



**Fig. 2.29 - Curvas coesão x teor de umidade (Gabr et al., 1995)**

No que se refere ao comportamento das poro-pressões e como resultado dos dados obtidos em 5 anos de monitoramento efetuado no Aterro Sanitário Bandeirantes, Kaimoto & Cepollina (1997) chegaram às seguintes e importantes conclusões:

- As pressões de chorume nos maciços antigos indicam uma distribuição errática, com clara evidência de empoleiramento e bolsões;
- Nos maciços intensamente drenados defronta-se com uma distribuição de chorume mais homogênea e, invariavelmente menor;
- As pressões internas de gás, lidas diretamente através de manômetro acoplado à câmara específica dos piezômetros em sifão tem resultados variáveis e às vezes elevados da ordem de até 100 a 170 kPa, muitas vezes superior aos níveis de pressão do chorume no mesmo ponto, contrapondo-se a valores bibliográficos.

#### **2.3.4.2 - Compressibilidade**

A compressibilidade dos aterros de resíduos sólidos urbanos está relacionada, basicamente, ao carregamento imposto e às transformações bioquímicas de seus materiais constituintes. Os mecanismos envolvidos nos recalques que são muito complexos devido à heterogeneidade dos resíduos, a deformabilidade de suas partículas e a presença de grandes vazios, tem sido discutidos por Sowers (1973), Huitric (1981), Gilbert & Murphy (1987), Manassero et al. (1996), Van Impe (1998). De acordo com o proposto por Manassero et al. (1996) estes mecanismos podem ser assim sumarizados:

- compressão física devido à quebra e reorientação dos elementos sólidos;
- recalques de desagregação devido à migração de pequenas partículas para os vazios das partículas maiores;

- comportamento viscoso e fenômeno de consolidação envolvendo o esqueleto sólido e partículas simples ou componentes;
- recalques de decomposição devido a biodegradação dos componentes orgânicos;
- colapso dos componentes devido às alterações físico-químicas como a corrosão, oxidação e degradação dos componentes inorgânicos.

Deve ser acrescentado aos itens acima, conforme citado por Carvalho (1999), a deformação devida à dissipação das pressões neutras de líquidos e gases.

De acordo com Huitric (1981) seriam 3 os mecanismos de recalque:

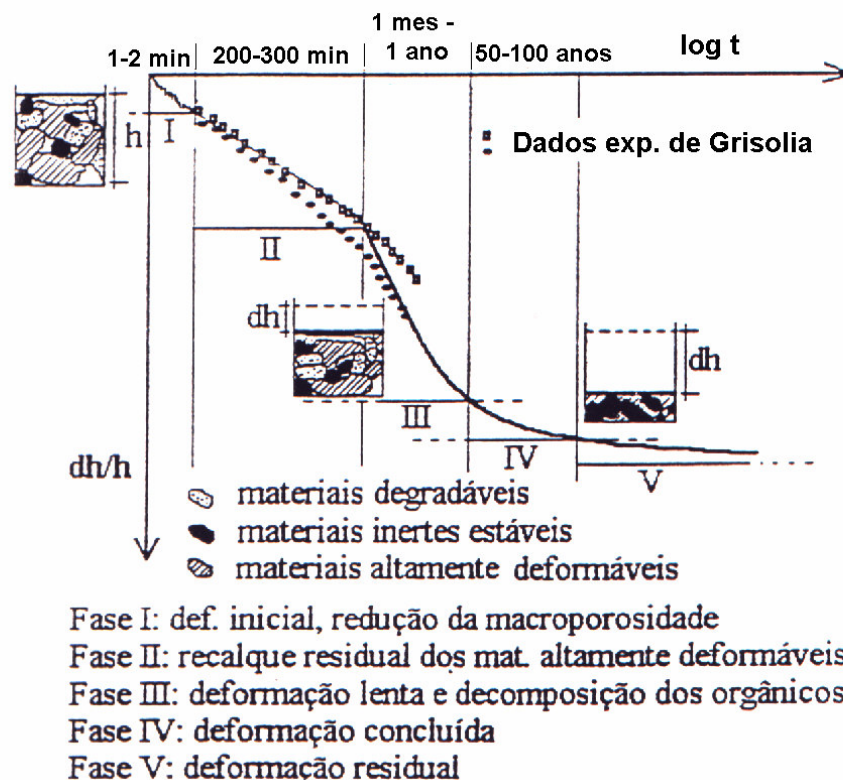
- consolidação ou adensamento: correspondente à mudança da tensão efetiva, com a dissipação das pressões neutras;
- compactação: devido a reorientação dos sólidos em uma configuração mais densa devido à perda gradual da rigidez (creep), em consequência da sobrecarga aplicada ou da decomposição;
- contração (shrinkage): devido à decomposição gradual dos sólidos orgânicos e úmidos e sua conversão em metano e dióxido de carbono, resultando em uma redução correspondente no volume do aterro.

De uma maneira geral, independentemente dos mecanismos anteriormente referidos, os recalques de aterros de resíduos sólidos urbanos ao longo do tempo, à semelhança dos solos, podem ser dividido em 3 fases (Wall & Zeiss, 1995):

- Compressão inicial: este tipo de recalque é análogo à compressão elástica nos solos, ocorrendo de forma instantânea quando da aplicação do carregamento, associado à redução do tamanho das partículas e do vazio entre as mesmas;
- Compressão primária: este tipo de recalque ocorre em um prazo de cerca de 30 dias da aplicação da carga (Sowers, 1973) e é devido à dissipação de poro-pressões e gás dos vazios.

- Compressão secundária: este tipo de recalque (“creep”) que é o responsável pela maior parcela do recalque total dos aterros de resíduos sólidos urbanos, com uma duração que pode atingir algumas décadas, corresponde a deformação lenta e a biodegradação dos componentes do aterro.

Estas fases podem ser sub-divididas, perfazendo um total de 5 fases (Grisolia & Napoleoni, 1996), conforme apresentado na Figura 2.30, apud Abreu (1999).



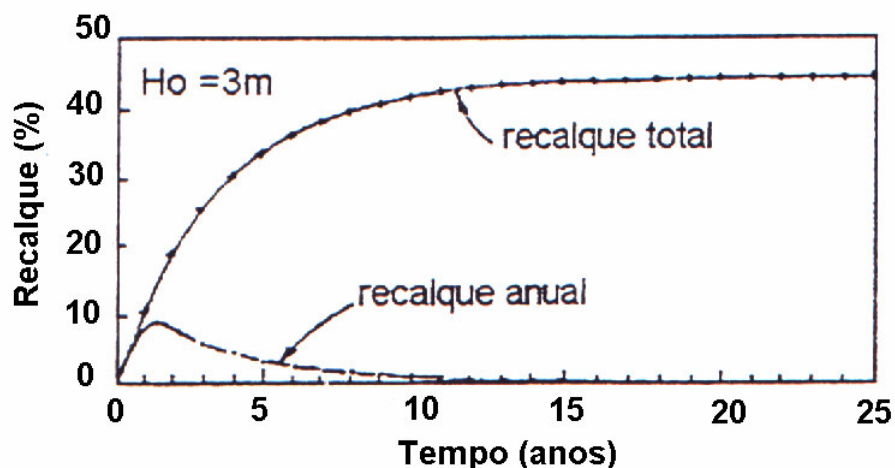
**Fig. 2.30 - Fases de compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos (Grisolia & Napoleoni, 1996)**

A divisão do desenvolvimento dos recalques em fases, de acordo com Abreu (1999), é bastante questionável uma vez que, certamente, estas fases não são independentes e, portanto, não ocorrem dissociadas no tempo. Assim, haveria uma sobreposição entre elas que, no estágio atual do conhecimento é desconhecida.

De acordo com Edil et al. (1990) são muitos os fatores que afetam a magnitude dos recalques, sendo que os mesmos se influenciam entre si, podendo ser destacados:

- peso específico e índice de vazios iniciais do resíduo sólido;
- volume de material decomposto (orgânico) do resíduo sólido;
- altura do aterro e sobrecargas adicionais;
- história de tensões durante a operação e após o fechamento do aterro;
- nível e flutuação do chorume;
- fatores ambientais como teor de umidade, temperatura e gases presentes ou gerados no interior do aterro.

De uma forma geral, o valor do recalque atinge no máximo 40% da espessura total inicial do aterro (Sowers,1973; Van Meerten et al.,1995 e Coumoulos & Koryalos, 1998), normalmente, com maior velocidade nos 2 primeiros anos, tendendo a diminuir no decorrer do tempo, conforme mostrado na Figura 2.31 (Gandolla et al., 1994).



**Fig. 2.31: Recalque total e anual de aterro de resíduo sólido urbano (Gandolla et al., 1994)**

De acordo com o sugerido por Sowers (1973) os recalques dos aterros de resíduos sólidos urbanos são semelhantes aos da turfa, no qual após um rápido e

imediate recalque, ocorre um recalque adicional acompanhado por pequeno ou nenhum desenvolvimento de excesso de poro pressão. Ao contrário dos depósitos de turfa, todavia, a compressão secundária do lixo inclui um significativo componente de decomposição biológica. Esta compressão secundária, por outro lado, depende da quantidade de água no interior do aterro, necessária a facilitar a decomposição do lixo. Este comportamento é confirmado por Carvalho (1999) a partir de ensaios de compressão confinada para o resíduo sólido urbano do aterro sanitário Bandeirantes.



## **CAPÍTULO 3 - SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS CURTAS ALEATÓRIAS (FIBROSSOLOS)**

### **3.1 - Introdução**

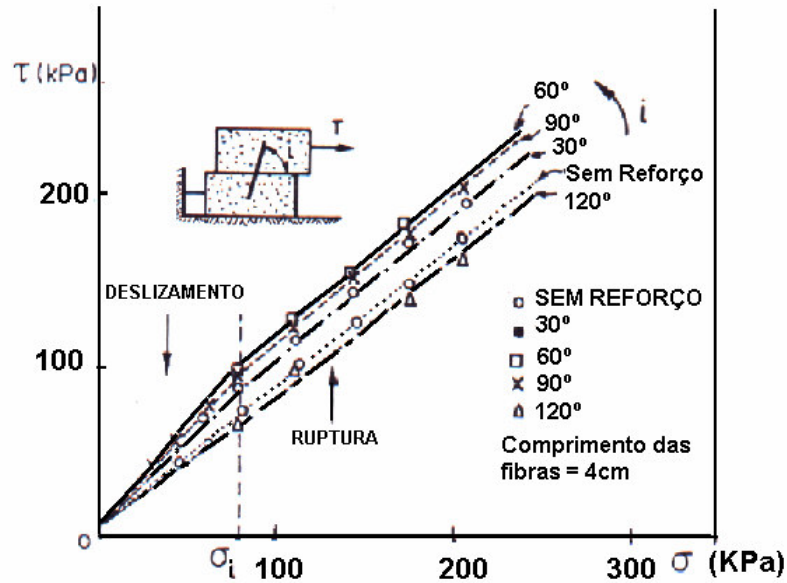
A utilização de inclusões aleatórias de fibras curtas misturadas ao solo antes da compactação é uma técnica recente, cujas pesquisas têm demonstrado que, a exemplo do que ocorre no lixo, o material resultante, normalmente denominado fibrossolo, apresenta um ganho considerável na resistência ao cisalhamento, com a incorporação de uma pseudo-coesão devido à resistência à tração das fibras. Este tipo de reforço já vem sendo utilizado comercialmente, obtendo-se como resultado final taludes sub-verticais, conforme exemplificado na Foto 3.1, onde foi aplicado um processo denominado “Texsol” (Texsol – 2002, ISSMFE-TC-17), desenvolvido por Phillip L. et al. (1995). Este processo consiste em uma mistura direta de solo granular com filamentos contínuos de poliéster, mediante jateamento hidráulico ou pneumático, em proporções adequadas (0,1% a 0,2% em peso de filamentos por cm<sup>3</sup> de material reforçado).



**Foto 3.1 - Talude de solo reforçado – Sistema Texsol (Texsol, 2002)**

### 3.2 - Comportamento mecânico e mecanismos de ruptura

A interação entre as duas componentes dos solos reforçados com fibras (fibrossolos) de uma maneira geral proporciona uma melhoria significativa das características mecânicas da estrutura global. O seu comportamento mecânico caracteriza-se pelos mecanismos de ruptura por perda de aderência solo-reforço (baixas tensões de confinamento) ou por ruptura do próprio reforço ou do solo (elevadas tensões de confinamento). Estes mecanismos, conforme referido por Gomes (1993), podem ser ilustrados por resultados de ensaios de cisalhamento direto (Gray & Ohashi, 1983), executados com amostras de areia reforçada com fibras a diferentes orientações (Figura 3.1). As envoltórias de resistência apresentam uma forma curvilínea ou bilinear, caracterizadas por dois trechos distintos e inerentes aos mecanismos mencionados. Para tensões confinantes ( $\sigma$ ) inferiores a tensão crítica ( $\sigma_i$ ), isto é, aquela correspondente à mudança de inclinação da envoltória de resistência, a ruptura ocorre por deslizamento das inclusões e a ação do reforço é traduzida por um aumento do ângulo de atrito do solo. Para tensões confinantes superiores a tensão crítica ( $\sigma > \sigma_i$ ), as fibras encontram-se mais fortemente presas à massa do solo, induzindo ao mesmo uma pseudo-coesão, sem qualquer variação do ângulo de atrito ( $\phi$ ). Nestas condições a ruptura poderá ocorrer, no caso de fibras extensíveis, no próprio solo ou, no caso de fibras inextensíveis, nos elementos de reforço (Fatani et al., 1991).



**Fig. 3.1 - Mecanismos de ruptura em solos reforçados com fibras (fibrossolos) a diferentes orientações (Gray & Ohashi, 1983)**

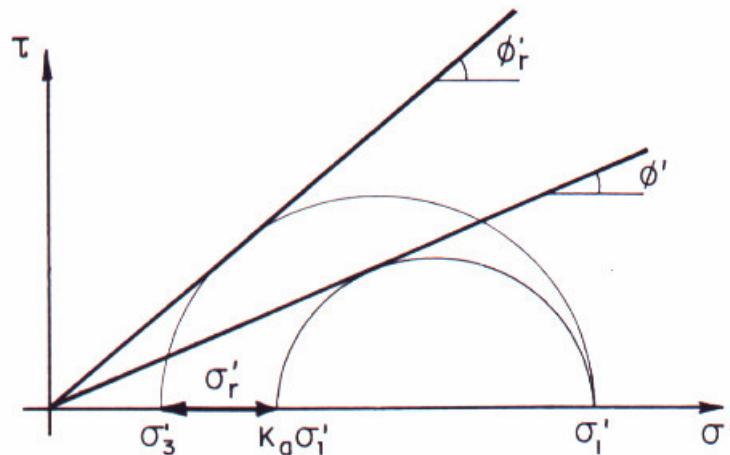
Cada um dos 2 trechos referidos da envoltória de resistência podem ser explicados pelos modelos, originariamente aplicados para as estruturas de terra armada, a seguir apresentados:

a) Baixas tensões de confinamento (tensões inferiores à tensão crítica).

Neste caso em que a ruptura ocorre por deslizamento das inclusões e a ação do reforço é traduzida por um aumento do ângulo de atrito do solo, o modelo proposto por Hausmann (1976), referido por Mitchell & Villet (1987), preconiza que o reforço atua no sentido de resistir às deformações do solo na direção das inclusões. Este comportamento anisotrópico é interpretado como uma tensão intrínseca ( $\sigma'_r$ ), estaticamente equivalente ao atrito de interface e proporcional às tensões verticais (fator de proporcionalidade F), totalmente mobilizada quando o solo atinge um estado de equilíbrio plástico, definido por  $\sigma'_3 = K_a \sigma'_1$ . Nestas condições, a envoltória de resistência é definida pela seguinte relação (Fig. 3.2):

$$\sigma'_3 + \sigma'_r = K_a \sigma'_1$$

onde:  $\sigma'_r = F \cdot \sigma'_1$  e  $\tan \phi'_r = \frac{1 + F - K_a}{1 - F + K_a}$  .....(3.1)



**Fig. 3.2 - Modelo de comportamento para baixas tensões de confinamento (Hausmann - 1976, referido por Mitchell & Villet 1987)**

b) Altas tensões de confinamento (tensões superiores à tensão crítica).

Neste caso em que a ruptura é condicionada pela resistência à tração ( $R_T$ ) dos elementos de reforço o comportamento mecânico pode ser analisado segundo 2 modelos equivalentes a seguir apresentados:

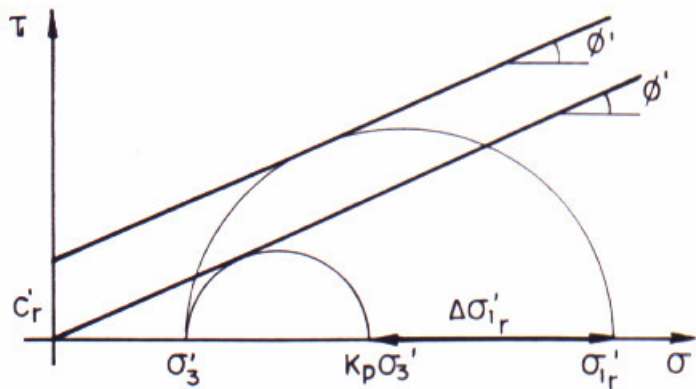
b.1) Modelo de Schlosser & Long (1972)

Neste modelo, o material reforçado com ângulo de atrito igual ao solo não reforçado, tenderia a apresentar um comportamento típico de material coesivo, incorporando uma pseudo-coesão de valor proporcional à resistência à tração do reforço. Sendo  $\Delta\sigma'_{1r}$  o acréscimo da tensão principal maior na ruptura da amostra reforçada, o círculo das tensões ultrapassa a envoltória de resistência e esta impropriedade física é corrigida pela introdução da coesão  $c'_r$  induzida pelo reforço (Fig. 3.3), tal que:

$$\sigma'_{1r} = K_p \sigma'_3 + \Delta\sigma'_{1r}$$

$$\text{sendo } c'_r = R_T \sqrt{K_p} / 2 S_v \dots\dots\dots(3.2)$$

onde  $S_v$  é o espaçamento vertical entre as lâminas de reforço (terra armada) ou um parâmetro equivalente ao teor de fibras.



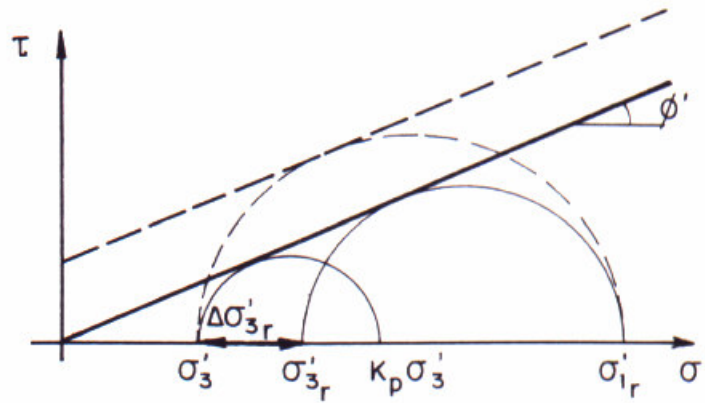
**Fig. 3.3 - Modelo de comportamento para altas tensões de confinamento (Schlosser & Long, 1972)**

b.2) Modelo de Yang (1972).

Este modelo referendado em Mitchell & Villet (1987), preconiza que o ganho de resistência propiciado pelo reforço decorre do aumento das tensões confinantes nas zonas de interface. Assim o acréscimo de  $\sigma'_1$  na ruptura de amostras reforçadas resulta de um aumento  $\Delta\sigma'_{3r}$  das tensões confinantes (Fig. 3.4), de tal forma que:

$$\sigma'_{1r} = K_p \sigma'_3 + K_p \Delta\sigma'_{3r}$$

$$\text{sendo } \Delta\sigma'_{3r} = R_T / S_v \dots\dots\dots(3.3)$$



**Fig. 3.4 - Modelo de comportamento para altas tensões de confinamento (Yang - 1972, referendado por Mitchell & Villet, 1987)**

### 3.3 - Fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento

Morel & Gourc (1997) concluem que a inclusão de fibras no solo proporciona uma melhoria nas características de resistência e ductibilidade do material, sendo o comportamento do material governado, basicamente, pelo teor e pelas propriedades mecânicas e geométricas das fibras. O efeito do comprimento das fibras tem sido estudado por vários autores, como por exemplo Maher & Gray (1990) e Ranjan et al. (1994), com conclusões semelhantes. De acordo com os autores em referência, para solos arenosos onde ocorre uma transferência de carga do solo para a fibra pelo atrito de interface, aumentando-se o comprimento da fibra ou o índice aspecto (relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra), obtém-se uma maior resistência de atrito entre o solo e a fibra, como consequência do aumento da área superficial desta. O efeito do teor das fibras foi estudado por Freitag (1986), Nataraj (1996) e Maher & Ho (1994), conforme citação de Teodoro & Bueno (1998), com base em resultados de ensaios de cisalhamento direto, compressão simples e triaxial. De acordo com tais estudos os solos ensaiados mostraram, com o aumento do teor de fibras, uma maior resistência de pico e menor perda de resistência pós – pico (maior ductilidade). Estudos desenvolvidos por Teodoro & Bueno (1998) confirmam a influência do comprimento e do teor de fibras citadas anteriormente e, também, mostram a influência marcante

exercida pelo tipo de solo considerado. Assim, a partir de ensaios triaxiais de solos arenosos e argilosos com a inclusão de fibras curtas de polipropileno, os autores citados puderam concluir:

(a) Para os solos argilosos a inclusão das fibras pouco influenciou o comportamento das curvas tensão x deformação, observando-se pequenos acréscimos das resistências de pico e dos próprios parâmetros de resistência, principalmente a coesão ( $c'$ );

(b) Para os solos arenosos verifica-se, de uma maneira geral, um aumento da resistência ao cisalhamento e uma redução na queda de resistência pós – pico. Estes ganhos de resistência cresceram à medida que se aumenta o teor e comprimento das fibras (Fig.3.5), sendo que para as fibras com maiores comprimentos (30 mm) as curvas indicam um aumento crescente de tensão com o aumento da deformação, não ficando caracterizado, deste modo, um tensão de pico.

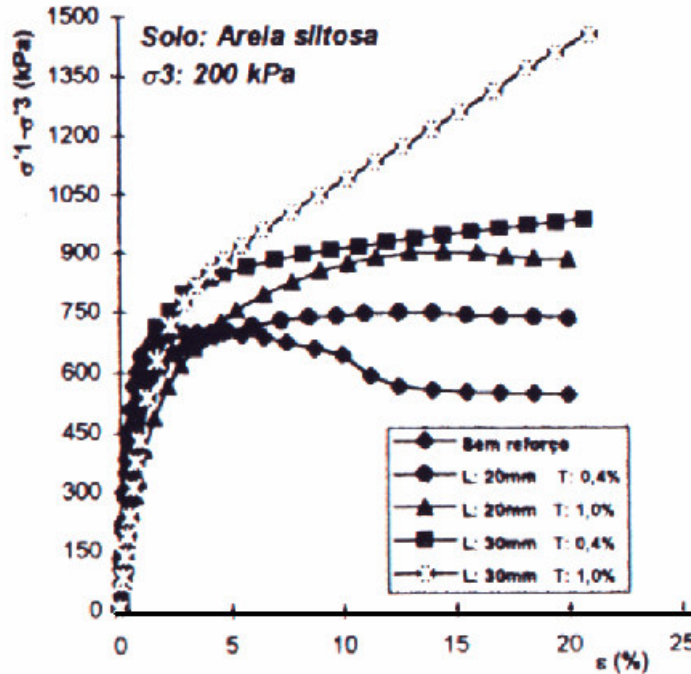


Fig. 3.5: Comportamento tensão – deformação de areia siltosa reforçada com fibras (Teodoro & Bueno, 1999)

As envoltórias de resistência, por sua vez, com o acréscimo do teor e o aumento do comprimento das fibras tendem à bilinearidade (Fig. 3.6), observando-se, conforme apresentado na Tabela 3.1, um aumento considerável nos valores da coesão e uma constância nos valores dos ângulos de atrito interno em relação ao solo sem reforço, a partir da provável tensão confinante crítica ( $\sigma'_{3crit}$ ).

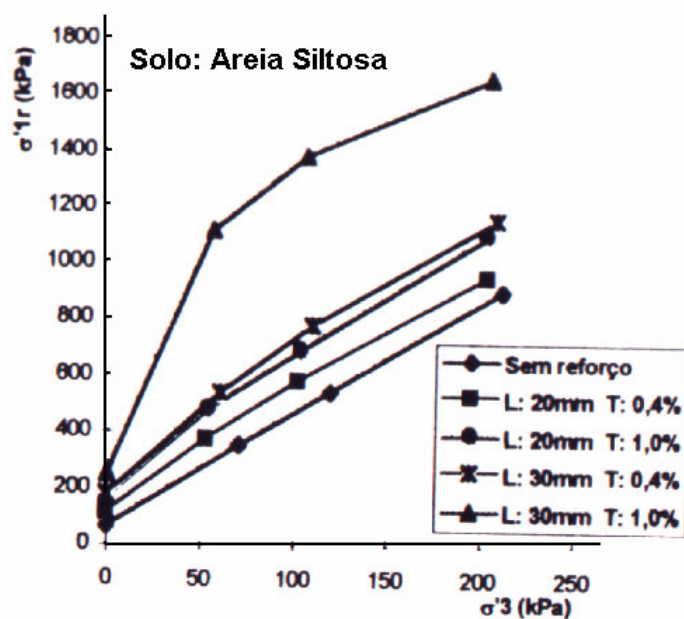


Fig. 3.6: Efeito das fibras na tensão confinante – areia siltosa (Teodoro & Bueno, 1999)

Tabela 3.1 - Parâmetros de resistência da areia siltosa reforçada com fibras e sem reforço (Teodoro & Bueno, 1999)

Amostra	Antes $\sigma'_{3crit}$		Depois $\sigma'_{3crit}$	
	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
Sem reforço	22,6	37,8	-	-
L:20mm T:0,4%	26,6	41,2	38	37,6
L:20mm T:1,0%	27,6	43,6	110,2	36
L:30mm T:0,4%	28,5	45,5	123,6	36
L:30mm T:1,0%	40,4	60,3	188,6	37,3



Em um solo reforçado as tensões mobilizadas na interface solo-reforço são função da orientação relativa e da rigidez do elemento de reforço. No que se refere a orientação dos elementos de reforço em relação ao plano de cisalhamento, de acordo com estudos de Jewell & Wroth (1987), citados por Gomes (1993) e apresentados na Figura 3.7, a resultante das forças de interação mobilizada no reforço ( $P_r$ ), através de suas componentes normal e tangencial, é responsável por um acréscimo da resistência ao cisalhamento através de 2 mecanismos distintos:

(a) Redução das tensões de cisalhamento mobilizadas ao longo do plano de cisalhamento, devido à componente tangencial:

$$\tau = \tau_{yx} - (P_r/A_s)\text{sen}\theta \dots\dots\dots(3.4)$$

onde:  $\tau$  - tensão de cisalhamento mobilizada no solo reforçado;

$\tau_{yx}$  - tensão de cisalhamento mobilizada no solo não reforçado;

$P_r$  - resultante das forças de interação mobilizada no reforço;

$A_s$  - área da seção transversal da amostra.

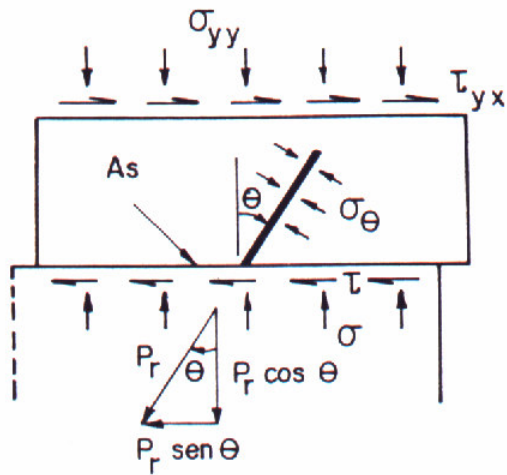
$\theta$  - ângulo entre o elemento de reforço e a normal ao plano de cisalhamento.

(b) Aumento das tensões normais atuantes no plano de cisalhamento, devido à componente normal:

$$\sigma = \sigma_{yy} + P_r/A_s \text{cos}\theta \dots\dots\dots(3.5)$$

onde:  $\sigma$  - tensão normal no solo reforçado

$\sigma_{yy}$  - tensão normal no solo não reforçado.

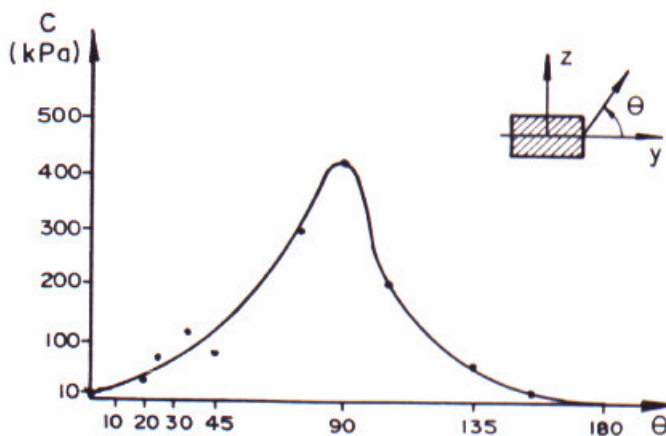


**Fig. 3.7 - Forças atuantes na interface solo-reforço (Jewell & Wroth, 1987, apud Gomes, 1993)**

Deste modo, o acréscimo de resistência ao cisalhamento ( $\Delta\tau$ ) devido ao efeito do reforço pode ser assim expresso:

$$\Delta\tau = P_r/A_s (\cos\theta \cdot \text{tg}\phi + \text{sen}\theta) \dots\dots\dots(3.6)$$

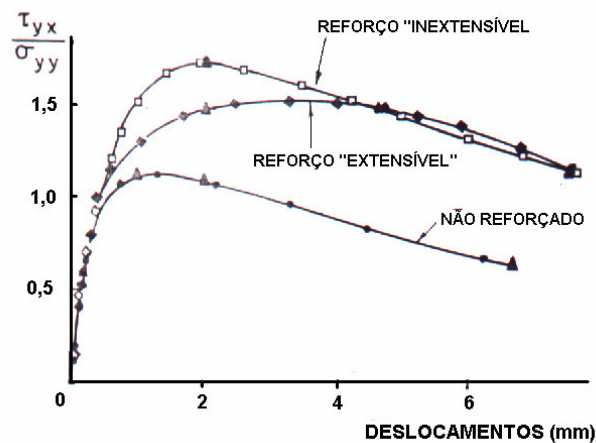
De acordo com Gigan et al. (1989), no caso de inclusões múltiplas, a orientação das mesmas em relação ao plano de cisalhamento condiciona primariamente a magnitude da componente de coesão induzida ao material reforçado (Fig. 3.8).



**Fig. 3.8 - Influência da orientação dos elementos de reforço (Gigan et al., 1989) (apud Gomes, 1993)**

No que se refere a rigidez dos elementos de reforço, estudos desenvolvidos por Jewell & Wroth (1987), citados por Gomes (1993) e apresentados na Fig. 3.9, mostram que a ação do reforço se manifesta a partir de um determinado valor de deslocamento que, por sua vez, é função da rigidez deste reforço. Para os reforços mais extensíveis, cuja tendência é que se deformem com o solo, os valores dos deslocamentos necessários a mobilização das tensões de cisalhamento seriam, por conseguinte, maiores.

Em contrapartida, os reforços inextensíveis ou com maior rigidez conduziriam a maiores valores de resistência ao cisalhamento.



**Fig. 3.9 - Influência da rigidez das inclusões em solos reforçados (Jewell & Wroth, 1987, apud Gomes, 1993)**

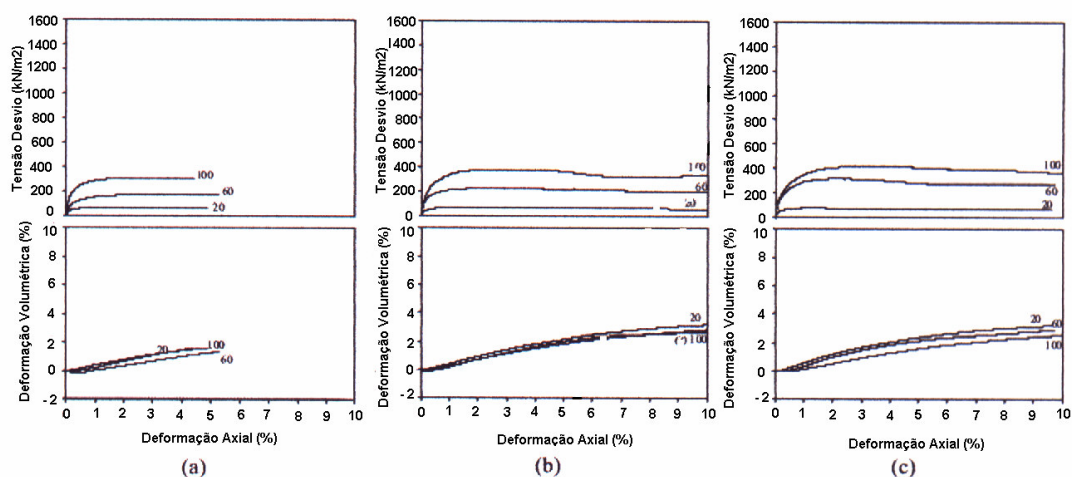
Estudos desenvolvidos por Mahler & de Lamare Neto (2003) a partir de ensaios de cisalhamento direto em equipamento de grande porte com amostras de areia misturada a tiras de plástico, obtidas de sacos de supermercados (rigidez desprezível), em diferentes percentuais (0, 0,05 e 0,15%), conduziram as seguintes conclusões:

(a) O teor de plástico (fibras) presente na mistura areia + plástico tem pouca influência nos valores do ângulo de atrito interno.

