



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
**DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL - GEOTECNIA**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS COM CODISPOSIÇÃO DE LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO  
ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES**

**RECIFE, MAIO DE 2011**

**EDUARDA DE QUEIROZ MOTTA**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS COM CODISPOSIÇÃO DE LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO  
ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia Civil.

**ORIENTADOR: Prof. José Fernando Thomé Jucá**

**CO-ORIENTADOR: Prof. Silvio Romero de Melo Ferreira**

Recife, PE – Brasil

Maio de 2011

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

M921a Motta, Eduarda de Queiroz.

Avaliação da Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos com Codisposição de Lodo de Tratamento de Esgoto através de Ensaio de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões / Eduarda de Queiroz Motta. - Recife: O Autor, 2011.

xviii, 190f., figs., tabs., gráfs.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Co-Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2011.

Inclui Referências, índice.

1. Engenharia Civil. 2. Geotecnia aplicada aos RSU. 3. Resistência ao Cisalhamento dos RSU. 4. Ensaio de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões. 5. Estabilidade de Taludes de Aterros de RSU. 6. Codisposição de RSU e Lodo de Esgoto. I. Jucá, José Fernando Thomé (Orientador). II. Ferreira, Silvio Romero de Melo (Co-Orientador). I. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE/BCTG214/2011

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS COM CODISPOSIÇÃO DE LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO  
ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES**

Eduarda de Queiroz Motta

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

Aprovada por:

---

Prof.: José Fernando Thomé Jucá, D.Sc.

---

Prof.: *Silvio* Romero de Melo Ferreira, D.Sc.

---

Prof.: Gustavo Ferreira Simões, D.Sc.

---

Prof.: *Stela* Fucate Sukar, D.Sc.

---

Prof.: *Leonardo* José Nascimento Guimarães, D.Sc.

---

Prof.: *Ézio* da Rocha Araújo, D.Sc.

Recife, PE – Brasil

Maio de 2011

Aos meus pais, Fernando e Vera,  
minhas irmãs e sobrinhas.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu esposo, Romero Azevêdo, pelo apoio e paciência, elementos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor José Fernando Thomé Jucá pelo incentivo e confiança depositada.

Ao professor Silvio Romero de Melo Ferreira pela amizade e co-orientação.

Ao CNPq, à CAPES e EMLURB/ATEPE, pelo suporte financeiro.

À EMLURB, pelo apoio nos trabalhos conduzidos no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca e CTR Igarassu.

À COMPESA (ETE-Cabanga), por disponibilizar material para a pesquisa.

À Civilserve pela concessão de direitos de utilização do programa GGU-Stability.

Ao professor Ézio da Rocha Araújo, do Departamento de Estruturas da UFPE, pelo apoio na fase de projeto do equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões.

Ao professor Paulo Régis, do Departamento de Estruturas da UFPE, pelo uso das instalações do laboratório de estruturas e pela orientação e empréstimo das células de carga e sistema para aquisição de dados.

À AGM Geotécnica, em nome do Eng. Ricardo Figueiredo Marques, pelo empréstimo dos extensômetros utilizados no equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões.

À equipe técnica do Laboratório de Solos e Instrumentação do Departamento de Engenharia Civil da UFPE: Eng. Antônio Brito, Severino, Gutemberg e Johnenderson, pela amizade, gentileza e por todo apoio na fase experimental deste trabalho.

À equipe técnica do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da UFPE: Ezequiel e Cazuzá, pelo apoio na fase experimental deste trabalho.

Aos amigos, Tatyane Rodrigues, Ricardo Simplicio (pelo mapa de localização), Gérson Marques (pelo apoio nos ensaios de caracterização dos RSU), Lêda Lucena (pela caracterização química do lodo), Eduardo Maia, Régia Lopes, Cecília Lins, Alessandra Lee (pelo uso do laboratório dos jovens pesquisadores), Fabrícia Silva, Ingrid Alves; aos colegas, professores e funcionários da UFPE, pela agradável convivência e amizade.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

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

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COM  
CODISPOSIÇÃO DE LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO ATRAVÉS DE ENSAIOS DE  
CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES**

Eduarda de Queiroz Motta

Esta tese apresenta uma avaliação da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos com codisposição de lodo de tratamento de esgoto. Neste sentido, verifica-se através de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões sua influência nos parâmetros de resistência, e por outro lado, verifica-se através de reatores em escala de laboratório a alteração dos processos biodegradativos dos resíduos sólidos na geração de gases (concentração, pressão e vazão). Avalia-se também, a influência de materiais fibrosos presentes nos resíduos (plásticos, têxteis, dentre outros) como elemento de reforço na resistência ao cisalhamento. Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi construído um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões onde foram realizados ensaios com amostras com três diferentes composições, utilizando-se resíduos sólidos pré-tratados mecanicamente, sendo: 1) amostra total; 2) resíduos com redução dos materiais fibrosos; 3) resíduos com adição de lodo. Finalmente, foi realizada uma análise de estabilidade de taludes de RSU, utilizando-se a geometria usual de projetos de aterros sanitários, onde foram considerados: sua composição com e sem codisposição de lodo; o efeito das fibras como componente de reforço; e a influência de poro-pressão de lixiviados e do biogás. Os resultados da pesquisa mostram a importância dos componentes fibrosos na resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos, conferindo altos valores aos parâmetros de resistência devido à tensão de tração das fibras. Verificou-se também que é possível se atingir poro-pressões de biogás e lixiviado muito altas, dentro de uma situação de estabilidade.

**PALAVRAS CHAVE:** Geotecnia aplicada aos RSU; Resistência ao Cisalhamento dos RSU; Ensaio de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões; Estabilidade de Taludes de Aterros de RSU; Codisposição de RSU e Lodo de Esgoto.

Abstract of Thesis presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Sciences (D.Sc.)

**SHEAR STRENGTH EVALUATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE WITH CO-DISPOSAL OF SEWAGE SLUDGE THROUGH LARGE-SCALE DIRECT SHEAR TESTING**

Eduarda de Queiroz Motta

This thesis presents an evaluation of the shear strength of municipal solid waste with co-disposal of sewage treatment sludge. In this sense, verifying through large-scale direct shear tests its influence on the parameters of resistance, and secondly, verifying through reactors at laboratory scale the amendment of biodegradation processes of solid waste in the gas generation (concentration, pressure and flow). This work also evaluates the influence of fibrous materials in the waste (plastics, textiles, among others) as a reinforcement element on the shear strength. To proceed with this research, a large-scale direct shear equipment was built and trials were conducted with three samples with different compositions, using mechanically pretreated solid wastes, being them: 1) full sample, 2) waste with fibrous materials reduction, 3) waste with sludge addition. Finally, an analysis of slope stability of MSW was carried out using the usual geometric design of landfills, considering: the composition with and without co-disposal sludge, the effect of fiber as a strengthening component, and the influence of pore-pressure of leachates and biogas. The survey results confirm the importance of fibrous components in the shear strength of solid waste, giving high values to the strength parameters due to tensile stress fibers. It was also verified that it is possible to achieve very high pore-pressure of biogas and leachate in a stable situation.

**KEY WORDS:** Geotechnics Applied to MSW, MSW Shear Strength, Large-scale Direct Shear Test, Slope Stability of MSW, MSW and Sewage Sludge Co-disposal.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	4
1.3 OBJETIVOS .....	5
1.3.1 OBJETIVO GERAL .....	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA .....	5
1.5 ESTRUTURA DA TESE .....	6
<b>CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>8</b>
2.1 PROPRIEDADES DOS RSU .....	8
2.1.1 COMPOSIÇÃO.....	8
2.1.2 PESO ESPECÍFICO.....	12
2.1.3 TEOR DE UMIDADE .....	15
2.1.4 PERMEABILIDADE .....	17
2.1.5 COMPACTAÇÃO.....	20
2.1.6 BIODEGRADAÇÃO DOS RSU.....	21
2.1.6.1 FASES DA BIODEGRADAÇÃO.....	22
2.1.6.2 FATORES IMPORTANTES NA EVOLUÇÃO DA BIODEGRADAÇÃO.....	24
2.1.6.3 ESTUDO DA BIODEGRADAÇÃO EM ESCALA REDUZIDA .....	28
2.1.7 COMPRESSIBILIDADE .....	29
2.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO .....	34
2.2.1 RESISTÊNCIA DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	34
2.2.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RSU .....	36
2.2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO DE RSU.....	39
2.2.4 ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA.....	42
2.3 ESTABILIDADE DE TALUDES DE RSU .....	59
2.3.1 EVENTOS DE RUPTURA EM ATERROS DE RSU .....	59
2.3.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES .....	65
2.3.3 MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE DE RSU (KÖLSCH, 1996) .....	67
<b>CAPÍTULO III - PROGRAMA EXPERIMENTAL E CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS .....</b>	<b>71</b>
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	71
3.2 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS .....	72
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS RSU .....	74

3.2.1.1	COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA E VOLUMÉTRICA.....	74
3.2.1.2	TEOR DE UMIDADE .....	77
3.2.1.3	COMPACTAÇÃO .....	78
3.2.1.4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	79
3.2.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO LODO DE ESGOTO (LE).....	83
3.2.2.1	METODOLOGIA DOS ENSAIOS .....	83
3.2.2.2	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	85
3.2.3	PERMEABILIDADE À ÁGUA DO LE .....	89
3.2.3.1	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	89
3.2.3.2	METODOLOGIA DOS ENSAIOS .....	90
3.2.3.3	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	91
3.2.4	ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL DO LE .....	92
3.2.4.1	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	92
3.2.4.2	METODOLOGIA DOS ENSAIOS .....	93
3.2.4.3	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	94
<b>CAPÍTULO IV - PROJETO, MONTAGEM E MONITORAMENTO DE REATORES .....</b>		<b>97</b>
4.1	CONCEPÇÃO DOS REATORES.....	97
4.2	PREPARAÇÃO E MONITORAMENTO DOS REATORES .....	99
4.3	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	102
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	104
<b>CAPÍTULO V - PROJETO, CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DE EQUIPAMENTO DE CISLHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES.....</b>		<b>105</b>
5.1	PROJETO E MONTAGEM DO EQUIPAMENTO .....	107
5.2	PROCEDIMENTOS GERAIS DO ENSAIO .....	108
5.3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	114
5.4	TESTES INICIAIS UTILIZANDO SOLO ARENOSO.....	115
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	119
<b>CAPÍTULO VI - ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES COM RSU ..</b>		<b>121</b>
6.1	PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE RSU.....	121
6.2	METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	122
6.3	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	124
6.3.1	ENSAIOS COM AMOSTRAS DE RSU.....	124
6.3.2	ENSAIOS COM AMOSTRAS DE RSU-RF.....	131
6.3.3	ENSAIOS COM AMOSTRAS DE RSU-LE .....	135
6.3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	138
<b>CAPÍTULO VII - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERRO DE RSU SIMULADO .....</b>		<b>142</b>

7.1 METODOLOGIA DAS ANÁLISES.....	143
7.2 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	148
7.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	163
<b>CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....</b>	<b>165</b>
8.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES.....	165
8.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....	167
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>168</b>

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura II.1. Diagrama triangular para classificação dos RSU (GRISOLIA <i>et al.</i> , 1995).....	8
Figura II.2. Procedimento para caracterização dos RSU e preenchimento dos lisímetros (Alcântara, 2007) .....	10
Figura II.3. Perfis de massa específica de RSU (CALLE, 2007).....	14
Figura II.4. Teor de umidade dos RSU versus matéria orgânica (LANDVA & CLARK, 1990) .....	16
Figura II.5. Teor de umidade dos RSU versus profundidade (CARVALHO, 1999) .....	17
Figura II.6. Relação entre peso específico equivalente do fluido dos poros e o coeficiente de permeabilidade (MERRY <i>et al.</i> , 2006).....	20
Figura II.7. Fases da degradação e concentração de gases em aterros (adaptado por ALCÂNTARA, 2007) .....	24
Figura II.8. Temperatura versus profundidade do aterro (COUMOULOS <i>et al.</i> , 1995) .....	26
Figura II.9. Temperatura versus profundidade do aterro (MARIANO & JUCÁ, 1998) .....	26
Figura II.10. Experimentos em escala reduzida de campo e laboratório: (1) lisímetros em alvenaria - Alcântara (2007); (2) reatores em fibra de vidro – Cintra <i>et al.</i> (2005); reatores em PVC- Levine <i>et al.</i> (2005).....	29
Figura II.11. Curva típica de compressibilidade dos RSU (GRISOLIA & NAPOLEONI, 1996) .....	31
Figura II.12. Ensaios de compressão confinada dos RSU (LANDVA & CLARK, 1990) .....	32
Figura II.13. Curvas recalque versus tempo de aterros de RSU.....	32
Figura II.14. Mecanismos de ruptura em solos reforçados com fibras a diferentes orientações (GRAY & OHASHI, 1983) .....	35
Figura II.15. Comportamento dos RSU – modelo com interação entre as duas parcelas: força de atrito e força de tração das fibras (KÖLSCH, 1993,1995, 1996).....	37
Figura II.16. Comportamento dos RSU – aumento da resistência ao cisalhamento devido às forças de tração das fibras (KÖLSCH, 1993, 1995, 1996).....	37
Figura II.17. Envoltórias de resistência dos RSU propostas por Kavazanjian <i>et al.</i> (2005) e Van Impe <i>et al.</i> (1996) .....	39
Figura II.18. Equipamento para ensaios de tração (ZIEHMANN, 2001) .....	40
Figura II.19. Coleta de amostra, transporte e realização do ensaio de tração (KÖLSCH, 1996) .....	41
Figura II.20. Envoltórias dos ensaios de tração (KÖLSCH, 1996).....	41

Figura II.21. Modelo de resistência mecânica dos RSU (KÖLSCH, 1997) .....	42
Figura II.22. Resistência à penetração SPT para Aterros de RSU na Espanha (SÁNCHEZ-ALCITURRI <i>et al.</i> , 1993) e Grécia (COUMOULOS <i>et al.</i> , 1995).....	44
Figura II.23. Resistência à penetração SPT em vários aterros (JUCÁ, 2003) .....	45
Figura II.24. Classificação dos RSU utilizando a Carta de Schmertmann (SÁNCHEZ-ALCITURRI <i>et al.</i> , 1993) .....	46
Figura II.25. Ensaios CPT na Célula 1 do Aterro da Muribeca (JUCÁ <i>et al.</i> , 2005) .....	47
Figura II.26. Parâmetros de resistência obtidos por retro-análises (SINGH & MUPHY, 1990) .....	48
Figura II.27. Ângulo de atrito e coesão versus deformação para diferentes idades dos RSU (KOCKEL, 1995; JESSBERGER <i>et al.</i> , 1995 e KÖNIG & JESSBERGER,1997). ....	51
Figura II.28. Mobilização do ângulo de atrito e intercepto de coesão com as deformações axiais para diferentes teores de fibra dos RSU (KOCKEL, 1995; KOCKEL & JESSBERGER, 1995 e KÖNIG & JESSBERGER,1997).....	52
Figura II.29. Equipamentos de cisalhamento direto de maiores dimensões: (a) ITA (LAMARE NETO, 2004 e CALLE, 2007) e (b) Instituto Leichtweiss (FUCALE, 2005) .....	53
Figura II.30. Equipamento de cisalhamento direto (MARTINS, 2006) .....	54
Figura II.31. Equipamento de cisalhamento direto (adaptado de CARDIM, 2008).....	55
Figura II.32. Faixa recomendada para projetos - parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU (SINGH & MURPHY, 1990) <i>apud</i> Oliveira (2002).....	57
Figura II.33. Faixa recomendada para projetos - parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU (SÁNCHEZ-ALCITURRI <i>et al.</i> , 1993) <i>apud</i> Carvalho (1999).....	58
Figura II.34. Imagem do deslizamento do aterro de Rumpke (STARK <i>et al.</i> , 2000).....	60
Figura II.35. Imagem do deslizamento do aterro de Doña Juana (COLLAZOS, 1998) .....	61
Figura II.36. Imagem do deslizamento do aterro de Payatas (MERRY <i>et al.</i> , 2005).....	62
Figura II.37. Imagem de satélite da ruptura do aterro de Leuwigajah (KÖLSCH <i>et al.</i> , 2005) .....	62
Figura II.38. Imagem da ruptura do Aterro da Pajoan: (a) vista aérea (TERRATV, 2011) e (b) vista no local (G1, 2011).....	63
Figura II.39. Sistema de equilíbrio de forças em um elemento reforçado horizontalmente (KÖLSCH, 1996 <i>apud</i> CALLE, 2007) .....	67
Figura II.40. Grau de ativação teórico da coesão das fibras (KÖLSCH, 1996).....	68

### **CAPÍTULO III - PROGRAMA EXPERIMENTAL E CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS**

Figura III.1. Localização da CTR Igarassu e do Aterro da Muribeca em relação à Região Metropolitana do Recife, ao estado de Pernambuco e ao Brasil .....	73
--	----

Figura III.2. Procedimentos para caracterização dos RSU: (1) descarregando num pátio pavimentado; (2) homogeneização; (3) redução por quarteamento; (4) ruptura manual dos sacos plásticos; (5) pilha pronta para caracterização; (6) segregação dos componentes	75
Figura III.3. Preparação das amostras na Central de Tratamento de Resíduos de Igarassu: (1) caminhão de coleta descarregando e (2) acondicionamento de amostras	76
Figura III.4. Segregação e pesagem dos RSU em um pátio da UFPE	77
Figura III.5. Apresentação do cilindro utilizado para os ensaios de compactação: (1) após compactação da segunda camada de RSU-LE; (2) após compactação da terceira camada de RSU-LE; (3) extração do corpo de prova de RSU	78
Figura III.6. Composição gravimétrica - RSU do Aterro de RSU da Muribeca	79
Figura III.7. Composição volumétrica - RSU do Aterro de RSU da Muribeca	79
Figura III.8. Composição gravimétrica - RSU da CRT Igarassu	80
Figura III.9. Curvas de compactação das amostras de RSU e RSU-LE da CTR Igarassu	82
Figura III.10. Curva granulométrica do LE desidratado da ETE Cabanga	85
Figura III.11. Curva de compactação do LE desidratado da ETE Cabanga	86
Figura III.12. Curva granulométrica do LE desidratado da ETE Cabanga e do LE analisado por Espinace <i>et al.</i> (2007)	87
Figura III.13. Difração de Raios-X do LE da ETE Cabanga	88
Figura III.14. Amostra de lodo desidratado utilizado nos ensaios	90
Figura III.15. Procedimento para montagem da célula do ensaio: (1) disposição dos conjuntos pedras porosas e papel filtro e <i>top-cap</i> ; (2) instalação da membrana de proteção; (3) célula de acrílico fechada	90
Figura III.16. Procedimento para moldagem dos corpos de prova de LE: (1) cravação do moldador na amostra compactada e (2) corpo de prova preparado para ensaio	92
Figura III.17. Ensaios de cisalhamento direto do LE: (1) umidade natural; (2) inundado	93
Figura III.18. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo do LE: (a) CN, (b) CI	95
Figura III.19. Variação de altura versus deslocamento relativo do LE: (a) CN; (b) CI	95
Figura III.20. Envoltórias de resistência para as condições natural e inundada - LE	95

#### **CAPÍTULO IV - PROJETO, MONTAGEM E MONITORAMENTO DE REATORES DE LABORATÓRIO**

Figura IV.1. Esquema do projeto dos reatores: (1) tubo de PVC; (2) manômetro; (3) termopar central; (4) dreno de líquidos e gases; (5) registro com adaptador para mangueira; (6) registro inferior; (7) isotubos isolantes em lã de rocha; (8) sistema de amarração	98
Figura IV.2. Processamento da fração orgânica dos RSU	99

Figura IV.3. Reatores experimentais.....	100
Figura IV.4. Variação da composição percentual e taxa da geração de biogás com o tempo para o reator 1 – fração orgânica dos RSU.....	102
Figura IV.5. Variação da composição percentual e taxa da geração de biogás com o tempo para o reator 2 – fração orgânica dos RSU.....	102
Figura IV.6. Variação da composição percentual e taxa da geração de biogás com o tempo para o reator 3 – fração orgânica dos RSU e LE.....	103
Figura IV.7. Variação da composição percentual e taxa da geração de biogás com o tempo para o reator 4 – fração orgânica dos RSU e LE.....	103

## **CAPÍTULO V - PROJETO, CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DE EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES**

Figura V.1. Caixa de cisalhamento direto de grandes dimensões – Fucale & Araújo (2003).....	105
Figura V.2. Detalhamento da caixa de cisalhamento: (1) caixa superior; (2) caixa inferior; (3) base; (4) trilhos inferiores; (5) trilhos intermediários; (6) tampa; (7) enrijecedores de reforço da tampa; (8) reforço da lateral da caixa inferior.....	106
Figura V.3. Esquema do equipamento de cisalhamento direto: (1) elemento para ancoragem da caixa superior; (2) suporte de apoio, instalado na caixa inferior; (3) suporte para fixação horizontal do cilindro hidráulico; (4) cilindro hidráulico; (5) extensômetros; (6) cilindro hidráulico; (7) régua graduada; (8) células de carga.....	107
Figura V.4. Princípio de funcionamento do equipamento: (1) fase de adensamento; (2) fase de cisalhamento.....	108
Figura V.5. Válvulas instaladas na bomba.....	110
Figura V.6. Células de carga <i>Gunt Hamburg LT 50/30</i> : (1) vista superior; (2) vista lateral; (3) vista superior com base de apoio para o pistão instalada.....	110
Figura V.7. Calibração das células de carga em andamento.....	111
Figura V.8. Calibração das células de carga <i>LT 50/30</i> .....	111
Figura V.9. Posicionamento dos extensômetros.....	112
Figura V.10. Disposição das régua nas laterais da caixa.....	112
Figura V.11. Detalhes do equipamento de cisalhamento: (1) base utilizada para fixação da célula de carga e mesa de proteção dos equipamentos e (2) deslocamento da caixa interior.....	113
Figura V.12. Equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões: (1) base envolvida com areia; (2) rótula para apoio do êmbolo do cilindro hidráulico.....	113

Figura V.13. Procedimentos para retornar os êmbolos dos cilindros hidráulicos: (1) vertical e (2) horizontal.....	114
Figura V.14. Sistema de aquisição de dados - <i>Spider 8</i> : (1) vista frontal; (2) painel traseiro .....	114
Figura V.15. Curva granulométrica do solo utilizado nos testes iniciais.....	116
Figura V.16. Corpos de prova utilizados para os testes do equipamento de cisalhamento direto desenvolvido: (1) ensaio convencional; (2) ensaio de grandes dimensões .....	117
Figura V.17. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo horizontal dos testes iniciais com solo arenoso: (a) de grandes dimensões e (b) convencional .....	118
Figura V.18. Variação de altura versus deslocamento relativo horizontal dos testes iniciais com solo arenoso: (a) de grandes dimensões e (b) convencional.....	118
Figura V.19. Envoltórias de ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos testes iniciais com solo arenoso: (a) de grandes dimensões e (b) convencional.....	118

## **CAPÍTULO VI - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES COM RSU**

Figura VI.1. Pré-tratamento mecânico dos RSU: (1) plástico duro; (2) plástico mole .....	121
Figura VI.2. Moldagem do corpo de prova na caixa de cisalhamento: (1) RSU; (2) RSU-LE .....	122
Figura VI.3. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo horizontal- RSU...	125
Figura VI.4. Variação de altura versus deslocamento relativo horizontal – RSU .....	125
Figura VI.5. Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento relativo horizontal - RSU .....	125
Figura VI.6. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005).....	127
Figura VI.7. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005).....	127
Figura VI.8. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005) .....	128
Figura VI.9. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal – Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005).....	128
Figura VI.10. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 1- Resíduos pré-tratados com 20% de reforço (FUCALE, 2005) .....	128

Figura VI.11. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 2- Resíduos pré-tratados com 10% de reforço (FUCALE, 2005) .....	129
Figura VI.12. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos com $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ (MARTINS, 2006) .....	129
Figura VI.13. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos com $\gamma = 8 \text{ kN/m}^3$ (MARTINS, 2006) .....	130
Figura VI.14. Variação da coesão e ângulo de atrito com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos – Ensaio 1 (CARDIM, 2008) .....	130
Figura VI.15. Variação da coesão e ângulo de atrito com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos – Ensaio 2 (CARDIM, 2008) .....	130
Figura VI.16. Variação da coesão e ângulo de atrito com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos – Ensaio 3 (CARDIM, 2008) .....	130
Figura VI.17. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo horizontal - RSU-RF .....	132
Figura VI.18. Variação de altura versus deslocamento relativo horizontal - RSU-RF .....	132
Figura VI.19. Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento relativo horizontal - RSU-RF.....	132
Figura VI.20. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos sem fibras na umidade natural (MARTINS, 2006) .....	133
Figura VI.21. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos sem fibras com umidade inferior à natural (MARTINS, 2006) .....	133
Figura VI.22. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005) ...	134
Figura VI.23. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005) .....	134
Figura VI.24. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005) ...	135
Figura VI.25. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo horizontal - RSU-LE .....	136
Figura VI.26. Variação de altura versus deslocamento relativo horizontal - RSU-LE.....	136
Figura VI.27. Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento relativo horizontal - RSU-LE .....	136

Figura VI.28. Variação dos parâmetros de resistência: (a)  $\phi'$  e (b)  $c'$  para diferentes níveis de deslocamento horizontal – RSU, RSU-RF e RSU-LE..... 140

## **CAPÍTULO VII - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERRO DE RSU SIMULADO**

Figura VII.1. Perfil dos taludes de RSU utilizado nas análises de estabilidade.....	143
Figura VII.2. Faixa de parâmetros obtidos na análise paramétrica para os fatores de segurança da condição de equilíbrio limite até a condição de segurança (Caso 1).....	148
Figura VII.3. FS versus ângulo de atrito (Casos 1 e 2).....	150
Figura VII.4. Análise de estabilidade: RSU novo (Caso 3) .....	151
Figura VII.5. Análise de estabilidade: RSU antigo (Caso 3) .....	151
Figura VII.6. Dados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto comparados à faixa de parâmetros obtidos na análise paramétrica .....	152
Figura VII.7. Variação do Fator de Segurança com o $r_u$ equivalente .....	153
Figura VII.8. Variação de $u_{lix}$ e $u_{gás}$ com $H_{sat}$ .....	155
Figura VII.9. Análise de estabilidade: RSU ( $\phi = 28^\circ$ ; $c = 34 \text{ kN/m}^2$ ; $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$ ) .....	157
Figura VII.10. Análise de estabilidade: RSU- RF ( $\phi = 23^\circ$ ; $c = 23 \text{ kN/m}^2$ ; $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$ ) ...	157
Figura VII.11. Análise de estabilidade: RSU-LE ( $\phi = 36^\circ$ ; $c = 24 \text{ kN/m}^2$ ; $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$ , $r_u = 0$ ) .....	158
Figura VII.12. Análise de estabilidade: RSU-LE ( $\phi = 36^\circ$ ; $c = 24 \text{ kN/m}^2$ ; $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$ , $r_u = 0,25$ ) .....	158
Figura VII.13. Análise de estabilidade: RSU-LE ( $\phi = 36^\circ$ ; $c = 24 \text{ kN/m}^2$ ; $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$ , $r_u = 0,5$ ) .....	159
Figura VII.14. Análise de estabilidade: RSU-LE ( $\phi = 36^\circ$ ; $c = 24 \text{ kN/m}^2$ ; $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$ , $r_u = 0,75$ ) .....	159
Figura VII.15. Análise de estabilidade: RSU-LE ( $\phi = 36^\circ$ ; $c = 24 \text{ kN/m}^2$ ; $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$ , $r_u = 0,77$ ) .....	160
Figura VII.16. Análise de estabilidade: RSU novo (Caso 6) – 1.....	160
Figura VII.17. Análise de estabilidade: RSU antigo (Caso 6) -1 .....	161
Figura VII.18. Análise de estabilidade: RSU novo (Caso 6) – 2.....	161
Figura VII.19. Análise de estabilidade: RSU antigo (Caso 6) – 2.....	162
Figura VII.20. Análise de estabilidade: RSU novo (Caso 6) - 3 .....	162
Figura VII.21. Análise de estabilidade: RSU antigo (Caso 6) - 3 .....	163

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela II.1. Composição percentual dos RSU de alguns países .....	11
Tabela II.2. Composição percentual dos RSU de algumas cidades brasileiras .....	11
Tabela II.3. Peso específico dos RSU de acordo com grau de compactação.....	13
Tabela II. 4. Peso específico úmido dos resíduos (MACIEL, 2009).....	15
Tabela II.5. Teor de umidade dos RSU de alguns países (ALCÂNTARA, 2007) .....	16
Tabela II.6. Permeabilidade à água dos RSU (Kaimoto & Cepollina, 1996 e Manassero <i>et al.</i> , 1996; ampliado por Calle, 2007) .....	18
Tabela II.7. Vantagens e desvantagens dos métodos para determinação dos parâmetros de resistência dos RSU (Dixon & Jones, 2005).....	43
Tabela II.8. Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos em ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões <i>in situ</i> .....	48
Tabela II.9. Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos em retro-análises .....	49
Tabela II.10. Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos através de ensaios de cisalhamento direto de laboratório e ensaios de compressão triaxial.....	56
Tabela II.11. Casos de ruptura de aterros de RSU (COLOMER <i>et al.</i> , 2009).....	64
Tabela II.12. Parâmetros de geotécnicos para RSU sugeridos por GDA E 2-35 (DGGT, 1994) .....	70

### CAPÍTULO III - PROGRAMA EXPERIMENTAL E CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS

Tabela III.1. Programa de investigação geotécnica.....	72
Tabela III.2. Composição das amostras dos ensaios de compactação .....	78
Tabela III.3. Resultado da composição gravimétrica dos RSU para uma amostra do Aterro de RSU da Muribeca, para uma amostra da CTR Igarassu (desta pesquisa) e para a média de nove rotas de diferentes bairros da cidade do Recife (Mariano <i>et al.</i> , 2007).....	81
Tabela III.4. Parâmetros peso específico e umidade da caracterização inicial. ....	83
Tabela III.5. Resumo dos resultados da caracterização física do lodo .....	85
Tabela III.6. Resumo da caracterização física do lodo - Espinace <i>et al.</i> (2007).....	86
Tabela III.7. Resumo da caracterização química quantitativa do lodo .....	88
Tabela III.8. Constituintes químicos encontrados no extrato lixiviado do LE .....	89
Tabela III.9. Constituintes químicos encontrados nos extratos solubilizados do LE .....	89
Tabela III.10. Dados dos ensaios de permeabilidade do equipamento Tri-Flex 2.....	92

Tabela III.11. Condições iniciais e finais dos corpos de prova e parâmetros de resistência obtidos nos ensaios CN para a amostra de lodo compactado - LE .....	94
Tabela III.12. Condições iniciais e finais dos corpos de prova e parâmetros de resistência obtidos nos ensaios CI para a amostra de lodo compactado -LE.....	94

#### **CAPÍTULO IV - PROJETO, MONTAGEM E MONITORAMENTO DE REATORES DE LABORATÓRIO**

Tabela IV.1. Faixa de leitura e erro do detector multigás Dräger X-am 7000 .....	98
--	----

#### **CAPÍTULO V - PROJETO, CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DE EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES**

Tabela V.1. Resumo dos resultados da caracterização física do solo dos testes iniciais .....	116
--	-----

#### **CAPÍTULO VI - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES COM RSU**

Tabela VI.1. Séries de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões .....	123
Tabela VI.2. Valores das tensões cisalhantes para diferentes níveis de deslocamento relativo horizontal para as tensões normais aplicadas- RSU.....	126
Tabela VI.3. Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para diferentes níveis de deslocamento relativo horizontal - RSU .....	126
Tabela VI.4. Valores das tensões cisalhantes para diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas- RSU-RF .....	131
Tabela VI.5. Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para diferentes níveis de deslocamento horizontal - RSU-RF.....	131
Tabela VI.6. Valores das tensões cisalhantes para diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas- RSU-LE.....	137
Tabela VI.7. Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para diferentes níveis de deslocamento horizontal - RSU-LE .....	137
Tabela VI.8. Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para 20% de deslocamento relativo horizontal.....	138

#### **CAPÍTULO VII - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERRO DE RSU SIMULADO**

Tabela VII.1. Parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU sem considerar o efeito das fibras (Caso 1).....	146
Tabela VII.2. Parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU considerando o efeito das fibras (Casos 2, 3 e 6) .....	147

Tabela VII.3. Parâmetros geotécnicos obtidos nos ensaios de cisalhamento direto utilizados nas análises de estabilidade de taludes sem considerar o efeito das fibras (Caso 4).....	147
Tabela VII.4. Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU para o FS da condição de equilíbrio limite, sem considerar o efeito das fibras - Caso 1.....	148
Tabela VII.5. FS determinados com parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU do Caso 1, com ativação do efeito das fibras - Caso 2.....	149
Tabela VII.6. FS determinados para os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU com ativação do efeito das fibras, recomendados por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins <i>et al.</i> (1997) - Caso 3.....	150
Tabela VII.7. Fator de segurança mínimo das análises de estabilidade de taludes de RSU com os parâmetros determinados nesta pesquisa - Caso 4.....	152
Tabela VII.8. Fator de segurança com a variação do parâmetro $r_u$ - Caso 5.....	153
Tabela VII.9. Determinação das poro-pressões de lixiviado e biogás no aterro de RSU para a condição limite de estabilidade do talude proposto.....	155
Tabela VII.10. FS determinados para os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos nesta pesquisa com ativação do efeito das fibras, recomendados por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins <i>et al.</i> (1997) - Caso 6.....	156

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A disposição final e o tratamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) se tornaram assuntos de grande importância em nível global devido ao aumento das exigências de conservação e proteção ambiental. Os impactos ambientais negativos que os subprodutos gerados na decomposição destes resíduos podem trazer ao meio, se não tratados com as devidas precauções, levam à utilização de sistemas mais seguros para sua disposição. Uma das alternativas para o tratamento é o aterro sanitário, sendo uma prática comum em todo mundo por representar uma alternativa viável sob os pontos de vista técnico, econômico e ambiental.

Para atender à crescente geração de RSU, os aterros sanitários têm sido comumente ampliados para aumentar sua vida útil devido à escassez de áreas e à dificuldade de licenciar uma nova área para sua implantação. Muitas destas ampliações são feitas com alteamentos sucessivos, o que implica em análises de estabilidade mais rigorosas e campanhas de monitoramento intensas. Neste sentido, os projetos precisam ser adaptados à nova situação para oferecerem um tratamento seguro para os resíduos. Howland & Landva (1992) afirmam que um dos desafios de projeto oriundos dos processos de expansões verticais é a análise de estabilidade de aterros sanitários projetados com taludes mais íngremes e alturas maiores. Outra questão importante é a drenagem de líquidos e gases, que podem influenciar devido ao aumento de poropressões.

Atualmente, no Brasil, as principais propriedades mecânicas dos RSU ainda são estimadas utilizando ensaios convencionais desenvolvidos para solos, baseando-se nas teorias e conceitos da Mecânica dos Solos. Este fato é explicado pela falta de dados consistentes e de uma metodologia específica para obtenção de dados experimentais para análise dos RSU. O desafio de várias pesquisas tem sido identificar parâmetros de resistência dos resíduos, mas como esses parâmetros sofrem influência da composição, do procedimento operacional do aterro e dos fatores climáticos, os resultados têm apresentado estimativas com grande variabilidade. Diante destes aspectos, a adoção de

critérios e parâmetros para elaboração de projetos de aterros sanitários com base em dados de locais distintos não determina a segurança do empreendimento.

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

Segundo Fucale (2005), os ensaios de campo, como SPT e CPT, em RSU são difíceis de serem executados devido à presença de materiais resistentes como madeira, pedra, metal e outros, que ocasionam grandes picos na resistência medida, além de desvio das hastas dos equipamentos e avarias nos amostradores, paletas e ponteiras. Por outro lado, os ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões proporcionam resultados mais representativos.

Dentro deste contexto, esta pesquisa visa contribuir para um melhor entendimento do comportamento mecânico dos RSU através de um programa de investigação geotécnica que consta de montagem de um equipamento e realização de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões para avaliação da resistência dos RSU.

Outro enfoque desta pesquisa é a análise de aspectos geotécnicos da codisposição de RSU e lodo de tratamento de esgoto, que tem se tornado uma prática comum em aterros de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Lodo de esgoto (LE) é uma denominação genérica para o resíduo sólido gerado pelos sistemas de tratamento de águas residuárias (SANEPAR, 1997). Tsutiya (1999) afirma que o termo biossólido é recomendado pela WEF (Water Environment Federation) para designar o lodo tratado ou beneficiado de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Segundo a WEF, reserva-se o termo biossólido para um produto que tenha passado por processo de estabilização biológica, caso contrário, são empregados os termos sólidos, lodo ou torta.

A disposição de LE em aterros sanitários pode funcionar como inóculo celular, possibilitando acelerar a biodegradação dos resíduos. A degradação acelerada e controlada de resíduos sólidos em aterros sanitários é uma opção que vem sendo estudada em países desenvolvidos como forma de rapidamente estabilizar os resíduos, reduzindo os riscos de contaminação do meio ambiente. Em países como o Brasil, a

degradação dos RSU é naturalmente mais acelerada, tendo em vista que se trata de um país de clima tropical.

Contudo, o fato de o lodo acelerar a biodegradação dos RSU contribui para a geração de biogás e, conseqüentemente, de vazios no aterro. O lodo com elevado teor de umidade pode trazer dificuldades operacionais e ser prejudicial ao funcionamento do aterro sanitário. Podem-se gerar planos preferenciais de ruptura, redução dos parâmetros de resistência, redução da permeabilidade, e com isto aumentar a geração de poropressões. Por isto, algumas condicionantes devem ser impostas para garantir uma codisposição aceitável do ponto de vista geotécnico, além das exigências de percentual máximo de lodo e limitação do teor de umidade.

A destinação final do LE é um problema que vem sendo observada em nível mundial. Existem técnicas para seu aproveitamento e beneficiamento, como o lançamento em solos agrícolas (SANTOS, 2003; BARBOZA, 2007; SILVA, 2008; LOPES, 2008 *apud* FEITOSA, 2009) e em florestas e aplicação em áreas degradadas (ANDREOLI *et al.*, 1999; TSUTUYA & HIRATA, 2001). O lodo pode ainda ser utilizado na fabricação de fertilizantes e de agregados para concreto (GEYER, 2001; FONTES, 2003), dentre outros. Santos (2003) cita também a disposição de lodo no solo sem fins agrícolas, técnica conhecida como *Landfarming*.

Para técnicas de simples descarte, o lançamento ao mar foi proibido nos Estados Unidos desde 1991 (HEMPHILL, 1992), fazendo com que o país procurasse outras alternativas, sendo interessante para isso uma redução dos volumes gerados. No caso da alternativa de disposição final ser um aterro sanitário, os órgãos receptores (municipal, estadual ou particular) tem exigido teores de sólidos de pelo menos de 35 a 40%. Existem também, aterros específicos para o lodo, conhecidos como *monofill*, cujo teor de sólidos deve ser superior a 30%.

Segundo Fontes (2003), a incineração do lodo tem como principal vantagem a redução do volume, chegando a cerca de 10 a 20% do volume total. Durante o processo de incineração, os organismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos são eliminados, mas os metais pesados continuam presentes nas cinzas, tornando necessária uma disposição final adequada (TSUTUYA & HIRATA, 2001). Segundo Feitosa (2009), as cinzas podem ser dispostas em aterros sanitários, ou utilizadas como co-incineradores em fornos de cimento ou termoelétricas ou ainda em misturas com cimento, como se

realiza atualmente no Japão e Europa (ANDREOLI *et al.*, 2001). As cinzas também são aproveitadas em substituição parcial ao cimento para produção de argamassas e concretos (GEYER, 2001; TAY, 1978; FONTES, 2003).

Independente da alternativa escolhida para a disposição final, o LE possui características físico-químicas específicas que exigem uma disposição controlada. Desta forma, é indispensável se introduzir regulamentações específicas a fim de garantir a segurança dos agentes envolvidos e minimizar os riscos de contaminação do meio ambiente.

Os regulamentos vigentes em diferentes países da América e Europa para procedimentos de codisposição de lodos e resíduos sólidos urbanos abrangem aspectos relacionados à infra-estrutura e equipamentos básicos disponíveis no aterro, teor de umidade do lodo no momento da disposição e a relação percentual máxima em peso entre o lodo e resíduos sólidos urbanos dispostos (ESPINACE *et al.*, 2007). No entanto, não contemplam outros tópicos importantes para se estabelecer uma disposição segura em relação à estabilidade geotécnica do aterro, por exemplo:

- Forma adequada para disposição do lodo, como a espessura máxima das camadas, ou se deve ser disposto misturado com os RSU;
- Considerações a respeito do excedente de biogás, que é gerado devido à aceleração da biodegradação provocada pela codisposição de RSU com lodo, que deve ser devidamente drenado para evitar excessos de poro-pressão.

## **1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA**

Este trabalho dá continuidade às pesquisas desenvolvidas pelo Grupo de Resíduos Sólidos (GRS) da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, no tocante à necessidade de obtenção de critérios e parâmetros de resistência dos RSU para melhor entendimento do complexo comportamento geomecânico de aterros sanitários com base em dados locais, com objetivo de se estabelecer relações entre teoria e prática.

A justificativa da atual pesquisa consiste na avaliação da influência da codisposição de lodo de tratamento de esgoto e dos componentes fibrosos na resistência ao cisalhamento dos RSU. A etapa da pesquisa referente ao estudo da resistência ao cisalhamento dos RSU em equipamento de grandes dimensões foi iniciada por Fucale (2005). A etapa

relativa à geração de gás dos RSU vem sendo analisada em vários trabalhos, tais como Maciel (2003), Alcântara (2007), Alves (2008), Maciel (2009), dentre outros.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

Esta tese tem como principal objetivo avaliar a resistência ao cisalhamento dos RSU, considerando o efeito de reforço dos materiais fibrosos constituintes dos resíduos e alguns aspectos relacionados à codisposição de resíduos com lodo de esgoto (LE), tais como: geração de biogás, redução da permeabilidade, e sua influência nos parâmetros de resistência e na estabilidade de taludes de aterros sanitários.

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- i. Projetar e montar reatores para avaliação da geração de biogás dos RSU com codisposição com LE;
- ii. Projetar e montar um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões para avaliação da resistência ao cisalhamento dos RSU;
- iii. Realizar uma análise de estabilidade de um talude simulado, empregando uma geometria usual de projetos de aterros sanitários, utilizando os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos por meio de ensaios de laboratório, considerando o efeito das fibras e da codisposição de RSU e LE.

### **1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA**

Para a consecução dos objetivos, foi adotada a seguinte metodologia de pesquisa:

- i. revisão bibliográfica sobre o atual estado de conhecimento dos temas envolvidos;
- ii. coleta e preparação das amostras de RSU e LE;
- iii. realização de ensaios de caracterização dos resíduos para classificar e quantificar os materiais constituintes das amostras investigadas;
- iv. realização de ensaios de cisalhamento direto convencional e ensaios de permeabilidade com amostra de LE compactada;

- v. construção de reatores de laboratório para avaliação das alterações dos processos biodegradativos nos resíduos na geração do biogás, gerados por adição de lodo;
- vi. realização de monitoramento de gases nos reatores;
- vii. montagem de equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões para avaliação de parâmetros de resistência dos RSU;
- viii. realização de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões com amostras de RSU com e sem codisposição de LE;
- ix. análise dos resultados dos ensaios, comparação com resultados de trabalhos de outros pesquisadores;
- x. análises de estabilidade de taludes de um aterro sanitário hipotético através do uso do programa GGU-Stability, que permite incorporar o efeito da resistência dos materiais fibrosos nos cálculos.

## **1.5 ESTRUTURA DA TESE**

A tese está dividida em oito capítulos. Além deste, apresentam-se:

### ***CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

A revisão bibliográfica está dividida em três partes. Na primeira, sobre as propriedades dos RSU, enfatizam-se aspectos de composição, peso específico, teor de umidade, permeabilidade, compactação, biodegradação, destacando suas fases, fatores importantes na evolução da biodegradação e alguns estudos em escala reduzida, e compressibilidade. Na segunda parte, apresenta-se a resistência ao cisalhamento, com destaque para alguns estudos de laboratório com desenvolvimento de equipamentos de maiores dimensões para determinação de parâmetros de resistência para os RSU. Na terceira, aborda-se a estabilidade de taludes de aterros de RSU, alguns casos de ruptura reportados na literatura e o modelo de análise de estabilidade de taludes de RSU proposto por Kölsch (1996), que considera a contribuição da resistência à tração das fibras nos cálculos.

### ***CAPÍTULO III - PROGRAMA EXPERIMENTAL E CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS***

Apresenta-se o programa de investigação geotécnica em laboratório, adotado para análise do comportamento geotécnico de aterros de resíduos sólidos urbanos com codisposição de lodo de tratamento de esgoto. Apresentam-se as metodologias, resultados e análises dos ensaios de caracterização dos RSU e do LE.

***CAPÍTULO IV - PROJETO, MONTAGEM E MONITORAMENTO DE REATORES***

Apresenta-se a concepção, montagem, preparação das amostras, resultados e análises do monitoramento da geração de biogás em reatores de laboratório, onde foram reproduzidas duas condições de disposição de resíduos em aterros de RSU, para avaliar a influência da codisposição de RSU e LE.

***CAPÍTULO V - PROJETO, CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DE EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES***

Apresenta-se a concepção, montagem, procedimentos gerais de funcionamento e sistema de aquisição de dados de um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões desenvolvido para avaliação do comportamento mecânico dos RSU. A calibração inicial e os testes realizados no equipamento desenvolvido e no equipamento de cisalhamento direto convencional para efeito comparativo são também apresentados neste capítulo.

***CAPÍTULO VI - ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES COM RSU***

Apresenta-se a preparação das amostras, moldagem dos corpos de prova, metodologia e resultados dos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões realizados com três diferentes composições de RSU e LE. Nas análises dos resultados dos parâmetros de resistência obtidos nos ensaios são avaliadas a influência das fibras e do LE na resistência ao cisalhamento dos RSU.

***CAPÍTULO VII - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERROS DE RSU SIMULADO***

Apresentam-se análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU considerando dados da literatura para uma análise paramétrica e os dados obtidos nos ensaios de grandes dimensões para avaliação do efeito das fibras como componente de reforço, e avaliação da influência das poro-pressões de lixiviados e do biogás como agente de instabilização.

***CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS***

Apresenta-se o resumo das principais conclusões da tese e são sugeridas linhas de investigação para o desenvolvimento de futuras pesquisas.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 PROPRIEDADES DOS RSU

##### 2.1.1 COMPOSIÇÃO

Os RSU são constituídos por uma mistura heterogênea de tipo, forma e tamanho de seus componentes. A massa de resíduos depositada e compactada nos aterros se arranja formando uma estrutura. O volume intersticial entre seus componentes pode estar ocupado por lixiviado ou biogás, desta forma, na sua composição estão as fases sólida, líquida e gasosa. Grisolia *et al.* (1995) subdividem a fase sólida em três grupos principais, com diferentes comportamentos sob o ponto de vista geomecânico, propondo uma classificação que consiste de um diagrama triangular, apresentado na Figura II.1.

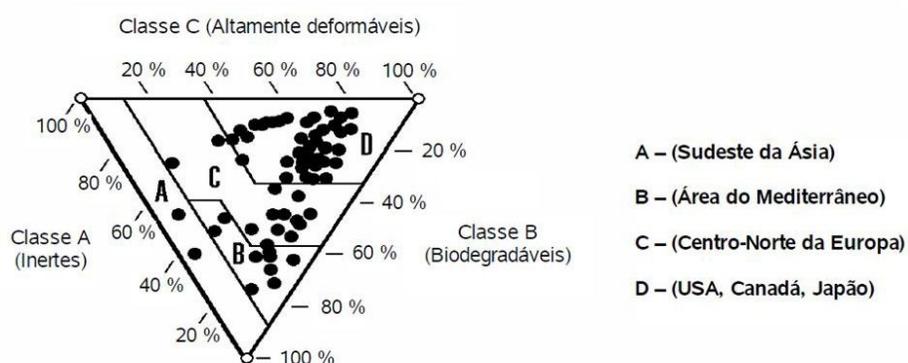


Figura II.1. Diagrama triangular para classificação dos RSU (GRISOLIA *et al.*, 1995)

- Materiais inertes estáveis, cujo comportamento mecânico pode ser considerado como o de um solo granular muito heterogêneo de granulometria grosseira, desenvolvendo forças de atrito entre as partículas. São exemplos vidros, metais, solos, restos de construção dentre outros;
- Materiais altamente deformáveis, que sofrem grandes recalques sob pequenos carregamentos, além da possibilidade de deformações de natureza viscosa, visto que apresentam também a capacidade de absorver ou incorporar fluidos no interior de sua estrutura. Por exemplo, tecidos, papéis, plásticos e borracha;

- Materiais facilmente degradáveis, que passam por grandes transformações na sua constituição e consistência num curto espaço de tempo, devido aos processos bio-físico-químicos. Sua degradação provoca variações consideráveis na estrutura do material com a contração e geração de líquidos e gases. Exemplo: matéria orgânica em geral, como vegetais e restos de alimento.

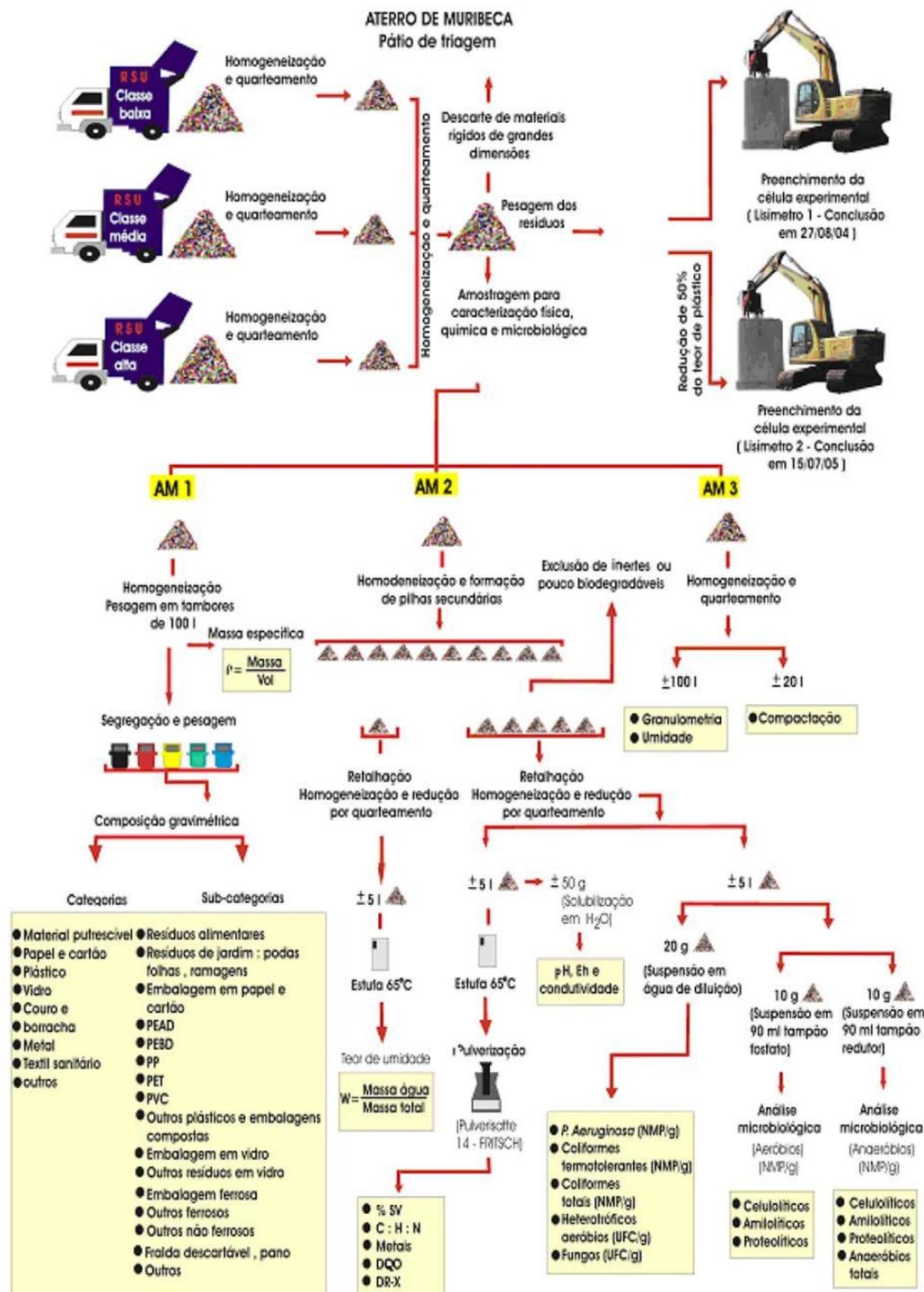
Segundo Carvalho (1999), existe uma variação do percentual das fases com o tempo devido aos processos de biodegradação que estão relacionados com umidade, conteúdo orgânico dos RSU e condições climáticas e o ponto básico para a compreensão do comportamento dos maciços de RSU é o conhecimento das interações existentes entre as três fases e as alterações destas com o tempo.

Para Alcântara (2007) o conhecimento da composição dos RSU permite uma avaliação preliminar da sua degradabilidade, do poder de contaminação ambiental e das possibilidades de reutilização, reciclagem e valorização energética e orgânica.

A composição gravimétrica dos RSU consiste na caracterização da disposição percentual em peso dos seus principais componentes, tais como matéria orgânica, papel, papelão, plásticos, metais, vidros, dentre outros. O nível de detalhamento desta caracterização depende da sua finalidade, podendo ser mais relevante caracterizar melhor um ou outro componente. Para Bidone & Povinelli (1999) o conhecimento dessa composição é essencial para a definição das providências a serem tomadas com os resíduos, desde sua coleta até o seu destino final.

De acordo com Landva & Clark (1990), o *Bureau of Solid Waste Management* sugere nove categorias para caracterização dos RSU: resíduos de poda; de alimentos; produtos de papel; materiais metálicos; plástico, borracha e couro; têxteis; madeira; vidros e cerâmicas; cinzas e pedras. Já a comissão europeia sugere 12 categorias e 35 subcategorias (SWA, 2004).

Alcântara (2007) faz referência a uma série de metodologias simplificadas e de ampla caracterização da literatura internacional, que depende de exigências particulares de cada país. O autor cita também algumas recomendações da literatura nacional, no entanto menciona que nenhuma recomendação nacional encontrada tem caráter oficial. Desta forma, para obter uma amostra representativa dos RSU da cidade do Recife – PE adotou-se o procedimento apresentado na Figura II.2 para a caracterização dos resíduos.



**Figura II.2. Procedimento para caracterização dos RSU e preenchimento dos lisímetros (Aicântara, 2007)**

A composição gravimétrica dos RSU geralmente reflete a situação econômica e hábitos da população, mas depende da legislação ambiental vigente, dentre outros fatores. Na

Tabela II.1 são apresentadas as composições dos resíduos de alguns países, adaptada de Alcântara (2007) e Fucale (2005). Na Tabela II.2 são apresentadas as composições dos resíduos de algumas cidades brasileiras, ampliado de Alcântara (2007).

**Tabela II.1. Composição percentual dos RSU de alguns países**

PAÍS	MATÉRIA ORGÂNICA	PAPEL E PAPELÃO	PLÁSTICO	VIDRO	METAL	TÊXTEIS	MADEIRA, BORRACHA E COURO	OUTROS
África do Sul <sup>1</sup>	31	33	7	12	7	-	-	10
Alemanha <sup>2</sup>	44	18	5	9	3	-	-	20
Austrália <sup>3</sup>	58	16	20	2	3	-	-	1
Bolívia <sup>3</sup>	71	2	3	1	1	-	1	21
Brasil <sup>4</sup>	52,5	24,5	2,9	1,6	2,3	-	-	16,2
Canadá <sup>1</sup>	33,9	38,9	4,9	6,5	6,2	-	-	9,6
China <sup>3</sup>	45	5	1	1	1	-	1	46
Escócia <sup>5</sup>	31,9	24,3	11,5	6,6	7,1	5,1	-	17,1
Espanha <sup>1</sup>	52	15	6	6	2,5	-	-	18,5
França <sup>2</sup>	25	31	10	12	6	4	-	12
Grécia <sup>3</sup>	59	19	7	2	4	-	4	5
Holanda <sup>2</sup>	52	25	8	5	4	2	-	5
Hong Kong <sup>3</sup>	15	3	-	10	3	10	7	22
Índia <sup>4</sup>	78	2	-	-	-	-	-	20
Itália <sup>2</sup>	47	23	7	6	3	-	-	14
Japão <sup>1</sup>	22,2	31,1	15,9	13,8	6,4	-	-	10,6
Kuwait <sup>6</sup>	50	20,6	12,6	3,3	2,6	4,8	-	6,1
México <sup>4</sup>	54,4	20	3,8	8,2	3,2	-	-	10,4
Peru <sup>4</sup>	51,4	10	3,2	1,3	2,1	-	-	32
Portugal <sup>2</sup>	60	23	4	3	4	-	-	6
Quênia <sup>3</sup>	74	12	5	4	3	-	-	2
Reino Unido <sup>2</sup>	20	35	11	9	7	2	-	16
Suíça <sup>3</sup>	28	31	9,5	9	2,5	5	4	11
Tailândia <sup>6</sup>	44	25	-	1	1	3	7	19
Turquia <sup>2</sup>	19	37	19	9	7	-	-	18
U.S.A. <sup>7</sup>	11,4	35,7	11,1	5,5	7,9	-	-	28,4

Fonte: <sup>1</sup>Otero Del Peral (1992) e Carra & Cossu (1990) *apud* Palma (1995); <sup>2</sup>White *et al.* (1995); <sup>3</sup>Bouazza *et al.* (1996); <sup>4</sup>Philippi Jr. (1999) *apud* D'Almeida & Vilhena (2000); <sup>5</sup>SEPA (2004); <sup>6</sup>Jasem (2002); <sup>7</sup>EPA (2003).

**Tabela II.2. Composição percentual dos RSU de algumas cidades brasileiras**

CIDADE	MATÉRIA ORGÂNICA	PAPEL E PAPELÃO	PLÁSTICO	VIDRO	METAL	OUTROS
Brasília <sup>1</sup>	50	26	15	-	2,5	6,5
Belo Horizonte <sup>2</sup>	61,6	9,5	10,9	2,9	2,3	12,8
Salvador <sup>3</sup>	60	10,5	15	2	2,4	10,1
São Carlos <sup>4</sup>	56,7	21,3	8,5	1,4	5,4	6,7
São Paulo <sup>5</sup>	49	19	23	2	4	3
Rio de Janeiro <sup>6</sup>	58,1	14,6	17,2	2,9	1,6	5,6
Palmas <sup>7</sup>	63	10,7	11,4	2,4	5,9	6,6
Recife <sup>8</sup>	45,5	23,1	19,9	3,9	1,8	5,8
Recife <sup>9</sup>	46,3	12,2	19,4	1,0	1,9	19,2

Fonte: <sup>1</sup>Junqueira (2000); <sup>2</sup>SMLU (2004) *apud* Martins (2006); <sup>3</sup>Melo & Jucá (2001); <sup>4</sup>Povinelli & Gomes (1991); <sup>5</sup>Limpurb (1999) *apud* Ziglio (2002); <sup>6</sup>COMLURB (2007); <sup>7</sup>Naval & Gondim (2001); <sup>8</sup>Alcântara (2007); <sup>9</sup>Mariano *et al.* (2007).

Para Lamare Neto (2004), a importância do conhecimento da composição física, principalmente daquelas características que direta ou indiretamente podem influenciar o comportamento dos resíduos nos aspectos ligados à 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, à permeabilidade e ao peso específico da massa de resíduos. Enquanto os plásticos e panos/trapos, que constituem os principais componentes fibrosos dos resíduos, influenciam o comportamento da massa de resíduos conferindo-lhe uma pseudo coesão.

### 2.1.2 PESO ESPECÍFICO

O conhecimento do peso específico dos RSU é indispensável para a elaboração dos projetos de aterros sanitários. Este índice físico é utilizado em várias etapas do projeto, desde os cálculos da vida útil do empreendimento, aspectos gerenciais de coleta, disposição, até o comportamento mecânico dos RSU no aterro. Além disto, o conhecimento do peso específico pode ser um indicador do processo de degradação da matéria orgânica no aterro, devido à evolução da sua composição com o tempo. Deve-se levar em conta que a metodologia adotada em cada análise pode não ser a mesma.

O peso específico úmido, expresso pelo símbolo  $\gamma$ , é a relação entre o peso total dos resíduos e seu volume total. Para sua determinação, molda-se um cilindro de resíduos cujas dimensões conhecidas permitem calcular o volume. O peso total dividido pelo volume é o peso específico úmido. Para ensaios *in situ*, a melhor forma de determinar o peso específico é através da escavação de poços ou trincheiras, onde se relaciona a massa de resíduos retirada com o volume da cavidade. No entanto, segundo Gachet *et al.* (1998), esta técnica tem a desvantagem da limitação de profundidade, em torno de 4 m. Pode-se estimar o peso específico *in situ* através da evolução do volume da massa aterrada com o peso do resíduo registrado na entrada do aterro. O valor obtido pode variar em função da umidade, mas permite um bom controle de campo.

A maioria dos dados encontrados na literatura se refere ao peso específico aparente úmido, já que na prática da gestão de RSU se visa sobretudo a massa dos resíduos que será depositada e o volume que ocupará no aterro. Para Alcântara (2007), a determinação do peso específico do resíduo fresco antes da disposição no aterro é relativamente simples, e a dificuldade reside na obtenção de uma amostra representativa

da massa aterrada. Já a medida desse parâmetro em aterros não é tão simples devido às dificuldades para a retirada de amostras “indeformadas” que sejam representativas ou de simular em laboratório as mesmas condições de compactação do aterro, a partir de amostras deformadas.