(b) Para o intercepto coesivo ( $c'_f$ ), todavia, verificou-se um aumento razoável nos valores quando o % de fibras é aumentado, o que vem comprovar que o mesmo é função exclusiva do teor de fibras presentes no material.

(c) Todos os materiais ensaiados, para cada tensão normal considerada, apresentaram comportamentos muito semelhantes para valores de deslocamentos horizontais de até cerca de 6 mm (ou 1,5% de deformação horizontal). A partir deste valor, que corresponde aproximadamente ao início da mobilização das fibras, verificou-se um aumento de resistência que acompanhou o aumento do % de fibras das amostras.

É importante ressaltar, todavia, que nem sempre a inclusão de fibras aos solos proporciona este efeito de pseudo-coesão até aqui referido, conforme é demonstrado em pesquisas recentes desenvolvidas por Consoli et al. (2000). Estas pesquisas consistiram, basicamente, em avaliar os efeitos da inclusão de fibras de polietileno tereftalato (PET), distribuídas aleatoriamente, nas propriedades mecânicas de um solo arenoso artificialmente cimentado e não cimentado. Estas fibras foram obtidas de monofilamentos com diâmetros variando de 0,18 a 0,20 mm, cortados nos comprimentos desejados (12 e 36 mm). Os resultados apresentados na Fig. 3.10 e na Tabela 3.2 se restringirão aos ensaios de compressão triaxial drenada para as amostras não cimentadas com e sem o reforço das fibras PET, uma vez que os ensaios com as amostras cimentadas fogem do objeto do presente trabalho.



**Fig. 3.10 - Curvas tensão-deformação-variação volumétrica das matrizes não cimentadas (a) sem reforço; (b) reforçada com fibras de 12 mm; (c) reforçada com fibras de 36 mm (Consoli et al., 2000)**

**Tabela 3.2 - Resultados dos ensaios de compressão triaxial (Consoli et al., 2000)**

Mat.	Tensão confin. (kPa)	Tensão desvio máx. (kPa)	Tensão desvio última (kPa)	Ângulo de atrito (°)		Intercep. coesivo (KPa)	
				$\phi'$	$\phi'_{ult}$	$c'$	$c'_{ult}$
Areia	20	72	63	37	36	0	0
	60	174	168				
	100	311	299				
Areia c/fibras (12mm)	20	72	57	40	37	0	0
	60	228	198				
	100	383	319				
Areia c/fibras (36mm)	20	73	62	43	40	0	0
	60	319	270				
	100	420	366				

Da análise dos resultados obtidos pode-se afirmar que as fibras PET ao serem adicionadas a uma matriz não cimentada aumentam a resistência triaxial de ruptura do compósito, sendo que quanto maior o comprimento das fibras mais pronunciado é este efeito. Este incremento deve-se na sua totalidade ao aumento da resistência friccional (aumento do ângulo de atrito de pico), não se verificando qualquer alteração nos valores do intercepto coesivo.

## CAPÍTULO 4 - RESÍDUOS DO PRÉ-TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO DO LIXO

### 4.1 - Introdução

Na Alemanha, após o ano de 2005, não mais será possível o depósito dos resíduos sólidos urbanos (lixo) em aterros sem a garantia que os mesmos estejam inertes. Esta será, indiscutivelmente, uma tendência mundial, fazendo com que processos de pré-tratamentos térmicos ou mecânico-biológicos cada vez mais sejam desenvolvidos e aplicados para esta transformação do lixo. Exemplo de um destes processos existe no Brasil desde 1999, quando foi iniciado um projeto piloto, coordenado pela COPPE – UFRJ, visando a pesquisa de um pré-tratamento mecânico-biológico do lixo, denominado AMBRA (Costa, 2001 e Mahler, 2002).

O pré-tratamento mecânico-biológico do lixo proporciona uma série de benefícios que, de acordo com Gomes (1996), baseado em trabalho de Heerenklage & Stegmann (1995), podem ser assim resumidos:

- Redução do volume do aterro pela separação e reciclagem dos componentes e degradação da matéria orgânica (Fig. 4.1).

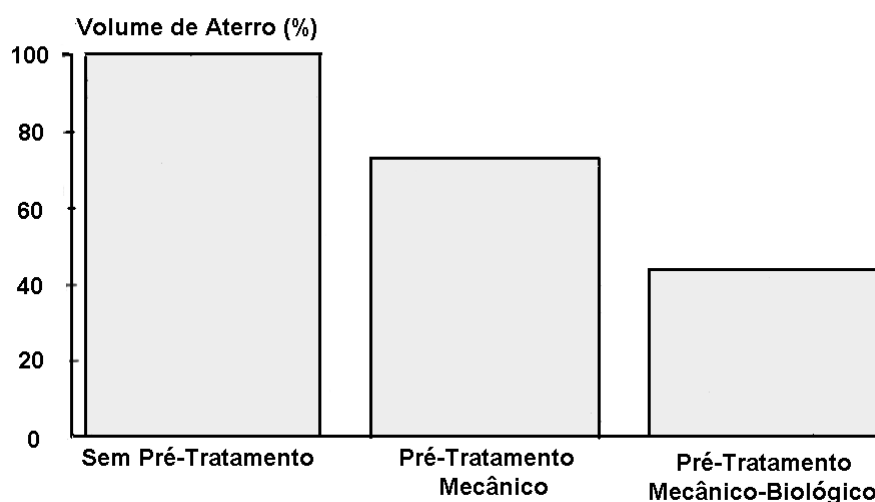


Fig. 4.1 - Redução do volume do aterro após pré-tratamento mecânico-biológico do lixo (Gomes, 1996)

- Redução do potencial de emissão de chorume e gás do aterro pela inertização biológica;
- Remoção dos contaminantes do resíduo do lixo pela separação dos componentes;
- Melhoria da operação do aterro pela redução da emissão de poeira e odor;
- Menores custos de compactação pela melhoria das características de compactação do resíduo;
- Menores recalques, antecipando a colocação da camada final de cobertura do aterro.

Deste modo, tendo em vista a perspectiva, cada vez maior, de sua utilização em maior escala, torna-se importante no Brasil o estudo das diversas características do resíduo após o pré-tratamento, seja para a sua disposição final em depósitos de forma segura ou para a utilização adequada como matéria prima em materiais da construção civil. Deve ser ressaltado que este assunto ainda é muito pouco estudado, existindo poucas referências mesmo na literatura internacional.

## **4.2- Processos de Pré-tratamento mecânico-biológico**

### **4.2.1 - Princípios Básicos**

O pré-tratamento mecânico-biológico dos resíduos sólidos urbanos (lixo) consta de uma combinação de processos mecânicos e biológicos.

O processo mecânico tem a finalidade de preparar o resíduo para o processo biológico, constando, basicamente, da separação dos materiais que possam interferir no tratamento como metais, vidros, pedras, plásticos e baterias. Para isso utilizam-se processos tais como a homogeneização, a moagem, a aglomeração, a classificação, a separação e o peneiramento de modo a otimizar a degradação dos resíduos remanescentes através do aumento da superfície de contato.

O processo biológico estabiliza o lixo bruto através da degradação da matéria orgânica existente. O grau de degradação da fração orgânica dependerá da

composição do resíduo, do método de tratamento aplicado e da duração do tratamento.

Assim, uma vez concluído o processo mecânico com a minimização e homogeneização do lixo, este é disposto em pilhas que podem permanecer estáticas ou revolvidas, com o auxílio de máquinas específicas, a cada período de tempo. O tratamento pode ser efetuado da forma aeróbica e anaeróbica.

Na forma aeróbica a matéria orgânica é degradada pela liberação de calor que a transforma em  $\text{CO}_2$ , água e biomassa. A ventilação utilizada pode ser apenas a natural ou obtida com a ajuda de dispositivos aplicados na confecção das pilhas, em um processo semelhante a uma chaminé, no qual há uma troca de energia entre a massa de resíduos e o meio ambiente. Durante o processo de degradação a produção de microorganismos é acelerada pela presença de oxigênio em abundância, provocando uma elevação de temperatura. A busca de equilíbrio com o meio interno provoca o fluxo praticamente espontâneo de ar através da própria leira que deve ser mantida com uma umidade específica, por meio de uma irrigação descontínua, com o controle da umidade feito com medições periódicas.

Na forma anaeróbica ocorre a exclusão do oxigênio e os resíduos orgânicos podem ser convertidos em biogás e resíduos de digestão. Este processo que ocorre em um ambiente fechado exige um monitoramento dos gases produzidos (predominantemente o  $\text{CH}_4$ ).

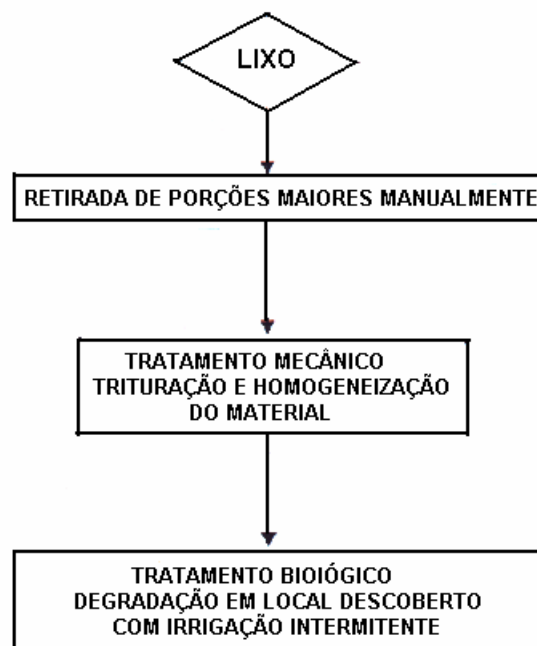
Dentre os diversos processos utilizados na Europa, principalmente na Alemanha, Áustria e Suíça pode-se destacar os Sistemas MBA-KIRCHDORF, MBA-VAGRON, MBA-BASSUM, MBA-LINKENBACH e MBA-FABER AMBRA RECYCLING. Este último processo, objeto de estudos recentes (Cantuária Costa, 2001), será melhor detalhado nos itens a seguir, sendo o seu produto final ensaiado quanto à resistência ao cisalhamento, a ser visto no Capítulo 5.



#### 4.2.2 - Processo MBA-FABER AMBRA RECYCLING

Neste processo primeiramente é efetuada a separação de materiais de grande porte, seguindo-se o tratamento mecânico através da trituração e homogeneização do material. Após esta etapa o material é disposto em leiras ao ar livre para o início do tratamento biológico.

As leiras são dispostas sobre uma estrutura de madeira acima do nível do solo, permitindo a entrada de ar pela parte de baixo da mesma, sendo a circulação do ar garantida por um sistema de tubos de condução furados. O controle da umidade é feito pela irrigação com água ou esgoto tratado da região. O esquema operacional deste sistema é apresentado na Fig. 4.2 abaixo.



**Fig. 4.2 - Esquema operacional do sistema MBA-Faber Ambra (Faber Ambra Recycling, 1999).**

Na Foto 4.1 é apresentada uma das leiras executada de acordo com o Projeto Piloto realizado nas dependências da Usina de Compostagem da COMLURB em Jacarepaguá – Rio de Janeiro.



**Foto 4.1 – Leira de resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo – Projeto Piloto na usina de Compostagem da COMLURB em Jacarepaguá – Rio de Janeiro.**

### **4.3 - Características Principais**

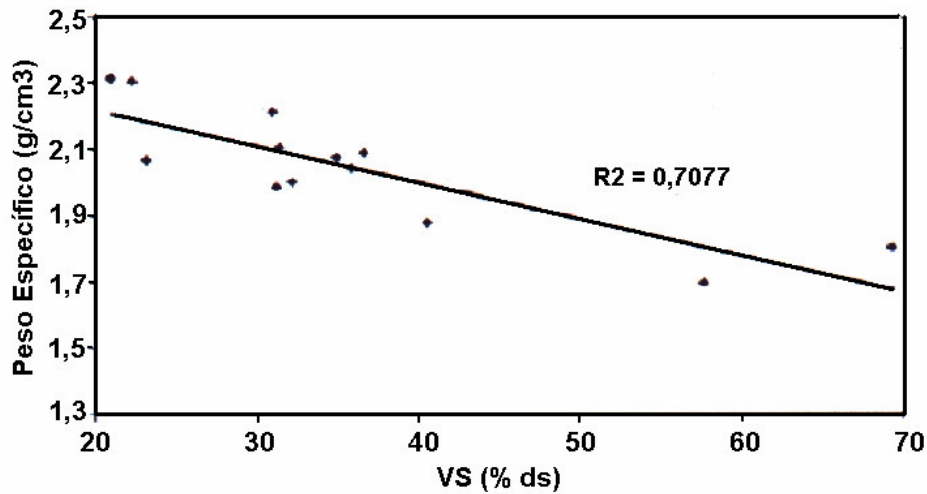
#### **4.3.1 - Características Físicas**

As principais características físicas dos resíduos do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo são influenciadas diretamente pela redução biológica da matéria orgânica que, por sua vez, é função do método e do período ou duração do pré-tratamento.

De acordo com Scheelhaase et al. (2001), esta redução biológica da matéria orgânica, faz com que haja um aumento do peso específico dos grãos e um decréscimo do percentual dos materiais voláteis dos resíduos tratados (Fig. 4.3). A

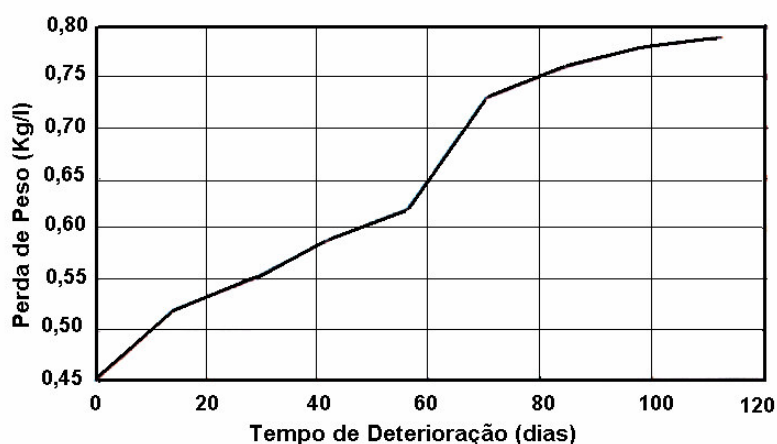
relação entre o peso específico dos grãos ( $\gamma$ ) e o percentual dos materiais voláteis (VS) pode ser representada pela seguinte expressão (Maile et al., 1998):

$$\gamma = VS/100 * 1,31 + (1 - VS/100) * 2,42 \text{ [g/cm}^3\text{]} \dots\dots\dots(4.1)$$



**Fig. 4.3 - Correlação entre o % de material volátil e o peso específico dos grãos (Scheelhaase et al., 2001).**

Estudos desenvolvidos por Bidlingmaier & Scheelhaase (1997) mostram que a eficiência do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo está relacionado a perda de peso por unidade de volume (kg/l) durante o período de duração do pré-tratamento. Conforme observado na Fig.4.4, esta perda de peso é mais acentuada nos primeiros 75 dias e praticamente se estabiliza após 110 dias, atingindo um valor de cerca de 0,78 kg/l.



**Fig.4.4 - Perda de peso por unidade de volume do lixo, durante o período de pré-tratamento mecânico-biológico ( Bidlingmaier & Scheetlhaase, 1997)**

Além do peso específico, diversos outros parâmetros variam gradativamente ao longo do tempo, conforme resultados obtidos (Tabela 4.1) em amostras de resíduo após 16 semanas e 36 semanas de pré-tratamento (Scheelhaase et al., 2001).

**Tabela 4.1 - Parâmetros de amostras do resíduo do pré-tratamento do lixo para diferentes idades (Scheelhaase et al., 2001)**

Parâmetro	Amostra c/ 16 semanas	Amostra c/ 36 semanas
Diâmetro max. dos grãos (mm)	100	60
Percentual de grãos finos (%)	13,2	39,1
Umidade (%)	36,0	37,0
Densidade dos grãos	2,10	2,30

De acordo com os resultados do quadro acima, pode-se observar que um maior tempo de pré-tratamento (amostras com 36 semanas) implica em uma melhor distribuição granulométrica (redução do diâmetro máximo dos grãos e aumento do % de grãos finos), além do aumento da densidade dos grãos; quanto ao teor de umidade os valores permanecem praticamente inalterados.

Além do tempo de pré-tratamento, outro aspecto que tem grande influência nos principais parâmetros do resíduo se refere ao diâmetro máximo das partículas obtido ao término do processo. Neste sentido, de acordo com ensaios de compactação Proctor realizados por Klümper (1998), pode-se concluir que o peso específico aparente seco máximo obtido é tanto maior quanto menor for o diâmetro máximo das partículas do resíduo, conforme demonstrado no Tabela 4.2 abaixo:

**Tabela 4.2 - Ensaio de Compactação Proctor (Klümper,1998)**

<b>Diâm. máximo das partículas (mm)</b>	<b>Peso específico máximo (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Umidade ótima (%)</b>
40	0,59	43
100	0,54	37

Esta mesma conclusão é confirmada por Heiss-Ziegler & Fehrer (2003), com base em resultados de ensaios de compactação Proctor fornecidos por Fehrer (2002) e apresentados na Tabela 4.3 a seguir:

**Tabela 4.3 - Ensaio de Compactação Proctor (Feher, 2002)**

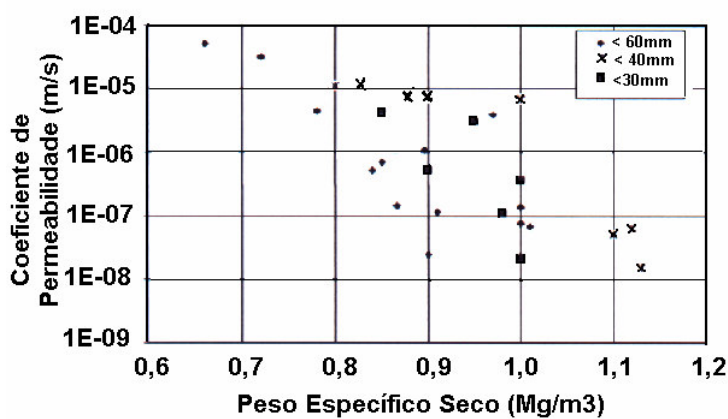
<b>Diâm. máximo das partículas (mm)</b>	<b>Peso específico máximo (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Umidade ótima (%)</b>
12	0,930	33,1
40	0,750	39,9
80	0,686	42,6

Assim sendo, como as partículas de maior diâmetro, em função de seu menor peso específico, ocupam os maiores volumes, é preconizado por Kuehle & Doedens (2003) que, na produção futura do resíduo do pré-tratamento mecânico – biológico no

lixo, deverá haver um peneiramento final de modo que a partícula máxima do resíduo seja inferior a 60 mm.

Quanto aos coeficientes de permeabilidade de acordo Kuehle & Doedens (2003), com base em estudos de Duellmann (2002), estes são extremamente dependentes da umidade e do peso específico do resíduo e, também, da sobrecarga (tensões normais), com os seus valores reduzindo com o aumento destes parâmetros. Assim, como ficou demonstrado em tais estudos, o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) apresentou valores entre  $10^{-6}$  e  $10^{-7}$  m/s para pesos específicos aparentes secos da ordem de  $0,65 \text{ g/cm}^3$ , atingindo valores entre  $10^{-8}$  e  $10^{-9}$  m/s para pesos específicos secos ligeiramente superiores a  $0,90 \text{ g/cm}^3$ .

Estudos desenvolvidos por Ziehmman et al (2003) para um mesmo resíduo de tratamento mecânico-biológico com partículas de diferentes tamanhos máximos confirmam que o coeficiente de permeabilidade é significativamente reduzido com o aumento do peso específico. Quanto ao diâmetro máximo das partículas sua influência não pode ser avaliada, pela grande heterogeneidade do material (Fig.4.5).



**Fig.4.5 - Influência do peso específico e do tamanho das partículas na permeabilidade de resíduos pré-tratados (Ziehmman et al., 2003)**

Finalmente de acordo com estudos desenvolvidos por Von Felde & Doedens (1997) é possível avaliar a influência da pressão aplicada, do tempo de tratamento e do tamanho das partículas do resíduo no valor do coeficiente de permeabilidade. Da

análise da Fig. 4.6 pode-se concluir que o coeficiente de permeabilidade decresce com o aumento da pressão aplicada e com a redução do tamanho das partículas. Quanto ao período de tratamento seria de se esperar que um maior tempo corresponderia a um menor valor para o coeficiente de permeabilidade. Esta conclusão, todavia, neste estudo não ficou suficientemente caracterizada talvez, segundo o autor, por insuficiência de dados.

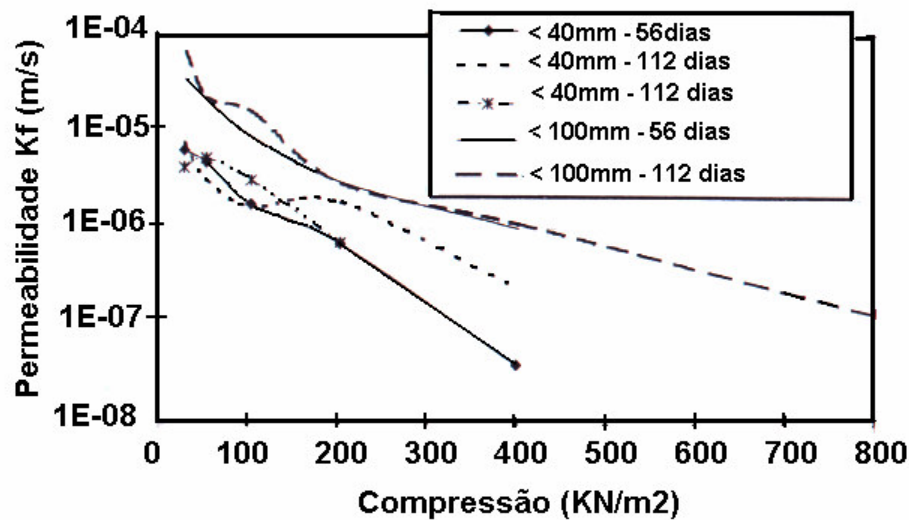


Fig. 4.6 - Coeficiente de permeabilidade em relação a pressão aplicada para diferentes tempos de pré-tratamento do resíduo do lixo (Von Felde & Doedens,1997)

#### 4.3.2 - Características Mecânicas

##### 4.3.2.1 - Resistência ao Cisalhamento

A influência do tempo de duração do pré-tratamento e do teor de umidade dos resíduos do lixo na resistência ao cisalhamento é analisada em trabalho de Scheelhaase et al. (2001). Para amostras de resíduo com tempos de pré-tratamento mecânico-biológico distintos (16 e 36 semanas) e diferentes teores de umidade, os valores dos parâmetros de resistência ( $c'$  e  $\phi'$ ), determinados em equipamento de cisalhamento direto de 30 x 30 x 20 cm, encontram-se indicados na Tabela 4.4 abaixo.

**Tabela 4.4 - Parâmetros de resistência dos resíduos do pré-tratamento do lixo em função dos deslocamentos horizontais (Scheelhaase et al., 2001)**

Amostra	Parâmetros Mobilizados	Deslocamento Horizontal (mm)				
		20	40	60	80	100
16 sem. w=20%	$\phi' (^\circ)$	22,54	28,10	33,90	38,87	43,35
	$c' (kN/m^2)$	30,41	42,07	48,33	46,55	39,34
	$\tau (kN/m^2)$ para $\sigma = 100 kN/m^2$	134,17	175,56	216,32	248,06	275,34
16 sem. w=36%	$\phi' (^\circ)$	24,08	28,94	34,99	39,28	42,08
	$c' (kN/m^2)$	33,96	46,83	46,82	36,43	26,52
	$\tau (kN/m^2)$ para $\sigma = 100 kN/m^2$	145,69	185,07	221,81	240,91	252,25
16 sem. w=45%	$\phi' (^\circ)$	25,13	30,79	35,07	37,09	39,04
	$c' (kN/m^2)$	25,73	35,83	43,77	51,62	54,18
	$\tau (kN/m^2)$ para $\sigma = 100 kN/m^2$	143,00	184,80	219,28	240,62	256,92
36 sem. w=20%	$\phi' (^\circ)$	28,81	34,57	40,16	41,28	38,55
	$c' (kN/m^2)$	26,82	35,23	34,26	33,08	45,04
	$\tau (kN/m^2)$ para $\sigma = 100 kN/m^2$	164,32	207,50	245,23	252,56	244,26
36 sem. w=37%	$\phi' (^\circ)$	26,20	32,25	36,91	40,40	40,33
	$c' (kN/m^2)$	31,29	39,44	39,44	32,74	32,86
	$\tau (kN/m^2)$ para $\sigma = 100 kN/m^2$	154,31	197,18	227,21	245,51	245,10

Da análise dos resultados pode-se concluir:

(a) Para as amostras com a idade de pré-tratamento de 16 semanas não foi observado um valor máximo para a resistência ao cisalhamento que mostrou uma tendência a crescimento, mesmo atingido o deslocamento horizontal máximo de ensaio de 100 mm; ao contrário, para as amostras com a idade de pré-tratamento de 36 semanas o valor de pico para a resistência ao cisalhamento foi atingido para um deslocamento horizontal de 80 mm;

(b) De uma maneira geral, independentemente da idade de pré-tratamento das amostras, observa-se uma tendência de crescimento do ângulo de atrito interno,



mesmo atingido o deslocamento horizontal máximo de ensaio de 100 mm, enquanto os valores de coesão atingem valores máximos para deslocamentos horizontais em torno de 60 mm;

(c) O teor de umidade praticamente não influenciou os resultados, independentemente da idade de pré-tratamento das amostras.

A influência do diâmetro máximo das partículas na variação dos parâmetros de resistência do resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo foi estudado por Klümper (1998) a partir de ensaios de cisalhamento direto, com os resultados apresentados abaixo na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 - Parâmetros de Resistência do resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo em função do diâmetro máximo das partículas (Klümper, 1998)**

<b>Diâmetro máximo das partículas (mm)</b>	<b>Coesão c (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Ângulo de Atrito interno (°)</b>
60	32,7	41,3
100	36,4	39,3

Estes resultados poderiam levar a conclusão de que o aumento do diâmetro das partículas do resíduo conduz a uma redução do ângulo de atrito e a um aumento da coesão. Isto parece razoável na medida que a componente fibrosa do resíduo (plásticos, panos, etc...) geralmente apresenta maiores diâmetros resultando, conseqüentemente, em maiores valores de coesão para as amostras com maiores diâmetros. Por outro lado, as amostras com os menores diâmetros das partículas tenderiam a apresentar uma maior homogeneidade, um maior entrosamento e, em conseqüência, maiores pesos específicos e ângulos de atrito interno.

Esta conclusão, todavia, não vem de encontro ao preconizado por Heiss-Ziegler & Fehrer (2003) com base em ensaios de cisalhamento direto em amostras do resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo executados por Fehrer (2002).

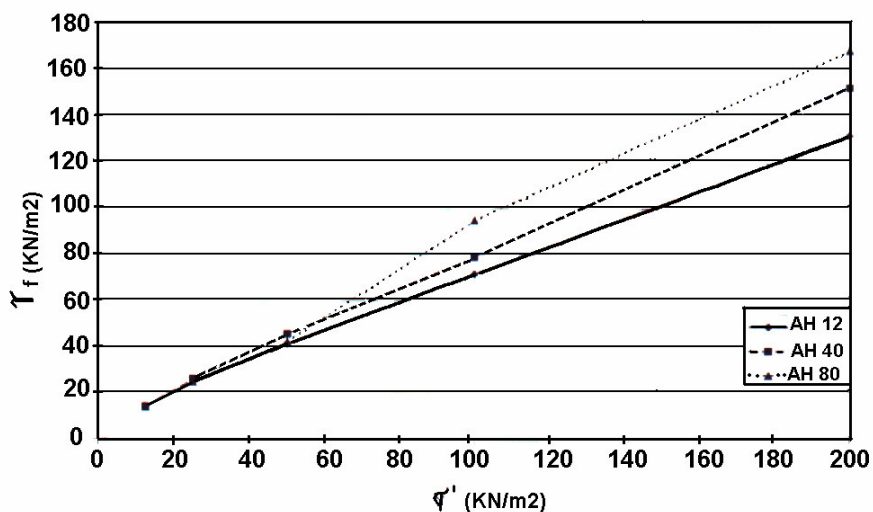
Para isso foram utilizadas amostras de resíduos provenientes de Oberpullendorf (OP) com diâmetros máximos de 25 mm e de Allerheiligen (AH) com diâmetros máximos de 12, 40 e 80 mm, ensaiados em caixas de 50 x 50 x 20 cm. Adicionalmente foram executados ensaios com amostras dos mesmos materiais com diâmetros máximos de 2 mm em caixas com 10,11 cm de diâmetro e 27 mm de altura. Os resultados obtidos constam da Tabela 4.6 a seguir.

**Tabela 4.6 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento para o resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo (Fehrer, 2002)**

Amostra	Diâmetro máximo das partículas (mm)	Coesão c (kN/m <sup>2</sup> )	Ângulo de atrito interno $\phi$ (°)
OP 2	2	4,8	36,4
OP 25	25	6,0	32,6
AH 2	2	4,9	35,9
AH 12	12	9,5	31,5
AH 40	40	6,7	36,2
AH 80	80	4,2	39,5

De acordo com a conclusão de Heiss-Ziegler & Fehrer (2003) geralmente os valores de coesão decrescem e os do ângulo de atrito crescem com o aumento do diâmetro das partículas. Esta tendência, todavia, não ocorreu para as amostras com diâmetro máximo de 2 mm (OP 2 e AH 2), segundo os autores, pelo alto teor de material mineral presente nestas amostras, responsável por um maior entrosamento entre as partículas, conduzindo a elevados ângulos de atrito interno. Por outro lado, as envoltórias de resistência apresentadas na Fig. 4.7 para as amostras AH 12, AH 40 e AH 80, permitem concluir que o modelo proposto por Kölsch (1996), quanto a influência das fibras na resistência ao cisalhamento do lixo, também é válido para o caso dos resíduos obtidos no pré-tratamento mecânico-biológico do lixo. Conforme

pode ser verificado na mesma figura, para tensões normais de até cerca de 50 kN/m<sup>2</sup>, quando ainda não teria havido a mobilização das fibras, as envoltórias são praticamente coincidentes. Para tensões normais entre 50 e 100 kN/m<sup>2</sup> quando a componente de resistência devido as fibras é mobilizada pode-se verificar, principalmente para a amostra AH 80 com maiores diâmetros de partículas um ganho de resistência considerável. Para tensões normais superiores a 100 kN/m<sup>2</sup> este ganho de resistência tende a diminuir com as envoltórias de resistência tendendo ao paralelismo.



**Fig. 4.7 - Envoltórias de resistência do resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo para amostras com diferentes diâmetros máximos de partículas. (Fehrer, 2002)**

Estudos desenvolvidos por Mahler & de Lamare Neto (2003) a partir de ensaios de cisalhamento direto em equipamento de grande porte com amostras de resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico, com partículas de diâmetro máximo de 3/4", originado de um lixo típico da cidade do Rio de Janeiro, conduziram a conclusões semelhantes as obtidas para resíduos dos países europeus. As principais destas conclusões refere-se ao fato de não terem sido observados pontos de pico, com a tensão cisalhante mostrando uma tendência de crescimento mesmo atingido o limite de deslocamento horizontal do ensaio em torno de 45 mm. Os parâmetros de

resistência ( $c'$  e  $\phi'$ ), por sua vez, mostraram uma tendência de crescimento com os deslocamentos horizontais.

#### 4.3.2.2 - Compressibilidade.

A compressibilidade dos aterros de resíduos do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo é baixa quando comparada com o próprio lixo. Isto é compreensível uma vez que, estando esta compressibilidade relacionada, basicamente, ao carregamento imposto e às transformações bioquímicas dos materiais constituintes, no caso do resíduo do pré-tratamento esta 2ª parcela é pouco representativa ou até mesmo negligenciada, dependendo do período de duração deste pré-tratamento. Esta diferença de compressibilidade pode ser observada na Tabela 4.7, apresentado por Bidlingmaier & Scheelhaase (1997), com a comparação dos valores do recalque anual específico do lixo doméstico e do resíduo do pré-tratamento do lixo para aterros com alturas entre 10 e 15 m.

**Tabela 4.7 - Recalque anual específico em função de diferentes tipos de materiais de aterro (Bidlingmaier & Shheelhaase, 1997)**

<b>Peso específico "in-situ" (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Recalque específico anual (%)</b>	<b>Aterro</b>	<b>Tipo do lixo</b>
0,60	11,0	Misson Cânion, USA	Lixo doméstico
0,75	5,0	Lübars	Lixo doméstico
0,90	1,2	Kahlenberg	Lixo doméstico
0,90	1,1	Sprendlingen	Lixo doméstico
0,85	2,0	Dußlingen	Resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo
1,30	0,8	Ensaio de campo ZDE	Resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo
1,20	1,0	Ensaio de campo ZDE	Resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo

A influência do período de pré-tratamento pode ser comprovado em trabalho de Scheelhaase et al. (2001) com base em ensaios de compressão com corpos de prova cilíndricos de resíduo do pré-tratamento do lixo, utilizando-se um lisímetro especialmente construído. Estas amostras ensaiadas em diferentes condições de umidade (natural, seco e muito úmido) e duração de pré-tratamento (16 e 36 semanas), apresentaram as características principais constantes da Tabela 4.8.

**Tabela 4.8 - Ensaios de compressão com o resíduo do pré-tratamento do lixo (Scheelhaase et al., 2001).**

Ensaio	Condições de umidade	Período de duração do tratamento			
		16 semanas		36 semanas	
		$\gamma$ (Mg/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma$ (Mg/m <sup>3</sup> )	w (%)
1	Natural	0,62	36	0,82	37
2	Seco	0,65	20	0,80	20
3	Muito úmido	0,63	46	-	-

$\gamma$  (Mg/m<sup>3</sup>) – peso específico seco

w (%) – teor de umidade.

As curvas carga-recalque constantes na Figura 4.8 permitem concluir que as amostras com um maior tempo de pré-tratamento (36 semanas) apresentam valores de recalque, para a carga máxima aplicada (600 kN/m<sup>2</sup>), inferiores aos das amostras com menor tempo de pré-tratamento (16 semanas), com a parcela mais importante do recalque ocorrendo para o 1º carregamento aplicado (50 kN/m<sup>2</sup>), devido a baixa densidade inicial das amostras.

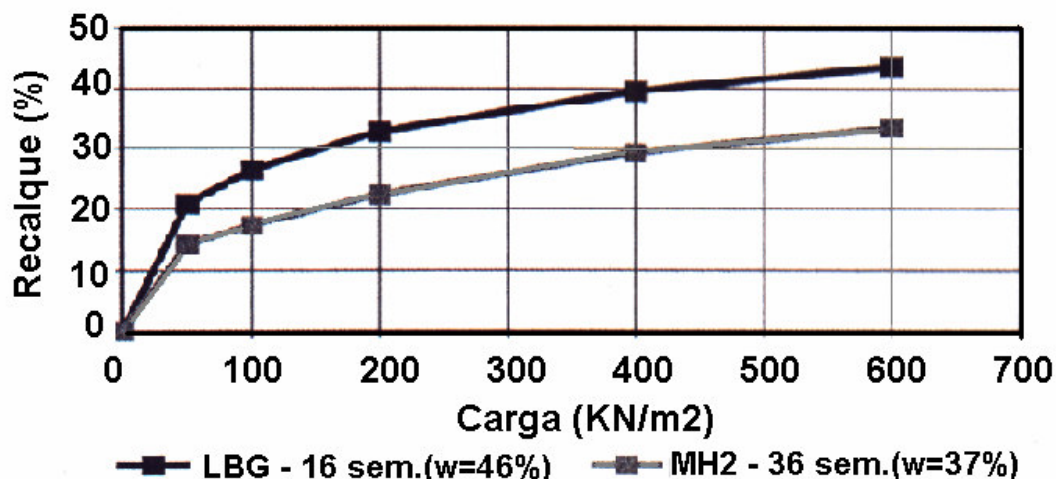
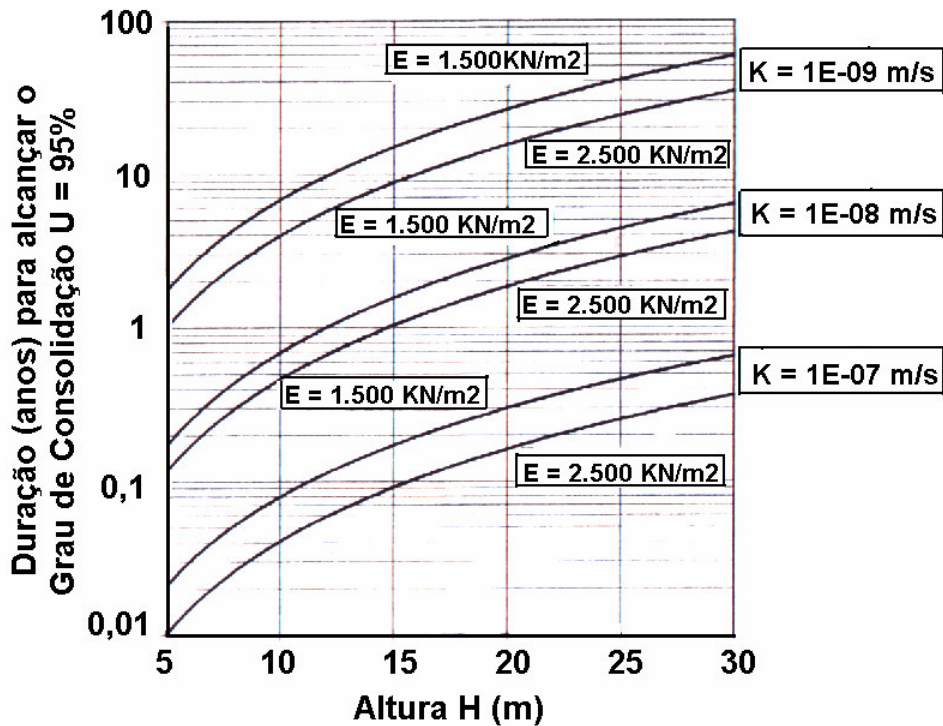


Fig. 4.8 – Curvas carga-recalque (Scheelhaase et al., 2001)

De acordo com conclusões de Heiss-Ziegler & Fehrer (2003), a partir de ensaios de adensamento utilizando células com 15 cm de diâmetro com amostras com diferentes tamanhos máximos de partículas de resíduos do tratamento mecânico-biológico do lixo, a compressibilidade / recalques cresce com o aumento do tamanho das partículas e decresce com o aumento da estabilidade dos materiais.

A estimativa de recalques em aterros de resíduos do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo foi feita por Dach et al. (1997) aplicando a Teoria de Terzaghi (1936) para uma condição de dupla camada drenante. Esta estimativa foi realizada considerando-se diferentes coeficientes de permeabilidade ( $K_f$ ) e pesos específicos secos ( $\gamma_A$ ), obtidos em ensaios de adensamento em laboratório e coeficientes de rigidez ( $E$ ) variando de 1.500 a 2.500 kN/m<sup>2</sup>, conforme apresentado na Fig. 4.9.



**Fig. 4.9 - Tempos de duração de recalques para um grau de adensamento  $U=95\%$ , em função da altura do aterro, coeficiente de permeabilidade e coeficiente de rigidez (Dach et al., 1997)**

A figura acima nos permite concluir que para um grau de adensamento ( $U$ ) igual a 95%, coeficientes de permeabilidade baixos ( $K_f < 10^{-8}$  m/s) e alturas de aterros de 10 a 20 m, o tempo de duração do recalque pode atingir muitos anos. Esta constatação é importante e deve ser levada em consideração na elaboração de projetos de aterros com altos teores de umidade e baixas permeabilidades.

Finalmente, em estudos desenvolvidos por Bidlingmaier & Scheelhaase (1997) baseados em ensaios de laboratório utilizando um lisímetro com 5 m de altura e volume total de 100 m<sup>3</sup>, são comparados os valores dos recalques obtidos para o resíduo do lixo com o pré-tratamento somente mecânico com aquele resultante do pré-tratamento completo mecânico-biológico. Este pré-tratamento completo leva a recalques medidos na superfície inferiores a 50% daqueles medidos para o resíduo somente com o pré-tratamento mecânico, conforme verificado na Fig. 4.10.

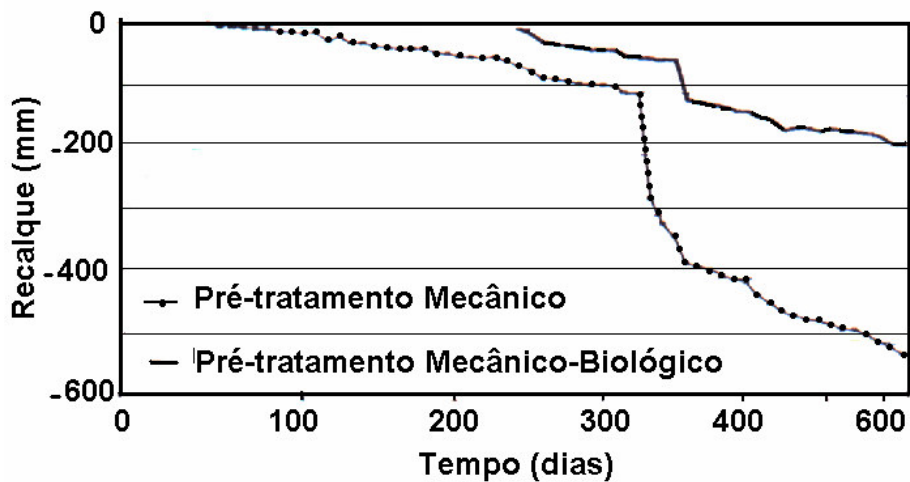


Fig. 4.10 - Recalques do resíduo do pré-tratamento mecânico e mecânico-biológico do lixo ( Bidlingmaier & Scheelhaase, 1997)

Esta diferença de recalques que vem a comprovar a eficiência da etapa de pré-tratamento biológico é evidente, também, quando comparados diferentes alturas das amostras ensaiadas para os 2 tipos de pré-tratamento, de acordo com os resultados apresentados na Fig. 4.11.

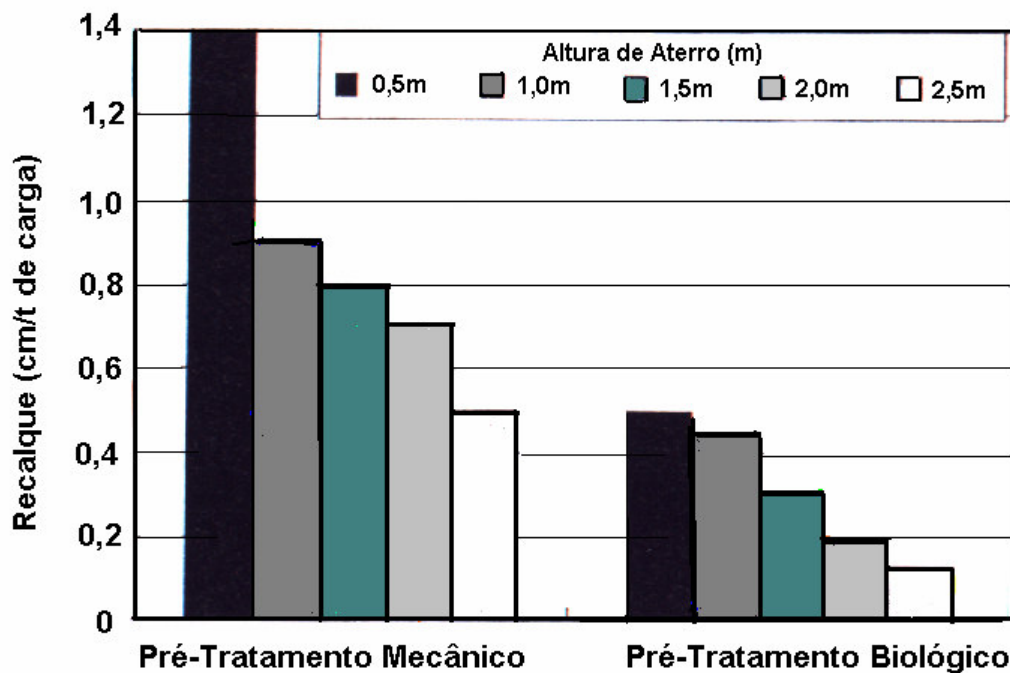


Fig. 4.11 - Recalques do resíduo do pré-tratamento mecânico e biológico do lixo, para diferentes alturas (Bidlingmaier & Scheelhaase, 1997)



## **CAPÍTULO 5 - ESTUDO EXPERIMENTAL DO EFEITO DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE MATERIAIS GRANULARES / RESÍDUO DO PRÉ-TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO DO LIXO**

### **5.1 - Introdução**

Uma pesquisa de laboratório visando uma avaliação da interação material granular - fibras foi desenvolvida no presente trabalho, utilizando-se amostras de um fibrossolo, obtido da mistura de areia e pequenas tiras de plástico em percentuais variados e amostras do resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo, com diferentes diâmetros máximos de partículas. Estas amostras foram submetidas a ensaios de cisalhamento direto a fim de se verificar a influência das fibras presentes no comportamento destes materiais e, principalmente, nos seus parâmetros de resistência. Finalmente, o mesmo resíduo do pré-tratamento do lixo foi misturado a areia em diferentes percentuais com a finalidade de se verificar as características do material assim obtido e a viabilidade de seu possível aproveitamento como material de construção ou pavimentação.

Para estes ensaios, dependendo do tamanho máximo das partículas das amostras correspondentes e, de modo a atender as recomendações da ASTM D 3080 (valores mínimos de comprimento das caixas de 12 vezes o tamanho da maior partícula do solo), foram utilizados os seguintes tipos de equipamentos: especial (grandes dimensões) desenvolvido pelo ITA (Instituto Tecnológico da Aeronáutica), baseado em modelo originalmente construído no IRIGM (Institut de Recherches Interdisciplinaires en Géologie et Mécanique, da Universidade de Grenoble) [Delmas,1979] ou convencionais existentes no Laboratório de Geotecnia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC).

Com base nos resultados assim obtidos comparados com os dados disponíveis na literatura nacional e internacional para os resíduos sólidos urbanos (lixo), para os resíduos do pré-tratamento do lixo e, ainda, para os solos reforçados

com fibras, procurou-se estabelecer uma provável analogia entre os materiais em referência. Deve ser destacado, ainda, que de acordo com Palmeira & Milligan (1989), o efeito escala no caso de ensaios de cisalhamento direto com a utilização de equipamentos de grande porte em relação aos equipamentos convencionais se manifesta, sobretudo, na espessura da zona de cisalhamento e nos comportamentos residuais das amostras, mantendo-se praticamente invariáveis os valores dos respectivos ângulos de atrito e de dilatação do solo.

## **5.2 - Equipamentos de Ensaio**

### **5.2.1 - Equipamento de Cisalhamento direto convencional**

O equipamento de cisalhamento direto convencional, disponível no Laboratório de Geotecnia da PUC, é constituído por um conjunto de 2 caixas de seção quadrada (lado = 4”), com a amostra atingindo uma altura de 3,26 cm.

### **5.2.2 - Equipamento de Cisalhamento direto de grande porte**

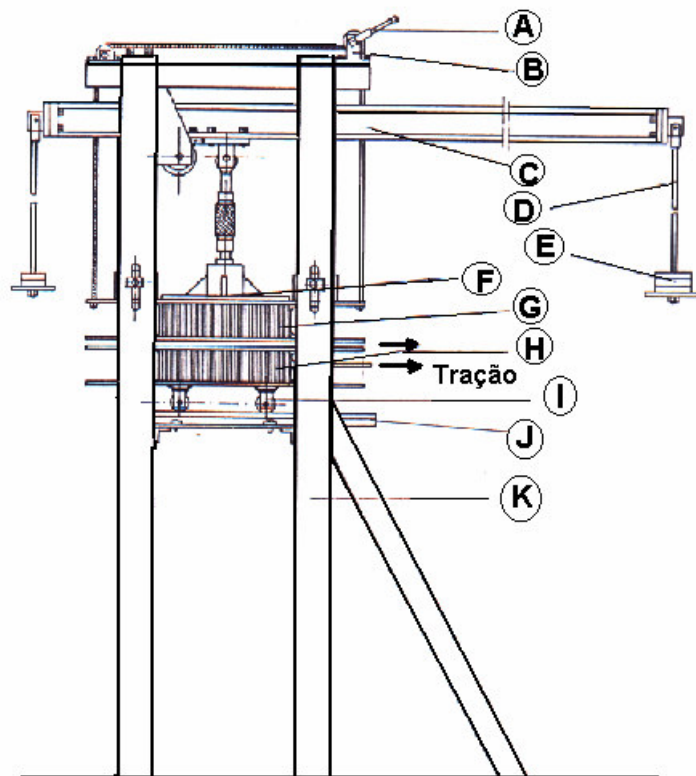
O equipamento de cisalhamento direto de grande porte (Fig. 5.1 e Fotos 5.1 e 5.2) desenvolvido no ITA (Rimoli,1986; Vidal et al., 1988) conforme descrito por Gomes (1993), é constituído por um conjunto de duas caixas de grandes dimensões (400 x 250 x 100 mm), montadas em uma estrutura de sustentação e associadas a uma prensa de ensaio convencional.

O espaçamento entre as caixas pode ser livremente ajustado com o deslocamento da metade superior verticalmente ao longo da estrutura de sustentação através de um sistema de roldanas e cabos de aço. Esta metade superior é selada por uma placa rígida, dotada de rótula de articulação, para a transmissão das cargas verticais. A caixa inferior está apoiada em um sistema de trilhos e rolamentos, capaz de minimizar os esforços de atrito com a base de suporte.

Uma viga em perfil “I” com 4000 mm de comprimento, acoplada a parte superior da estrutura, possui em cada uma de suas extremidades sistemas articulados

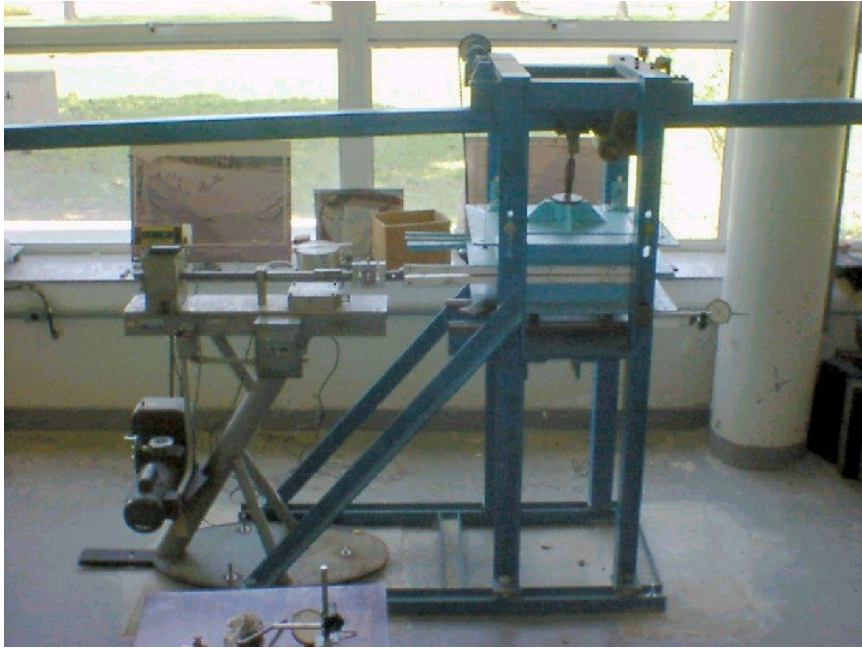
que atuam como elementos de suporte para conjuntos de pesos, possibilitando aplicações de cargas normais até 30 kN.

O deslocamento relativo entre as caixas é induzido por um eixo conectado à metade inferior e a um anel dinamométrico para a quantificação das cargas aplicadas, o qual, por sua vez, está conectado ao parafuso de acionamento de uma prensa convencional de cisalhamento direto trabalhando, entretanto, em sentido inverso ao usual. Deslocamentos horizontais e verticais do sistema são obtidos através de extensômetros.



- A e B - sistema de roldanas e cabos de aço.
- C - viga em perfil "I", com 4000mm de comprimento.
- D - sistemas articulados / elementos de suporte.
- E - conjuntos de pesos.
- F - placa rígida dotada com rótula de articulação.
- G - metade superior da caixa.
- H - metade inferior da caixa (móvel).
- I e J - sistema de trilhos e rolamentos
- K - estrutura de sustentação.

**Fig. 5.1 - Esquema Geral do equipamento de cisalhamento direto (Gomes, 1993).**



**Foto 5.1 – Vista frontal do equipamento de cisalhamento direto de grande porte.**



**Foto 5.2 – Vista lateral do equipamento de cisalhamento direto de grande porte.**

### 5.3 - Materiais Ensaiaados

#### 5.3.1 - Considerações Preliminares

Os materiais ensaiados possuem aspectos semelhantes, ou seja, apresentam-se como granular (caso da areia e das misturas de areia e plásticos) ou predominantemente granular (caso do resíduo do lixo) e com a presença de um elemento fibroso de baixa rigidez. No caso da mistura areia + plásticos o elemento fibroso (plásticos) é homogêneo (dimensões e rigidez definidas) e o seu percentual é conhecido. Para o resíduo do pré-tratamento do lixo o elemento fibroso é heterogêneo (dimensões e rigidez variadas) e o seu percentual, apesar de não totalmente definido, pode ser estimado com precisão aceitável, a partir de separação por peneiramento. De qualquer forma os materiais ensaiados, dado as características em referência, podem ser considerados como tipos de fibrossolos ou solos reforçados com inclusões (extensíveis) múltiplas. Na Tabela 5.1 é apresentado um resumo com a discriminação das diversas amostras de materiais ensaiados e os respectivos equipamentos utilizados.

**Tabela 5.1 – Resumo dos ensaios realizados**

<b>Discriminação da amostra</b>	<b>Equipamento</b>
Areia	Especial de grandes dimensões (400 x 250 x 200 mm) – ITA
Areia + plástico (0,05% em peso)	
Areia + plástico (0,15% em peso)	
Resíduo do pré-tratamento do lixo (passando na peneira 3/4")	
Resíduo do pré-tratamento do lixo (passando na peneira 3/4") + areia	
Resíduo do pré-tratamento do lixo (passando na peneira 3/8")	Convencional (100 x 100 x 70 mm) – PUC-RJ

### 5.3.2 - Mistura de areia e tiras de plástico

#### 5.3.2.1 - Características dos Materiais

A areia utilizada foi a quartzosa de rio, com grãos arredondados e sub-angulares, granulometria compreendida entre 0,6 a 2,0 mm, coeficiente de não uniformidade de 1,80 e um peso específico seco ( $\gamma_s$ ) igual a 26,17 kN/m<sup>3</sup>. O plástico é do tipo de sacos de supermercado cortado em tiras de 4,0 x 8,0 cm.

Na Tabela 5.2 abaixo são apresentadas as amostras obtidas com a indicação dos percentuais em peso do plástico na mistura e os valores dos índices de vazios antes e após o adensamento (para  $\sigma = 100$  kPa).

**Tabela 5.2 - Relação de Amostras de areia + plástico**

Amostra	Discriminação	Índice de vazios	
		Antes do adensamento	Após adensamento (para $\sigma = 100$ kPa)
1	Areia	0,693	0,525
2	areia + plástico (0,05% em peso)	0,666	0,465
3	areia + plástico (0,15% em peso)	0,658	0,404

#### 5.3.2.2 - Procedimento de Ensaio

##### (a) - Sistemática dos Ensaios

Estas amostras foram ensaiadas, conforme apresentado na Tabela 5.1, utilizando-se equipamento especial de grande porte do Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA. Inicialmente foram efetuados ensaios experimentais visando definir a sistemática a ser adotada, sobretudo no que se refere à preparação das amostras e à velocidade dos ensaios.

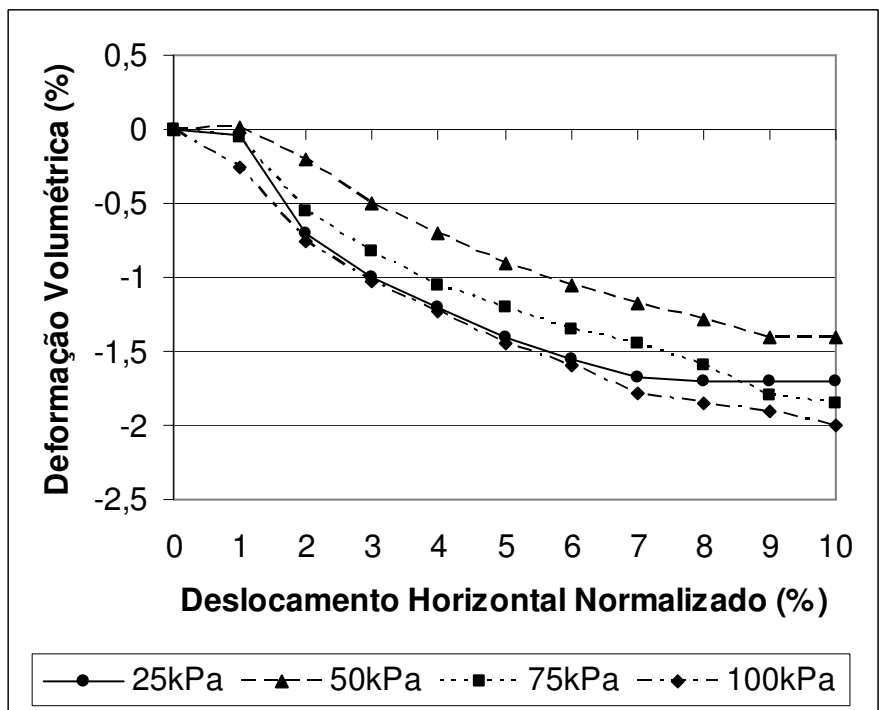
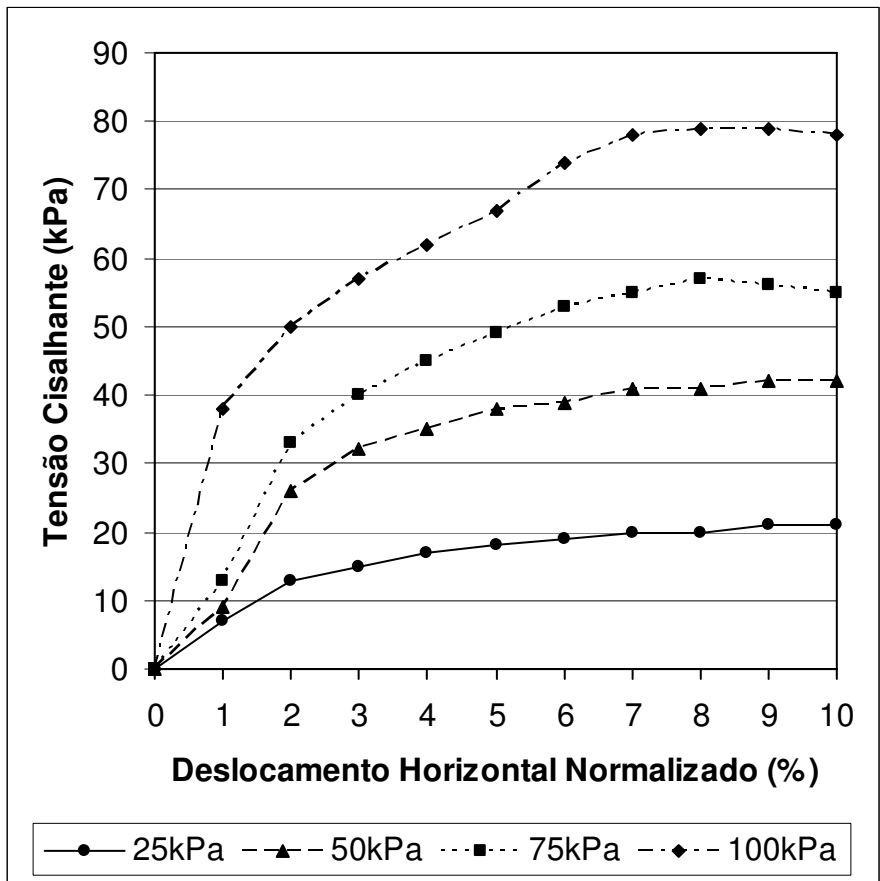
No que se refere à preparação das amostras de areia pura (sem mistura com plástico) o material foi depositado nas caixas de cisalhamento com o auxílio de um funil, a partir de uma altura de queda de cerca de 15 cm, de modo a se obter uma

condição de compactação o mais fofa possível ( $\gamma = 15,46 \text{ kN/m}^2$ ). Para a mistura areia + plástico as amostras que, visualmente apresentaram uma maior homogeneidade, foram obtidas através da moldagem diretamente nas caixas do equipamento de cisalhamento em três camadas iguais, colocando-se, para cada uma destas camadas, primeiramente a areia e em seguida as tiras de plástico no percentual indicado (Tabela 5.2), sendo as misturas efetuadas manualmente. Neste caso, pelo próprio procedimento de moldagem, houve um ligeiro aumento da compactação das amostras ( $\gamma = 15,71 \text{ kN/m}^2$ ). Quanto à velocidade de ensaio, a conclusão a que se chegou foi de que esta pouco influencia os resultados obtidos (material seco e granular), razão pela qual optou-se por uma velocidade mais rápida de 2,41 mm/min a fim de agilizar os ensaios. Esta constatação, aliás, foi confirmada pelas conclusões de uma análise paramétrica extensa e minuciosa dos ensaios de cisalhamento direto de grande porte, desenvolvida por Gomes (1992) para a definição de uma sistemática geral de ensaios com o mesmo equipamento em referência e, particularmente, para o caso de materiais granulares.

Cada amostra especificada na Tabela 5.1 foi ensaiada para tensões normais de 25, 50, 75 e 100 kPa, efetuando-se leituras (a cada 30 segundos) dos deslocamentos horizontais, verticais e das forças de cisalhamento.

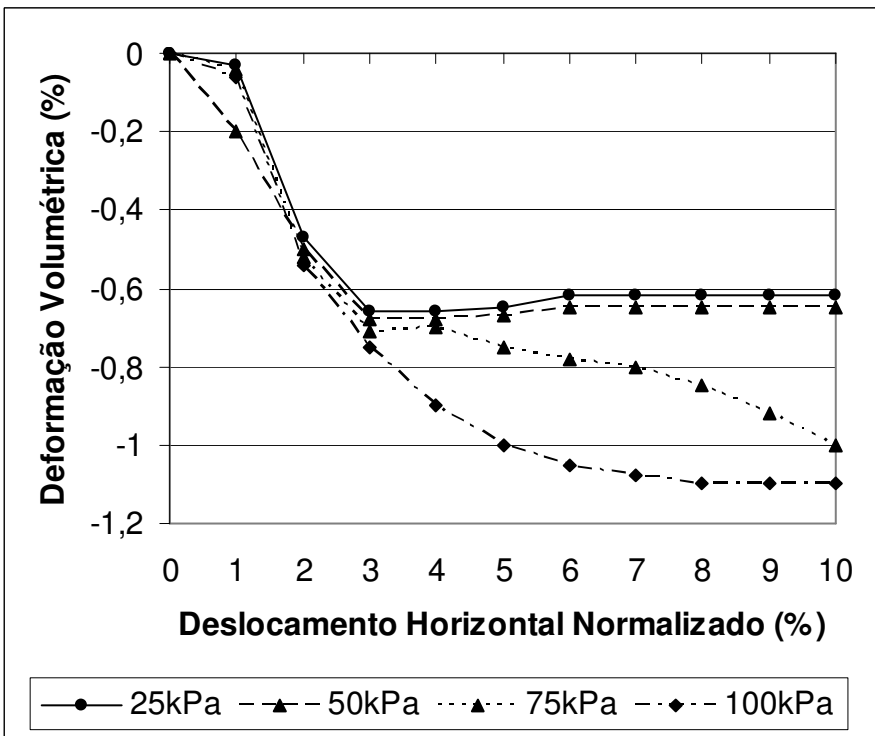
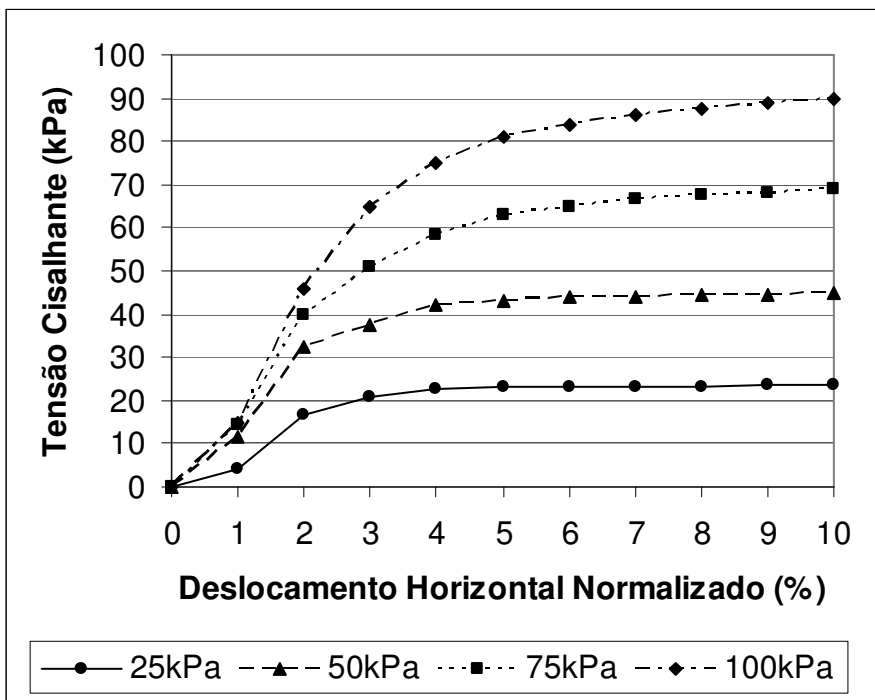
(b) Curvas tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais normalizados e deformações volumétricas x deslocamentos horizontais normalizados.

A partir das leituras efetuadas em cada amostra ensaiada foram obtidos pares de valores relacionando os deslocamentos horizontais às tensões cisalhantes e deslocamentos verticais, possibilitando o traçado das curvas correspondentes em referência, apresentadas nas Fig. 5.2, 5.3 e 5.4. Estas curvas, conforme pode ser verificado, apresentam um aspecto característico das areias fofas o que significa dizer que as tiras de plástico introduzidas nas amostras 2 e 3 contribuem tão somente no aumento da tensão cisalhante de pico em relação a amostra 1 (areia pura).