Alcântara (2007) apresenta valores encontrados na literatura variando numa ampla faixa, que vai desde 1,1 kN/m<sup>3</sup> para resíduos soltos sem nenhuma compactação, até 17 kN/m<sup>3</sup> para resíduos bem compactados. Alguns valores de peso específico de acordo com grau de compactação reportados na literatura são apresentados na Tabela II.3.

**Tabela II.3. Peso específico dos RSU de acordo com grau de compactação**

FONTE	GRAU DE COMPACTAÇÃO	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	
Merz & Stone (1962)		2,2 a 2,7	
Schomaker (1972)	RSU não compactado	2,9	
Bromwell (1978)		3,1	
König & Jessberger (1997)		3,0	
Schomaker (1972)		4,7 a 5,9	
Bromwell (1978)	RSU medianamente compactado	6,2	
Fassett <i>et al.</i> (1994)		5,0 a 8,0	
Fassett <i>et al.</i> (1994)	RSU mal compactado	3,0 a 9,0	
Sowers (1968)		4,7 a 9,4	
Oweis & Khera (1990)	RSU compactado	6,3 a 9,4	
Galante <i>et al.</i> (1991)		9,9 a 10,9	
Farias & Jucá (2000)		11,04	
Sowers (1968)		8,0 a 12,0	
Schomaker (1972)		8,8	
Bromwell (1978)		9,3	
Landva & Clark (1986)		6,8 a 16,2	
Landva & Clark (1990)	RSU bem compactado	7,0 a 14,0	
Watts & Charles (1990)		5,4 a 8,0	
Galante <i>et al.</i> (1991)		9,9 a 10,9	
Oweis (1993)		8,6 a 9,4	
Fassett <i>et al.</i> (1994)		9,0 a 10,5	
Oweis (1993)		RSU enfardado	8,6 a 14,1
König & Jessberger (1997)		RSU com alto grau de compactação	17,0
Richardson & Reynolds (1991)		RSU (não cita o grau de compactação)	15,0
Zornberg <i>et al.</i> (1999)	10,0 a 15,0		

A estimativa do peso específico para solos pode variar, e dependem do tipo de solo, da umidade e do grau de compactação, enquanto que para RSU existe uma série de outros fatores que podem trazer variações significativas, o que torna complexa a sua estimativa.

Estas variações podem ser observadas para diferentes regiões ou até dentro de um mesmo aterro, que podem ser influenciadas pela sua composição, forma de operação do aterro, pelas pressões das camadas sobrejacentes, sua idade e condições climáticas.

Para Dixon & Jones (2005), o peso específico inicial dos resíduos é dependente da sua composição, da cobertura diária e do grau de compactação durante a disposição. Com o passar do tempo, o peso específico passa a depender da profundidade do aterro, do grau de decomposição dos resíduos e das condições climáticas. Segundo Kavazanjian *et al.* (1995) o peso específico *in situ* médio varia tipicamente entre 8,6 a 10,2 kN/m<sup>3</sup> e, geralmente aumenta com a profundidade, mas a partir de 40 a 45 m o aumento é insignificante. Esse fato pode ser observado através do gráfico de perfis de massa específica de diferentes aterros, de acordo com Manassero (1997) ampliado por Calle (2007), apresentado na Figura II.3.

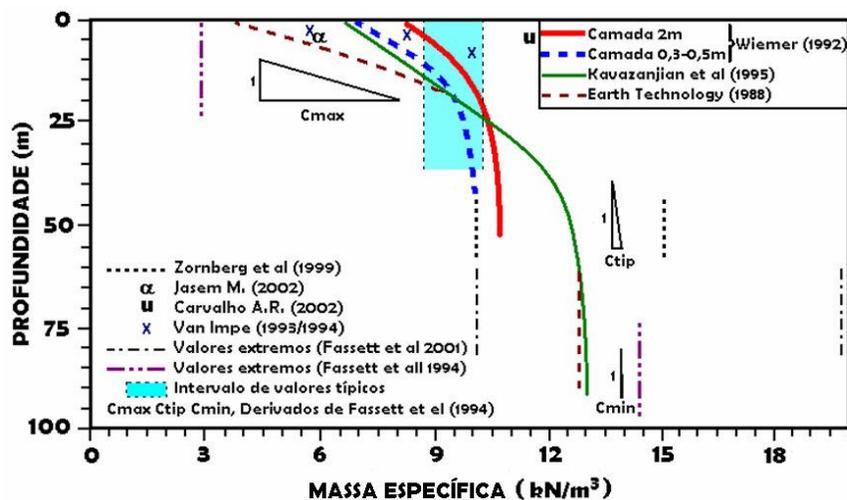


Figura II.3. Perfis de massa específica de RSU (CALLE, 2007)

Martins (2006) destaca a relação da composição gravimétrica nos valores do peso específico e o poder aquisitivo da população. O autor faz referência ao fato de resíduos com maior percentual de matéria orgânica gerados pela população de menor poder aquisitivo apresentarem maior peso específico, enquanto que os resíduos com maior percentual de papéis, papelão e plástico gerados pela população de maior poder aquisitivo possuem menor peso específico.

Maciel (2009) realizou uma avaliação do peso específico dos resíduos em ensaios de compressibilidade para amostra composta e por tipo de fração. Observa-se que a matéria

orgânica, depois de compactada, é a fração que apresentou maior peso específico. Os resultados médios para o peso específico dos RSU obtido sem aplicação de carga e sob compressão são apresentados na Tabela II.4.

**Tabela II. 4. Peso específico úmido dos resíduos (MACIEL, 2009)**

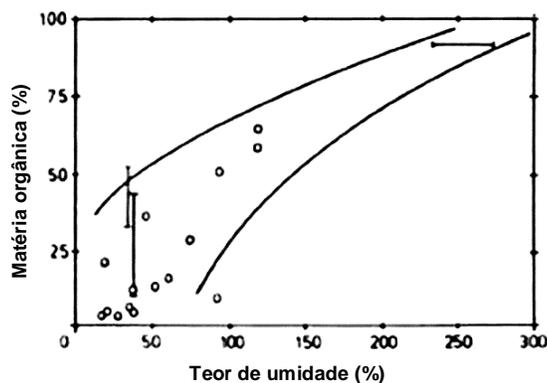
RSU (AMOSTRA COMPOSTA E FRAÇÕES)	PESO ESPECÍFICO ÚMIDO (kN/m <sup>3</sup> )	
	$\gamma_{\text{solto}}$	$\gamma_{\text{compactado (2,0 MPa)}}$
Amostra composta ( <i>in natura</i> )	4,3	8,8
Matéria orgânica putrescível	4,4	9,7
Papel/papelão	2,7	7,6
Plástico mole	1,8	7,2
Plástico duro	1,5	2,9
Isopor	1,8	1,8
Madeira	4,2	4,5
Materiais têxteis	2,8	5,6
Borracha e couro	4,2	4,6
Metais	2,8	3,1
Vidro	8,6	8,6
Fraldas descartáveis	4,4	7,1
Coco	4,6	5,0
Outros	11,2	---

### 2.1.3 TEOR DE UMIDADE

A umidade é um parâmetro que representa a variação do percentual de líquido dos RSU, que pode ser expresso como uma relação de volume (umidade volumétrica) ou de massa (umidade gravimétrica). A umidade volumétrica,  $\theta$ , é a razão entre volume de líquido ( $V_1$ ) e o volume total *in situ* ( $V_2$ ) da amostra:  $\theta = V_1/V_2$ . A umidade gravimétrica ( $w_w$ ), a razão entre a massa de líquidos ( $M_w$ ) e a massa total úmida ( $M_t$ ):  $w_w = M_w/M_t$ , ou entre a massa de líquidos ( $M_w$ ) e a massa total seca ( $M_s$ ):  $w = M_w/M_s$ . A relação entre as umidades gravimétrica e volumétrica depende do peso específico dos RSU e pode ser escrita como:  $\theta = (\gamma/\gamma_w) \cdot w_w$ , para a umidade gravimétrica e peso específico em base úmida, e  $\theta = (\gamma_d/\gamma_w) \cdot w$ , para a umidade gravimétrica e peso específico em base seca.

Em geral, no Brasil, a determinação do teor de umidade dos RSU, obedece a NBR 6457 (ABNT, 1986a), que convencionou a temperatura na faixa de 60 a 65°C para solos com elevado conteúdo de matéria orgânica para se evitar a perda de sólidos por volatilização. Há outras metodologias em que a temperatura estabelecida é de 105°C (WHO, 1979 e TCHOBANOGLOUS *et al.*, 1993).

Após analisar várias amostras de RSU obtidas em aterros no Canadá, Landva & Clark (1990) afirmam que a massa orgânica tem maior capacidade de retenção de água, assim o teor de umidade parece aumentar com maiores percentuais de matéria orgânica, de acordo com gráfico apresentado na Figura II.4. Essa relação também foi observada por Knochenmus *et al.* (1998) e Azevedo *et al.* (2003).



**Figura II.4. Teor de umidade dos RSU versus matéria orgânica (LANDVA & CLARK, 1990)**

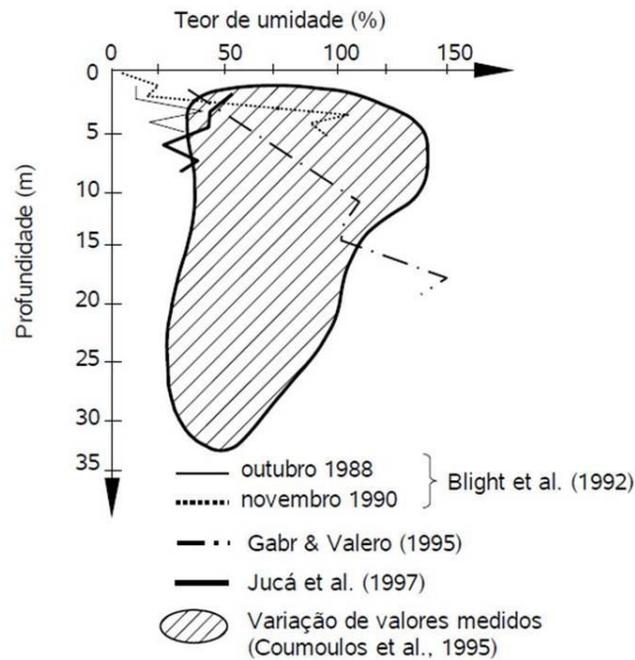
Os valores dos teores de umidade dos RSU dependem de vários fatores, como sua composição inicial, condições climáticas, procedimentos operacionais de coleta, aterramento e cobertura dos resíduos, biodegradação, eficiência do sistema de drenagem de gases e líquidos, dentre outros. Na Tabela II.5 são apresentados os valores do teor de umidade compilados da literatura por Alcântara (2007) ampliados.

**Tabela II.5. Teor de umidade dos RSU de alguns países (ALCÂNTARA, 2007)**

FONTE	LOCAL	UMIDADE GRAVIMÉTRICA (%)
Huitric (1981)	Aterros dos EUA	15 a 40
Tchobanoglous <i>et al.</i> (1993)	Aterros e caminhão compactador – EUA	15 a 40
Gabr & Valero (1995)	Pioneer Crossing Landfill / Pensilvânia – EUA	(30 <sup>1</sup> a 130 <sup>2</sup> )*
Coumoulos <i>et al.</i> (1995)	Aterro Ano Liossa / Atenas – Grécia	(40 <sup>3</sup> a 60 <sup>4</sup> )
Palma (1995)	Espanha (resíduos não compactados)	40 a 60
El-Fadel & Al-Rashed (1998)	Aterro de Mountain View / Califórnia – EUA	26 a 50
Jucá <i>et al.</i> (1997)	Aterro da Muribeca / Recife – Brasil	20 a 50
Bidone & Povinelli (1999)	Brasil	40 a 60
Gomes <i>et al.</i> (2005)	Aterro de Santo Tirso – Portugal	(61 <sup>1</sup> a 117 <sup>5</sup> )*
Zornberg <i>et al.</i> (1999)	Aterro na Califórnia – EUA	(8 a 50)*
Verbrugge (2000)	Aterros da Bélgica	10 a 50
Carvalho (2002)	Aterro de Santo André - Brasil	(17 a 54)*
Catapreta <i>et al.</i> (2005)	Aterro de Belo Horizonte – Brasil	(25 a 75)*

Legenda: \*umidade na base seca; <sup>1</sup>resíduo novo na superfície do aterro; <sup>2</sup>resíduo na profundidade de 20 m; <sup>3</sup>para profundidades de 30 m; <sup>4</sup>para profundidades de até 5 m; <sup>5</sup>resíduo com 3 anos na profundidade de 11 m.

Verifica-se que, para os resultados encontrados por Gabr & Valero (1995) e Gomes *et al.* (2005), existe um aumento do teor de umidade com a profundidade, enquanto nas pesquisas de Coumoulos *et al.* (1995) ocorre o inverso. Isto depende do balanço hídrico do aterro. Na Figura II.5 são apresentadas correlações do teor de umidade com a profundidade, determinadas por alguns autores (CARVALHO, 1999).



**Figura II.5. Teor de umidade dos RSU versus profundidade (CARVALHO, 1999)**

#### 2.1.4 PERMEABILIDADE

O coeficiente da permeabilidade dos RSU é um importante dado de projeto e operação de aterros sanitários porque ele intervém num grande número de problemas práticos. Seu conhecimento pode contribuir no cálculo da estimativa da vazão do lixiviado do aterro utilizado no dimensionamento dos sistemas de coleta e drenagem; na análise de recalques, que está relacionado com a redução do índice de vazios associado à perda de água e gás; e nos estudos de estabilidade, porque a tensão efetiva depende da poro-pressão.

A permeabilidade depende do procedimento de aterramento, grau de compactação, tensão de sobrecarga, idade e composição dos RSU (KNOCHENMUS *et al.*, 1998). Outros fatores que têm influência direta na permeabilidade são o grau de saturação e a

temperatura. De acordo com Alcântara (2007), a determinação do coeficiente de permeabilidade à água dos resíduos sólidos tem sido realizada pelos métodos comumente empregados para solos, como: ensaios de bombeamento (OWEIS *et al.*, 1990), ensaios de laboratório do tipo coluna (POWRIE *et al.*, 2005; LANDVA & CLARK, 1990), e ensaios de infiltração em poços (LANDVA & CLARK, 1990).

König & Jessberger (1997) compilaram dados de coeficientes de permeabilidade à água de RSU obtidos através ensaios de laboratório e de campo por vários autores, sendo os valores da ordem de  $10^{-4}$  a  $10^{-8}$  m/s. Para Landva *et al.* (1998), um dos motivos da grande variabilidade desse parâmetro está centrado na escala de estudo. Para McCreanor & Reinhart (1997), essa variabilidade é função dos procedimentos de disposição bem como das características do material.

De forma geral, valores típicos para a permeabilidade à água, verificadas em aterros sanitários, variam de  $10^{-4}$  a  $10^{-6}$  m/s, semelhante à permeabilidade das areias. A Tabela II.6 apresenta a permeabilidade à água de RSU obtido por diferentes métodos, ampliados de Kaimoto & Cepollina (1996) e Manassero *et al.* (1996) por Calle (2007).

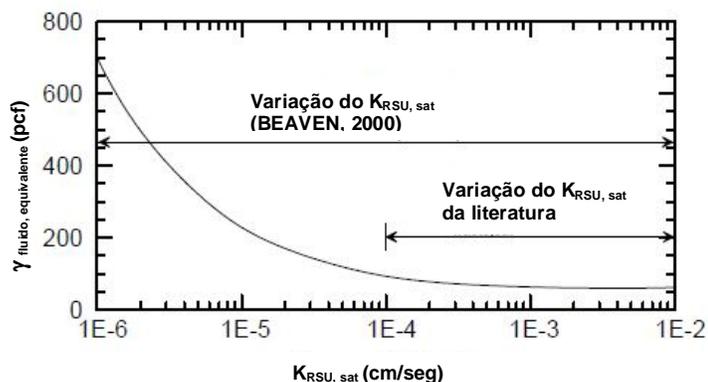
**Tabela II.6. Permeabilidade à água dos RSU (Kaimoto & Cepollina, 1996 e Manassero *et al.*, 1996; ampliado por Calle, 2007)**

FONTE	ANÁLISE	k (m/s)	OBSERVAÇÃO
Fungaroli & Steiner (1979)	Lisímetro	$10^{-5}$ a $2 \times 10^{-4}$	Resíduo triturado
Koriatas <i>et al.</i> (1983)	Laboratório	$5 \times 10^{-5}$ a $3 \times 10^{-5}$	
Oweis & Khera (1990)	Ensaio de campo	$10^{-5}$	
Oweis <i>et al.</i> (1990)	Ensaio de campo	$10^{-6}$	Carga variável
Manassero (1990)	Ensaio em poço	$10^{-5}$ a $2 \times 10^{-4}$	Bombeamento (15 - 20 m)
Brandl (1990)	Ensaio de campo	$2 \times 10^{-5}$ a $7 \times 10^{-6}$	Comp com rolo. Ens..carga variável
Landva & Clark (1990)	Ensaio em poço	$10^{-5}$ a $4 \times 10^{-4}$	
Cepollina <i>et al.</i> (1994)	Ensaio em poço	$10^{-7}$	Bandeirantes/SP
Brandl (1994)	Laboratório	$2 \times 10^{-6}$ a $3 \times 10^{-5}$	Compacto
Ehrlich <i>et al.</i> (1994)	Ensaio de campo	$10^{-5}$	Gramacho/RJ - Fluxo horiz.
Beaven & Powrie (1995)	Laboratório	$10^{-7}$ a $10^{-6}$	Pres. conf. de 0 a 600 kPa
Gabr & Valero (1995)	Laboratório	$10^{-7}$ a $10^{-5}$	
Blengino <i>et al.</i> (1996)	Ensaio de campo	$3 \times 10^{-7}$ a $3 \times 10^{-6}$	Carga variável em furos (30-40 m)
Santos (1998)	Ensaio de campo	$10^{-7}$	Muribeca/PE – Furos de sondagem
Carvalho (2002)	Ensaio de campo	$9,5 \times 10^{-6}$	Santo André/SP
Mahler & Aguilar (2001)	Permeômetro Guelph	$4,7 \times 10^{-4}$	Jacarepaguá/RJ

Segundo Santos & Presa (1995), os RSU são materiais propensos a se comportarem de modo drenado, ou seja, a não desenvolverem excessos de poro-pressão. No entanto, Boscov & Abreu (2000) questionam esta afirmação devido às medidas de pressões de gás de até 170 kPa registradas em aterros sanitários brasileiros (CALLE, 2007).

Segundo Merry & Kavazanjian (2006), em aterros sanitários, os RSU se apresentam não saturados, o que reduz o coeficiente de permeabilidade ao ar de forma significativa. Se por alguma situação, os resíduos ficarem saturados, o gás gerado não será devidamente drenado, ficando retido no interior no aterro. Como resultado, o gás acumulado forma bolhas. Considerando uma única bolha de gás “estático” no fluido dos poros (ou lixiviado), a pressão dentro da bolha estaria em equilíbrio com a pressão em torno dos lixiviados, segundo a estática dos fluidos (KOERNER & SONG, 2000). Num aterro, a pressão dentro da bolha de gás é continuamente crescente em massa devido à degradação dos resíduos e está em equilíbrio com o lixiviado circundante.

Merry *et al.* (2006) avaliou a interação do gás gerado no aterro com o fluido dos poros utilizando um ensaio de coluna unidimensional saturada, que foi preenchida apenas com resíduos degradáveis na porção inferior. Um modelo teórico para estimativa do excesso de poro-pressão foi desenvolvido pelo método de diferenças finitas e forneceu uma solução aproximada para o modelo. Segundo os autores, como resultado da combinação da pressão estática do fluido e o excesso de poro-pressão da geração de gás, pode-se considerar que o fluido dos poros tem um peso específico “equivalente”, que é mais alto que o da água, para esta condição específica. Um estudo paramétrico mostrou que o peso específico equivalente do fluido dos poros para a interação com o gás do aterro é altamente dependente do coeficiente de permeabilidade dos RSU. Baseando-se nos resultados encontrados pelo método das diferenças finitas, uma relação entre o peso específico equivalente do fluido dos poros e a coeficiente de permeabilidade saturada foi desenvolvida, conforme apresentados na Figura II.6.



**Figura II.6. Relação entre peso específico equivalente do fluido dos poros e o coeficiente de permeabilidade (MERRY *et al.*, 2006)**

### 2.1.5 COMPACTAÇÃO

A compactação dos RSU é sua densificação, ou a redução do seu índice de vazios, realizada através de equipamentos mecânicos, com o objetivo torná-los mais resistentes e menos deformáveis, além de possibilitar maior acondicionamento por unidade de volume, aumentando a vida útil do aterro. Os ensaios de compactação para RSU são realizados de acordo com a metodologia do ensaio de compactação padronizada no Brasil para solos, descrita na NBR 7182 (ABNT, 1986b).

Gabr & Valero (1995) realizaram ensaios utilizando energia normal e obtiveram peso específico seco máximo de  $9,3 \text{ kN/m}^3$  e teor de umidade ótimo de 31% em resíduos com idade entre 15 e 30 anos. Kölsch (2003) encontrou valores da ordem de  $12 \text{ kN/m}^3$  e umidade ótima de 26,8% para amostras de resíduos sólidos velhos com partículas inferiores a 8 mm do Aterro de Ihlenberg, Alemanha (FUCALE, 2005).

Fucale (2005) realizou ensaios de compactação utilizando amostras de resíduos velhos do aterro de Ihlenberg e pré-tratados mecânica e biologicamente do aterro de Buchen, Alemanha, com diferentes composições, sem fazer reuso da amostra. Foram obtidos valores de  $8,6$  a  $13,8 \text{ kN/m}^3$  para o peso específico aparente seco máximo e umidades ótimas de 20,5 a 36,5%. Os resultados indicaram pesos específicos aparentes secos mais baixos para as amostras com composição que incluía a componente de reforço dos materiais fibrosos. Essa redução da densidade foi associada à resistência à compactação das fibras e ao fato de as mesmas possuírem peso específico mais baixo que o do material granular dos resíduos.

Este fato foi também constatado por Alcântara (2007) ao realizar ensaios de compactação utilizando amostras de resíduos com diferentes teores de plástico na sua composição. O autor observou que o peso específico aparente seco máximo foi maior para os resíduos com menor teor de plástico na sua composição. Apontando o fato de o menor teor de plástico na composição facilitar o entrosamento das partículas, melhorando a trabalhabilidade dos resíduos.

A compactação de RSU em aterros sanitários geralmente é realizada através do emprego de equipamentos mecânicos, como tratores de esteira. As tensões devidas ao peso próprio das camadas sobrejacentes também contribuem para a compactação do aterro. Segundo Catapreta (2008), a compactação realizada nos aterros de RSU deve ser controlada dada a sua importância no que se refere à otimização da disposição e melhoria das propriedades geomecânicas dos resíduos. A compactação depende de inúmeros fatores, dentre eles: espessura da camada de resíduos, tipo, peso e número de passadas do equipamento compactador; inclinação da rampa de compactação; sentido de compactação; composição e umidade dos RSU (BOSCOV & ABREU, 2000; SAVAGE *et al.*, 1998 e CATERPILLAR, 2001).

Catapreta (2008) cita ainda que são caracterizadas como vantagens de uma boa compactação: aumento da vida útil dos aterros sanitários, redução da migração descontrolada de gases e líquidos lixiviados, diminuição da vazão de líquidos lixiviados, aumento da estabilidade do maciço de resíduos, a possibilidade de tráfego imediato de veículos sobre o maciço e melhorias no aspecto estético da massa de resíduos aterrada.

#### 2.1.6 BIODEGRADAÇÃO DOS RSU

Do ponto de vista geotécnico, a biodegradação altera o comportamento dos aterros de RSU, a exemplo da contínua perda de massa da fase sólida dos resíduos que gera o aumento da densidade, redução da permeabilidade e da compressibilidade do aterro (EDGERS *et al.*, 1992; WALL & ZEISS, 1995 e SIMÕES *et al.*, 1996 *apud* Carvalho, 1999). Além disso, a biodegradação pode modificar a resistência ao cisalhamento do resíduo através do enfraquecimento do efeito “reforço” dado pela presença de materiais plásticos, têxteis e fibras.

Os resíduos sólidos urbanos, acumulados continuamente em aterros, são uma mistura de grande variedade química sob influência de agentes naturais como, chuva e microorganismos, e são objeto de evoluções complexas, constituídas pela superposição de mecanismos físicos, químicos e biológicos. Além da dissolução dos elementos minerais e do carreamento pela água de percolação das finas partículas e do material solúvel, o principal responsável pela degradação dos resíduos é a bioconversão da matéria orgânica em formas solúveis e gasosas. O conjunto destes fenômenos conduz à geração de metabólitos gasosos e ao carreamento pela água de moléculas muito diversas, as quais originam os vetores da poluição em aterro sanitário: o biogás e os lixiviados (CASTILHOS JR, 2003).

A quantidade de resíduos decompostos dependerá principalmente do seu conteúdo orgânico biodegradável, da temperatura ambiente, da disponibilidade de oxigênio, da umidade, dos microorganismos e das condições do meio interno e externo (KELLER *et al.*, 2002). Outros fatores que influenciam nos processos de biodegradação, foram citados por Van Meerten *et al.* (1995), tais como: composição, tamanho de partículas e grau de compactação dos RSU, disponibilidade de nutrientes, detalhes de projeto e de operação do aterro (compactação, existência de cobertura diária, drenagem).

Para que ocorra um crescimento bacteriano satisfatório, todos os microorganismos necessitam de condições mínimas para a sobrevivência e posterior reprodução. Para tanto, as fontes de nutrientes, oxigênio, pH, umidade e temperatura ideais são fatores essenciais para o seu desenvolvimento (MELO, 2003). Para a compreensão do processo de decomposição e como ele influencia na geotecnia dos aterros, apresenta-se uma breve revisão da literatura sobre a biodegradação dos RSU.

#### 2.1.6.1 FASES DA BIODEGRADAÇÃO

Segundo Barlaz *et al.* (1989), geralmente, a celulose e a hemicelulose somam de 45 a 60% em peso seco dos resíduos sólidos urbanos e são os principais constituintes biodegradáveis. O processo de decomposição anaeróbia dos RSU requer atividade coordenada de vários grupos de microorganismos que desencadeiam etapas distintas.

A transformação anaeróbia do material orgânico bruto em bioestabilizado nos aterros sanitários é admitida conceitualmente por vários autores (PARKER, 1983; POHLAND,

1987; CHRISTENSEN & KJELDSSEN, 1989; TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993; BARLAZ, 1996; BIDONE & POVINELLI, 1999; BENSON *et al.*, 2007) como um processo de cinco fases:

- I. **Fase aeróbia - ajustamento inicial:** os resíduos depositados no aterro apresentam grande quantidade de oxigênio aprisionado em seus vazios, o que favorece a biodegradação aeróbia. Devido a este fato, observa-se a predominância de fungos e bactérias. Nesta fase, que pode durar semanas, se estabelece o consumo do oxigênio, a degradação da matéria orgânica a CO<sub>2</sub> e água e um aumento considerável de temperatura, como consequência de reações aeróbias fortemente exotérmicas.
- II. **Fase de transição:** a queda no nível do oxigênio, o início do estabelecimento de condições anaeróbias na massa de resíduos e o aumento na produção dióxido de carbono e hidrogênio caracterizam esta fase. Em condições anaeróbias, o receptor de elétrons muda de oxigênio para nitratos e sulfatos, sendo reduzidos quase sempre em gás nitrogênio e gás sulfídrico. No final desta fase, ocorre o início do acúmulo de ácidos graxos orgânicos voláteis.
- III. **Fase ácida:** o aumento da biomassa microbiana desta fase está associada à grande produção e acúmulo de quantidades significativas de ácidos orgânicos e CO<sub>2</sub>, determinando a redução do pH do resíduo e do lixiviado produzido. A concentração de ácidos carboxílicos alcança um valor máximo e o pH atinge valores mínimos durante todo o processo. Outras características desta fase são: o rápido consumo de substratos e nutrientes e os aumentos significativos na DQO, DBO e condutividade do lixiviado.
- IV. **Fermentação metanogênica:** nesta fase, a presença de ácidos decresce, o pH retorna à neutralidade e acentua-se a atividade dos microrganismos produtores de metano. Com o aumento da produção de biogás, as concentrações de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> atingem normalmente valores na faixa de 45 a 60% e 35 a 50% do volume produzido, respectivamente. Ocorrem reduções nas concentrações de DQO, DBO e de metais pesados do lixiviado.
- V. **Fase de maturação:** é caracterizada pela queda na produção de biogás (CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>), devido à redução da atividade biológica determinada pela escassez de nutrientes e substratos do meio, e pelo aumento nas concentrações de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>. O lixiviado continua a migrar através dos resíduos, mas permanece com concentrações mais baixas. Ocorre ainda a biodegradação lenta dos substratos resistentes.

A duração de cada fase é dependente de diversos fatores, tais como: pH, Eh, alcalinidade, nutrientes, infiltração de água, temperatura, composição, grau de compactação dos resíduos, disposição, coberturas intermediárias e final etc., que são condições particulares de cada aterro. A Figura II.7 apresenta o modelo típico da evolução da degradação dos resíduos e da composição dos gases do aterro, adaptado de Farquhar & Rovers (1973), Parker (1983), Pohland (1991) *apud* Tchobanoglous *et al.* (1993) e Augenstein & Pacey (1991) por Alcântara (2007).

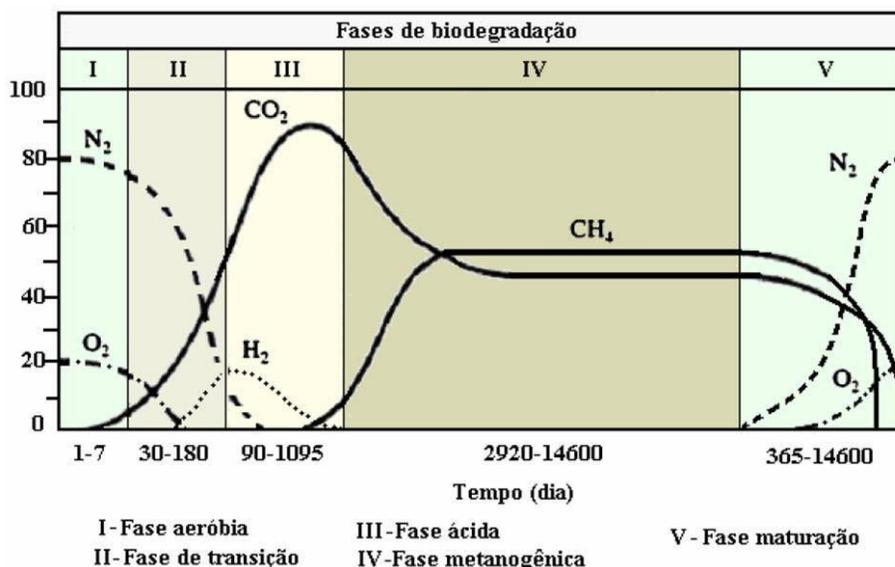


Figura II.7. Fases da degradação e concentração de gases em aterros (adaptado por ALCÂNTARA, 2007)

### 2.1.6.2 FATORES IMPORTANTES NA EVOLUÇÃO DA BIODEGRADAÇÃO

- **NUTRIENTES**

Nos processos de decomposição anaeróbia, igual aos aeróbios, utiliza-se o carbono, nitrogênio, fósforo e outros elementos nutrientes para a formação celular. Este processo de decomposição anaeróbia caracteriza-se por um conjunto de reações associadas ao metabolismo de numerosos microorganismos, os quais ocorrem em múltiplas etapas. A decomposição anaeróbia produz-se sobre a fração orgânica dos resíduos sólidos. Durante este processo, as complexas partículas sólidas de matéria orgânica são reduzidas a compostos mais simples e solúveis em água. Uma vez solubilizados, os

produtos da decomposição são eliminados em forma de lixiviado ou convertidos em metano e dióxido de carbono (ARIAS, 1994).

Os nutrientes podem ser de origem orgânica e inorgânica. Segundo Christensen & Kjeldsen (1989); Tchobanoglous *et al.* (1993); Chernicharo (1997) e Silva (2005), os principais nutrientes inorgânicos, de interesse da digestão anaeróbia são: ferro, zinco, cobre, cobalto, níquel e molibdênio (micronutrientes), além de nitrogênio fósforo potássio, enxofre, cálcio, magnésio (macronutrientes) (CATAPRETA, 2008).

Segundo Monteiro (2003), os nutrientes orgânicos são necessários aos organismos para a formação do tecido celular, os quais não podem ser sintetizados a partir de outras fontes de carbono orgânico.

#### • *TEMPERATURA*

A temperatura tem importante significado no processo de decomposição dos resíduos, pois atua na cinética das reações bioquímicas responsáveis pela conversão de resíduos em gases, líquidos e composto bioestabilizado (MONTEIRO, 2003). A cinética de degradação de compostos químicos pelos microorganismos presentes na massa de RSU consiste na sua evolução ao longo do tempo.

Através da temperatura, é possível se estimar o tipo de população microbiana que está em atividade. Isso porque cada tipo de microorganismo atua numa faixa de temperatura específica, na qual se encontra melhor adaptado. Em condições anaeróbias, os microorganismos são classificados de acordo com três faixas de temperatura:

- Psicrófilos - sua temperatura ótima se encontra entre 0 e 15°C, embora possam crescer a temperaturas até 20°C;
- Mesófilos - crescem a temperaturas moderadas, entre 15 e 45°C;
- Termófilos - crescem entre 42 e 113°C. Os organismos que crescem acima de 60°C são designados por termófilos extremos ou hipertermófilos.

Em termos gerais, as espécies que crescem a baixas temperaturas têm taxas de crescimento mais lentas. Todos os processos de crescimento dos microorganismos são dependentes de reações químicas, as quais são afetadas pela temperatura. A temperatura na qual uma espécie de microorganismo cresce mais rapidamente é denominada temperatura ótima de crescimento.

Chernicharo (1997) cita que dois níveis ótimos de temperatura têm sido associados à digestão anaeróbia, um na faixa mesófila (30 a 35°C) e outro na faixa termófila (50 a 55°C). Estudos da cinética de fermentação de RSU em temperaturas de 30-46°C indicam que a faixa ótima de operação de aterros estaria entre 36-38°C e que sob condições ótimas, em apenas um ano, haveria uma redução de cerca de 95% da matéria orgânica biodegradável (MATA-ALVAREZ & MARTINEZ-VITURTIA, 1986 *apud* ALCÂNTARA, 2007). No entanto, alguns estudos de aterros registram temperaturas bem mais elevadas.

A temperatura dos aterros de RSU geralmente apresenta valores crescentes até profundidades entre 5 e 10 m. Coumoulos *et al.* (1995) apresentam dados de aterro de RSU em Atenas - Grécia, com temperaturas basicamente na faixa termofílica, oscilando entre 40 e 60°C, Figura II.8. Para os autores, a temperatura a partir de 5,0 m no interior do aterro aparentemente não é afetada pelas variações sazonais da temperatura ambiente. Mariano & Jucá (1998) apresentam valores crescentes da temperatura com a profundidade no aterro da Muribeca em Pernambuco, Figura II.9.

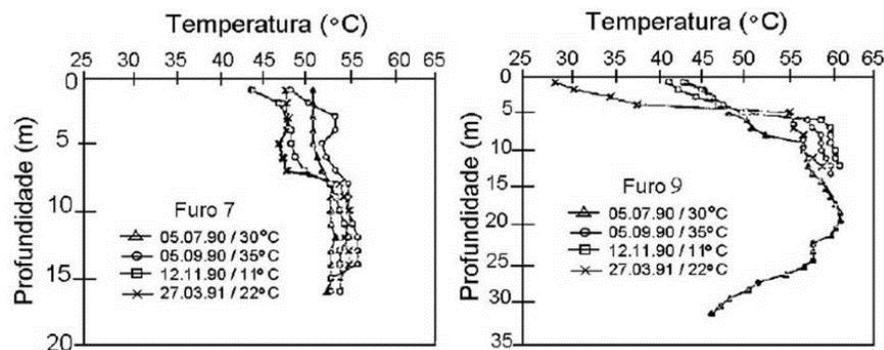


Figura II.8. Temperatura versus profundidade do aterro (COUMOULOS *et al.*, 1995)

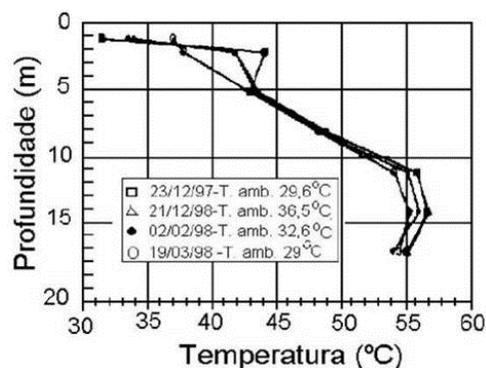


Figura II.9. Temperatura versus profundidade do aterro (MARIANO & JUCÁ, 1998)

- **UMIDADE**

Um dos principais fatores que controlam o processo de biodegradação é o teor de umidade (REINHART & AL-YOUSFI, 1996). Segundo El-Fadel *et al.* (1997), o teor de umidade é a variável que mais afeta os processos de biodegradação, pois promove um ambiente aquoso que facilita o transporte de nutrientes e de microorganismos, além de diluir os constituintes inibidores do processo. Para Paes (2003), até um determinado nível de umidade pode haver estímulo de produção de gás. No entanto, infiltrações excessivas podem causar retardamento da produção.

Segundo alguns autores (BARLAZ *et al.*, 1990; PALMISANO & BARLAZ, 1996; BIDONE & POVINELLI, 1999; US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1995), a faixa ótima de umidade para a degradação biológica deverá estar entre 20 e 40%. No entanto, a literatura também recomenda desde o mínimo de 25% até a umidade ótima de 40 a 70% (MACIEL, 2003).

- **POTENCIAL HIDROGENIÔNICO**

O termo pH (Potencial Hidrogeniônico) é usado universalmente para expressar o grau de acidez ou alcalinidade de uma solução, mostrando o equilíbrio entre as concentrações de oxidrilas (OH<sup>-</sup>) e íons de hidrogênio (H<sup>+</sup>) na solução. Esse parâmetro é muito utilizado no monitoramento de diversos ambientes, uma vez que influencia nas reações químicas e bioquímicas, podendo comprometer a atividade metabólica dos microorganismos.

Segundo Alcântara (2007), geralmente o pH ótimo para o crescimento bacteriano está compreendido entre 6,5 e 7,5 (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993) e é praticamente nesse mesmo intervalo que os processos de digestão anaeróbia se desenvolvem melhor (CHRISTENSEN & KJELDSEN, 1989 e McCARTY, 1964a). Valores abaixo de 6,2 inibem fortemente a atividade das bactérias metanogênicas e, na faixa de 4,5 a 5,9, afetam também as bactérias fermentativas. Efeitos similares são observados, também, em valores de 8,0 a 8,5 (McCARTY, 1964a e 1964b)

Condições ácidas são tipicamente desenvolvidas logo depois que o resíduo é aterrado, durante o desequilíbrio entre as fases hidrolítica e fermentativa e as fases acetogênica e metanogênica. O pH é indicado em várias pesquisas como o principal fator relacionado com a metanogênese (BARLAZ *et al.*, 1990). Como constatado por Segal (1987),

baseado em análises de amostras de mais de dez aterros sanitários, o pH foi apontado como o mais forte prognóstico da taxa de produção de metano. Nesta linha de investigação, vários autores (BUIVID *et al.*, 1981; MATA-ALVAREZ & MARTINEZ-VITURTIA, 1986; BARLAZ *et al.*, 1987, 1989) estimularam a produção de metano em reatores contendo resíduos sólidos e lodo adicionando substâncias neutralizantes, como, carbonato de cálcio. Desta neutralização seria esperada uma aceleração da decomposição e estabilização do lixiviado.

### 2.1.6.3 ESTUDO DA BIODEGRADAÇÃO EM ESCALA REDUZIDA

A técnica das células experimentais em escala reduzida, geralmente empregada para estudar o comportamento dos resíduos sólidos, contribui para uma melhor compreensão do metabolismo da degradação da matéria orgânica nos aspectos físicos, químicos e microbiológicos. Segundo Alcântara (2007), através destes experimentos pode-se simular situações particulares, que seriam inviáveis em escala real como, por exemplo, estudar o comportamento de resíduos com composições específicas, sua codisposição com resíduos de outra natureza, a simulação de condições ambientais que podem envolver precipitação, umidade e temperatura, concepção técnica alternativa de tratamento ou pré-tratamento dos resíduos, entre outros. De acordo com Levine *et al.* (2005), testes com lisímetros possibilitam avaliar o processo de degradação de resíduos e geração de lixiviado sob condições controladas. Os experimentos em escala de laboratório são mais comuns, devido ao baixo custo de montagem, que possibilita a preparação de vários ensaios em série, além da facilidade de controle das variáveis.

Na Figura II.10 são apresentados exemplos de experimentos realizados em escala reduzida de campo e laboratório. Os lisímetros (1), com aproximadamente 8 m<sup>3</sup> de capacidade, foram realizados por Alcântara (2007) no Aterro de RSU da Muribeca – PE para avaliar a influência das condições climáticas e composição dos resíduos no processo evolutivo da biodegradação; os reatores confeccionados em fibra de vidro (2), com 2,5 m de altura e 0,6 m de diâmetro, realizados em triplicata para avaliar a influência da recirculação de lixiviado nas fases de digestão anaeróbia de RSU, apresentados por Cintra *et al.* (2005); e os reatores confeccionados em tubos de PVC (3), com 1,37 m de altura e 0,3 m de diâmetro, realizados por Levine *et al.* (2005) *apud* Alcântara (2007), para verificar a eficiência de diferentes sistemas de drenagem para o lixiviado gerado por RSU e sua codisposição com resíduos de combustão e lodos.



**Figura II.10. Experimentos em escala reduzida de campo e laboratório: (1) lisímetros em alvenaria - Alcântara (2007); (2) reatores em fibra de vidro – Cintra *et al.* (2005); reatores em PVC- Levine *et al.* (2005)**

### 2.1.7 COMPRESSIBILIDADE

Para um tratamento de RSU seguro em aterros sanitários, o empreendimento necessita adequar projeto e operação às propriedades geotécnicas dos resíduos. As propriedades mecânicas dos resíduos sólidos urbanos dependem da composição e comportamento de cada componente. Segundo Fucale (2005), quantificar a resistência e a compressibilidade dos RSU consiste numa difícil tarefa em função da sua heterogeneidade, da alteração de suas propriedades com o tempo devido a diferentes características de biodegradação de cada material, e da presença de componentes com diferentes formas e dimensões, que dificultam a obtenção de amostras de boa qualidade, a definição do tamanho das amostras e dos tipos de ensaios mais apropriados. A maioria dos dados da literatura é resultado de “estimativas”, sendo poucos os derivados de retro-análises ou ensaios de laboratório e campo.

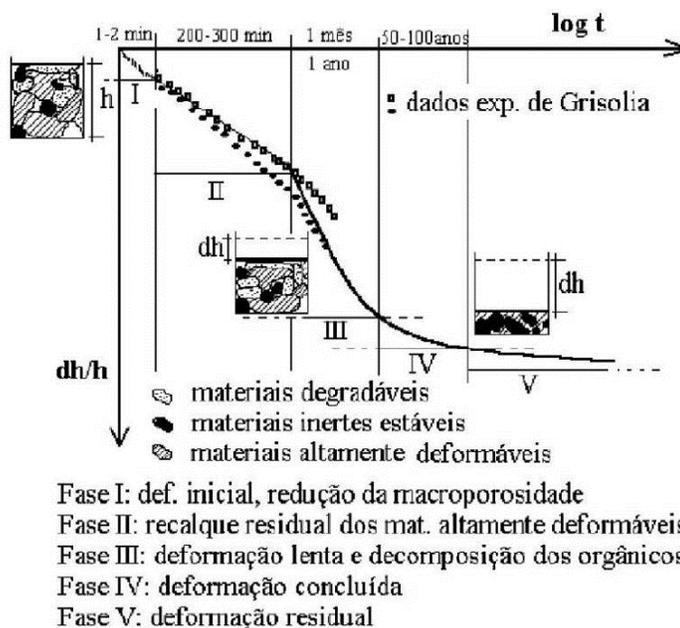
Os aterros de RSU são formados por uma massa heterogênea de componentes que apresenta grandes deformações devidas às pressões da sobrecarga das camadas subjacentes e à sua degradação com o passar do tempo. Espinace *et al.* (1999) definem recalque como deslocamentos verticais descendentes da superfície do aterro sanitário, com redução da sua velocidade com o tempo, mas se mantendo perceptível durante anos. A previsão dessas deformações e dos mecanismos que governam os recalques dos aterros de RSU são aspectos de interesse e discussão de várias pesquisas (SOWERS, 1973; LANDVA & CLARK, 1990; JESSBERGER & KOCKEL, 1993; GABR & VALERO, 1995; BOUAZZA *et al.*, 1996; GREEN & JAMENJAD, 1997; KÖNIG & JESSBERGER, 1997; KNOCHENMUS *et al.*, 1998; POWRIE & BEAVEN, 1999; FARIAS,

2000; LANDVA *et al.*, 2000; WATTS *et al.*, 2001; WARITH, 2002; OLIVIER & GOURC, 2007).

Os resíduos sólidos urbanos são formados por materiais naturais ou artificiais de diversas categorias, formas e tamanhos, podendo apresentar enormes variações nas suas propriedades de deformação, degradabilidade e tenacidade. Desta forma, os mecanismos que governam as deformações em aterros são muito complexos e envolvem aspectos físicos e bioquímicos, o que torna difícil a estimativa dos recalques da massa de resíduos. Mesmo assim, os estudos desenvolvidos nessa área têm conseguido avançar através da proposição de modelos matemáticos cada vez mais complexos que procuram integrar a biodegradabilidade e o comportamento mecânico dos resíduos aterrados (ALCÂNTARA, 2004).

Huitric (1981) definiu o recalque dos RSU em três termos: (1) Adensamento, que é resultante da variação da tensão efetiva, e se refere ao recalque resultante da drenagem dos materiais saturados recém depositados sob aplicação de carga; (2) Contração, que é procedente da decomposição da matéria orgânica, e se refere ao processo de conversão dos sólidos orgânicos em dióxido de carbono e metano, resultando numa correspondente redução de volume do aterro; e (3) Compactação, que é decorrente da sobrecarga, e se refere à reorientação dos sólidos para uma configuração mais densa, devida à perda gradual da rigidez dos sólidos, oriundos do *creep* dos sólidos sob carregamento ou da decomposição da parte sólida

Grisolia & Napoleoni (1996) propõem uma curva teórica da compressibilidade dos RSU com base na subdivisão das classes de materiais da fase sólida (inertes estáveis, altamente deformáveis e facilmente degradáveis; descritos no Item 2.1.1). A Figura II.11 apresenta a subdivisão do processo em cinco fases, proposta pelos autores, sendo a Fase I a deposição dos RSU no aterro, onde são poucos os contatos entre os materiais inertes estáveis, a estrutura se apresenta porosa, podendo variar de forma e volume facilmente; a Fase II quando submetidos a um carregamento ocorre uma acentuada redução de volume dos materiais altamente deformáveis e deslocamento dos inertes estáveis; a Fase III com a manutenção do carregamento ocorrem deformações do tipo "*creep*" e transformações da matéria orgânica, até que se estabeleçam contatos diretos entre os elementos inertes estáveis; a Fase IV, a deformação concluída; e a Fase V, a deformação residual.



**Figura II.11. Curva típica de compressibilidade dos RSU (GRISOLIA & NAPOLEONI, 1996)**

A curva proposta se adapta à teoria apresentada por Wall & Zeiss (1995) para a subdivisão dos recalques de aterros de RSU ao longo do tempo em três fases:

- Compressão inicial: análoga à compressão elástica nos solos, ocorrendo de forma instantânea quando da aplicação do carregamento, associada à redução do tamanho das partículas e do vazio entre elas;
- Compressão primária: ocorre em um prazo de cerca de 30 dias da aplicação da carga (SOWERS, 1973) e é devida à dissipação de poro-pressões de líquidos e gás dos vazios;
- Compressão secundária: é responsável pela maior parcela do recalque total dos aterros de RSU, com duração de décadas, corresponde à deformação lenta e à biodegradação dos componentes do aterro.

Landva & Clark (1990), *apud* Carvalho (1999), avaliaram a compressibilidade dos RSU antigos de vários aterros do Canadá através de ensaios de compressão confinada em células de grandes dimensões (diâmetro de 0,45 m), onde encontraram os resultados apresentados na Figura II.12. Os coeficientes de compressão primária variando de 0,2 a 0,5 dos resíduos indicam alta compressibilidade, e os coeficientes de compressão secundária, de 0,03 a 0,002, segundo os autores, parece aumentar com o acréscimo do conteúdo orgânico.

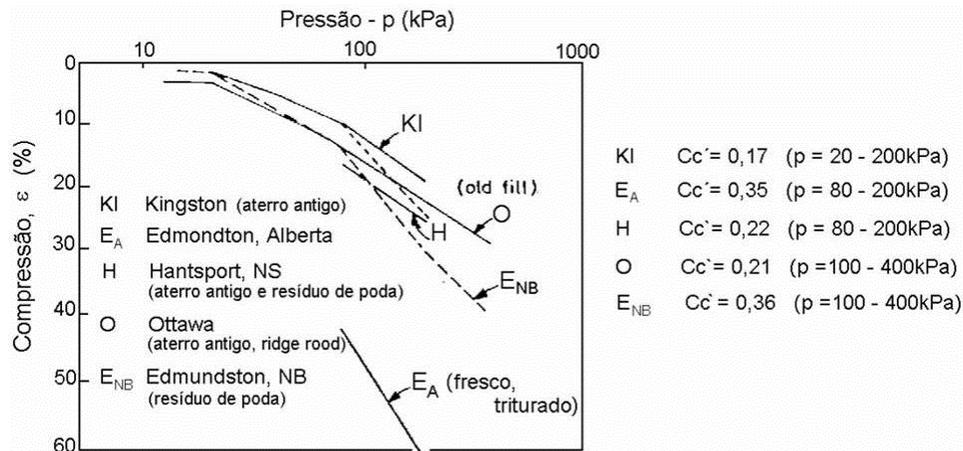


Figura II.12. Ensaios de compressão confinada dos RSU (LANDVA & CLARK, 1990)

A Figura II.13 apresenta dois casos de monitoramento de recalques de aterros experimentais desde a fase de construção publicados por Boutwell & Fiore (1995) e Stulgis *et al.* (1995), *apud* Carvalho (1999). Observa-se que os dados obtidos nos monitoramento dos recalques dos aterros estão de acordo com a curva teórica apresentada por Grisolia & Napoleoni (1996).

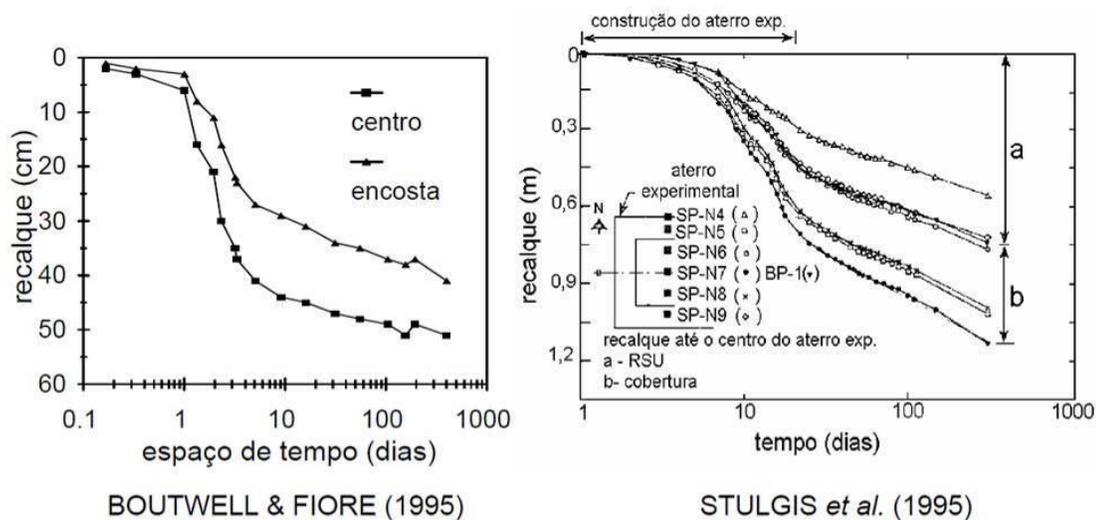


Figura II.13. Curvas recalque versus tempo de aterros de RSU

Segundo Oliveira (2002), os principais mecanismos que condicionam os recalques podem ser resumidos por ações mecânicas (peso próprio, sobrecarga etc.); reorientação de partículas menores devido à percolação de líquidos; transformações dos resíduos por

reações físico-químicas (corrosão, oxidação etc.); e decomposição bioquímica com consequente perda de massa através do escape de gases e percolados. A deformação devida ao recalque em aterros sanitários de RSU é normalmente estimada com base na teoria do adensamento unidimensional, em que o recalque total é decomposto por uma parcela primária e outra secundária. Ao contrário dos solos, o cálculo para RSU deve incluir reduções volumétricas devido à fluência e à biodegradação dos resíduos.

Na previsão de recalques, Oliveira (2002) descreve alguns modelos encontrados na literatura, tais como: Sowers (1973) que se baseia na teoria de adensamento da mecânica dos solos e serve de base para a maioria dos modelos; Yen & Scanlon (1975) que abrange apenas recalques a longo prazo (secundários); o estudo de Edil *et al.* (1989, 1990) baseado no Modelo reológico de Gibson & Lo (1961) que propõe um modelo visco-elástico; Edil *et al.* (1989, 1990) baseado em função de potência, que reproduzem os fenômenos de compressão secundária; Bjarngard & Edgers (1990) que tem procedimento de cálculo empírico baseado em observações e monitoramento de aterros; Ling *et al.* (1998) baseado em função logarítmica e hiperbólica; e Meruelo (1999) que é embasado no processo de perda de massa dos materiais degradáveis e só é válida para previsão de recalques em longo prazo.

Alcântara (2007) cita vários modelos convencionais para estimativas de recalque dos RSU, com base na teoria clássica de adensamento dos solos (TERZAGHI & PECK, 1948), mas faz uma observação a respeito das hipóteses simplificadoras da aludida teoria não serem válidas para os RSU, o que tornaria os modelos inadequados. O autor descreve alguns modelos biológicos para recalques de RSU que considera relevante: Wall & Zeiss (1995), Gandolla *et al.* (1992), Edgers *et al.* (1992), Park & Lee (1997); e Arias (1994).

Os recalques dos aterros de RSU alcançam de 10 a 30% somente sob a ação de seu peso próprio, e cerca de 90% dos recalques totais esperados ocorrem nos dez primeiros anos após o fechamento do aterro (GRISOLIA & NAPOLEONI, 1996). Martins (2006) cita que os valores de recalques de um maciço de RSU devido somente à ação do peso próprio variam entre 10 a 40% da altura original do aterro, dependendo do tipo de resíduos e do grau de compactação alcançado no momento da disposição. Apesar do problema da elevada compressibilidade do maciço de resíduos, ela permite o aumento da vida útil do aterro através de adicionais deposições, gerando um benefício para o gerenciamento de resíduos de um município.

## 2.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Quando um aterro é submetido a deformações sob uma dada tensão normal efetiva, sua resistência ao cisalhamento é capaz de suportar esforços até uma condição limite. A ruptura do aterro é alcançada quando as forças cisalhantes se igualam às forças resistentes e uma superfície de cisalhamento crítica se desenvolve. A resistência ao cisalhamento é a tensão cisalhante no plano de ruptura no momento da ruptura. Em solos, essa resistência é denominada “resistência de pico” e, comumente os ensaios são conduzidos até que essa resistência seja alcançada.

Em RSU, a ruptura de aterros de RSU é quase sempre um fenômeno de cisalhamento associado a rupturas por tensão de tração. Isso ocorre devido à presença de materiais fibrosos nos componentes constituintes dos RSU, tais como plásticos, têxteis entre outros, que promovem um incremento nos parâmetros de resistência. Esse comportamento dos aterros de RSU se assemelha aos aterros de solos reforçados, que apresentam geralmente nas curvas tensão-deformação, um ganho de resistência com o acréscimo de deformação e não apresentam comportamento de pico.

### 2.2.1 RESISTÊNCIA DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS

O solo bem compactado, em geral, apresenta boa resistência à compressão e ao cisalhamento. No entanto, a resistência à tração é baixa ou inexistente. A associação do solo com reforços para lhe conferir melhores características mecânicas é uma prática há muito tempo conhecida e empregada pela humanidade. Solos com elementos de reforço permitem taludes mais verticais, em função da quantidade e resistência dos reforços empregados. O comprimento e a quantidade de reforços são estabelecidos por análises de estabilidade externa e interna.

A técnica de reforçar os solos com fibras tem o propósito de aliar materiais com diferentes propriedades para formar um material compósito com boa resistência à compressão, ao cisalhamento e à tração. Diversos tipos de fibras podem ser empregados na matriz de solo e suas características são determinantes do comportamento do material compósito. As fibras podem ser classificadas em quatro grandes classes: naturais, poliméricas, minerais e metálicas, descritas por Feuerharmel (2000).

Lamare Neto (2004) faz referência às estruturas de solos reforçados com fibras curtas aleatórias como exemplo do que ocorre nos RSU. Segundo o autor, seu comportamento mecânico se caracteriza pelos mecanismos de ruptura por perda de aderência solo-reforço para baixas tensões de confinamento; ou por rupturas dos elementos de reforço ou do solo para elevadas tensões de confinamento. Este conceito é explicado pelos modelos originalmente aplicados para as estruturas de terra armada: para baixas tensões de confinamento, a ação do reforço é traduzida por um aumento do ângulo de atrito do solo (Hausmann, 1976 *apud* Michell & Villet, 1987); para altas tensões de confinamento, a ruptura é condicionada pela resistência à tração dos elementos de reforço incorporando uma pseudo-coesão de valor proporcional à resistência à tração do reforço (Schlosser & Long, 1972), ou o ganho de resistência propiciado pelo reforço decorre do aumento das tensões confinantes nas zonas de interface (Yang, 1972 *apud* Michell & Villet, 1987).

Este comportamento pode ser observado na Figura II.14, através dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto executados com amostras de areia reforçada com fibras a diferentes orientações por Gray & Ohashi (1983). As envoltórias de resistência apresentam forma bilinear, caracterizada por dois trechos distintos e uma tensão crítica ( $\sigma_i$ ), que correspondente à mudança de inclinação da envoltória. Para tensões confinantes inferiores à tensão crítica ( $\sigma < \sigma_i$ ), 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 ( $\phi$ ) (LAMARE NETO, 2004).

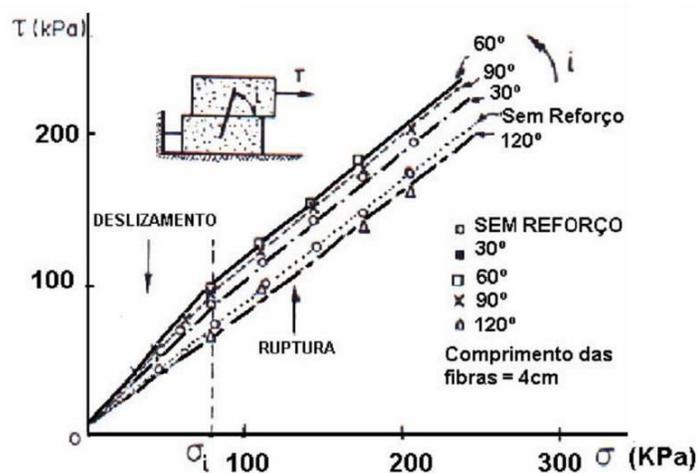


Figura II.14. Mecanismos de ruptura em solos reforçados com fibras a diferentes orientações (GRAY & OHASHI, 1983)

## 2.2.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RSU

O conhecimento dos parâmetros de resistência dos RSU tem fundamental importância na definição dos projetos de aterros sanitários. No entanto, a interpretação dos resultados de ensaios de resistência em resíduos está sujeita a muitas incertezas devido à dificuldade de definir o modelo apropriado para o seu comportamento.

Os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento dos RSU, observados em curvas tensão-deformação de diversas pesquisas, geralmente apresentam ganho de resistência com o acréscimo de deformação e não apresentam comportamento de pico, independente da sua composição ou estado de decomposição. Desta forma, os parâmetros de resistência são estimados em função da deformação admissível. Para Fucale (2005), estes parâmetros não servem como indicadores de resistência, mas de uma condição específica de deformação.

No estado atual do conhecimento dos parâmetros de resistência dos resíduos, o modelo de resistência mecânica proposto para os RSU por Kölsch (1996), baseado nos modelos originalmente aplicados para as estruturas de terra armada, é considerado o conceito que mais se aproxima da realidade. O autor verificou através de ensaios de cisalhamento direto que os materiais fibrosos não coesivos são capazes de incorporar forças de tração. Assim, propôs o modelo que considera que os materiais fibrosos são capazes de incorporar forças de tração e transmiti-las para fora da zona de deformação.