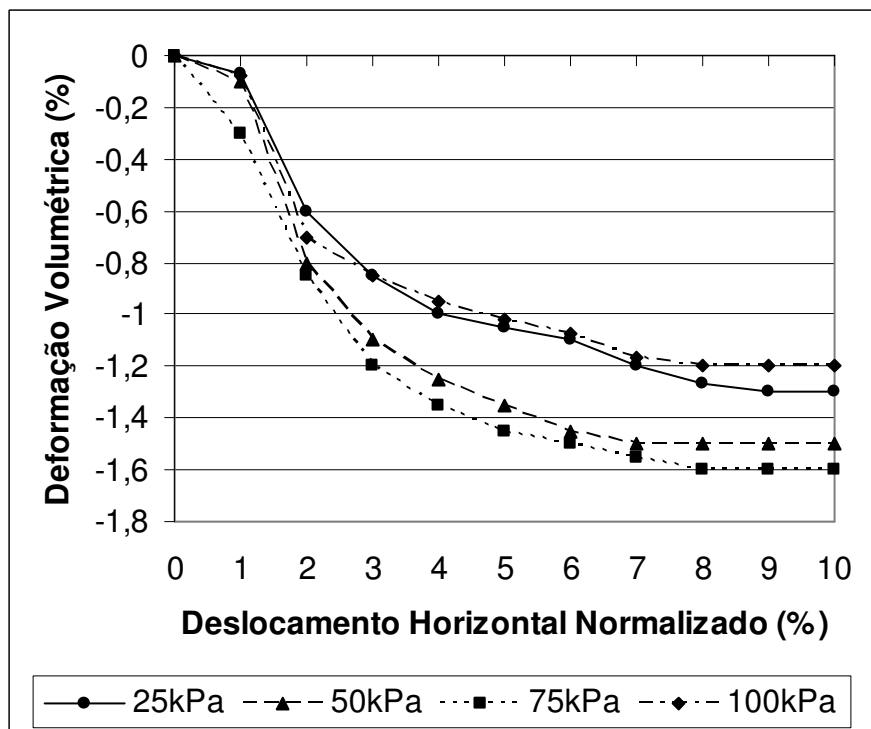
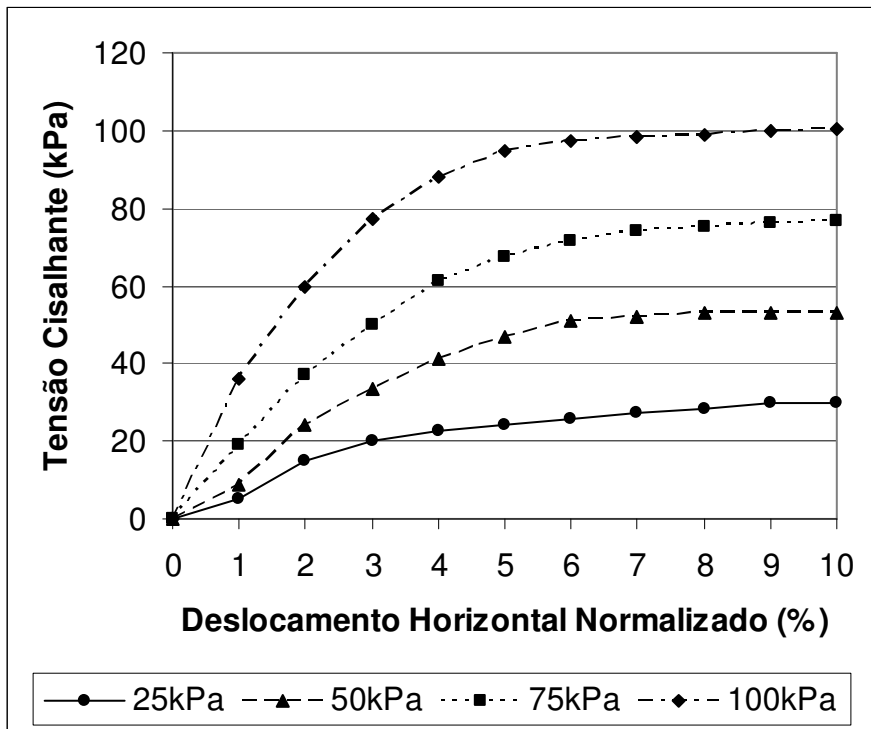


**Fig. 5.2 - Curvas tensões de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados e deformações volumétricas x deslocamentos horizontais normalizados para a Amostra 1 (areia pura).**





**Fig. 5.3 - Curvas tensões de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados e deformações volumétricas x deslocamentos horizontais normalizados para a Amostra 2 (areia + plástico com 0,05% em peso).**



**Fig. 5.4 - Curvas tensões de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados e deformações volumétricas x deslocamentos horizontais normalizados para a Amostra 3 (areia + plástico com 0,15% em peso).**

(c) Envoltórias de Resistência

As envoltórias de resistência para cada amostra em referência foram obtidas a partir das curvas tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais normalizados, considerando-se para as tensões cisalhantes valores correspondentes a deslocamentos horizontais normalizados de 4, 7 e 10% (tensões normais de 25, 50, 75 e 100 kPa). Estas envoltórias apresentadas nas Fig. 5.5, 5.6 e 5.7 foram representadas de forma linear o que, para efeito de análise e comparação, é considerado válido pela maioria dos autores.

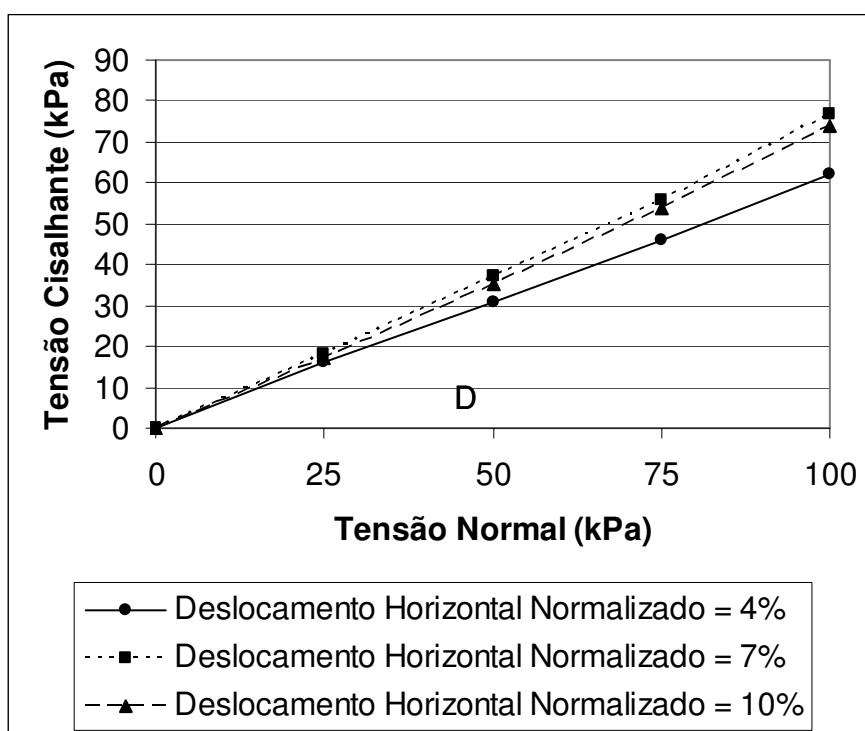


Fig. 5.5 - Envoltórias para a amostra 1 (areia)

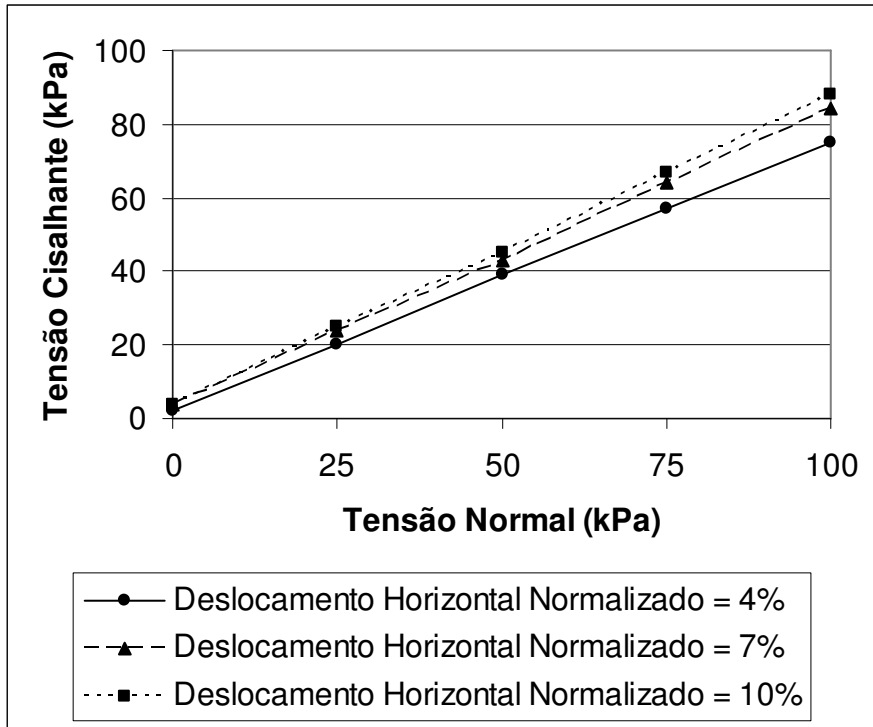


Fig. 5.6 - Envoltórias para a amostra 2 (areia + plástico com 0,05% em peso)

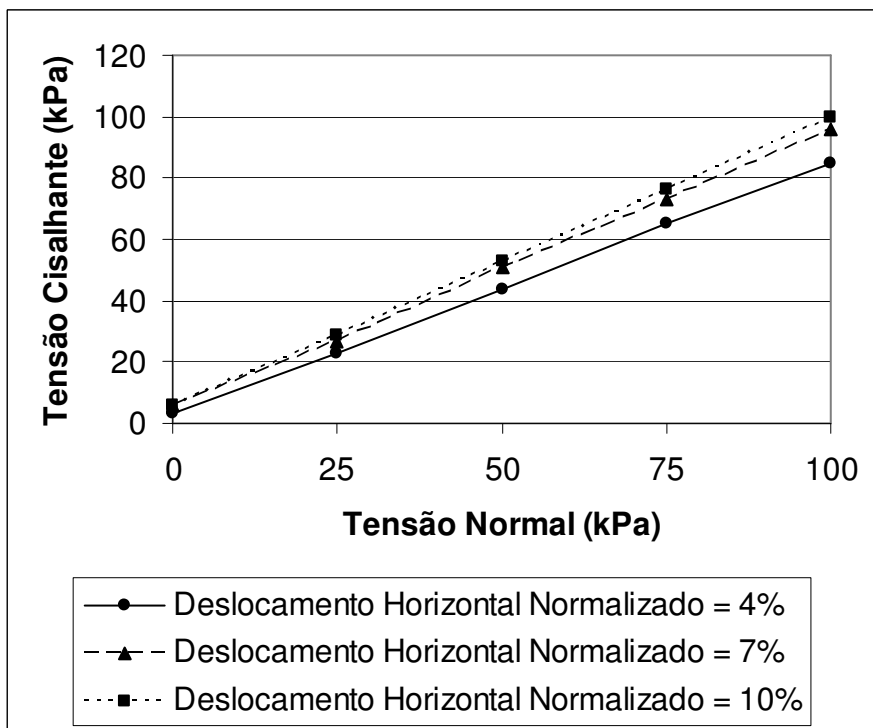


Fig. 5.7 - Envoltórias para a amostra 3 (areia + plástico 0,15% em peso)

(d) - Parâmetros de Resistência

Os parâmetros de resistência mobilizados para deslocamentos horizontais normalizados de 4, 7 e 10%, correspondentes a cada amostra ensaiada, foram determinados a partir das respectivas envoltórias de resistência. O intercepto coesivo ou pseudo coesão devido as fibras ( $c'_f$ ) foi obtido pelo prolongamento desta envoltória até encontrar o eixo (vertical) das tensões cisalhantes, com o ângulo de atrito correspondendo a inclinação desta mesma envoltória com o eixo (horizontal) das tensões normais. Os resultados dos ensaios realizados encontrando-se resumidos na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3 - Resumo dos resultados de ensaios de cisalhamento direto com areia + plástico**

Am.	Descrição	Parâmetros mobilizados	Deslocamentos Horizontais Normalizados (%)		
			4	7	10
1	areia	$\phi'$ mob. ( $^\circ$ )	31 $^\circ$ 48'	37 $^\circ$ 36'	36 $^\circ$ 52'
		$c'_f$ mob. (kPa)	0	0	0
		$\tau$ mob. (kPa) para $\sigma = 100$ kPa	62	77	74
2	areia + plástico (0,05% em peso)	$\phi'$ mob. ( $^\circ$ )	37 $^\circ$ 14'	40 $^\circ$ 2'	41 $^\circ$ 40'
		$c'_f$ mob. (kPa)	2	4	4
		$\tau$ mob. (kPa) para $\sigma = 100$ kPa	77	84	88
3	areia + plástico (0,15% em peso)	$\phi'$ mob. ( $^\circ$ )	39 $^\circ$ 41'	43 $^\circ$ 50'	45 $^\circ$
		$c'_f$ mob. (kPa)	3	6	6
		$\tau$ mob. (kPa) para $\sigma = 100$ kPa	83	97	100

### 5.3.3 - Resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo

#### 5.3.3.1 - Características dos materiais

O resíduo utilizado, conforme já descrito no item 4.3, foi resultante de um estudo realizado nas dependências da Usina de Compostagem da COMLURB em Jacarepaguá - Rio de Janeiro, no acompanhamento do processo de pré-tratamento mecânico e biológico de duas leiras de lixo (Cantuária Costa, 2001). Para a construção dessas leiras foi utilizado lixo fresco proveniente das áreas da Baixada de Jacarepaguá, Barra da Tijuca e Recreio dos Bandeirantes e que possuía a composição física ou gravimétrica constante da Tabela 5.4.

**Tabela 5.4 - Composição percentual do lixo nas leiras estudadas (Lima & Surluiga, 2000).**

<b>Componentes</b>	<b>%</b>
Papel e papelão	14,37
Plástico	38,86
Vidro	1,00
Material orgânico	33,64
Metais ferrosos e não ferrosos	2,33
Material inerte - pedra, louça/cerâmica	2,30
Outros materiais - folha, madeira, pano/trapo, couro, osso	7,48
<b>Total Geral</b>	<b>100,00</b>
<b>Peso Específico (kgf/m<sup>3</sup>)</b>	<b>284,00</b>
<b>Teor de Umidade (%)</b>	<b>67,62</b>

O resíduo após o tratamento mecânico-biológico durante um período de 12 meses foi espalhado sobre uma lona plástica e seco ao ar, procedendo-se, em seguida, a análise granulométrica (peneiramento grosso e fino) apresentada na Tabelas 5.5 e 5.6.

**Tabela 5.5 - Análise Granulométrica do Resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo – Peneiramento grosso**

<b>Peneiras</b>	<b>% Acumulado Passando</b>
2"	62,91
1 1/2"	60,15
1"	54,99
3/4"	52,18
3/8"	43,73
4	43,56
8	39,53
10	38,00

**Tabela 5.6 - Análise Granulométrica do Resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo – Peneiramento fino**

<b>Peneiras</b>	<b>% Acumulado Passando</b>
10	38,00
20	32,54
30	29,30
40	25,06
60	19,90
100	16,49
200	14,12

As amostras a serem ensaiadas foram obtidas do material passando nas peneiras 3/4" e 3/8", cujas composições granulométricas encontram-se discriminadas na Tabela 5.7 abaixo:

**Tabela 5.7 – Composição Granulométrica das Amostras Ensaadas**

<b>Amostras (material passando)</b>	<b>Composição Granulométrica (% em peso)</b>			
	<b>Pedregulho</b>	<b>areia</b>	<b>silte</b>	<b>argila</b>
peneira 3/4"	27,2	45,7	20,4	6,7
peneira 3/8"	13,1	54,6	24,3	8,0

### **5.3.3.2 - Procedimento de Ensaio**

#### **5.3.3.2.1 - Amostras do resíduo do pré-tratamento do lixo passando na peneira 3/4"**

##### **(a) - Sistemática dos Ensaios**

Estas amostras foram ensaiadas, conforme apresentado na Tabela 5.1, utilizando-se equipamento especial de grande porte do Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA. Da mesma forma que o descrito no item 5.3.2.2, inicialmente foram efetuados ensaios experimentais visando definir a sistemática a ser adotada, sobretudo no que se refere à preparação das amostras e à velocidade dos ensaios.

No que se refere à preparação das amostras do resíduo do pré-tratamento do lixo procedeu-se uma homogeneização prévia (material seco) com o revolvimento e mistura manual do material. A moldagem nas caixas do equipamento de cisalhamento foi efetuada em camadas delgadas com ligeira compactação para a melhor acomodação do material (peso específico = 0,849 g/cm<sup>3</sup>), correspondente a uma densidade relativa de cerca de 20%. Os valores dos índices de vazios antes e após o adensamento (para  $\sigma = 100$  kPa) constam da Tabela 5.8.



**Tabela 5.8 – Valores dos Índices de Vazios – Amostra do resíduo do lixo passando na peneira 3/4"**

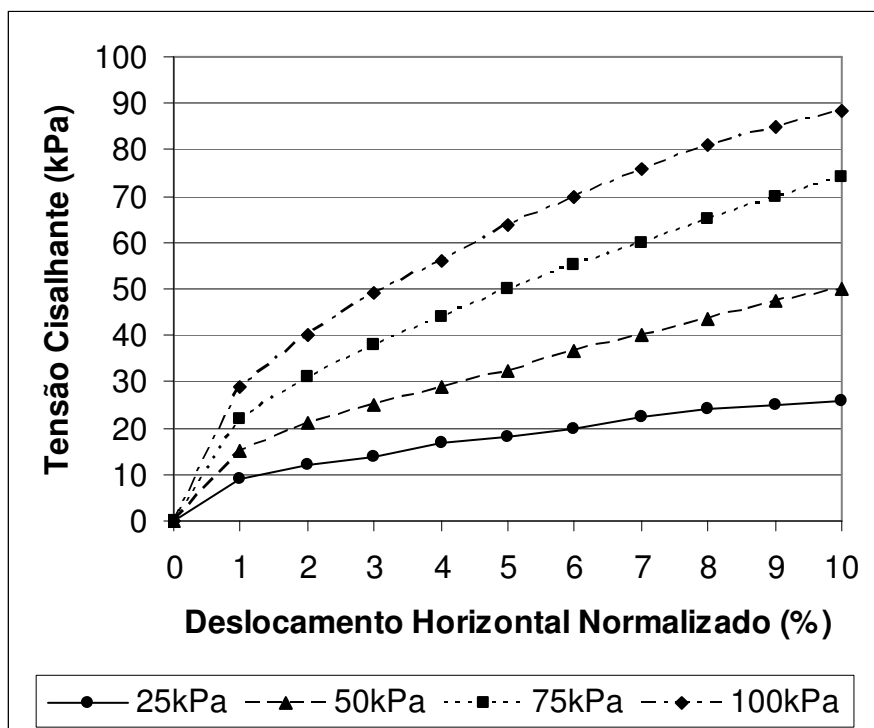
Amostra	Índice de vazios	
	Antes do adensamento	Após adensamento (para $\sigma = 100\text{kPa}$ )
Resíduo do pré-tratamento passando na peneira 3/4"	1,827	1,000

Quanto à velocidade de ensaio a conclusão a que se chegou foi de que esta pouco influencia os resultados obtidos (material seco com predominância granular), razão pela qual optou-se por uma velocidade mais rápida de 2,41 mm/min a fim de agilizar os ensaios.

A amostra foi ensaiada para tensões normais de 25, 50, 75 e 100 kPa, efetuando-se leituras (a cada 30 segundos) dos deslocamentos horizontais e das forças de cisalhamento.

(b) Curvas tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais normalizados.

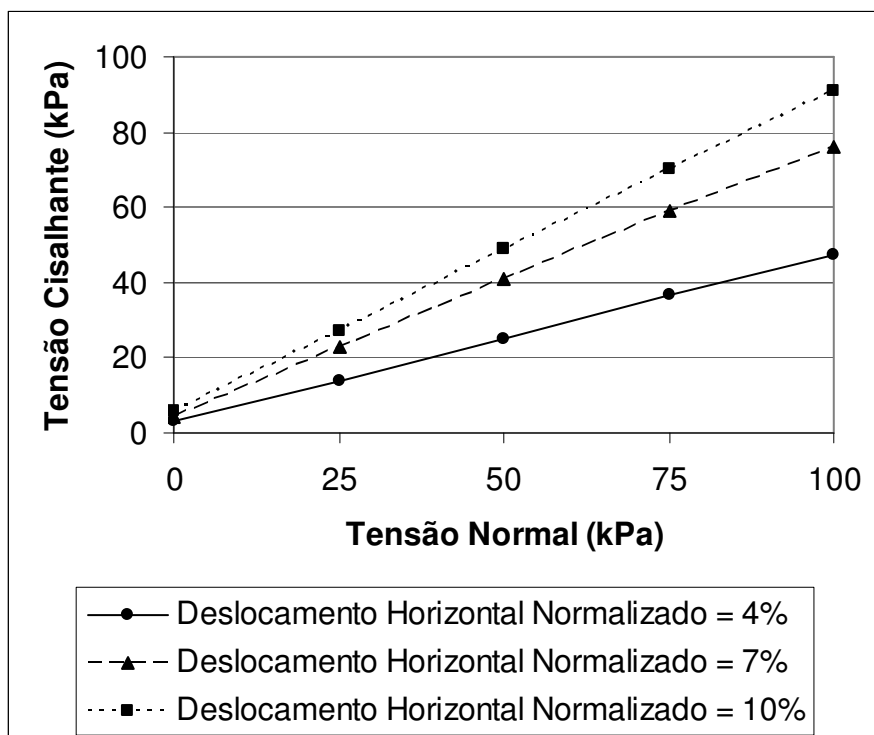
A partir das leituras efetuadas na amostra ensaiada foram obtidos pares de valores (deslocamentos horizontais, tensões cisalhantes), traçando-se as curvas correspondentes em referência apresentadas nas Fig. 5.8.



**Fig. 5.8 - Curvas tensões de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados para o resíduo do pré-tratamento do lixo (material passando na peneira 3/4")**

(c) Envolvórias de Resistência

As envoltórias de resistência para a amostra em referência, apresentada na Fig. 5.9, foram obtidas a partir da curva tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais normalizados, considerando-se para as tensões cisalhantes valores correspondentes a deslocamentos horizontais normalizados de 4, 7 e 10% (tensões normais de 25, 50, 75 e 100 kPa).



**Fig. 5.9 - Envoltórias para o resíduo do pré-tratamento do lixo (material passando na peneira 3/4")**

(d) - Parâmetros de Resistência

Os parâmetros de resistência mobilizados para deslocamentos horizontais normalizados de 4, 7 e 10%, correspondentes a amostra ensaiada, foram determinados a partir das respectivas envoltórias de resistência, com os resultados dos ensaios encontrando-se resumidos na Tabela 5.9.

**Tabela 5.9 - Resumo dos resultados de ensaios de cisalhamento direto com resíduo do pré-tratamento do lixo (material passando na peneira 3/4")**

Parâmetros mobilizados	Deslocamento Horizontal Normalizado (%)		
	4	7	10
$\phi'_{mob.} (^{\circ})$	25° 25'	37° 14'	42° 36'
$c'_{mob.} (kPa)$	3,0	4,5	6,0
$\tau_{mob.} (kPa)$ para $\sigma = 100kPa$	47	77	92

**5.3.3.2.2 – Amostras do resíduo do pré-tratamento do lixo passando na peneira 3/8".**

(a) Sistemática dos Ensaios.

Estas amostras foram ensaiadas, conforme apresentado na Tabela 5.1, utilizando-se equipamento convencional da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ. No que se refere à preparação das amostras do resíduo do pré-tratamento do lixo com diâmetro máximo de 3/8" procedeu-se, inicialmente, a uma homogeneização (material seco), com o revolvimento e mistura manual do material. A moldagem nas caixas do equipamento de cisalhamento foi efetuada com o lançamento do resíduo com o auxílio de um funil, de modo a conferir uma condição de material fofo (peso específico médio = 0,746 g/cm<sup>3</sup>), correspondente a uma densidade relativa de cerca de 10%. Os valores dos índices de vazios antes e após o adensamento (para  $\sigma = 100$  kPa e 400 kPa) constam da Tabela 5.10.

**Tabela 5.10 – Valores dos Índices de Vazios – Amostra do resíduo do lixo passando na peneira 3/8"**

Amostra	Índice de vazios		
	Antes do adensamento	Após adensamento	
		$\sigma = 100$ kPa	$\sigma = 400$ kPa
Resíduo do pré-tratamento passando na peneira 3/8"	2,217	1,21	1,176

Quanto à velocidade de ensaio a conclusão que se chegou foi de que esta pouco influencia nos resultados obtidos (material seco com predominância granular) razão pela qual optou-se por uma velocidade mais rápida de 0,61 mm/min a fim de agilizar os ensaios.

A amostra foi ensaiada para tensões normais de 25, 50, 75, 100, 200 e 400 kPa, efetuando-se leituras (a cada 15 segundos) dos deslocamentos horizontais e verticais e das forças de cisalhamento.

(b) Curvas tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais normalizados e deformações volumétricas x deslocamentos horizontais normalizados.

A partir das leituras efetuadas em cada amostra ensaiada foram obtidos pares de valores relacionando os deslocamentos horizontais às tensões cisalhantes e deslocamentos verticais, possibilitando o traçado das curvas correspondentes em referência, apresentadas nas Fig. 5.10.

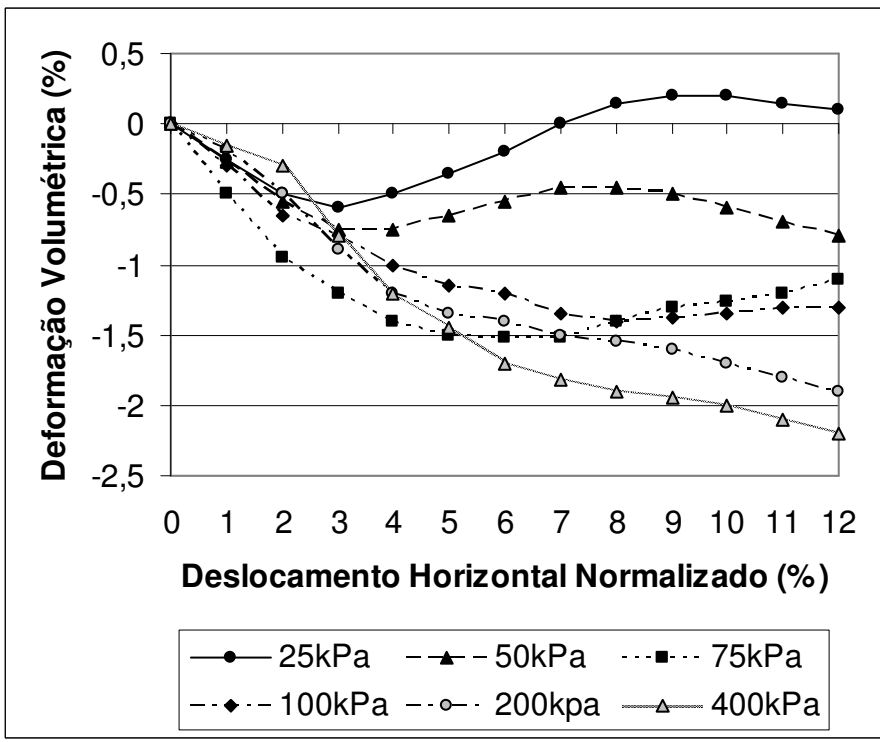
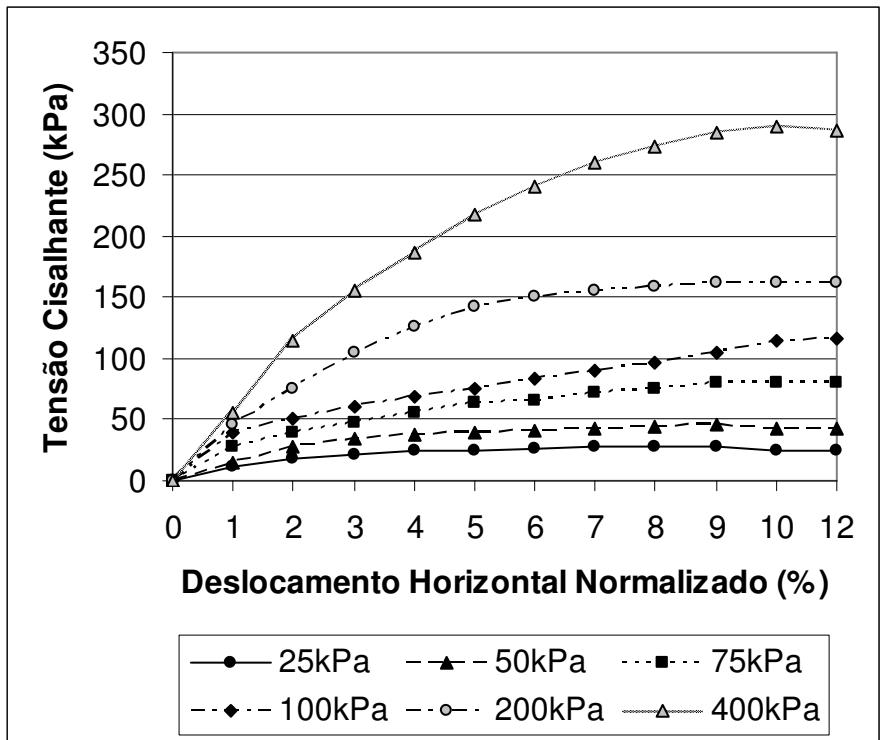
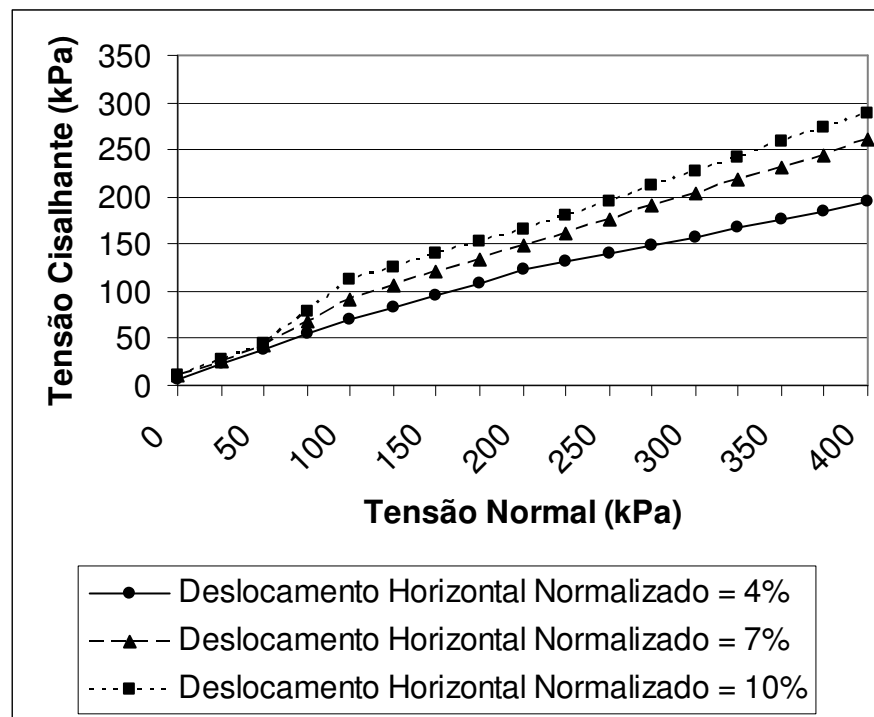


Fig. 5.10 - Curvas tensões de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados e deformações volumétricas x deslocamentos horizontais normalizados para o resíduo do pré-tratamento do lixo (material passando na peneira 3/8").

(c) Envoltórias de Resistência.

As envoltórias de resistência para a amostra em referência, apresentada na Fig. 5.11, foram obtidas a partir da curva tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais normalizados, considerando-se para as tensões cisalhantes valores correspondentes a deslocamentos horizontais normalizados de 4, 7 e 10% (tensões normais de 25, 50, 75 e 100, 200 e 400 kPa).



**Fig. 5.11 - Envoltórias para o resíduo do pré-tratamento do lixo (material passando na peneira 3/8")**

(d) - Parâmetros de Resistência

Os parâmetros de resistência mobilizados para deslocamentos horizontais normalizados de 4, 7 e 10%, correspondentes a amostra ensaiada, foram determinados a partir das respectivas envoltórias de resistência, com os resultados dos ensaios encontrando-se resumidos na Tabela 5.11.

**Tabela 5.11 - Resumo dos resultados de ensaios de cisalhamento direto com resíduo do pré-tratamento do lixo (material passando na peneira 3/8")**

Parâmetros mobilizados	Deslocamento Horizontal Normalizado (%)		
	4	7	10
$\phi'_{\text{mob.}}(^{\circ})$	35° 20'	36° 15'	37° 9'
$c'_{\text{mob.}}(\text{kPa})$	7	10	11
$\tau_{\text{mob.}}(\text{kPa})$ para $\sigma = 100\text{kPa}$	70	92	112

### 5.3.4 - Resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo (material passando na peneira 3/4") + areia.

#### 5.3.4.1 - Características dos materiais

As amostras ensaiadas foram obtidas dos materiais já descritos no item 5.4.1.1 (areia) e 5.4.2.1 (resíduo do pré-tratamento do lixo).

Deste modo procedeu-se a mistura do resíduo do pré-tratamento do lixo com percentuais de 20, 40 e 60% de areia em peso.

#### 5.3.4.2 - Procedimento de Ensaio

##### (a) - Sistemática dos Ensaios

Estas amostras foram ensaiadas, conforme apresentado na Tabela 5.1, utilizando-se equipamento especial de grande porte do Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA. Da mesma forma que o descrito nos itens 5.3.1.2 e 5.3.2.2, inicialmente foram efetuados ensaios experimentais visando definir a sistemática a ser adotada, sobretudo no que se refere à preparação das amostras e a velocidade dos ensaios.

No que se refere à preparação das amostras do resíduo do pré-tratamento do lixo + areia procedeu-se, inicialmente, uma homogeneização com o revolvimento e mistura manual dos materiais. A moldagem nas caixas do equipamento de

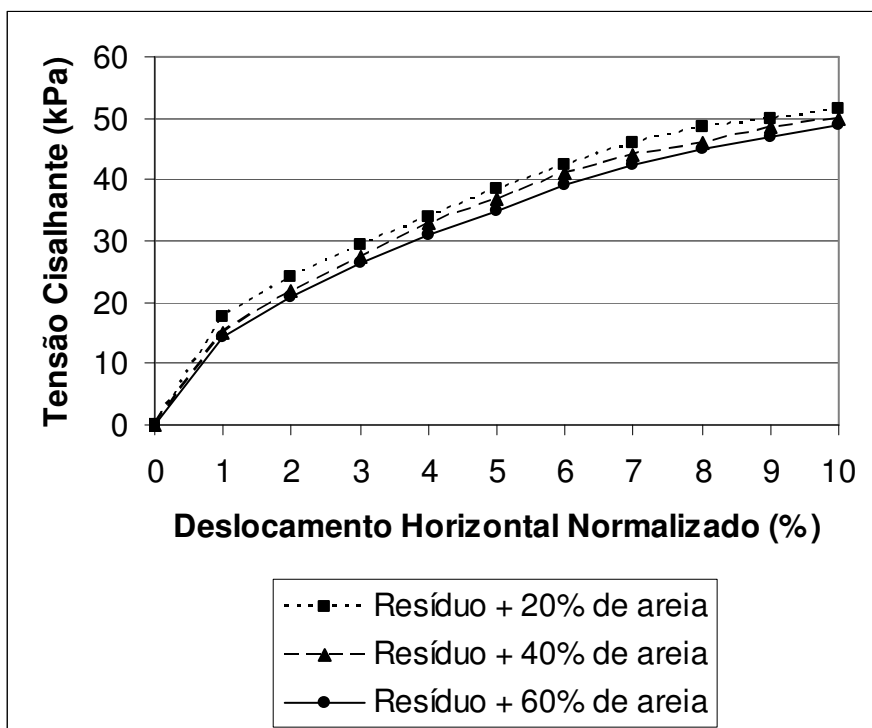


cisalhamento foi efetuada em camadas delgadas com ligeira compactação para a melhor acomodação do material. Quanto a velocidade de ensaio a conclusão que se chegou foi de que esta pouco influencia nos resultados obtidos, razão pela qual optou-se por uma velocidade mais rápida de 2,41 mm/min a fim de agilizar os ensaios.

Cada amostra especificada no item 5.3.3.1 foi ensaiada para uma tensão normal de 50 kPa, efetuando-se leituras (a cada 30 segundos) dos deslocamentos horizontais e das forças de cisalhamento.

(b) - Resultados Obtidos.

A finalidade principal destes ensaios da mistura resíduo do lixo + areia (em diferentes percentuais) foi a de se verificar a influência que esta adição de areia proporcionaria na resistência ao cisalhamento e nas próprias características de compressibilidade do material. Assim, foi utilizada apenas a tensão normal de 50 kPa, não sendo possível, portanto, a obtenção dos parâmetros de resistência das misturas obtidas. Na Fig. 5.12 são apresentadas as curvas tensão de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados das 3 amostras de resíduo + areia (em diferentes percentuais).



**Fig. 5.12 - Curvas tensão de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados para o resíduo do pré-tratamento do lixo passando na peneira 3/4" + areia em diferentes percentuais.**

Na Tabela 5.12 são indicados os valores correspondentes das tensões cisalhantes máximas (para  $\sigma = 50$  kPa) das diversas amostras ensaiadas, para diferentes valores de deslocamentos horizontais normalizados.

**Tabela 5.12 - Valores de tensão de cisalhamento para a mistura de resíduo do lixo passando na peneira 3/4" + areia em diferentes percentuais.**

Descrição	Tensões cisalhantes (kPa) para $\sigma = 50$ kPa		
	Deslocamentos Horizontais Normalizados		
	4(%)	7(%)	10(%)
Resíduo do lixo passando na peneira 3/4" + 20% de areia	34	47	51
Resíduo do lixo passando na peneira 3/4" + 40% de areia	33	43	50
Resíduo do lixo passando na peneira 3/4" + 60% de areia	32	43	50

## CAPÍTULO 6 – ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS.

### 6.1 – Introdução

Neste capítulo será procedida a análise global e interpretações dos resultados apresentados no capítulo anterior.

### 6.2 – Ensaio com amostras de areia + plástico.

Na Figura 6.1 são apresentadas as envoltórias de resistência das amostras 1 (areia), 2 (areia + 0,05% de plástico) e 3 (areia + 0,15% de plástico), para o deslocamento horizontal normalizado de 7%, correspondente à tensões cisalhantes mobilizadas próximas aos valores máximos para os materiais ensaiados. Desta figura pode-se concluir que o teor de plástico (fibras) presente na mistura areia + plástico tem influência marcante no aumento dos valores do intercepto coesivo ( $c'_f$ ) e da tangente do ângulo de atrito ( $\text{tg } \phi'$ ).

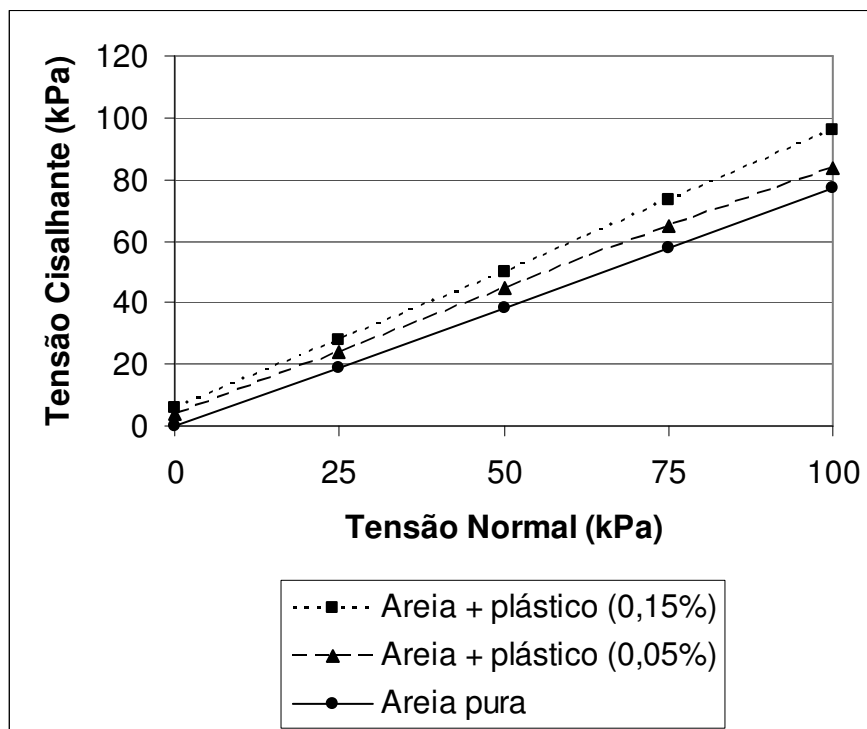
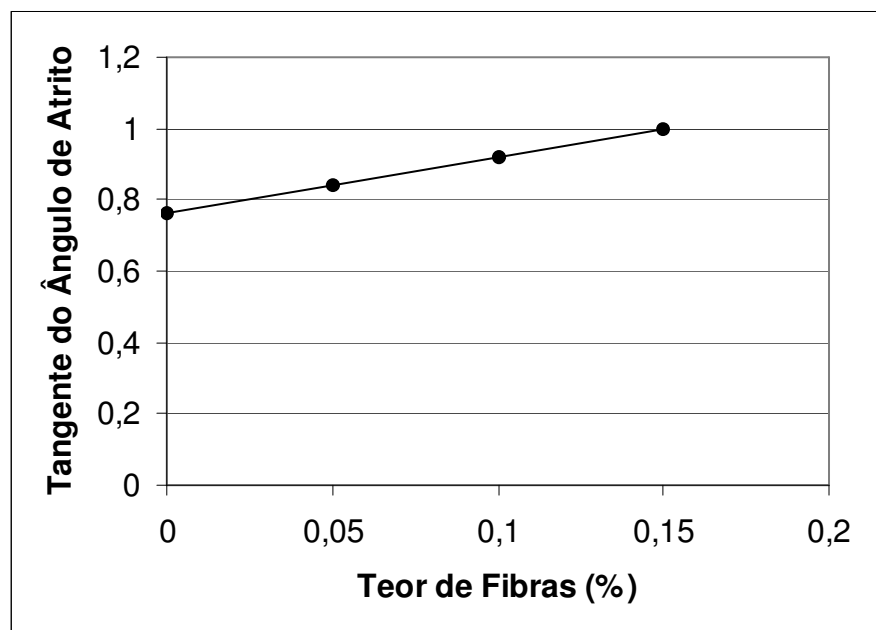
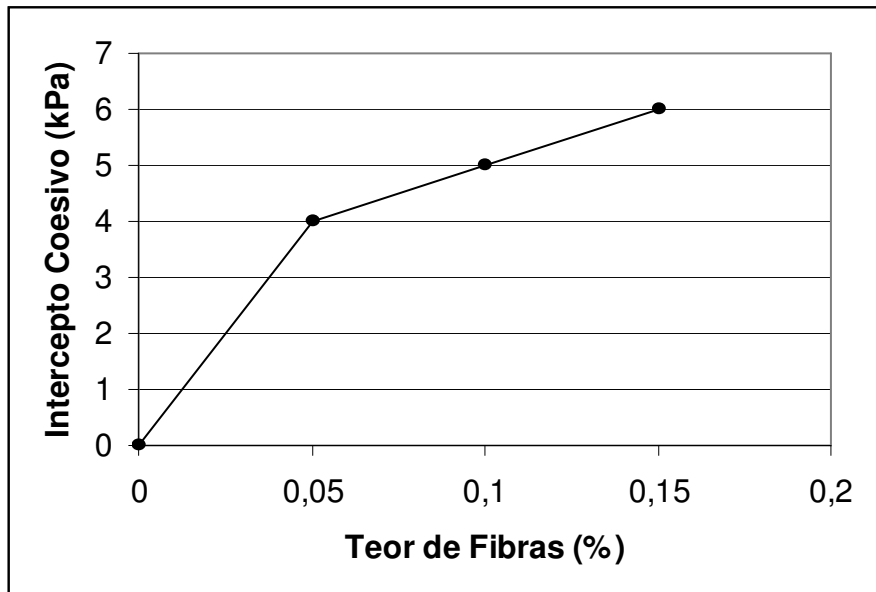


Fig. 6.1 - Envoltórias para as amostras 1, 2 e 3, correspondente ao deslocamento horizontal normalizado de 7%.

Na Figura 6.2 abaixo pode-se verificar que este aumento mostra-se proporcional ao percentual de fibras aplicado (entre 0 à 0,15%), sendo que o valor da tangente do ângulo de atrito ( $\text{tg } \phi'$ ) aumenta linearmente com o teor de fibras, enquanto que para o valor do intercepto coesivo ( $c'_f$ ) esta relação não é linear, com um percentual de aumento inicial mais expressivo.



**Fig. 6.2 – Variação do teor de fibras com a tangente do ângulo de atrito ( $\text{tg } \phi'$ ) e o intercepto coesivo ( $c'_f$ ).**

É importante ressaltar que este intercepto coesivo ( $c'_f$ ) representa apenas um ponto obtido do prolongamento da envoltória de resistência até o eixo em referência. Do ponto de vista físico este valor de  $c'_f$  não tem qualquer significado uma vez que o material ensaiado, na realidade, não apresenta nenhuma resistência ao cisalhamento para uma tensão normal nula.

Finalmente, a partir das curvas tensões de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados para as amostras 1 (areia), 2 (areia + 0,05% de plástico) e 3 (areia + 0,15% de plástico), correspondentes às tensões normais de 25, 50, 75 e 100 kPa apresentadas, respectivamente, nas Figuras 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 pode-se concluir quanto à mobilização das fibras no aumento das tensões de cisalhamento. Como pode ser verificado, todos os materiais ensaiados, para cada tensão normal considerada, apresentaram comportamentos muito semelhantes para valores de deslocamentos horizontais normalizados de até cerca de 1,5%. Tal fato comprova que até este valor de deslocamento horizontal normalizado não haviam sido mobilizadas, ainda, as fibras do material, isto é, a resistência ao cisalhamento era devida tão somente à parcela de atrito. Para deslocamentos horizontais normalizados superiores a 1,5%, quando começa, efetivamente, a mobilização das fibras, verificou-se um aumento de resistência que acompanhou o aumento do percentual de fibras das amostras.

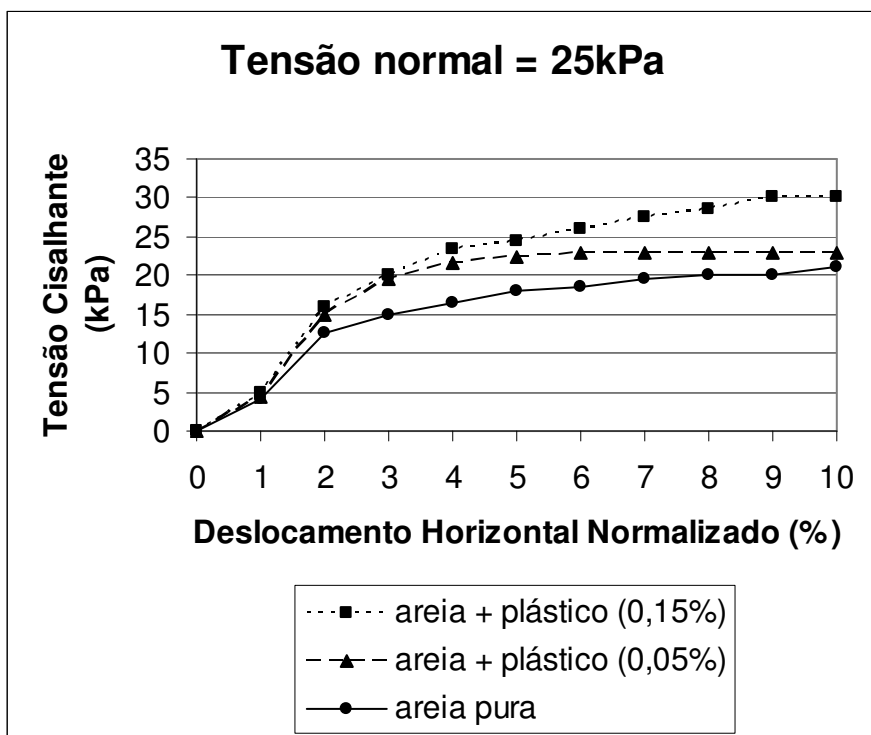


Fig. 6.3 – Curvas tensões de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados para as amostras 1, 2 e 3 para  $\sigma = 25$  kPa.

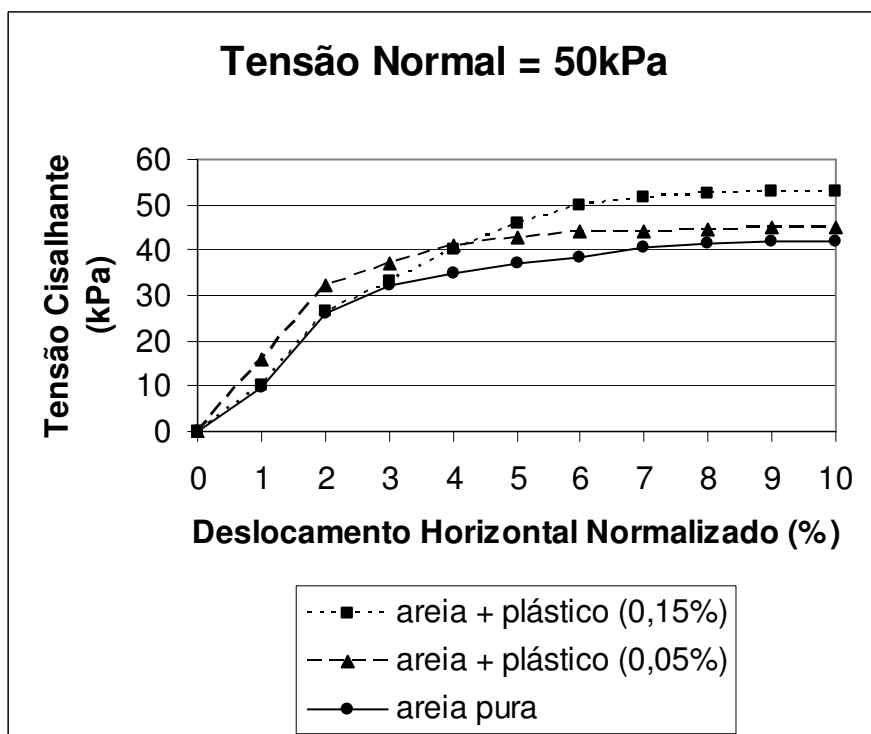


Fig. 6.4 – Curvas tensões de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados para as amostras 1, 2 e 3 para  $\sigma = 50$  kPa.

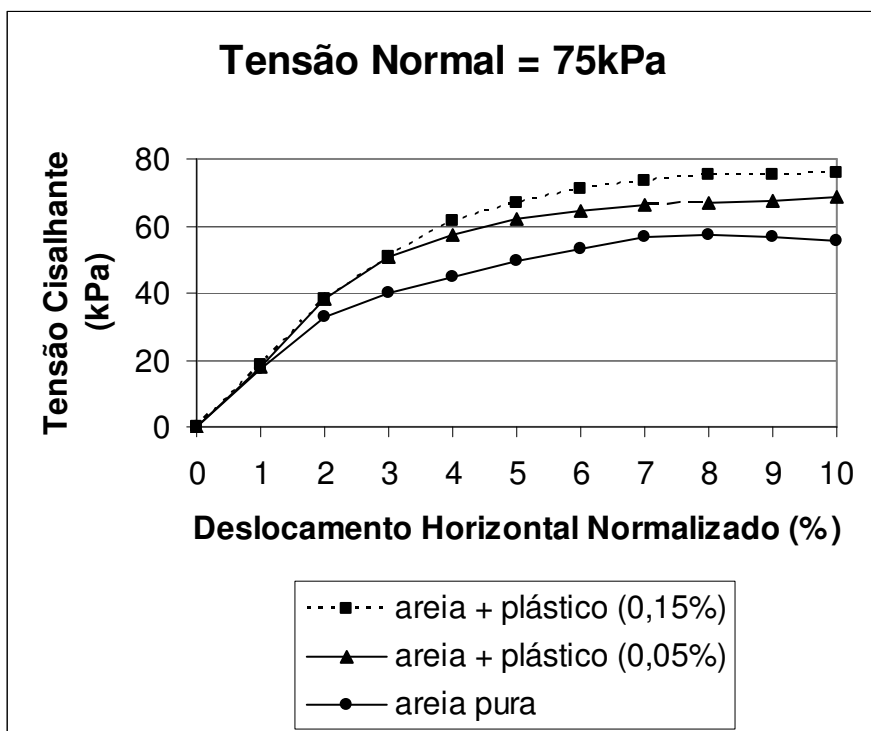


Fig. 6.5 – Curvas tensões de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados para as amostras 1, 2 e 3 para  $\sigma = 75$  kPa.

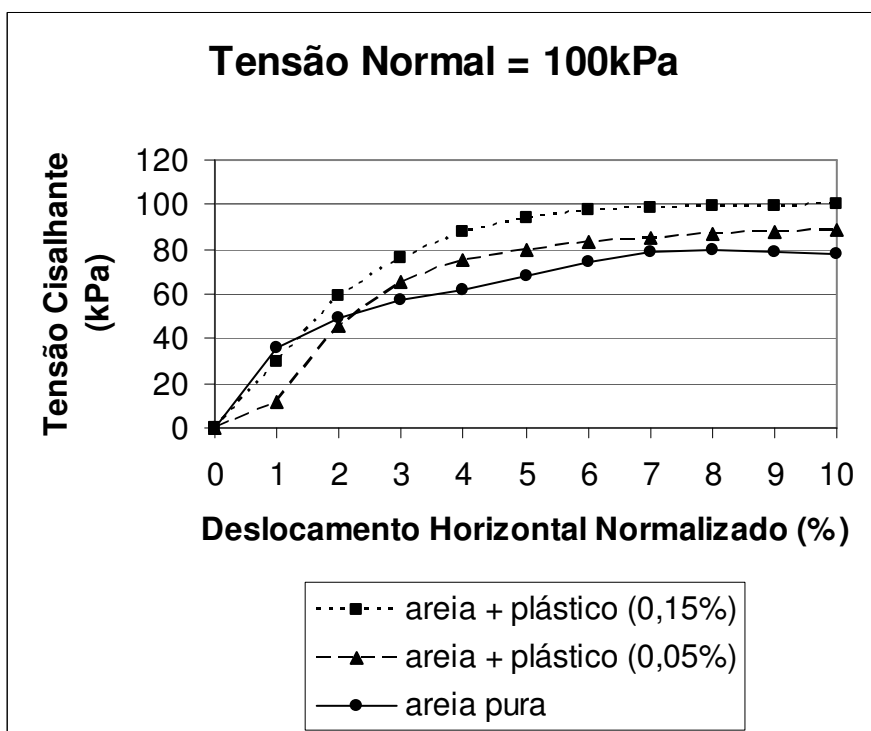


Fig. 6.6 – Curvas tensões de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados para as amostras 1, 2 e 3 para  $\sigma = 100$  kPa.

### **6.3 – Ensaio com amostras do resíduo do pré-tratamento com material passando na peneira 3/4"**

(a) Não foram observados pontos de pico, com a tensão cisalhante mostrando uma tendência de crescimento mesmo atingido o limite de deslocamento horizontal normalizado do ensaio em torno de 10%. Em função da maior compacidade das amostras, à medida que são aumentadas as tensões normais de ensaio, esta tendência de crescimento, função da inclinação das curvas tensão cisalhante x deslocamentos horizontais normalizados (Fig. 5.8), é tanto maior quanto maiores forem as tensões normais consideradas (25, 50, 75 e 100 kPa).

(b) Os parâmetros de resistência mobilizados mostraram uma tendência de crescimento com os deslocamentos horizontais normalizados. Como estes parâmetros são influenciados pelas fibras existentes, pode-se concluir que a mobilização destas fibras se faz de forma crescente com o aumento destes deslocamentos horizontais normalizados.

### **6.4 – Ensaio com amostras do resíduo do pré-tratamento passando na peneira 3/8".**

(a) Não foram observados pontos de pico bem caracterizados, sendo que para as tensões normais superiores a 50 kPa (75, 100, 200 e 400 kPa), mesmo atingido o limite de deslocamento horizontal normalizado do ensaio em torno de 10%, a tensão cisalhante mostra uma tendência de crescimento. Em função do próprio aumento da compacidade das amostras, à medida que são aumentadas as tensões normais de ensaio, esta tendência de crescimento, função da inclinação das curvas tensão cisalhante x deslocamentos horizontais normalizados (Fig. 5.11), é tanto maior quanto maior for a tensão normal considerada.

(b) As envoltórias de resistência para tensões normais de até 100 kPa, conforme representado na Figura 6.7, apresentaram dois trechos distintos, de acordo



com a tensão normal aplicada e o deslocamento horizontal normalizado considerado, com as seguintes tendências:

(b.1) Para tensões normais ( $\sigma'$ ) iguais ou inferiores a 50 kPa em que a resistência devida as fibras não é mobilizada, o modelo de Mohr-Coulomb permanece válido, ou seja:  $\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi'$  .....(6.1)

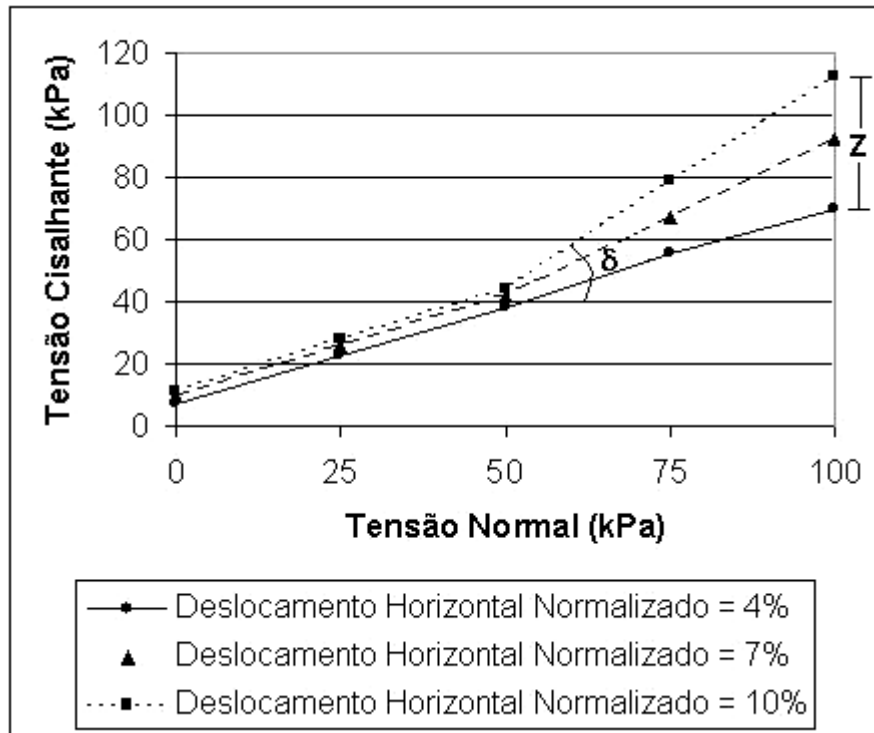
(b.2) Para tensões normais ( $\sigma$ ) entre 50 e 100 kPa a resistência ao cisalhamento é acrescida de uma parcela ( $Z$ ) devida à resistência à tração das fibras, ou seja, a resistência ao cisalhamento total pode ser representada pela seguinte expressão:  $\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi' + Z$  .....(6.2)

Esta parcela de resistência devida às fibras ( $Z$ ) é função da tensão normal e do deslocamento horizontal considerado, podendo ser representada pela seguinte expressão:

$$Z = (\sigma' - 50) \operatorname{tg} (\delta - \phi') \dots\dots\dots(6.3)$$

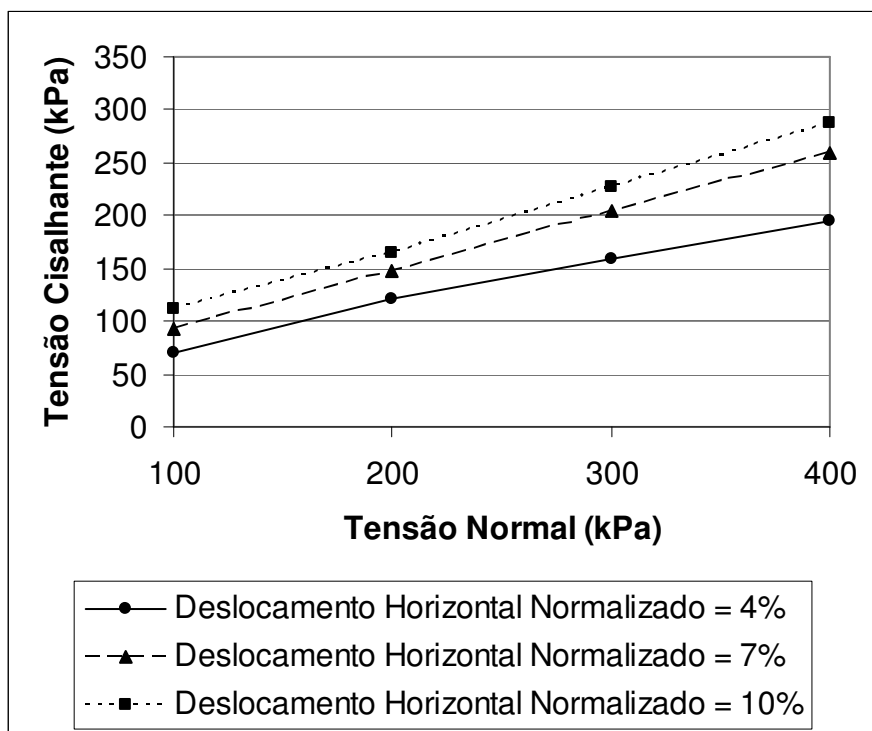
onde:  $\delta$  - ângulo entre a envoltória considerada e a horizontal.

No caso presente, esta parcela só começa a ser mobilizada para deslocamentos horizontais normalizados iguais ou superiores a 4%.



**Fig. 6.7 – Envoltórias para amostra do resíduo do pré-tratamento do lixo passando na peneira 3/8” para tensões normais até 100 kPa.**

(c) As envoltórias de resistência para tensões normais entre 100 e 400 kPa, conforme representado na Figura 6.8, apresentam uma tendência à linearidade com o aumento dos deslocamentos horizontais normalizados, com inclinações próximas à do ângulo de atrito inicial (para  $\sigma$  até 100 kPa).



**Fig. 6.8 – Envoltórias para amostra do resíduo do pré-tratamento do lixo passando na peneira 3/8" para tensões normais entre 100 e 400 kPa.**

As constatações acima referidas vem de encontro ao preconizado por Gray & Ohashi (1983) para os solos reforçados com fibras – fibrossolos (Fig. 3.1), por Kolsch (1993) para os resíduos sólidos urbanos (Fig. 2.12) e, também, por Feher (2002) para os resíduos do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo, particularmente aqueles com partículas de maiores diâmetros – 80 mm (Fig. 4.7).

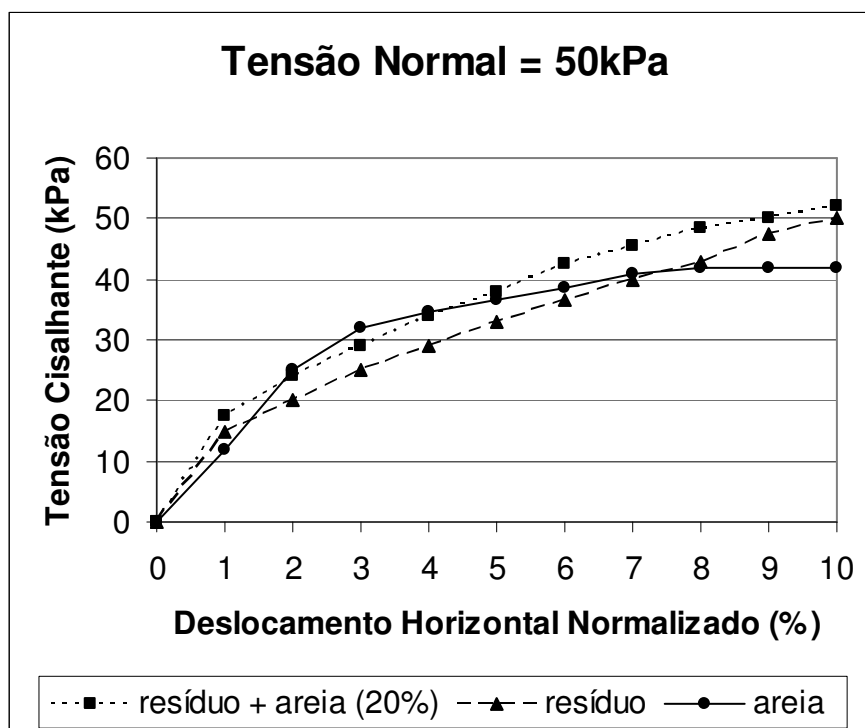
### **6.5 – Ensaio de amostras do resíduo do pré-tratamento do lixo (passando na peneira 3/4") + areia.**

Da análise dos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto realizados com as amostras do resíduo do pré-tratamento do lixo + areia (em diferentes percentuais) e, ainda, da comparação destes resultados com aqueles obtidos para a areia pura (Fig. 5.2) e para o resíduo do lixo sem mistura (Fig. 5.9), podemos concluir:

(a) As curvas tensão cisalhante x deslocamentos horizontais normalizados apresentam aspectos semelhantes ao obtido para o resíduo do lixo sem a mistura da areia, isto é, não foram observados pontos de pico, com a tensão cisalhante mostrando uma tendência de crescimento mesmo atingido o limite de deslocamento horizontal normalizado do ensaio em torno de 10%.

(b) A mistura de areia ao resíduo do lixo mostrou um aumento insignificante nas tensões cisalhantes mobilizadas em relação ao resíduo do lixo sem mistura, sendo os melhores resultados obtidos para o menor percentual (20%) adicionado.

(c) Para efeito comparativo, são apresentadas na Fig. 6.9, as curvas tensão de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados (para  $\sigma = 50$  kPa) da areia sem mistura, do resíduo do pré-tratamento sem mistura e do resíduo do pré-tratamento misturado a 20% de areia.



**Fig. 6.9 - Curvas tensão de cisalhamento x deslocamentos horizontais normalizados para o resíduo do pré-tratamento do lixo, o resíduo do pré-tratamento do lixo + areia (com 20%) e a areia.**

Na Tabela 6.1 são indicados os valores correspondentes das tensões cisalhantes máximas (para  $\sigma = 50$  kPa) das diversas amostras ensaiadas, para diferentes valores de deslocamentos horizontais normalizados.