Kölsch (1993, 1995, 1996 *apud* FUCALE, 2005) desenvolveu um modelo para descrever o comportamento dos RSU baseado no conhecimento da capacidade de carga de aterros de solos reforçados com fibras. Os materiais fibrosos dos RSU desenvolvem forças de tração a depender do entrosamento destas fibras com a massa de resíduos, sendo função da tensão normal e do tipo de compactação. A resistência ao cisalhamento dos RSU seria composta de duas parcelas distintas, sendo a primeira referente às forças de atrito no plano de cisalhamento e a segunda, referente às forças de tração das fibras, também chamada de pseudo-coesão. As Figuras II.15 e II.16 apresentam o modelo proposto, desenvolvido a partir de ensaios de compressão triaxial e cisalhamento direto.

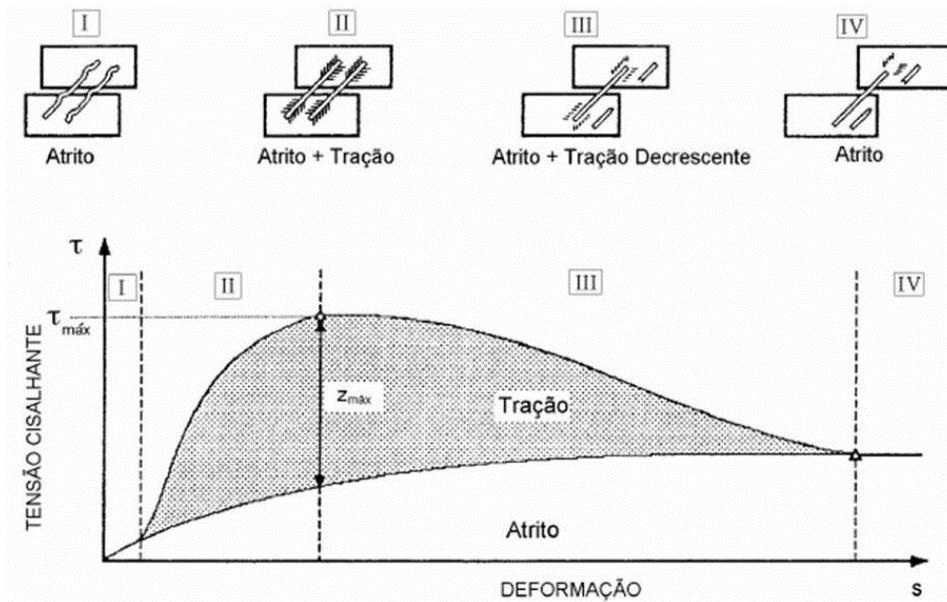


Figura II.15. Comportamento dos RSU – modelo com interação entre as duas parcelas: força de atrito e força de tração das fibras (KÖLSCH, 1993,1995, 1996)

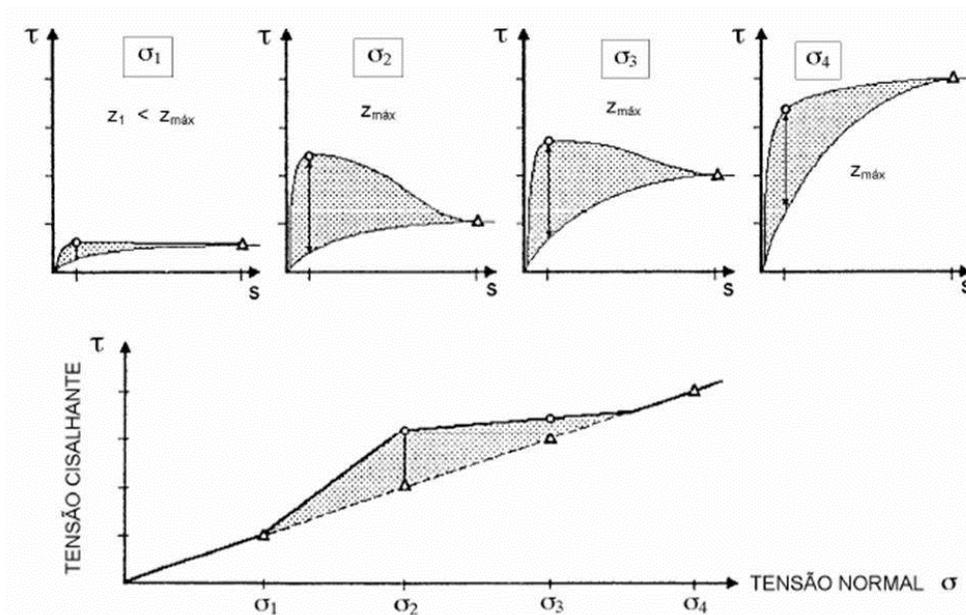


Figura II.16. Comportamento dos RSU – aumento da resistência ao cisalhamento devido às forças de tração das fibras (KÖLSCH, 1993, 1995, 1996)

Na curva tensão-deformação, apresentada na Figura II.15, observa-se a interação entre as forças de atrito e tração de um material fibroso numa determinada tensão normal constante. A deformação é dividida em quatro fases, onde: (I) no início do ensaio, as

forças de atrito são dominantes; (II) com o aumento da deformação, as fibras são gradualmente solicitadas, e este incremento determinado pela tração do material fibroso segue até a condição limite; em que (III) a partir da tensão máxima de tração, as fibras se rompem e a tensão de cisalhamento decresce até que (IV) sejam novamente determinadas pelas forças de atrito.

A Figura II.16 apresenta a envoltória de ruptura e as respectivas curvas tensão-deformação para os diferentes níveis de tensão normal. Pode-se observar que para tensões normais mais baixas ( $\sigma_1$ ), têm-se forças de tração mais baixas devido à falta de ligação das fibras, enquanto que para tensão normal mais alta ( $\sigma_2$ ), as forças de tração das fibras aumentam até que atinjam um valor máximo. Para tensões normais maiores que  $\sigma_2$ , apenas o valor da componente de atrito aumenta. No intervalo de tensão normal ( $\sigma_1 \leq \sigma \leq \sigma_4$ ), onde a resistência ao cisalhamento total é determinada pelas forças de tração, a envoltória linear de cisalhamento mostra uma quebra, característica de materiais fibrosos.

Ziehmman (1999 e 2001 *apud* LAMARE NETO, 2004) considera o modelo bilinear de Kölsch (1996) o mais completo e o que melhor representa a resistência dos RSU porque permite determinar e descrever as duas componentes de resistência de RSU separadamente. O autor sugere a aplicabilidade do método para o cálculo da estabilidade do aterro sempre que uma das condições se aplicar:

- O percentual de partículas maiores que 120 mm for superior a 10% (em peso) e a espessura de cada camada do aterro for inferior a 1 m;
- Não for possível estimar realisticamente a deformação de diferentes partes do aterro;
- A espessura de cada camada do aterro for inferior a 50 cm e os resíduos apresentarem partículas maiores que 40 mm.

A Figura II.17 apresenta proposições de Kavazanjian *et al.* (1995) e Van Impe *et al.* (1996) para envoltórias de resistência dos RSU. Kavazanjian *et al.* (1995) sugere uma envoltória de resistência bilinear, considerando os resíduos como um material puramente coesivo ( $c = 24$  kPa) para tensões normais até 30 kPa e como um material não coesivo com um ângulo de atrito interno igual a  $33^\circ$  para tensões maiores que 30 kPa. Van Impe *et al.* (1996) sugerem uma envoltória de resistência trilinear, considerando os resíduos como um material puramente coesivo ( $c = 20$  kPa) para tensões normais 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 (LAMARE NETO, 2004).

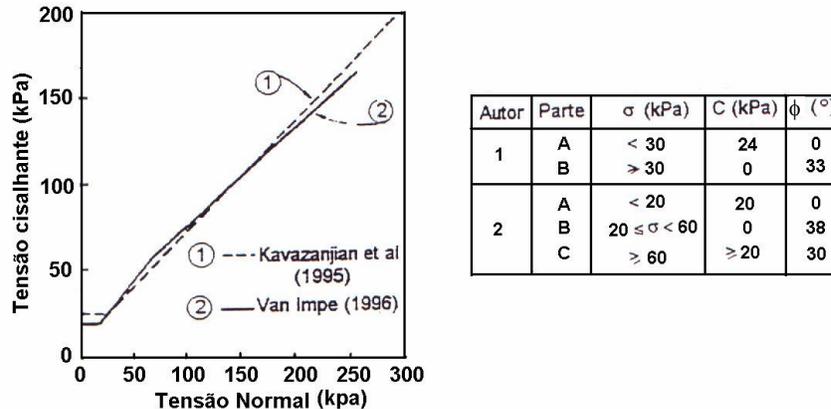


Figura II.17. Envoltórias de resistência dos RSU propostas por Kavazanjian *et al.* (2005) e Van Impe *et al.* (1996)

Jessberger *et al.* (1995) discordam do modelo de envoltória de resistência bilinear para os RSU. Segundo os autores, o ponto de variação de inclinação da envoltória de resistência não pode ser caracterizado uma vez que, ao contrário dos solos reforçados com fibras, os resíduos apresentam elementos distintos de reforço, com diferentes resistências à tração e comportamentos tensão-deformação.

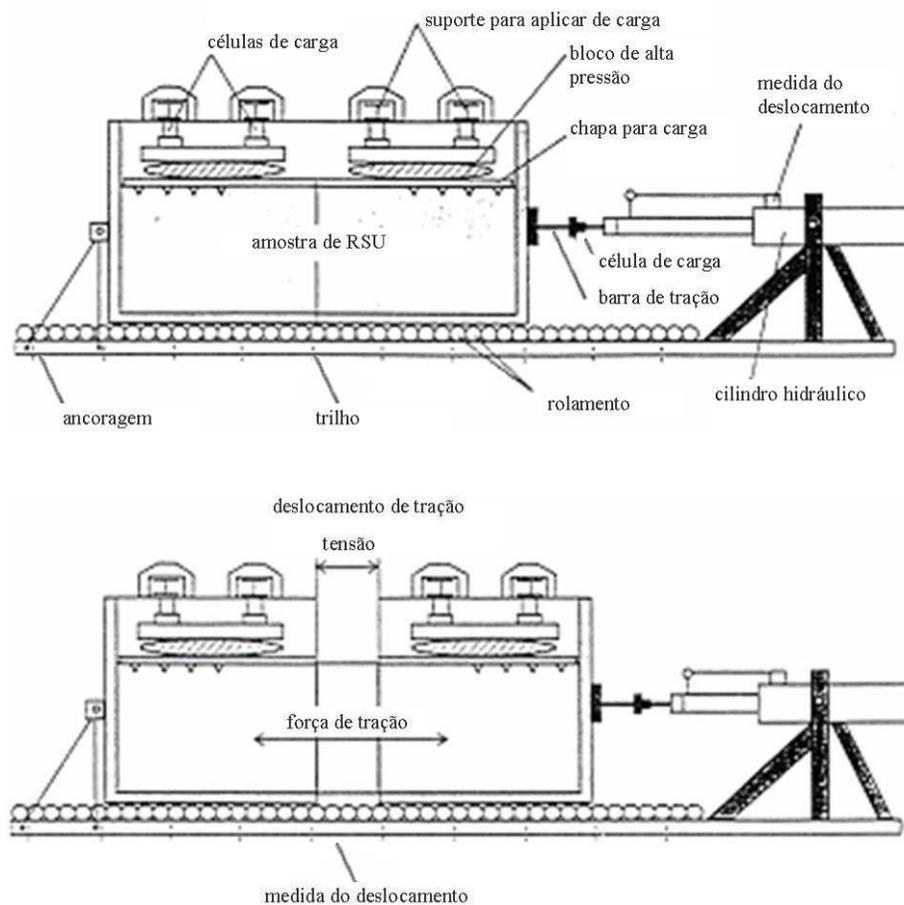
Dentre os vários problemas existentes na investigação do comportamento dos RSU, Kölsch (1995) destaca que os resultados dos ensaios de compressão triaxial e cisalhamento direto não descrevem o comportamento da capacidade de carga, porque nestes arranjos de ensaio, a anisotropia do resíduo não é suficientemente registrada. Devido a este fato, o autor decidiu separar as investigações entre as propriedades de atrito e reforço. Desta forma, é utilizado o ensaio de cisalhamento direto para medir a propriedade de atrito dos RSU, e um ensaio de tensão de tração em equipamento desenvolvido para determinar a resistência à tração das fibras dos resíduos.

### 2.2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO DE RSU

Kölsch (1995) propõe a realização de ensaios separados, distinguindo a parte friccional e relativa à tração da resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos, ou seja, a

execução de ensaios de cisalhamento direto e de tração de grandes dimensões em laboratório, respectivamente. Até o presente momento, este parece ser o melhor caminho para a investigação deste tipo de material.

A Figura II.18 apresenta o esquema do equipamento desenvolvido por Kölsch (1996) para realizar ensaios de tração dos RSU com diferentes tensões normais. O equipamento, que serve também para transporte da amostra, é constituído por uma caixa com seção transversal retangular de 3 m<sup>2</sup> (1,0 x 3,0 m) e altura de 1,5 m. A caixa é bipartida para permitir o deslocamento de uma delas enquanto a outra está ancorada.



**Figura II.18. Equipamento para ensaios de tração (ZIEHMANN, 2001)**

A metodologia do ensaio consiste em aplicar uma força normal à amostra, em seguida, uma força de tração horizontal à caixa. São medidas a força de tração e a respectiva deformação, sendo o deslocamento máximo de 1,0 m e a força de tração máxima de 600 kN. A relação linear entre a tensão de tração e a tensão normal pode ser descrita pelo

ângulo de tensão de tração ( $\zeta$ ). A Figura II.19 (*apud* BORGATTO, 2006) apresenta a coleta da amostra no Aterro de Ihlenberg, Alemanha, o transporte da caixa e a realização dos ensaios de tração.



Figura II.19. Coleta de amostra, transporte e realização do ensaio de tração (KÖLSCH, 1996)

Devido à dificuldade na obtenção das amostras, os ensaios foram realizados com o mesmo corpo de prova para todos os níveis de tensão normal. No entanto, observou-se que a estrutura representativa do material não é destruída quando atinge a tensão máxima, porque a predominância da ruptura da amostra é causada pelo arrancamento das fibras e não pela sua quebra. Assim, a parte elástica submetida à tração durante o ensaio é preservada quando é feito o descarregamento das tensões. A Figura II.20 apresenta envoltórias de tensão de tração de ensaios com diferentes amostras de RSU obtidas por Kölsch (1996) neste equipamento.

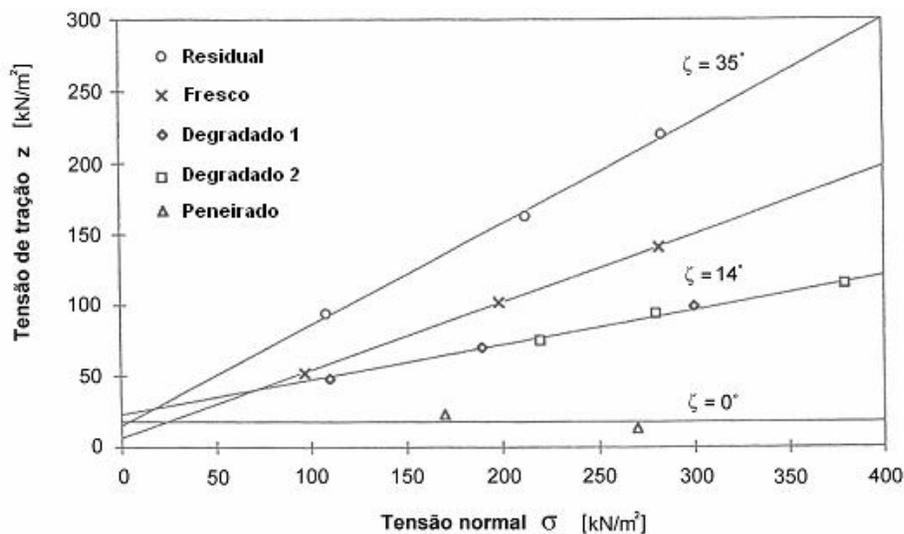


Figura II.20. Envoltórias dos ensaios de tração (KÖLSCH, 1996)

A amostra de resíduo residual corresponde ao resíduo novo, sem matéria orgânica; a amostra de resíduo fresco é relativa ao resíduo sólido novo incluindo todos os componentes; as amostras de resíduo degradado 1 e 2 são resultantes de pré-tratamento anaeróbio e biológico aeróbio, respectivamente; e a amostra de resíduo peneirado corresponde ao resíduo degradado 2 peneirado, sem seus componentes de reforço.

Com a separação das investigações, as características de resistência mecânica dos RSU são dadas por sua resistência ao cisalhamento da matriz básica, expressa através dos parâmetros ângulo de atrito ( $\phi_{MB}$ ) e a coesão ( $c_{MB}$ ), e pela coesão dos componentes fibrosos, expressa pelo ângulo de tensão à tração ( $\zeta$ ) e pela tensão à tração independente da carga ( $z_0$ ). A transformação da tensão à tração em coesão das fibras resulta da consideração da anisotropia bem como da resistência à tração específica das fibras ( $z_{máx}$ ). A Figura II.21 apresenta o modelo da envoltória de ruptura dos RSU obtidas através da resistência ao cisalhamento da matriz básica e da coesão dos componentes fibrosos (KÖLSCH, 1997).

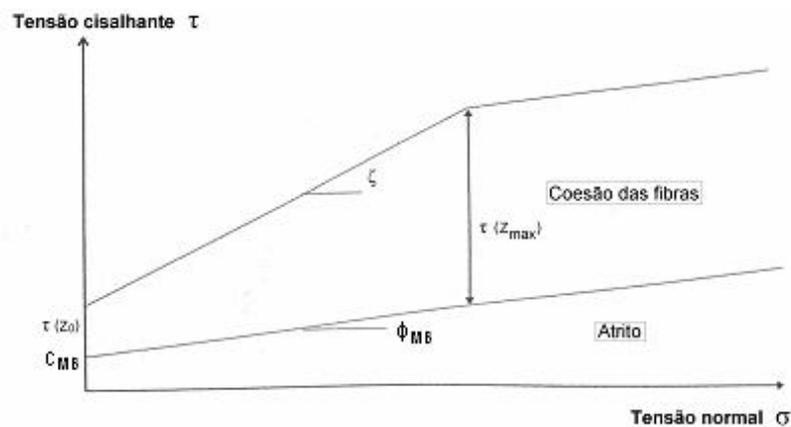


Figura II.21. Modelo de resistência mecânica dos RSU (KÖLSCH, 1997)

#### 2.2.4 ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

A estimativa dos parâmetros de resistência de RSU é usualmente realizada a partir de ensaios de laboratório, ensaios de campo ou por meio de retroanálises, com base em dados de ensaios e registros de monitoramento. No entanto, os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos na literatura apresentam grande variabilidade, devido principalmente às diferentes composições, idade e arranjo/estrutura dos RSU e à falta de uma metodologia eficaz para a caracterização da sua resistência.

A Tabela II.7, elaborada por Dixon & Jones (2005), apresenta alguns comentários das vantagens e desvantagens associadas às metodologias atualmente disponíveis para a obtenção da informação do comportamento resistente dos RSU.

**Tabela II.7. Vantagens e desvantagens dos métodos para determinação dos parâmetros de resistência dos RSU (Dixon & Jones, 2005)**

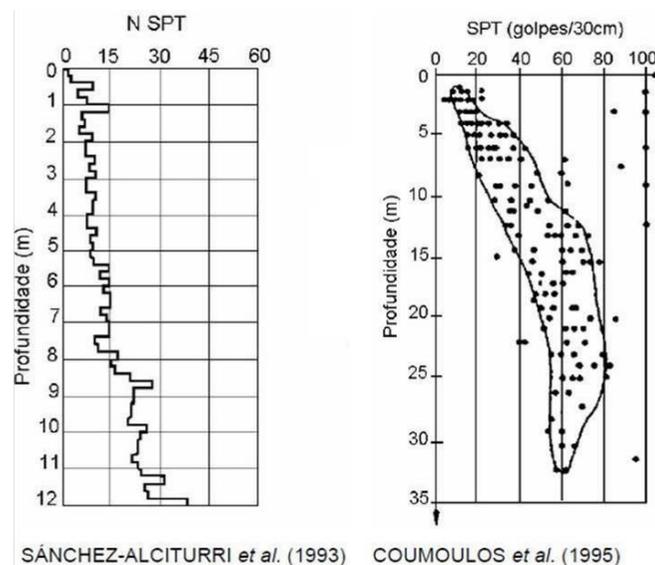
	MÉTODOLOGIA	COMENTÁRIOS	FONTE
CAMPO	Retroanálise de rupturas de talude	Informação adequada raramente disponível (poro-pressão, forma, posição da superfície de ruptura)	Koerner & Soong (2000)
	Retroanálise de experimentos de talude cortado	Grandes deformações observadas, mas sem rupturas	Singh & Murphy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

• **ENSAIOS DE CAMPO**

Siegel *et al.* (1990), Sánchez-Alciturri *et al.* (1993), Coumoulos *et al.* (1995) e Jucá *et al.* (1997) avaliaram a resistência do RSU por meio de ensaios *in situ*, através de ensaios SPT, CPT e *vane test*. Nestes ensaios, a avaliação da resistência dos RSU se torna difícil devido à heterogeneidade do material, com a presença de materiais resistentes como madeira, pedra, metal e outros, que provocam grandes picos na resistência medida, desvio das hastes dos equipamentos e avarias nos amostradores, paletas e ponteiras. Além disto, não há uma relação clara entre a resistência à penetração e a resistência ao cisalhamento dos RSU. Dixon & Jones (2005) afirmam que as técnicas de campo para medir a resistência ao cisalhamento são inadequadas e não confiáveis.

Segundo Singh & Murphy (1990) e Manassero *et al.* (1996), os resultados obtidos de *vane test* não são representativos da resistência dos RSU, pois as palhetas usadas neste ensaio são muito pequenas comparadas com as dimensões dos componentes dos RSU. A aplicabilidade dos ensaios de palheta é muito questionada, uma vez que a estrutura de composição e as condições de drenagem dos RSU comprometem a qualidade dos resultados obtidos pelo equipamento, que fornece melhores resultados para condições drenadas de materiais homogêneos.

Os ensaios SPT apresentam uma técnica bastante criticada pelo empirismo do tratamento dos dados. Ainda não existe especificação para os parâmetros obtidos pela utilização de correlações entre o número de golpes e a resistência ao cisalhamento dos RSU. Segundo Sowers (1968) e Jucá *et al.* (1997), os valores de penetração do amostrador ( $N_{SPT}$ ), raramente ultrapassam 10 golpes. Sánchez-Alciturri *et al.* (1993) e Coumoulos *et al.* (1995) apresentaram resultados de ensaios SPT, conforme mostrado na Figura II.22. Sánchez-Alciturri *et al.* (1993) encontraram valores de  $N_{SPT}$  crescente com a profundidade no Aterro Meruelo, na Espanha, variando de 10 golpes para os metros iniciais até 30 golpes em 12 m de profundidade. Coumoulos *et al.* (1995) também encontraram os valores de  $N_{SPT}$  crescentes com a profundidade no Aterro Liossa, em Atenas-Grécia, variando entre 25 golpes a 5 m de profundidade até uma média de 65 golpes a 25 m de profundidade, mas com grande dispersão, tornando difícil a sua interpretação.



**Figura II.22. Resistência à penetração SPT para Aterros de RSU na Espanha (SÁNCHEZ-ALCITURRI *et al.*, 1993) e Grécia (COUMOULOS *et al.*, 1995)**

Segundo Knochenmus *et al.* (1998), a maioria destes ensaios apresentam um alto grau de dispersão nos resultados, o que torna difícil sua interpretação e obtenção das propriedades de resistência dos RSU através de correlações entre o número de golpes.

Carvalho (1999) verificou que o  $N_{SPT}$  aumentou com a profundidade nas investigações no Aterro Sanitário Bandeirantes. O  $N_{SPT}$  médio de 7 golpes para as camadas superficiais e 12 golpes para as camadas mais profundas (10 a 30 m) permitiram estimar uma faixa variando de 26 a 32° para o atrito, empregando correlações propostas para solos arenosos, ou coesão entre 90 e 150 kPa, empregando correlações para solos argilosos.

Jucá (2003) apresenta uma série de resultados de ensaios SPT em três aterros e um lixão de algumas cidades do Brasil (aterros controlados da Muribeca e Aguazinha em Pernambuco, aterro sanitário Metropolitano Centro na Bahia e lixão do Róger na Paraíba), como mostrado na Figura II.23. Apenas no aterro sanitário Metropolitano Centro se verificou uma elevação dos valores da resistência à penetração com a profundidade, com  $N_{SPT}$  de 5 a 10 nas profundidades iniciais (até 4 m) e de 10 a 20 golpes com o acréscimo da profundidade. Os demais apresentaram resultados de resistência à penetração praticamente constantes ao longo da profundidade, com  $N_{SPT}$  entre 2 e 10. Esses ensaios indicaram variabilidade em função da heterogeneidade dos resíduos. De forma geral, os ensaios mostraram que em resíduos sólidos antigos, os valores de resistência são baixos e mantêm-se praticamente constantes com a profundidade; já em resíduos sólidos novos, estes valores são um pouco mais elevados e apresentaram uma tendência a acréscimo com a profundidade.

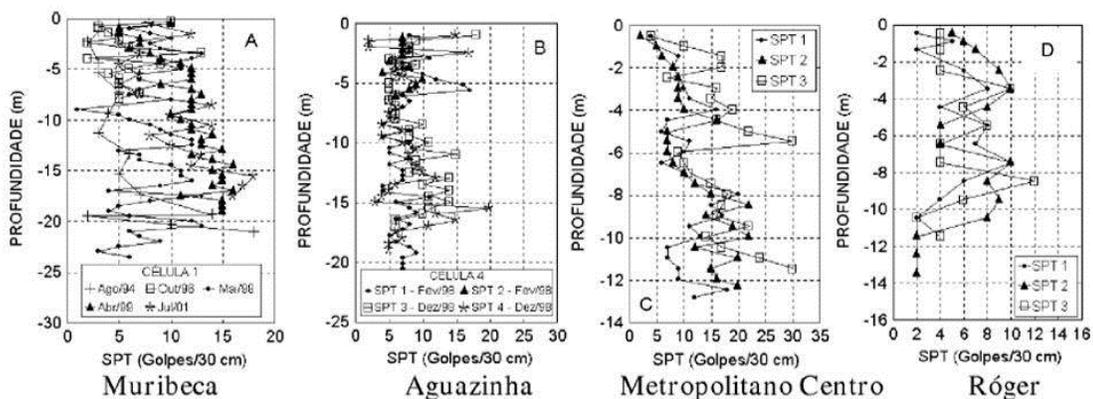


Figura II.23. Resistência à penetração SPT em vários aterros (JUCÁ, 2003)

Os ensaios de penetração contínua (CPT) podem ser usados para localizar áreas de menor resistência no interior do aterro e avaliar a variação de resistência com o tempo (SIEGEL *et al.*, 1990; MANASSERO *et al.*, 1996 e KNOCHENMUS *et al.*, 1998). Da mesma forma que ocorre no SPT, as medidas do CPT apresentam picos de resistência, indicando a presença de objetos rígidos (madeira, metal, pedras etc.). Segundo MANASSERO *et al.* (1996), há uma tendência na maioria dos casos à resistência de ponta aumentar com a profundidade.

Sánchez-Alciturri *et al.* (1993) obtiveram resistência de ponta variando de 1 a 3 MPa, e a relação de atrito (atrito na luva / resistência de ponta) variando de 1% a 2% no aterro Meruelo (Espanha). Através destes resultados e do emprego das correlações existentes para areias entre  $q_c$  e  $\phi$ , os autores estimaram um ângulo de atrito para o RSU que variou entre 28 e 35°. Segundo os autores, estes resultados foram plotados na carta de Schmertmann, o que permitiu uma classificação para os resíduos sólidos do local variando de areias fofas a areia argilosa e siltes, para os resultados médios obtidos dos ensaios de penetração do cone, excluindo os picos de resistência causados pela presença de objetos rígidos dos RSU. Resultados de ensaios de penetração contínua (CPT) obtidos para os RSU por vários autores (JESSBERGER, 1990; HINKLE, 1990; SIEGEL *et al.*, 1990 e SÁNCHEZ-ALCITURRI *et al.*, 1993) também foram plotados na carta de Schmertmann, e os valores permitiram classificar os RSU dentro de uma variação de areia fofa a argila siltosa e arenosa, conforme apresentado na Figura II.24.

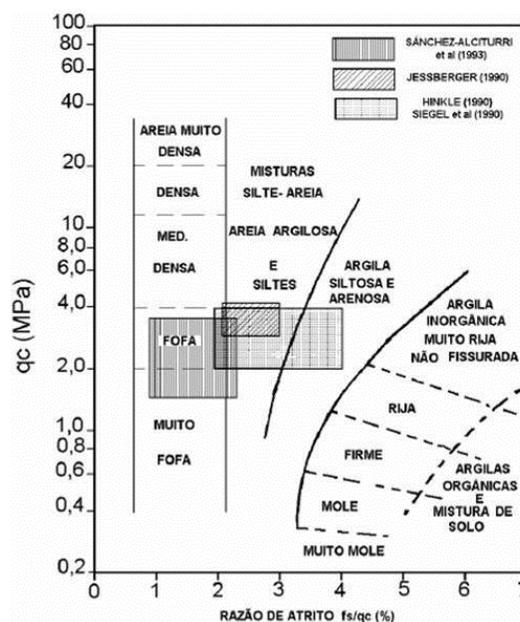
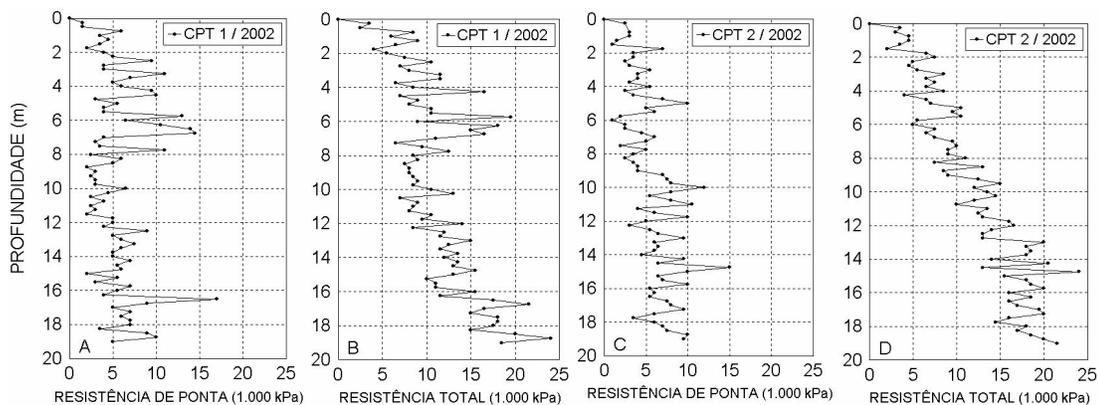


Figura II.24. Classificação dos RSU utilizando a Carta de Schmertmann (SÁNCHEZ-ALCITURRI *et al.*, 1993)

Carvalho (1999) avaliou os valores das resistências de ponta entre 2500 e 7500 kPa e resistência lateral entre 100 e 400 kPa, medidas no ensaio de penetração do cone (CPT) no Aterro Sanitário Bandeirantes, São Paulo. Os valores típicos obtidos permitiram estimar uma faixa de variação de 29 a 33° para o ângulo de atrito efetivo dos RSU, utilizando correlações existentes para solos arenosos, ou coesão entre 45 e 120 kPa, empregando correlações para solos argilosos.

Ensaio CPT foram realizados na Célula 1 do aterro da Muribeca, em Pernambuco, até profundidades em torno de 19 m. Os resultados obtidos nestes ensaios, apresentados na Figura II.25, mostram que o cone geralmente encontrava objetos rígidos (como madeira, metal, pedras etc.), os quais produziram picos acentuados nas medidas da resistência de ponta, conforme apresentado por Jucá *et al.* (2005).



**Figura II.25. Ensaio CPT na Célula 1 do Aterro da Muribeca (JUCÁ *et al.*, 2005)**

Além dos ensaios SPT e CPT, alguns autores avaliaram a resistência dos resíduos por meio de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões *in situ*, em grandes blocos de RSU (SING & MURPHY, 1990; RICHARDSON & REYNOLDS, 1991; DEL-GRECO & OGGIERI, 1993; GOTTELAND *et al.*, 1995; WITHIAN *et al.*, 1995; MAZZUCATO *et al.*, 1999 e CAICEDO *et al.*, 2002).

Os ensaios de cisalhamento direto *in situ* visam à determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos resíduos com amostras indeformadas (amostras superficiais). A Tabela II.8 apresenta alguns parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU reportados na literatura, obtidos em ensaios de cisalhamento direto *in situ*.

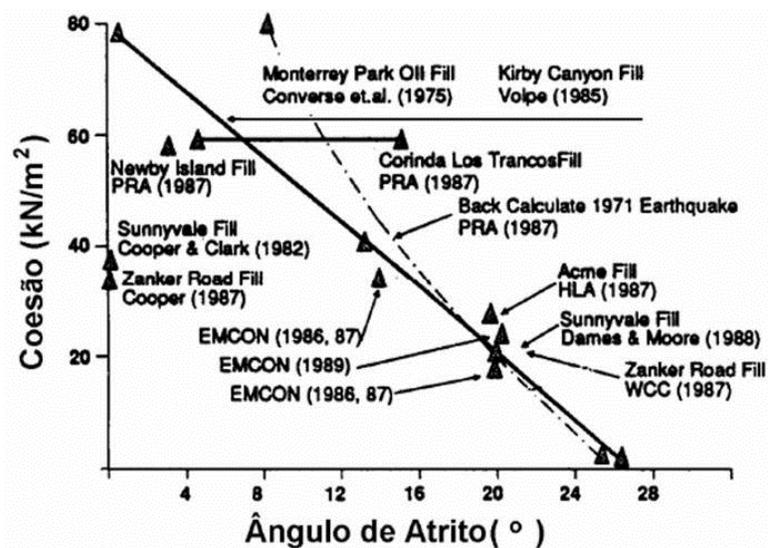
**Tabela II.8. Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos em ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões *in situ***

FONTE	DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA	PARÂMETROS	
		c (kN/m <sup>2</sup> )	φ (°)
Richardson & Reynolds (1991)	1,5 x 1,5 m (comp. x larg.)	10	18-43
Gotteland <i>et al.</i> (1995)	1 m <sup>2</sup> x 0,35 m (área x alt.)	10	25
Withiam <i>et al.</i> (1995)	1,5 x 1,5 x 1,5 m (comp. x larg. x alt.)	10	30
Mazzucato <i>et al.</i> (1999)	810 x 440 mm (diâmetro x altura)	22-24	17,18
Caicedo <i>et al.</i> (2002)	900 mm (diâmetro)	78	23

• **RETRO-ANÁLISES**

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento estimados através de retro-análises são baseados principalmente em ensaios de carregamento de placa e registros operacionais. Segundo alguns autores, a principal justificativa de utilizar os parâmetros destas análises é a representação do contorno inferior da resistência de campo disponível (OLIVEIRA, 2002).

Singh & Murphy (1990) apresentam uma coletânea de parâmetros de resistência (Figura II.26) obtidos de retro-análises de aterros sanitários de RSU, porém sem informações adicionais a respeito das considerações adotadas nos cálculos de referência.



**Figura II.26. Parâmetros de resistência obtidos por retro-análises (SINGH & MUPHY, 1990)**

Para Manassero *et al.* (1996) e König & Jessberger (1997), um cuidado especial deve ser tomado ao se utilizar parâmetros de resistência obtidos por retro-análises devido à dificuldade de estabelecer parâmetros corretos, pois a equação da resistência, que é função de dois parâmetros, pode ser satisfeita por infinitos pares de combinações que satisfazem a condição de equilíbrio. Outro aspecto é abordado por Kavazanjian (2003), que afirma que as retro-análises de ruptura de taludes de aterro de taludes cortados verticalmente e de taludes estáveis existentes podem fornecer informações da resistência ao cisalhamento de uma grande massa de resíduo, mas dados de entrada de baixa qualidade tornam tais análises problemáticas e normalmente não confiáveis.

A Tabela II.9 apresenta alguns parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU reportados na literatura, obtidos através de retro-análises.

**Tabela II.9. Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos em retro-análises**

FONTE	PARÂMETROS	
	c (kN/m <sup>2</sup> )	φ (°)
Dames & Moore (1988)	21	20
IPT (1991)	14	22
Howland & Landva (1992)	23	23
Cowland <i>et al.</i> (1993)	10	25
Kavazanjian <i>et al.</i> (1995)	-	25 - 34
Benvenuto & Cunha (1991)	20	30
Benvenuto <i>et al.</i> (1994)	22	13,5
Van Impe <i>et al.</i> (1996)	0 - 20	0 - 38
Kaimoto & Cepollina (1996)	14 - 16	22 - 28
Borgatto (2006)	2	22

Em relação às poro-pressões, através de dados obtidos em 5 anos de monitoramento no aterro sanitário Bandeirantes – São Paulo, Kaimoto & Cepollina (1996) chegaram às seguintes conclusões:

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

• *ENSAIOS DE LABORATÓRIO*

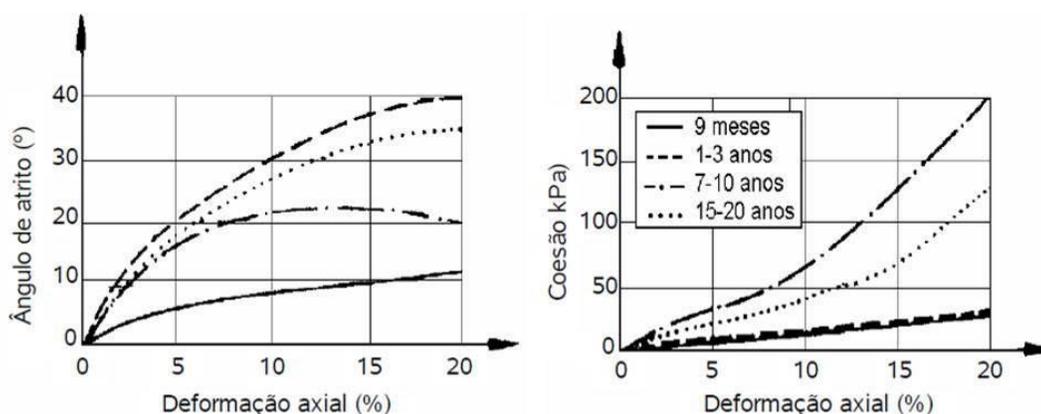
Nos ensaios de laboratório (cisalhamento direto e triaxial) geralmente se utilizam amostras preparadas em laboratório e amostras de RSU deformadas obtidas em aterros sanitários. Os ensaios comumente são realizados em equipamentos de grandes dimensões na tentativa de reproduzir amostras que sejam representativas do todo, devido à heterogeneidade do tipo e tamanho das partículas dos RSU. No entanto, de forma geral, os resultados dos ensaios obtidos em diversas pesquisas não apresentam comportamento de pico que defina a ruptura nas curvas tensão-deformação.

Para Manassero *et al.* (1996), os ensaios de cisalhamento direto não reproduzem o comportamento do aterro, no entanto consideram de grande utilidade os conceitos teóricos do comportamento de solos para a interpretação dos ensaios com RSU, servindo como uma aproximação inicial para elaboração de procedimentos mais exatos. Para König & Jessberger (1997) e Knochenmus *et al.* (1998), a principal limitação na realização de ensaios de laboratório surge da dificuldade de se obter amostras com qualidade e representatividade da granulometria e composição dos resíduos, assim como da necessidade da utilização de equipamentos de grandes dimensões.

Com base nos resultados dos ensaios triaxiais em RSU, as condições de ruptura não podem ser definidas com facilidade. Assim, os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) são usualmente determinados para níveis de deformação. De acordo com Grisolia *et al.* (1995) e König & Jessberger (1997), uma forma de apresentar os resultados de ensaios triaxiais em resíduos sólidos é empregando-se as trajetórias de tensões, uma vez que elas facilitam a visualização dos resultados. Por meio dos pontos obtidos das trajetórias, podem-se traçar diversas envoltórias de resistência para diferentes deformações (FUCALE, 2005).

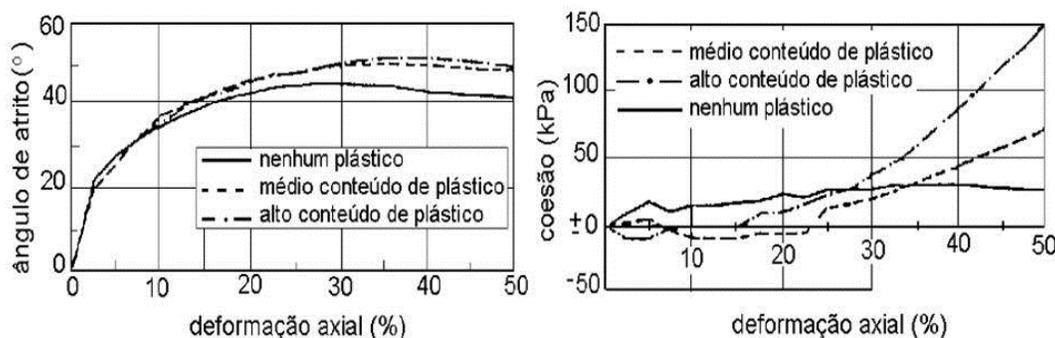
A variação dos parâmetros de resistência em função das deformações foi analisada por meio de ensaios de laboratório por Jessberger (1990); Jessberger & Köckel (1993); Reunter (1995) e Köckel (1995). Os autores demonstram que, em geral, o valor limite do ângulo de atrito é mobilizado para deformações 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 (LAMARE NETO, 2004).

No modelo de análise proposto por Kockel (1995), os RSU são caracterizados como um material composto, dividido em dois componentes: uma matriz básica com granulação fina a média (diâmetro < 120 mm) que apresenta comportamento de atrito e uma matriz de reforço contendo os componentes fibrosos (diâmetro > 120 mm), que compreende plásticos, panos, galhos, dentre outros que contribuem para a resistência. Com base neste modelo, o autor realizou ensaios triaxiais com diferentes amostras de resíduos sólidos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A Figura II.27 apresenta a variação do ângulo de atrito e da coesão em função da deformação obtida por Kockel (1995), onde o autor indica que existem incrementos de coesão e ângulo de atrito com a idade dos resíduos, exceto para os resíduos muito velhos.



**Figura II.27. Ângulo de atrito e coesão versus deformação para diferentes idades dos RSU (KOCKEL, 1995; JESSBERGER *et al.*, 1995 e KÖNIG & JESSBERGER, 1997).**

Kockel & Jessberger (1995) analisaram resíduos sólidos com diferentes teores de fibras. Os autores consideram que é a matriz básica que comanda a parcela de resistência por atrito interno dos RSU, com um ângulo de atrito interno máximo que varia de 42° a 45°, que aparece a altas deformações e praticamente não sofre a influência do teor de fibras. A coesão, ao contrário, tem o seu valor fortemente dependente da matriz reforçada, tendendo a crescer com a deformação quanto maior o teor de fibras. Essa coesão pode ser definida como uma “coesão devida à resistência à tração” dos componentes fibrosos. A ativação desta coesão requer grandes deformações axiais, cerca de 20%, quando a resistência por atrito interno já está praticamente mobilizada. A Figura II.28 apresenta a variação do ângulo de atrito e da coesão em função da deformação obtida nos ensaios.



**Figura II.28. Mobilização do ângulo de atrito e intercepto de coesão com as deformações axiais para diferentes teores de fibra dos RSU (KOCKEL, 1995; KOCKEL & JESSBERGER, 1995 e KÖNIG & JESSBERGER, 1997)**

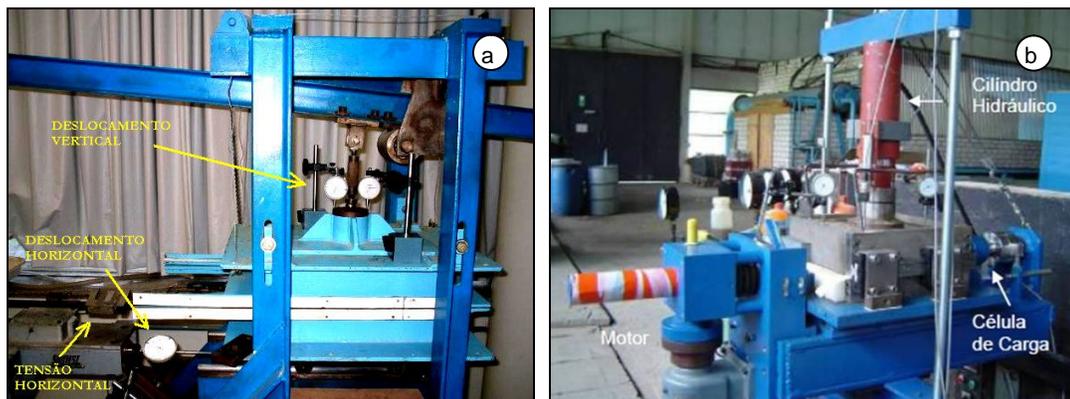
Segundo Grisolia & Napoleoni (1996), o fato de a resistência ao cisalhamento aumentar com as deformações e quase estabilizar em um valor constante admite a hipótese de que a grandes deformações o comportamento mecânico dos RSU é semelhante ao de solos e controlado pelos componentes inertes. Para os autores, o intercepto de coesão é dependente da matriz de reforço, que é ativada a deformações maiores que 20%, quando o atrito está quase totalmente mobilizado.

Segundo Carvalho (1999), as dimensões dos corpos de prova parecem influenciar nos resultados de resistência ao cisalhamento, conforme verificado em ensaios triaxiais do tipo CD com a amostra de resíduo do aterro sanitário Bandeirantes, São Paulo. Nos ensaios foram encontrados valores de ângulo de atrito 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.

Lamare Neto (2004) e Calle (2007) realizaram ensaios de cisalhamento direto em equipamento de cisalhamento direto do Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, constituído por um conjunto de uma caixa bipartida de maiores dimensões (0,4 x 0,25 m de seção transversal e 0,2 m de altura), apresentado na Figura II.29a. A caixa é montada em uma estrutura de sustentação e associada a uma prensa de ensaio convencional com sistema de peso pendural com viga de 4 m de comprimento.

Na pesquisa de Fucale (2005), utilizou-se um equipamento de cisalhamento direto do Instituto Leichtweiss, Alemanha. A caixa de cisalhamento direto do equipamento de

média escala utilizada na pesquisa, apresentada na Figura II.29b, possui seção de  $0,09 \text{ m}^2$  ( $0,3 \times 0,3 \text{ m}$ ) e altura total de  $0,15 \text{ m}$ . A aplicação da força normal é realizada através de um cilindro hidráulico com registro da carga em manômetro e a força cisalhante aplicada por um motor e a leitura da carga através de célula de carga.



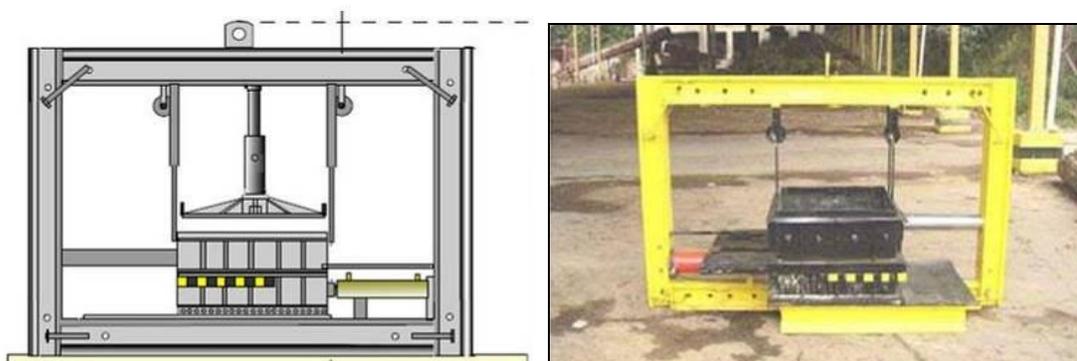
**Figura II.29. Equipamentos de cisalhamento direto de maiores dimensões: (a) ITA (LAMARE NETO, 2004 e CALLE, 2007) e (b) Instituto Leichtweiss (FUCALE, 2005)**

Lamare Neto (2004) avaliou a interação de material granular com as fibras em amostras de areia misturadas em percentuais variados a pequenas tiras de plástico e amostras do resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico dos RSU. O autor considera as fibras como as únicas responsáveis pelos valores de um intercepto coesivo, contribuindo, também, para o acréscimo nos valores do ângulo de atrito dos materiais. Em relação aos mecanismos de mobilização da resistência ao cisalhamento, o comportamento das amostras de areia com tiras de plásticos foi considerado semelhante ao dos RSU.

Calle (2007) avaliou a influência do plástico no comportamento mecânico dos RSU. Os ensaios mostraram que o ângulo de atrito não sofre significativa variação com a compacidade da amostra. A quantidade de fibras (plásticos, variação de tamanho de partícula entre  $2 \text{ mm}$  e  $19 \text{ mm}$ ) também não altera substancialmente o valor do ângulo de atrito, sendo o valor médio de  $38^\circ$  para os RSU do Aterro de São Sebastião, São Paulo, e  $34^\circ$  para os de Novo Hamburgo, Rio Grande do Sul, referentes a uma deformação de 20%. Para pressões de confinamento baixas ( $< 100 \text{ kPa}$ ) a coesão aparente variou muito pouco e o ângulo de atrito atingiu seu valor máximo a 20% de deformação horizontal específica. Já para confinamentos altos ( $> 100 \text{ kPa}$ ) a coesão aparente atingiu seu valor máximo a 6% de deformação.

Fucale (2005) realizou ensaios de cisalhamento direto em equipamento convencional e de maiores dimensões com amostras de resíduos sólidos velhos e de resíduos sólidos resultante de pré-tratamento mecânico e biológico para verificar a influência da incorporação de diferentes porcentagens de fibras no comportamento mecânico e nos parâmetros de resistência. Foi observado nos ensaios um acréscimo da resistência ao longo do deslocamento horizontal das amostras, sem atingir um pico, nem mesmo para níveis de 20%. Considerou-se, desta forma, que o estado de ruptura não foi alcançado pelo material, assim os parâmetros de resistência foram definidos com base em critérios de deformação. Segundo a autora, o estudo permitiu confirmar que os elementos de reforços (plásticos, têxteis, fibras, dentre outros) que compõem a massa de resíduos nos aterros possuem uma grande influência no comportamento mecânico do material como um todo, sendo responsáveis pelos altos valores dos parâmetros de resistência medidos em ensaios e pela estabilidade observada em diversos taludes de RSU.

Martins (2006) desenvolveu um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões, apresentado na Figura II.30, com caixa de seção transversal com  $0,49 \text{ m}^2$  ( $0,7 \times 0,7 \text{ m}$ ) e  $0,5 \text{ m}$  de altura para avaliação da resistência dos RSU. A aplicação das forças normal e cisalhante era realizada através de dois sistemas de aplicação de carga constituídos de macacos hidráulicos manuais. Os ensaios foram realizados em amostras com diferentes condições de composição, peso específico e umidades iniciais e idade.

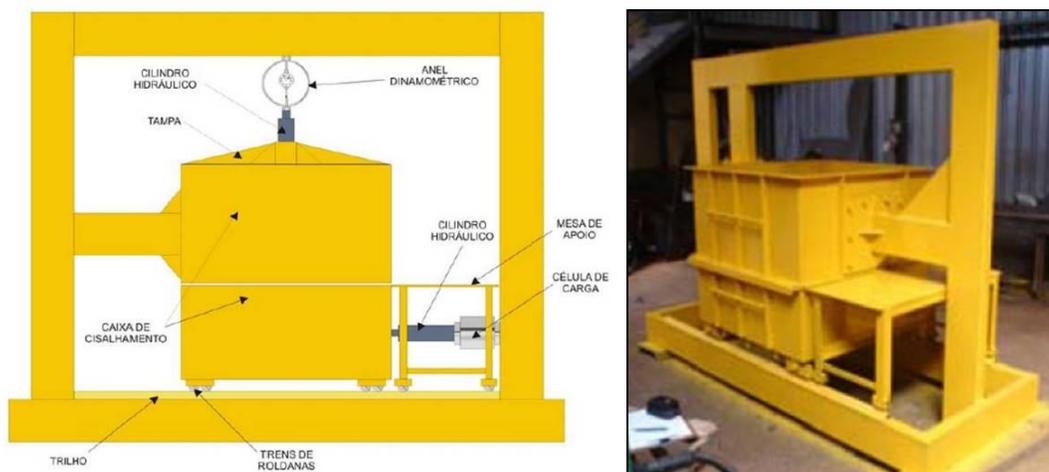


**Figura II.30. Equipamento de cisalhamento direto (MARTINS, 2006)**

O autor verificou nos gráficos tensão-deformação um ganho contínuo de resistência sem a identificação de ruptura em nenhuma das amostras ensaiadas. Observou também que a presença de materiais fibrosos conferiu significativos ganhos de resistência em relação às amostras sem fibras e constatou que as amostras cujas composições possuíam baixo

percentual de materiais fibrosos apresentaram um critério de ruptura linear, já as amostras cujas composições possuíam alto percentual de materiais fibrosos apresentaram uma tendência a um critério de ruptura bi-linear.

Cardim (2008) desenvolveu um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões, apresentado na Figura II.31. O equipamento apresenta uma caixa de seção transversal com  $1 \text{ m}^2$  ( $1 \times 1 \text{ m}$ ) e  $1 \text{ m}$  de altura, o que segundo Dixon & Jones (2005) representa a situação ideal para a avaliação da resistência dos RSU. A aplicação das forças normal e cisalhante era realizada através de dois sistemas de aplicação de carga, constituídos de macacos hidráulicos manuais. Segundo o autor, mediante poucas adaptações, o equipamento pode ser utilizado para realizar ensaios de campo em amostras indeformadas.



**Figura II.31. Equipamento de cisalhamento direto (adaptado de CARDIM, 2008)**

Os resultados dos ensaios realizados com amostras de resíduo fresco demonstraram que não houve picos de resistência, nem mesmo para deformações máximas de 50% da amostra. Os parâmetros de resistência obtidos através destes ensaios estão inseridos em uma zona de dados compilados da literatura por Sánchez-Alciturri *et al.* (1993) para ensaios de laboratório. O autor constatou para níveis maiores de deformações, que as envoltórias de ruptura apresentaram uma feição bi-linear, de acordo com Kölsch (1993).

A Tabela II.10 apresenta alguns parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU reportados na literatura, obtidos através de ensaios de cisalhamento direto de laboratório e ensaios de compressão triaxial.

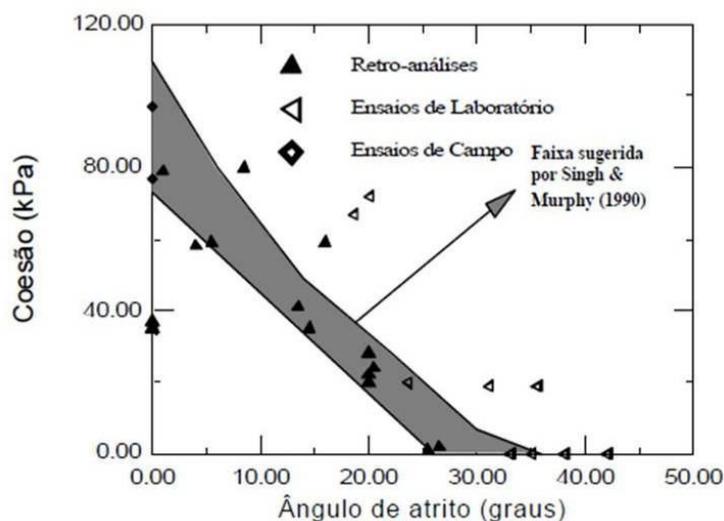
**Tabela II.10. Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos através de ensaios de cisalhamento direto de laboratório e ensaios de compressão triaxial**

<b>ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO</b>				
<b>FONTE</b>	<b>DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA</b>	<b>PARÂMETROS</b>		<b>LOCAL</b>
		$\phi$ (°)	c (kN/m <sup>2</sup> )	
Landva & Clark, (1990)	434 x 287 mm (c x l)	24 - 41	0 - 23	Aterros do Canadá
Siegel <i>et al.</i> (1990)	130 x 76 a 102 mm (diâmetro x h)	39 e 53	0	Aterro Monterey, Califórnia
Kölsch (1990)	100 x 100 x 300 mm (c x l x h)	26,4 (rsu novo) 17,7 (rsu velho)	-	-
Del Greco & Oggeri (1993) <sup>1</sup>	fardos com 400 x 500 x 600 mm (c x l x h)	21 e 22	16 e 24	-
Gabr & Valero (1995)	63,5 mm x 23 mm (diâmetro x h)	20,5 a 39 (rsu velho)	0 a 27,5	Pioneer Crossing, Pensilvânia
Edinçiler <i>et al.</i> (1996)	300 mm (diâmetro)	42	24	Wisconsin, EUA
Collins & Kölsch (1996)	2 x 1 x 1,5 m (c x l x h) e 300 x 300 mm (c x l)	29,7 e 31 (rsu novo) 40 e 38 (rsu velho)	15	-
Münnich (2001)	555 x 365 x 190 mm (c x l x h)	22,9 e 26,4	59,7 e 17	Aterro de Pinnow, Alemanha
Scheelhaase <i>et al.</i> (2001)	300 x 300 x 200 mm (c x l x h)	22,5 - 43,3	25,7 - 54,1	-
Caicedo <i>et al.</i> (2002)	300 x 300 x 200 mm (c x l x h)	24	27	Aterro de Doña Juana, Colômbia
Lamare Neto (2004)	400 x 250 x 200 mm (c x l x h) e 100 x 100 x 70 mm (c x l x h)	25 - 42 e 35 - 37	3 - 6 e 7 - 11	Usina de Compostagem em Jacarepaguá - RJ
Fucale (2005)	300 x 300 x 150 mm (c x l x h)	37 - 46	23 - 29	Aterro de Buchen e Ihlenberg, Alemanha
Martins (2006)	700 x 700 x 500 mm (c x l x h)	3 - 38	5 - 84	Aterro em Belo Horizonte, MG
Cardim (2008)	1000 x 1000 x 1000 mm (c x l x h)	34,5 - 38,6	1 - 4,35	Usina de compostagem - DF
<b>ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL</b>				
<b>FONTE</b>	<b>DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA</b>	<b>PARÂMETROS</b>		<b>LOCAL</b>
		$\phi$ (°)	c (kN/m <sup>2</sup> )	
Stoll (1971)	-	44	0	-
Matsumoto <i>et al.</i> (1987)	300 mm (diâmetro)	4,3 - 16,5	14,7 - 89,2	Aterro de Tokyo Port
Jessberger & Köckel (1991)	-	17,9 - 45,6	17,8 - 25,5	-
Gabr & Valero (1995)	70,6 x 152 mm (diâmetro x altura)	0 - 34	42 - 68	-
Grisolia <i>et al.</i> (1995)	250 x 650 mm (diâmetro x altura)	11 - 45	5 - 63	Aterros da Itália
Kockel (1995)	300 x 600 mm (diâmetro x altura)	10 - 40	25 - 200	-
Carvalho (1999)	150 x 300 mm e 200 x 400 mm (diâmetro x altura)	17 - 27	39 - 60	Aterro Bandeirantes, SP
Nascimento (2007)	500 x 1000 mm (diâmetro x altura)	14 - 40	1 - 26	Aterro Metropolitano, BA

• **PARÂMETROS RECOMENDADOS PARA PROJETOS**

Em função da dispersão de valores encontrada na literatura, observados em ensaios de laboratório, de campo e retro-análises; não se pode considerar a estimativa de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU confiáveis. Os resultados apresentados, muitas vezes, contradizem as reais condições de estabilidade de taludes observadas no campo. Diante disto, os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, obtidos por diferentes métodos e autores, têm sido plotados em gráficos do tipo coesão ( $c$ ) versus ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) na tentativa de se constituir uma faixa recomendada para projetos.

Singh & Murphy (1990) foram os primeiros a usar essa representação, conforme apresentado na Figura II.32. Baseados em uma série de resultados de ensaios de campo, laboratório e de retro-análises disponíveis, os autores sugeriram uma faixa de parâmetros para serem utilizados em projetos. Esta faixa tem como enfoque principal os resultados de retro-análises, face à performance satisfatória de taludes altos e íngremes, mesmo após terremotos (OLIVEIRA, 2002).

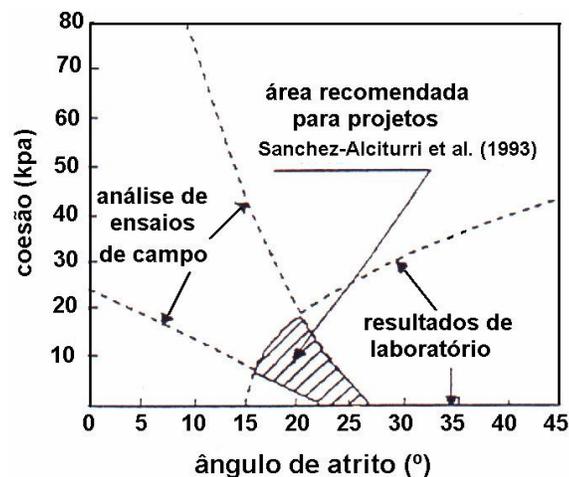


**Figura II.32. Faixa recomendada para projetos - parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU (SINGH & MURPHY, 1990) apud Oliveira (2002)**

Sánchez-Alciturri *et al.* (1993) observaram algumas tendências nos resultados dos parâmetros de resistência dos RSU, ressaltando que a mobilização do ângulo de atrito nos ensaios de laboratório, varia entre 25 e 35°. Não foi indicado nenhum valor inferior a

17°. Os valores compilados de Singh & Murphy (1990) e Gabr & Valero (1995) que apresentavam ângulo de atrito igual a 0 (zero) referem-se a ensaios UU. O intercepto de coesão é variável, mas para ensaios de laboratório, a grande concentração dos valores estão abaixo de 60 kPa. (CARVALHO, 1999).