**Tabela 6.1 - Valores de tensão cisalhante para o resíduo do lixo, a mistura de resíduo do lixo + areia em diferentes percentuais e a areia.**

Descrição	Tensões cisalhantes (kPa) para $\sigma = 50$ kPa		
	Deslocamentos Horizontais Normalizados		
	4%	7%	10%
Resíduo do lixo passando na peneira 3/4"	29	40	50
Resíduo do lixo passando da peneira 3/4" + 20% de areia	34	47	52
Areia	34	40	42

## CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

### 7.1 – Conclusões

Os ensaios de cisalhamento direto realizados com areia e tiras de plásticos, de uma maneira geral, forneceram resultados que refletem um comportamento semelhante aos apresentados na literatura internacional para os resíduos sólidos urbanos. Dentre estas semelhanças pode-se destacar:

(a) As fibras são as únicas responsáveis pelos valores de um intercepto coesivo, ou mais apropriadamente denominada, “pseudo coesão devido às fibras” ( $c'_f$ ), contribuindo, também, para o acréscimo nos valores do ângulo de atrito ( $\phi'$ ) dos materiais;

(b) A resistência ao cisalhamento pode ser decomposta em 2 parcelas distintas: a 1ª devido às forças de atrito e a 2ª referente às forças de tração das fibras ou “intercepto coesivo devido às fibras”. Para pequenas deformações existe apenas a mobilização das forças de atrito e à medida que estas deformações vão aumentando começam, também, a ser mobilizadas as forças de tração das fibras.

No que se refere, portanto, aos mecanismos de mobilização da resistência ao cisalhamento o estudo ora desenvolvido evidencia semelhanças de comportamento entre as amostras de areia com tiras de plásticos e os resíduos sólidos urbanos (lixo). Com base nessas semelhanças é razoável considerar, portanto, que o lixo pode ser caracterizado como um material com comportamento granular e que, devido às fibras presentes na sua composição, apresenta valores de uma “pseudo coesão” muitas vezes elevados. Esta afirmação possui um caráter apenas qualitativo, uma vez que o lixo, ao contrário dos solos em geral, cujas partículas podem ser consideradas incompressíveis, apresenta uma grande deformabilidade o que, evidentemente, influencia e governa o seu comportamento.

Quanto aos ensaios de cisalhamento direto realizados com o resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo, de uma maneira geral, os resultados obtidos foram semelhantes aos encontrados na literatura internacional, confirmando-se algumas características de comportamento dentre as quais podem ser destacadas:

(a) As curvas tensão cisalhante x deslocamentos horizontais normalizados não apresentam pontos de pico bem definidos, com a tensão cisalhante mostrando uma tendência de crescimento mesmo atingindo o limite de deslocamento horizontal normalizado dos ensaios.

(b) Os parâmetros de resistência mobilizados mostram uma tendência de crescimento com o aumento dos deslocamentos horizontais normalizados, o que a exemplo do que ocorre com o lixo, sugerem que a definição destes parâmetros deva ser feita com base em critérios de deformação.

(c) Para as amostras do resíduo do pré-tratamento passando na peneira 3/8" pode-se observar, adicionalmente, os valores mínimos de tensão normal e deslocamentos horizontais normalizados, a partir dos quais começam a ser mobilizadas as forças de tração das fibras. Esta constatação é muito importante e vem comprovar que o resíduo do pré-tratamento do lixo, pelo menos qualitativamente, apresenta comportamento semelhante ao preconizado por Kolsch (1993) para os resíduos sólidos urbanos e por Gray & Ohashi (1983) para os solos reforçados com fibras – fibrossolos.

(d) As tensões cisalhantes mobilizadas, para os diversos valores de deslocamentos horizontais normalizados considerados, mostraram-se superiores às obtidas para a areia pura. Isto vem confirmar as características satisfatórias destes materiais, quanto à resistência, para utilização em reaterros ou até mesmo, desde que, tecnicamente justificado, como camada de reforço em pavimentação viária.

Finalmente, os ensaios realizados com as amostras obtidas da mistura do resíduo do pré-tratamento do lixo + areia, forneceram resultados que nos permitem concluir:

(a) As curvas tensão cisalhante x deslocamentos horizontais normalizados apresentam aspectos semelhantes ao obtido para o resíduo do lixo sem a mistura da areia, isto é, não foram observados pontos de pico, com a tensão cisalhante mostrando uma tendência de crescimento mesmo atingido o limite de deslocamento horizontal normalizado do ensaio em torno de 10%.

(b) A mistura de areia ao resíduo do lixo mostrou um aumento insignificante nas tensões cisalhantes mobilizadas em relação ao resíduo do lixo sem mistura, sendo os melhores resultados obtidos para o menor percentual (20%) adicionado.

## **7.2 - Sugestões para Futuras Pesquisas**

### **(a) Mistura de areia e tiras de plástico**

A pesquisa desenvolvida no presente trabalho referente à resistência ao cisalhamento de misturas de areia e tiras de plástico em diferentes percentuais teve, como uma de suas finalidades básicas, estabelecer uma eventual analogia comportamental com o lixo doméstico. Por outro lado, todavia, conforme resultados obtidos, pôde-se comprovar a influência destas tiras de plástico no aumento da resistência ao cisalhamento das misturas referidas devido à incorporação de uma parcela de um intercepto coesivo.

Este aumento de resistência, conforme já referido, se mostrou basicamente proporcional ao percentual de tiras de plástico utilizado nas misturas, não sendo possível, todavia, o estabelecimento de uma lei de variação ou proporcionalidade. Para isso seria necessário considerar diversos outros parâmetros intervenientes, tais como a variação da compactação das misturas, a granulometria das areias ou material granular e as dimensões das tiras de plástico, entre outros.

Pesquisa complementar desenvolvida no sentido de estabelecer esta lei de variação, permitiria viabilizar este tipo de mistura, em determinadas circunstâncias, por



exemplo, como um tipo de solo reforçado de baixo custo. Neste caso o estudo específico da fluência destas fibras configura-se como fundamental para sua eventual utilização comercial.

**(b) Resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo.**

(b.1) O pré-tratamento mecânico-biológico do lixo é uma tendência mundial, porém, a par de suas vantagens indiscutíveis, tratando-se de um resíduo descartável, continuará a ocupar espaços cada vez mais escassos nas grandes cidades. Assim, uma alternativa para minimizar este problema seria a sua utilização como material de construção. Uma linha de pesquisa neste sentido foi iniciada no presente trabalho, com a mistura deste resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo com diferentes percentuais de areia. Assim, pesquisa complementar poderia ser desenvolvida no sentido da utilização do resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico do lixo puro ou misturado com areia ou outros materiais, por exemplo, como agregado fino para camadas asfálticas de pavimentos viários de baixo custo;

(b.2) O comportamento do resíduo do pré-tratamento observado nesta pesquisa, semelhante, no que se refere à mobilização da resistência das fibras, ao modelo preconizado por Kolsch (1993) para os resíduos sólidos urbanos, merece uma investigação mais aprofundada, visando a criação de um modelo próprio para estes resíduos. Neste sentido, seria importante a execução de ensaios de cisalhamento direto, por exemplo, com a utilização de maiores tensões normais para se verificar até que ponto o mesmo modelo continua válido. A influência da compactação, que é fator preponderante nos parâmetros de resistência dos materiais, também pode ser melhor investigada, com a execução, por exemplo, de ensaios de cisalhamento direto com o resíduo, para amostras com diferentes compactações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1987. Resíduos Sólidos: Classificação – NBR 10.004/87.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1987. Resíduos de Serviços de Saúde – Classificação - NBR 12.808/87

ABREU, R.C. (2000). Compressibilidade de Maciços Sanitários. Tese de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 241p.

AGUIAR, A.B. de (2001). Ensaio de Permeabilidade in Situ em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro, RJ

BEAVEN, R. P. & POWRIE, W. (1995). Determination of the Hydrogeological and Geotechnical Properties of Refuse using a large scale Compression Cell. Proceedings of the Fifth Sardinia International Landfill Symposium, S. Margherita Di Pula, Cagliari. v.2, p.745-760.

BENVENUT, C. & CUNHA, M. A. (1991). Escorregamento em Massa de lixo no Aterro Sanitário Bandeirantes em São Paulo. II Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos – REGEO'91 – v.2, p. 55-66.

BIDLINGMAIER, W. & SCHEELHAASE, T. (1997). Geomechanical Evaluation of Mechanical-Biological Pretreated Waste. Proceedings Sardinia 1997, Sixth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1997, p.495-500.

BLIGHT, G. E.; BALL, J. M. & BLIGHT, J. J. (1992). Moisture and Suction in Sanitary Landfills in Semiarid Areas. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 118(6).

BLENGINO, A. M.; VEGGI, S.; MANASSERO, M.; ROSSELLO, A. & SPANNA, C. (1996). Investigation, Monitoring System and Stability Analysis of an Old Canyon. In: *Proc. Of The second International Congress on Environmental Geotechnics*, ISBN 90 5410 848 7, Osaka, Japan, A.A. Balkema, v.2, p. 629-634.

BRANDT, H. (1990). Personal Communication with Manassero et al.(1996), from dito.

BRANDT, H. (1994). Personal Communication with Manassero et al. (1996), from dito.

BRITO, J. C. X. (1999). *Peculiaridades dos Resíduos Sólidos Urbanos e Especiais*. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.

CAICEDO, B.; YAMIN, L.; GIRALDO, E. & CORONADO, O. and SOLER, N. (2002). Geomechanical properties of municipal solid waste in Doña Juana sanitary landfill. *Proc. Environmental Geotechnics (4th ICEG)*, de Mello & Almeida (eds) © Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 501 0, p.177-182.

CALDERONI, S. (1998) – *O\$ Bilhão\$ Perdido\$ no Lixo*. Humanitas Publicações FFLCH/USP (2ª ed.), 345p.

CANTUÁRIA COSTA, L. (2001). *Estudo do Pré-Tratamento Mecânico-Biológico de Resíduos Sólidos com ênfase em Compressibilidade*. Tese de Mestrado. COPPE / UFRJ, 137p.

CARVALHO, M. F. (1999). Comportamento Mecânico de resíduos sólidos Urbanos. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 300p.

CEPOLLINA, M.; KAIMOTO, L. S. A. & LUDERMANN, S. M. (1994) – Investigações de Condicionantes Geotécnicos de Maciços Sanitários. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, v.3. Foz do Iguaçu, nov. 1994, p.979-986.

COLLINS, H. J. (2001). Compactation of Municipal Solid Waste after Mechanical and Biological Treatment. Proceedins Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill symposium S. Margherita di Pula, Gagliari, Italy: 1 -5 October 2001, p.456-464.

COMLURB (1999). Análise Gravimétrica do Lixo da Cidade do Rio de Janeiro.

CONSOLI, N. C.; MONTARDO, J. P. & PRIETTO , P. D. M. (2000). Comportamento Mecânico de uma Areia Cimentada Reforçada com Resíduos Plásticos. Seminário Nacional sobre Reuso / reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais. SMA / SP, agosto/2000, p.1-18.

COUMOULOS, D. G; KORYALIOS, T. P; METAXAS, I. L. & GIOKA, D. A. (1995). Geotechnical Investigation at the Main Landfill of Athens. Proceedins Sardinia 95, Fifth International Lasndfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995, p.885-895.

COUMOULOS, D. G. & KORYALIOS, T. P. (1999). Prediction of Long Term Settlement Behaviour of Landfill Covers After Closes. Proceedings Sardinia 99, Seventh

International Waste Management and Landfill Symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, p.505-512.

DACH, J.; OBERMAANN, I.; JAGER, J. & OSTROWSKI, W. (1997). Wasser- und Gasrasport in Deponien mit Mechanisch-Biologisch Vorbehandelten Abfällen. Wasser & Boden, 49. Jg., Heft 6, p.9-14.

DEL-GRECO, O.; OGGERI, C. (1993). Geotechnical Parameters of Sanitary Wastes. IV International Landfill Symposium – Sardinia'93. S. Margherita di Pula, Italy, October, 1993, p.1421-1431.

DELMAS, P. (1979). Sols Reforcés par géotextiles - premieres études. Tese de Doutorado, IRIGM / Universidade de Grenoble.

DUELLMANN, H. (2002). Untersuchungen zum Einbau von MBA-Abfaellen auf der Zentraldeponie Hannover. Laboruntersuchungen zum Verdichtungs-, Durchlaessigkeits-, Last-Setzungs- und Scherverhalten. Unpublished. By order of Abfallwirtschaftsbetrieb Hannover.

EDIL, T. B.; RANGUETTE, V. J. & WUELLNER, W. W. (1990). Settlement of Municipal Refuse. Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva and G. David Knowles, Eds., American society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, p.225-239.

EHRlich, M., ALMEIDA, M.S.S, BARBOSA, M.C.. Pollution Control of Gramacho Municipal Landfill. First Int. Cong. on Environmental Goetechnics. Edmonton, Canadá, 1994.

FATANI, M. N.; SHRADER, S. L. & AL-JOULANI, N. (1991). Reinforcing Soil with Aligned and Randomly Oriented Metallic Fibers, *Geotechnical Testing Journal*, 14(1).

FEHRER, K. (2002). Geotechnisches Verhalten von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur Wien.

FUNGAROLI, A. A. & STEINER, R.L. (1979). Investigation of Sanitary Landfill Behavior. Final Report – USEPA Report EPA-600/2-79-053, Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati, Ohio.

GABR, M.A & VALERO, S.N. (1995). Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste. *Geotechnical Testing Journal*, 18(2).

GANDOLLA, M.; DUGNANI, L.; BRESSI, G. & ACAIA, C. (1994). Determinação do Efeitos do Recalque sobre os Depósitos de Lixo Sólido Municipal. *Simpósio Internacional de Destinação do Lixo*, nov.1994, Salvador, p.191-211.

GIGAN, J. P., KHAY, M., MARSHALL, J. & LEDELLIOU, M. (1989). Propriétés mécaniques du Texsol – application aux ouvrages de soutènement. 12<sup>th</sup> Int.Conf. on soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro, Vol. 2, p.1251 - 1252

GILBERT, P. A. & MURPHY, W. L. (1987). Prediction and Mitigation of Subsidence Damage to Hazardous waste Landfill Covers. EPA 600/2-87, PB 87-175386, Cincinnati, Ohio, USA.

GOMES, M. M. (1996). Concepts, Processes, Technologies, Operation Siting, Lining, Drainage & Landfill Mechanics Regulations, Environmental Impact & Aftercare. Report Based on Sardinia 95. Swedish Institute.

GOMES, R. C. (1992) – Resistência ao Cisalhamento de Interfaces Solos-Geotexteis. Relatório de Pesquisa, Instituto Tecnológico da Aeronáutica - ITA.

GOMES, R.C. (1993). Interação Solo-Reforço e Mecanismos de Ruptura em Solos Reforçados com Geotextil. Tese de Doutorado USP, 270p.

GRAY, D. H. & OHASHI, H. (1983). Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand. Journal of Geotechnical Engineering, v.109, no.3, p.335-353.

GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q. & TANCREDI, G. (1995). Contribution to a Technical Classification of MSW. Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S.Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995, p.761-768.

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, November, 1996, v.2, p.641-646.

HEERENKLAGE, J. & STEGMANN, R. (1995). Overview on Mechanical-Biological Pretreatment of Residual MSW. Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S.Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995.

HEISS-ZIEGLER, C. & FEHRER (2003). Geotechnical Behaviour of Mechanically-Biologically Pre-Treated Municipal Solid Waste (MSW). Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 2003.

HOWLAND, J. D. & LANDVA, A. O. (1992). Stability Analysis of a Municipal Solid Waste Landfill. Stability and Performance of Slopes and Embankments, ASCE GSP n.31, v.2, New York..

HUITRIC, R. (1981). Sanitary Landfill Settlement Rates. Technical University of Berlin.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT (1995). Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 2<sup>o</sup> ed. São Paulo: IPT/ CEMPRE, 278 p. (IPT. Publicação, 2.163).

JESSBERGER, H.L. (1990). Some Geotechnical Aspects of Waste Disposal. Proceedings of 6<sup>th</sup> International Congress of IAEG, Balkema, Rotterdam, p.131-138.

JESSBERGER, H.L. & KOCKEL, R. (1993). Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Materials. Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1993, p.1383-1392.

JESSBERGER, H. L. (1994). Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction – Parts 1 to 3. Proc. Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, v.107, Apr., p.99-113.

JESSBERGER, H. L.; SYLLWASSCHY, O. & KOCKEL, R. (1995). Investigation of Waste Body-Behaviour and Waste-Structure-Interaction. Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995, p.731-743.



JESSBERGER, H. L. (1984). Untersuchung zur Tiefenverdichtung von Deponien. Forschungsbericht 84-1, Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum.

JEWELL, R.A & WROTH, C.P. (1987). Direct Shear Tests on Reinforced Sand. *Geotechnique* 37 (1), p. 53-68.

KAIMOTO, L.S.A. & CEPOLLINA, M. (1997). Considerações Sobre Alguns Condicionantes e Critérios Geotécnicos de Projeto e Executivos de Aterros Sanitários. Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, Porto Alegre, p.51-54.

KAVAZANJIAN, E.; JR.; MATASOVIC, N.; BONAPARTE, R. & SCCHMERTMANN, G. R. 1995. Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis. *Geoenvironment* 2000. ASCE Geotechnical Special Publication No 46, V 2, p.1126-1141.

KAVAZANJIAN, E.; MATASOVIC, N. & BACHUS, C. (1999). Large Diameter Static and Cyclic Laboratory Testing of Municipal Solid Waste. *Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium*. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, p.437-444.

KAVAZANJIAN, E. (2001). Mechanical Properties of Municipal Solid Waste (2001) - *Proceedings Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium* S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy: 1 -5 October 2001, p.415-424.

KAVAZANJIAN, E. JR.; MATASOVIC, N. & BACHUS, R.C. (2001). Larger Diameter and Cyclic Laboratory Testing of Municipal Solid Waste - *Proceedings Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium* S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy: 1 -5 October 2001.

KIM, Y. M. (1996). Ground Improvement of Municipal Waste Landfill by Dynamic Compaction. Proc. 2<sup>nd</sup> Intern.Congr. on Environmental Geotechnics, Balkema, Rotterdam, v.2, p.653-656.

KLÜMPER, A. (1998). Untersuchung und Bewertung des geotechnischen Verhaltens von mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen auf Grundlage der Bestimmung ausgewählter bodenmechanischer (abfallmechanischer) Parameter. Diplomarbeit, Universität Gesamthochschule Essen.

KNOCHENMUS, G.; WOJNAROWICZ, M. & VAN IMPE (1998). Stability of Municipal Solid Wastes. In: Proc. Of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, Sêco e Pinto (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 006x, p.977-1000.

KOCKEL, R. (1995). Scherfestigkeit von Mischabfällen in Hinblick auf die Standsicherheit von Deponien. Schriftenreihe des Institute für Greendbau, Ruhr - Universität Bochum, Heft 24.

KÖLSCH, F. (1993). The Bearing Behaviour of Domestic Waste and Related Consequences for Stability. Proceeding Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1393-1410.

KÖLSCH, F. (1995). Material Values of some Mechanical Properties of Domestic Waste. Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995, p.711-729.

KÖNIG, D. & JESSBERGER, H. L.(1997). Waste Mechanics. In: ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, p.35-76.

KUEHLE, M.; WEIDEMEIER & DOEDENS, H. (2003). Landfilling and Properties of MBP Waste. Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October,2003.

LANDVA, A. O. & CLARK, J. I. (1990). Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice. ASTM STP nº 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, p.86-103.

LIMA, M.W & SURLUIGA, G.C (2000). Análise das Características do Resíduo Sólido Urbano na Cidade do Rio de Janeiro. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre.

MAHLER, C. F (2002). Proposed Scientific follow-up of the Project of Mechanical Biological Treatment of UrbanSolid Waste, Final report. Fundação COPPETEC, for Faber Recycling and the German Ministry of Education and Reseach.

MAHLER, C. F & DE LAMARE NETO, A. (2000). Análise da Estabilidade do Vazadouro da Rua Duarte da Silveira (Petrópolis), considerando o efeito das fibras – XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, RGS, 2000.

MAHLER, C. F & DE LAMARE NETO, A. (2000). Analylis of Municipal Landfill Stability Considering the Fibre Effect – 5 th. Inernational Symposium on Enviromental Geotechnology and Global Sustainable Development, Belo Horizonte, Brazil, 2000.

MAHLER, C. F & DE LAMARE NETO, A. (2003). Shear Resistance of Mechanical Biological Pre-Treated Domestic Urban Waste. Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October, 2003.

MAHLER, C. F. & ITURRI, E. A. Z. (1998). Solid Waste Landfill Studied by Means of the finite Element Method. 4<sup>o</sup> Simpósio Internacional de Geotecnia Ambiental, Boston, agosto 1998.

MAHLER, C. F.; BURIN, E. & OLIVEIRA, F.J.P (1998). Reflections on the Stability of a Municipal Sanitary Landfill.

MAILE, A.; HALFMANN, A.; SCHEELHAASE, T. & BIDLINGMAIER, W. (1998). Langzeitverhalten von Mechanisch-Biologisch Vorbehandeltem Restmüll auf der Deponie – Abfallmechanische Kenngrößen und Emissionsverhalten. In: BMBf – statusseminar. Verbundvorhaben MBV von zu Deponierenden Abfällen, 17-19. März, Potsdam 1998.

MAINSONVILLE, C. (1997). Private Communication.

MANASSERO, M. (1990). Pumping Tests in a Municipal Solid Waste Landfill. Geotechnics Seminar, ENEL-CRIS, Milano, Italy.

MANASSERO, M.; VAN IMPE, W.F. & BOUAZZA, A. (1996). Waste Disposal and Containment. Technical Committee on Environmental Geotechnics, ISSMFE, Preprint of Special Lectures, 2<sup>nd</sup> Int. Congress on Environmental Geotechnics. p.193-242.

MARIANO, M. O. & JUCÁ, J.F.T. (1998). Monitoramento de recalques no aterro de resíduos sólidos da Muribeca – XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Geotécnica, v.3 – nov. 1998, Brasília, p.1671- 1678.

MINGLIANG XIE, J. F. Wagner and Rettenberger (2001). Permeability Characteristics of Mechanical - Biologically Pretreated municipal Solid Waste - Proceedins Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Gagliari, Italy: 1-5 October 2001, p.466-472.

MITCHELL, J. K. (1983). Fundamentals of Soil Behavior. 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, New York.

MITCHELL, J. K. & VILLET, W. C. B. (1987). Reinforcement of Earth Slopes and Embankments. NCHRP report No. 290, Transportation Research board, Washington, 323p.

MÜNNICH, K., MAHLER, C.F. & MAAK, D. (2001). Mechanical Biological Pre-treatment of Residual Waste in Brazil. Eighth International Conference on Waste Management. Sardinia, 2001, Italy.

MÜNNICH, K., MAHLER, C.F. & FRICKE, K. (2003). Mechanical and Biological Pre-treatment in the Waste, Müll und Abfall Journal, Germany (in German).

OLIVEIRA, P.J (1996). Geotechnical Characteristics of Sanitary Landfill of Municipal Domestic Wastes, Londres (polluted + Marginal Land, 4 th Int. Conf., Brunel University, Londres, UK.

OWEIS, I. S. & KHERA, R. (1986). Criteria for Geotechnical Construction of Sanitary Landfills. International Symposium on Environmental Geotechnology. Allentown, USA, p.205-222.

OWEIS, I. S.; SMITH, D. A.; ENWOOD, R. B. & GREENE, D. S. (1990). Hydraulic Characteristics of Municipal Refuse. ASCE Journal Geotechnical Eng., v. 116(4).

PAGOTTO, A. & RIMOLDI, P. (1987). Design and Construction of a Geogrid Reinforced Embankment over Waste Material. Proc. Geosynthetics'87, New Orleans, L.A., Industrial Fabrics Association International, St. Paul, Minnesota.

PALMEIRA, E.M. & MILLIGAN, G.W.E. (1989). Scale Effects in Direct Shear Tests on Sand. Proc. XII ICSMFE, Rio de Janeiro, V.2, p. 739-742.

PATTON, F. D.(1966). Multiple Modes of Shear Failure in Rock and Related Materials. Ph.D Thesis, Univ. Of Illinois, 282 pp.

PHILLIP, L. & JURAN, I. (1995). Texol: Material Properties & Engineering Performance. Transportation Research Record, Soil Geology and Foundation. Vol. No 1474, p.3-13.

POWRIER, W.; BEAVEN, R. P. & HARKNESS, R. (1999). Applicability of Soil Mechanics Principles to Household Waste. Proceedins Sardinia 1999, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Gagliari, Italy: 4-8 October 2001, p.429-436.

REUTNER, E. (1995). Verformungsanalyse und standsicherheitsbeurteilung für die Zentraldeponie Hannover. Geotechnische Probleme beim Bau von Abfall - Deponien, 11. Nürnberger deponieseminar, Mullner, B. (ed.) Eigenverlag LGA.

RICHARDSON, G. & REYNOLDS, D. (1991). Geosynthetics Consideration in a Landfill on compressible Clays. Proc. Geosynthetics 91, Atlanta, GA (preprint).

RIMOLDI, J.V.V. (1986). Desenvolvimento de um Equipamento para Estudo da Interação Solo-Geotextil. Relatório de Pesquisa, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 52p.

SANCHEZ – ALCITURRI, J. M.; PALMA, J. SAGASETA, C. & CANIZAL, J. (1993). Three Years of Deformation Monitoring at Meruelo Landfill. In: Proc. International Conference Green'93, Waste disposal by Landfill – GREEN' 93, Sarsby (ed), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 356 6, p.365-371.

SANTOS, L. A. O. & PRESA, E. P. (1995). Compressibilidade de Aterros Sanitários Controlados. III Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos – REGEO'95, v.2, Ouro Preto, MG, p.577-591.

SANTOS, S.M. (1997). Propriedades Geotécnicas de um Aterro de resíduos Sólidos. Recife. Tese de Mestrado. Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 108p.

SCHEELHAASE, T.; BIDLINGMAIER, W.; KLUMPER, A.; MAILE, A. & RECHBERGER, M. (2001). Geotechnical Behaviour of Mechanically Pretreated Residual Waste - Proceedins Sardinia 2001, Eighth International Waste Management

and Landfill symposium S. Margherita di Pula, Gagliari, Italy: 1-5 October 2001, p.445-453.

SCHLOSSER, F. & LONG, N. C. (1972). Comportement de la terre armée dans les ouvrages de soutènement, 5<sup>th</sup> European Conf. On soil Mechanics and Foundations, Madrid, Espanha, vol.1, p.299-306.

SINGH, S. & MURPHY, B. (1990). Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills. Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice. ASTM STP. N. 1070, Arvid Landva and G.David Knowles, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, p.240-258.

SOWERS, G. F. (1973). Settlement of Waste Disposal Fills. Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering's, v.2, Moscow, URSS, 1973, p.207-210.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H., H. & VIGIL, S. (1993). Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, 978p.

TEODORO, J. M. & BUENO, B. S. (1998). Solos Reforçados com Fibras: Uma Abordagem Sistemática Sobre a Resistência de Compostos Argilosos e Arenosos. XV COBRAMSENG. Novembro, 1998. Brasília, DF.

TEXSOL (2002). Fiber Reinforcement. ISSMFE-TC-17.

TURCZYNSKI, U. (1988). Geotechnische Aspekte beim Aufbau von Mehrkomponentendeponien. Dissertation na der Bergakademie Freiberg (in German).



VAN IMPE, W. F; MANASSERO, M. & BOUAZZA, A. (1996). Geotechnical Properties of MSW. State of the Art Report. Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Environmental Geotechnics, Osaka, Japan.

VAN IMPE, W. F. (1998). Environmental Geotechnics. ITC5 Activies – State of the Art. 3<sup>rd</sup> Int. Conf.on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal.

VAN MEERTEN, J. J.; SELLMEIJER, J. B. & PEREBOOM, D. (1995). Prediction of Landfill Settlements. Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, s. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, october 1995.

VILAR, O. M. & CARVALHO, M. F. (2002). Shear Strength Properties of Municipal Solid Waste. Environmental Geotechnics (4<sup>th</sup> ICEG), de Mello & Almeida (eds) © 2002 Swts & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 501 0, p.59-64.

VON FELDE, D. & DOEDENS, H. (1997). Mechanical-Biological Pretreatment: Results of Full Scale Plant. Proceedings Sardinia 1997, Sixth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1997, p.531-542.

WALL, D. K. & ZEISS, C. (1995). Municipal Landfill Biodegradation and Settlement. Journal of Environmental Engineering, ASCE, v.121, no 3.

WATTS, B. S. & CHARLES, J. A. (1990). Settlement of Recently Placed Domestic Refuse Landfill. Proceedings Institution of civil Engineering. Part 1, 1990, p.971-993.

WIEMER, K. (1982). Qualitative und Quantitative Kriterien zur Bestimmung der Dichte von Abfällen in Geordneten Deponien. Dissertatio, Technical University of Berlin.

WITHIAN, J.L., TARVIN, P.A., BUSHELL, T.D., SNOWW R.E & GERMAN, H.WW. (1995). Prediction and Performance of municipal Landfill Slope. Proc. International Conference the geoenvironment 2000, ASCE GSP nº 46, New York.

VIDAL, D., MOREIRA FILHO, L.A., MONTEZ, F. & HUCH, W. (1988). Desenvolvimento de um Dispositivo para Estudo da Interação Solo - Geotextil. Simpósio sobre novos conceitos em ensaios de Campo e Laboratório. Rio de Janeiro, p. 475-482.

ZIEHMANN, G. (1999). Bilinear Model for Stability of Domestic Waste Landfills. Slope Stability Engineering, Yagi, Yamagami & Jiang © 1999 Balkema. Rotterdam, IBSN 90 5809 079 5, p.853-858.

ZIEHMANN, G. (2001). Mechanical Properties of Waste in Low Income Countries. Proceedins Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill symposium S. Margherita di Pula, Gagliari, Italy: 1 -5 October 2001, p.139-144.

ZIEHMANN, G., MÜNNICH, K. & FRICKE, K. (2003). Deposition of Mechanical-Biologically Treated Municipal solid Waste. Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October, 2003.

**ANEXO 1** - Analysis of Municipal Landfill Stability Considering the Fibre Effect – 5 th. International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, Belo Horizonte, Brazil (2000).

**COD 292**  
**ID 247**



### **Analysis of Municipal Landfill Stability Considering the Fibre Effect**

**Claudio F. Mahler**

*Rio de Janeiro - RJ, Brazil*

*COPPE/UFRJ*

*Mahler@coc.ufrj.br*

**Ademaro de Lamare Neto**

*Rio de Janeiro - RJ, Brazil*

*COPPE/UFRJ*

#### **ABSTRACT**

*Landfill stability in recent years has been computed using the classical methods of limit equilibrium theory and by adopting resistance parameters ( $c$  and  $\phi$ ) for waste, obtained from Brazilian and international publications. Only a few resistance tests have been performed in the world using this material. Moreover, its change in resistance with biodegradation is relatively unknown. Some laboratory tests have been performed in Europe and the USA, but the results are not necessarily valid for Brazilian conditions. Residual waste produces very different parameters to those of soil. According to some authors the residual material could be considered as a compound that consists of a mass and a structure. Plastic and textiles give this matrix form to the waste composition and this increases the stability resistance of waste embankments enormously. Landfills comprise partially saturated heterogeneous material, where leachate and gas pressure play an important role. The simple classical methods used in soil mechanics can be very limited. In Germany, in the last few years, two different methods for stability analysis have been developed: one based on the strain of waste (Kochel, 1996), from the Ruhr-University Bochum*

*and the other on the traction effects of waste (Kölsch, 1997), from the Technical University of Braunschweig. Some results of slope stability analysis of the Duarte da Silveira (Petrópolis) landfill, which was installed in a steep valley are presented herein. Duarte da Silveira, in Petrópolis, is an old non-controlled landfill, which started up in 1989. It receives about 250 tons of waste per day. It is more than 50 meters high and will be shut down at the earliest opportunity. This paper analyses the effect of the introduction of geomembrane layers in an embankment. From these analyses charts are plotted and from these charts conditions are studied for the two-landfill cases. Some comments, based on these results, are also made on equivalence between the urban residual solid waste and reinforced soil concept, considering the fibre (plastic and textiles) effect.*

## **INTRODUCTION**

The stability studies of sanitary landfills have been undertaken using the classical methods of the limit equilibrium theory for solid urban waste, adopting resistance parameters ( $c$  and  $\phi$ ) obtained mainly from international publications.

The reliability of these methods, however, is seriously prejudiced since there is a wide variation in the values obtained when determining these resistance parameters, even in the USA and Europe, where better technological conditions are available and, consequently, many more tests have been performed. Furthermore, the changes in these parameters over the years due to the effects of biodegradation of the waste are relatively unknown. With regard to this, in the case of sanitary landfills with efficient drainage systems, which help to reduce the organic rate and to control the water content, there is a tendency for these parameters to improve, contrary to what happens in landfills with inefficient or even non-existent drainage systems, in the case of the waste fills that represent the vast majority of waste disposal in Brazil. It is known, on the other hand, that sanitary landfills consisting of partly saturated heterogeneous material have their stability heavily influenced by the level of leachate and gas pressure.

Lastly, it is currently known from the latest publications that the fibres present in waste heavily influence its shear resistance. This is because, despite the waste being characterised as a thick granular material, it can achieve high cohesion rates due to the effect of these fibres. This effect is similar to that exerted by the geomembrane covers on granular soil landfills, which permits us to imagine a possible equivalence between both.

## **SOLID URBAN WASTE CHARACTERISTICS**

The characteristics discussed herein refer only to those that can directly or indirectly influence waste behaviour, principally with regard to aspects relating to slope stability.

- **Physical or Gravimetric Composition**

The gravimetric composition defines the percentage of the different components in the waste, such as paper/cardboard, plastics, rags, iron materials, glass, rubber, organic matter, etc. It is important to know this, as in the following examples:

- (a) Percentage of organic matter

This portion is directly linked to the water content, permeability and specific weight of the waste mass. So in Brazil, where the percentage of organic matter is around 50% compared to the United States and European countries whose portions are normally under 30%, we have higher water contents and lower permeability coefficient and specific weight figures of the waste mass.

- (b) Plastics and rags

Plastics and textiles are the main fibre components of waste, as already mentioned, and influence the behaviour of waste mass, normally characterised as a predominantly granular material, giving it much higher cohesion rates. It is important to emphasise that this cohesion, more appropriately called “fibre cohesion” is a parameter completely different from the cohesion defined for clay soils due to electrochemical forces of particle attraction.

- **Particle Size Composition**

Waste mass can be described as a predominantly granular material with high percentages of thick fractions. As time passes this characteristic may become accentuated if the internal drainage system of the landfill is efficient, with the outflow of liquid (leachate) and gas effluents produced by the decay of organic matter. Otherwise, when the internal drainage is inefficient or non-existent, the difficulty in eliminating the effluents may give rise to regions with very soft organic masses or even granular regions with heterogeneous behaviour with respect to the retention capacity and seepage of these effluents (gas and liquid).

- **Specific Weight**

Specific weight is influenced by the particle sizes in the waste, thickness of the daily (clay) top layer as well as by the executive method of the landfill.

When referring to the particle size, studies performed, for example, by Mitchell (1983) confirm a sharp drop in specific weight, with an increase in the organic matter content.

Specific weight generally increases with depth, as a result of the compression and consolidation of the waste mass due to the overload of the upper layers. Wiemer (1982) and Kavazanjian (1995) show that the specific weight for depths to around 40m can increase significantly from 6 kN/m<sup>3</sup> at the surface to 12 kN/m<sup>3</sup> at 40m.

With regard to the executive method of the landfill, the variation in specific weight is heavily influenced by the thickness of the layer of waste and equipment used in its compaction. Watts and Charles (1990) tell how a sanitary landfill in England compacted with a 21t steel roller, varied from 6.3 kN/m<sup>3</sup> for 2m thick layers to 8 kN/m<sup>3</sup> for narrower layers. The degree of compaction is also a predominant factor in the value of specific weight, and it may be said that in general the values found may vary from 3 to 7 kN/m<sup>3</sup> for landfills with the material merely spread on top, until 9 to 13 kN/m<sup>3</sup> when controlled compaction is applied, using caterpillar tractors or appropriate compactor rollers.

- **Water content**

The water content of waste depends on a series of factors, including the initial particle size, climatic conditions, rate of biological decay and the actual operation of the internal drainage system of the landfill for collecting the liquid (leachate) and gas effluents. Particle size composition or, more particularly, as already mentioned, larger portions of organic matter correspond to higher water contents in the waste (Landva & Clark, 1990). Climatic conditions, that is, rainfall and evapo-transpiration, can contribute to wide variations in the water content. For instance, Blight and others

(1992) found that, when comparing the measurements for October 1988 (around 50%) and November 1990 (around 100%) in the Linbro landfill in Johannesburg, South Africa, the water content measured in November 1990 practically doubled between the depths of 3 to 5m after a period of exceptional rainfall.

The heterogeneity of waste, on the other hand, may produce zones with a wide variation in water, normally with a tendency to increase with depth, as observed by Gabr & Valero (1995), with values of 30% close to the surface and 130% for depths of around 20m.

There are cases, however, as presented by Coumoulos and others (1995) for the Ano Liossia landfill in Athens, Greece, where the water in the waste diminishes with depth, with values of more than 60% for depths to 15m and around 40% for depths of 30m.

- **Permeability**

Permeability is influenced by the particle sizes in the waste and also by the executive method of the landfill, that is, the degree of applied compaction. According to studies by Cepollina and others (1994) based on well-lowering tests with a wide diameter (50cm) and depth of 30 m, and by opening test drains in massifs with high percentages of organic matter, with around 12 years of waste fill in São Paulo, readings were obtained of  $10^{-5}$ cm/s for the permeability coefficient. According to Manassero (1990) for a similar well test in a compacted landfill, probably with smaller percentages of organic matter, figures were found for the permeability coefficient of between  $1.5 \times 10^{-3}$  and  $2.6 \times 10^{-2}$  cm/s.

- **Resistance parameters**

Resistance parameters (cohesion and internal friction angle) adopted when calculating the slope stability of sanitary landfills in Brazil was until recently based exclusively on results from tests and retro-analyses of studies in international publications. This practice has proven totally unsuitable because of the different characteristics normally



found in the waste in Brazil compared to the European countries and the USA. Moreover, it is known that, because of its heterogeneous composition with large elements, it is very difficult to obtain ideally representative samples of the waste. On the other hand, given the need for test equipment (tri-axial and direct shear) with compatible dimensions (at least 5 to 10 times more than the largest particle in the waste) and proper protection against corrosion and for the workers' safety, given the difficult workability and high costs, the number of test results available even in international literature is small and varies considerably. Thereby, taking the work by Pagotto & Rinoldi (1987), Landva & Clark (1990), Singh & Murphy (1990), Richardson & Reynolds (1991), Withiam and others (1994), Gabr & Valero (1995) and Kockel (1995) as a basis, figures are found for the friction angle of between  $10^{\circ}$  and  $53^{\circ}$  and cohesion of between 0 and 67 kPa. As a result of these scattered values, it is hard to obtain a reliable estimate of the shear resistance of the waste and very often this leads to contradictory results in relation to the real conditions of slope stability found in the field.

A further drawback with respect to the waste resistance parameters is to do with the relative lack of how it varies over the years. It is known that, for landfills with a high percentage of organic matter and deficiency or even non-existence of internal drainage systems for the liquid (leachate) and gas effluents, which is the typical case in Brazil, there is a tendency to reduce these values. According to data provided by Turczynski (1988) and quoted by Kockel (1995) for European sanitary landfills, when comparing values from 0 (zero) to 15 years old, cohesion may vary from  $50 \text{ kN/m}^2$  to  $10 \text{ kN/m}^2$ , while the internal friction angles may vary from  $40^{\circ}$  to  $26^{\circ}$ . In Brazil, studies performed by Kaimoto & Cepollina (1997), considering retro-analyses made on a landslide occurring in the sub-landfill AS-1 of the Bandeirantes landfill in 1991, under conditions of high neutral pressures in the surface cells, resulted in the following resistance parameters: cohesion ( $c$ ) = 13.5 kPa and ( $\phi$ ) =  $22^{\circ}$ .

## **METHODS OF STABILITY ANALYSIS**

The sanitary landfill stability studies were performed using the classical methods of the limit equilibrium theory, normally applied in soil mechanics, which is an acceptable procedure, as shown in centrifugal shear tests carried out in Bochum (Jessberger, 1997). The major drawback found, as stressed by Kockel (1995) and Kölsch (1993 and 1995), refers to the definition of the resistance parameters due to the heterogeneity of the waste, anisotropy resulting from the way the waste is deposited in layers and, also, not knowing the variation of its properties with time due to the biochemical degradation processes.

According to the model proposed by Kölsch (1993) the behaviour of sanitary landfills would be similar to that of reinforced soil landfills. In the latter model, fibre materials (plastics, textiles, etc.) present in the composition of the waste could create traction forces that would depend on the fibres joining the waste mass, that is, they would be a function of the normal active traction. In this way the shear resistance would consist of two different portions: the first with respect to the friction forces on the shear plane and the second referring to the traction forces of the fibres, or "fibre cohesion". The interaction between these two portions represented in the stress x deformation curve shows that for small deformations (Phase 1) only the friction forces are mobilised; as the deformations increase and the fibres started to be stretched (Phase 2), the portion of the traction forces increases until it reaches a maximum value corresponding to the traction resistance or the fibres joining with the waste mass. Based on this figure (Z max.) Phase 3 starts with the gradual reduction of the portion of traction forces until reaching Phase 4 where shear resistance would be limited to the portion due to friction. The portion of resistance due to friction varies linearly with normal stress, to the extent that in the portion due to the traction forces (fibre cohesion) this correlation is discontinuous. Hence, the contribution of each of these portions in the shear resistance

of the waste will vary according to the normal active stress, and of course to deformation.

In order to describe separately each of the portions mentioned above, Kölsch (1993) designed equipment exclusively for measuring the traction forces (fibre cohesion). The friction forces were determined by using direct shear tests after reducing the waste particles, thus eliminating the effect of the fibres.

Based on the results obtained in tests carried out for a standard sample, considering the methodology under reference, Kölsch (1993) proposes to calculate the traction forces using the following equation:

$$F = \alpha \gamma h \quad (1)$$

Where:  $F$  = traction force on the wedge element of the possible landslide surface

$\gamma$  = specific weight of waste

$\alpha$  = characteristic factor of the fibrous material, varying between 0.1 and 0.3.

Mahler and others (1998) proceeded to analyse the slope stability of the Sitio São João landfill (São Paulo) using a characteristic section and piezometric data obtained from on-site instrumentation. The resistance parameters were determined by retro-analysis of the 1991 AS-1 sub-landfill landslide of the Bandeirantes sanitary landfill (IPT Report – 1991), considering a safety factor (SF) equal to 1. The stability was analysed using the Bishop and Spencer methods. Once the critical landslide surface was obtained, five points were chosen on this surface, to which were applied the traction forces calculated from the equation of Kölsch (1993). With the results obtained correlating the safety factors with the  $\alpha$  values, a  $\alpha$  value equal to 0.14 was obtained using a safety factor (SF) of 1.4, as recommended by Jessberger (1997).

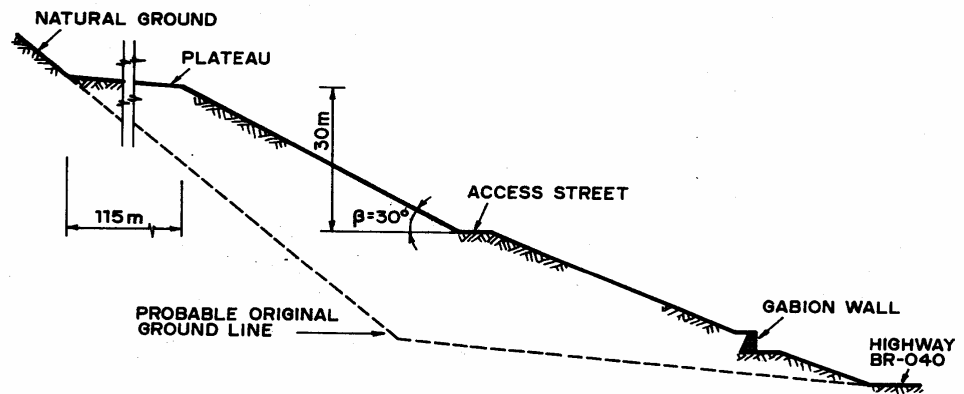
## **STUDY OF WASTE FILL ON DUARTE DA SILVEIRA STREET IN PETRÓPOLIS**

### *Preliminary Comments*

Petrópolis is a mountain town in the State of Rio de Janeiro with a population of around 300,000 inhabitants, characterised by the dense occupation of its slopes and heavy rainfall, particularly during the summer months. As a result of its topographic characteristics, waste collection and principally its final disposal are one of the major problems due to the almost complete lack of areas suitable for sanitary landfills, in accordance with the current requirements of the Brazilian law in treating domestic waste. Currently the town has three different areas for the end disposal of its waste. Currently the town has three different areas for the final disposal of its waste. The largest area is the Duarte da Silveira disposal site (Bingen). This site covers an area of approximately 30,000 m<sup>2</sup>. In some places the waste is deposited up to 50 m. The construction is in a valley over a natural talweg. Its upper boundary is the Tinguá biological reserve and the lower is the BR-040 highway.

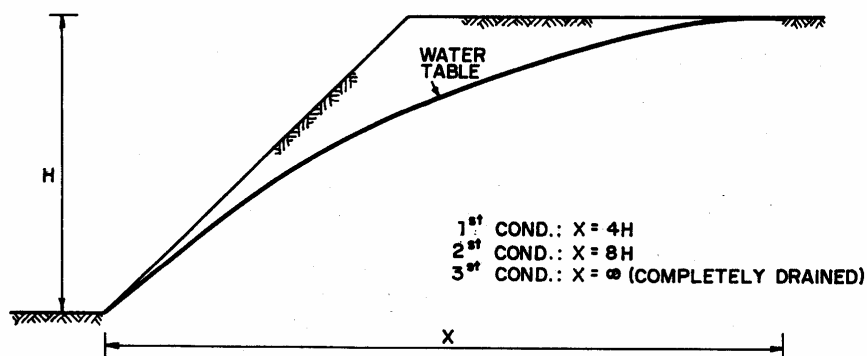
### **STABILITY ANALYSIS**

The total height of the Duarte da Silveira street waste fill is around 50m, according to the topographic survey undertaken for a characteristic cross-section (Fig. 1). The stretch used for the stability analysis was considered the most unfavourable in this section, located between the main access thoroughfare and landfill crest, with a height of 30m and average slope of 30. The Modified Bishop method was used, assuming the specific weight ( $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ ) and internal friction angle ( $\phi = 25^\circ$ ) as constants and varying the cohesion and groundwater line position values. A graph was drawn by correlating the safety factors (SF) with cohesion values, obtaining representative curves for each position considered for the groundwater line.



**Figure 1** – Characteristic cross-section

To calculate the stability of the section under study the Modified Bishop Method was used based on the SLOPE/W program. Several hypotheses were made in this calculation, keeping the specific weight ( $\gamma$ ) and internal friction angle ( $\phi$ ) values constant and varying the cohesion ( $c$ ) and groundwater line values. The calculations proposed by Hoek & Bray (1974) for three different conditions were used to determine the groundwater line, as shown in Figure 2.



**Fig. 2** – Underground water conditions (Hoek & Bray – 1974)

Thereby, according to Figure 3, the safety factors (SF) were correlated with the cohesion to obtain the representative curves for each groundwater line position.

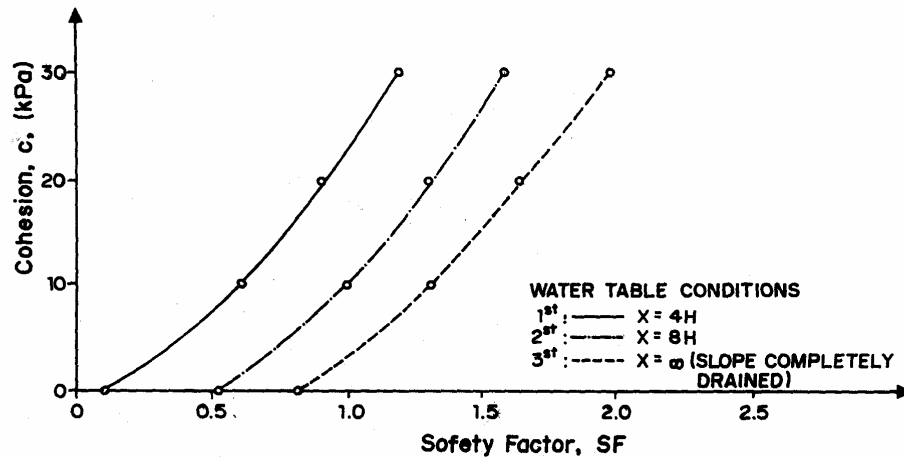


Fig. 3 – Cohesion x SF curves for different conditions of underground water.

Based on readings taken along the stretch of the slope considered for the landfill (waste fill) on Duarte da Silveira Street, the condition that would be most suitable would be 3, that is, a completely drained slope. So, based on the corresponding curve in Figure 4, a SF can be found between 0.812 and 1.965 when the cohesion values vary from 0 to 30 KPA.

It is known, on the other hand, that the cohesion in question, more appropriately called “fibre cohesion”, depends on the content or concentration of fibres (plastics, textiles, etc.) in the waste mass. The fibre concentration in a certain sanitary landfill can be easily determined by analysing the composition of its particle sizes. In the case of the Duarte da Silveira street waste fill, the composition of the deposited waste underwent some variations over the years as a result of several factors, such as, for instance, the alternating operation of the recycling and compost plant, upgrade of the household collection system and even the population’s purchasing power during the period under study.

Despite the absence of routine studies to determine the particle composition of the waste, from the readings taken and information obtained, this composition is quite similar to that of the city of Rio de Janeiro. The main difference, as would be expected, refers to the percentages of textiles, which in Rio de Janeiro show values of 1%, while in Petrópolis these figures can represent between 4% and 5% in relation to the total weight of the waste. We can, therefore, consider the following average composition for the Petrópolis waste: organic matter (45%), paper and cardboard (21%), plastics (19%), rags (4%), metal (3%), inert material (1%) and others (leaves, wood, rubber, leather, etc.) (1%).

Although the variation curve between the SF and cohesion and the value of fibre concentration for the Duarte da Silveira street waste fill were calculated, the ratio between the cohesion and fibre concentration is not known.

## **CONCLUSIONS**

The cohesion, or more correctly called “fibre cohesion”, is related to the concentration of the fibres/geomembranes. There is an approximately linear ratio between the “fibre cohesion” and geomembrane concentration, while this ratio is not known for the sanitary landfills/waste fills. In the case under study of the Duarte da Silveira street waste fill, a cohesion of 30 KPa would be related to a fibre concentration (plastics, rags, etc.) of around 23%. Studies are presently being undertaken to endeavour to determine a possible correlation between the fibre cohesion and fibre concentration, which would be very useful in the stability analysis of sanitary landfills/waste fills.

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors of this paper thank the constant support of CNPq and Petrópolis Town Council, especially Mayor Dr. Leandro Sampaio and Secretary of Works, Dr. José Roberto Machado da Costa, and the colleague Marcos Bergman (GEORIO-RJ) for their kind support.

## REFERENCES

1. Blight, G.E., Ball, J.M., Blight, J.J.– Moisture and suction in sanitary landfills in semiarid areas. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 118(6) (1992).
2. Cepollina, M., Kaimoto, L. S. Q., Ludemann, S.M. - Investigation of geotechnical border lines (conditioning factors) of landfills. X COBRAMSEF (1994). (in Portuguese)
3. Gabr, M.A. & Valero, S.N.– Geotechnical properties of municipal solid waste. *Geotechnical Testing Journal*, 18(2) (1995).
4. Hoek, E. & Bray, J.– *Rock slope engineering*. London Institution of Mining and Metallurgy (1974).
5. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT– Manual of integrated waste administration (1995). (in Portuguese)
6. Jessberger, H.L.– Material characteristics of waste considering the stability study of a landfill., 2. Bochumer Deponie – Seminar (1990). (in German)
7. Jessberger, H.L. & Kockel, R.– Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Materials. Proc., Int. Symp. Green' 93, Bolton, UK, A..A. Balkema, Rotterdam (1993).
8. Jessberger, H.L.– Environmental Geotechnics. Report of the ISSMFE Technical Committee TC.5 on Environmental Geotechnics, Bochum, September (1997).
9. Kaimoto, L.S.A. & Cepollina, M.– Comments on some geotechnical criteria and conditioning factors of a design and project of landfills. International Symposium on Environmental Quality (1997). (in Portuguese)
10. Kockel, R. - Shear resistance of waste considering landfill stability. *Schriftenreihe des Institute fur Greendbau, Ruhr – Universitat Bochum, Heft 24* (1995). (in Germany).
11. Kockel, R. & Jessberger, H.L.– Stability Evaluation of Municipal Solid Waste Slopes. Proc., 11th ECSMFE, Copenhagen, Denmark, Danish Geotechnical



- Society, Bulletin 11, vol. 2 (1995).
12. Kolsch, F.– The Bearing Behaviour of Domestic Waste and Related Consequences for Stability. Proceedings, Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy (1993).
  13. Kolsch, F.– Material Values for some Mechanical Properties of Domestic Waste. Proceedings, Sardinia 93, Fifth International Landfill Symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy (1995).
  14. Landva, A . O. & Clark, J. I.– Geotechnics of Waste Fills. Theory and Practice. ASTM STP n. 1070 – Philadelphia (1990).
  15. Mahler, C. F., Burin, E., & Oliveira, F. J. P. (1998) – Reflections on the Stability of a Municipal Sanitary Landfill.
  16. Mahler, C. F. & Oliveira, F. J. P.– Sitio São João, a monitoring proposal for environmental landfill management. Int. Symp. of Recent Development in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, 25 – 27 June 1997 : 437 – 45. A..A .Balkema, Rotterdam (1997).
  17. Manassero, M.– Pumping Tests in a Municipal Solid Waste Landfill – Geotechnics Seminar. ENEL – CRIS. Milan (1990).
  18. Geotextil Bidim Technical Manual. Reinforced soil: slopes and retaining structures, Rhodia. (in Portuguese)
  19. Pagotto, A. & Rinoldi, P.– Design and Construction of a Geogrid Reinforced Embankment over Waste Material. Proc. Geosynthetics'87, New Orleans, LA, International Industrial Fabrics Association, St. Paul, Minnesota (1987).
  20. IPT Report 29,596. Survey and analysis of the causes of waste mass instability in the Bandeirantes Landfill -AS-1, in Perus, São Paulo., 24/06/91.
  21. Reutner, E - Deformation analysis and diagnosis of the Hannover landfill stability. Geotechnical problems during the landfill construction. 11. Nurnberger Deponieseminar, Mullner, B. (ed.) Eigenverlag LGA (1995). (in German).
  22. Richardson, G. & Reynolds, D.– Geosynthetics Consideration in a Landfill on

- Compressible Clays. Proc. Geosynthetics 91, Atlanta, GA (preprint) (1991).
23. Singh, S. & Murphy, B.– Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills. Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice. ASTM STP. N. 1070. Philadelphia (1990).
24. Turczynski, U.– Geotechnical features during the construction of a landfill with extra components. Dissertation an der Bergakademie Freiberg (1988). (in German)

**ANEXO 2** - Shear Resistance of Mechanical Biological Pre-Treated Domestic Urban Waste, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia (2003)

*Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 6 - 10 October 2003*

*~ 2003 by CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy*

SHEAR RESISTANCE OF MECHANICAL BIOLOGICAL PRE-TREATED DOMESTIC URBAN WASTE

C. F. MAHLER AND A. DE LAMARE NETO

*COPPE/UFRJ – Department of Civil Engineering (PEC), Federal University of Rio de Janeiro, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, C.P. 68506 21945-970 Rio de Janeiro/RJ, Brazil.*

SUMMARY: In Germany, after 2005, it will no longer be possible to dispose of domestic solid waste in landfills without ensuring that the waste is inert. Consequently, processes such as thermal or mechanical biological pre-treatment will need to be undertaken in order to transform the waste. Examples of these processes exist in Brazil where we initiated a pilot project, in 1999, to research an aerobic mechanical biological pre-treatment called AMBRA, which is a special form of chimney process. There are now two Brazilian cities that are using mechanical biological pre-treatment of waste processes (São Sebastião -AMBRA and Novo Hamburgo - DEGEMA). Thus, it has become important to study several characteristics of the residue after the pretreatment. In order to facilitate a valid conclusion, it is necessary to know the physical and chemical characteristics of the fresh waste, as well as the mechanical properties of the material after treatment; this material being destined for disposal, or for use in civil engineering projects such as roads, bricks, etc. With this purpose in aim, this paper contains:

1. A brief description of the procedures of the nearby chimney process used in the pilot project;
2. The physical characteristics of the fresh waste used in the pilot project;
3. A short description of the direct shear test equipment used in the test for the determination of the shear strength parameters (cohesion and friction angle);
4. The results of the shear tests.

## **1. INTRODUCTION**

Landfills, if not well constructed and monitored, can become chemical time bombs. This is applicable, not only to Germany, but to the entire world, particularly undeveloped countries where environmental factors are rarely taken into consideration by their governments. Consequently, thermal or mechanical biological pre-treatment processes will be increasingly used, and necessary, in order to avoid the expansion of pseudo sanitary landfills and to transform the waste as inert. Brazil has had experiences of pre-treatment of waste since the seventies. These experiences have been, in general, applied to organic waste (Kiehl, 1998). Pereira (1996) presents results pertaining to the valuable use of an aerobic mechanical biological process, with forced ventilation, on urban waste. Mahler (2002) and Münnich et al (2001) describe an experience with a variation of the chimney process of aerobic mechanical biological pre-treatment of waste. At this moment in time, two variations of the chimney process are being used in Brazil, the AMBRA process and the DEGEMA process. The procedures of these processes are very similar to the model proposed by Spillmann and Collins (1981), in Germany, and Pereira (1996) and Kiehl (1998), amongst others, in Brazil. The research presented here was carried out with material obtained from the windrows constructed for research we carried out from 1999 to 2001. When the increasing tendency to protect the environment is recognised, it is clear that new technologies or procedures will be evolved to render waste as inert before disposal. As a result of this, there will be an economy in monitoring landfills, more positive use of the area and possible future

recuperation of the land, for social use, that is relatively inexpensive and simple to create and maintain. It becomes apparent, on accepting the fact of this evolution, that it is of prime importance to study the characteristics of waste material after the pre-treatment. It will contribute to the formulation of secure and adequate disposal of waste or enhance its appropriateness for use as material for civil engineering. In this paper we present some shear tests results with this material (Münnich et al, 2003).

## **2. PILOT PROJECT OF AEROBIC MECHANICAL BIOLOGICAL PRE-TREATMENT APPLIED IN RIO DE JANEIRO**

### **2.1. Basic Conception**

As described before, the mechanical biological pre-treatment process, used in Rio de Janeiro, corresponds to a variation of the chimney process initially developed in Germany. The experience consisted of the construction of two windrows measuring approximately 1000 m<sup>2</sup> and 2,5 to 3,5 m height (Mahler, 2002). The process was monitored by the Federal University of Rio de Janeiro, COPPE Institute, accompanied by the Waste Department of the Leichtweiß Institute of the Technical University of Braunschweig. The process consists of a sequence of:

- . separation of the largest pieces visible in the waste;
- . mechanical treatment with minimisation and homogenisation of the mass with input of water or sewage water;
- . static biological degradation, enabled by mounting the windrows, mechanically, in such a way that ensures continuous aeration (in this step the wetting of the material must be monitored, as well as the gas production and temperature at different levels and points)
- . sieving the material after it is in inert.

The completion of these two processes, in Brazil, took about nine months to fulfil, similar to the time observed and recommended in Germany for the chimney process.

It was observed that, during the biological step, the organic matter was degraded by an

accelerated action of micro-organisms, whose presence and actions were caused by the equilibrium between humidity of the waste, air movement and temperature elevation, which caused a continuous change in the energy in the environment of the windrow. The organic matter was transformed to gases, water and bio-mass. The presence of gases as CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> are low and decreasing with the time. More details of this research can be seen in Mahler (2002), Münnich et al (2001 and 2003).

### 3. CHARACTERISTICS OF FRESH AND PRE-TREATED WASTE

Great differences were observed in the waste disposed in windrow 1 and 2. Table 1 presents results of the characterisation of the fresh waste disposed in the two windrows. Table 1. Characteristics of the fresh waste disposed in the windrows.

Compounds	Windrow 1 (%)	Windrow 2 (%)
Paper and carton	5,00	14,37
Plastic	25,00	38,86
Glass	3,00	1,00
Organic Material	58,00	33,64
Ferrous and non Ferrous Metals	5,00	2,33
Inert Material - stone, ceramic	1,00	2,30
Other materials - leaves, wood, cloth, leather, bone	3,00	7,48
Total	100,00	100,00
Specific weight (kg/m <sup>3</sup> )	491,43	284,00
Water content (%)	59,51	67,62

The prime reason for the differences could be that the samples were collected at different times, windrow 1 in September 1999 and windrow 2 in February 2000. During these two specific months the population in these districts varied. Usually in February there are many more tourists visiting the area from which the waste was collected and

they do not usually eat at home or use pre-prepared food for home consumption. A secondary reason could be that the waste was not collected from the same districts. As can be seen in Table 2, the waste from the city of Rio de Janeiro varies greatly, depending on the district of origin. The residues used for these laboratory tests, after the aerobic mechanical biological treatment, were put on one side and left to dry under natural environmental conditions for one week, or more if necessary. The grain size analysis was then undertaken. The results are presented in Table 3. The final measure of water content was 64 %. Figure 1 presents this waste being collected in windrow 2. The large amount of plastic material is visible.

Figure 1. Photo of the pre-treated waste after nine months in windrow 2.

Table 2 – Composition of the waste considering the original district in the City of Rio de Janeiro(Comlurb (1999) in Mahler, 2002).

Components	Composition (% in weight)								
	Centro	Rocinha	Leblon	Tijuca	Piedade	Penha	Pavuna	Barra	Sta.Cruz
Glass	3,54	2,27	9,06	2,97	1,93	3,61	3,15	6,85	2,62
Metal	2,59	2,10	2,31	2,18	2,84	2,19	3,01	2,12	1,94
Plastics	23,72	19,29	18,60	19,96	20,38	16,84	16,52	24,40	17,05
Paper	23,56	11,60	28,09	28,91	19,41	18,93	14,60	25,03	18,87
Org. Matter	42,37	64,66	39,55	42,82	54,79	57,02	58,75	40,19	58,91
Inert	1,28	0,00	1,57	1,87	0,00	0,35	0,12	0,14	0,12
Others	2,94	0,08	0,82	1,29	0,65	1,06	3,85	1,27	0,49

- District of Rio de Janeiro City

Table 3 – Grain size analysis of the pre-treated residue.

Sieves	% Retained
2"	37,09
1 ½"	2,76
1"	5,16
¾ "	2,81
3/8"	8,45
Bottom	43,73
Total	100,00

The tested material corresponded to the fraction less than ¾". As shown in Table 3, it corresponds to 52,18 % of the total:

#### **4. STUDY OF THE SHEAR RESISTANCE OF THE PRE-TREATED WASTE**

##### **4.1. Description of the equipment**

The shear box test used (Figure 2) was developed in the Aeronautical Institute of Technology (São José dos Campos, São Paulo, Brazil) (Vidal et al, 1988). As described by Gomes (1993), it constitutes two boxes of the following dimensions, 400x250x100 mm. The boxes are mounted in a supporting structure, associated with conventional load equipment used in laboratories. The space between the two boxes can be freely adjusted through vertical movement of the upper part along the structure that sustains it, using a collection of steel cables and pulleys. This upper part is sealed by a rigid plate that has an articulated kneecap, which permits transmission of vertical loads. The lower box is sustained by a system of tracks and pulleys capable of maintaining minimal friction with the base that supports the system. A beam, measuring 400 mm in length, is coupled to the upper part of the structure and contains, in each end, articulated systems that act as support elements for measurement (collection of loads up to 30 kN). The relative displacement between the boxes is induced by an axis, connected to the lower part, and a load cell ring for the observation of the applied



loads. This ring is connected to acting screws of a conventional shear test working, however, inversely to normal. Horizontal and vertical displacements are obtained through strain meters.

Figure 2. View of the equipment

#### 4.2. Tests Results

Figure 3 presents some of the results of the tests carried out with the material ranging from 25 to 100 kPa. Using the shear stresses presented, referring to horizontal displacements of 10, 20 and 30 mm and normal stresses of 25, 50, 75 and 100 kPa, it is possible to obtain the resistance curve. From this curve it is possible to determine the resistance parameters (friction angle and cohesion). The results are summarised in Table 4.

Shear Stresses (kPa)

Horizontal Displacements (mm)

Figure 3. Stress-horizontal displacements curves of the pre-treated waste

Table 4. Results of shear tests.

Parameters	Horizontal Displacements (mm)			
	10	20	30	40
$\phi'(^{\circ})$	21° 48'	30° 7'	35° 45'	35° 45'
$c'$ (kPa)	2,50	3,00	3,50	4,00
$\tau$ (kPa)	43,66	60,77	72,49	84,50

Table 5 shows some results observed by Turczynski (1988) that illustrates how the resistance decreases with time of the fresh waste. The parameters increased as

observed by Kockel (1995) and Jessberger (1997), with the deformation, as in the case with pre-treated waste.

Table 5. Laboratory tests done with non pre-treated waste (Turczynski, 1988).

	Cohesion (kPa)	Friction Angle
Fresh Waste	5	40°
3 Years	1,5	35°
5 Years	1,2	32°
15 Years	1	26°

## 5. CONCLUSIONS

The following conclusions could be made from these results:

- Laboratory tests did not demonstrate any peak points
- The shear stress showed a growing tendency even when the limit horizontal displacement was reached (45 mm)
- Higher compaction of the material and higher normal stresses caused increased resistance
- The parameters  $c$  and  $\phi'$  also increase with the horizontal displacement.
- The parameters obtained are not very different from the values observed by other researchers, both for fresh and old waste. However, they have the advantage in that biological degradation had occurred and these values are definitive and will remain relatively stable and not decrease with time as observed for waste by Turczynski (1988).

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the National Research Council (CNPq), for its constant support, and Ms. Marilyn Wilding for the revision of the English text. We also thank COMLURB for allowing us access to the area and for permitting some laboratory investigations of the

waste. In addition, we thank Faber Recycling and the German Teaching and Research Ministry for sponsoring this research. Finally, we thank the TU Braunschweig, Leichweiß Institute, for the constant interchange in this research.

## REFERENCES

COMLURB (1999). Clean Company of the City of Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

Gomes, R.C. (1993) – Soil reinforcement interaction and rupture mechanisms in reinforced soils with geotextil – PhD Thesis. University of São Paulo, Brazil. (in Portuguese).

Jessberger, H.L. (1997) – Environmental Geotechnics. Report of the ISSMFE Technical Committee TC.5 on Environmental Geotechnics, Bochum, September 1997.

Kiehl, E.J.1998. Composting manual: Maturation and compost quality. Ed.: Edmar José Kiehl. São Paulo. 171 p. (in Portuguese).

Kockel, R. (1995) – Scherfestigkeit von Mischabfällen in Hinblick auf die Standsicherheit von Deponien. Schriftenreihe des Institutes für Grundbau, Ruhr – Universität Bochum, Heft 24

Mahler (2002). Proposed Scientific follow-up of the Project of Mechanical Biological Treatment of Urban Solid Waste, Final Report. Fundacao COPPETEC, for Faber Recycling and the German Ministry of Education and Reseach.

Mahler, CF, Araujo, F. & Paranhos, R. (2002). Pollution: aquatic and solid waste. Núcleo de Produção Editorial Aquarius/Fundação Bio-Rio. November, 2002, 132 pg. (in Portuguese)

Münnich, K., Mahler, C.F. & Maak, D. (2001). Mechanical Biological Pre-treatment of residual waste in Brazil, °, International Conference on Waste Management, Sardinia, 2001, Italy.