A partir dessas observações, Sánchez-Alciturri *et al.* (1993) propuseram um novo diagrama para a obtenção de parâmetros de projeto, conforme apresentado na Figura II.33. De acordo com os autores, de forma grosseira, observou-se no gráfico uma pequena área que coincide com a faixa proposta por Singh & Murphy (1990), sendo a faixa proposta por Sánchez-Alciturri *et al.* (1993) mais conservadora.



**Figura II.33. Faixa recomendada para projetos - parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU (SÁNCHEZ-ALCITURRI *et al.*, 1993) *apud* Carvalho (1999)**

Sánchez-Alciturri *et al.* (1993) e König & Jessberger (1997) ressaltam que as faixas recomendadas para projeto devem ser utilizadas com cautela, pois nestes gráficos estão plotados tanto resultados de ensaios de campo e laboratório, quanto os obtidos em retro-análises. Segundo os autores, no caso de ensaios de laboratório, os pares de valores  $c$  e  $\phi$  são determinados, no entanto, nos casos de ensaios de campo, geralmente são feitas suposições de valores individuais para  $c$  e  $\phi$  dos RSU, sendo usual considerar o resíduo puramente coesivo ( $\phi=0$ ) ou puramente não coesivo ( $c = 0$ ) e nos ensaios *in situ* e retro-análises existem infinitos pares de valores que satisfazem as condições de equilíbrio. Segundo Sánchez-Alciturri *et al.* (1993) esse procedimento é válido para solos, onde existem bases para essas suposições. Desta forma, para os RSU, a análise em termos de  $c$  e  $\phi$  seria a forma mais adequada.

## 2.3 ESTABILIDADE DE TALUDES DE RSU

A estabilidade dos taludes de RSU em condições estáticas é controlada por inúmeros fatores. Calle (2007) destaca a resistência ao cisalhamento e compressibilidade dos solos de fundação; massa específica e resistência ao cisalhamento dos resíduos; altura e inclinação do talude; nível de lixiviado e flutuação no interior do aterro; composição e resistência à erosão da camada superficial do aterro. Outros fatores importantes são a pressão do biogás e a tensão de tração das fibras (plásticos, têxteis, etc.).

Os parâmetros de resistência dos RSU passam por variações com o tempo, devido aos processos de biodegradação dos componentes orgânicos presente na massa de resíduos e através do enfraquecimento do efeito de reforço das fibras. Além disto, os parâmetros de resistência também estão suscetíveis a alterações devido às mudanças no funcionamento do aterro, por exemplo:

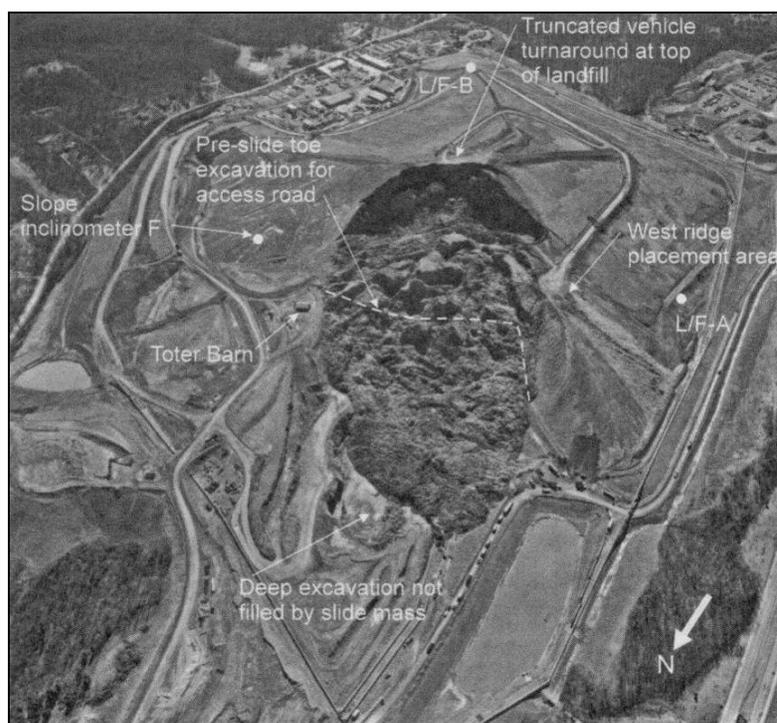
- Aumento do nível de lixiviado na massa de resíduos, devido à deficiência no sistema de drenagem ou recirculação excessiva, gerando acréscimo de poro-pressão de lixiviados;
- Aumento da pressão interna de gases, gerado por ruptura ou deficiência no sistema de drenagem de gases, causando excesso de poro-pressão de biogás.

O fator de segurança pode decrescer devido ao constante incremento da pressão de gás no interior do aterro. No aterro de Doña Juana (Colômbia), o fator de segurança variou de 1,31 a 1,27. No caso de recirculação de lixiviado, a redução do fator de segurança pode ser ainda maior, como no aterro de Doña Juana, onde as análises demonstram variações de 1,31 a 1,11 (CAICEDO *et al.*, 2002 *apud* CALLE, 2007).

### 2.3.1 EVENTOS DE RUPTURA EM ATERROS DE RSU

Nas duas últimas décadas, graves problemas relacionados à instabilidade de aterros sanitários foram registrados. Em alguns casos, os movimentos de grande quantidade de massa de resíduos sólidos, além de gerar gravíssimos inconvenientes no entorno, também ocasionaram perda de vidas humanas (BACAS, 2009). O tipo da ruptura de aterros de RSU depende de fatores internos e externos à massa de resíduos depositada. Alguns eventos de ruptura associados ao excesso de poro-pressão em aterros de RSU reportados na literatura são apresentados a seguir:

- Aterro de Rumpke (Ohio - EUA, março de 1996): foi verificado o surgimento de fissuras na parte superior do aterro, reconhecidas como de recalque, durante cinco dias consecutivos. No quinto dia, constatou-se o surgimento de fissuras no pé do talude e pouco tempo depois se observou a movimentação horizontal dos taludes em torno de 3 a 5 m do eixo e fissuras com 1 m de largura. No mesmo dia, à noite, houve registro de saída de lixiviado pressurizado e poucos minutos depois, cerca de 1,2 milhões de m<sup>3</sup> de resíduos deslizaram (Figura II.34). A ocorrência do evento foi atribuída à ausência de drenagem interna de gases e lixiviado, que causaram a elevação das poro-pressões, e conseqüentemente, redução das tensões efetivas levando a instabilidade do maciço (STARK *et al.*, 2000).



**Figura II.34. Imagem do deslizamento do aterro de Rumpke (STARK *et al.*, 2000)**

- Aterro de Doña Juana (Colômbia, setembro de 1997): foram observados recalques superficiais em um talude; no dia seguinte foram observados recalques mais acentuados, deslocamento de uma linha de drenagem e surgência de lixiviado nos taludes do aterro. No mesmo dia, iniciou-se o deslizamento de cerca de 800 mil m<sup>3</sup> de resíduos ao longo de 1.200 m de extensão horizontal, apresentado na Figura II.35. Segundo Collazos (1998), o deslizamento foi

originado devido à elevação da poro-pressão de líquidos causada pela recirculação do lixiviado. A zona do aterro onde ocorreu o acidente foi a única região onde a recirculação foi aplicada.



Figura II.35. Imagem do deslizamento do aterro de Doña Juana (COLLAZOS, 1998)

- Aterro de Payatas (Filipinas, julho de 2000): após cinco dias de chuvas intensas, foi verificada a abertura de fissuras na porção norte do aterro, seguida de surgências de lixiviado pelas fissuras. Cerca de três horas depois do registro da abertura das fissuras, o escorregamento de aproximadamente 16 mil m<sup>3</sup> de resíduos foi deflagrado, atingindo um povoado que cercava o aterro, inclusive a rede elétrica (Figura II.36). Após o deslizamento surgiram focos de incêndio na massa de resíduos, mas não se sabe se a origem do incêndio foi da rede elétrica ou combustão espontânea. A análise de estabilidade do aterro sugere que a interação da pressão de gás e líquidos na massa de resíduos saturada pode ter sido o fator determinante deste evento (MERRY *et al.*, 2005). No acidente, 278 pessoas morreram e várias outras ficaram desaparecidas.



**Figura II.36. Imagem do deslizamento do aterro de Payatas (MERRY *et al.*, 2005)**

- Aterro de Leuwigajah (Indonésia, fevereiro de 2005): após três dias de chuvas intensas na região, ocorreu o deslizamento de 2,5 milhões de m<sup>3</sup> de resíduos ao longo de 900 m de extensão horizontal, apresentado em imagem de satélite na Figura II.37. Segundo Kölsch *et al.* (2005), o deslizamento foi originado pela combinação do aumento da pressão neutra no solo de fundação do aterro e pela perda de propriedades de resistência de uma porção do aterro, ocasionada por um evento e queima sub-superficial na massa de resíduos. O evento resultou na morte de 147 pessoas de comunidades localizadas à jusante do aterro.



**Figura II.37. Imagem de satélite da ruptura do aterro de Leuwigajah (KÖLSCH *et al.*, 2005)**

No Brasil, existem vários casos de ruptura de aterros ainda não relatados na literatura, a exemplo dos Aterros Bandeirantes e São João, ambos em São Paulo. Além destes, o

mais recente escorregamento foi deflagrado no Aterro da Pajoan, em Itaquaquetuba, também em São Paulo (Brasil, abril de 2011), apresentado na Figura II.38. O evento ocorreu após uma grande fissura no aterro ser detectada, e com isto houve tempo para alertar para o risco de deslizamento e retirar as pessoas do local. Na ocasião, os resíduos interditaram uma estrada, onde formaram pilhas de mais de 12 metros de altura, e chegaram às margens de um córrego. Pequenos focos de incêndio surgiram na massa de resíduos após o evento. Ainda não foram investigadas as causas do deslizamento.



**Figura II.38. Imagem da ruptura do Aterro da Pajoan: (a) vista aérea (TERRATV, 2011) e (b) vista no local (G1, 2011)**

Colomer *et al.* (2009) apresentam casos de ruptura reportados na literatura, associando cada caso ao problema de instabilidade, possível deflagrador da ruptura. Alguns casos apresentam dois ou mais problemas associados, conforme se observa na Tabela II.11.

Tabela II.11. Casos de ruptura de aterros de RSU (COLOMER *et al.*, 2009)

INSTABILIDADE POR DECLIVIDADE EXCESSIVA DOS TALUDES		
ATERRO	LOCAL, ANO	FONTE
Sarajevo	Bósnia-Herzegovina, 1977	1; 2
Umraniye-Hekimbasi	Istambul, Turquia, 1993	3; 4; 1; 5; 6; 7
Beirolas	Lisboa, Portugal, 1995	8; 9
Hiriya	Tel-Aviv, Israel, 1998	10
Abanilla	Murcia, Espanha, 2005	38
INSTABILIDADE POR DECLIVIDADE EXCESSIVA DO SOLO		
ATERRO	LOCAL, ANO	FONTE
Umraniye-Hekimbasi	Istambul, Turquia, 1993	3; 4; 1; 5; 6; 7
Bens	La Coruña, Espanha, 1996	38
Canabrava	Salvador, Brasil, 1997	11
INSTABILIDADE POR DESLIZAMENTOS DA MASSA DE RESÍDUOS SOBRE A MANTA DE IMPERMEABILIZAÇÃO		
ATERRO	LOCAL, ANO	FONTE
Finale Emilia	Itália, 1987	12
Mankaa	Helsinki, Finlândia, 1987	12
Kettleman Hills	Califórnia, EUA, 1988	13
Rumpke	Cincinnati, Ohio, EUA, 1996	14; 15; 16
INSTABILIDADE POR SATURAÇÃO DA MASSA DE RESÍDUOS		
ATERRO	LOCAL, ANO	FONTE
Bens	La Coruña, Espanha, 1996	38
Doña Juana	Bogotá, Colômbia, 1997	1; 17; 18
Payatas	Manila, Filipinas, 2000	15; 19
El Basuro de Navarro	Cali, Colômbia, 2001	38
Mpewere	Kampala, Uganda, 2002	18; 20
Chongqing	China, 2002	38
Loma Los Colorados	Santiago, Chile, 2002	38
Ano Liossia	Atenas, Grécia, 2003	38
Guadalupe	Salvador, 2003	21
Bandung	Indonésia, 2005	22; 23
FUGAS DE LIXIVIADOS OCASIONADAS POR UMA MÁ IMPERMEABILIZAÇÃO DA BASE		
ATERRO	LOCAL, ANO	FONTE
Lewiston	Idaho, EUA, 1999	24
Guadalupe	Califórnia, 2003	25
PROBLEMAS OCASIONADOS PELA PRODUÇÃO E PELA MÁ GESTÃO DOS GASES GERADOS		
ATERRO	LOCAL, ANO	FONTE
Sarajevo	Bósnia Herzegovina, 1977	1; 2; 32
Derbyshire	Loscoe, UK, 1986	26; 27; 28; 29
Carate-Brianza	Itália	30; 31
Umraniye-Hekimbasi	Istambul, Turquia, 1993	3; 4; 1; 5; 6; 7
Vergiate	Itália	1; 30
Cerro Maggiore	Milão, Itália	35; 1; 33; 34
Seveso	Itália	1; 31
Casate	Ticino, Suíça	1; 30; 33; 36
Croglio	Suíça	30
Saint Augustin	Alemanha	30
Los Angeles	Albuquerque, EUA	1; 37
Ghemme	Novara, Itália	30; 35

Fonte: <sup>1</sup>ECONS.S.A. (2003); <sup>2</sup>UNECE (2004); <sup>3</sup>Blight & Fourie (2005); <sup>4</sup>Díaz *et al.* (2003); <sup>5</sup>Fahey *et al.* (2002); <sup>6</sup>Kocasooy & Curi (1995); <sup>7</sup>Rushbrook (1999); <sup>8</sup>Castelao *et al.* (1999); <sup>9</sup>Pardo de Santayana & Veiga (1998); <sup>10</sup>Klein (2003); <sup>11</sup>Oliveira (2002); <sup>12</sup>Cancelli (1989); <sup>13</sup>Chang *et al.* (1999); <sup>14</sup>Eid *et al.* (2000); <sup>15</sup>Kölsch & Ziehmman (2004); <sup>16</sup>Stark *et al.* (2000); <sup>17</sup>Hendron *et al.* (1999); <sup>18</sup>Johannessen & Boyer (1999); <sup>19</sup>Merry (2000); <sup>20</sup>Lemoine (2003); <sup>21</sup>Prois (2003); <sup>22</sup>Kölsch *et al.* (2005); <sup>23</sup>Kölsch (2005); <sup>24</sup>Jenkins *et al.* (2002); <sup>25</sup>Seward (2000); <sup>26</sup>Aitkenhead (2002); <sup>27</sup>Derbyshire County Council (1986); <sup>28</sup>Eden (2005); <sup>29</sup>Wittle (1998); <sup>30</sup>Gandolla *et al.* (1998); <sup>31</sup>Lassini *et al.* (1999); <sup>32</sup>Gandolla *et al.* (1979); <sup>33</sup>Parsons (1993); <sup>34</sup>TENAX SpA (2004); <sup>35</sup>Calare *et al.* (1996); <sup>36</sup>Zhao & Montanelli (1999); <sup>37</sup>Yoshimura (2002); <sup>38</sup>COLOMER *et al.* (2009).

### 2.3.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

As análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU são comumente realizadas com base na teoria de equilíbrio limite da mecânica dos solos clássica, adotando os parâmetros de resistência – ângulo de atrito e intercepto coesivo para os resíduos, obtidos principalmente em dados da literatura internacional, devido à ausência de dados locais e de uma metodologia específica para a mecânica dos resíduos sólidos. Este modelo pode servir como uma aproximação inicial. No entanto, a análise de estabilidade de taludes dos resíduos a partir de modelos e métodos estabelecidos para solos sempre deve ser realizada com cautela. Alguns valores muito baixos encontrados nas análises são considerados contraditórios diante de condições de estabilidade encontradas em campo.

As análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU reportadas na literatura geralmente subestimam o fator de segurança. No entanto, comumente são feitas ressalvas, com base em observações de aterros que mantêm sua estabilidade ao longo do tempo, mesmo em condições de precipitações intensas; o que sugere que os fatores de segurança são mais elevados.

Singh & Murphy (1990) sugerem, como uma aproximação para análises de maciços de RSU para aterros com alturas em torno de 61 m e taludes 3H:1V, assentes em fundações relativamente resistentes, que as análises clássicas de estabilidade de taludes podem ser realizadas admitindo-se parâmetros dentro das faixas recomendadas para projetos (Figura II.32). Os resultados devem ser interpretados a favor da condição menos conservadora, pois taludes com inclinações superiores encontram-se estáveis. Aterros com alturas elevadas e taludes moderadamente íngremes (1,5 a 2H:1V) assentes em fundações pouco resistentes, apresentam potencial de ruptura pela fundação do aterro. A avaliação da estabilidade das fundações pode ser conduzida com base em análises de estabilidade de taludes convencionais e de capacidade de carga das fundações. Os autores consideram que na análise de estabilidade das fundações, a resistência do aterro deve ser desconsiderada numa abordagem conservadora. Nessa modelagem tem-se a ruptura da fundação independente do corpo do aterro.

Kavazanjian *et al.* (1995) calcularam parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU por meio de análises em quatro aterros sanitários existentes nos EUA (Lopez Canyon, CA; OII, CA; Babylon, NY; Private Landfill, OH), utilizando as inclinações (h:v) médias

encontradas, que variam de 1,9:1 a 2,5:1 e máximas de 1,2:1 a 1,7:1. Assumindo uma coesão de 5 kPa, estimaram ângulos de atrito variando de 25 a 38° para os fatores de segurança mínimo de 1,0; 1,1 e 1,2. Como estes aterros têm permanecido estáveis, presume-se que os fatores de segurança são mais altos que os utilizados para a análise.

Para Kölsch (1993, 1995, 1996) *apud* Fucale (2005), existem muitos problemas em cálculos de estabilidade para aterros de resíduos sólidos baseados em métodos usuais da Mecânica dos Solos, devido à grande diferença entre as propriedades do solo e dos resíduos. O autor considera que os resíduos sólidos apresentam comportamento de resistência para grandes deformações semelhante ao de solos reforçados, ou seja, a resistência ao cisalhamento total é composta pelo atrito no plano cisalhante e pelas forças de tração nas fibras. Neste sentido, o resíduo sólido é considerado um material constituído de duas componentes: uma matriz básica, compreendida pelas partículas de granulação fina a média, que apresentam comportamento de atrito, e a outra, a matriz de reforço contendo os componentes fibrosos dos resíduos sólidos (plásticos, tecidos, galhos de madeira).

Calle (2007) ressalta que os resíduos apresentam diferenças significativas dos solos, pois o índice de vazios é muito alto, o que implica numa alta compressibilidade; as partículas são de natureza muito diferente, algumas fracas e muito deformáveis ou quebradiças; há um processo de decomposição com o tempo, o que promove um auto-adensamento e variação de suas propriedades com o tempo.

Merry & Kavazanjian (2006) analisaram os efeitos da interação do gás gerado no aterro com o fluido dos poros, apresentado na Figura II.6, em análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU por simulações de diferentes declividades, utilizando parâmetros de resistência obtidos na literatura e observaram que o fator de segurança diminui rapidamente com o acréscimo do peso específico equivalente do fluido dos poros, para todas as inclinações investigadas.

Colomer *et al.* (2009) realizaram cálculos de estabilidade de taludes com condições muito desfavoráveis para as propriedades mecânicas da massa de resíduos, já que se utilizaram valores de  $c'$  próximos a 0 e de  $\phi'$  mínimos. Como resultado, aterros com taludes com inclinação em torno de 2,5:1 (h:v) permanecem estáveis durante muito tempo, mesmo em condições de precipitações intensas, havendo-se calculado um fator de segurança para esses casos inferior ao recomendado. Por isto, é de se considerar que

os valores de  $c'$  e  $\phi'$  na massa de resíduos são sensivelmente maiores e permitem dar a estabilidade suficiente aos taludes, sempre que os lixiviados e o biogás sejam convenientemente drenados.

### 2.3.3 MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE DE RSU (KÖLSCH, 1996)

O modelo proposto por Kölsch (1996) considera a contribuição da resistência à tração, que depende da tensão normal no contato resíduos-fibras e da resistência das fibras. Esta contribuição é denominada coesão das fibras  $\tau(z)_\alpha$  e consiste de duas parcelas:  $\tau_z$  (tensão cisalhante devido às forças de tração no reforço, que atua paralela ao plano de ruptura) e  $\tau_R(z)$  (tensão de atrito adicional que é causada por uma tensão normal  $\sigma_z$  resultante das forças de equilíbrio). A tensão de tração no reforço ( $z$ ) é representado por  $z_\alpha$  de acordo com o ângulo do elemento reforço. A Figura II.39 mostra a relação de equilíbrio entre a tensão de tração  $P$  axial à direção das fibras e cisalhante, e uma força cisalhante  $T$  paralela ao plano de ruptura  $A_\alpha$  num elemento reforçado horizontalmente.

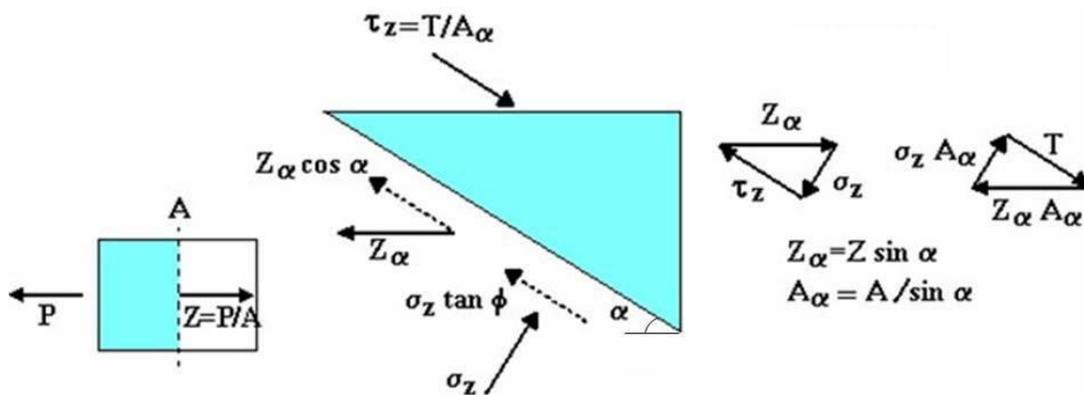


Figura II.39. Sistema de equilíbrio de forças em um elemento reforçado horizontalmente (KÖLSCH, 1996 *apud* CALLE, 2007)

Desta forma, a coesão das fibras pode ser calculada de acordo com a Equação II.1:

$$\tau(z)_\alpha = \tau_z + \tau_R(z)$$

$$\tau(z)_\alpha = Z_\alpha \cos \alpha + \sigma_z \cdot \tan \phi$$

$$\tau(z)_\alpha = Z_\alpha \cos \alpha + Z_\alpha \sin \alpha \cdot \tan \phi$$

$$\tau(z)_\alpha = Z_\alpha (\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \tan \phi)$$

(II.1)

Substituindo a relação  $z_\alpha = z \cdot \sin \alpha$  na Equação II.1, tem-se a Equação II.2:

$$\tau(z)_\alpha = z \cdot \sin \alpha (\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \tan \phi) \quad (\text{II.2})$$

Onde:  $\tau(z)_\alpha$  é a coesão das fibras;  $\tau_z$  é a tensão cisalhante devido ao efeito de reforço que atua paralela no plano de ruptura;  $\tau_R(z)$  é a tensão de atrito adicional;  $z$  é a tensão à tração no reforço; e  $\alpha$  é o ângulo entre a superfície de ruptura e a direção das fibras.

Como a coesão das fibras depende da posição do ângulo  $\alpha$  e das propriedades de atrito do material, sua determinação está sujeita ao grau de ativação da coesão das fibras ( $a_\zeta$ ), através da Equação II.3:

$$\tau(z)_\alpha = z \cdot a_\zeta, \text{ sendo } a_\zeta = \sin \alpha (\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \tan \phi) \quad (\text{II.3})$$

O grau de ativação da coesão das fibras ( $a_\zeta$ ) versus ângulo entre a superfície de ruptura e a direção das fibras ( $\alpha$ ), para diferentes valores de ângulo de atrito ( $\phi$ ) está apresentado na Figura II.40 (KÖLSCH, 1996 *apud* FUCALE, 2005).

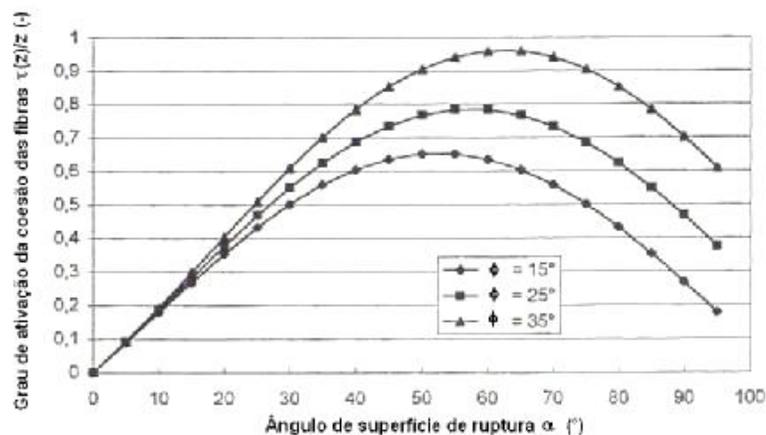


Figura II.40. Grau de ativação teórico da coesão das fibras (KÖLSCH, 1996)

Uma função da anisotropia foi deduzida através do gráfico da Figura II.40. A coesão ativada devido ao reforço, que depende do ângulo  $\alpha$ , resulta da Equação II.4:

$$\tau(z)_\alpha = z \cdot a_{\zeta\text{máx}} \cdot \sin (1,5\alpha) \quad (\text{II.4})$$

Onde:  $a_{\zeta_{\max}}$  é a taxa de ativação máxima sob ângulo  $\alpha$  (entre 0,8 e 1,1); e  $\alpha$  é o ângulo da superfície de ruptura com a direção das fibras, admitindo-se  $\alpha = V$  (superfície de ruptura perpendicular à direção principal das fibras).

Com base nestes dados para incorporação do efeito das fibras nos cálculos e considerando o método de fatias para o cálculo de estabilidade de taludes, segundo Bishop (1955), foi proposto por Kölsch (1996) um método de cálculo de estabilidade de taludes de aterros de RSU. Para os cálculos, é adicionado um termo às forças resistentes (T), que corresponde à coesão das fibras, conforme Equação II.5:

$$T = \frac{G \cdot \text{tg}\phi + c \cdot b + G \cdot \text{tg}\zeta \cdot a_{\zeta} \cdot \sin(1,5\alpha)}{\frac{1}{FS} \sin \alpha \cdot \text{tg}\phi + \cos \alpha} \quad (\text{II.5})$$

Onde: G é a massa efetiva do elemento (kN);  $\zeta$  é o ângulo de tensão de tração (°); c é a coesão (kN/m<sup>2</sup>);  $\phi$  é o ângulo de atrito (°);  $\alpha$  é o ângulo da superfície de ruptura com a direção das fibras (°); b é a espessura da fatia (m); FS é o fator de segurança e  $a_{\zeta}$  é a taxa de ativação da coesão das fibras.

Os parâmetros geotécnicos para os resíduos sólidos foram sugeridos por GDA E 2-35 (DGGT, 1994), após uma ampla campanha de ensaios, tanto para resíduos sem tratamento, como também para resíduos resultantes de pré-tratamento mecânico e biológico. Um resumo dos parâmetros sugeridos está apresentado na Tabela II.12, conforme apresentado por Fucale (2005), onde foram considerados procedimentos para deposição dos resíduos sólidos, de forma isotrópica (GDA E 2-23) e anisotrópica (GDS E 2-29).

Para os resíduos depositados isotropicamente, segundo GDA E 2-23, pode-se utilizar os métodos conhecidos da Mecânica dos Solos. Os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos depositados de forma isotrópica são desta forma dados em termos de coesão e ângulo de atrito. Em relação aos resíduos depositados anisotropicamente, GDA E 2-29 recomenda que as variáveis da força relativa à tensão de tração dos constituintes sejam consideradas, não devendo se empregar simplesmente os métodos da Mecânica dos Solos. Neste caso, deve-se incorporar a coesão das fibras nos cálculos, podendo-se utilizar o modelo bi-linear desenvolvido por KÖLSCH (1996) nas análises.

**Tabela II.12. Parâmetros de geotécnicos para RSU sugeridos por GDA E 2-35 (DGGT, 1994)**

Dimensão		RESÍDUOS NÃO TRATADOS	RESÍDUOS TRATADOS MECÂNICO-BIOLÓGICO
		Dim 1;2 <sup>(1)</sup> (E 1-7) > 30% em peso	Dim 1;2 <sup>(1)</sup> (E 1-7) < 20% em peso
Peso específico seco $\gamma_{\text{seco}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Sem compactação	2 – 5	2 – 7
	Após compactação	5 – 10	8 – 15
Resistência para resíduos depositados em condição anisotropia <sup>(2)</sup> (E 2-29)	$\zeta$ (°)	20 – 35	10 – 14
	$\phi_{\text{MB}}$ (°)		30 – 35
	$c_{\text{MB}}$ (kN/m <sup>2</sup> )		10 – 15
Resistência para resíduos depositados em condição isotrópica <sup>(3)</sup> (E 2-23)	$\phi_{\varepsilon 1}$ (°)	$\varepsilon_1 = 0\%$ :	$\phi_{\varepsilon 1} = 0$
		$\varepsilon_1 = 10\%$ :	$\phi_{\varepsilon 1} = 20$ a 25
		$\varepsilon_1 = 20\%$ :	$\phi_{\varepsilon 1} = 22$ a 35
	$c_{\varepsilon 1}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\varepsilon_1 = 0\%$ :	$c_{\varepsilon 1} = 0$
		$\varepsilon_1 = 10\%$ :	$c_{\varepsilon 1} = 11$ a 17,5
	$\varepsilon_1 = 20\%$ :	$c_{\varepsilon 1} = 22$ a 35	
Módulo de rigidez (E 2-24)	$E_s$ (kN/m <sup>2</sup> ) a e $\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	$E_s = a + b^*s$ a: - 100 até - 300 b: 10 até 13	
Coeficiente de Permeabilidade	$k_f$ (m/s)	$10^{-3}$ até $10^{-6}$	$10^{-6}$ até $10^{-9}$

(1) Dim 1 = fibra, fio ; Dim 2 = folha, planar;

(2) Massa de resíduos sólidos com propriedades de resistência anisotrópica;

(3) Parâmetros de resistência dependentes de deformação e definidos para uma determinada deformação.

## CAPÍTULO III

### PROGRAMA EXPERIMENTAL E CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS

#### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para análise do comportamento geotécnico de aterros de resíduos sólidos urbanos com codisposição de lodo de tratamento de esgoto, foi desenvolvido um programa experimental. A investigação consistiu basicamente de três etapas: (I) construção e monitoramento de reatores para análise da geração do biogás dos RSU com codisposição com LE; (II) construção de equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões e execução de ensaios para obtenção de parâmetros de resistência dos RSU; e (III) análise de estabilidade de talude simulado, empregando uma geometria usual de projetos de aterros sanitários, para avaliação dos parâmetros de resistência da literatura e obtidos nos ensaios desta pesquisa.

O programa de investigação de laboratório elaborado para a realização dos ensaios, está apresentado de forma resumida na Tabela III.1. Este programa de investigação tem por objetivo a obtenção de parâmetros de resistência para análise da estabilidade geotécnica da massa de RSU considerando sua composição inicial, o efeito das fibras como componente de reforço e a influência de poro-pressão do biogás.

Com o objetivo de definir critérios para disposição de forma adequada, a análise de alguns aspectos geotécnicos relevantes na codisposição de RSU e LE em aterros sanitários é proposta, tais como, a contribuição do LE na geração de biogás; a redução dos parâmetros de resistência; redução da permeabilidade e a influência na estabilidade de taludes de aterros de RSU. Com isto, verificam-se algumas condicionantes importantes para uma codisposição segura do ponto de vista geotécnico.

Os equipamentos desenvolvidos, metodologias dos ensaios e resultados encontrados no programa de investigação de laboratório, são apresentados em cinco capítulos:

- Caracterização inicial dos resíduos;
- Reatores de laboratório;
- Equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões;
- Ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões;
- Análises de estabilidade de taludes.

**Tabela III.1. Programa de investigação geotécnica**

<b>CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS</b>		
<b>INVESTIGAÇÃO/ENSAIOS</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>QUANT.</b>
Caracterização física dos RSU	Composição gravimétrica e volumétrica, teor de umidade e compactação	02
Caracterização física e química do lodo residual de tratamento de esgoto	Ensaio físicos: granulometria, limites de consistência, peso específico dos grãos e compactação; e químicos: espectrometria de fluorescência por energia dispersiva de Raios-X (EDX) e por difração de Raios-X (DRX) e por absorção atômica	01
Permeabilidade do lodo residual de tratamento de esgoto	Ensaio realizado com amostra de LE compactada no ramo úmido do ensaio normal de compactação	01
Cisalhamento direto convencional do lodo do tratamento de esgoto	Ensaio na umidade natural e inundado, realizados com amostra de LE compactada no ramo úmido do ensaio normal de compactação	08
<b>ENSAIOS EM REATORES DE LABORATÓRIO</b>		
<b>INVESTIGAÇÃO/ENSAIOS</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>QUANT.</b>
Desenvolvimento de reatores para investigação da geração de biogás	Concepção, projeto e construção de quatro reatores para monitoramento da produção de biogás de RSU com e sem codisposição de lodo de tratamento de esgoto	04
Monitoramento do biogás	Pressão, concentração dos gases (CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, O <sub>2</sub> ), temperatura e estimativa da vazão	07 meses
<b>ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO</b>		
<b>INVESTIGAÇÃO/ENSAIOS</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>QUANT.</b>
Desenvolvimento de equipamento para ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões	Concepção, projeto e construção de equipamento de cisalhamento direto para corpos de prova com seção quadrada de 0,36 m <sup>2</sup> (0,6 x 0,6 m) e altura total de 0,6 m	01
Cisalhamento direto de grandes dimensões	Ensaio realizado com areia para teste comparativo do equipamento desenvolvido	04
Cisalhamento direto convencional	Ensaio realizado com areia para teste comparativo do equipamento desenvolvido	04
Cisalhamento direto de grandes dimensões	Ensaio realizados com três diferentes composições de RSU: com e sem codisposição de lodo de tratamento de esgoto desidratado	12
<b>ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE</b>		
<b>PROGRAMA UTILIZADO</b>	<b>OBJETIVOS</b>	
GGU-Stability	Análise da estabilidade de taludes, considerando a tração das fibras como componente de reforço e considerando a poro-pressão do biogás como agente de instabilização	

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS

A caracterização inicial dos RSU foi realizada com amostras de resíduos sólidos urbanos (RSU) da cidade do Recife - PE, coletadas para o preenchimento dos reatores e para moldagem dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto. A caracterização

física dos RSU compreende a composição gravimétrica e volumétrica, compactação e teor de umidade. É importante ressaltar que nos ensaios de compactação, também foram utilizadas amostras de resíduos com codisposição de lodo. Para a realização dos ensaios, foram utilizadas amostras de RSU provenientes do Aterro de RSU da Muribeca e da Central de Tratamento de Resíduos (CTR) Igarassu, ambos na Região Metropolitana do Recife (RMR), Pernambuco. A Figura III.1 apresenta a localização dos dois aterros em relação à RMR, ao estado de Pernambuco e ao Brasil.



**Figura III.1. Localização da CTR Igarassu e do Aterro da Muribeca em relação à Região Metropolitana do Recife, ao estado de Pernambuco e ao Brasil**

A caracterização inicial do lodo residual do tratamento de esgoto (LE) foi realizada com amostras de LE da cidade do Recife – PE, proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Cabanga, Pernambuco. A caracterização física do LE compreende ensaios de granulometria, limites de consistência, peso específico dos grãos e compactação.

Na caracterização química foram realizadas espectrometrias de fluorescência por energia dispersiva de Raios-X (EDX) e por difração de Raios-X (DRX), utilizando uma amostra passada na peneira ABNT n°. 200, e espectrometria por absorção atômica, utilizando extratos lixiviado e solubilizado dos resíduos do LE.

Na caracterização inicial do LE, também foram realizados ensaios de permeabilidade e ensaios de resistência ao cisalhamento, fazendo-se uso de amostras compactadas no ramo úmido da curva de compactação. A utilização de corpos de prova de LE compactados no ramo úmido foi um critério adotado devido às exigências de teor de umidade máximo do LE para disposição em aterros sanitários e aos resultados típicos de processos de desidratação mecânica.

Segundo David & Tsutiya (2001), dentre as técnicas de secagem de lodo, os processos de desidratação mecânica em filtros prensa permitem obter teores de sólidos na faixa de 20 a 30%, podendo-se chegar a 40% com a utilização de cal. Com a aplicação de secagem térmica pode-se obter teores de sólidos entre 90 e 95%, o que reduz significativamente os pesos para transporte. No entanto, a aplicação da tecnologia de secagem térmica é um processo relativamente caro, pois além de envolver a utilização de combustível para geração de calor necessita de mão de obra especializada para manuseio e controle.

### 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS RSU

#### 3.2.1.1 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA E VOLUMÉTRICA

Na composição física dos resíduos, foram realizados dois ensaios para determinação da composição gravimétrica. O primeiro, no Aterro de RSU da Muribeca para caracterização dos resíduos utilizados no preenchimento dos reatores, na ocasião também se realizou um ensaio para determinação da composição volumétrica. O segundo, realizado na UFPE com os RSU procedentes da CTR Igarassu, para caracterização dos resíduos utilizados nos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões.

A Figura III.2 apresenta os procedimentos adotados para a preparação das amostras para caracterização dos resíduos no Aterro da Muribeca. Um caminhão de coleta foi encaminhado para descarregar em um pátio pavimentado (1), onde os resíduos

passaram por homogeneização (2) e redução por quarteamento (3), conforme NBR 10.007 (ABNT, 2004). Os sacos plásticos que envolvem os resíduos foram rompidos manualmente (4). Os resíduos passaram novamente por homogeneização e quarteamento, de onde se tomou uma pilha (5) com cerca de 420 kg de resíduos, quantidade suficiente para a caracterização e preenchimento dos reatores. O material foi pesado e colocado sobre uma lona (6) para a segregação dos componentes.



**Figura III.2. Procedimentos para caracterização dos RSU: (1) descarregando num pátio pavimentado; (2) homogeneização; (3) redução por quarteamento; (4) ruptura manual dos sacos plásticos; (5) pilha pronta para caracterização; (6) segregação dos componentes**

Estes procedimentos foram adotados na caracterização com o objetivo de se obter um material representativo. É importante citar que a coleta apresentava resíduos de origem doméstica, comercial e de varrição. A amostra total passou por pesagem em baldes com volumes conhecidos para determinação do peso específico dos resíduos na umidade natural e sem compactação. Os resíduos foram depositados nos baldes até seu preenchimento completo, sem sofrer compactação. Foi utilizada uma balança eletrônica digital (marca Marte, modelo MW 100) com capacidade máxima de 100 kg e divisão de 50 g. Para a determinação das composições gravimétrica e volumétrica, os resíduos foram selecionados em dez categorias: (1) matéria orgânica; (2) papel e cartão; (3) plástico mole; (4) plástico duro; (5) vidro; (6) couro e borracha; (7) metal; (8) têxteis sanitários; (9) têxteis; (10) outros. A composição volumétrica dos RSU foi obtida através do percentual em volume dos seus componentes fazendo uso de baldes com volumes conhecidos, onde os resíduos foram depositados, sem sofrer compactação.

Devido ao encerramento das atividades do aterro da Muribeca, os resíduos utilizados nos ensaios de cisalhamento direto foram procedentes da CTR Igarassu. Os procedimentos para preparação das amostras para caracterização dos resíduos seguidos na CTR diferem dos critérios adotados na Muribeca apenas no que concerne às etapas de homogeneização e redução por sucessivos quarteamentos, por não haver disponibilidade de área para estas atividades no local. Desta forma, para facilitar o acondicionamento das amostras, foi necessário desviar um caminhão de coleta para descarregar em uma área coberta com uma lona, para evitar contato com o solo, conforme apresentado na Figura III.3. Foi selecionado um caminhão de coleta proveniente do Recife com resíduos de origem doméstica, comercial e de varrição.



**Figura III.3. Preparação das amostras na Central de Tratamento de Resíduos de Igarassu:**  
**(1) caminhão de coleta descarregando e (2) acondicionamento de amostras**

É importante mencionar que na coleta não houve triagem, foram selecionadas amostras de forma aleatória, mas foram rejeitados os materiais com grandes dimensões e/ou de difícil processamento como algumas pedras, pedaços de madeira e metais. Foram coletados cerca de 310 kg, quantidade suficiente para a caracterização e moldagem dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento, fazendo-se reuso da amostra. O material foi levado para um pátio de estacionamento no Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da UFPE, apresentado na Figura III.4, onde foi seguindo o mesmo procedimento adotado na Muribeca: os resíduos foram dispostos sobre uma lona para segregação e pesagem dos componentes individuais dos RSU de acordo com as dez categorias já citadas anteriormente para determinação da composição gravimétrica. O material separado foi encaminhado para o pré-tratamento mecânico, apresentado no Item 6.1.



**Figura III.4. Segregação e pesagem dos RSU em um pátio da UFPE**

### 3.2.1.2 TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade dos RSU da Muribeca foi determinado em base úmida (Equação III.1). Uma amostra de aproximadamente 1 kg selecionada aleatoriamente foi dividida em três partes, que foram pesadas em balança eletrônica digital, com capacidade de 1 kg e sensibilidade de 0,01 g e foi levada à estufa mantida a 65°C. A temperatura utilizada é a indicada para a determinação da umidade de solos com elevado conteúdo de matéria orgânica, de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986a). A determinação do peso seco era verificada quando constatada a constância de peso. Após estabilização do peso, esperava-se o resfriamento do material em um dessecador antes de pesá-lo.

$$w(\%) = 100 \cdot \frac{\text{peso}_{\text{úmido}} - \text{peso}_{\text{seco}}}{\text{peso}_{\text{úmido}}} \quad (\text{III.1})$$

### 3.2.1.3 COMPACTAÇÃO

Os ensaios de compactação foram conduzidos de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 1986b). Foram determinados 10 pontos para cada curva de compactação fazendo-se reuso da amostra de resíduos. Foi utilizado o cilindro padrão (dimensões: 10,16 cm de diâmetro e 12,73 mm de altura) do ensaio de compactação, com energia Normal. A curva de compactação foi ilustrada utilizando o teor de umidade em base úmida.

Os ensaios foram realizados com amostras de RSU da CTR Igarassu. Foram utilizadas as amostras de resíduos dos ensaios de cisalhamento direto, reduzindo-se para 25 mm as dimensões máximas dos componentes para minimizar a influência do tamanho das partículas nos resultados. O pré-tratamento mecânico para redução dos componentes dos resíduos está descrito na preparação da amostra para os ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões (Item 6.1). Para o procedimento de secagem, o material foi depositado em bandejas para secar ao ar durante aproximadamente 10 dias. Os ensaios de compactação foram realizados com duas diferentes composições de resíduos, apresentadas na Tabela III.2. Para cada ensaio eram necessários cerca de 4 kg de amostra em peso úmido. Na Figura III.5 são apresentas algumas etapas da realização dos ensaios de compactação dos RSU.

**Tabela III.2. Composição das amostras dos ensaios de compactação**

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	
AMOSTRAS	COMPOSIÇÃO
1. RSU	Resíduos sólidos urbanos pré-tratados mecanicamente
2. RSU-LE	Resíduos sólidos urbanos pré-tratados mecanicamente com adição de lodo residual do tratamento do esgoto, na proporção de 17:3 (15% em peso úmido)



**Figura III.5. Apresentação do cilindro utilizado para os ensaios de compactação: (1) após compactação da segunda camada de RSU-LE; (2) após compactação da terceira camada de RSU-LE; (3) extração do corpo de prova de RSU**

### 3.2.1.4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### • COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA E VOLUMÉTRICA

A composição gravimétrica e volumétrica foi obtida de acordo com dez categorias. Na seleção e pesagem dos componentes dos RSU realizada na ocasião do preenchimento dos reatores experimentais, foram utilizadas amostras frescas do Aterro de RSU da Muribeca. O gráfico de percentual em peso úmido por categoria está apresentado na Figura III.6.

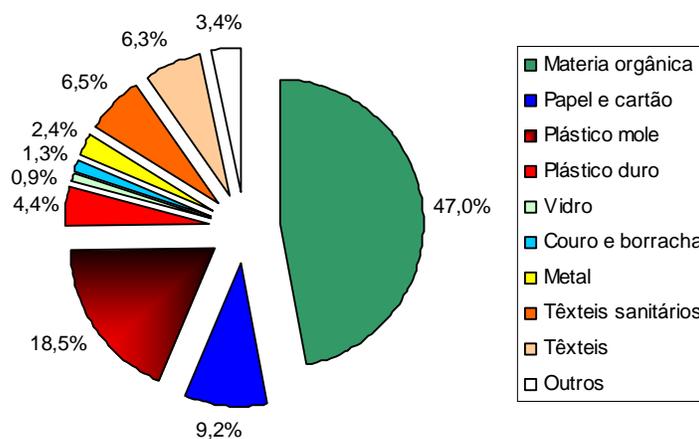


Figura III.6. Composição gravimétrica - RSU do Aterro de RSU da Muribeca

A estimativa do percentual em volume dos componentes dos RSU para a determinação da composição volumétrica foi realizada após o acondicionamento dos itens não compactados em baldes de volume conhecido. O gráfico de percentual em volume por categoria obtido está apresentado na Figura III.7.

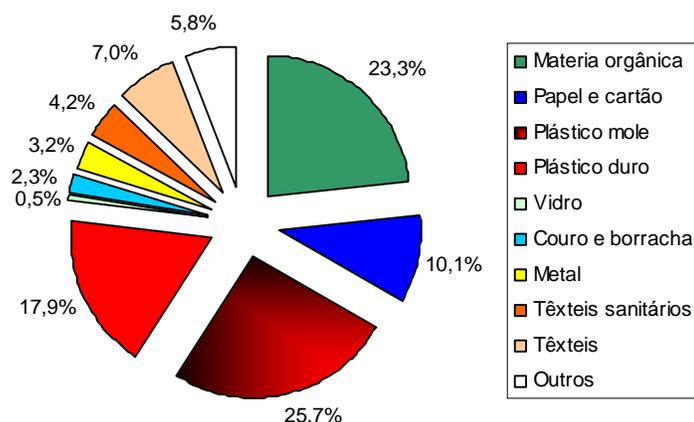
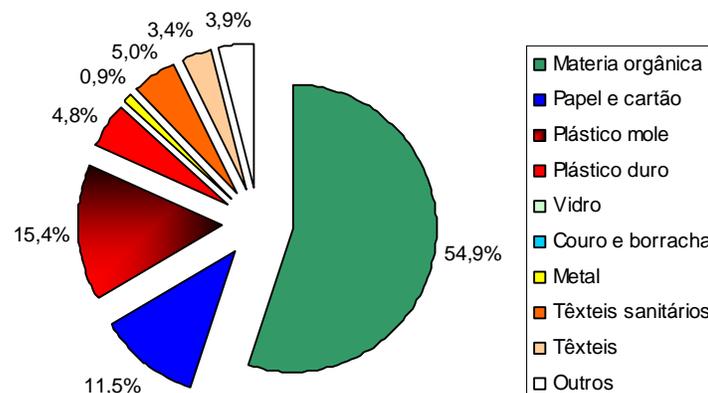


Figura III.7. Composição volumétrica - RSU do Aterro de RSU da Muribeca

Ao se comparar as composições, gravimétrica e volumétrica, observam-se diferenças significativas nos percentuais de matéria orgânica e plásticos. A proporção destes componentes praticamente se inverte na composição. Sendo, o plástico duro, o item que mais se destacou, certamente porque as embalagens pouco se alteram quando vazias e não compactadas. A composição volumétrica dos RSU tem fundamental importância para resistência ao cisalhamento do aterro, pois representa o quantitativo real de componentes de reforço que está presente na massa de resíduos.

Da mesma forma realizada no Aterro de RSU da Muribeca, a seleção e pesagem dos componentes dos RSU de acordo com dez categorias para a determinação da composição gravimétrica foi realizada com amostras frescas da CTR Igarassu. Neste caso, para caracterização dos resíduos utilizados nos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões. O gráfico de percentual em peso úmido por categoria obtido está apresentado na Figura III.8.



**Figura III.8. Composição gravimétrica - RSU da CRT Igarassu**

A Tabela III.3 apresenta o resultado das composições gravimétricas realizadas para uma amostra dos RSU do Aterro de RSU da Muribeca e para uma amostra da CTR Igarassu (desta pesquisa) e para a média de nove rotas de diferentes bairros da cidade do Recife, realizada durante a execução da célula experimental, localizada no Aterro de RSU da Muribeca (MARIANO *et al.*, 2007). Observa-se na composição gravimétrica dos RSU do Aterro da Muribeca, que o teor de matéria orgânica de 47% se apresenta próximo à média de 46,3% encontrada para os RSU da cidade do Recife. O teor de 55% encontrado para a matéria orgânica na composição gravimétrica dos RSU da CTR Igarassu se apresentou mais alto que a média do Recife, valor que pode ser atribuído à rota utilizada nesta pesquisa, oriunda de bairro com renda *per capita* muito baixa.

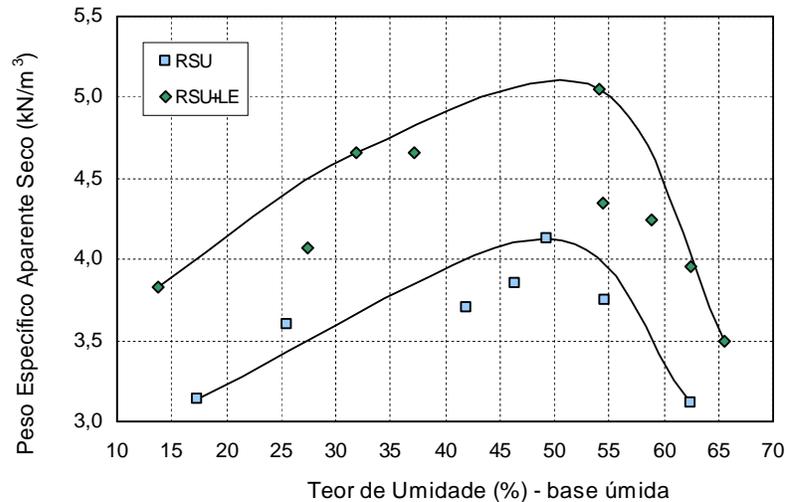
**Tabela III.3. Resultado da composição gravimétrica dos RSU para uma amostra do Aterro de RSU da Muribeca, para uma amostra da CTR Igarassu (desta pesquisa) e para a média de nove rotas de diferentes bairros da cidade do Recife (Mariano *et al.*, 2007)**

	COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA (%)		
	ATERRO DE RSU DA MURIBECA	CTR IGARASSU	MÉDIA DE NOVE ROTAS: MARIANO <i>ET AL.</i> (2007)
Matéria orgânica	47,0	54,9	46,3
Papel e cartão	9,3	11,5	12,2
Plástico	22,9	20,2	19,4
Vidro	0,9	0,0	1,0
Couro e borracha	1,3	0,2	0,8
Metal	2,4	0,9	1,9
Têxteis sanitários	6,5	5,0	3,6
Têxteis	6,3	3,4	3,5
Outros	3,4	3,9	11,3

Os teores de plástico totais de 23% e 20%, encontrados na composição dos RSU do Aterro da Muribeca e da CTR Igarassu, respectivamente, apresentam-se levemente superiores à média de 19% da cidade do Recife, apresentada por Mariano *et al.* (2007). Os valores percentuais de plástico nas duas composições se apresentam bem mais elevados quando comparados com dados em torno de 8%, citados por Melo & Jucá (2001). Esse percentual encontrado, inclusive em bairro com renda *per capita* muito baixa, reflete o crescimento do consumo das principais resinas termoplásticas (PEBD, PEAD, PP, OS, PVC e PET) relatado por Alcântara (2007). Segundo Maciel (2009), a tendência de incremento no percentual de plástico pode estar relacionada às mudanças de ordem sócio-cultural e econômica da população.

#### • COMPACTAÇÃO

Nos ensaios de compactação, foram determinados 10 pontos para cada curva, fazendo-se reuso da amostra de resíduos. Para determinação de uma curva de compactação mais coerente, foram utilizados os pontos com melhor concordância, desprezando-se os demais. O peso específico aparente seco dos RSU foi determinado para um teor de umidade em base úmida. O valor para o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d \text{ máx}}$ ) obtido da amostra de RSU foi 4,1 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima ( $w_{ot}$ ) 49%. Já o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d \text{ máx}}$ ) obtido da amostra de RSU-LE foi 5,1 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima ( $w_{ot}$ ) 52%. Na Figura III.9 são apresentadas as curvas de compactação obtidas nos dois ensaios realizados com resíduos da CTR Igarassu.



**Figura III.9. Curvas de compactação das amostras de RSU e RSU-LE da CTR Igarassu**

Observa-se que a amostra de RSU-LE apresentou peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d \text{ máx}}$ ) e umidade ótima ( $w_{ot}$ ) superiores à da amostra de RSU. Tal fato pode ser atribuído ao maior teor de partículas finas na amostra de RSU-LE, que aumenta o volume das partículas sólidas e reduz o volume de vazios na massa de resíduos, além de contribuir para maior absorção de água. Observa-se que os valores obtidos nos ensaios podem ser associados a aterros medianamente compactados, devido aos plásticos que provocam um comportamento elástico no material ensaiado.

Os valores do peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d \text{ máx}} = 4,1$  e  $5,1 \text{ kN/m}^3$ ) das duas amostras se apresentaram muito próximos aos valores ( $\gamma_{d \text{ máx}} = 4,5$  e  $4,7 \text{ kN/m}^3$ ) para os resíduos frescos da cidade do Recife, apresentados por Alcântara (2007). Já os valores apresentados por Fucale (2005), da ordem de  $8,6$  a  $12,6 \text{ kN/m}^3$  para o  $\gamma_{d \text{ máx}}$  da matriz composta de resíduos sólidos de aterros da Alemanha, se apresentaram bem mais elevados que os resultados obtidos, podendo-se atribuir a diferença ao tipo de resíduo e ao estado de degradação dos mesmos.

Para efeito de comparação entre a amostra pré-tratada e a amostra total de RSU, a Tabela III.4 apresenta um resumo dos resultados da umidade, em base úmida, e do peso específico da amostra total de RSU da Muribeca, na umidade natural, sem redução dos componentes e sem compactação. A umidade natural de 52%, obtida na caracterização inicial dos RSU, se apresentou muito próxima à umidade ótima de compactação, observada nos gráficos dos ensaios de compactação.

**Tabela III.4. Parâmetros peso específico e umidade da caracterização inicial.**

PARÂMETRO	AMOSTRA TOTAL DE RSU
Umidade natural em base úmida	52,4%
Peso específico aparente sem compactação	3,6 kN/m <sup>3</sup>

Teores de umidade na faixa de 40 a 60% podem ser considerados dentro da faixa de valores normais para as condições brasileiras (BIDONE & POVINELLI, 1999).

### 3.2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO LODO DE ESGOTO (LE)

#### 3.2.2.1 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

- *CARACTERIZAÇÃO FÍSICA*

Os ensaios do lodo residual do tratamento de esgoto foram realizados com amostra de lodo desidratado, obtida nos leitos de secagem da ETE Cabanga. Os ensaios de caracterização física foram realizados conforme metodologia da Associação Brasileira de Normas Técnicas: Granulometria - NBR 7181 (ABNT, 1984a); Limites de Liquidez - NBR 6459 (ABNT, 1984b) e Plasticidade - NBR 7180 (ABNT, 1984c); Peso Específico dos Grãos - NBR 6508 (ABNT, 1984d); Ensaio de Compactação - NBR 7182 (ABNT, 1986b).

- *CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA*

A análise química quantitativa dos principais elementos do lodo residual do tratamento de esgoto foi realizada por espectrometria de fluorescência por energia dispersiva de Raios-X (EDX), utilizando-se uma amostra passada na peneira ABNT n°. 200 (0,075 mm). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, através de análise química por fluorescência de Raios-X em espectrômetro modelo EDX 720 da Shimadzu. A geração de Raios-X é feita por meio de um tubo com alvo de Rh, que converte os Raios-X em pulsos elétricos proporcionais à energia destes raios. Assim, a fração mássica de cada elemento pode ser calculada comparando a intensidade dos Raios-X de cada elemento a um padrão conhecido (com correções adequadas para efeito de outros elementos presentes), de acordo com E 1508 (ASTM, 2003).

Para identificação das fases cristalinas do lodo residual do tratamento de esgoto, as amostras foram submetidas à análise através de difração de Raios-X (DRX). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, através de difratômetro modelo XDR-6000 da Shimadzu, utilizando radiação de  $\text{CuK}\alpha$ , tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, varredura de  $2^\circ < 2\theta < 30^\circ$  e  $\lambda = 1,54\text{\AA}$ .

Para determinação dos constituintes químicos contidos nos extratos lixiviado e solubilizado dos resíduos do lodo residual do tratamento de esgoto, foi realizada a espectrometria por absorção atômica. Os ensaios foram realizados no Fundo de Fomento à Mineração (FUNMINERAL) – GO, através do espectrômetro de absorção atômica modelo AAnalyst 200 da Perkin Elmer. Para a avaliação da imobilização dos contaminantes, os extratos foram preparados no laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos - LABGER da Unidade de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande. As amostras foram preparadas por meio de extrato lixiviado, conforme NBR 10.005 (ABNT, 2004), e solubilizado, conforme NBR 10.006 (ABNT, 2004).

No ensaio de lixiviação, uma amostra representativa de 100 g (base seca) foi colocada em frasco de 2.000 mL com água deionizada e isenta de matéria orgânica mais solução lixivante (ácido acético glacial, hidróxido de sódio e água em concentrações estabelecidas pela norma). Em seguida, a solução foi submetida à agitação em equipamento rotativo com 30 rotações por minuto, relação L/S igual a 20:1 e tempo de contato com o meio lixivante igual a  $18 \pm 2$  horas.

O ensaio de solubilização se caracteriza por usar amostra triturada, uma relação L/S igual a 4:1 e repouso de sete dias em temperatura ambiente. No ensaio de solubilização, uma amostra representativa de 250 g (base seca) do material foi colocada em frasco de 1.500 mL. Em seguida, foram adicionados 1.000 mL de água deionizada e isenta de orgânicos. Os metais foram quantificados após repouso por sete dias, em temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .

A Classificação dos resíduos sólidos de lodo foi realizada segundo os procedimentos da NBR 10.004 (ABNT, 2004), que estabelece critérios para a classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, classificando os resíduos perigosos segundo suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade e sua toxicidade.

### 3.2.2.2 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### • CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A análise granulométrica da amostra de lodo residual do tratamento de esgoto proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Cabanga mostra a predominância da fração fina, conforme apresentado na Figura III.10, com mais de 50% passando na peneira nº 200 (0,075 mm), sendo a fração “silte” predominante. O valor do peso específico dos grãos do lodo ( $\gamma_s$ ) encontrado foi 18,8 kN/m<sup>3</sup>. Nos ensaios de consistência, o lodo apresentou Limite de Liquidez de 92% e Plasticidade de 78%, sendo caracterizado como um material medianamente plástico ( $7 < IP < 15$ ), segundo a classificação de Jenkins para solos (CAPUTO, 1988). Considerando o SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos), o material pode se enquadrar no grupo dos siltes de alta compressibilidade – MH. A Tabela III.5 apresenta um resumo da caracterização física do lodo.

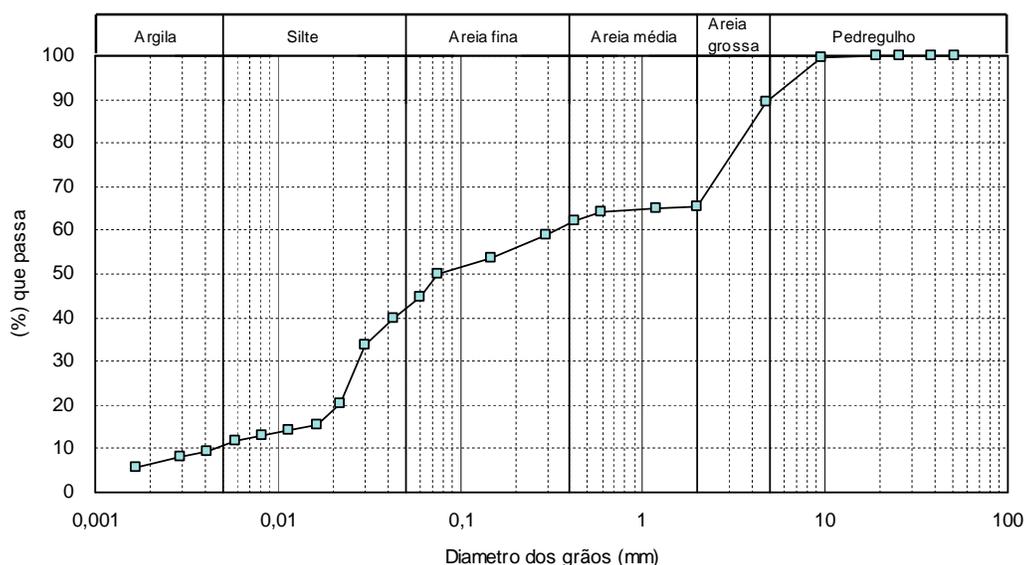
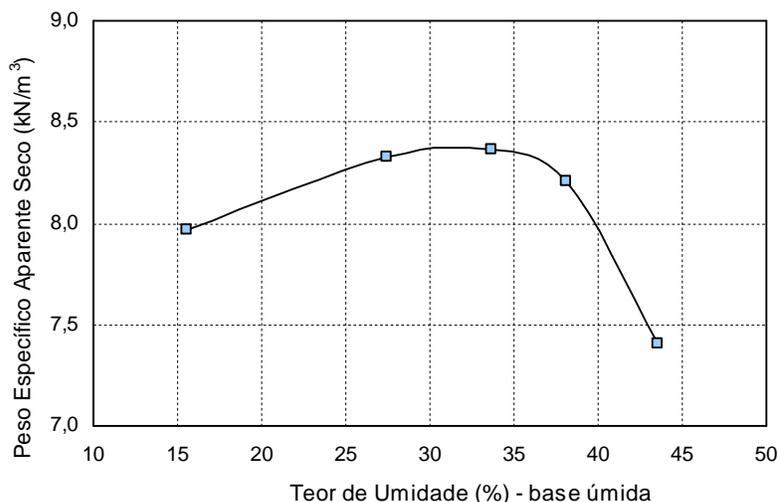


Figura III.10. Curva granulométrica do LE desidratado da ETE Cabanga

Tabela III.5. Resumo dos resultados da caracterização física do lodo

$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%) ABNT						LIMITES DE ATTERBERG (%)			SUCS
	PEDREGULHO	AREIA GROSSA	AREIA MÉDIA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA	LL	LP	IP	
18,8	10	25	4	21	30	10	92	78	14	MH

Os ensaios de compactação foram realizados com reuso da amostra. O peso específico aparente seco do LE foi determinado para o teor de umidade em base úmida. O valor para o peso específico aparente seco máximo obtido foi  $8,4 \text{ kN/m}^3$  e umidade ótima 34%, apresentados na curva de compactação da Figura III.11.

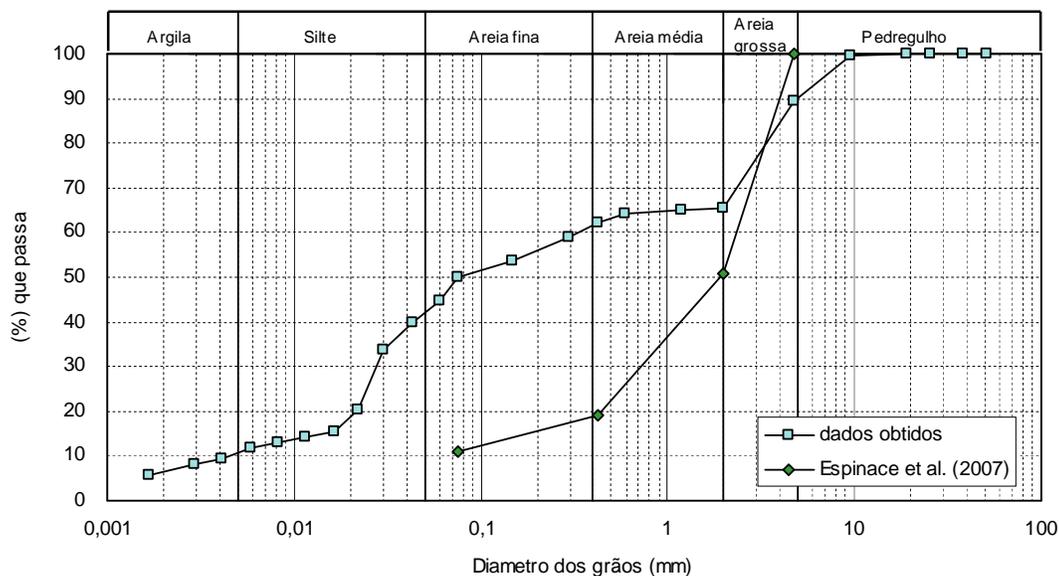


**Figura III.11. Curva de compactação do LE desidratado da ETE Cabanga**

Em ensaios para caracterização do lodo residual de tratamento de esgoto, Espinace *et al.* (2007) obtiveram valores diferenciados em relação aos obtidos no presente trabalho, conforme síntese dos resultados apresentados na Tabela III.7 e no gráfico da curva granulométrica, apresentado na Figura III.12 para efeito comparativo. No entanto, segundo os autores, é importante citar que os lodos obtidos por processos de tratamentos de esgoto podem ter diferentes características e propriedades, segundo a qualidade das águas residuárias, as tecnologias do tratamento e tratamento do lodo residual, que se aplique em cada caso. Além disto, existem algumas diferenças na metodologia dos ensaios, como a secagem da amostra em forno para obtenção da granulometria e não há relato sobre destorroamento. Em relação aos limites de consistência, os autores utilizaram a amostra em seu estado natural, considerando alguns relatos bibliográficos que indicavam LL correspondente a uma umidade levemente superior à que possuía em seu estado natural.

**Tabela III.6. Resumo da caracterização física do lodo - Espinace *et al.* (2007)**

GRANULOMETRIA - PENEIRAS				LIMITES DE ATTERBERG (%)			ENSAIO PROCTOR	
# 4	# 10	# 40	# 200	LL	LP	IP	$\gamma_{d \text{ máx}}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$w_{ot}$ (%)
100	51	19	11	430	89	341	10	49



**Figura III.12. Curva granulométrica do LE desidratado da ETE Cabanga e do LE analisado por Espínace *et al.* (2007)**

Observa-se que os valores do peso específico aparente seco máximo e umidade ótima obtidos no ensaio de compactação se apresentaram mais altos que os deste trabalho. No entanto não há relato sobre o método utilizado para determinação da umidade, provavelmente em base seca. Desta forma, este dado não deve ser utilizado para efeito comparativo. Já a curva granulométrica obtida para o LE do presente trabalho apresentou um material com maior teor de finos que o LE analisado por Espínace *et al.* (2007).

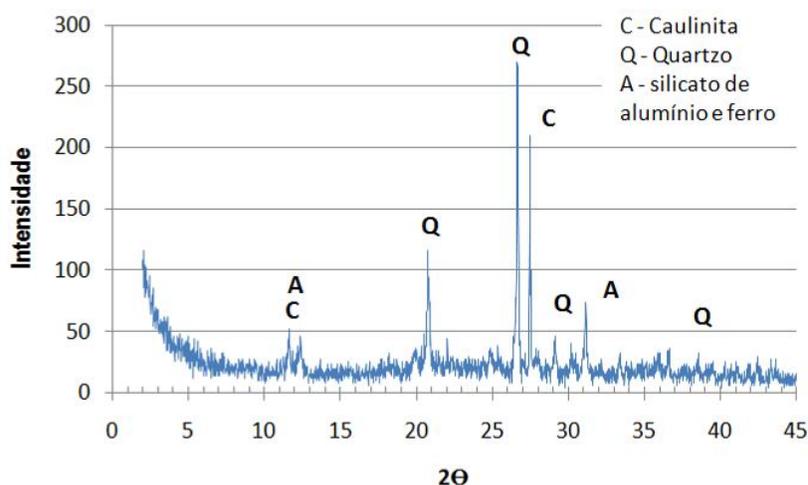
#### • CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A caracterização química quantitativa do LE em ensaios EDX determinou a presença predominante de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), ou sílica, de acordo com os resultados apresentados na Tabela III.7. Em seu estado natural, a sílica pode ser encontrada em diversas formas cristalinas, entre elas o quartzo, mineral inerte, principal componente da areia. Outros elementos relevantes que acompanham a sílica em menores proporções foram os óxidos de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), enxofre ( $\text{SO}_3$ ), cálcio ( $\text{CaO}$ ) e fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), que podem favorecer problemas em sua disposição devido ao seu potencial poluidor.

**Tabela III.7. Resumo da caracterização química quantitativa do lodo**

COMPOSTO	TEOR (%)
SiO <sub>2</sub>	34,109
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,824
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,306
SO <sub>3</sub>	12,183
CaO	11,525
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,816
Outros óxidos	6,238

Os resultados da identificação das fases cristalinas do LE obtidos nos ensaios DRX estão apresentados no gráfico da difração de Raios-X (Figura III.13). Observa-se que foram definidos poucos picos, devido à grande quantidade de matéria orgânica. Identificou-se principalmente a presença do quartzo em  $2\theta \sim 21, 27, 29$  e  $38^\circ$ , que confirmam os resultados observados nos ensaios EDX. A presença de caulinita foi identificada em  $2\theta \sim 12$  e  $28^\circ$ . As demais reflexões indicam a presença de silicato de alumínio e ferro.

**Figura III.13. Difração de Raios-X do LE da ETE Cabanga**

Na Tabela III.8 e na Tabela III.9 estão apresentados os valores dos constituintes químicos encontrados nos extratos lixiviados e solubilizados com o auxílio do ensaio de Espectrometria por Absorção Atômica. Observa-se que todos os constituintes químicos identificados na amostra de extrato lixiviado do lodo, apresentam concentrações inferiores aos limites máximos estabelecidos no Anexo F, NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Para os constituintes obtidos com o extrato solubilizado, observam-se concentrações superiores aos limites do Anexo G, estabelecido pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), com

exceção dos teores de Arsênio e Cobre e Zinco. Segundo os resultados obtidos para as concentrações dos constituintes químicos do resíduo do LE, pode-se classificá-lo como:

- Resíduo não tóxico - devido às concentrações para o extrato lixiviado do LE se apresentarem abaixo do limite máximo do Anexo F;
- Resíduo Classe II A - Não Inerte – devido às concentrações de constituintes do extrato solubilizado do LE se apresentarem acima do limite máximo do Anexo G.

**Tabela III.8. Constituintes químicos encontrados no extrato lixiviado do LE**

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	Pb	Cd	Cr	As
	mg/L			
RESÍDUO DO LE	0,33	0,05	0,10	0,010
LIMITE NORMA	1,0	0,5	5,0	1,0

**Tabela III.9. Constituintes químicos encontrados nos extratos solubilizados do LE**

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	As	Cd	Cr	Pb	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg/L							
RESÍDUO DO LE	0,01	<0,05	0,10	0,39	0,10	8,52	0,77	0,48
LIMITE NORMA	0,01	0,005	0,05	0,01	2,0	0,3	0,1	5,0

Os constituintes químicos obtidos para o extrato solubilizado se apresentaram inferiores aos valores para o lodo de esgoto, reportados na literatura (TUREK *et al.*, 2005; CAPANA, 2009; FRANÇA, 2003). No entanto, a amostra de lodo utilizada por estes autores foi coletada após tratamento secundário, enquanto na atual pesquisa, utilizou-se um lodo proveniente do leito de secagem, que pode ter sido lixiviado para o subsolo.

### 3.2.3 PERMEABILIDADE À ÁGUA DO LE

#### 3.2.3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os ensaios para determinação da permeabilidade à água do LE foram realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE. Foi utilizada uma amostra de LE desidratado obtida nos leitos de secagem da ETE Cabanga, apresentada na Figura III.14. O corpo de prova utilizado no ensaio foi moldado através da compactação da amostra de LE no cilindro padrão do Proctor Normal (100 mm de altura e 127,3 mm de diâmetro), com 58% de umidade (ramo úmido).



**Figura III.14. Amostra de lodo desidratado utilizado nos ensaios**

### 3.2.3.2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

A permeabilidade à água da amostra compactada de lodo de esgoto foi determinada por meio do ensaio de permeabilidade saturada com carga constante, utilizando um permeâmetro de paredes flexíveis. A célula deste equipamento permite a aplicação de diferentes pressões (confinante, base e topo).

A Figura III.15 apresenta o procedimento para a montagem da célula do ensaio. Coloca-se na parte superior e inferior do corpo de prova um conjunto de pedra porosa e papel filtro, em seguida, instala-se um *top-cap* (peça de acrílico com orifícios para permitir a saída da água que percola de baixo para cima durante o ensaio). O corpo de prova é envolvido com uma membrana flexível de látex de proteção, presa com anéis de borracha para melhor fixação, evitando o contato com a água externa e, finalmente, é inserido numa célula de acrílico.



**Figura III.15. Procedimento para montagem da célula do ensaio: (1) disposição dos conjuntos pedras porosas e papel filtro e *top-cap*; (2) instalação da membrana de proteção; (3) célula de acrílico fechada**

Após a montagem, conecta-se a célula ao painel de controle e inicia-se o processo de saturação da amostra aumentando-se a pressão interna e externa à membrana. A pressão externa deve ser sempre ligeiramente maior que a interna, não ultrapassando a diferença de pressão de 10 kPa, para não provocar adensamento da amostra. Essa medida assegura que toda a água vai passar pela seção da amostra, e não pelas laterais.

Deve-se tomar cuidado para garantir que todo o ar contido nas pedras porosas, célula de acrílico e nas tubulações sejam removidos e substituídos por água. Verifica-se a saturação da amostra pelo parâmetro B (SKEMPTON, 1954) através de um transdutor adaptado à célula, com leitura externa de poro-pressão. Só quando este parâmetro é igual ou ligeiramente inferior a 1 a amostra é considerada saturada.

Com a amostra saturada, pode-se dar início ao ensaio. Provoca-se um fluxo de água através do corpo de prova a partir do gradiente hidráulico gerado pela diferença das pressões de topo e base. As leituras podem ser feitas fixando os tempos e medindo o volume percolado ou o inverso. Para o ensaio com o LE, mediu-se o tempo necessário para o volume de 5000 mm<sup>3</sup> de água atravessar o corpo de prova, repetindo este processo até se obter leitura de três tempos iguais para o mesmo volume percolado. O coeficiente de permeabilidade é obtido através da Equação III.2:

$$k = \frac{V.L}{A_{CP}.t.\Delta p} \quad (III.2)$$

Onde: k é o coeficiente de permeabilidade (cm/s); V é o volume percolado (cm<sup>3</sup>); L é o comprimento percolado, igual à altura do corpo de prova (cm); A<sub>CP</sub> é a área da base do corpo de prova (cm<sup>2</sup>); t é o tempo (s); Δp é o gradiente de pressão, igual à diferença de carga entre o topo e a base (cm).

### 3.2.3.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela III.10 apresenta os dados utilizados para determinação da permeabilidade saturada no ensaio. A permeabilidade da amostra compactada de lodo de esgoto, k = 1,497 x 10<sup>-7</sup> m/s, determinada por meio do ensaio de permeabilidade com carga constante, apresentou-se similar à permeabilidade típica de solos sedimentares, para areias argilosas.

**Tabela III.10. Dados dos ensaios de permeabilidade do equipamento Tri-Flex 2**

VOLUME PERCOLADO (m <sup>3</sup> )	ALTURA DO CP (m)	ÁREA DA BASE DO CP (m <sup>2</sup> )	TENSÃO CONFINANTE (kPa)	TENSÃO NA BASE (kPa)	TENSÃO NO TOPO (kPa)	Δp (kPa)	t (min)
5 x 10 <sup>-6</sup>	0,127	8,1 x 10 <sup>-3</sup>	210	200	100	100	9

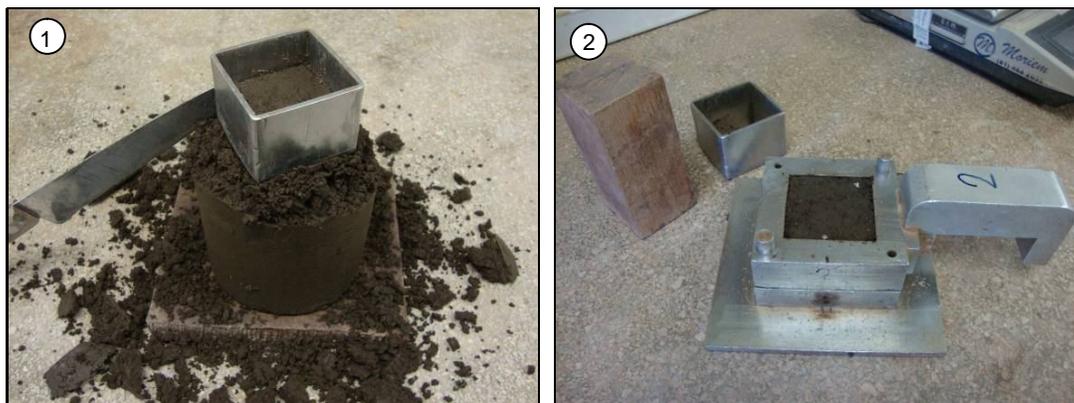
O valor encontrado representa uma permeabilidade pelo menos 10 vezes menor que a dos RSU, conforme valores típicos para a permeabilidade da ordem de 10<sup>-4</sup> a 10<sup>-6</sup> m/s verificados em aterros sanitários, conforme reportado na literatura.

Desta forma, a codisposição do LE em aterros sanitários, quando realizada em forma de camadas espessas, pode funcionar como “barreira”, contribuindo para o acúmulo de gases e lixiviados na massa de resíduos, gerando um acréscimo de poro-pressões que podem resultar em considerável perda de resistência.

### 3.2.4 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL DO LE

#### 3.2.4.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os ensaios de cisalhamento direto convencionais do LE foram realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE. A Figura III.16 apresenta a moldagem do corpo de prova (1) e caixa de cisalhamento com corpo de prova moldado, retirado do moldador com auxílio de um bloco de madeira (2).



**Figura III.16. Procedimento para moldagem dos corpos de prova de LE: (1) cravação do moldador na amostra compactada e (2) corpo de prova preparado para ensaio**

Foram realizados ensaios em séries de 4 (quatro) corpos de prova de seção quadrada, com 50,8 mm de lado e 43,5 mm de altura moldados com amostras compactadas no cilindro do ensaio normal de compactação com 65% de umidade (ramo úmido).

#### 3.2.4.2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Os ensaios foram executados em uma prensa de cisalhamento direto produzida pela Ronald Top S/A, com sistema de carga confinante através de pesos em pendural. Nas leituras dos deslocamentos verticais e horizontais foram utilizados extensômetros com sensibilidade de 0,01 mm. A força horizontal foi determinada através de um anel dinamométrico com capacidade de 500 kgf.

Os ensaios foram realizados nas condições de umidade natural (CN) e inundados (CI) (Figura III.17). Nos ensaios inundados, os corpos de prova eram inundados previamente através do preenchimento com água da “piscina” que circunda a caixa de cisalhamento no ensaio. Nos ensaios na umidade natural, não era realizada esta etapa. Quanto aos procedimentos gerais, seguiram-se basicamente as recomendações de HEAD (1980).



Figura III.17. Ensaios de cisalhamento direto do LE: (1) umidade natural; (2) inundado

Após a etapa de inundação, as tensões normais (50, 100, 150 e 200 kPa) foram aplicadas e mantidas até a estabiliza o dos deslocamentos. O cisalhamento dos corpos de prova para cada tensão normal aplicada foi realizado com velocidade constante de 0,483 mm/min. Adotou-se como critério de ruptura os valores de pico da tensão cisalhante ou os valores máximos, quando a curva tensão-deslocamento horizontal não

indicava valores de pico bem definidos. Os deslocamentos máximos adotados nos ensaios eram de 10 mm, referente a aproximadamente 20% da amostra.

### 3.2.4.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Apresentam-se os resultados dos ensaios de cisalhamento direto convencionais, realizados com amostras compactadas de lodo residual do tratamento de esgoto, nas condições de umidade natural (CN) e inundada (CI). Nas Tabelas III.11 e III.12 são mostradas as condições dos corpos de prova e os parâmetros de resistência obtidos dos ensaios CN e CI, respectivamente.

**Tabela III.11. Condições iniciais e finais dos corpos de prova e parâmetros de resistência obtidos nos ensaios CN para a amostra de lodo compactado - LE**

CP	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_0$	$w_0$ (%)	$S_0$ (%)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
1	7,52	1,5	65,36	81,92	37	38,5
2	7,75	1,424	65,12	85,97		
3	7,55	1,492	65,92	83,06		
4	7,71	1,439	66,01	86,24		

**Tabela III.12. Condições iniciais e finais dos corpos de prova e parâmetros de resistência obtidos nos ensaios CI para a amostra de lodo compactado -LE**

CP	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_0$	$w_0$ (%)	$S_0$ (%)	$w_f$ (%)	$S_f$ (%)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
1	7,72	1,436	63,57	83,22	72,91	95,44	33	37
2	7,73	1,433	63,85	83,79	68,87	90,37		
3	7,88	1,385	64,11	87,00	68,35	92,75		
4	7,93	1,372	64,20	87,98	66,32	90,89		

As curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo horizontal; e variação de altura versus deslocamento relativo horizontal para os ensaios CN e CI são apresentadas nas Figuras III.18 e III.19. A Figura III.20 apresenta as envoltórias de resistência para o lodo desidratado nas duas condições analisadas. Observa-se nas envoltórias, que no ensaio inundado, os valores de coesão e ângulo de atrito sofreram uma leve redução, não considerada significativa na resistência ao cisalhamento.

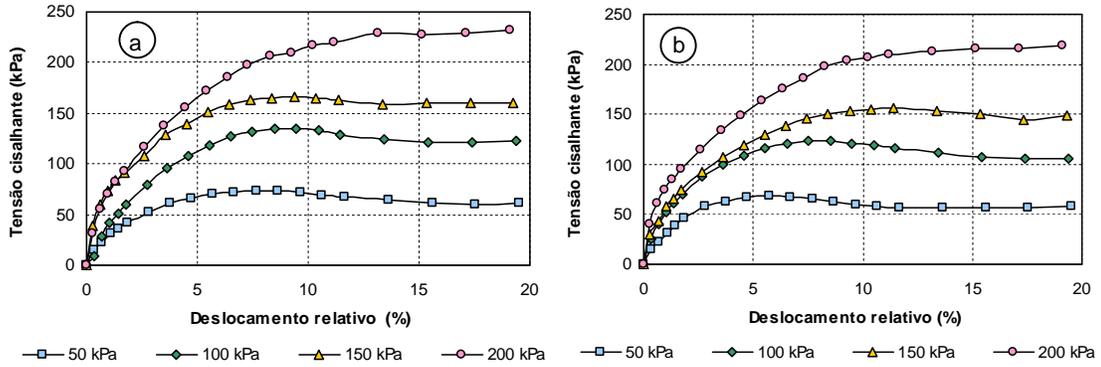


Figura III.18. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo do LE: (a) CN, (b) CI

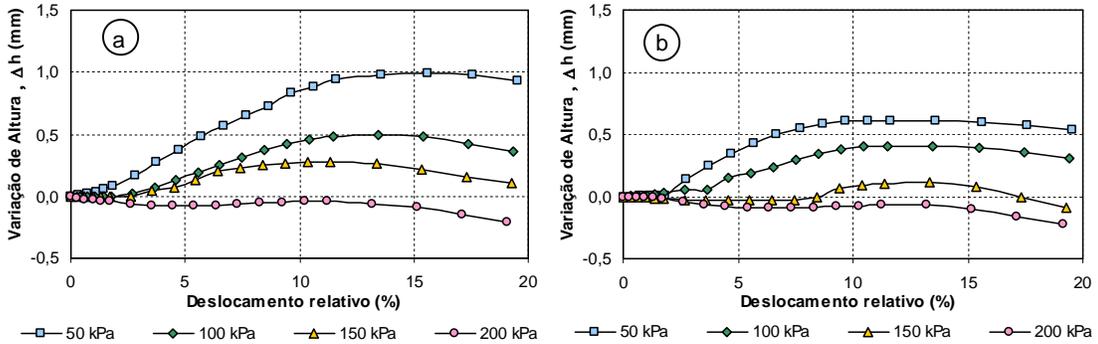


Figura III.19. Variação de altura versus deslocamento relativo do LE: (a) CN; (b) CI

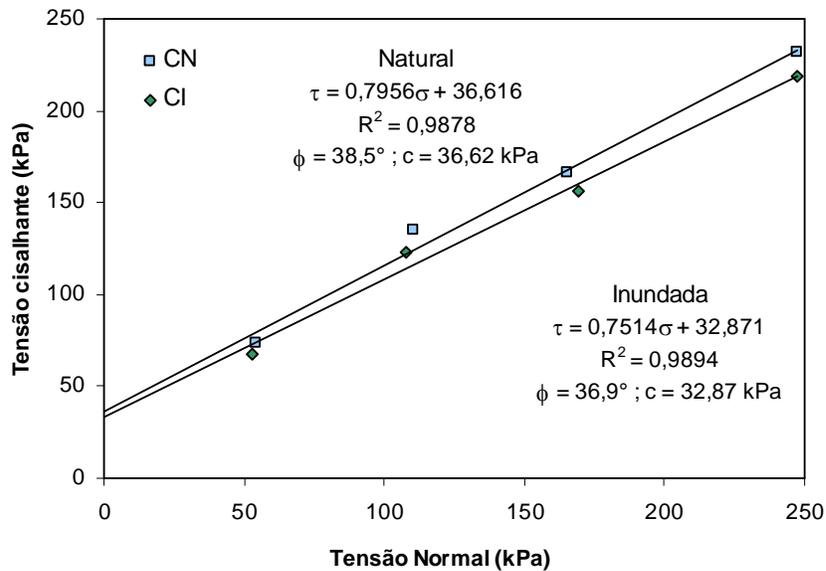


Figura III.20. Envoltórias de resistência para as condições natural e inundada - LE

Com relação ao comportamento tensão-deslocamento relativo observado nos ensaios dois ensaios, nota-se que para os níveis de tensão normal até 150 kPa, aparecem nas curvas resistências de pico acompanhadas de dilatância (aumento de volume da amostra). Esse comportamento, onde os corpos de prova apresentam inicialmente uma redução de volume, mas antes de atingir a resistência máxima, o volume do corpo de prova volta a crescer, apresentando no momento da ruptura um volume maior que no início do carregamento é similar aos comportamentos típicos de areias densas.

Os valores obtidos para a coesão, entre 33 e 37 kPa, se apresentaram bem maiores que os resultados encontrados na literatura. Os valores obtidos para o ângulo de atrito, entre 37 e 38,5°, se apresentaram dentro da faixa de valores da literatura consultada. Bekker & Berg (1993) *apud* Espinace *et al.* (2007) obtiveram uma coesão de 10 kPa em ensaios triaxiais com lodos desidratados com 38% de matéria seca. Moo-Young *et al.* (1996) *apud* Espinace *et al.* (2007) realizaram ensaios de cisalhamento direto com amostras de lodo tratado quimicamente e encontraram a coesão na faixa de 0 a 14,5 kPa e ângulo de atrito entre 26 e 44°.

## CAPÍTULO IV

### PROJETO, MONTAGEM E MONITORAMENTO DE REATORES

Os reatores experimentais foram construídos e monitorados no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE. Foram realizadas análises periódicas da geração e composição do biogás nos reatores nos quais foram reproduzidas duas condições de disposição de resíduos em aterros de RSU, com e sem codisposição de lodo de tratamento de esgoto.

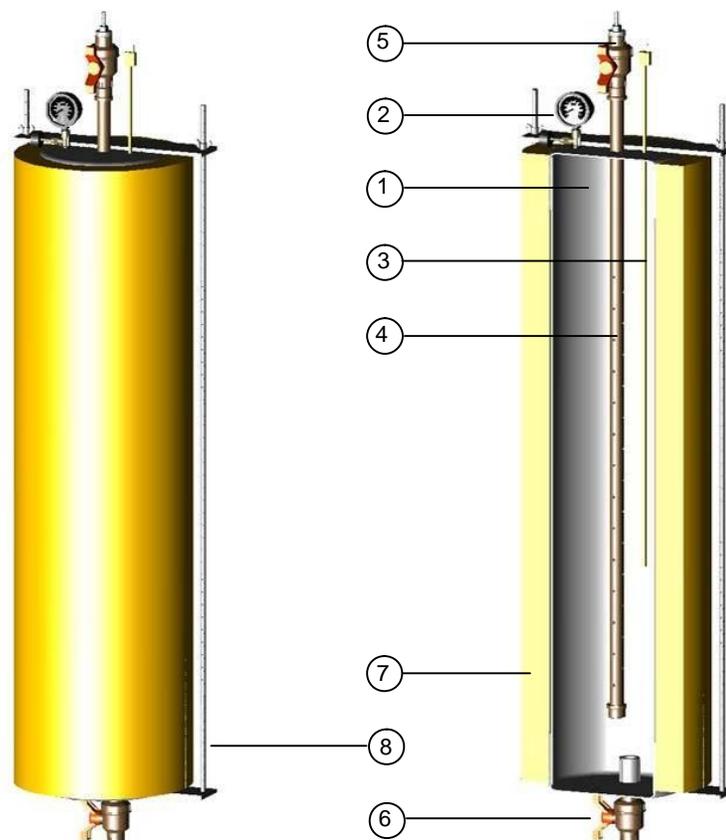
Para realização dos ensaios, os reatores foram montados em duplicata apresentando o mesmo peso total para as composições:

1. Fração orgânica segregada de resíduos sólidos urbanos com adição de 15% em peso de lodo residual do tratamento do esgoto;
2. Fração orgânica segregada de resíduos sólidos urbanos.

#### 4.1 CONCEPÇÃO DOS REATORES

Quatro reatores de laboratório com sistema para drenagem de biogás e lixiviados foram montados. A Figura IV.1 apresenta o esquema com detalhe em corte dos reatores, compostos por tubo leve de PVC (1) com 0,2 m de diâmetro, 1,0 m de altura e volume útil de aproximadamente 0,03 m<sup>3</sup>, com adaptação de elementos auxiliares para o acompanhamento do processo de biodegradação dos RSU.

Nos reatores foram instalados: um manômetro (2) para o monitoramento da pressão gerada pelo biogás e um termopar central (3) para o monitoramento da temperatura da massa de resíduos. No centro do reator foi instalado um sistema de drenagem constituído por um tubo de PVC de ½" de diâmetro perfurado (4), para a drenagem de líquidos e gases. Na saída superior do tubo de drenagem se instalou um registro com adaptador para mangueira (5), utilizada para conectar o detector multigás para monitorar a composição do biogás produzido. Os reatores têm um lastro de pedra britada e um registro inferior (6) para coleta do lixiviado. Após a montagem, os reatores foram envolvidos em isotubos isolantes em lã de rocha (7) para seu isolamento térmico e se instalou um sistema de amarração composto por barras e hastes rosqueadas (8), como medida de precaução para a tampa do reator não ser ejetada devido à pressão interna.



**Figura IV.1. Esquema do projeto dos reatores: (1) tubo de PVC; (2) manômetro; (3) termopar central; (4) dreno de líquidos e gases; (5) registro com adaptador para mangueira; (6) registro inferior; (7) isotubos isolantes em lâ de rocha; (8) sistema de amarração**

O manômetro utilizado para o monitoramento das pressões do biogás, marca ABC Instrumentação, tem capacidade de 0 a 100 kPa, e sensibilidade de 1 kPa. O termopar tipo k, com capacidade de medir temperatura na faixa de -40 a 200°C, foi instalado para monitorar a temperatura com o auxílio de um termômetro digital portátil Minipa APPA, modelo MT-520, com dois terminais de entrada e resolução de 0,1°C. O detector multigás utilizado para monitorar a composição do biogás, modelo Dräger X-am 7000, apresenta faixa de leitura para cada sensor de acordo com a Tabela IV.1.

**Tabela IV.1. Faixa de leitura e erro do detector multigás Dräger X-am 7000**

GÁS	FAIXA DE MEDIÇÃO	ERRO
CO <sub>2</sub>	0 a 100%	2%
CH <sub>4</sub>	0 a 100%	5%
H <sub>2</sub> S	0 a 500 ppm	5%
O <sub>2</sub>	0 a 25%	1%
CO	0 a 500 ppm	1%

Para o isolamento térmico, os reatores foram envolvidos em isotubos isolantes em lã de rocha basáltica TERMAX<sup>®</sup> de alta densidade, aglomerados com resinas especiais. Os tubos são bipartidos em duas metades iguais, têm espessura de 40 mm, diâmetro nominal de 8" e comprimento de 1000 mm. Este produto está de acordo com a NBR 11363 (ABNT, 1995) e Petrobrás N-1618c (CONTEC, 1996) que fixam condições exigíveis para tubos termoisolantes à base de lã de rocha.

#### 4.2 PREPARAÇÃO E MONITORAMENTO DOS REATORES

Após realização da caracterização dos RSU no Aterro de RSU da Muribeca, a fração orgânica dos resíduos foi processada, através de um triturador de resíduos orgânicos, modelo TR 200 da marca TRAPP, conforme apresentado na Figura IV.2. Os resíduos processados foram acondicionados em dois tambores de 100 litros e levados para o Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE.



Figura IV.2. Processamento da fração orgânica dos RSU

Para a preparação dos reatores, foi calculado o volume necessário para se obter o preenchimento de 65% do volume útil, com peso específico úmido de  $9,0 \text{ kN/m}^3$ , deixando 35% de *Headspace* (espaço do reator ocupado pelo biogás gerado na biodegradação). Para o preenchimento dos reatores sem adição de lodo, foram utilizados 18 kg da fração orgânica segregada e triturada dos RSU. Para os reatores com adição de lodo, foram necessários 15,3 kg da fração orgânica segregada e triturada dos RSU e 2,7 kg de lodo residual do tratamento do esgoto, que corresponde a 15% da amostra úmida.

Para montagem e preenchimento dos reatores, foram adotados alguns procedimentos para manter a uniformidade entre eles. Os resíduos eram dispostos em camadas de 0,20 m, em seguida eram compactados manualmente com o auxílio de um soquete de madeira até atingir o peso específico desejado. O sistema de drenagem, constituído por um tubo de PVC perfurado, foi instalado no centro do reator antes do seu preenchimento. O termopar foi afixado na lateral do tubo de drenagem para não sofrer deslocamento durante o preenchimento. Após a montagem, cada reator foi envolvido por um isotubo isolante térmico com proteção metálica em alumínio corrugado e recebeu um sistema de amarração da tampa. A Figura IV.3 apresenta os reatores após a montagem, com destaque para os elementos instalados no cap superior que receberam vedação extra com massa epóxi.



**Figura IV.3. Reatores experimentais**

O monitoramento da geração do biogás foi constituído para determinação da produção diária do biogás ao longo do processo de biodegradação. A geração do biogás nos reatores foi monitorada durante sete meses, sendo a periodicidade diária no primeiro mês, semanal no segundo mês, quinzenal no terceiro e quarto mês e mensal nos meses seguintes. Durante o monitoramento foram verificadas a pressão interna dos reatores, a temperatura dos resíduos e a composição do biogás. A vazão foi determinada através do cálculo do volume diário do biogás gerado nos reatores, considerando-se as leituras da pressão e da temperatura. Desta forma, utilizou-se a Equação IV.1:

$$V_G = n \cdot V_m \quad (IV.1)$$

Onde:  $V_G$  é o volume gerado no reator (L);  $n$  é o número de mols (mol);  $V_m$  é o volume molar ( $L \cdot mol^{-1}$ ).

Considerando que o biogás gerado no interior do reator se comporta como gás ideal, se emprega a Equação de Estado dos Gases Perfeitos (Equação IV.2), que é válida para todos os gases (de comportamento ideal), podendo ser aplicada a transformações em que a massa de gás varia, ou seja, quando ocorre entrada ou saída de gás de um cilindro:

$$P \cdot V_U = n \cdot R \cdot T \quad (IV.2)$$

Onde:  $P$  é a pressão do gás (atm);  $V_U$  é o volume útil do reator (L);  $n$  é o número de mols (mol);  $R$  é a constante universal dos gases perfeitos ( $atm \cdot L \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ );  $T$  é a temperatura (K).

Desta forma, substituindo  $n$  por  $P V_U R^{-1} T^{-1}$  na Equação IV.1, pode-se escrever:

$$V_G = \frac{P \cdot V_U}{R \cdot T} V_m \quad (IV.3)$$

Onde:  $R = 0,082 \text{ atm} \cdot L \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $V_m = 22,413 \text{ L} \cdot mol^{-1}$  (nas CNTP\*).

Para o cálculo da vazão em determinado período, tem-se:

$$Q_t = \frac{V_G}{t} \quad (IV.4)$$

Onde:  $Q_t$  é a vazão no tempo  $t$  (L/dia);  $V_G$  é o volume gerado no reator (L),  $t$  é o tempo (dias).

---

\* CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão, que representa o estado normal de um gás, caracterizado pela temperatura de 273,15 K e pressão de 101325 Pa (1 atm).

Finalmente, para a estimativa da taxa de geração de biogás, utiliza-se a Equação IV.5:

$$TX_{GB} = \frac{Q_t}{P_{seco}} \quad (IV.5)$$

Onde:  $TX_{GB}$  é a taxa de geração de biogás (L/kg-dia);  $Q_t$  é a vazão no tempo  $t$  (L/dia);  $p_{seco}$  é o peso seco dos resíduos depositados no reator (kg).

#### 4.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os reatores experimentais, realizados em duplicata, foram monitorados durante sete meses para estimativa da produção diária do biogás ao longo do processo de biodegradação dos RSU, sem e com codisposição de lodo residual do tratamento de esgoto. Os resultados das análises periódicas da geração e composição do biogás são apresentados nos gráficos das Figuras IV.4 a IV.7.

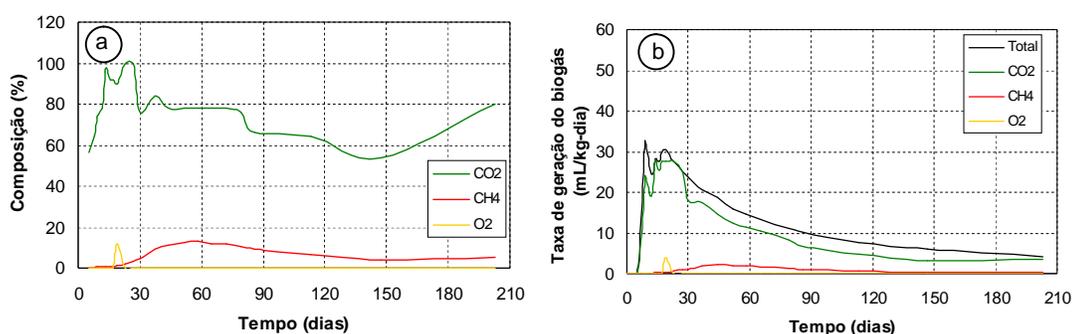


Figura IV.4. Variação da composição percentual e taxa da geração de biogás com o tempo para o reator 1 – fração orgânica dos RSU

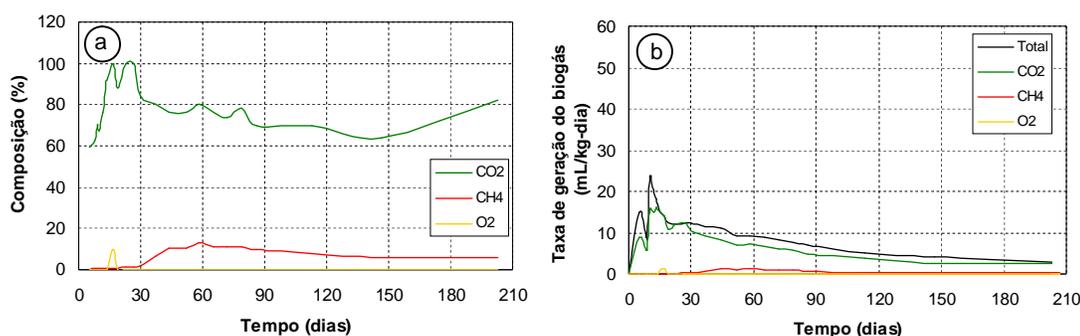
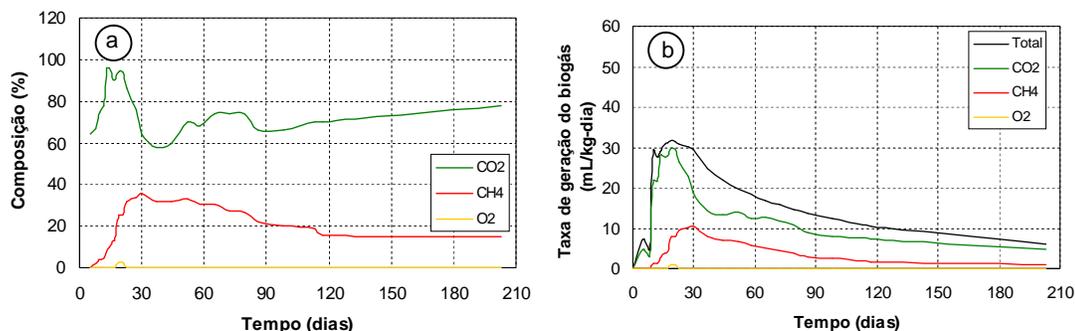
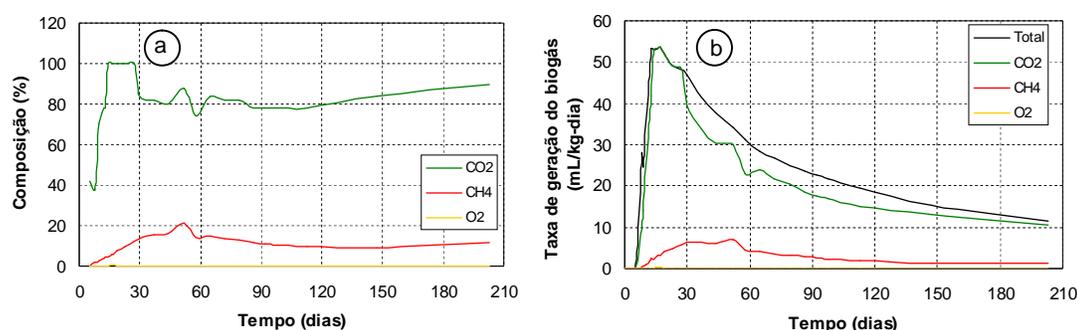


Figura IV.5. Variação da composição percentual e taxa da geração de biogás com o tempo para o reator 2 – fração orgânica dos RSU



**Figura IV.6. Variação da composição percentual e taxa da geração de biogás com o tempo para o reator 3 – fração orgânica dos RSU e LE**



**Figura IV.7. Variação da composição percentual e taxa da geração de biogás com o tempo para o reator 4 – fração orgânica dos RSU e LE**

A partir dos resultados do monitoramento da composição do biogás, apresentados nas Figuras IV.4a, IV.5a, IV.6a e IV.7a, observa-se que a geração de biogás dos RSU com codisposição de lodo ocorreu de forma mais acelerada. O pico máximo da concentração de metano ocorreu em 60 dias para os reatores 1 e 2, que apresentavam apenas RSU na sua composição, e levou aproximadamente metade do tempo para os reatores 3 e 4, que apresentavam RSU e LE na sua composição. Segundo Alves (2008) é provável que o lodo proporcione entrada de água, nutrientes e microrganismos, aumentando a população microbiana e facilitando o acesso aos nutrientes presentes nos resíduos orgânicos. Desta forma, os compostos se tornam mais disponíveis, acelerando a biodegradação e potencializando a geração de biogás.

Outro ponto a se destacar na geração de biogás dos RSU com codisposição de lodo é o incremento na taxa de geração de biogás diária. Com a determinação da vazão, foi possível estimar a taxa de geração de biogás por massa de resíduo, considerando o peso seco do material depositado. Observa-se, através das Figuras IV.4b, IV.5b, IV.6b e IV.7b, que as taxas de geração de biogás máximas para os reatores sem lodo em sua

composição foram de 1,1 e 2,1 mL/kg – dia para o metano, enquanto os reatores que apresentavam lodo tiveram taxa máxima de 7,1 a 10,6 mL/kg – dia.

As pressões máximas obtidas durante o monitoramento dos reatores foram de 30 kPa, consideradas altas. Alves (2008) obteve pressões máximas de 112 kPa em reatores de bancada com codisposição de lodo de esgoto, consideradas muito altas. Enquanto, os resultados obtidos durante o monitoramento ao longo de 5 anos no aterro sanitário Bandeirantes – São Paulo, indicam valores da ordem de até 100 a 170 kPa para pressões internas de gás *in situ*, lidas diretamente através de manômetro acoplado à câmara específica dos piezômetros em sifão (KAIMOTO & CEPOLLINA, 1996).

#### **4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

- *DESEMPENHO DOS REATORES*

A construção dos reatores, realizados em duplicata, para estimativa da produção diária do biogás ao longo do processo de biodegradação dos RSU, sem e com codisposição de lodo residual do tratamento de esgoto, foi executada de tal maneira que permitisse condições de fácil monitoramento, trazendo resultados com reprodutividade das diferentes condições de disposição de RSU em aterros propostas. Os resultados obtidos no monitoramento geraram estimativas das taxas de geração de biogás em curvas que transmitem a informação básica para avaliar as duas condições propostas. Desta forma, a metodologia adota foi considerada adequada e desempenho dos reatores satisfatório.

- *EFEITOS DO BIOGÁS DA CODISPOSIÇÃO DE LE E RSU EM ATERROS*

Os parâmetros de resistência dos RSU estão suscetíveis a alterações devidas às mudanças no funcionamento/operação do aterro. Uma codisposição de RSU e LE de forma desordenada ou em camadas espessas pode causar redução da permeabilidade e ineficiência dos sistemas de drenagem de gases e líquidos. Diante disto, com o incremento na produção do biogás gerado pela aceleração da biodegradação dos RSU com codisposição de LE, os excessos de poro-pressões na massa de RSU não são devidamente drenados, ocasionando redução das tensões efetivas, interferindo negativamente na estabilidade do aterro.

## CAPÍTULO V

### PROJETO, CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DE EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES

A utilização de ensaios de cisalhamento para a avaliação do comportamento mecânico dos RSU requer cuidados especiais no que se refere às dimensões do corpo de prova. Os RSU possuem uma composição heterogênea, tanto em relação aos seus constituintes, quando ao tamanho das partículas, que podem influenciar nos resultados dos ensaios. Diante disto, observou-se a necessidade de corpos de prova de grandes dimensões que fossem representativos, para que os resultados dos ensaios de cisalhamento direto em RSU fossem confiáveis. Este fato motivou a retomada da construção do equipamento de grandes dimensões, iniciado em 2003 por Fucale (2005).

Os ensaios de cisalhamento direto em equipamento de grandes dimensões foram constituídos para investigação da resistência ao cisalhamento dos RSU seguindo os mesmos procedimentos adotados para solos. Para a construção do equipamento foi necessário adaptar a caixa de cisalhamento direto com grandes dimensões (Figura V.1), desenvolvida por Fucale & Araújo (2003), a um pórtico de reação para a aplicação das tensões normal e cisalhante.

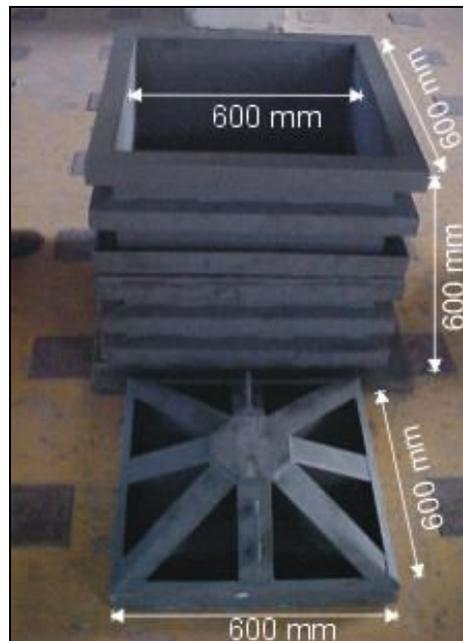
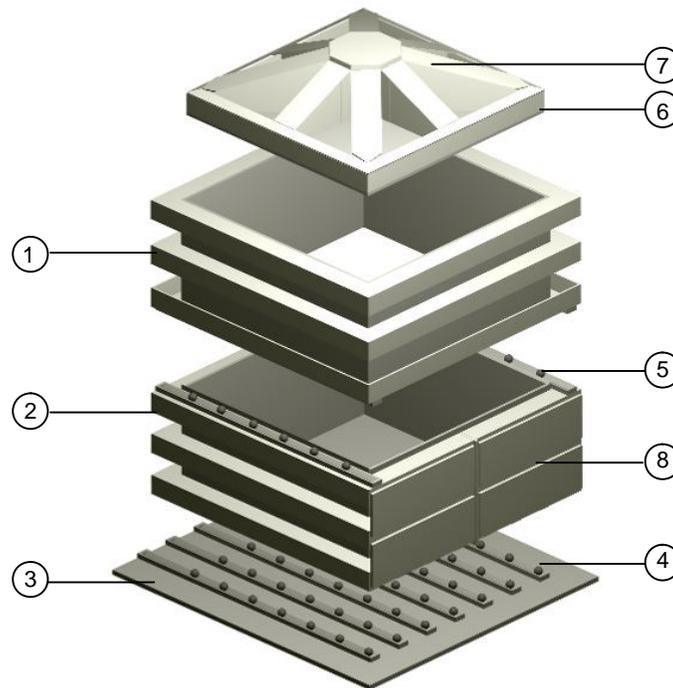


Figura V.1. Caixa de cisalhamento direto de grandes dimensões – Fucale & Araújo (2003)

A Figura V.2 apresenta o detalhamento da caixa de cisalhamento direto com seção transversal quadrada de  $0,36 \text{ m}^2$  ( $0,60 \times 0,60 \text{ m}$ ) e altura de  $0,6 \text{ m}$ . A caixa é bipartida, sendo composta pelas caixas superior (1) e inferior (2) com alturas iguais a  $0,30 \text{ m}$ , foi confeccionada em chapa de aço com espessura de  $8 \text{ mm}$  e possui enrijecedores de reforço dispostos horizontalmente.

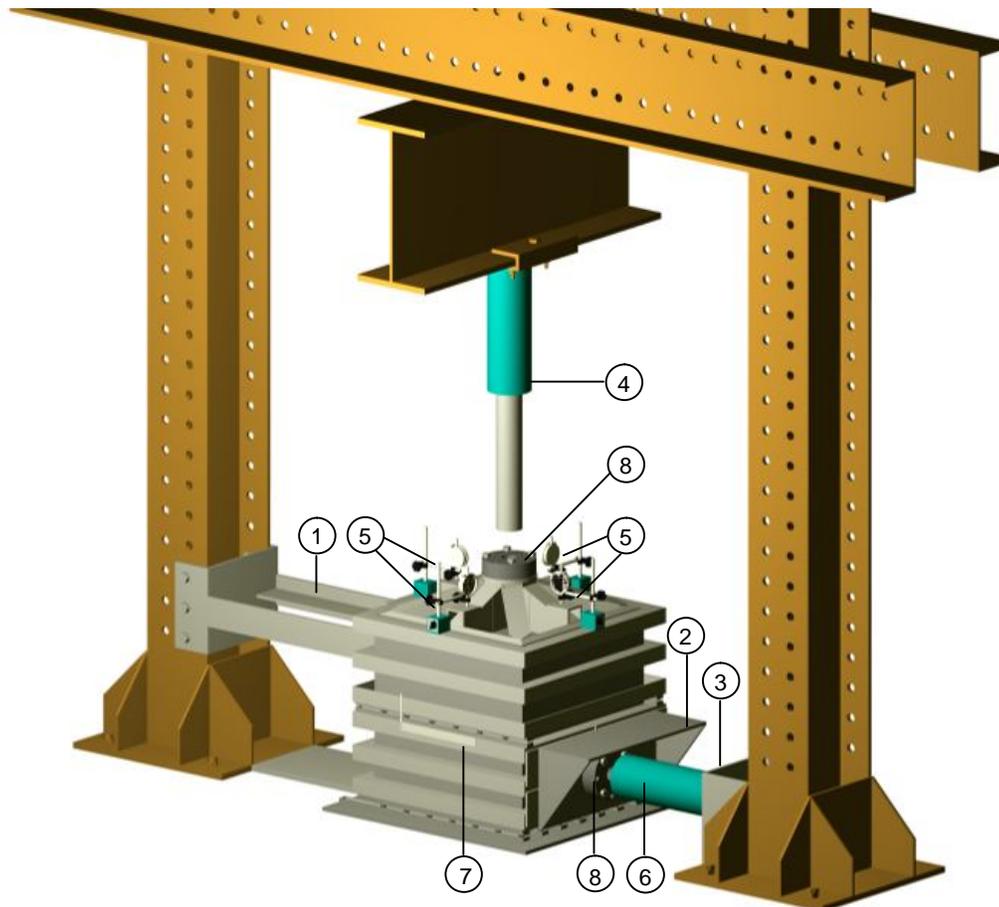


**Figura V.2. Detalhamento da caixa de cisalhamento: (1) caixa superior; (2) caixa inferior; (3) base; (4) trilhos inferiores; (5) trilhos intermediários; (6) tampa; (7) enrijecedores de reforço da tampa; (8) reforço da lateral da caixa inferior**

Por questões práticas, seu projeto foi idealizado para permitir o deslocamento da caixa inferior. Desta forma, a caixa fica apoiada em uma base (3), fabricada em chapa de aço com espessura de  $1,25 \text{ mm}$ , que dispõe de guias com esferas lubrificadas posicionadas nos trilhos inferiores (4) para permitir seu deslocamento no momento da aplicação da tensão cisalhante. Do mesmo modo, a caixa inferior é separada da caixa superior por guias com esferas lubrificadas posicionadas nos trilhos intermediários (5). Este afastamento reduz o atrito entre as caixas e entre a caixa inferior e a base, de forma a minimizar alterações nos parâmetros de resistência medidos. A caixa possui uma tampa (6) fabricada em chapa de aço com espessura de  $8 \text{ mm}$ , com enrijecedores de reforço (7) para distribuição uniforme das tensões normais na amostra. A lateral da caixa inferior, onde são aplicadas as tensões cisalhantes, também recebeu um reforço adicional (8).

## 5.1 PROJETO E MONTAGEM DO EQUIPAMENTO

O equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões desenvolvido nesta tese foi montado no Laboratório de Estruturas da UFPE, conforme apresentado em esquema detalhado na Figura V.3.



**Figura V.3. Esquema do equipamento de cisalhamento direto: (1) elemento para ancoragem da caixa superior; (2) suporte de apoio, instalado na caixa inferior; (3) suporte para fixação horizontal do cilindro hidráulico; (4) cilindro hidráulico; (5) extensômetros; (6) cilindro hidráulico; (7) régua graduada; (8) células de carga**

O equipamento é composto por um pórtico de reação com adaptação da caixa de cisalhamento e dos seguintes elementos:

- Elemento de ancoragem para a caixa superior (1);
- Suporte de apoio instalado na caixa inferior (2), composto por base para fixação da célula de carga e mesa para proteção dos equipamentos;
- Suporte para fixação horizontal do cilindro hidráulico (3);

- Um sistema de aplicação de carga para tensões normais composto por um cilindro hidráulico de simples efeito (4) e bomba hidráulica manual com capacidade para acionar cilindros de até 200 t;
- Um sistema para acompanhamento dos deslocamentos verticais, composto por três extensômetros (5) apoiados em bases instaladas na tampa da caixa de cisalhamento;
- Um sistema de aplicação de carga para tensões cisalhantes composto por um cilindro hidráulico de simples efeito (6) e bomba hidráulica manual com capacidade para acionar cilindros de até 200 t;
- Um sistema para acompanhamento do deslocamento devido à tensão cisalhante, composto por duas réguas graduadas em milímetros (7) instaladas nas laterais da caixa, posicionadas abaixo do trilho intermediário;
- Um sistema para controle e acompanhamento das tensões normal e cisalhante, composto por células de carga (8) acopladas a um sistema de aquisição de dados.

## 5.2 PROCEDIMENTOS GERAIS DO ENSAIO

O princípio de funcionamento do equipamento é composto por duas fases apresentadas na Figura V.4.

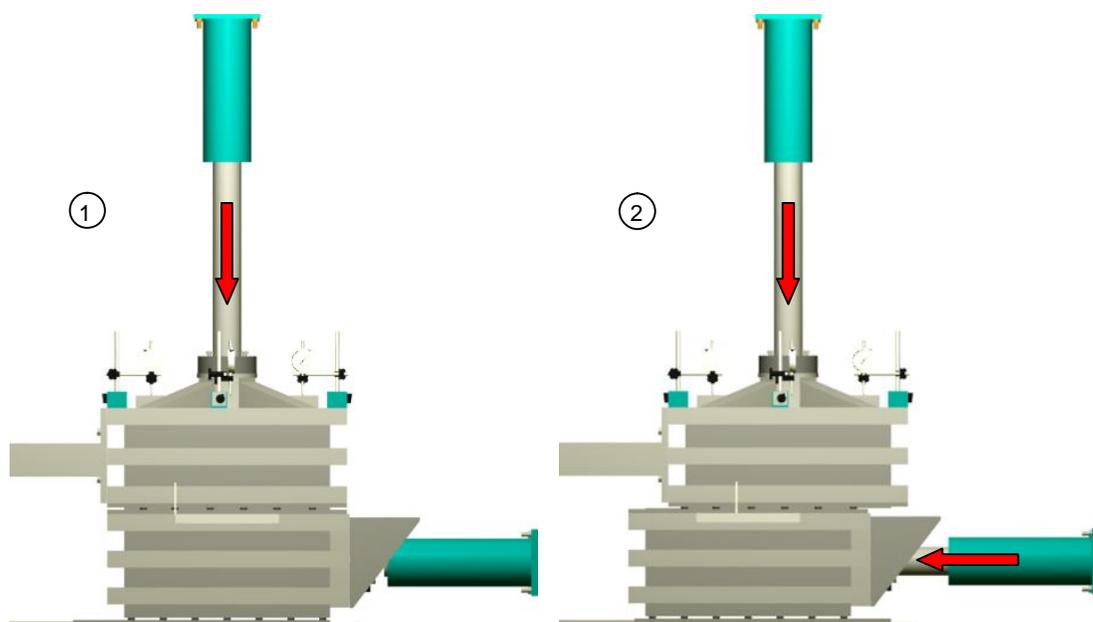


Figura V.4. Princípio de funcionamento do equipamento: (1) fase de adensamento; (2) fase de cisalhamento

A fase de adensamento (1), referente à aplicação de tensões normais ( $\sigma$ ) previamente definidas ao corpo de prova, é conduzida até se alcançar estabilização dos deslocamentos da amostra. Finalizado o adensamento, inicia-se a fase de cisalhamento (2), referente à aplicação das tensões cisalhantes ( $\tau$ ), que é conduzida até o deslocamento máximo adotado para os ensaios. Para cada tensão normal aplicada, determina-se a tensão cisalhante ao longo do plano horizontal, para diferentes níveis de deslocamento relativo. Em termos de tensões, para cada tensão normal ( $\sigma$ ) aplicada:

$$\sigma_{\text{esp}} = \frac{N}{A_{\text{rel}}} \quad (\text{V.1})$$

Tem-se o valor da tensão cisalhante específica ( $\tau_{\text{esp}}$ ):

$$\tau_{\text{esp}} = \frac{T_{\text{esp}}}{A_{\text{rel}}} \quad (\text{V.2})$$

Onde: Para determinado deslocamento relativo,  $\sigma_{\text{esp}}$  é a tensão normal específica (Pa);  $N$  é a força normal aplicada (N);  $A_{\text{rel}}$  é a área da seção transversal ( $\text{m}^2$ );  $\tau_{\text{esp}}$  é a tensão cisalhante específica (Pa);  $T_{\text{esp}}$  é a força tangencial específica (N)

As tensões normal e cisalhante foram aplicadas através de um sistema de bombeamento hidráulico manual que pode acionar até 2 cilindros simultaneamente. A bomba é composta por válvula reguladora de vazão, mangueira, registro geral e um manômetro com capacidade de 0 a 35 MPa, e sensibilidade de 0,5 MPa.

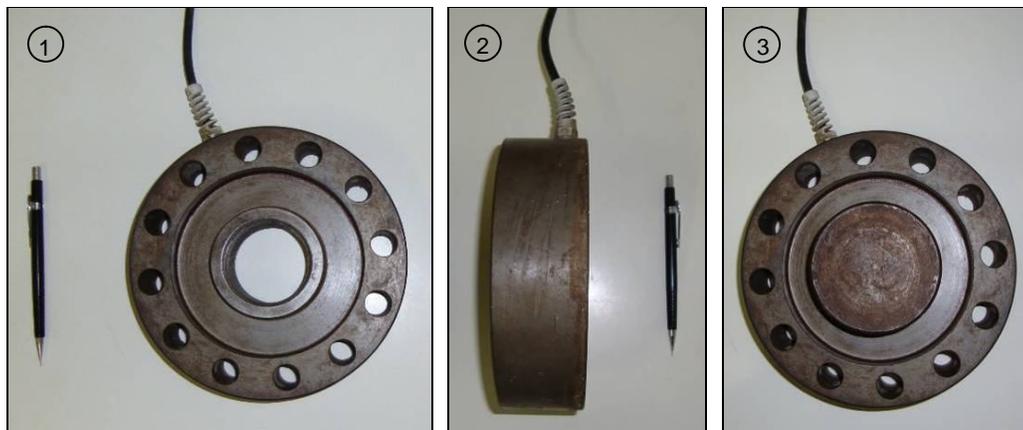
O manômetro é um equipamento que mede a força indiretamente, com base na pressão do óleo observada no cilindro. No entanto, para o funcionamento do equipamento de cisalhamento, o sistema de bombeamento foi concebido para aplicar as duas tensões de forma independente com a instalação de válvulas que permitiam o acionamento de cada pistão de forma isolada, e isto impossibilitava a leitura das duas tensões simultaneamente através do manômetro.

Na Figura V.5 são apresentadas as válvulas instaladas na bomba, fabricadas em aço carbono com registro tipo esfera de  $\frac{1}{4}$  de volta, com capacidade de estanqueidade de pressões de serviço até 50 MPa.