Münnich, K. Mahler, CF & Fricke, K. (2003). Mechanical and Biological Pre-treatment in the Waste, Müll und Abfall Journal, Germany, (2003). (in German)

Scheelhaase,, T., Bidlingmaier, W., Klumper,A., Maile, A. and Rechberger, M. (2001) -

Geotechnical Behaviour of Mechanically Pretreated Residual Waste - Proceedins Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill symposium S. Margherita di Pula, Gagliari, Italy: 1-5 October 2001.

Spillmann, P. and H.-J. Collins 1981 Das Kaminzug-Verfahren - eine einfache und zielsichere Belüftung als Voraussetzung des aeroben Abbaues im Betrieb einer geordneten Mülldeponie Z. Forum Städte-Hygiene, 32, 15-24, Patzer Verlag Berlin Hannover

Turczynski, U. (1988), Geotechnische Aspekte beim Aufbau von Mehrkomponentendeponien, PhD Thesis, University of Freiberg, Germany.

Vidal, D. Moreira Filho, L.A., Montez, F. e Huch, W. (1988) – Development of an equipment to study the interaction of soil and geotextl. Syposium about new concepts of laboratory and field tests. Rio de Janeiro, p. 475-482. (in Portuguese).

**ANEXO 3** - Análise da Estabilidade do Vazadouro da Rua Duarte da Silveira (Petrópolis), considerando o efeito das fibras – XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, RGS (2000)

**III-118 - ANÁLISE DA ESTABILIDADE DO VAZADOURO DA RUA DUARTE DA SILVEIRA (PETRÓPOLIS), CONSIDERANDO O EFEITO DAS FIBRAS.**

**Claudio Fernando Mahler <sup>1</sup>**

Engenheiro Civil, D.Sc. (1994) COPPE/UFRJ, Coordenador de Projetos Ambientais com as Universidades de Osnabruck e Braunschweig na Alemanha, Professor da COPPE/UFRJ, Consultor na Área Ambiental e Mecânica dos Solos.

**Ademaro de Lamare Neto <sup>1</sup>**

Engenheiro Civil pela EE-UFRJ (1973), M.Sc. pela PUC/RJ (1982), em doutoramento na COPPE/UFRJ. Consultor em Mecânica dos Solos.

**Endereço <sup>1</sup>:** Centro de Tecnologia, Bloco B-00, Bairro Cidade Univers. Cx. Postal 68506 21945-970 Rio de Janeiro/RJ – Tel: +5521 5608993 Ext.229- Fax +5521 2809545- Cel +5521 96162968- Email:mahler@pec.coppe.ufrj.br e cfmahler@usp.br.

**RESUMO**

Os estudos da estabilidade de aterros sanitários têm sido desenvolvidos empregando-se os métodos clássicos da teoria de equilíbrio limite, adotando-se parâmetros de resistência ( $c$  e  $\phi$ ) para o resíduo sólido urbano obtidos a partir de retroanálises de acidentes e da bibliografia nacional e internacional. A confiabilidade dos resultados, todavia, fica seriamente comprometida uma vez que na determinação destes parâmetros de resistência, mesmo nos Estados Unidos e Europa, onde se dispõe de melhores condições tecnológicas e, conseqüentemente, tem sido realizados uma

maior quantidade de ensaios, existe uma gama de variação considerável nos valores. Acrescenta-se a isto, ainda, o relativo desconhecimento das alterações desses parâmetros ao longo do tempo devido aos efeitos da bio-degradação do lixo. Sabe-se por outro lado, que os aterros de lixo comendo-se de material heterogêneo, parcialmente saturado, têm suas condições de estabilidade fortemente influenciadas pelo nível de chorume e pressão do gás. De acordo com os últimos trabalhos publicados, existe um consenso de que as fibras presentes no lixo têm uma grande influência na sua resistência ao cisalhamento. Isto porque, apesar do lixo ser caracterizado como um material granular de constituição grosseira, pode adquirir valores elevados de coesão aparente devido ao efeito destas fibras. Este efeito é semelhante ao exercido pelas mantas de geotextil nos aterros de solos granulares. Neste trabalho é apresentado o resultado da análise da estabilidade efetuado para o vazadouro da Rua Duarte da Silveira em Petrópolis (Rio de Janeiro), considerando-se diferentes condições de nível d'água, sendo ainda efetuados alguns comentários a respeito de possíveis relações entre os valores das coesões e as concentrações das fibras neste aterro e, ainda, em aterros de solo reforçado com geotexteis.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise da Estabilidade, Aterros de Lixo, Coesão das Fibras, Concentração das Fibras, Geotexteis.

## **INTRODUÇÃO:**

Diversos estudos da estabilidade de aterros sanitários têm sido desenvolvidos empregando-se os métodos clássicos da teoria de equilíbrio limite, adotando-se parâmetros de resistência ( $c$  e  $\phi$ ) para o resíduo sólido urbano obtidos principalmente na bibliografia internacional, ou através de estudos de retroanálise de acidentes de aterros (Mahler e outros, 1998).

A confiabilidade dos resultados pode ficar comprometida uma vez que na determinação destes parâmetros de resistência, mesmo nos Estados Unidos e Europa, onde se dispõe de melhores condições tecnológicas e, conseqüentemente, tem sido realizados uma maior quantidade de ensaios, existe uma gama de variação considerável nos valores obtidos. Acrescenta-se a isto, ainda, o relativo desconhecimento das alterações desses parâmetros ao longo do tempo devido aos efeitos da bio-degradação do lixo. Neste aspecto, para os aterros sanitários com sistemas de drenagem eficientes, propiciando a redução da taxa orgânica e o controle da umidade, existe uma tendência da melhoria destes parâmetros, ao contrário do que ocorre para os aterros com sistemas de drenagem ineficientes ou até mesmo inexistentes, o que é o caso dos lixões que representam a grande maioria dos depósitos de lixo no Brasil. Sabe-se por outro lado, que os aterros de lixo compostos de material heterogêneo, parcialmente saturado, têm suas condições de estabilidade fortemente influenciadas pelo nível de chorume e pressão do gás.

Finalmente, de acordo com os últimos trabalhos publicados, sabe-se hoje que as fibras presentes no lixo têm uma grande influência na sua resistência ao cisalhamento. Isto porque apesar do lixo ser caracterizado como um material granular de constituição grosseira, pode adquirir valores elevados de coesão devido ao efeito destas fibras. Este efeito é semelhante ao exercido pelas mantas de geotextil nos aterros de solos granulares.

O presente trabalho apresenta resultados da análise da estabilidade efetuado para o vazadouro da Rua Duarte da Silveira em Petrópolis (Rio de Janeiro), considerando diferentes condições de nível d'água, contendo ainda alguns comentários a respeito de possíveis relações entre os valores das coesões e as concentrações das fibras neste aterro e, ainda, em aterros de solo reforçado com geotexteis.

## **CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS URBANOS SÓLIDOS**

### **Composição Física ou Gravimétrica**

A composição gravimétrica define o percentual dos diversos componentes presentes no lixo, tais como papel/papelão, plásticos, panos/trapos, materiais ferrosos, vidro, borracha, matéria orgânica, etc...

Assim, por exemplo, o percentual de matéria orgânica está diretamente vinculado ao teor de umidade, à permeabilidade e ao peso específico da massa de lixo. No Brasil onde este percentual está na ordem de 50 a 60%, em comparação com os Estados Unidos e os países da Europa cujos percentuais normalmente não atingem os 30%, temos teores de umidade mais elevados e valores inferiores para os coeficientes de permeabilidade e pesos específicos da massa de lixo.

Por outro lado, os plásticos e panos/trapos que constituem os principais componentes fibrosos do lixo, como já referido, influenciam o comportamento da massa do lixo, normalmente caracterizado como um material predominantemente granular, conferindo-lhes valores de coesão muitas vezes elevados. É importante ressaltar que esta coesão, mais apropriadamente denominada "coesão das fibras", é um parâmetro



totalmente distinto daquela coesão definida para os solos argilosos, devida a forças eletroquímicas de atração das partículas.

### **Composição Granulométrica**

A massa do lixo pode ser caracterizada como um material predominantemente granular com elevados percentuais de frações grosseiras. Ao longo do tempo esta característica pode ser acentuada, caso o sistema de drenagem interna do aterro seja eficiente, com a saída dos efluentes líquidos (chorume) e gasosos gerados pela decomposição do material orgânico. Caso contrário, isto é, quando a drenagem interna for ineficiente ou inexistente, a dificuldade de eliminação dos efluentes poderá gerar regiões com massas orgânicas muito moles ou mesmo regiões granulares com comportamentos heterogêneos no que se refere a capacidade de retenção e percolação destes efluentes (gases e líquidos).

### **Peso Específico.**

O peso específico é influenciado pela composição gravimétrica do lixo, pela espessura da camada de cobertura (argilosa) diária e, também, pelo método executivo do aterro.

No que se refere a composição gravimétrica, estudos realizados, por exemplo, por Mitchell (1983) comprovam um decréscimo acentuado do peso específico, com o aumento do teor de matéria orgânica.

O peso específico geralmente aumenta com a profundidade em consequência da compressão e consolidação da massa de lixo devido a sobrecarga das camadas superiores. Wiemer (1982) e Kavazanjan (1995) demonstram que o peso específico

para profundidades de até cerca de 40m podem sofrer aumentos significativos, passando de valores de 6 kN/m<sup>3</sup> na superfície até 12 kN/m<sup>3</sup> àquela profundidade.

Quanto ao método executivo do aterro, a variação do peso específico é fortemente influenciada pela espessura da camada do lixo e pelo equipamento utilizado na sua compactação. Watts e Charles (1990) relatam que para um aterro sanitário na Inglaterra compactado com um rolo de aço de 21t, valores variando de 6,3 kN/m<sup>3</sup> para camadas de 2m de espessura até 8 kN/m para camadas de espessuras mais reduzidas. O grau de compactação igualmente é fator preponderante no valor do peso específico, podendo-se afirmar que, de uma maneira geral, os valores encontrados podem variar de 3 a 7 kN/m<sup>3</sup> para aterros com o material simplesmente espalhado, até valores de 9 a 13 kN/m<sup>3</sup> quando aplicado uma compactação controlada, utilizando-se tratores de esteira ou rolos compactadores apropriados.

### **Teor de Umidade.**

O teor de umidade do lixo depende de uma série de fatores, incluindo a composição gravimétrica inicial, as condições climáticas, o grau de decomposição biológica e o próprio funcionamento do sistema de drenagem interno do aterro para a coleta dos efluentes líquidos (chorume) e gasosos.

A composição gravimétrica ou mais particularmente, conforme já referido, maiores percentuais de material orgânico correspondem a teores de umidade mais elevados no lixo (Landva e Clark, 1990).

As condições climáticas, isto é, os índices de precipitação e de evapo-transpiração podem contribuir para grandes variações no teor de umidade. Conforme relatado, por exemplo, por Blight e outros (1992) para o aterro de Linbro em Johannesburg- África

do Sul, os teores de umidade entre as profundidades de 3 a 5m praticamente duplicaram quando comparados os valores medidos em outubro/88 (cerca de 50%) e novembro/90 (cerca de 100%), este último após uma precipitação excepcional .

A heterogeneidade do lixo, por outro lado, pode produzir zonas com intensa variação de umidade, normalmente com uma tendência de aumento com a profundidade, conforme observado por Gabr e Valero (1995), com valores de 30% próximo a superfície e 130% para profundidades de cerca de 20m . Existem casos, porém, conforme apresentado por Coumoulos e outros (1995) para o aterro de Ano Liossia, em Atenas (Grécia) que a umidade do lixo se reduz com a profundidade, com valores superiores a 60% para profundidades de até 15m e de cerca de 40% para profundidades de 30m .

### **Permeabilidade**

A permeabilidade sofre influência da composição gravimétrica do lixo e, também, do método executivo de aterro, isto é, o grau de compactação aplicado. De acordo com estudos de Cepollina e outros (1994) a partir de testes de rebaixamento de poço de grande diâmetro (50 cm) e profundidade (30 m) e da abertura de valas de investigação em maciços com elevados percentuais de matéria orgânica, com cerca de 12 anos de deposição em São Paulo, foram obtidos valores da ordem de  $10^{-7}$  m/s para o coeficiente de permeabilidade. Segundo Manassero (1990) para ensaio semelhante de poço em aterro compactado, provavelmente com menores percentuais de material orgânico, foram encontrados valores para o coeficiente de permeabilidade entre  $1,5 \times 10^{-5}$  e  $2,6 \times 10^{-4}$  m/s.

## **Parâmetros de resistência**

Os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito interno) são de difícil determinação. Isto porque o lixo pela sua composição heterogênea e com elementos de grandes dimensões, apresenta dificuldades consideráveis para obtenção de amostras idealmente representativas. Por outro lado, os equipamentos de ensaio (triaxiais e cisalhamento direto) apresentam custos elevados, uma vez que devem ter dimensões compatíveis (no mínimo 5 a 10 vezes superiores à partícula de maior diâmetro do lixo) e proteção adequada quanto a corrosão e segurança dos operadores. Assim, o número de resultados de ensaios disponíveis é pequeno e apresentam-se com uma apreciável gama de variação. Tomando-se como base os trabalhos de Pagott e Rinoldi (1987), Landva e Clark (1990), Singh e Murphy (1990), Richardson e Reynolds (1991), Withiam e outros (1994), Gabr e Valero (1995) e Kockel (1995), verifica-se valores para o ângulo de atrito entre 10° e 53° e coesão entre 0 e 67 kPa. Em função desta dispersão de valores, uma estimativa confiável da resistência ao cisalhamento do lixo é difícil e, muitas vezes, conduz a resultados contraditórios em relação às reais condições de estabilidade de taludes observado no campo.

Uma dificuldade adicional quanto aos parâmetros de resistência do lixo diz respeito ao relativo desconhecimento de suas variações ao longo do tempo. Sabe-se que para aterros com elevado percentual de matéria orgânica e deficiência ou mesmo inexistência de sistemas de drenagem interna para os efluentes líquidos (chorume) e gasosos, o que é o caso típico do Brasil, existe uma tendência de redução desses valores. De acordo com dados apresentados por Turczynski (1988) e citados por Kockel (1995) para aterros sanitários europeus, quando comparados valores para idades de 0 (zero) a 15 anos, as coesões podem variar de 50 kN/m<sup>2</sup> a 10 kN/m<sup>2</sup>, enquanto que os ângulos de atrito interno podem variar de 40° para 26°.

No Brasil estudos desenvolvidos por Kaimoto e Cepollina (1997), considerando retroanálises efetuadas em deslizamento ocorrido no sub-aterro AS-1 do Aterro Sanitário Bandeirantes em 1991, mediante condições de elevadas pressões neutras nas células superficiais, resultaram na obtenção dos seguintes parâmetros de resistência:  $c' = 13,5 \text{ kPa}$  e  $\phi' = 22^\circ$ .

Os estudos da estabilidade de aterros sanitários tem sido desenvolvidos empregando-se os métodos clássicos da teoria do equilíbrio limite, normalmente utilizados em Mecânica dos Solos, o que como demonstrado em ensaios de cisalhamento em centrífuga efetuado em Bochum (Jessberger, 1997), constitui-se de um procedimento aceitável. A grande dificuldade encontrada, conforme enfatizado por Kockel (1995) e Kolsch (1993 e 1995), se refere a definição dos parâmetros de resistência devido a heterogeneidade do lixo, a anisotropia que é resultado da forma de deposição do lixo em camadas e, ainda, o desconhecimento da variação de suas propriedades com o tempo devido aos processos de degradação bio-químicos.

De acordo com modelo proposto por Kolsch (1993) o comportamento dos aterros sanitários seria similar ao de aterros de solo reforçado. Neste modelo os materiais fibrosos (plásticos, panos/trapos, etc...) presentes na composição do lixo seriam capazes de criar forças de tração que dependeriam do vínculo das fibras com a massa do lixo, isto é, seriam função da tensão normal atuante. Deste modo a resistência ao cisalhamento seria composta por duas parcelas distintas: a 1ª referente às forças de atrito no plano de cisalhamento e a 2ª referente as forças de tração das fibras ou “coesão das fibras”. A interação entre essas duas parcelas representada na curva tensão x deformação mostra que para pequenas deformações (Fase 1) existe apenas a mobilização das forças de atrito; a medida que as deformações vão aumentando e as fibras começam a ser tracionadas (Fase 2), a parcela das forças de tração aumenta até atingir um valor máximo correspondente a resistência a tração ou vínculo das

fibras com a massa do lixo. A partir deste valor ( $Z$  máx.) entra-se na Fase 3 com a redução gradativa da parcela das forças de tração até atingir a Fase 4 onde a resistência ao cisalhamento se limitaria a parcela devido ao atrito. A parcela de resistência devido ao atrito varia linearmente com a tensão normal, ao passo que na parcela devida às forças de tração (coesão das fibras) esta correlação é descontínua. Assim, a contribuição de cada uma dessas parcelas na resistência ao cisalhamento do lixo variará de acordo com a tensão normal atuante, além naturalmente, da deformação.

De modo a caracterizar separadamente cada uma das parcelas referidas, Kolsch (1993) desenvolveu equipamento destinado exclusivamente a medição das forças de tração (coesão das fibras). As forças de atrito foram determinadas através de ensaios de cisalhamento direto após a redução das partículas do lixo, eliminando deste modo o efeito das fibras.

Com base nos resultados obtidos em ensaios efetuados para uma amostra padrão, considerando a metodologia em referência, Kolsch (1993) propõe para o cálculo das forças de tração a seguinte formulação:

$$F = \gamma \alpha h$$

Onde:  $F$  = força de tração na cunha da possível superfície de

Deslizamento

$\gamma$  = peso específico do lixo

$\alpha$  = fator característico do material fibroso, variando entre 0,1

e 0,3.

Mahler e outros (1997) procedeu a análise de estabilidade de taludes do aterro do Sítio São João (São Paulo) utilizando-se uma seção característica e dados piezométricos obtidos de instrumentação instalada no local. Os parâmetros de resistência foram determinados por retro-análise do deslizamento do sub-aterro AS-1 do aterro sanitário Bandeirantes ocorrido em 1991 (Relatório IPT – 1991), considerando um fator de segurança (FS) igual a 1. A análise da estabilidade foi feita utilizando-se os métodos de Bishop e Spencer. Uma vez obtida a superfície de deslizamento crítica foram escolhidos 5 pontos sobre esta superfície, a partir dos quais foram aplicadas as forças de tração calculadas conforme a formulação de Kolsch (1993). Com os resultados obtidos correlacionando os fatores de segurança com os valores de  $\alpha$  obteve-se um valor de  $\alpha$  igual a 0,14, utilizando-se um fator de segurança (FS) de 1,4, conforme recomendações de Jessberger (1997).

## **ESTUDO DO VAZADOURO DA RUA DUARTE DA SILVEIRA EM PETRÓPOLIS**

### **PRELIMINARES**

Petrópolis é um município da região serrana do Estado do Rio de Janeiro com uma população de cerca de 300.000 habitantes, caracterizado pela ocupação intensa de suas encostas e por um regime pluviométrico rigoroso, particularmente nos meses de verão. Em função de suas características topográficas, a coleta de lixo e principalmente sua destinação final, apresenta-se como um problema dos mais sérios pela quase inexistência de áreas adequadas para aterros sanitários, conforme as atuais exigências da lei brasileira de tratamento de resíduos domésticos.

A área que concentra o maior volume de lixo no município constitui-se a do vazadouro da rua Duarte da Silveira, no bairro do Bingen, cuja capacidade foi esgotada, sendo,

porisso, recentemente desativado. O presente estudo se refere a este vazadouro que ocupa uma área de cerca de 30.000m<sup>2</sup> com alturas de até 50m, implantada a meia encosta e sobre talvegue natural, e limitada a montante pela reserva biológica do Tinguá e a jusante pela rodovia BR-040.

Assim sendo procedeu-se a análise da estabilidade dos taludes, admitindo-se várias hipóteses quanto aos níveis do lençol freático e adotando-se parâmetros de resistência constantes na bibliografia nacional e internacional, utilizando-se uma seção transversal característica levantada topograficamente no aterro (vazadouro).

## **ANÁLISE DA ESTABILIDADE**

A partir da seção transversal característica, representada na Fig.1, foi tomado o trecho considerado como o mais desfavorável limitado entre a via principal de acesso e a crista do aterro, com uma altura de 30m e inclinação média de 30° . Utilizou-se o método de Bishop Modificado, admitindo-se como constantes o peso específico ( $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ ) e o ângulo de atrito interno ( $\phi = 25^\circ$ ) e fazendo-se variar os valores da coesão e da posição da linha freática. A seguir foi traçado um gráfico correlacionando os fatores de segurança (FS) com os valores da coesão, obtendo-se curvas representativas para cada uma das posições consideradas para a linha freática.



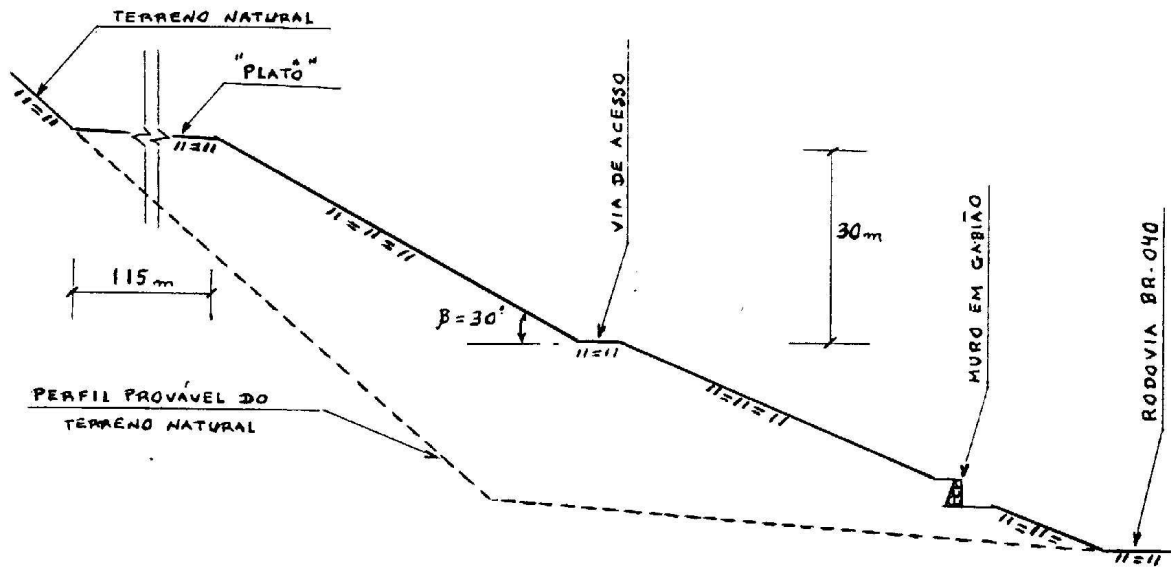


Fig. 1 – Seção Transversal Característica

Para o cálculo da estabilidade da seção considerada foi utilizado o método de Bishop Modificado, a partir do Programa SLOPE/W. Neste cálculo foram feitas diversas hipóteses, mantendo-se constantes os valores do peso específico ( $\gamma$ ) e do ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e fazendo-se variar os valores da coesão ( $c$ ) e da posição da linha freática. Para a determinação da posição da linha freática foram utilizados os ábacos propostos por Hoek e Bray (1974) para 3 condições distintas, conforme Fig. 2.

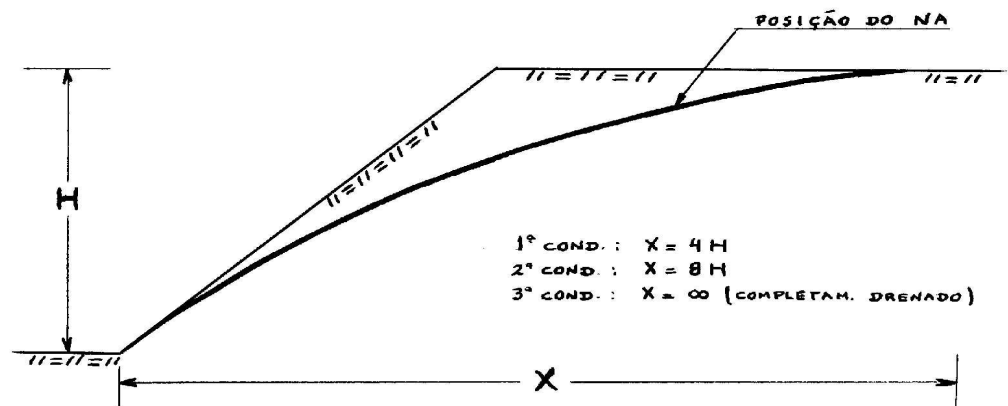


Fig. 2 – Condições de água subterrânea (Hoek e Bray – 1974)

Deste modo, conforme representado na Fig. 3, foram correlacionados os fatores de segurança (FS) com as coesões, obtendo-se as curvas representativas para cada uma das posições da linha freática.

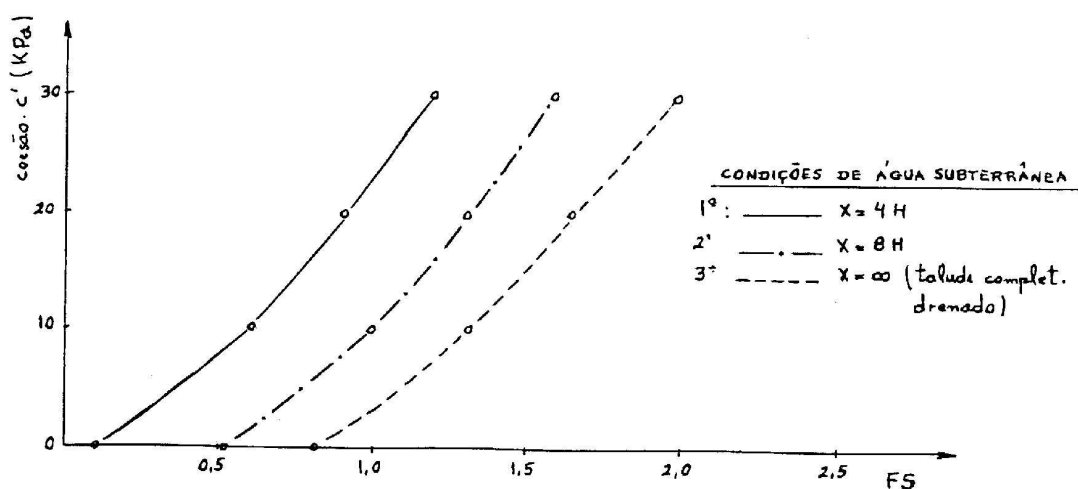


Fig. 3— Curvas coesão x FS para diferentes condições de água subterrânea.

Com base em observações visuais efetuadas no trecho de talude considerado para o aterro (vazadouro) da rua Duarte da Silveira, a condição que melhor se enquadraria seria a 3ª, isto é, talude completamente drenado. Assim, a partir da curva correspondente na Fig. 3, pode-se observar FS entre 0,812 e 1,965 quando se varia os valores da coesão de 0 a 30 Kpa.

Sabe-se, por outro lado, que a coesão em referência, mais apropriadamente denominada “coesão das fibras” depende do teor ou concentração das fibras (plásticos, panos/trapos, etc...) presentes na massa do lixo. A determinação da concentração das fibras em um determinado aterro sanitário pode ser facilmente obtida através da análise da sua composição gravimétrica. No caso do vazadouro da

rua Duarte da Silveira a composição do lixo depositado tem sofrido, ao longo dos anos, algumas variações decorrentes de fatores diversos, como por exemplo, a alternância no funcionamento da usina de reciclagem e compostagem, o aprimoramento do sistema de coleta domiciliar e até o próprio poder aquisitivo da população em função do período considerado.

Apesar da inexistência de pesquisas rotineiras para determinação da composição gravimétrica do lixo, pelas observações efetuadas e informações obtidas, esta composição é bastante semelhante à da cidade do Rio de Janeiro. A principal diferença, como seria de se esperar, se refere aos percentuais de panos/trapos que no Rio de Janeiro apresentam valores de 1%, enquanto em Petrópolis esses valores podem atingir entre 4 e 5% em relação ao peso total do lixo. Assim sendo, podemos considerar a seguinte composição média para o lixo de Petrópolis: material orgânico ( 45%), papel e papelão ( 21%), plástico ( 19%), panos/trapos ( 4%), metal (3%), material inerte ( 1%) e outros - folhas, madeira, borracha, couro, etc...( 1%).

Apesar de determinada a curva de variação entre os FS e a coesão, além do valor da concentração das fibras (cerca de 23%) para o vazadouro da Rua Duarte da Silveira, não se conhece a relação entre a coesão e a concentração das fibras. Para os aterros de solo reforçado com geotextil sabe-se que esta relação pode ser considerada linear, sendo que os valores de concentração de fibras (geotextil), normalmente não ultrapassa a 1% para fatores de segurança (FS) em torno de 1,5.

## **CONCLUSÕES**

Tanto para os aterros sanitários como para os aterros de solo reforçado com geotexteis a coesão ou, mais apropriadamente denominada “coesão das fibras”, está relacionada a concentração das fibras. Para os solos reforçados existe uma relação

aproximadamente linear entre a “coesão das fibras” e a concentração de geotextil, enquanto que para os aterros sanitários/ vazadouros esta relação não é conhecida.

No momento estão sendo desenvolvidos estudos no sentido de se tentar determinar uma possível correlação entre a coesão das fibras e a concentração de fibras, o que seria de grande utilidade na análise da estabilidade de aterros sanitários/ vazadouros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Blight, G.E., Ball, J.M., Blight, J.J. (1992) – Moisture and suction in sanitary landfills in semi-arid areas. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 118(6).
2. Cepollina, M., Kaimoto, L. S. Q., Ludemann, S.M. (1994) – Investigação de condicionantes geotécnicos de maciços sanitários. X COBRAMSEF.
3. Coumoulos, D. G., Korialos, T. P., Metaxas, I. L. e Giorka, D. A. (1995) – “The Main Landfill of Athens-Geotechnical Investigation”. Proc., 5<sup>th</sup> International Landfill Symposium, Sardinia’95, S. Margherita di Pula, CISA, Cagliari.
4. Gabr, M.A. e Valero, S.N. (1995) – Geotechnical properties of municipal solid waste. *Geotechnical Testing Journal*, 18(2).
5. Hoek, E. e Bray, J. (1974) – *Rock slope Engineering*. London Institution of Mining and Metallurgy.
6. Jessberger, H.L. (1997) – *Environmental Geotechnics*. Report of the ISSMFE Technical Committee TC.5 on Environmental Geotechnics, Bochum, September 1997.
7. Kaimoto, L.S.A. e Cepollina, M. (1997) – Considerações sobre alguns condicionantes e critérios geotécnicos de projeto e executivos de aterros sanitários. Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental.

8. Kavazanjian, E. jr. (1995) – Evaluation of Properties for Seismic Analysis. *Geoenvironmental 2000*. Acor/Daniel (eds.), pp. 1126-1141.
9. Kockel, R. (1995) – Scherfestigkeit von Mischabfällen in Hinblick auf die Standsicherheit von Deponien. *Schriftenreihe des Institute für Greendbau, Ruhr – Universität Bochum, Heft 24*.
10. Kolsch, F. (1993) – The Bearing Behaviour of Domestic Waste and Related Consequences for Stability. *Proceeding Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium*. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
11. Kolsch, F. (1995) – Material Values for some Mechanical Properties of Domestic Waste. *Proceedings Sardinia 93, Fifth International Landfill Symposium*. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
12. Landva, A. O. e Clark, J. I. (1990) – *Geotechnics of Waste Fills. Theory and Practice*. ASTM STP n. 1070 – Philadelphia.
13. Mahler, C. F., Burin, E., e Oliveira, F. J. P. (1998) – Reflections on the Stability of a Municipal Sanitary Landfill.
14. Manassero, M. (1990) – Pumping Tests in a Municipal Solid Waste Landfill – *Geotechnics Seminar*. ENEL – CRIS. Milano.
15. Mitchell, J. K. (1983) – “Fundamentals of Soil Behaviour”, John Wiley e Sons, New York.
16. Pagotto, A. e Rinoldi, P. (1987) – Design and Construction of a Geogrid Reinforced Embankment over Waste Material. *Proc. Geosynthetics'87*, New Orleans, LA, Industrial Fabrics Association Internacional, St. Paul, Minnesota.
17. Relatório IPT 29.596 – Levantamento e Análise das Causas do Escorregamento de Massa de Lixo, no Aterro Sanitário Bandeirantes – AS – 1, em Perus, São Paulo, 24/06/91.
18. Richardson, G. e Reynolds, D. (1991) – Geosynthetics Consideration in a Landfill on Compressible Clays. *Proc. Geosynthetics 91*, Atlanta, GA (preprint).

19. Singh, S. e Murphy, B. (1990) – Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills. Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice. ASTM STP. N. 1070. Philadelphia.
20. Turczynski, U. (1988) – Geotechnische Aspekte beim Aufbau von Mehrkomponentendeponien. Dissertation na der Bergakademie Freiberg (in German).
21. Watts, K. S. e Charles, J. A. (1990)- “Settlement of Recently Placed Domestic Refuse Landfills”. Proc., Institute of Civil Engineering, London, part 1, vol.88.
22. Wiemer, K. (1982) – Qualitative und quantitative Kriterien zur Bestimmung der Dichte von Abfällen in geordneten Deponien. Dissertation, TU Berlin.
23. Withiam, J. L., Tarvin, P. <sup>a</sup>, Bushell, T. D., Snow, R. E. e German, H. W. (1995) – “Prediction and Performance of Municipal Landfill Slope”. Proc. International Conference The Geoenvironment 2000, ASCE GSP n<sup>o</sup> 46, New York.