**Figura V.5. Válvulas instaladas na bomba**

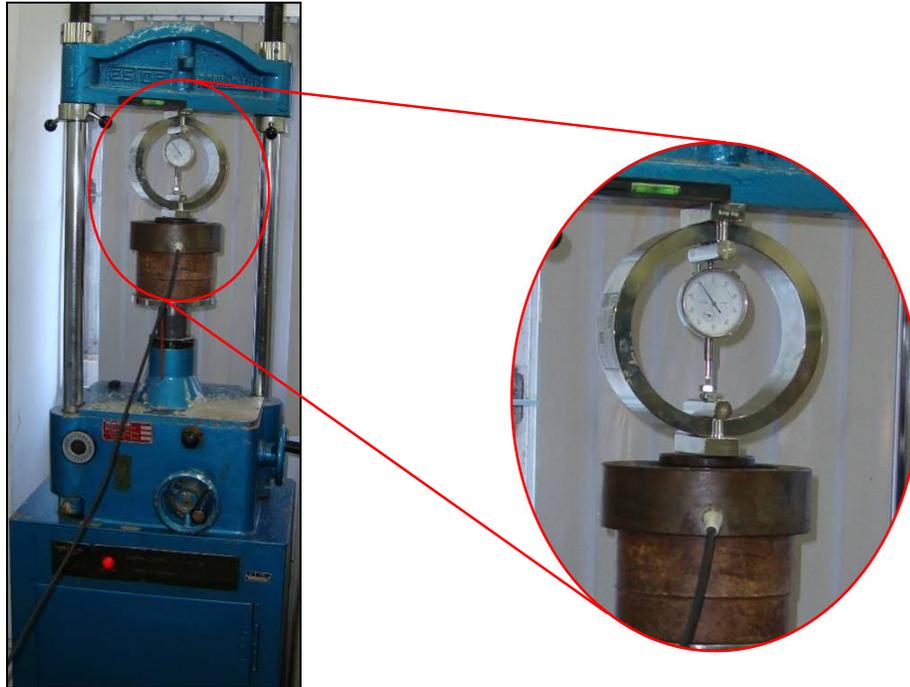
Para controle das tensões aplicadas, optou-se por fazer seu acompanhamento através de células de carga acopladas a um sistema de aquisição de dados. A Figura V.6 apresenta as células de carga utilizadas, modelo *Gunt Hamburg LT 50/30*, com carga nominal de 300 kN, com vistas: superior (1), lateral (2) e com a base de apoio para o pistão do cilindro hidráulico instalada (3).



**Figura V.6. Células de carga *Gunt Hamburg LT 50/30*: (1) vista superior; (2) vista lateral; (3) vista superior com base de apoio para o pistão instalada**

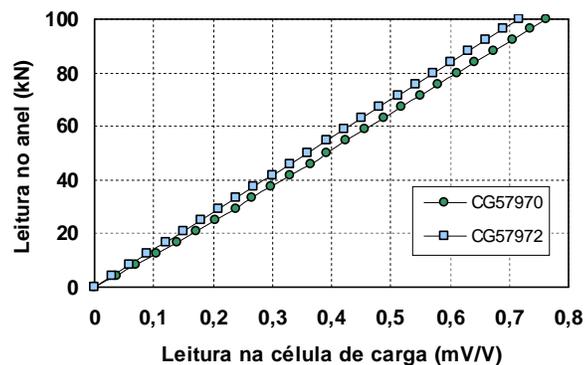
Célula de carga é um dispositivo eletromecânico que mede a deformação sofrida por uma estrutura através da variação de tensão em um circuito denominado ponte de Wheatstone. Para transformar o desbalanceamento medido pela variação de tensão (mV/V) na grandeza de força desejada (kN), foi realizada a calibração das células utilizando um sistema para a aquisição de dados, *Spider 8*, e um anel dinamométrico com

10 t de capacidade. A Figura V.7 apresenta a calibração das células de carga em andamento. O procedimento de calibração foi realizado com o auxílio de uma prensa de compressão com capacidade de 10 t da Testop à velocidade de 0,2 mm/min.



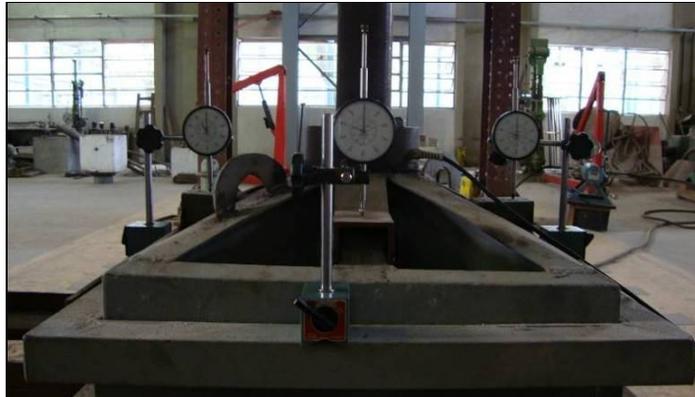
**Figura V.7. Calibração das células de carga em andamento**

A calibração das células de carga foi realizada para transformar o desbalanceamento medido pela variação de tensão (mV/V) na grandeza de força desejada (kN) para controle das tensões aplicadas através dos cilindros hidráulicos no equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões. As duas células apresentaram uma relação linear com excelente correlação ( $R^2=1$ ) nas calibrações, conforme apresentado na Figura V.8.



**Figura V.8. Calibração das células de carga LT 50/30**

As leituras dos deslocamentos verticais foram realizadas a partir de três extensômetros analógicos, com capacidade de 50 mm e sensibilidade de 0,01 mm, adaptados a suportes magnéticos instalados no centro do enrijecedor superior de três laterais da caixa. Para acompanhar os deslocamentos verticais, os extensômetros foram posicionados em bases instaladas na tampa da caixa, conforme apresentado na Figura V.9.



**Figura V.9. Posicionamento dos extensômetros**

Os deslocamentos horizontais foram acompanhados por meio de duas régulas graduadas em milímetros afixadas nas laterais da caixa, abaixo dos trilhos intermediários. Cada régua apresenta um ponteiro instalado na caixa superior, acima dos trilhos intermediários, para sua leitura, conforme apresentado na Figura V.10.



**Figura V.10. Disposição das régulas nas laterais da caixa**

A Figura V.11 apresenta o sistema utilizado para o cisalhamento, com detalhe para (1) base utilizada para fixação da célula de carga e mesa para proteção dos equipamentos; e (2) deslocamento da caixa inferior.



**Figura V.11. Detalhes do equipamento de cisalhamento: (1) base utilizada para fixação da célula de carga e mesa de proteção dos equipamentos e (2) deslocamento da caixa interior**

A Figura V.12 apresenta o equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões montado, onde podem ser observadas algumas medidas adotadas nos ensaios para facilitar seu desenvolvimento. Como o equipamento não possui sistema de coleta de lixiviado, sua base era envolvida com areia (1), para absorver eventuais transbordamentos. O êmbolo do cilindro hidráulico era apoiado em uma rótula (2) para garantir a distribuição da tensão na tampa do equipamento, mesmo com deslocamentos diferentes em cada ponto.



**Figura V.12. Equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões: (1) base envolvida com areia; (2) rótula para apoio do êmbolo do cilindro hidráulico**

A Figura V.13 apresenta os procedimentos necessários para retornar os êmbolos dos cilindros hidráulicos após os ensaios, devido ao mecanismo ser de simples efeito. Foi utilizado um macaco hidráulico, modelo CJ2, com 2 toneladas de capacidade, da marca

Bovenau, para fazer o recolhimento dos êmbolos. Como o cilindro hidráulico utilizado para aplicação das tensões normais (1) é posicionado em uma base móvel, ele pode ser deslocado ao longo da viga de sustentação para realizar o procedimento. Já o cilindro utilizado para aplicação das tensões cisalhantes (2) é posicionado em uma base fixa, desta forma, o seu recolhimento precisa ser realizado através da caixa de cisalhamento.

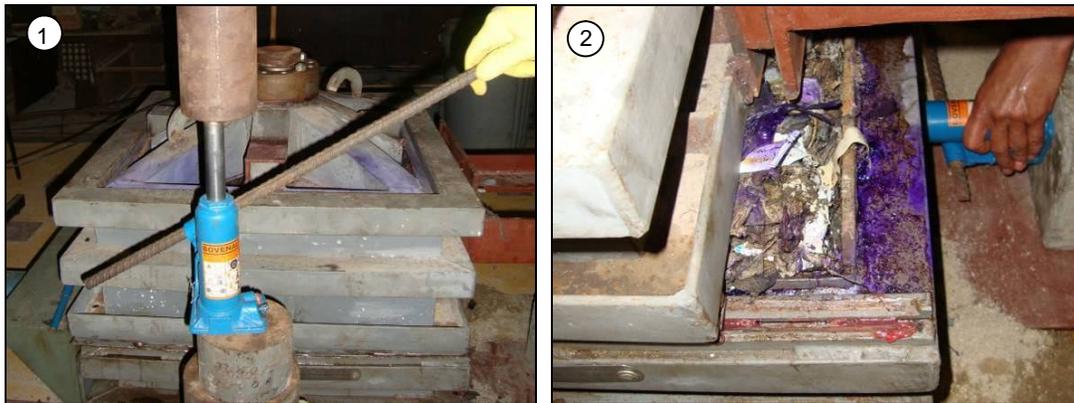


Figura V.13. Procedimentos para retornar os êmbolos dos cilindros hidráulicos: (1) vertical e (2) horizontal

### 5.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados foi realizada pelo equipamento modelo *Spider 8* gerenciado pelo programa *Catman 4.5*, ambos da marca Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM). A Figura V.14 apresenta o equipamento *Spider 8* (1) e seu painel traseiro (2).



Figura V.14. Sistema de aquisição de dados - *Spider 8*: (1) vista frontal; (2) painel traseiro

O *Spider 8* possui oito canais de comunicação e pode ser conectado ao computador por meio de portas paralelas ou seriais. Cada canal trabalha com um conversor analógico/digital individual que possibilita atingir taxas de aquisição de 1 a 9600 leituras/segundo. Os conversores são sincronizados de modo a permitir leituras simultâneas em todos os canais.

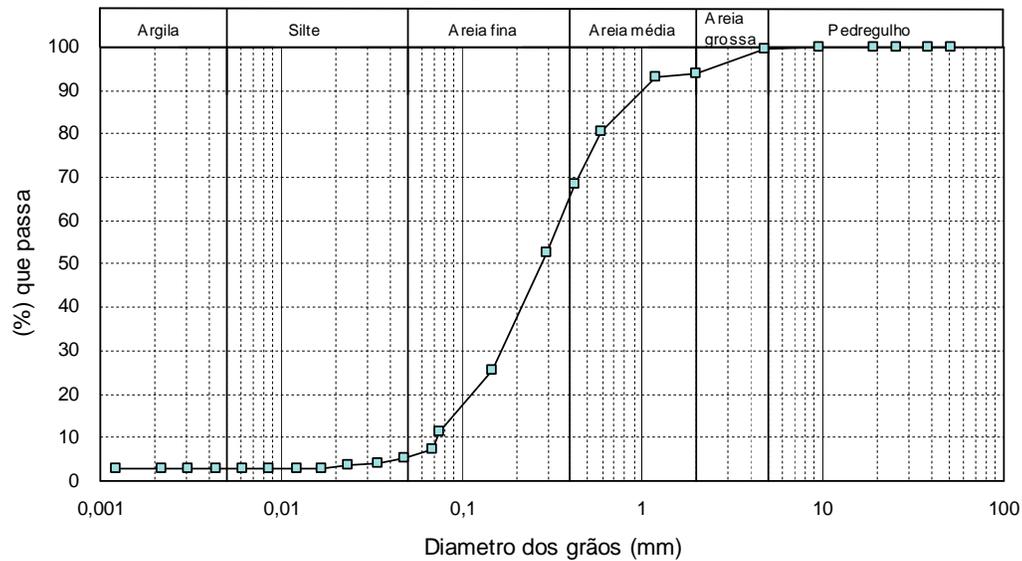
Após a conexão das células de carga ao sistema *Spider 8*, para se estabelecer a comunicação com o computador utilizando-se o programa *Catman 4.5*, são necessárias algumas configurações. As definições de entrada e saída (*I/O definitions*) são realizadas para cada canal, de acordo com o tipo de sensor utilizado. No caso das células de carga *Gunt Hamburg LT 50/30*, são utilizadas pontes completas (*full bridge*), de 3 Volts, com sensibilidade de 0 mV/V a 20 mV/V e valor nominal de 0 a 100%. Os módulos pré-existent (*CatModules*) possibilitam a execução dos ensaios de forma fácil e rápida.

Os resultados dos ensaios são fornecidos pelo sistema de aquisição em formato de arquivo de dados, conforme Régis (2010), com as grandezas medidas pelos sensores apresentadas em colunas. Estes arquivos permitem que os dados dos ensaios sejam editados em programas, tipo planilha eletrônica. Assim, foi desenvolvida uma planilha modelo para conduzir as interpretações segundo o padrão utilizado para solos.

#### **5.4 TESTES INICIAIS UTILIZANDO SOLO ARENOSO**

Para se avaliar o efeito da escala das amostras, foram realizados ensaios de cisalhamento direto convencional e de grandes dimensões com o mesmo solo para efeito comparativo. Para estes ensaios, utilizou-se uma amostra de solo arenoso amolgada, pois seria inviável moldar corpos de prova com amostras indeformadas na caixa de cisalhamento de grandes dimensões.

A granulometria da amostra de solo utilizada, realizada de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984a), está indicada na Figura V.15. A análise granulométrica do solo mostra a predominância da fração grossa, com menos de 50% passando na peneira nº 200, sendo a areia fina a fração predominante. O valor do peso específico dos grãos ( $\gamma_s = 26,46 \text{ kN/m}^3$ ), sugere uma mineralogia composta principalmente pelo mineral Quartzo.



**Figura V.15. Curva granulométrica do solo utilizado nos testes iniciais**

Nos ensaios de consistência, o solo não apresentou Limite de Liquidez e Plasticidade, sendo, portanto um solo não líquido e não plástico. Sua classificação, pelo SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos), se enquadra no grupo SW (areia, predominante fina a média, bem graduada). A Tabela V.1 apresenta um resumo da caracterização física do solo.

**Tabela V.1. Resumo dos resultados da caracterização física do solo dos testes iniciais**

$\gamma_s$ ( $\text{kN/m}^3$ )	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%) ABNT						SUCS
	PEDREGULHO	AREIA GROSSA	AREIA MÉDIA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA	
26,46	0	6	28	61	2	3	SW

Para os ensaios de cisalhamento direto convencionais foi utilizada uma prensa de cisalhamento direto produzida pela Ronald Top S/A, com sistema de aplicação de tensão normal através de pesos em pendural. Nas leituras dos deslocamentos verticais e horizontais foram utilizados extensômetros com sensibilidade de 0,01 mm. A força horizontal foi determinada através de um anel dinamométrico com capacidade de 500 kgf. As tensões normais foram aplicadas e mantidas até a estabilização dos deslocamentos. O cisalhamento dos corpos de prova para cada tensão normal aplicada foi realizado com velocidade constante de 0,483 mm/min. Adotou-se como critério de ruptura os valores de pico da tensão cisalhante ou os valores máximos, quando a curva tensão-deslocamento não indicava valores de pico bem definidos. Os deslocamentos máximos adotados nos ensaios foram de 15 mm.

Uma série de quatro tensões normais (50, 100, 150 e 200 kPa) foi ensaiada em cada equipamento com corpos de prova moldados com peso específico aproximado de  $16 \text{ kN/m}^3$ . Os ensaios foram realizados inicialmente no equipamento convencional utilizando corpos de prova de seção quadrada, com 101,6 mm de lado e 42,7 mm de altura moldados com a amostra de solo amolgada na própria caixa de cisalhamento, sem sofrer compactação. Em seguida, foram realizados os ensaios no equipamento de grandes dimensões utilizando corpos de prova de seção quadrada, com 600 mm de lado e 600 mm de altura moldados com mesmo peso específico dos ensaios convencionais. Os deslocamentos máximos adotados nos ensaios de grandes dimensões foram de 90 mm, referente a 15% da amostra. A Figura V.16 apresenta os corpos de prova moldados nas caixas de cisalhamento convencional (1) e de grandes dimensões (2).



**Figura V.16. Corpos de prova utilizados para os testes do equipamento de cisalhamento direto desenvolvido: (1) ensaio convencional; (2) ensaio de grandes dimensões**

As curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo horizontal; e variação de altura versus deslocamento relativo horizontal para os ensaios convencionais e de grandes dimensões são apresentadas nas Figuras V.17 e V.18. As envoltórias de resistência para os ensaios realizados nos dois equipamentos de cisalhamento direto estão apresentadas na Figura V.19.

Com relação ao comportamento tensão-deslocamento relativo observado nos ensaios, as curvas não apresentam comportamento de pico, desta forma, foram adotados os valores máximos para todos os níveis de tensão normal. A variação de altura com o deslocamento relativo horizontal, observada nos dois ensaios, apresentou comportamento típico de areias fofas. Observa-se no ensaio de grandes dimensões que a redução do volume foi bem menor que no ensaio convencional.

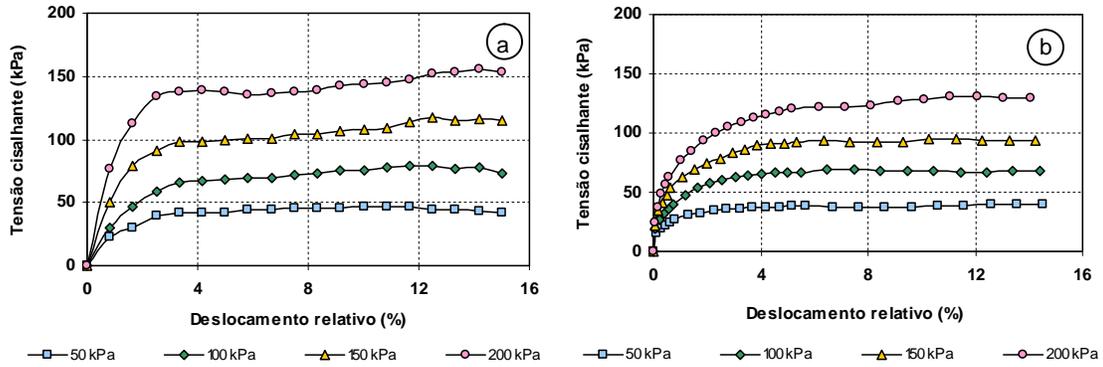


Figura V.17. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo horizontal dos testes iniciais com solo arenoso: (a) de grandes dimensões e (b) convencional

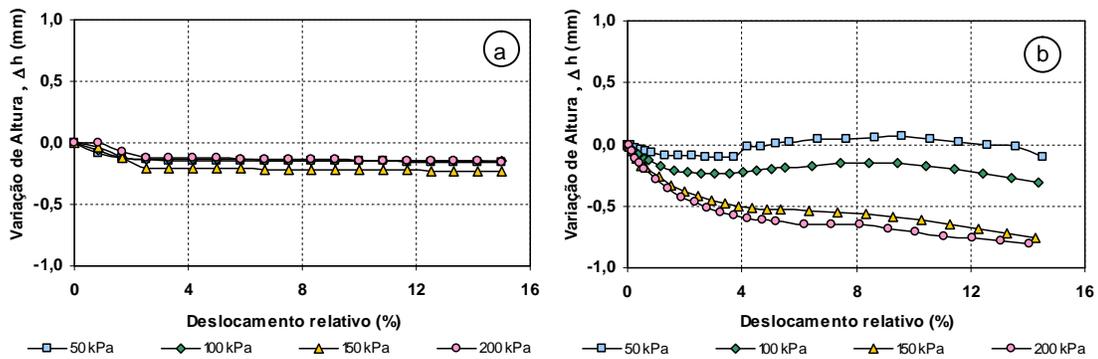


Figura V.18. Variação de altura versus deslocamento relativo horizontal dos testes iniciais com solo arenoso: (a) de grandes dimensões e (b) convencional

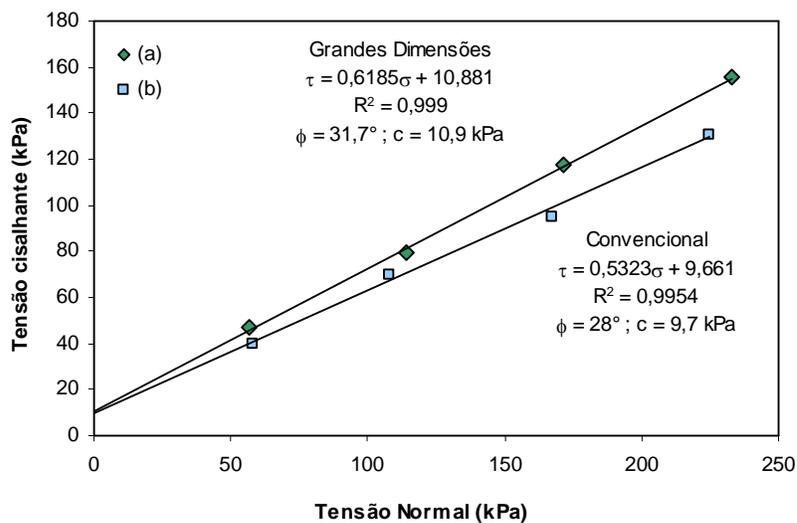


Figura V.19. Envoltórias de ruptura dos ensaios de cisalhamento direto dos testes iniciais com solo arenoso: (a) de grandes dimensões e (b) convencional

Observando as envoltórias, verifica-se um pequeno incremento no ângulo de atrito e a coesão aparente praticamente se manteve a mesma. Observam-se melhores resultados para as tensões normais até 100 kPa. No entanto, diante das condições de difícil controle de tensão e velocidade do ensaio de grandes dimensões e das diferenças de ajuste de escala, a evolução da envoltória de resistência do solo no equipamento desenvolvido apresentou resultados de boa qualidade.

Em relação ao comportamento tensão-deslocamento relativo, observou-se que o nível de tensão do equipamento de grandes dimensões se apresentou um pouco mais elevado, mas os resultados foram relativamente próximos ao do equipamento convencional. No entanto, o comportamento da variação de altura versus deslocamento relativo apresentou uma redução de volume muito inferior ao resultado do ensaio convencional, apesar de se fazer um controle da variação de altura com o valor médio obtido por meio de três extensômetros.

É provável que a altura do corpo de prova influencie nos resultados da variação de altura ao longo do deslocamento relativo horizontal. Como altura total do corpo de prova é muito grande comparada à altura que sofre influência do rearranjo das partículas no plano de ruptura, não se constata o comportamento do deslocamento vertical esperado.

## **5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **• AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO EQUIPAMENTO**

Para a construção do equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões, os elementos propostos para ancoragem da caixa superior, para fixação de células de carga e cilindros hidráulicos, e para apoio dos extensômetros funcionaram adequadamente.

A aplicação das tensões normal e cisalhante, através do sistema de bombeamento hidráulico manual com a instalação de válvulas que permitiam o acionamento de cada pistão de forma isolada, foi considerada eficaz. No entanto, as tensões normais aplicadas passavam por frequentes reduções, devido à compressibilidade da amostra. Desta forma, era sempre necessário se fazer ajustes no sistema para manter as tensões normais aplicadas constantes.

Com o sistema proposto para controle e acompanhamento das tensões normal e cisalhante, composto por células de carga acopladas a um sistema de aquisição de dados foi possível fazer o acompanhamento da leitura das duas tensões simultaneamente.

Foi verificada uma dificuldade no retornar os êmbolos dos cilindros hidráulicos. Devido ao mecanismo dos cilindros hidráulicos utilizados serem de simples efeito. Após os ensaios era necessário realizar alguns procedimentos utilizando um macaco hidráulico para retornar os êmbolos dos cilindros. Se o mecanismo dos cilindros fosse de duplo efeito, esta dificuldade seria eliminada e os ensaios seriam menos trabalhosos.

• ***RESULTADOS OBTIDOS NO EQUIPAMENTO DE GRANDES DIMENSÕES NOS TESTES***

O teste inicial do equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões realizado com solo arenoso, comparado ao ensaio de cisalhamento direto convencional realizado com o mesmo solo, apresentou resultados satisfatórios para a envoltória de resistência e comportamento tensão-deslocamento relativo. Já o comportamento da variação de altura versus deslocamento relativo horizontal não foi representativo das condições esperadas, apesar de se utilizar a média das leituras de três extensômetros para a variação de altura. Observaram-se melhores resultados na envoltória de resistência para tensões normais até 100 kPa.

## CAPÍTULO VI

### ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES COM RSU

Os ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões foram realizados com o objetivo avaliar a resistência ao cisalhamento dos RSU. Foram analisadas a influência da codisposição de RSU e lodo de esgoto, e o efeito dos constituintes fibrosos dos RSU como componente de reforço à resistência. Para realização dos ensaios foi utilizado o equipamento apresentado no Capítulo V, com sistema de carga confinante e de cisalhamento através de bombeamento hidráulico. Nas leituras dos deslocamentos verticais foram utilizados extensômetros com capacidade de 50 mm e sensibilidade de 0,01 mm. Para as leituras dos deslocamentos horizontais foram utilizadas régua graduadas com capacidade de 300 mm e sensibilidade de 1 mm. As forças horizontal e vertical foram determinadas através de células de carga com capacidade de 300 kN, acopladas à um sistema de aquisição de dados.

#### 6.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE RSU

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com amostras deformadas de resíduos pré-tratados mecanicamente, com e sem adição de lodo, com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência dos RSU em termos de tensões efetivas utilizando o critério de ruptura de Coulomb. As amostras foram provenientes da CTR Igarassu, que recebe diariamente aproximadamente 2,7 t de resíduos provenientes de Recife, Olinda e Igarassu. Após realização dos ensaios de composição gravimétrica, os resíduos passaram por um pré-tratamento mecânico, através de processos de trituração e picotamento manual com auxílio de tesouras e facões, apresentado na Figura VI.1.



Figura VI.1. Pré-tratamento mecânico dos RSU: (1) plástico duro; (2) plástico mole

O pré-tratamento mecânico dos resíduos foi realizado para atender a ASTM D 3080 (1998), que recomenda que as dimensões máximas das partículas tenham a relação com o comprimento da caixa na proporção máxima de 1:12. A representatividade do ensaio depende desta proporção. Desta forma, os resíduos foram triturados de forma a se obter após processamento o tamanho das partículas na relação máxima desejada. Ou seja, as partículas devem possuir dimensões inferiores a 50 mm.

## 6.2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Os ensaios foram realizados na umidade natural após o pré-processamento mecânico, aproximadamente 33% em base úmida. Os corpos de prova foram moldados na caixa de cisalhamento de grandes dimensões de seção quadrada de  $0,36 \text{ m}^2$  ( $0,6 \times 0,6 \text{ m}$ ), e altura total de  $0,6 \text{ m}$ . Para se obter o peso específico de campo de  $9,0 \text{ kN/m}^3$  (peso específico úmido comumente empregado em projetos de aterro sanitários), foi calculada a quantidade de resíduos de aproximadamente  $194,4 \text{ kg}$  em peso úmido para o seu preenchimento total. Foram adotados alguns procedimentos para moldagem dos corpos de prova para manter a uniformidade entre eles. Os resíduos eram dispostos em camadas de  $0,20 \text{ m}$  e passavam por compactação manual com o auxílio de barrotes e em seguida eram compactados com o cilindro hidráulico até atingir o peso específico desejado. A Figura VI.2 apresenta a moldagem dos corpos de prova, das amostras (1) RSU e (2) RSU-LE na caixa de cisalhamento.



Figura VI.2. Moldagem do corpo de prova na caixa de cisalhamento: (1) RSU; (2) RSU-LE

Para execução dos ensaios, as tensões normais foram aplicadas através de bombeamento hidráulico em único estágio e era mantida até a estabilização dos

deslocamentos. As tensões normais aplicadas sofriam por reduções eventuais que eram verificadas através do seu monitoramento com a célula de carga. Quando isto ocorria, efetuava-se novo bombeamento para se manter a tensão desejada constante. Os deslocamentos verticais eram registrados através de três extensômetros.

Três séries de quatro tensões normais, indicadas na Tabela VI.1, foram ensaiadas com corpos de prova moldados na caixa de cisalhamento segundo três diferentes composições. A altura inicial dos corpos de prova variou entre 0,45 e 0,55 m. Desta forma, a tensão normal máxima de 100 kPa foi adotada para os ensaios devido à compressibilidade da amostra. Foi verificado que, caso fossem utilizadas tensões normais mais altas, a tampa da caixa poderia atingir o plano de cisalhamento do ensaio, inviabilizando o mesmo. O tempo de adensamento médio foi aproximadamente 30 min.

**Tabela VI.1. Séries de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões**

ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO		
AMOSTRAS	COMPOSIÇÃO	TENSÃO NORMAL (kPa)
1. RSU	Resíduos sólidos urbanos pré-tratados mecanicamente.	25
		50
		75
		100
2. RSU-RF	Resíduos sólidos urbanos pré-tratados mecanicamente com redução dos componentes fibrosos (plásticos totais e têxteis).	25
		50
		75
		100
3. RSU-LE	Resíduos sólidos urbanos pré-tratados mecanicamente com adição de lodo residual do tratamento do esgoto, na proporção de 17:3 (15%).	25
		50
		75
		100

Após estabilização dos deslocamentos verticais, iniciava-se o cisalhamento com tensão controlada. A velocidade média de cisalhamento dos ensaios foi calculada em torno de 2,4 mm/min. Para se manter uma velocidade padrão nos ensaios, foi adotado como critério, estimar o tempo de aproximadamente 2 minutos para cada 5 mm de deslocamento relativo horizontal, tempo suficiente para permitir a drenagem e o rearranjo das partículas. No sistema para aquisição de dados das tensões de cisalhamento ( $\tau$ ) foram considerados deslocamentos horizontais pré-definidos de 5 mm para cada leitura. O deslocamento máximo adotado nos ensaios foi de 120 mm, equivalente a 20% da amostra.

### 6.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões foram realizados com amostras de resíduos sólidos urbanos pré-tratados mecanicamente (RSU); resíduos sólidos urbanos pré-tratados mecanicamente com redução dos componentes fibrosos (RSU-RF); resíduos sólidos urbanos pré-tratados mecanicamente com adição de lodo residual do tratamento do esgoto (RSU-LE). Foram aplicadas tensões normais de 25, 50, 75 e 100 kPa. Os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios são apresentados para cada tipo de amostra ensaiada, para uma análise com a finalidade de se avaliar: (1) a influência das fibras; e (2) a influência do LE nos parâmetros de resistência obtidos para os RSU. Os parâmetros obtidos por esses ensaios formam parte da base de dados utilizados nas análises de estabilidade de taludes com o programa GGU Stability, apresentadas no Capítulo VII.

#### 6.3.1 ENSAIOS COM AMOSTRAS DE RSU

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões para as amostras de RSU são apresentados através das curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo horizontal e variação de altura x deslocamento relativo horizontal, conforme Figuras VI.3 e VI.4.

Com relação ao comportamento das curvas tensão-deslocamento relativo e variação de altura versus deslocamento relativo, observa-se que todas as amostras apresentam comportamento de redução de volume, fato que pode ser relacionado ao alto índice de vazios dos resíduos. Também se nota o ganho de resistência com acréscimo de deslocamento para todos os níveis de tensão normal aplicados, não se definindo resistências de pico nas curvas, típico comportamento de material plástico com endurecimento. Desta forma, as envoltórias de resistência  $\tau \times \sigma$  (tensão cisalhante x tensão normal) foram estimadas em função do nível de deslocamento (5, 10, 15 e 20%), conforme apresentado na Figura VI.5.

Observam-se nas envoltórias de 5 e 10% de deslocamento uma tendência ao critério de ruptura bi-linear. No entanto, esta evidência só seria comprovada com a realização de ensaios com a aplicação de no mínimo cinco tensões normais diferentes.

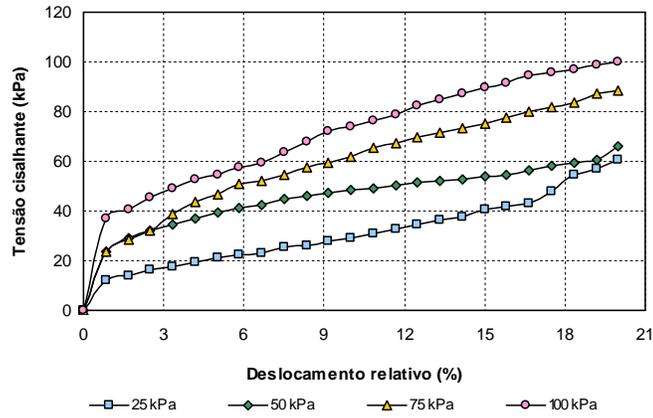


Figura VI.3. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo horizontal- RSU

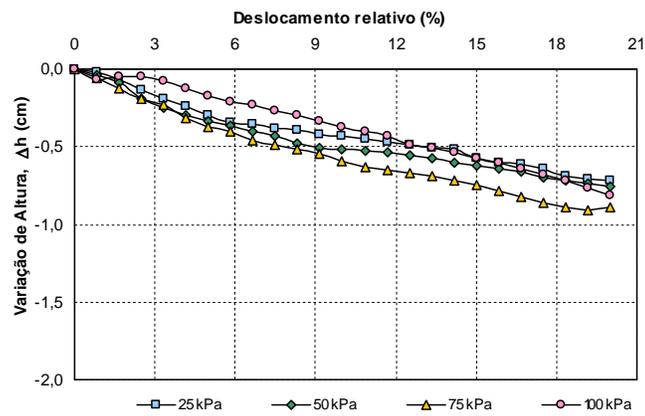


Figura VI.4. Variação de altura versus deslocamento relativo horizontal - RSU

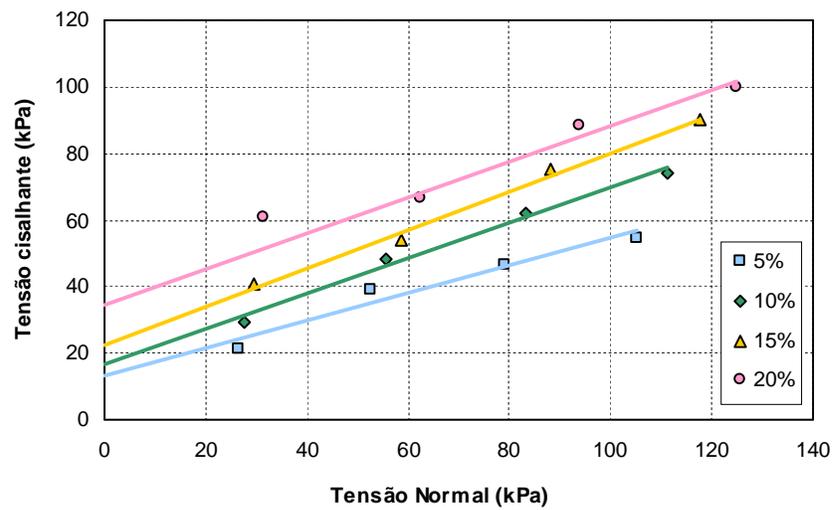


Figura VI.5. Envolvórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento relativo horizontal - RSU

A Tabela IV.2. apresenta os valores das tensões cisalhantes para diferentes níveis de deslocamento, de acordo com as tensões normais aplicadas nos ensaios. Na Tabela IV.3 são mostrados os parâmetros de resistência obtidos para a amostra de resíduos sólidos urbanos pré-tratados mecanicamente – RSU, para os diferentes níveis de deslocamento horizontal.

**Tabela VI.2. Valores das tensões cisalhantes para diferentes níveis de deslocamento relativo horizontal para as tensões normais aplicadas- RSU**

$\sigma$ (kPa)	$\tau$ PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO (kPa)			
	5%	10%	15%	20%
25	21,0	29,3	40,5	60,8
50	39,2	48,5	53,9	66,3
75	46,8	61,7	75,2	88,2
100	54,7	74,1	89,9	100,0

**Tabela VI.3. Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para diferentes níveis de deslocamento relativo horizontal - RSU**

PARÂMETROS	NÍVEIS DE DESLOCAMENTO			
	5%	10%	15%	20%
$c'$ (kPa)	13,3	16,5	22,6	34,3
$\phi'$ (°)	22	28	30	28
$R^2$	0,948	0,998	0,992	0,971

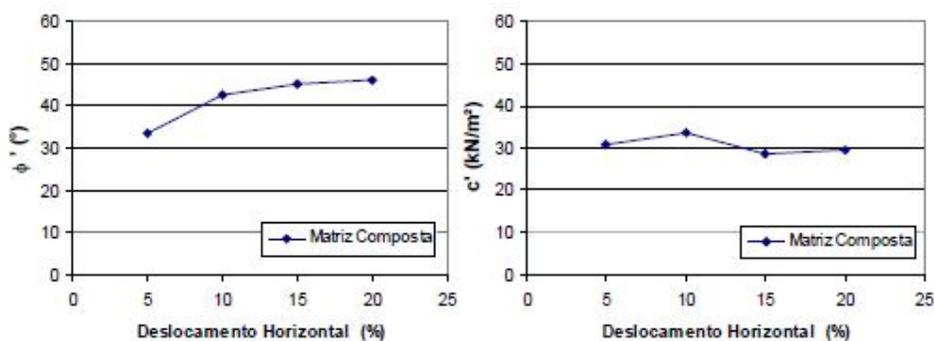
Observa-se que os valores da coesão aumentam com o nível de deslocamento, com o valor máximo de 34 kPa para 20% de deslocamento relativo horizontal. Já os valores do ângulo de atrito apresentaram aumento até 15% de deslocamento relativo horizontal, apresentando-se entre 22 e 30°, com tendência a constância de valores a partir de 10% de deslocamento.

Os parâmetros determinados estão de acordo com variação dos parâmetros de resistência em função das deformações, analisada por meio de ensaios de laboratório por Jessberger (1990); Jessberger & Köckel (1993); Reunter (1995) e Köckel (1995). Segundo os autores, em geral, o valor limite do ângulo de atrito é mobilizado para deformações máximas de 20%. Em relação à mobilização da coesão, esta 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.

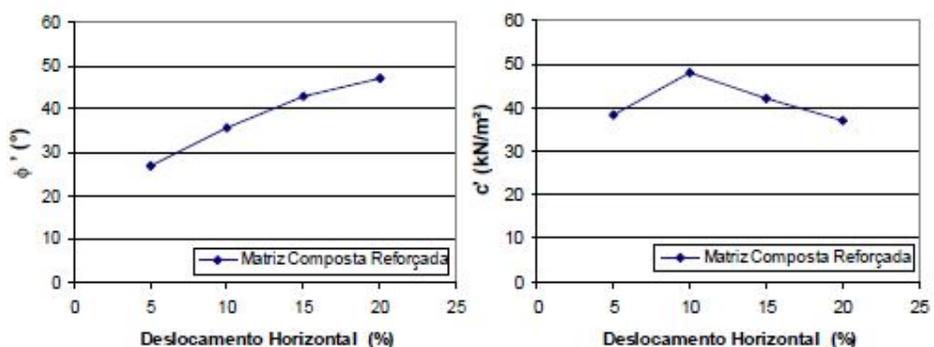
Fucale (2005) obteve ângulo de atrito crescente para a matriz composta e matriz composta reforçada dos resíduos sólidos velhos do Aterro de Ihlenberg, Alemanha. No

entanto, a coesão apresentou comportamento diferenciado, atingindo seu valor máximo a 10% de deslocamento horizontal nos dois casos, conforme apresentado nas Figuras VI.6 e VI.7. Outra diferença importante é com relação ao comportamento tensão-deslocamento, observou-se que as curvas de deslocamento vertical ao longo do deslocamento horizontal das duas matrizes indicaram que as amostras sofreram inicialmente dilatação e em seguida apresentaram comportamento de compressão na fase de cisalhamento, como apresentado nas Figuras VI.8 e VI.9. Comportamento diferenciado ao observado nas amostras de RSU deste trabalho, que só apresentaram compressão.

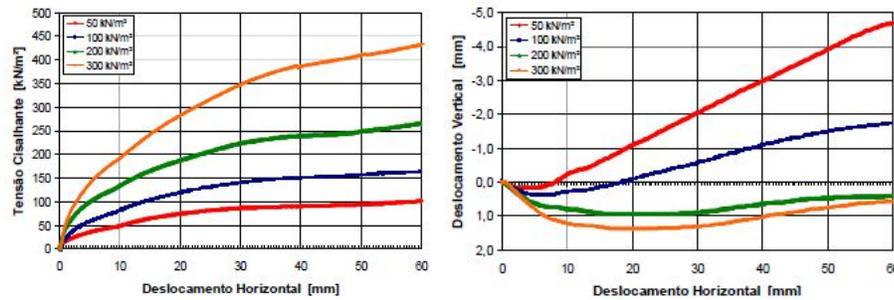
De certa forma, era provável se encontrar diferenças significativas ao se comparar dados de resíduos velhos, já estabilizados ensaiados por Fucale (2005), com resíduos frescos utilizados neste trabalho.



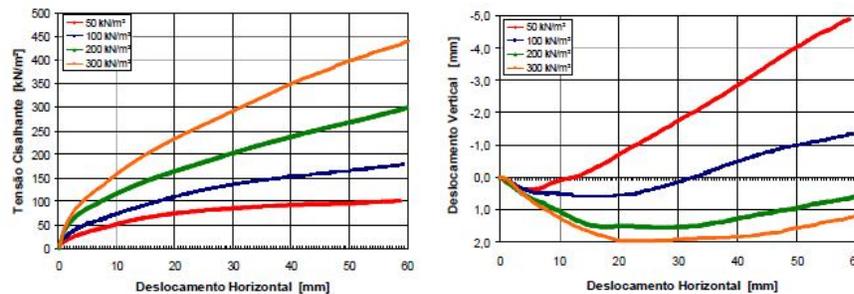
**Figura VI.6. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005)**



**Figura VI.7. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005)**

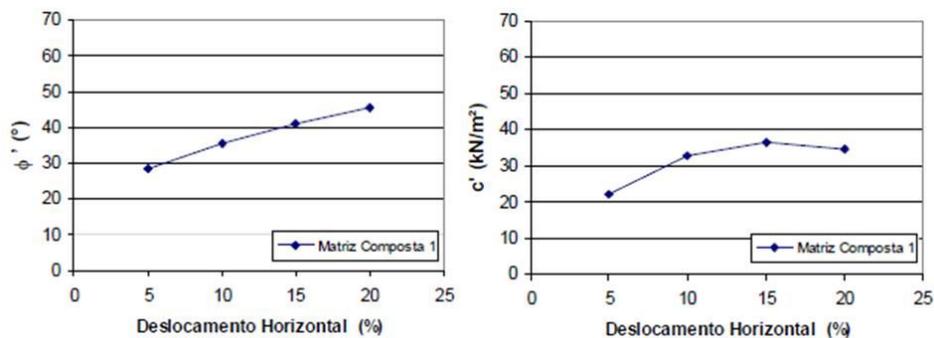


**Figura VI.8. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005)**

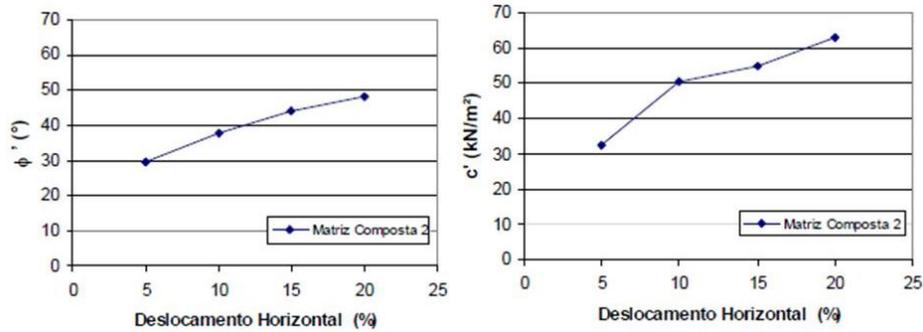


**Figura VI.9. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal – Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005)**

Fucale (2005) também obteve comportamento diferenciado para os resíduos pré-tratados das matrizes compostas 1 e 2, com 20% e 10% de componentes de reforço respectivamente, do Aterro de Buchen, Alemanha, onde obteve ângulos de atrito crescentes com o deslocamento horizontal. A coesão apresentou tendência à constância de valores a partir de 10% de deslocamento horizontal no primeiro caso e crescente com o deslocamento horizontal no segundo caso, conforme apresentado nas Figuras VI.10 e VI.11.



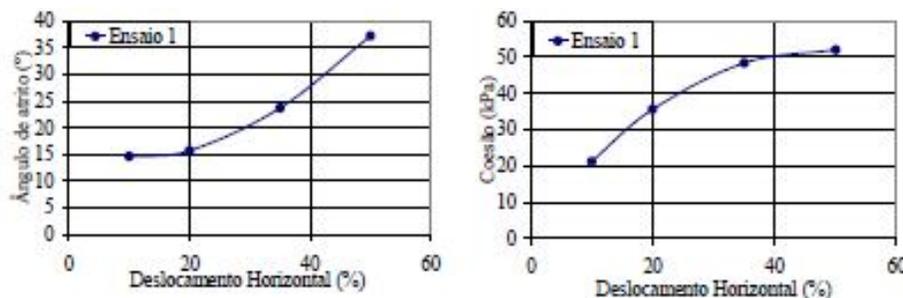
**Figura VI.10. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 1- Resíduos pré-tratados com 20% de reforço (FUCALE, 2005)**



**Figura VI.11. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 2- Resíduos pré-tratados com 10% de reforço (FUCALE, 2005)**

Com relação ao comportamento tensão-deslocamento, as curvas de deslocamento vertical ao longo do deslocamento horizontal das matrizes compostas 1 e 2 indicaram que as amostras sofreram inicialmente compressão e em seguida comportamento de dilatação na fase de cisalhamento. Comportamento diferenciado ao observado nas amostras de RSU deste trabalho, que só apresentaram compressão.

Os resultados de ensaios com resíduos frescos obtidos na literatura nacional são mais apropriados para efeito comparativo. Martins (2006) encontrou ângulo de atrito e coesão crescentes até 50% de deslocamento horizontal para amostras totais de resíduos de Belo Horizonte com diferentes densidades (Figuras VI.12 e VI.13). Da mesma forma, Cardim (2008) obteve valores crescentes até 50% de deslocamento horizontal para resíduos do Distrito Federal (Figuras VI.14, VI.15 e VI.16). No entanto, é importante mencionar que os trabalhos não foram realizados com resíduos pré-tratados mecanicamente para redução dos componentes.



**Figura VI.12. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos com  $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$  (MARTINS, 2006)**

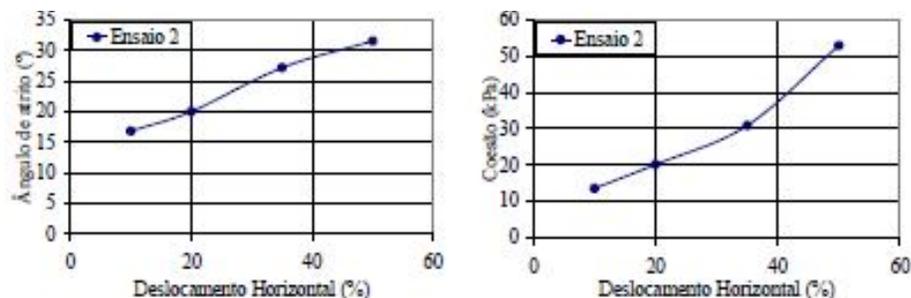


Figura VI.13. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos com  $\gamma = 8 \text{ kN/m}^3$  (MARTINS, 2006)

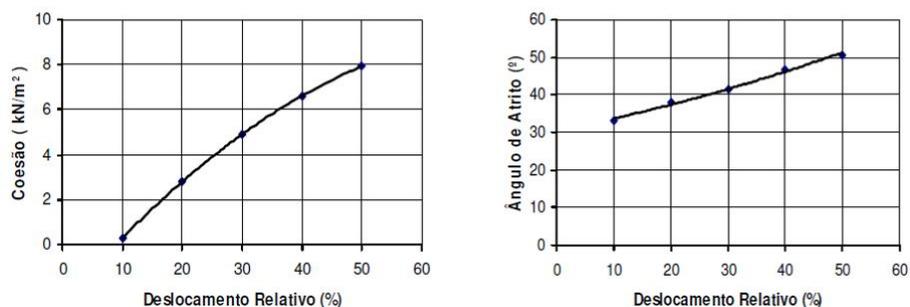


Figura VI.14. Variação da coesão e ângulo de atrito com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos – Ensaio 1 (CARDIM, 2008)

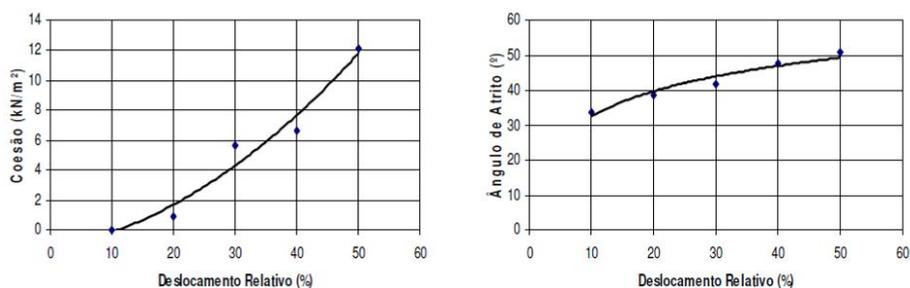


Figura VI.15. Variação da coesão e ângulo de atrito com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos – Ensaio 2 (CARDIM, 2008)

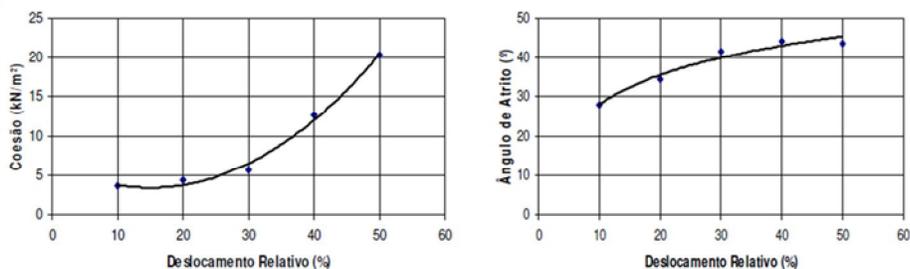


Figura VI.16. Variação da coesão e ângulo de atrito com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos – Ensaio 3 (CARDIM, 2008)

### 6.3.2 ENSAIOS COM AMOSTRAS DE RSU-RF

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões para as amostras de RSU-RF são apresentados através das curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo horizontal; e variação de altura versus deslocamento relativo horizontal, conforme Figuras VI.17 e VI.18.

Com relação ao comportamento das curvas tensão-deslocamento relativo e variação de altura versus deslocamento relativo, de forma semelhante à observada para as amostras de RSU, todas as amostras apresentam comportamento de redução de volume e nota-se o ganho de resistência com acréscimo de deslocamento horizontal para todos os níveis de tensão normal aplicados, não se definindo resistências de pico nas curvas, típico comportamento de material plástico com endurecimento. Desta forma, as envoltórias de resistência  $\tau \times \sigma$  (tensão cisalhante x tensão normal) foram estimadas em função do nível de deslocamento relativo (5, 10, 15 e 20%), Figura VI.19. Observa-se que todas as envoltórias de resistência apresentam leve tendência a um critério de ruptura bi-linear. No entanto, esta evidência só seria comprovada com a realização de ensaios com a aplicação de pelo menos cinco tensões normais diferentes.

A Tabela VI.4. apresenta os valores das tensões cisalhantes para diferentes níveis de deslocamento de acordo com as tensões normais aplicadas nos ensaios. Na Tabela VI.5 são mostrados os parâmetros de resistência obtidos para a amostra de resíduos sólidos urbanos pré-tratados mecanicamente com redução dos componentes fibrosos - RSU-RF.

**Tabela VI.4. Valores das tensões cisalhantes para diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas- RSU-RF**

$\sigma$ (kPa)	$\tau$ PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO (kPa)			
	5%	10%	15%	20%
25	14,6	21,3	25,8	33,0
50	26,9	36,4	47,4	52,4
75	35,7	43,2	52,3	64,9
100	46,2	52,5	60,8	72,9

**Tabela VI.5. Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para diferentes níveis de deslocamento horizontal - RSU-RF**

PARÂMETROS	NÍVEIS DE DESLOCAMENTO			
	5%	10%	15%	20%
$c'$ (kPa)	5,0	13,3	19,1	22,7
$\phi'$ (°)	22	20	21	23
$R^2$	0,996	0,972	0,905	0,963

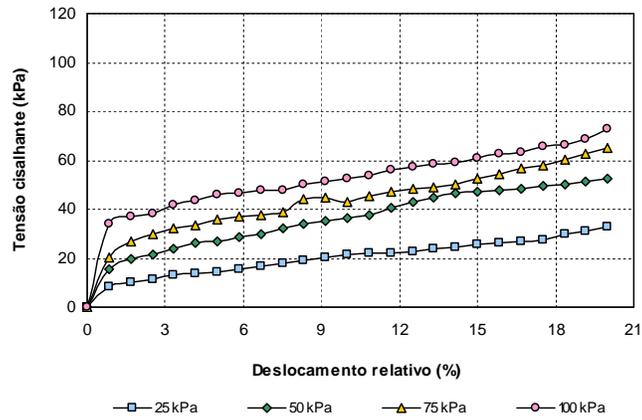


Figura VI.17. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo horizontal - RSU-RF

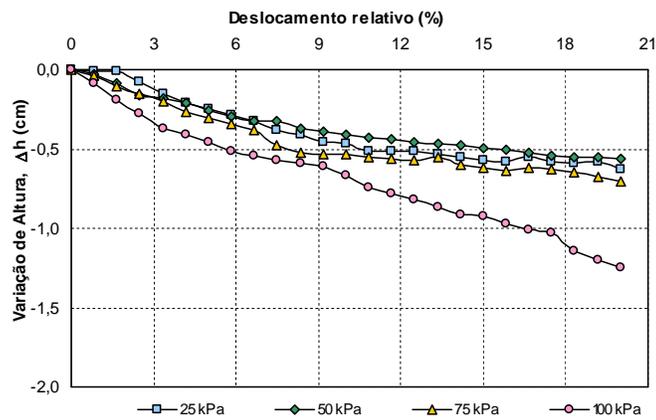


Figura VI.18. Variação de altura versus deslocamento relativo horizontal - RSU-RF

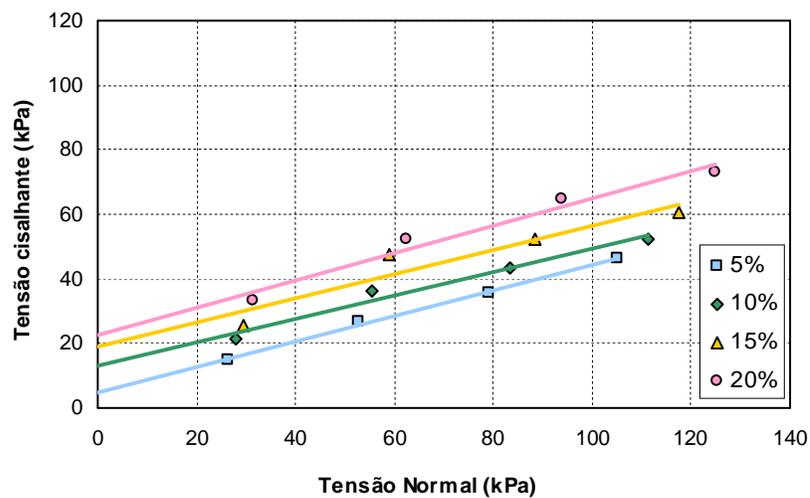
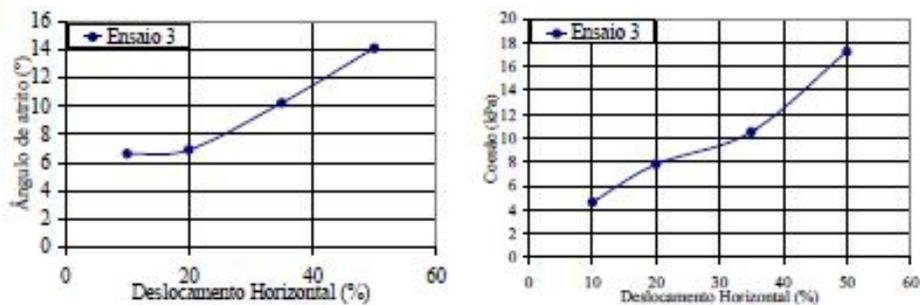


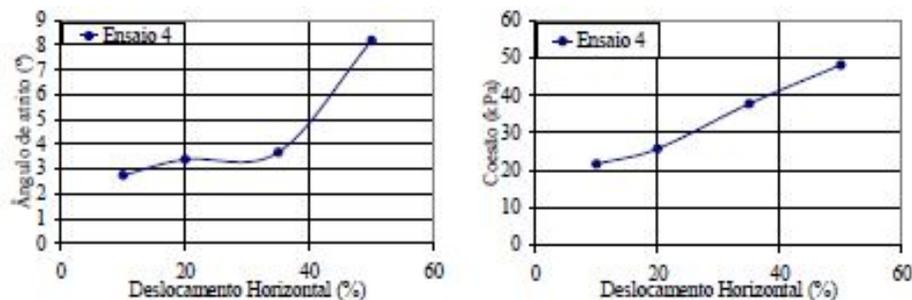
Figura VI.19. Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento relativo horizontal - RSU-RF

Observa-se que, mesmo com redução dos componentes fibrosos dos RSU, os valores da coesão tiveram um pequeno acréscimo com o nível de deslocamento horizontal, variando de 5 a 23 kPa. Já o ângulo de atrito, se apresentou quase constante com o aumento do deslocamento horizontal, com valores entre 20 e 23°. Os parâmetros obtidos para 20% de deslocamento relativo se apresentaram dentro das faixas recomendadas para projetos por Singh & Murphy (1990), apresentado na Figura II.32.

Não foi observada concordância destes resultados com os encontrados na literatura para os resíduos com redução das fibras. Martins (2006) obteve ângulo de atrito e coesão crescentes até 50% de deslocamento para amostras de resíduos frescos sem fibras de Belo Horizonte (Figuras VI.20 e VI.21).



**Figura VI.20. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos sem fibras na umidade natural (MARTINS, 2006)**



**Figura VI.21. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos frescos sem fibras com umidade inferior à natural (MARTINS, 2006)**

Fucale (2005) encontrou, a partir de 10% de deslocamento horizontal, ângulo de atrito decrescente e coesão crescente para a matriz básica dos resíduos sólidos velhos do Aterro de Ihlenberg, Alemanha (Figura VI.22), e com relação ao comportamento tensão-deslocamento, da mesma forma dos resultados obtidos para a matriz composta e matriz composta reforçada, observou-se que as curvas de deslocamento vertical ao longo do

deslocamento horizontal das duas matrizes indicaram que as amostras submetidas às tensões normais de 50 e 100 kN/m<sup>2</sup> sofreram inicialmente dilatação e em seguida apresentaram comportamento de compressão na fase de cisalhamento (Figura VI.23). Comportamento diferenciado ao observado nas amostras de RSU-LE deste trabalho, que só apresentaram redução de volume.

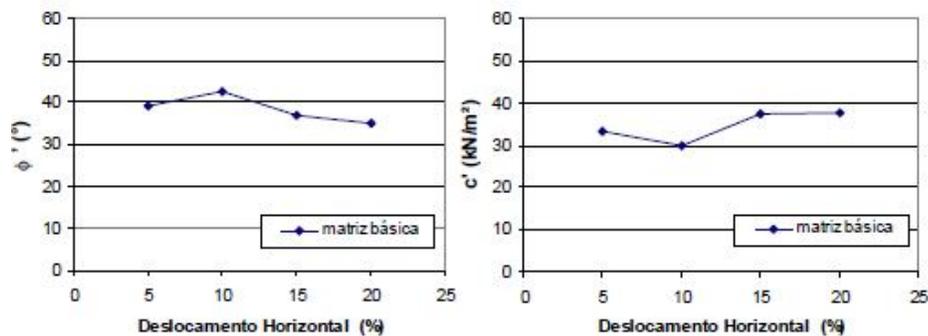


Figura VI.22. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005)

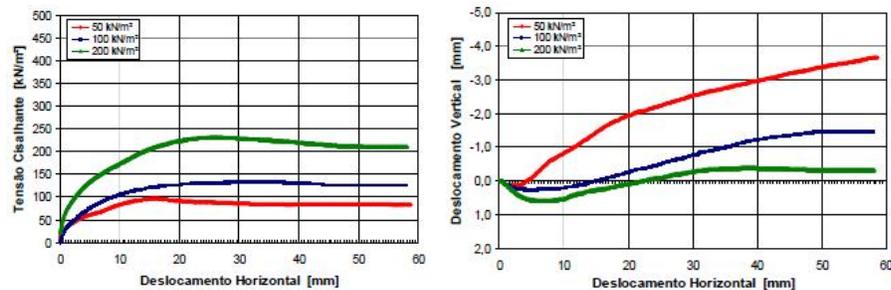
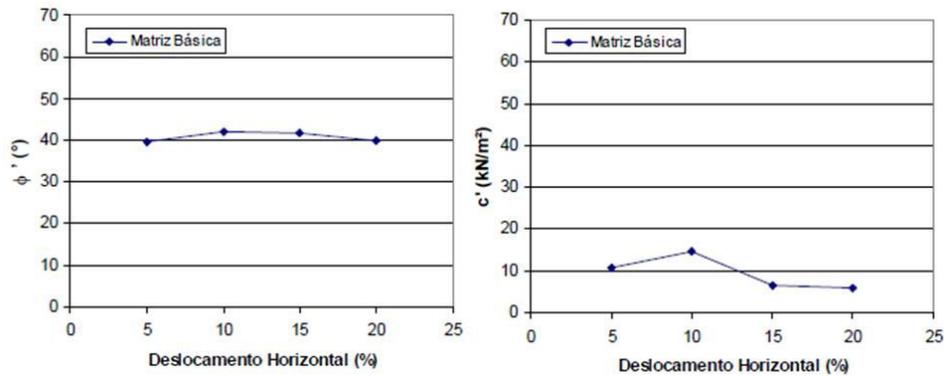


Figura VI.23. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005)

É provável que a altura do corpo de prova influencie nos resultados da variação do deslocamento vertical ao longo do deslocamento horizontal, como já visto nos testes iniciais do equipamento, realizados com solo arenoso na atual pesquisa. Como a altura total do corpo de prova é muito grande comparada à altura que sofre influência do rearranjo das partículas no plano de ruptura, não se constata o comportamento do real deslocamento vertical.

Fucale (2005) também obteve comportamento diferenciado para a matriz básica dos resíduos pré-tratados, do Aterro de Buchen, Alemanha, onde obteve ângulos de atrito

com tendência a constância de valores. A coesão se apresentou decrescente a partir de 10% de deslocamento horizontal, conforme apresentado na Figura VI.24.



**Figura VI.24. Variação do ângulo de atrito e coesão com diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos (FUCALE, 2005)**

### 6.3.3 ENSAIOS COM AMOSTRAS DE RSU-LE

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões para as amostras de RSU-LE são apresentados através das curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo horizontal; e variação de altura versus deslocamento relativo horizontal, conforme Figuras VI.25 e VI.26.

Com relação ao comportamento das curvas tensão-deslocamento relativo e variação de altura versus deslocamento relativo, de forma semelhante às observadas para as amostras de RSU e RSU-RF, observa-se que todas as amostras apresentam comportamento de redução de volume, ganho de resistência com o acréscimo de deslocamento horizontal e ausência de comportamento de pico, típico comportamento de material plástico com endurecimento. Verifica-se que independente da sua composição, os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento dos resíduos, conforme apresentado em várias pesquisas, apresentaram ganho de resistência com o acréscimo de deslocamento horizontal e não apresentam comportamento de pico. Da mesma forma, as envoltórias de resistência  $\tau \times \sigma$  (tensão cisalhante  $\times$  tensão normal) foram estimadas em função de diferentes níveis de deslocamento horizontal (5, 10, 15 e 20%), Figura VI.27.

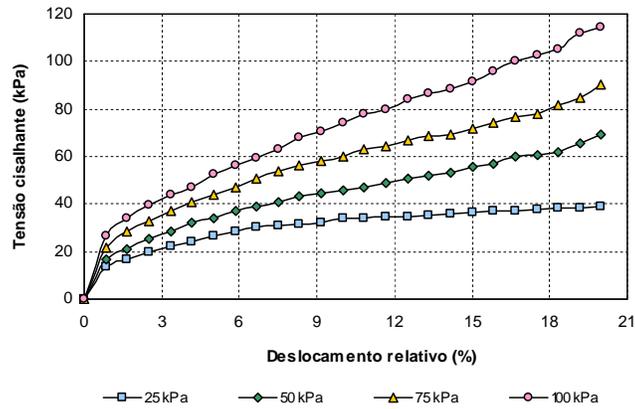


Figura VI.25. Curvas tensão cisalhante versus deslocamento relativo horizontal - RSU-LE

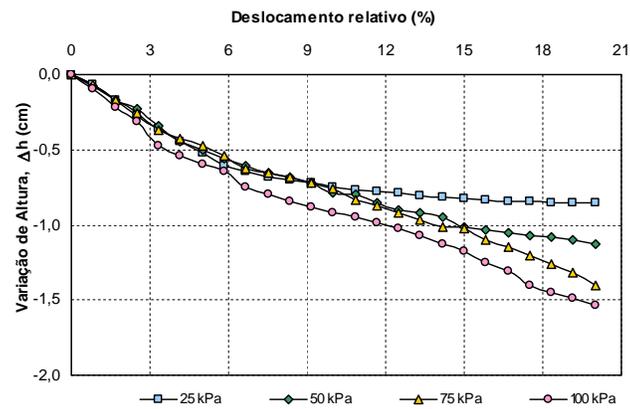


Figura VI.26. Variação de altura versus deslocamento relativo horizontal - RSU-LE

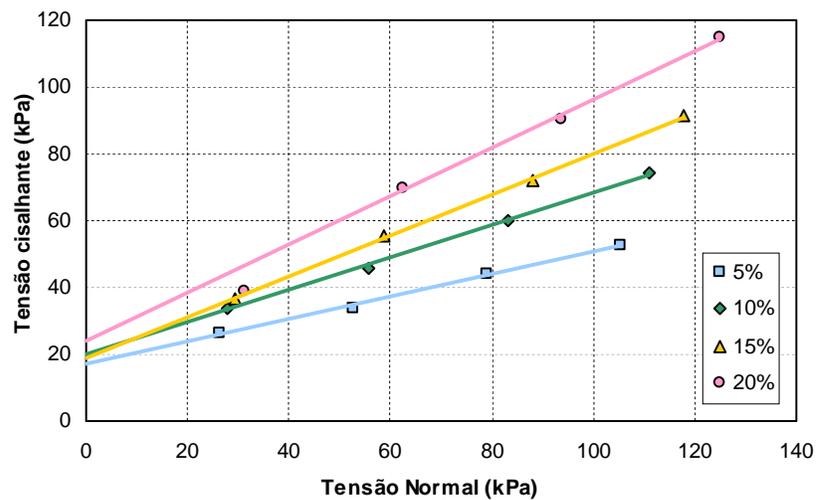


Figura VI.27. Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento relativo horizontal - RSU-LE

A Tabela VI.6. apresenta os valores das tensões cisalhantes para diferentes níveis de deslocamento de acordo com as tensões normais aplicadas nos ensaios. Na Tabela VI.7 são mostrados os parâmetros de resistência obtidos para a amostra de resíduos sólidos urbanos pré-tratados mecanicamente com adição de lodo residual do tratamento do esgoto - RSU-LE.

**Tabela VI.6. Valores das tensões cisalhantes para diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas- RSU-LE**

$\sigma_N$ (kPa)	$\tau$ PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DESLOCAMENTO (kPa)			
	5%	10%	15%	20%
25	26,3	33,9	36,6	38,9
50	33,9	45,7	55,6	69,4
75	43,9	60,2	71,9	90,3
100	52,6	74,1	91,5	114,6

**Tabela VI.7. Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para diferentes níveis de deslocamento horizontal - RSU-LE**

PARÂMETROS	NÍVEIS DE DESLOCAMENTO			
	5%	10%	15%	20%
$c'$ (kPa)	17,0	19,8	19,1	23,7
$\phi'$ (°)	19	26	31	36
$R^2$	0,997	0,998	0,997	0,998

Observa-se que a coesão apresentou um pequeno acréscimo, com tendência a constância de valores com o aumento do deslocamento relativo horizontal, com valores entre 17 e 24 kPa. Já os valores do ângulo de atrito aumentam com o nível de deslocamento horizontal, variando de 19 a 36°.

Não foram encontrados, na literatura consultada, dados de ensaios de cisalhamento direto com amostras de resíduos com adição de lodo. Mas, analisando-se os resultados em relação aos obtidos apenas para resíduos por meio de ensaios de laboratório por Jessberger (1990); Jessberger & Köckel (1993); Reunter (1995) e Kockel (1995), pode se constatar que em relação aos ângulos de atrito determinados, os valores estão de acordo com a variação dos parâmetros de resistência em função das deformações. Já que segundo os autores, em geral, o valor limite do ângulo de atrito é mobilizado para deformações máximas de 20%. No entanto, em relação à coesão, os resultados apresentaram uma tendência à constância de valores.

## 6.3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação ao comportamento das curvas tensão-deslocamento relativo e variação de altura versus deslocamento relativo horizontal, todas as amostras de resíduos ensaiadas apresentaram comportamento de redução de volume, ganho de resistência com o acréscimo de deslocamento e ausência de comportamento de ruptura. Apresentando típico comportamento de material plástico com endurecimento. Para comparar os valores dos parâmetros de resistência obtidos a 20% de deslocamento relativo horizontal com alguns valores encontrados na literatura, apresenta-se a Tabela VI.8.

**Tabela VI.8. Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para 20% de deslocamento relativo horizontal**

FONTE	CARACTERÍSTICAS DO CORPO DE PROVA	PARÂMETROS		LOCAL
		$\phi$ (°)	c (kN/m <sup>2</sup> )	
Dados obtidos	RSU (fresco)	28	34	CTR Igarassu
	RSU-RF (fresco)	23	23	
	RSU-LE (fresco)	36	24	
Kölsch (1990)	Resíduo fresco	26,4	-	-
Münnich (2001)	Resíduo pré-tratado (2 anos)	22,9 e 26,4	59,7 e 17	Aterro de Pinnow, Alemanha
Fucale (2005)	Matriz básica (resíduos velhos)	34,9	37,8	Aterro de Ihlenberg, Alemanha
	Matriz composta (resíduos velhos)	46,1	29,6	
	Matriz composta reforçada (resíduos velhos)	47,0	37,1	
	Matriz básica (resíduos pré-tratados)	40,1	6,0	Aterro de Buchen, Alemanha
	Matriz composta 1 (resíduos pré-tratados)	45,4	34,7	
	Matriz composta 2 (resíduos pré-tratados)	48,1	63,1	
Martins (2006)	Resíduos frescos	15,7 e 20,0	35,6 e 20,2	Aterro em Belo Horizonte, MG
	Resíduos frescos (sem fibras)	6,9 e 3,4	7,8 e 25,7	
Cardim (2008)	Resíduos frescos	38,6; 38,5 e 34,5	2,8; 1 e 4,35	Usina de compostagem - DF

Os dados obtidos para a coesão dos RSU estão dentro da faixa de valores encontrada por Fucale (2005) para a matriz composta e matriz composta reforçada de resíduos velhos e da matriz composta 1 dos resíduos pré-tratados e encontrada por Martins (2006) para os resíduos frescos, e diferem muito dos valores encontrados por Kölsch (1990), Münnich (2001) e Cardim (2008). Observa-se que os valores encontrados por Cardim (2008) para a coesão foram muito baixos, provavelmente devido às baixas tensões

normais utilizadas nos ensaios, que não garantiam a ancoragem das fibras, permitindo seu deslizamento.

Observa-se que os dados obtidos para o ângulo de atrito dos RSU estão dentro da faixa de valores encontrados por Kölsch (1990) e Münnich (2001), muito baixos quando comparados com os valores encontrados por Fucale (2005) para a matriz composta e matriz composta reforçada dos resíduos velhos e das matrizes compostas 1 e 2 dos resíduos pré-compostos e encontrados por Cardim (2008) para os resíduos frescos, e mais altos que os valores encontrados por Martins (2006) para os resíduos frescos. No entanto, os valores obtidos por Fucale (2005) foram para resíduos velhos, já estabilizados, e os resultados obtidos por Martins (2006) e Cardim (2007) foram para resíduos frescos, mas sem pré-tratamento das amostras para redução dos seus componentes.

Em relação aos parâmetros encontrados para os RSU-RF, o ângulo de atrito se apresentou bem mais baixo que o encontrado por Fucale (2005) para a matriz básica dos resíduos sólidos velhos e dos resíduos pré-tratados e bem mais alto que os valores obtidos por Martins (2006) para resíduo fresco sem fibras. A coesão se apresentou bem inferior à da matriz básica dos resíduos sólidos velhos, mais elevada que a da matriz básica dos resíduos pré-tratados encontradas por Fucale (2005) e próximo a um dos valores encontrados por Martins (2006). Essa análise comparativa se torna difícil em virtude da diferença das amostras dos resíduos utilizadas nos ensaios destes autores em relação às do presente trabalho.

Com isto, pode-se afirmar que a grande variabilidade dos valores para os parâmetros de resistência dos RSU encontrados na literatura é resultado de uma combinação de fatores, tais como: composição; tamanho das partículas; processamento das amostras; tensões normais aplicadas; níveis máximos de deslocamento horizontal; a falta de uma metodologia padronizada, que reproduza o comportamento mecânico dos RSU, dentre outros.

Para facilitar a análise da influência das fibras e do lodo na resistência dos RSU, as variações dos parâmetros de resistência ( $\phi'$  e  $c'$ ) para diferentes níveis de deslocamento horizontal, obtidos nos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões com as amostras RSU, RSU-RF e RSU-LE são apresentadas na Figura VI.28.

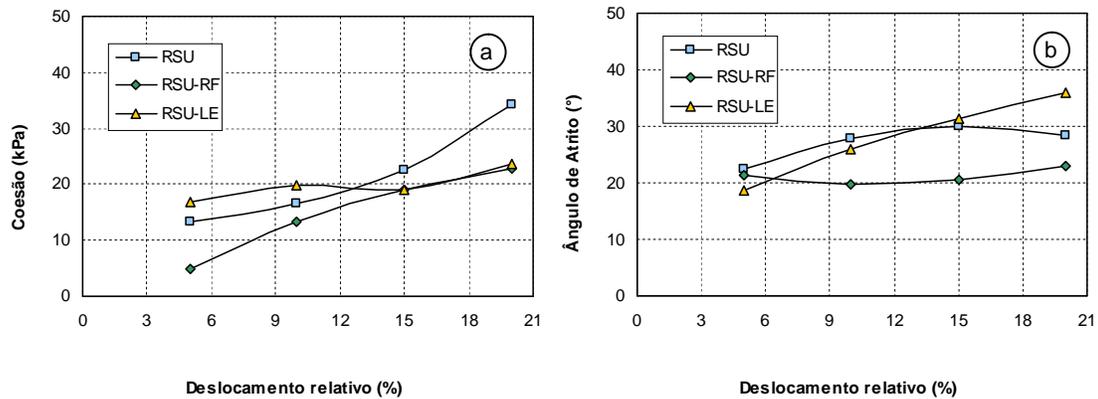


Figura VI.28. Variação dos parâmetros de resistência: (a)  $\phi'$  e (b)  $c'$  para diferentes níveis de deslocamento horizontal – RSU, RSU-RF e RSU-LE

• *INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DOS RSU*

Observa-se no gráfico, apresentado na Figura VI.28a, que existe uma tendência ao aumento da coesão com o deslocamento relativo horizontal para as amostras de RSU e RSU-RF. No entanto, na amostra de resíduos com redução do teor de fibras esta tendência é menos pronunciada. Esse comportamento associado à constância de valores obtidos para o ângulo de atrito, principalmente para os RSU-RF (Figura VI.28b), contribui para ratificar a suposição de que a coesão dos RSU seja relativa à parcela de tração das fibras presente na sua composição, denominada “coesão aparente das fibras”.

Como o ângulo de atrito se manteve numa mesma faixa de valores, considerando que a parcela relativa ao ângulo de atrito é comandada pela matriz básica, ou seja, pelos componentes não fibrosos dos resíduos, podem-se considerar valores da ordem de 20 a 30° para o ângulo de atrito dos resíduos analisados.

• *INFLUÊNCIA DO LE NOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DOS RSU*

Observa-se no gráfico, apresentado na Figura VI.28a, que a codisposição do LE misturado aos RSU elevou a coesão em relação às amostras de RSU até 10% de deslocamento relativo horizontal e o ângulo de atrito para deslocamentos superiores a 15%. Apesar dos valores para a variação da coesão das amostras de RSU e RSU-LE até 15% de deslocamento relativo horizontal se apresentarem muito próximos, a tendência ao aumento da coesão com o deslocamento relativo horizontal observada para a amostra

de RSU não foi verificada na amostra de RSU-LE, já que a mesma apresentou tendência à constância de valores. A partir de 15% de deslocamento, os valores da coesão dos RSU-LE coincidem com a amostra de RSU-RF. Esse comportamento pode estar associado ao acréscimo percentual do teor de partículas finas nos resíduos, gerado pela adição de lodo.

Os valores obtidos para a variação do ângulo de atrito com o deslocamento relativo horizontal da amostra de RSU-LE (Figura VI.28b) se apresentaram crescentes com o deslocamento relativo horizontal, mas se mantiveram na mesma faixa encontrada para os RSU até 15% de deslocamento. No entanto, a 20% de deslocamento, o ângulo de atrito dos RSU apresenta uma redução, enquanto o ângulo de atrito dos RSU-LE continua a aumentar de forma linear, chegando próximo ao valor do ângulo de atrito obtido no ensaio de cisalhamento convencional com o lodo compactado.

Através do comportamento observado para a amostra de RSU-LE, pode-se concluir que se determinado percentual de LE for disposto no aterro misturado aos RSU, pode até contribuir para um incremento na resistência ao cisalhamento, devido ao incremento no parâmetro de atrito. No entanto, outros fatores devem ser analisados em conjunto, tais como: compactação, teor de umidade, percentual máximo de LE e eficiência dos sistemas de drenagem de gases e líquidos do aterro para uma afirmação genérica a esse respeito.

## CAPÍTULO VII

### ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERRO DE RSU SIMULADO

Uma análise de estabilidade de talude de um aterro de RSU simulado foi realizada com objetivo de se avaliar o efeito das fibras como componente de reforço e as poro-pressões do excesso de biogás como agente de instabilização. Foi utilizado o programa GGU Stability, e como dados de entrada: uma geometria comumente empregada a taludes em projetos de aterros sanitários, parâmetros de resistência encontrados na literatura e valores recomendados por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997) para efeito comparativo com os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento de grandes dimensões realizados nesta pesquisa, e variação do parâmetro  $r_u$  para verificação das poro-pressões de lixiviado e biogás na estabilidade.

A estabilidade de taludes é uma questão geotécnica de grande responsabilidade em projeto e operação de aterros de RSU. A geometria final dos taludes de um aterro sanitário deve oferecer uma conformação que proporcione um nível de risco mínimo para o entorno do aterro. Esta geometria está relacionada às condições de controle da estabilidade dos taludes, de drenagem interna de gases e de lixiviado, além dos critérios operacionais e construtivos, depende ainda, da grande deformabilidade do maciço de resíduos sólidos.

Colomer *et al.* (2009) apresenta algumas considerações para geometria adequada em projetos de aterros. Inicialmente, deve-se atentar para o cumprimento da legislação vigente. Em relação à geometria, a normativa de países como Canadá determina a inclinação de 4:1 (h:v), que corresponde a uma declividade de 14°. Com esta inclinação, se assegura a estabilidade de taludes com alturas superiores a 60 m, condições de saturação e coeficientes sísmicos superiores a 0,15 (FS = 1,41). Mas nem todas as legislações definem essa declividade, a maioria só determina que os taludes sejam estáveis (Filipinas, União Européia, Japão e Índia) ou se limitam a definir uma inclinação máxima de 3:1 (h:v) (Chile, Austrália e África do Sul). Estes taludes, em condições normais permanecem estáveis, mesmo para grandes alturas. No entanto, no caso de chuvas intensas, movimentos sísmicos ou acumulação excessiva de biogás no interior da massa de resíduos, poderia ocasionar um deslizamento.

## 7.1 METODOLOGIA DAS ANÁLISES

### • *GEOMETRIA*

Para as análises, foi empregada a geometria definida usualmente em projetos no Brasil, que preconiza a implantação de células de resíduos executadas em camadas de 5,0 m de altura, com taludes externos na inclinação máxima de 2:1 (h:v) e bermas intermediárias com 6,0 m de largura, que auxiliam o equilíbrio do maciço. Para as análises da estabilidade de taludes de RSU, foi concebida a altura total de 60 m. A Figura VII.1 apresenta a visualização do perfil utilizado para as análises.



**Figura VII.1. Perfil dos taludes de RSU utilizado nas análises de estabilidade**

### • *MÉTODO*

A análise da estabilidade de taludes foi realizada com o programa GGU-Stability que realiza os cálculos de acordo com a Norma Alemã DIN 4084 (1981 e 2000), que descrevem todos os fundamentos do cálculo detalhadamente. Nesta análise foi utilizado o método de fatias de Bishop (1955), que tem superfície de ruptura circular, considera a hipótese de que a resultante das forças entre as fatias é horizontal e que faz uma análise bidimensional utilizando a teoria de equilíbrio limite para calcular o fator de segurança (FS), baseado na Equação VII.1:

$$\eta = \frac{r \cdot \sum T_i + \sum M_s}{r \cdot \sum G_i \cdot \text{sen} \vartheta_i + \sum M} \quad (\text{VII.1})$$

Sendo:

$$T_i = \frac{[G_i - (u_i + \Delta u_i) \cdot b_i] \tan \varphi + c_i \cdot b_i}{\cos \vartheta_i + \frac{1}{\eta} \tan \varphi_i \cdot \sin \vartheta_i} \quad (\text{VII.2})$$

Onde:  $\eta$  é o fator de segurança do terreno ou da estabilidade de talude;  $G_i$  é o peso próprio da fatia em kN/m, considerando o valor do peso unitário, incluindo as sobrecargas;  $M$  são os momentos das cargas e forças, sem incluir  $G_i$ , em torno do centro da superfície de escorregamento circular em kNm/m;  $M_s$  são os momentos em torno do centro da superfície de escorregamento circular em kNm/m, que não são considerados em  $T_i$ ;  $T_i$  é a força tangencial resistente do solo na superfície de escorregamento circular para cada fatia em kN/m;  $\vartheta_i$  é o ângulo tangencial da fatia com relação à horizontal em graus;  $r$  é o raio da superfície de escorregamento circular em m;  $b_i$  é a largura da fatia em m;  $\varphi_i$  é o ângulo de atrito em graus;  $c_i$  é a coesão em kN/m<sup>2</sup>;  $u_i$  é a poro-pressão em kN/m<sup>2</sup>; e  $\Delta u_i$  é a poro-pressão para a fatia em kN/m<sup>2</sup>.

Os parâmetros geotécnicos necessários para a análise de estabilidade de talude sem considerar o efeito de reforço das fibras, utilizando-se o programa GGU-Stability, são: ângulo de atrito interno, coesão e peso específico dos materiais envolvidos.

Para a análise do efeito de reforço conferido pelas fibras, considera-se a ativação de um parâmetro, obtido com: um ângulo de tensão de tração ( $\zeta$ ), um fator de correção para a ativação das fibras ( $a_\zeta$ ) e a tensão de tração das fibras ( $z_{\max}$ ). A equação para a análise, neste caso, é dada pela Equação VII.3, apresentada anteriormente (Equação II.5\*):

$$T = \frac{G \cdot \tan \varphi_{GM} + c_{GM} \cdot b + G \cdot \tan \zeta \cdot a_\zeta \cdot \sin (1,5\vartheta)}{\mu \cdot \sin \vartheta \cdot \tan \varphi_{GM} + \cos \vartheta} \quad (\text{VII.3})$$

---

\* Sendo: GM = matriz básica (do alemão Grund Matrix);  $\varphi_{GM} = \phi$  que é o ângulo de atrito (°);  $c_{GM} = c$  que é a coesão (kN/m<sup>2</sup>);  $\vartheta = \alpha$  que é o ângulo da superfície de ruptura com a direção das fibras (°); e  $\mu = 1/FS$

Para a análise do efeito das poro-pressões do excesso de biogás como agente de instabilização, simulando condições de drenagem interna do aterro insuficiente, admite-se que o incremento na poro-pressão do gás contribui na poro-pressão de líquidos. Esta diferença é representada através da variação do parâmetro  $r_u$  que equivale à aplicação de um valor de poro-pressão na base de cada fatia, conforme Equação VII.4:

$$r_u = \frac{u}{\sigma} \quad (\text{VII.4})$$

Onde:  $u$  é a poro-pressão ( $\text{kN/m}^3$ ) e  $\sigma$  é a tensão vertical total na base da fatia ( $\text{kN/m}^3$ ).

Considerando a poro-pressão e a tensão vertical total na base da fatia de acordo com as Equações VII.5 e VII.6, respectivamente:

$$u = H_{\text{sat}} \cdot \gamma_w \quad (\text{VII.5})$$

$$\sigma = \gamma_{\text{sat}} \cdot H_{\text{sat}} + \gamma(H - H_{\text{sat}}) \quad (\text{VII.6})$$

Onde:  $H_{\text{sat}}$  é a altura dos RSU saturados (m);  $\gamma_w$  é o peso específico do lixiviado ( $\text{kN/m}^3$ );  $\gamma_{\text{sat}}$  é o peso específico dos RSU saturados ( $\text{kN/m}^3$ );  $\gamma$  é o peso específico dos RSU ( $\text{kN/m}^3$ ) e  $H$  é a altura total da fatia (m).

Pode-se escrever a Equação VII.4 como:

$$r_u = \frac{u}{\sigma} = \frac{H_{\text{sat}} \cdot \gamma_w}{\gamma_{\text{sat}} \cdot H_{\text{sat}} + \gamma(H - H_{\text{sat}})} \quad (\text{VII.7})$$

#### • *SIMULAÇÕES*

Foram admitidos seis estudos de caso para as análises de estabilidade de talude de aterro de RSU simulado:

1. Parâmetros de resistência obtidos na literatura, sem considerar a ativação do efeito das fibras nas análises;
2. Parâmetros de resistência obtidos na literatura, considerando o efeito das fibras de acordo com GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997);
3. Parâmetros de resistência recomendados por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997), considerando o efeito das fibras;
4. Parâmetros de resistência das amostras RSU, RSU-RF e RSU-LE, obtidos nos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões da presente pesquisa, sem considerar a ativação do efeito das fibras nas análises;
5. Parâmetros de resistência das amostras RSU-LE, obtidos na presente pesquisa, considerando o efeito das poro-pressões de lixiviado e biogás;
6. Parâmetros de resistência das amostras RSU, obtidos na presente pesquisa, considerando a ativação do efeito das fibras nas análises de acordo com GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997).

Os dois primeiros casos apresentam uma análise paramétrica para avaliação do incremento gerado no fator de segurança através da incorporação do efeito das fibras nos RSU. A Tabela VII.1 apresenta os parâmetros: ângulo de atrito interno, coesão, e peso específico utilizados para a análise da estabilidade de taludes dos RSU (Caso 1).

**Tabela VII.1. Parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU sem considerar o efeito das fibras (Caso 1)**

$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
8; 10; 12	1; 10; 20	10 a 24

Os valores foram escolhidos para a condição mais desfavorável à estabilidade dentre os valores citados na literatura, sendo o ângulo de atrito variável para se determinar a faixa de valores para o fator de segurança na condição de equilíbrio limite, próximo a 1, extrapolando até 1,5. O peso específico foi considerado de compactado a bem compactado, conforme dados citados na literatura (valores apresentados na Tabela II.3) e dados utilizados em projetos.

Para o Caso 2, foram utilizados os mesmos parâmetros das análises do Caso 1, incorporando a parte do efeito das fibras representada pelos parâmetros  $\zeta$ ;  $a_z$  e  $z_{max}$ . A Tabela VII.2 apresenta os valores recomendados por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997) utilizados para as análises dos Casos 2,

3 e 6. Para uma mistura homogênea (base e fibra), o fator de correção pode ser 1, no entanto o conhecimento sobre o comportamento dos resíduos é limitado, desta forma a ativação de 0,7 é recomendada por Kölsch (1996).

**Tabela VII.2. Parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU considerando o efeito das fibras (Casos 2, 3 e 6)**

MATERIAL	RSU NOVO	RSU ANTIGO
$\phi$ (°)	25	30
$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	10	15
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	9	11
$\zeta$ (°)	35	20
$a_{\zeta}$	0,7 - 1,0	0,7 - 1,0
$z_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	210	110

A análise do Caso 4 é referente aos parâmetros de resistência obtidos através dos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões realizados na presente pesquisa. Foram considerados os valores referentes a 20% de deslocamento relativo horizontal. Os valores estão apresentados na Tabela VII.3.

**Tabela VII.3. Parâmetros geotécnicos obtidos nos ensaios de cisalhamento direto utilizados nas análises de estabilidade de taludes sem considerar o efeito das fibras (Caso 4)**

MATERIAL	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
RSU		34	28
RSU-RF	9	23	23
RSU-LE		24	36

O Caso 5 representa o incremento nas poro-pressões gerado pelo excesso de lixiviados e biogás na amostra de RSU-LE, na condição não drenada. Foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela VII.3 para os RSU-LE, incorporado nas análises o parâmetro  $r_u$  variando de 0 até o  $r_{uc}$  ( $r_u$  crítico), na condição limite para a ruptura. Através do conhecimento do  $r_{uc}$ , apresenta-se uma estimativa das poro-pressões máximas de lixiviados e biogás.

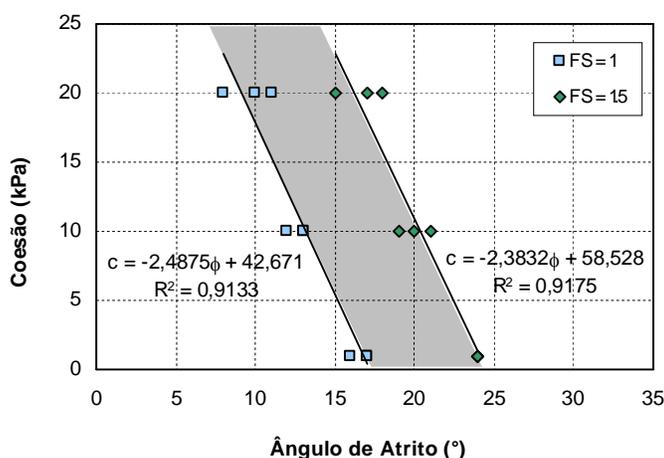
A análise do Caso 6 simula o efeito das fibras na amostra de RSU. Foram considerados os valores para o ângulo de atrito, da ordem de 20 a 30°, obtidos nesta pesquisa para o RSU novo e os demais parâmetros utilizados, apresentados na Tabela VII.2, são os recomendados por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997).

## 7.2 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados para a condição de equilíbrio limite (FS = 1), extrapolando até 1,5 para uma condição de segurança, encontrados nas análises do Caso 1 estão apresentados na Tabela VII.4. A Figura VII.2 apresenta uma relação entre os pares de parâmetros  $c$  e  $\phi$  encontrados para a condição de equilíbrio limite até a condição de taludes seguros.

**Tabela VII.4. Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU para o FS da condição de equilíbrio limite, sem considerar o efeito das fibras - Caso 1**

$\phi$ (°)	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	FS
16 - 24	1		1.00 - 1.53
12 - 19	10	8	1.03 - 1.51
8 - 15	20		1.01 - 1.49
17 - 24	1		1.06 - 1.52
13 - 20	10	10	1.05 - 1.52
10 - 17	20		1.05 - 1.52
17 - 24	1		1.05 - 1.51
13 - 21	10	12	1.01 - 1.54
11 - 18	20		1.05 - 1.53



**Figura VII.2. Faixa de parâmetros obtidos na análise paramétrica para os fatores de segurança da condição de equilíbrio limite até a condição de segurança (Caso 1)**

Considerando a faixa encontrada para os pares de parâmetros, observa-se que os valores são inferiores aos recomendados para projeto por Singh & Murphy (1990), apresentado na Figura II.32. No entanto, a área de parâmetros considerados mais conservadores (Figura II.33), recomendados por Sánchez-Alciturri *et al.* (1993), se situaram praticamente dentro da faixa encontrada. Neste caso, para a geometria do talude proposta, os parâmetros de resistência dos RSU recomendados para projeto por

Sánchez-Alciturri *et al.* (1993) estariam estimando FS muito próximos à condição de equilíbrio limite.

Utilizando os mesmo valores de parâmetros de resistência do Caso 1, foi simulada a ativação das fibras, para RSU novo e antigo, nas análises do Caso 2. Desta forma, foram obtidos os valores apresentados na Tabela VII.5.

**Tabela VII.5. FS determinados com parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU do Caso 1, com ativação do efeito das fibras - Caso 2**

RSU Novo						
$\phi$ (°)	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\zeta$ (°)	$\alpha$	$z_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	FS
16 - 24	1					1.80 - 2.32
12 - 19	10	8	35	0.7	210	1.94 - 2.43
8 - 15	20					1.97 - 2.47
17 - 24	1					1.84 - 2.30
13 - 20	10	10	35	0.7	210	1.94 - 2.43
10 - 17	20					1.97 - 2.48
17 - 24	1					1.83 - 2.26
13 - 21	10	12	35	0.7	210	1.89 - 2.44
11 - 18	20					1.89 - 2.46
RSU ANTIGO						
$\phi$ (°)	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\zeta$ (°)	$\alpha$	$z_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	FS
16 - 24	1					1.43 - 1.96
12 - 19	10	8	20	0.7	110	1.55 - 2.04
8 - 15	20					1.55 - 2.07
17 - 24	1					1.48 - 1.94
13 - 20	10	10	20	0.7	110	1.55 - 2.04
10 - 17	20					1.59 - 2.09
17 - 24	1					1.47 - 1.89
13 - 21	10	12	20	0.7	110	1.51 - 2.06
11 - 18	20					1.55 - 2.07

Observa-se nos resultados da análise do Caso 1, Tabela VII.4, que valores menores que 24° para o ângulo de atrito não oferecem taludes com nível de segurança alto (FS  $\geq$  1,50), conforme NBR 11.682 (ABNT, 2009). No entanto, ao se adicionar o efeito das fibras (Caso 2), todos os fatores de segurança se apresentaram maiores ou muito próximos a 1,5 para os resíduos novos e antigos, inclusive para um ângulo de atrito de 10°. Verificou-se que existe um incremento da ordem de 90% nos fatores de segurança mínimos encontrados para os mesmos parâmetros de resistência dos RSU novos com a ativação das fibras e cerca de 50% em relação aos RSU antigos.

Para uma melhor visualização destes resultados, os Casos 1 e 2 foram comparados também, através do gráfico FS versus ângulo de atrito, apresentado na Figura VII.3.

Através do gráfico, pode-se observar claramente o incremento gerado no fator de segurança da condição de equilíbrio limite devido à ativação do efeito de reforço das fibras, tanto para os RSU novos quanto para os RSU antigos.

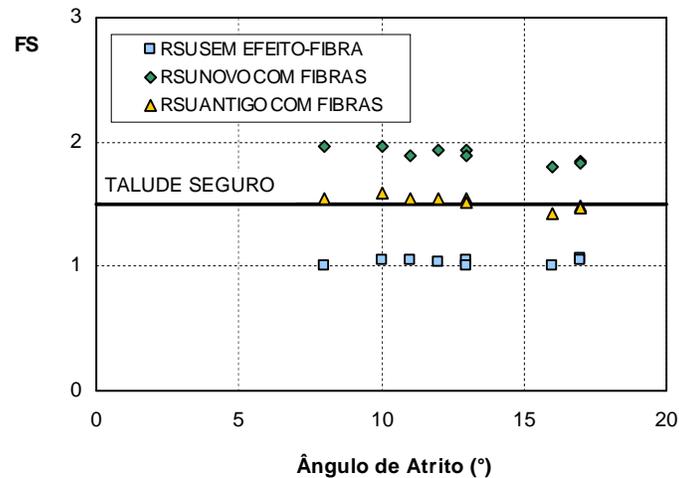


Figura VII.3. FS versus ângulo de atrito (Casos 1 e 2)

Para o Caso 3, utilizando os valores recomendados por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997), foram obtidos os fatores de segurança apresentados na Tabela VII.6, que refletem uma condição de talude seguro para os RSU novos ou antigos. Esta condição apresentada é resultado de parâmetros obtidos após uma ampla campanha de ensaios. No entanto, deve-se levar em conta que nestas análises não são considerados os efeitos do excesso de poro-pressão, pois se considera um eficiente sistema de drenagem de líquidos e gases.

Tabela VII.6. FS determinados para os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU com ativação do efeito das fibras, recomendados por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997) - Caso 3

MATERIAL	$\phi$ (°)	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\zeta$ (°)	$\alpha$	$z_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	FS
RSU NOVO	25	10	9	35	0.7	210	2,83
RSU ANTIGO	30	15	11	20	0.7	110	2,93

Nas Figuras VII.4 e VII.5 são apresentados os dados de saída do programa para a situação mais crítica de cada hipótese analisada. São determinados fator de segurança mínimo, a superfície potencial de ruptura, a localização do centro e respectivo raio da superfície crítica.

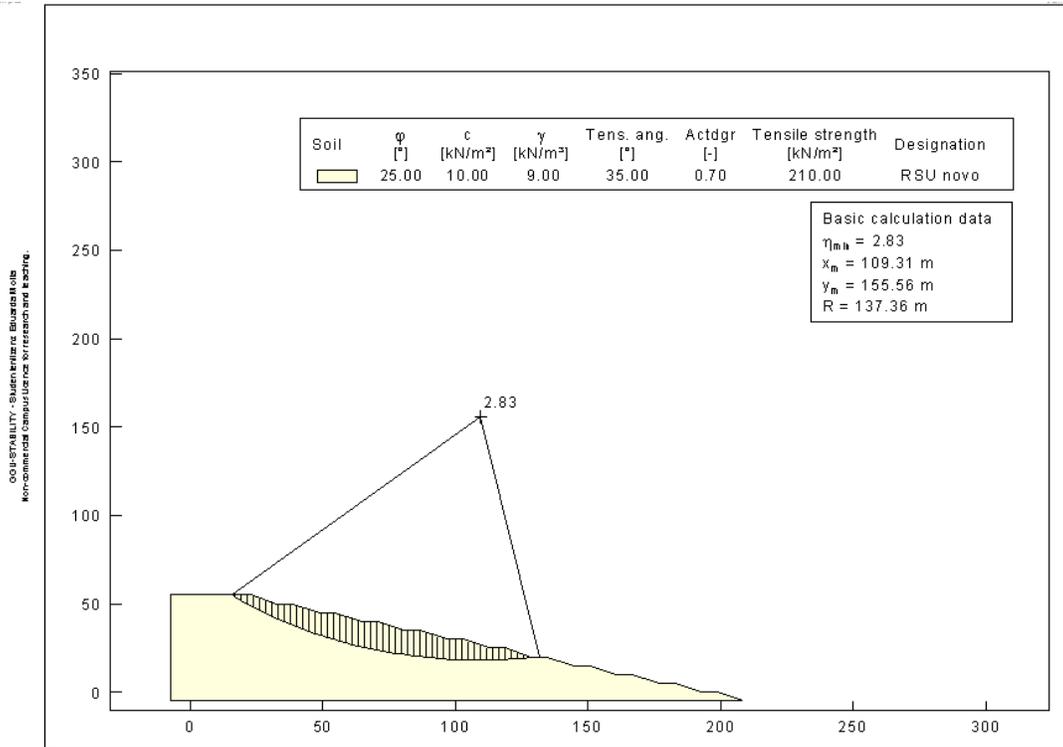


Figura VII.4. Análise de estabilidade: RSU novo (Caso 3)

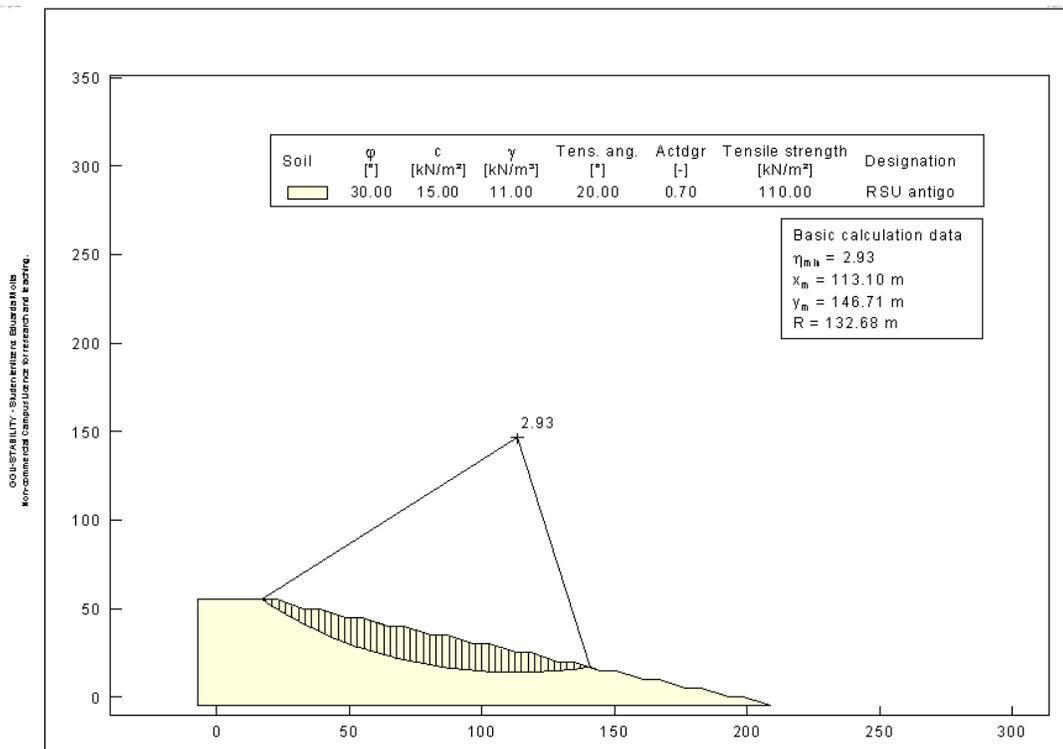
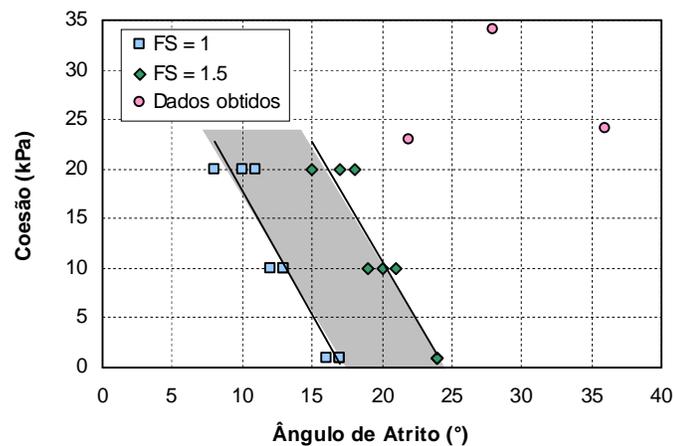


Figura VII.5. Análise de estabilidade: RSU antigo (Caso 3)

No Caso 4, para a análise dos parâmetros de resistência obtidos através dos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões, não se utilizou no programa a adição do termo correspondente à resistência adicional conferida pela tração das fibras. A Tabela VII.7 apresenta as estimativas dos fatores de segurança mínimos para cada situação analisada. Os pares de parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto foram plotados no gráfico da faixa de parâmetros apresentada na análise paramétrica para os fatores de segurança da condição de equilíbrio limite até a condição de segurança, conforme Figura VII.6.

**Tabela VII.7. Fator de segurança mínimo das análises de estabilidade de taludes de RSU com os parâmetros determinados nesta pesquisa - Caso 4**

MATERIAL	$\phi$ (°)	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$r_u$	FS
RSU	28	34	9	0	2,71
RSU-RF	23	23	9	0	2,07
RSU-LE	36	24	9	0	3,18



**Figura VII.6. Dados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto comparados à faixa de parâmetros obtidos na análise paramétrica**

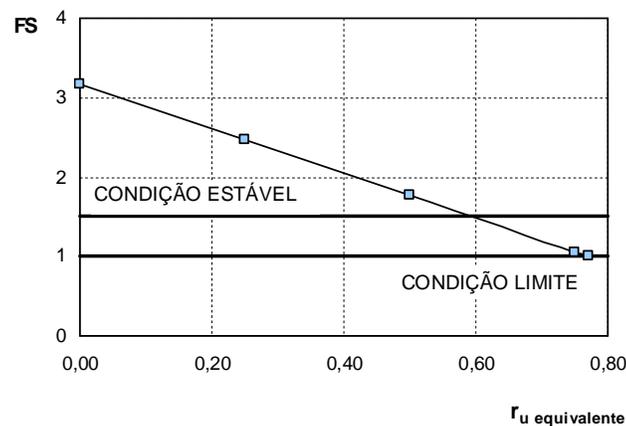
No gráfico, pode-se observar que os valores se apresentam bem mais altos que a faixa da análise paramétrica, conseqüentemente, mais altos que os valores sugeridos para projeto por Sánchez-Alciturri *et al.* (1993). Apenas o par de parâmetros dos RSU-RF se apresentou dentro da faixa sugerida por Singh & Murphy (1990), enquanto os parâmetros dos RSU e RSU-LE se apresentaram mais elevados.

Observa-se que os fatores de segurança estimados para as diferentes composições proposta para os resíduos se apresentaram em conformidade com a NBR 11.682 (ABNT, 2009) como taludes com nível de segurança alto ( $FS \geq 1,50$ ), mesmo sem considerar a ativação do efeito das fibras. Os RSU apresentaram fator de segurança 34% maior que os RSU-RF e 15% menor que os RSU-LE. Apesar de não ter sido considerado o efeito das fibras neste caso, os resultados das análises com os parâmetros obtidos nos ensaios de laboratório refletiram um incremento no FS devido à presença de maior quantidade de fibras e, também, devido à codisposição com lodo.

No Caso 5, para a codisposição dos RSU com LE, foram propostas diferentes situações, admitindo condições de eficiência e deficiência no sistema de drenagem de líquidos e gases até a condição de equilíbrio limite ( $FS = 1$ ), utilizando a variação do parâmetro  $r_u$ . Na Tabela VII.8 e na Figura VII.7 estão apresentados os fatores de segurança obtidos para as diferentes situações.

**Tabela VII.8. Fator de segurança com a variação do parâmetro  $r_u$  - Caso 5**

MATERIAL	$\phi$ (°)	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$r_u$	FS
RSU-LE	36	24	9	0	3,18
				0,25	2,48
				0,5	1,77
				0,75	1,06
				0,77	1,00



**Figura VII.7. Variação do Fator de Segurança com o  $r_u$  equivalente**

No caso de eficiência de drenagem de líquidos e gases no aterro, o FS do RSU-LE se apresentou mais elevado que os das amostras de RSU-RF e RSU, e mais elevados até

que os FS obtidos utilizando os valores recomendados por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997) para a ativação do efeito das fibras, apresentado no Caso 3. No caso de deficiência de drenagem, observa-se através da Figura VII.7 que a condição de estabilidade para um talude com alto grau de segurança (FS = 1.5) é mantida até  $r_u = 0,6$ . A condição limite da estabilidade foi verificada quando o excesso de poro-pressão é equivalente a 77% da tensão vertical total na base da fatia.

Para se comparar o parâmetro  $r_{u \text{ máx}}$  da situação de estabilidade crítica, considerou-se a altura dos RSU saturados equivalente à altura total da fatia:

$$r_{u \text{ máx}} \Rightarrow H = H_{\text{sat}}$$

Desta forma, para estimar o  $r_{u \text{ crit}}$  de acordo com a Equação VII.7, admitindo os valores para  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ ;  $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$  e  $\gamma_{\text{sat}} = 12 \text{ kN/m}^3$ , foi possível obter aproximadamente o valor 0,77 do  $r_{u \text{ crit}}$  encontrado na análise de estabilidade:

$$r_{u \text{ crit}} = \frac{H \cdot \gamma_w}{\gamma_{\text{sat}} \cdot H} = \frac{\gamma_w}{\gamma_{\text{sat}}} = \frac{9}{12} = 0,75$$

Para o cálculo do efeito das poro-pressões de biogás, o parâmetro  $r_u$  apresentado na Equação VII.4 foi dividido em duas componentes, conforme Equação VII.8:

$$r_u = \frac{u}{\sigma} = \frac{u_{\text{lix}} + u_{\text{gás}}}{\sigma} = \frac{u_{\text{lix}}}{\sigma} + \frac{u_{\text{gás}}}{\sigma} \quad (\text{VII.8})$$

Onde:  $u_{\text{lix}}$  é a poro-pressão do lixiviado ( $\text{kN/m}^3$ );  $u_{\text{gás}}$  é a poro-pressão do biogás ( $\text{kN/m}^3$ );  $\sigma$  é a tensão vertical na base da fatia ( $\text{kN/m}^3$ ).

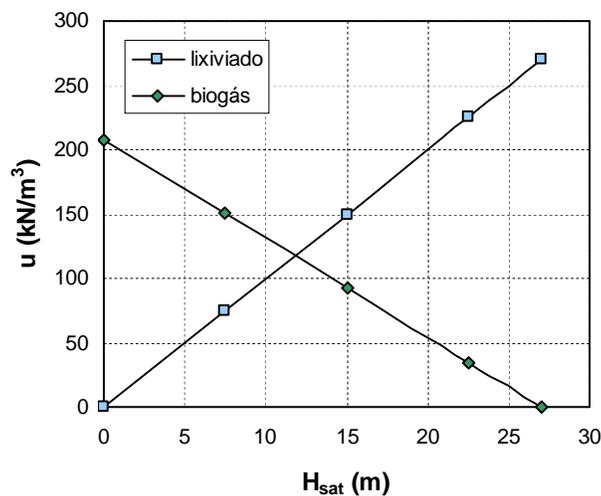
Desta forma, para a determinação do  $u_{\text{gás}}$  na condição limite da estabilidade, a Equação VII.8 pode ser escrita como:

$$r_u = \frac{H_{\text{sat}} \cdot \gamma_w}{\gamma_{\text{sat}} \cdot H_{\text{sat}} + \gamma(H - H_{\text{sat}})} + \frac{u_{\text{gás}}}{\gamma_{\text{sat}} \cdot H_{\text{sat}} + \gamma(H - H_{\text{sat}})}$$

Assim, admitindo o perfil do talude do aterro com 60 m de altura proposto, considerando uma fatia da superfície de ruptura circular crítica profunda, com altura ( $H_{fatia}$ ) equivalente a 30 m, o parâmetro  $r_u$  limite de 0,77 encontrado na análise de estabilidade e os valores de  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ ;  $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$  e  $\gamma_{sat} = 12 \text{ kN/m}^3$ , pode-se determinar as poro-pressões de lixiviado e biogás, conforme apresentado na Tabela VII.9 e na Figura VII.8.

**Tabela VII.9. Determinação das poro-pressões de lixiviado e biogás no aterro de RSU para a condição limite de estabilidade do talude proposto**

$H_{SAT}$	$u_{lix}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\sigma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$r_{u \text{ lix}}$	$u_{gás}$ ( $\text{kN/m}^3$ )
0	0	270	0	207,90
0,25.H	75	292,5	0,26	150,22
0,5.H	150	315	0,48	92,55
0,75.H	225	337,5	0,67	34,87
0,9.H	270	351	0,77	0



**Figura VII.8. Variação de  $u_{lix}$  e  $u_{gás}$  com  $H_{sat}$**

Através desta simulação, verifica-se que é possível se alcançar poro-pressões de biogás muito altas dentro de uma situação de estabilidade. Assim, pode-se admitir que os excessos de poro-pressões de lixiviados e biogás oriundos da codisposição de LE e RSU em aterros são passíveis de prejudicar a estabilidade dos aterros de RSU somente em condições de deficiência no funcionamento dos sistemas de drenagem de líquidos e gases. Vale salientar que os parâmetros de resistência estimados nos ensaios de cisalhamento direto para os RSU-LE foram obtidos com amostras de RSU misturadas ao LE.

No Caso 6, para analisar o efeito das fibras na amostra de RSU, foram considerados os valores para o ângulo de atrito, da ordem de 20 a 30°, obtidos nesta pesquisa para o RSU novo. Os demais parâmetros utilizados foram os recomendados por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997), admitindo a variação do parâmetro da coesão até se obter o fator de segurança da análise de estabilidade sem considerar as fibras (Caso 4). Para o RSU antigo, considerou-se um incremento de 5° no valor do ângulo de atrito obtido nesta pesquisa. A Tabela VII.10 apresenta as estimativas dos fatores de segurança mínimos para cada situação analisada.

**Tabela VII.10. FS determinados para os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos nesta pesquisa com ativação do efeito das fibras, recomendados por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997) - Caso 6**

HIPÓTESE	MATERIAL	$\phi$ (°)	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\zeta$ (°)	$\alpha$	$z_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	FS
1	RSU NOVO	20	10	9	35	0.7	210	2,46
	RSU ANTIGO	25	15	11	20	0.7	110	2,53
2	RSU NOVO	20	18,5	9	35	0.7	210	2,71
	RSU ANTIGO	25	26,5	11	20	0.7	110	2,80
3	RSU NOVO	30	10	9	35	0.7	210	3,22
	RSU ANTIGO	35	15	11	20	0.7	110	3,37

Os resultados encontrados nas análises com a ativação do efeito das fibras para o ângulo de atrito de 20° (hipótese 1) subestimou o fator de segurança encontrado na análise do Caso 4. Desta forma, considerou-se a hipótese 2 para verificar a coesão equivalente, onde foram encontrados valores para coesão bem mais elevados que os recomendados por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997). Na hipótese 3, considerando o ângulo de atrito de 30°, observaram-se níveis altos que FS encontrado no Caso 4.

Nas Figuras VII.9 a VII.21 estão apresentados os resultados do programa para a situação mais crítica de cada hipótese analisada nos Casos 4, 5 e 6. São determinados fator de segurança mínimo, a superfície potencial de ruptura, a localização do centro e respectivo raio da superfície crítica de cada caso.

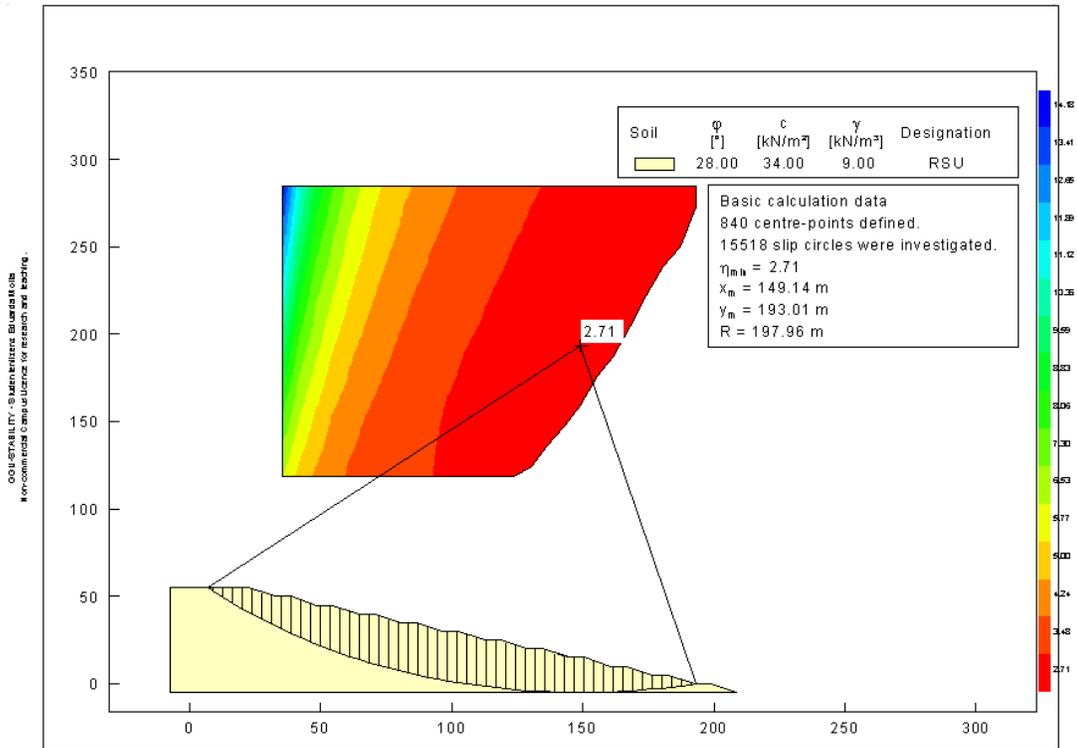


Figura VII.9. Análise de estabilidade: RSU ( $\phi = 28^\circ$ ;  $c = 34$  kN/m<sup>2</sup>;  $\gamma = 9$  kN/m<sup>3</sup>)

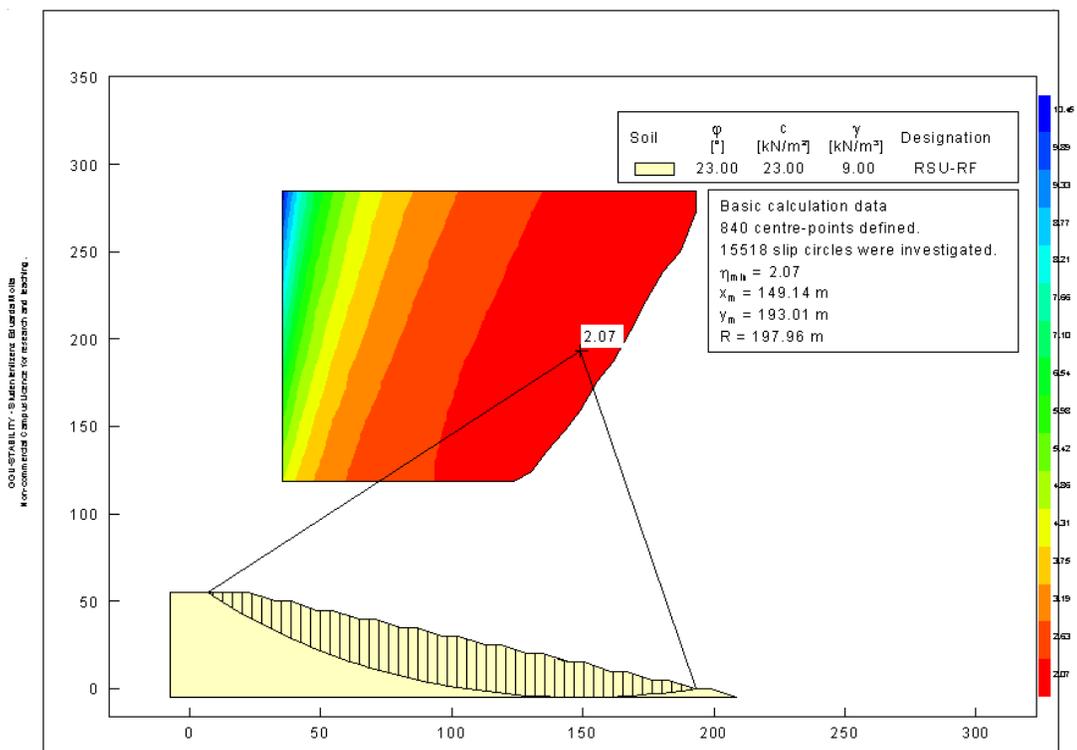


Figura VII.10. Análise de estabilidade: RSU- RF ( $\phi = 23^\circ$ ;  $c = 23$  kN/m<sup>2</sup>;  $\gamma = 9$  kN/m<sup>3</sup>)

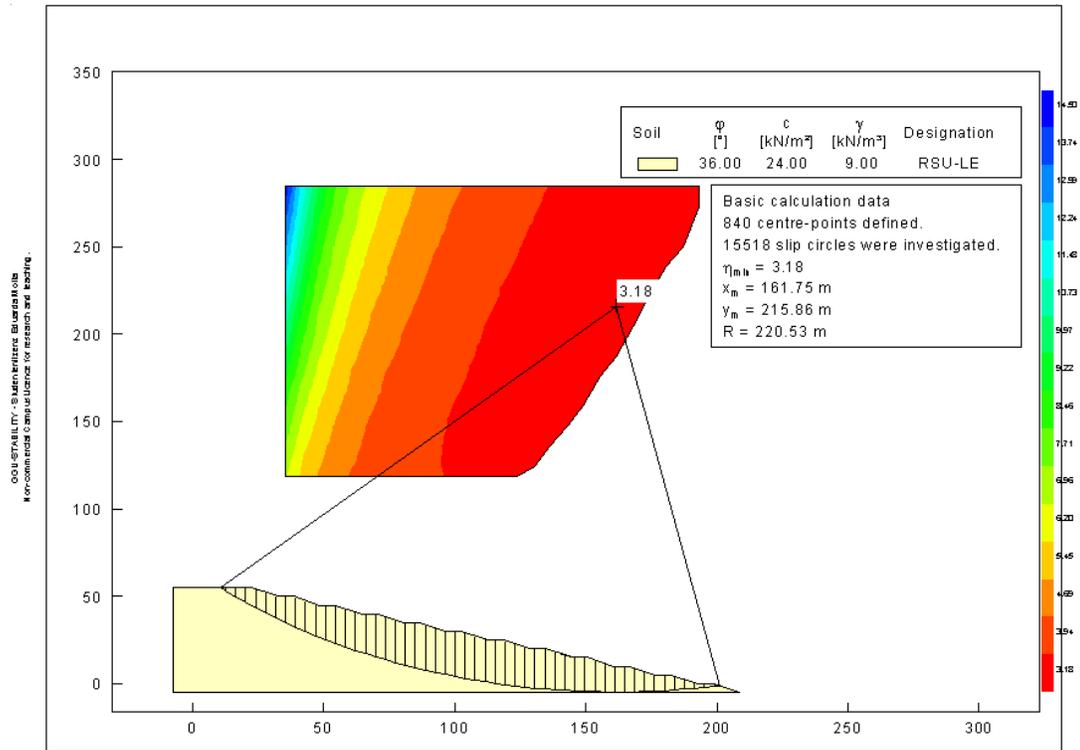


Figura VII.11. Análise de estabilidade: RSU-LE ( $\phi = 36^\circ$ ;  $c = 24$  kN/m<sup>2</sup>;  $\gamma = 9$  kN/m<sup>3</sup>,  $r_u = 0$ )

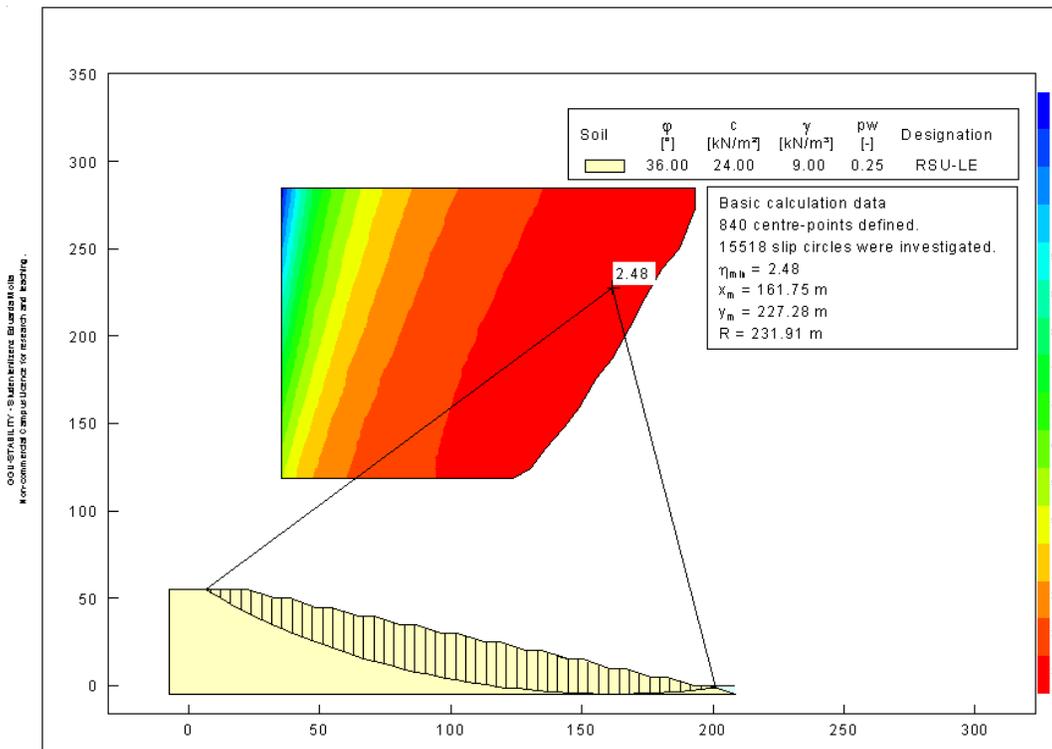


Figura VII.12. Análise de estabilidade: RSU-LE ( $\phi = 36^\circ$ ;  $c = 24$  kN/m<sup>2</sup>;  $\gamma = 9$  kN/m<sup>3</sup>,  $r_u = 0,25$ )

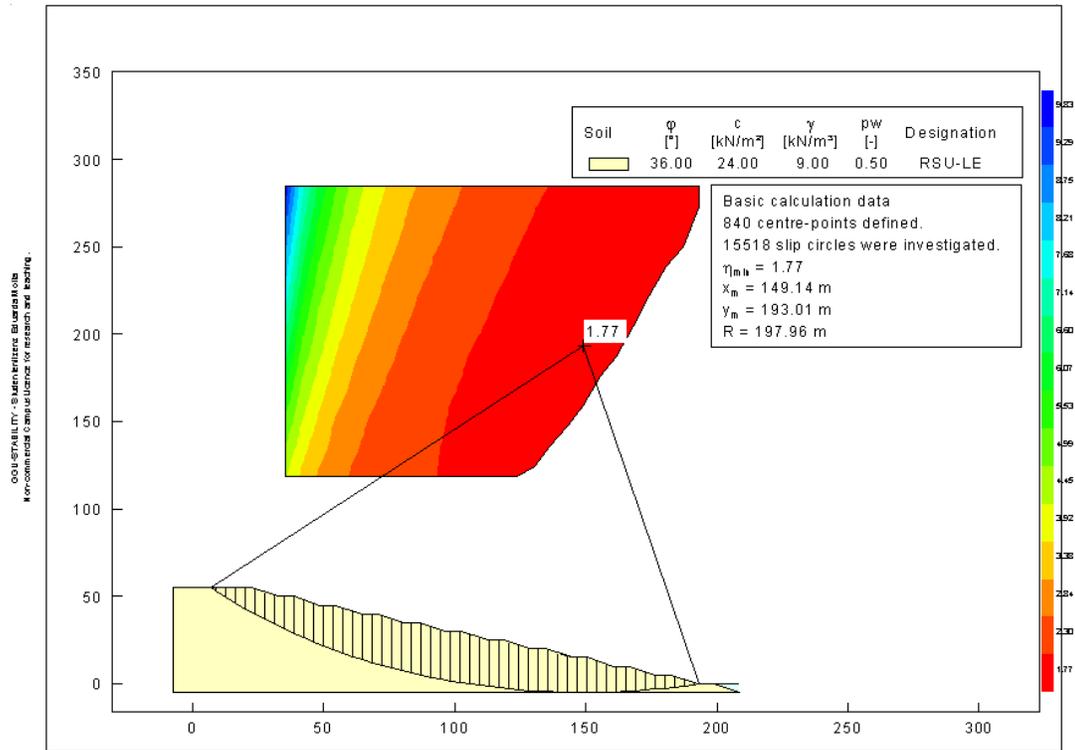


Figura VII.13. Análise de estabilidade: RSU-LE ( $\phi = 36^\circ$ ;  $c = 24$  kN/m<sup>2</sup>;  $\gamma = 9$  kN/m<sup>3</sup>,  $r_u = 0,5$ )

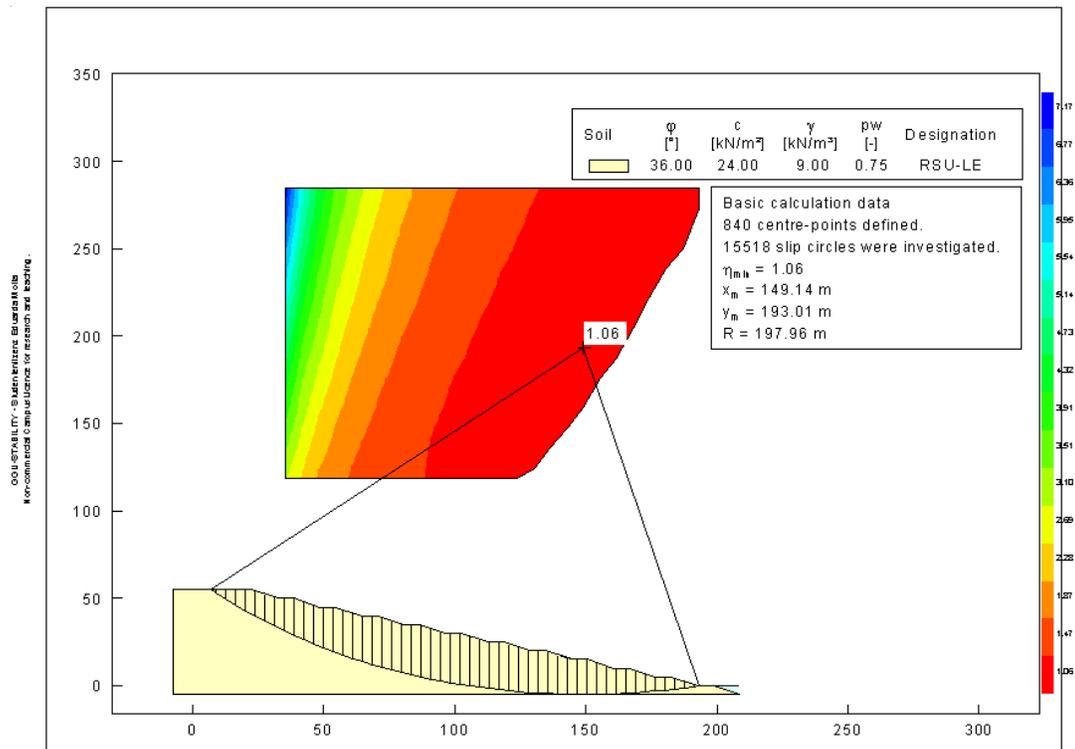


Figura VII.14. Análise de estabilidade: RSU-LE ( $\phi = 36^\circ$ ;  $c = 24$  kN/m<sup>2</sup>;  $\gamma = 9$  kN/m<sup>3</sup>,  $r_u = 0,75$ )

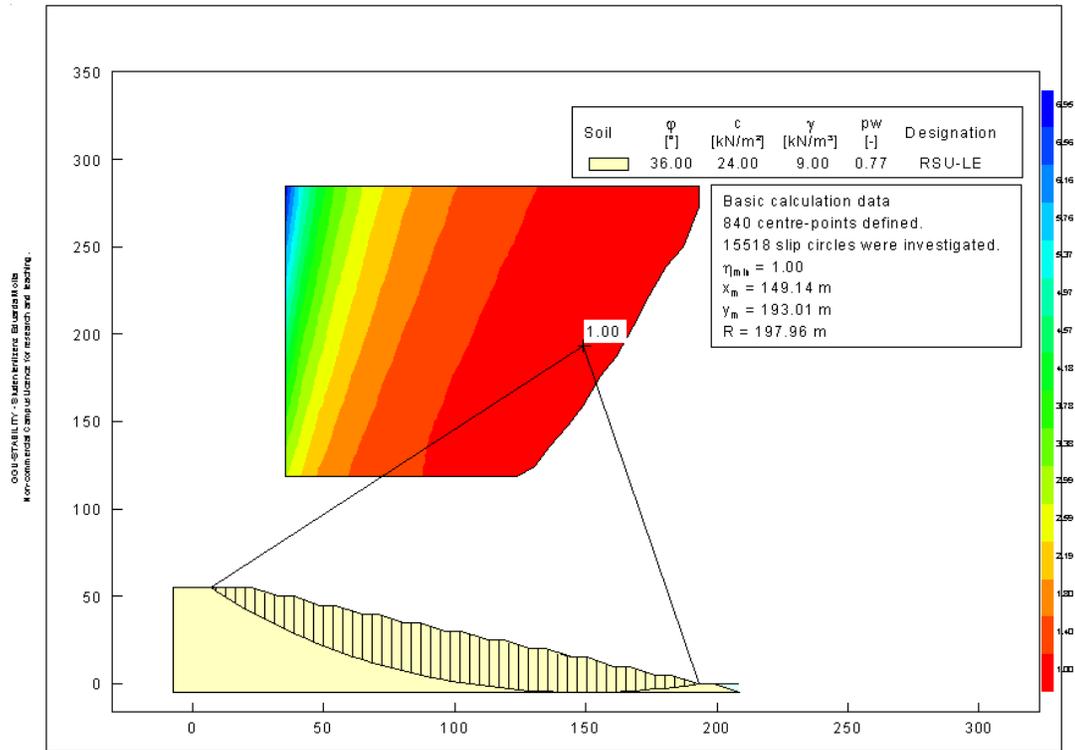


Figura VII.15. Análise de estabilidade: RSU-LE ( $\phi = 36^\circ$ ;  $c = 24$  kN/m<sup>2</sup>;  $\gamma = 9$  kN/m<sup>3</sup>,  $r_u = 0,77$ )

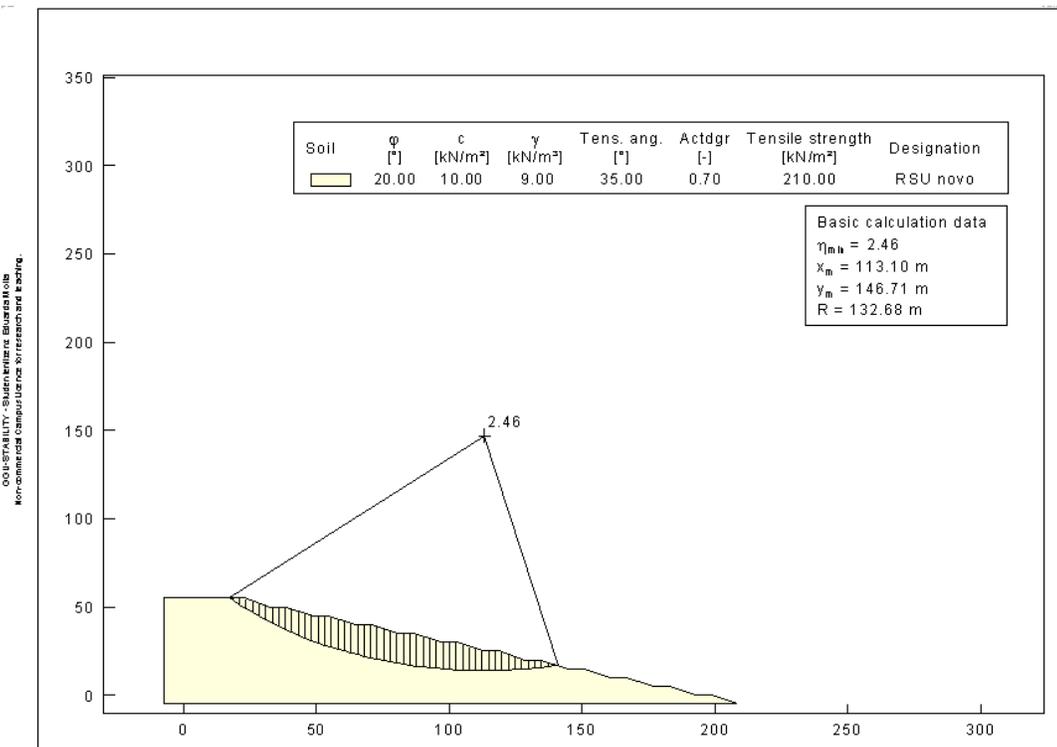


Figura VII.16. Análise de estabilidade: RSU novo (Caso 6) - 1

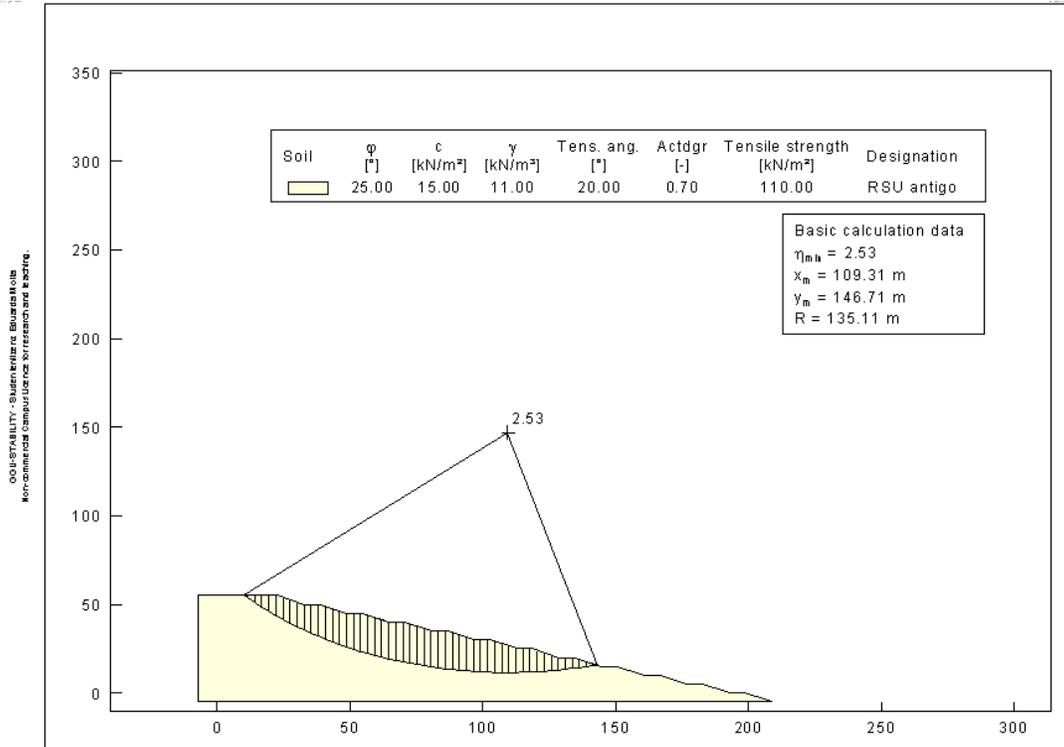


Figura VII.17. Análise de estabilidade: RSU antigo (Caso 6) - 1

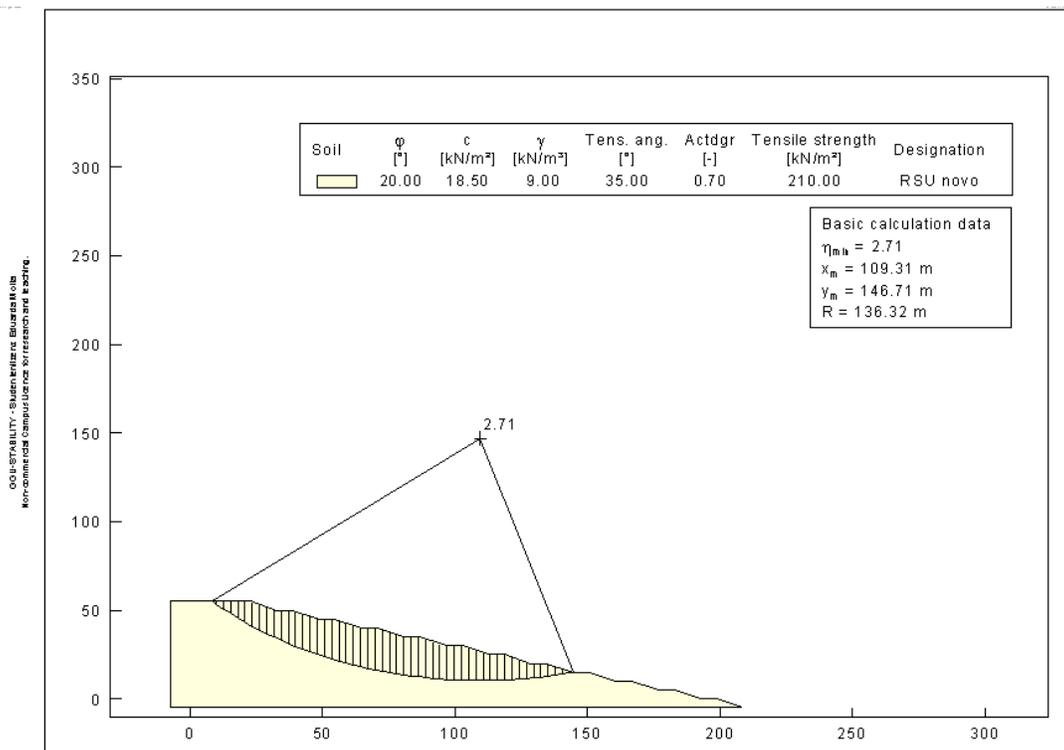


Figura VII.18. Análise de estabilidade: RSU novo (Caso 6) - 2

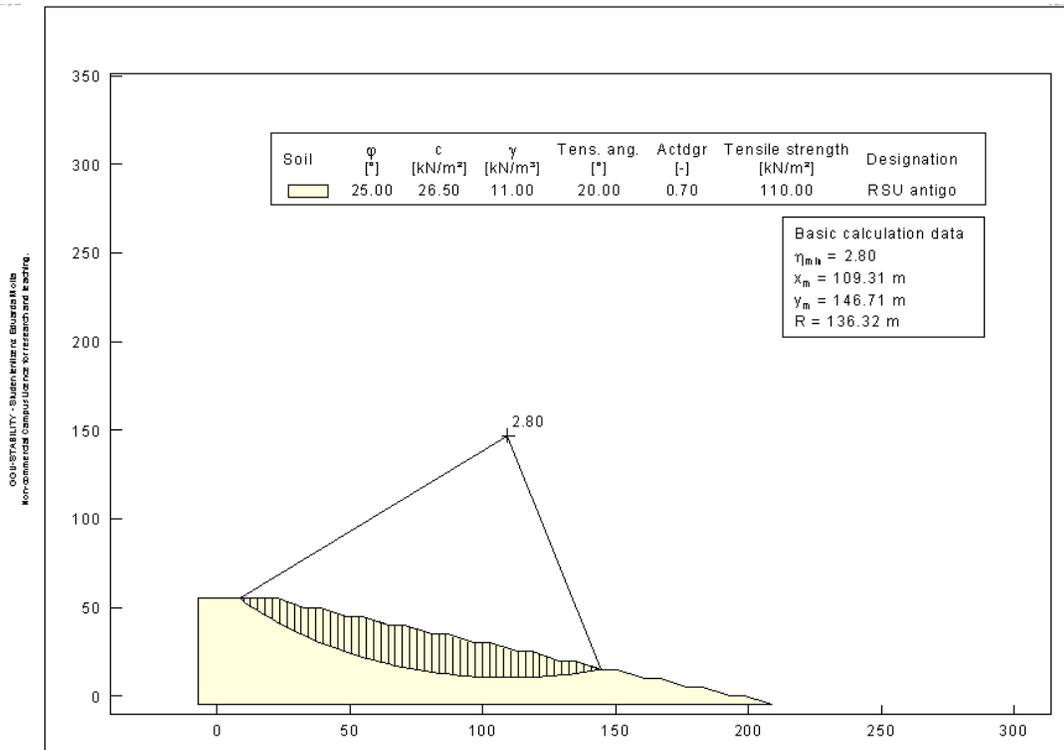


Figura VII.19. Análise de estabilidade: RSU antigo (Caso 6) – 2

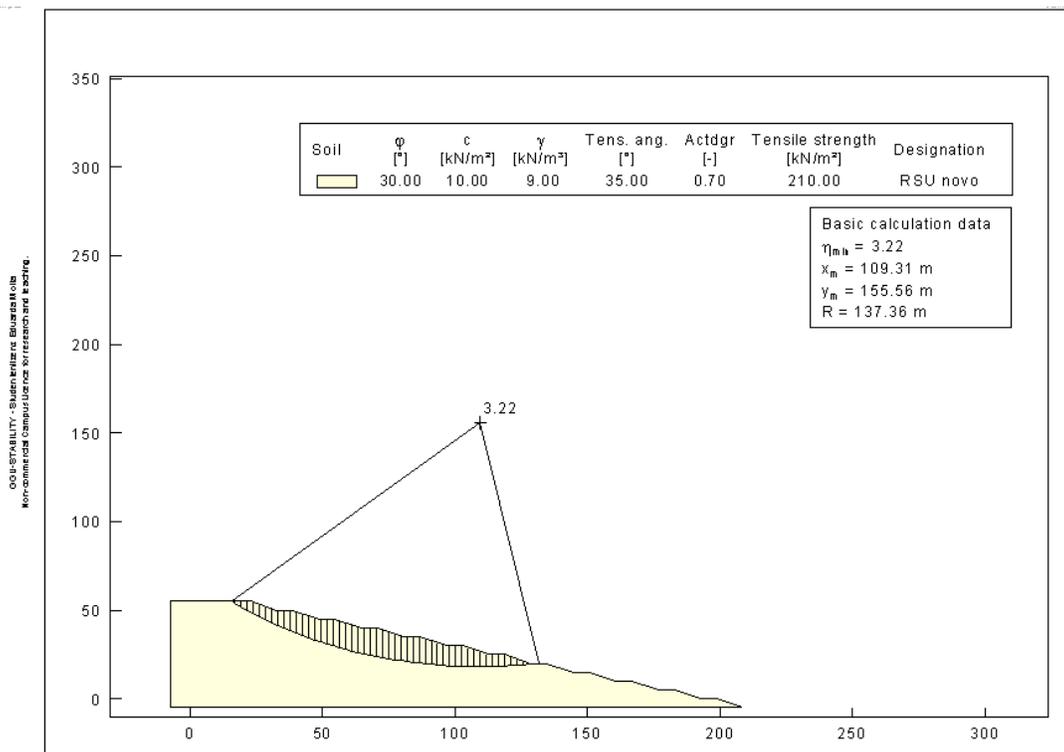


Figura VII.20. Análise de estabilidade: RSU novo (Caso 6) - 3

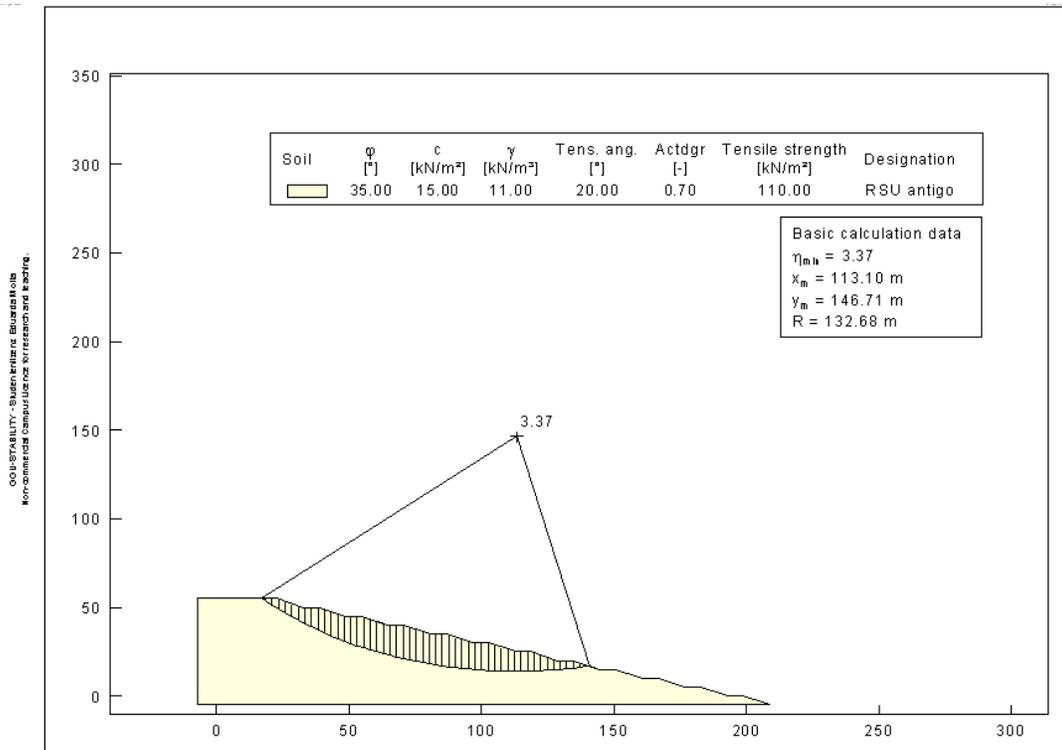


Figura VII.21. Análise de estabilidade: RSU antigo (Caso 6) - 3

### 7.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na análise paramétrica, Casos 1 e 2, foi verificado o incremento gerado no fator de segurança através da incorporação do efeito das fibras nos RSU, da ordem de 90% para os parâmetros de resistência dos RSU novos com a ativação das fibras e cerca de 50% em relação aos RSU antigos.

No Caso 3, utilizando os valores recomendados por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997), foram obtidos os fatores de segurança que refletem uma condição de talude seguro para os RSU novos ou antigos. No entanto, deve-se levar em conta que nestas análises não são considerados os efeitos do excesso de poro-pressão, pois se considera um eficiente sistema de drenagem de líquidos e gases.

No Caso 4, utilizando os parâmetros de resistência obtidos através dos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões, foram obtidos fatores de segurança em conformidade com a NBR 11.682 (ABNT, 2009) como taludes com nível de segurança alto ( $FS \geq 1,50$ ), mesmo sem considerar a ativação do efeito das fibras. Os RSU

apresentaram fator de segurança 34% maior que os RSU-RF e 15% menor que os RSU-LE.

No Caso 5, variando o parâmetro  $r_u$  até a condição crítica, verificou-se que é possível se alcançar poro-pressões de biogás muito altas dentro de uma situação de estabilidade. Desta forma, mesmo admitindo uma maior geração de biogás para os RSU codispostos com LE, a codisposição não prejudica a estabilidade dos aterros de RSU, desde que os RSU sejam dispostos no aterro misturados ao LE e que as condições dos sistemas de drenagem de líquidos e gases estejam em pleno funcionamento.

Com a simulação do parâmetro  $r_u$  foram estimadas poro-pressões de biogás maiores que 200 kPa para o perfil de talude proposto. Com isso, verifica-se que os resultados da ordem de até 100 a 170 kPa para pressões internas de gás *in situ*, obtidas no monitoramento do aterro sanitário Bandeirantes – São Paulo (KAIMOTO & CEPOLLINA, 1996) correspondem a valores possíveis dentro de uma situação de estabilidade.

No Caso 6, observou-se que os resultados das análises com a ativação do efeito das fibras, considerando os ângulos de atrito da faixa de valores obtidos através dos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões e os demais parâmetros conforme recomendado por GDA R 2-35 (DGGT, 1997) e Collins *et al.* (1997), podem subestimar ou majorar o FS encontrado na análise do Caso 4.

As análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU são realizadas através de estimativas por simulações, seja por simulação de parâmetros, ou de parâmetros e da geometria para efeito de projeto. De fato, a mecânica dos resíduos não dispõe de uma metodologia eficaz para se obter os parâmetros que representem o comportamento resistente de aterros sanitários. O método que mais se aproxima deste comportamento, na atualidade, foi o proposto por Kölsch (1996). No entanto, os componentes dos resíduos são heterogêneos, não inertes e seu comportamento está sujeito a variações ao longo do tempo devido aos efeitos da biodegradação. Desta forma, é devido e pertinente se resguardar a segurança no dimensionamento dos taludes de aterros de RSU. Pois, o reforço das fibras, pode favorecer a estabilidade de taludes mais íngremes, no entanto não se pode garantir sua manutenção em longo prazo, visto que o efeito de reforço pode diminuir com o tempo devido à degradação de seus componentes, às altas temperaturas e aos incêndios na massa de resíduos.

## CAPÍTULO VIII

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

#### 8.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

O monitoramento dos reatores permitiu verificar que a geração de biogás dos RSU com codisposição de LE ocorreu de forma mais acelerada, levando metade do tempo que os RSU sem LE levaram para atingir o pico da concentração de metano. Além de provocar um incremento de pelo menos três vezes a taxa de geração de biogás diária dos RSU sem LE. Este fato, associado à redução de permeabilidade que o LE confere à massa de resíduos num aterro, pode contribuir significativamente para um acréscimo na poro-pressão de gases e lixiviados, interferindo negativamente na estabilidade do aterro.

Nos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões com amostras de RSU-RF e RSU foi verificada a influência dos componentes fibrosos dos resíduos nos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Existe uma tendência ao aumento da coesão com o deslocamento relativo horizontal para as duas amostras, mas é menos evidenciada na amostra de RSU-RF. Como o ângulo de atrito se manteve numa mesma faixa de valores, considerando que a parcela relativa ao ângulo de atrito é comandada pela matriz básica, ou seja, pelos componentes não fibrosos dos resíduos, podem-se considerar valores da ordem de 20 a 30° para o ângulo de atrito dos resíduos analisados.

Nos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões com amostras de RSU-LE, se constatou que a codisposição do LE misturado aos RSU elevou a coesão em relação às amostras de RSU até 10% de deslocamento relativo e o ângulo de atrito para deslocamentos relativos superiores a 15%. O ângulo de atrito aumentou de forma linear com o deslocamento relativo, chegando a 36° para o RSU-LE, enquanto os RSU atingiram o valor máximo de 28°. Esse comportamento pode estar associado ao maior teor de partículas finas na amostra de RSU-LE, gerado pela adição de lodo, que aumenta o volume das partículas sólidas e reduz o volume de vazios na massa de resíduos.

Através do comportamento observado para a amostra de RSU-LE nos ensaios de cisalhamento direto e verificado nas análises de estabilidade de talude, pode-se concluir que determinado percentual de LE pode conferir um ganho na resistência ao cisalhamento dos RSU. Para isto, o LE deve ser disposto no aterro misturado aos RSU e

a massa de resíduos deve ter um bom sistema de drenagem de líquidos e gases. Contudo, recomenda-se a análise de outros fatores em conjunto, tais como: compactação, teor de umidade, percentual máximo de LE e eficiência dos sistemas de drenagem de gases e líquidos do aterro para uma afirmação genérica a esse respeito.

As análises de estabilidade de talude de aterros de RSU propostas permitiram verificar que se for incorporado o efeito das fibras dos resíduos nos cálculos, o fator de segurança é aumentado em cerca de 90% para os RSU novos e em 50% para os RSU antigos. As análises de estabilidade de um talude simulado, com os parâmetros obtidos por meio dos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões para as diferentes composições propostas para os RSU apresentaram fatores de segurança em conformidade com a NBR 11.682 (ABNT, 2009) com taludes com nível de segurança alto ( $FS \geq 1,50$ ), mesmo sem considerar o efeito das fibras nos cálculos. Nas análises de estabilidade admitindo deficiência no sistema de drenagem de líquidos e gases até a condição de equilíbrio limite ( $FS = 1$ ), verificou-se que é possível se atingir poro-pressões de biogás muito altas dentro de uma situação de estabilidade.

Como aspectos geotécnicos relevantes para determinação de critérios para codisposição de LE em aterros de RSU de forma adequada se destacam:

- se o LE é misturado aos RSU, pode conferir um ganho nos parâmetros de resistência, mas devido ao aumento do percentual de finos na massa de resíduos, a permeabilidade é reduzida, e devido ao incremento na geração de biogás, pode-se gerar um excesso de poro-pressões de gases e líquidos. Desta forma, deve-se considerar uma análise que ofereça condições de uma avaliação conjunta de todos estes fatores;
- se o LE for disposto em camadas, a permeabilidade reduz significativamente, podendo funcionar como uma “barreira”, impedindo a drenagem de gases e lixiviados na massa de resíduos, gerando acréscimos de poro-pressão pontuais que resultam em considerável perda de resistência.

A interação do biogás gerado no aterro com o lixiviado pode afetar significativamente as poro-pressões na massa de resíduos e, conseqüentemente, a estabilidade do aterro de RSU, principalmente em resíduos com baixa permeabilidade. Portanto, para uma codisposição de LE em aterros de RSU segura, deve-se proceder de forma controlada e em condições drenadas, para não se estabelecer um problema em relação ao excesso de poro-pressões.

## 8.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Algumas sugestões são propostas para dar continuidade a este trabalho:

- Realizar ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões com tensões maiores.
- Realizar ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões com pelo menos seis diferentes tensões normais, buscando-se definir uma envoltória bilinear.
- Realizar ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões com amostras de RSU com diferentes idades.
- Realizar ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões com amostras de RSU com diferentes percentuais de LE.
- Realizar ensaios para determinação da permeabilidade de amostras de RSU com diferentes percentuais de LE.
- Adaptar um elemento drenante na parte inferior da caixa para coletar o lixiviado.
- Reduzir a altura da parte inferior da caixa de cisalhamento para moldar corpos de prova com alturas menores.
- Utilizar diferentes temperaturas para avaliar seu efeito nos componentes fibrosos dos resíduos.
- Desenvolver um equipamento para realização de ensaios para determinação da tensão de tração dos componentes fibrosos dos RSU.
- Avaliar o efeito da disposição do lodo em camadas como planos preferenciais de ruptura.
- Realizar retro-análises de casos de ruptura de aterros sanitários provocados pelo excesso de poro-pressão de biogás.
- Caracterização dos RSU de acordo com as recomendações alemãs, com a identificação de resíduos e grupos de matéria, GDA E1-7 (DGGT, 1997).
- Realizar análise da estabilidade de taludes através do MEF.
- Considerar variabilidade espacial nas análises de estabilidade de taludes.
- Realizar análises numéricas com duas simulações (parâmetros pré-estabelecidos e com fibras aleatórias).
- Fazer uso de métodos probabilidade e estatística, analisando os parâmetros em conjunto.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AITKENHEAD, N. Ph. D. (2002) Geological Aspects of two Derbyshire Disasters Lessons from Loscoe: March 1986.
- ALCÂNTARA, P. B. (2004) Recalques em Aterros de Resíduos Sólidos. Trabalho de Geotecnia Ambiental. Recife, 31p. Não publicado.
- ALCÂNTARA, P. B. (2007) Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, CTG, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Julho, 364p.
- ALVES, I. R. F. (2008) Análise Experimental do Potencial de Geração de Biogás em Resíduos Sólidos Urbanos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. CTG, 128p.
- ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I. & FERNANDES, F. (1999). Reciclagem de Biossólidos: Transformando Problemas em Soluções. Curitiba: SANEPAR, FINEP.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M. & FERNANDES, F. (2001). Lodos de Esgoto: Tratamentos e Disposição Final. Belo Horizonte: DESA/UFMG, Curitiba: SANEPAR.
- ARIAS, A. (1994) Modelo de Asentamientos de Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos. Tesis de Magíster, Universidad de Cantabria, Santander, Espanha.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 10.004 (2004) Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 72p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 10.005 (2004). Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 10.006 (2004). Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 10.007 (2004) Amostragem de Resíduos. Rio de Janeiro, 14p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 11.363 (1995) Tubos Termoisolantes à Base de Lã de Rocha – Especificação, Rio de Janeiro, 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 11.682 (2009) Estabilidade de Taludes. Rio de Janeiro, 33p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6459 (1984b) Solo: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6508 (1984d) Solo: Determinação da Massa Específica Aparente. Rio de Janeiro, 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7180 (1984c) Solo: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7181 (1984a) Solo: Análise Granulométrica Conjunta. Rio de Janeiro, 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7182 (1986b) Solo: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 6457 (1986a). Amostras de Solo: Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, 9p.
- ASTM D 3080 (1998) Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
- ASTM E 1508 (2003) Standard Guide for Quantitative Analysis by Energy-Dispersive Spectroscopy. Philadelphia.
- AUGENSTEIN, D. & PACEY, J. (1991) Modelling Landfill Methane Generation. In: International Landfill Symposium, 3, Sardinia, Italia. Proceedings of the... Sardinia, pp. 115-148.
- AZEVEDO, R. F.; CARVALHO, A. R.; AZEVEDO, I. C. D. & MARQUES, E. A. G. (2003) Variação com a Idade de Características dos Resíduos do Aterro Sanitário de Santo André, São Paulo. V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. REGEO 2003. Porto Alegre, CD-ROM.
- BACAS, A. B. M (2009) Comportamiento Resistente al Deslizamiento de Geosintéticos. Tesis Doctoral em Departamento de Ciencias e Ingeniería Del Terreno y de los Materiales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria. Santander, 270p.
- BARBOZA, R. S. L. (2007). Influência do Lodo de Esgoto na Nodulação e no Desenvolvimento do Caupi. Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais – UNICAP: Recife, 84p.
- BARLAZ, M. A. (1996) Microbiology of Solid Waste Landfills. In: PALMISANO, A. C.; BARLAZ, M. A. (eds.) Microbiology of Solid Waste, New York: CRC Press.
- BARLAZ, M. A., HAM, R. K., & MILKE, M. W. (1987) Gas Production Parameters in Sanitary Landfill Simulators. Waste Mgmt. and Res., vol. 5, pp. 27-39.

- BARLAZ, M. A., HAM, R. K., & SCHAEFER, D. M. (1990) Methane Production from Municipal Refuse: A Review of Enhancement Techniques and Microbial Dynamics. *CRC Critical Rev. in Envir. Control*, 19(6), pp. 557-584.
- BARLAZ, M. A., HAM, R. K., & SCHAEFER, D. M. (1989) Mass Balance Analysis of Decomposed Refuse in Laboratory Scale Lysimeters. *J. Envir. Engrg., ASCE*, 115(6), pp. 1088-1102.
- BEAVEN, R. & POWRIE, W. (1995). Determination of the Hydrogeological and Geotechnical Properties of Refuse Using a Large Scale Compression Cell. *Proceeding of the 5th Sardinia International Landfill Symposium, S. Margherita Di Pula, Cagliari.*, vol.II, pp. 745-760.
- BENSON, C. H.; BARLAZ, M. A.; LANE, D. T. & RAWE, J. M. (2007) Practice Review of Five Bioreactor/Recirculation Landfills. *Waste Management*. v. 27, n.1, pp. 13-29.
- BENVENUTO, 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*, pp. 55-66.
- BENVENUTO, C.; CRUZ, P. T. & MIRANDA, I. C. S. B. (1994) A Metodologia Geotécnica Aplicada à Disposição dos Resíduos Sólidos. In: *Seminário sobre Geotecnia de Aterros para Disposição de Resíduos – GEOAMBIENTAL'94*, Rio de Janeiro, Abril, pp. 1.33-1.48.
- BIDONE, F. R. A. & POVINELLI, J. (1999) *Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos*. São Carlos, SP: EESC/USP, 120p.
- BISHOP, A. W. (1955). The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Geotechnique*, 5, pp. 7-17.
- BJARNGARD, A. E. & EDGERS, L. (1990) Settlements of Municipal Solid Waste Landfills. In: *Annual Madison Waste Conference, 13, 1990, Madison, USA, Proceedings...* Madison, pp. 192-205.
- BLIGHT, G. E. & FOURIE, A. B. (2005) Catastrofe Revisited - Disastrous Flow Failures of Mine and Municipal Solid Waste. *Geotechnical and Geological Engineering*. 23, pp. 219-248.
- BORGATTO, A. V. A. (2006) *Estudo do Efeito Fibra e da Morfologia na Estabilidade de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Fevereiro, 157p.
- BOSCOV, M. E. G. & ABREU, R. C. (2000) Aterros sanitários previsão de desempenho x comportamento real. In: *Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica / Núcleo Regional de São Paulo (Org.)*. *Previsão de Desempenho x Comportamento Real*. São Paulo: ABMS/NRSP.

- BOUAZZA, A.; VAN IMPE, W. F. & HAEGEMAN, W. (1996) Quality Control of Dynamic Compaction in Municipal Solid Waste Fills. In: Proc. of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, ISBN 90 5410 848 7, Osaka, Japan, Rotterdam, A. A. Balkema, Vol. 2, pp. 635-640.
- BOUTWELL, G. P; & FIORE, V. A. (1995) Settlement of Clay Cover on Saturated Garbage. In: Geonviromental 2000. Geotechnical Special Publication n°.46, ASCE, Ed. Yalcin B. Acar and David E. Daniel, New Orleans, pp. 964-979.
- BROMWELL, L. G. (1978) Properties, Behavior and Treatment of Waste Fills. In: Seminar Series on Methods of Soil Improvement, Metropolitan Section, ASCE, November, pp. 1-103.
- BUIVID, M.G., WISE, D.L., BLANCHET, M.J., REMEDIOS, E.C., JENKINS, B.M., BOYD, W.F., & PACEY, J.G. (1981) Fuel Gas Enhancement by Controlled Landfilling of Municipal Solid Waste. Resour. Recovery and Conservation, vol. 6, pp. 3-20.
- CAPANA, A. (2009) Caracterização e Estudo do Comportamento Térmico de Resíduo (Lodo) Proveniente de Estações de Tratamento de Água e de Esgotos do Município. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Araraquara.
- CAICEDO, B.;YALMIN, L.; GIRALDO, E.; CORONADO, O. & SOLER, N. (2002) Geomechanical Properties of Municipal Solid Waste in Doña Juana Sanitary Landfill. Proceedings of the 4th Environmental Geotechnics – 4th ICEG, Rio de Janeiro, de Melo & Almeida (eds), Rio de Janeiro, Vol. 1, pp. 177-182.
- CALARE, A.; RECALTATI, P.; RICCIUTTI, A. & RIMOLDI, P. (1996). Italian Landfill Capping Techniques. Geotechnical Fabrics Report. 14, pp. 42-47.
- CALLE, J. A. C. (2007) Comportamento Geomecânico de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Fevereiro, 160p.
- CANCELLI, A., (1989) Soil and Refuse Stability in Sanitary Landfills. Sanitary Landfilling Process, Technology and Environmental Impact. Academic Press. London.
- CAPUTO, H. P. (1988). Mecânica dos Solos e suas Aplicações. 6° ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v.1, 234p.
- CARDIM, R. D. (2008) Estudo da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por meio de Ensaio de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-168/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91p.
- CARRA, J. S. & COSSU, R. (1990) International Perspectives on Municipal Solid Wastes and Sanitary Landfilling. Joseph S. Carra and Raffaello Cossu, Eds., Academic Press, New York, NY, ISBN No.: 0-12-106355-0, U.S., 234p.

- CARVALHO, A. R. (2002) Percâmetro: Um novo equipamento para medidas de parâmetros geotécnicos de resíduos sólidos. Desenvolvimento e Aplicação no Aterro Sanitário de Santo André. Viçosa: UFV, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, 114p.
- CARVALHO, M. F. (1999) Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Doutorado em Geotecnia - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 300p.
- CASTELAO, M.; RODRIGUES, L. M.; ZUNGAILIA, E. & ROCHA, J. (1999) Beirolas Sanitary Landfill Closure and Post-Closure Use as a Park. International Waste Management and Landfill Symposium. Sardinia (Italy). Sta. Margherita di Paula, Cagliari, Italy.
- CASTILHOS JR, A.B. (2003) Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte. Projeto PROSAB, ABES-RJ, ISBN 85-86552-70-4, Florianópolis, SC, pp. 1-294.
- CATAPRETA, C. A. A. (2008) Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação. Tese de Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 316p.
- CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F.; BATISTA, H. P.; OLIVEIRA, A. F. G.; OLIVEIRA L. C. M. (2005) Influência da Umidade e Fatores Operacionais na Compactação de Resíduos Sólidos Urbanos no Aterro Sanitário de Belo Horizonte, MG. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, Campo Grande, Anais, Rio de Janeiro: ABES.
- CATTERPILAR (2001) Manual de Gerenciamento de Resíduos (ref. APDS0227). Washington: Caterpillar.
- CHANG, M. H., MITCHELL, J. K. & SEED, R. B. (1999) Model Studies of the 1988 Kettleman Hills Landfill Slope Failure. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ. 22, pp. 61-66.
- CHERNICHARO. C. A. L. (1997) Reatores anaeróbios (Princípios do tratamento biológicos de águas residuárias, v. 5). Belo Horizonte: DESA/UFMG, 246 p.
- CHRISTENSEN, T. H. & KJELDSSEN, P. (1989) Basic Biochemical Processes in Landfills. In: Christensen, T.H., Cossu, R., Stegmann, R. (eds.): Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact. London, GB: Academic Press, pp. 29-49.
- CINTRA, I. S.; LIBÂNIO, P. A. C.; COSTA, B. M. P. & CHERNICHARO, C. A. L. (2005) Influência da recirculação de chorume cru e chorume inoculado nas fases de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos. In: Congresso Brasileiro de

- Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, Campo Grande, MS. Anais... Rio de Janeiro: ABES.
- COLLAZOS, H. D. M. (1998) Deslizamiento de Basura en el Relleno Sanitario Doña Juana. CEPIS: Santa Fe de Bogotá, Janeiro, 38p.
- COLLINS, H. J. & KÖLSCH, F. (1996) Veränderung des Tragverhaltens und der mechanischen Eigenschaften von Abfällen durch Alterung und Abbau. Abschlußbericht, Leichtweiss Institut, Abfallwirtschaft, TU Braunschweig, 58p.
- COLLINS, H. J.; KÖLSCH, F. & ZIEHMANN, G. (1997): Veränderung des Tragverhaltens und der mechanischen Eigenschaften von Abfällen durch Alterung und Abbau. DFG final report. Ref no. Co 76/26-1 to -5. Leichtweiß Institute for Hydraulic Engineering, Technical University of Braunschweig.
- COLOMER, F. J.; GALLARDO, A.; BOVEA, M. D. & CARLOS, M. (2009) Evaluación del Riesgo Geotécnico en Vertederos de Residuos Sólidos: Identificación de los Principales Peligros. In: II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Barranquilla, setembro, 18p.
- COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS DA PETROBRÁS - CONTEC (1996). Material para Isolação Térmica.
- COMLURB - Companhia Municipal de Limpeza Urbana (2007) Composição gravimétrica do lixo no Município do Rio de Janeiro - 1995 - 2007.(Tabela Nº 1494), PCRJ. Disponível em < <http://www.armazemdedados.rio.rj.gov.br/>> Acesso em: out. 2010.
- COUMOULOS, D. G.; KORIALOS, T. P.; METAXAS, I. L. & GIORKA, D. A. (1995) The Main Landfill of Athens-Geotechnical Investigation. Proc., 5th International Landfill.
- COWLAND, J. W.; TANG, K. & GABAY, J. (1993) Density and Strength Properties of Hong Kong Refuse. Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1993, pp. 1433-1446.
- DAVID, A .C.; & TSUTIYA, M. T. (2001) Secagem Térmica de Biossólido na Região Metropolitana de São Paulo. In: 21 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES.
- D'ALMEIDA, M. L. O. & VILHENA, A. (2000) Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 2 ed., São Paulo: IPT/CEMPRE, 370p.
- DAMES & MOORE. (1988) Remedial Investigation/ Feasibility Study Work Plan, Corona, CA for Thomas Ranch, Job No. 116045-003-001, January.
- DEL-GRECO, O. & OGERRI, C. (1993) Geotechnical Parameters of Sanitary Wastes. In: IV International Landfill Symposium – Sardinia 93, S. Margherita di Pula, Italy, October, 1993, 12p.

- DERBYSHIRE COUNTY COUNCIL (1986) Report on the Non-Statutory Public Enquiry into the Gas Explosion at Loscoe, Derbyshire, 24 March, 1986. Derbyshire County Council. Derbyshire.
- DGGT, DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (1997): Empfehlungen der Arbeitskreise zur 'Geotechnik der Deponien und Altlasten' GDA, (Recommendations of the Working Group on 'Geotechnical Aspects of Landfill and Brownfield Sites', GDA), Berlin: Ernst, ISBN 3-433-01318-7.
- DGGT, DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK e.V. (1994). Empfehlungen des Arbeitskreises Geotechnik der Deponie und Altlasten". Sonderdruck aus: Bautechnik, Jg. 71, Heft 9, Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn.
- DÍAZ, L.; RÖDER, S. & NGUYEN, B. (2003). Solid Waste Management in Economically Developing Countries. Institut für Abfallwirtschaft Boku Universtität für Bodenkultur, Mungasse. Viena, Austria.
- DIN 4084 (1981) Subsoil; Calculations of Terrain Rupture and Slope Rupture.
- DIN 4084 (2000) Subsoil; Calculations of Terrain Rupture and Slope Rupture.
- DIXON, N. & JONES, D.R.V. (2005) Engineering Properties of Municipal Solid Waste. Geotextiles and Geomembranes, v.23, Issue 3, ISSN 0266-1144, pp. 205–233.
- ECONS.S.A., (2003) Safety in Landfill: Photographic Documentation. <http://www.econs.ch/> Bioggio, Switzerland.
- EDEN, R. (2005) The Three Dimensional Modelling of Flare Stacks Combusting Landfill Gas. Sardinia 2005. International Waste Management and Landfill Symposium Sta. Margheritha di Paula, Italy.
- EDGERS, L.; NOBLE, J.J.; & WILLIAMS. (1992) A Biologic Model for Long Term Settlement in Landfills. In: Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology, Rotherdan, Netherlands, Proceeding., Balkema, pp. 177–184.
- EDIL, T. B.; RANGUETE, V. J.; & WUELLNER, W. W. (1990) Settlement of Municipal Refuse. In: Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice. Philadelphia: ASTM, pp. 225–239.
- EDIL, T. B.; RANGUETTE, V. J. & OTZELBERGER, D. G. (1989) Comparison of Refuse Settlement Prediction Models. In: 12° Annual Madison Waste Conference on Municipal & Industrial Waste, Proc..., Madison, WI, pp. 520-531.
- EID, H. T.; STARK, T.; EVANS, W. D. & SHERRY, P. E. (2000) Municipal Solid Waste Slope Failure I: Waste and Foundation Soil Properties. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 126, pp. 397-407.
- EDINCLILER, A.; BENSON, C. H. & EDIL, T. B. (1996) Shear strength of municipal solid waste. Environmental Geotechnics Report 96-2. Geotechnical Engineering Program,

- Department of Civil e Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, U.S.A., 65p.
- EL-FADEL, M. & AL-RASHED, H. (1998) Sittlement in Municipal Solid Waste Landfills In: Field Scale Experiments. *J. Solid Waste Tec. Management*, v.25, n.2, pp.89-98.
- EL-FADEL, M.; FINDIKAKIS, A. N. & LECKIE, J. O. (1997) Environmental impacts of solid waste landfilling, *Journal of Environ. Management, ASCE*, 50, pp. 1-25.
- EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2003) Muniicipal Solid Waste in the United States: 2001 Facts and Figures. U. S.
- ESPINACE, R.; PALMA, J.; SANCHEZ-ALCITURRI, J. M. (1999) Experiencias de Aplicación de Modelos para la Determinación de los Asentamientos de Rellenos Sanitarios. In: Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 11, Foz do Iguacu, Brasil. Proceedings...
- ESPINACE, R.; PALMA, J. H.; VALENZUELA, P. (2007). Aspectos Geotécnicos de la Co-disposición de Lodos y Residuos Sólidos Urbanos. *Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS*, n.94, Argentina, sep-oct., pp. 98-107.
- EHRlich, M.; ALMEIDA, M. S. S. & BARBOSA, M. C. (1994). Pollution Control of Gramacho Municipal Landfill. In: Proceedings of the 1st Int. Congress on Environmental Geotechnics. Edmonton, Canada, July.
- FAHEY, M., NEWSON, T. A. & FUJIYASU, F. (2002) Engineering With Tailings; Environmental Geotechnics. Balkema, Lisse, Netherlands. 2, pp. 947-973.
- FARIAS, A. B. & JUCÁ, J. F. T. (2000) Propriedades Físicas dos Resíduos Sólidos do Aterro da Muribeca. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, ABES: Anais, ref.: iii-038.
- FARIAS, A. B. (2000) Parâmetros de compressibilidade de resíduos sólidos urbanos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 86 p.
- FARQUHAR, G. H. & ROVERS, F. A. (1973) Gás Production During Refuse Decomposition. *Water Air Soil Pollution.*, v.2, pp. 483-495.
- FASSETT, J.B.; LEONARDS, G.A.; REPETTO, P.C. (1994) Geotechnical Properties of Municipal Solid Wastes and their Use in Landfill Design. In: Waste Technical Conference - WasteTech 94. Proceedings, Charleston, SC, 32p.
- FEITOSA, M. C. A. (2009). Lodo de Esgoto: Algumas Aplicações em Engenharia. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. UNICAP, Recife, 120p.
- FEUERHARMEL, M.R. (2000) Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, junho, 133p.

- FONTES, C. M. A. (2003). Potencialidade de Cinzas de Lodo de Estações de Tratamento de Esgoto como Material Suplementar para Produção de Concretos com Cimento Portland. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro, 120p.
- FRANÇA, R.G. (2003) Remoção de Metais de Lodo de Esgoto por Biolixiviação Visando a sua Utilização Agrícola. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP.
- FUCALE, S. P. (2005) Influência dos Componentes de Reforço na Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 217p.
- FUCALE, S. P. & ARAUJO, E. R. (2003). Projeto de Caixa de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões. Não Publicado. Comunicação Pessoal.
- FUNGAROLI, A & STEINER, R. (1979). Investigation of Sanitary Landfill Behavior. Final Report, EPA-600-2-79-053a, vol.I, Washington, D.C-USA.
- G1, SP (2011). Cetesb aplica mais uma multa contra empresa dona de aterro que explodiu. Disponível em: <http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2011/04/cetesb-aplica-mais-uma-multa-contr-a-empresa-dona-de-aterro-que-explodiu.html>
- GABR, M. A. & VALERO, S. N. (1995) Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, v.18, n°18, June, pp. 241-251.
- GACHET, C.; LEMARÉCHAL, D.; GOTTELAND, P.; PRUDHOMME, B. (1998) In Situ Household Refuse Density Measurement protocol. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 3, 1998, Lisbon. Proceedings... Lisbon.
- GALANTE, V. N.; LEONARD, M. S. M. (1991) An Assessment of Deep Dynamic Compaction as a Means to Increase Refuse Density for an Operating Municipal Waste Landfill. Proc, Conference on the Planning and Engineering of Landfills, Midland Geotechnical Society, pp. 165-169.
- GANDOLLA, M., ACAIA, C. & FISHER, C. (1998) Landfill Gas Migration in the Subsoil. Experiences of Control and Remediation. James & James Science Publishers Ltd. London, UK. Pp. 237-245.
- GANDOLLA, M.; DUGNANI, I. BRESSI, G.; ACAIA, C. (1992). The Determination of Subsidence Effects at Municipal Solid Waste Disposal Sites. In: International Solid Waste Association Conference. Proceedings... Madri, pp. 1-17.
- GANDOLLA, M.; GABNER, E. & LEONI, R. (1979) Stability Problems with Compacted Landfills: the Example of Sarajevo. ISWA Journal. Pp. 75-80.

- GEYER, A. L. (2001). Contribuições ao Estudo de Disposição Final e Aproveitamento da Cinza de Lodo de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário como Adição ao Concreto. Tese de Doutorado em Engenharia – UFRS, Porto Alegre.
- GIBSON, R. E; LO, K. Y. (1961) A Theory of Consolidation for Soils Exhibiting Secondary Compression. In: Norwegian Geotechnical Institute Publications, n. 41, pp. 1-16.
- GOMES, C. LOPES, M. L. LOPES, M. G. (2005) A Study of MSW Properties of a Portuguese Landfill. International Workshop, 2005, Grenoble. Hydro-Physico-Mechanics of Landfills. Grenoble, LIRIGM; University France, 4p.
- GOTTELAND, P.; LEMARÉCHAL, D. & RICHARD, P. (1995) Analysis and Monitoring of the Stability of a Domestic Waste Landfill. Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995, pp. 777-787.
- GRAY, D. & OHASHI, H. (1983) Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand, Journal of Geotechnical Engineering., ASCE, 109(3), pp. 335-353.
- GREEN, D. & JAMENJAD, D. (1997) Settlement Characteristics of Domestic Waste. In: Conference on Contaminated Ground, 1977. Proceedings Conference on Contaminated Ground. Cardiff: BGS, pp.319-324.
- GRISOLIA, M. & NAPOLEONI, Q (1996) Geotechnical Characterization of Municipal Solid Waste: Choice of Design Parameters. Proc of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, A.A.Balkema, 5-8 November, v.2, pp. 642-646.
- GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q. & TANCREDI, G. (1995) The Use of Triaxial Tests for the Characterization of MSW. Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October, pp. 761-768.
- HEAD, K.H. (1980) Manual of Soil Laboratory Testing. London, Pentech Press, v.2, 442p.
- HEMPHILL, B. (1992) Rules and Options for Sludge Disposal In: Water Engineering and Management, v.139, n.2, February, pp. 24-26.
- HENDRON, D. M.; FERNÁNDEZ, G.; PROMMER, P. J. & OROZCO, L. F. (1999) Investigation of the Cause of the 27 September 1997 Slope Failure at the Doña Juana Landfill. Proceedings Sardinia 1999. 7th International Waste Management and Landfill Symposium. S. Margherita di Paula, Cagliari, Italy. 3, pp. 545-567.
- HINKLE, R. D. (1990) Landfill Site Reclaimed for Commercial Use as Container Storage Facility. Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva and G. David Knowles, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 331-344.

- HOWLAND, J.D. & LANDVA, A.O. (1992) Stability Analysis of a Municipal Solid Waste Landfill. In: Stability and Performance of Slope and Embankments – ASCE, Geotechnical Special Publication, n. 31.
- HUITRIC, R. (1981). Sanitary Landfill Settlement Rates. Technical University of Berlin.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT (1991) RELATÓRIO n°. 29.596 - Levantamento e Análise das Causas do Escorregamento de Massa de Lixo, no Aterro Sanitário Bandeirantes - AS-1, São Paulo, 24/06/91.
- JASEM, M. (2002) Solid Waste Management in Kuwait Journal of Solid Waste Technology and Management, vol.28, n. 2, May.
- JENKINS, J. E.; RAJIV, A. & RICK, T. (2002) South Hill Landslide, Meeting Owner's Need with Financial Constraints. Cordilleran Section.
- JESSBERGER, H. L. & KOCKEL, R. (1991) Mechanical Properties of Waste Materials. XV Ciclo di Conferenze di Geotecnica di Torino, Italien.
- JESSBERGER, H. L. & KÖCKEL, R. (1993) Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Materials. In: International Landfill Symposium, 4, Cagliari, Sardinia. Proceedings... Cagliari: CISA.
- JESSBERGER, H. L. (1994) Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction - Parts 1 to 3. Proc. Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, v.107, April, pp. 99-113.
- JESSBERGER, H. L.; SYLLWASSCHY, O. & KOCKEL, R. (1995) Investigation of Waste Body-Behavior and Waste-Structure-Interaction. Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995, pp. 731-743.
- JESSBERGER, H.L. (1990) Some Geotechnical Aspects of Waste Disposal. Proceedings of 6th International Congress of IAEG, Balkema, Rotterdam, pp.131-138.
- JOHANNESSEN, L. M. & BOYER, G. (1999) Observations of Solid Waste Landfills in Developing Countries: Africa, Asia and Latin America. Waste Management Anchor Team. The World Bank. Washington.
- JUCÁ, J. F. T. (2003) Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil. Anais do V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO' 2003, Porto Alegre, RS, pp. 443-470.
- JUCÁ, J. F. T.; CABRAL, J. J. P. S.; MONTEIRO, V. E. D; SANTOS, S. M. & PERRIER Jr., G. S. (1997) Geotechnics of a Municipal Solid Waste Landfill in Recife, Brazil. Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Almeida (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN90541 08851, pp. 429-436.

- JUCÁ, J. F. T.; MACIEL, F. J.; BELTRÃO, K. G.; MARIANO, M. O. H.; FUCALE, S. P. & MONTEIRO, V. E. D. (2005) Geotecnia Ambiental Aplicada a Aterros de Resíduos Sólidos. Livro Geotecnia no Nordeste, Editora Universitária-UFPE, pp. 452-506.
- JUNQUEIRA, F. F. (2000) Análise do Comportamento de Resíduos Sólidos Urbanos e Sistemas Dreno-Filtrantes em Diferentes Escalas, com Referência ao Aterro do Jôquei Clube – DF. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, 289p.
- KAIMOTO, L. S. A. & CEPOLLINA, M. (1996) Considerações Sobre Alguns Condicionantes e Critérios Geotécnicos de Projeto Executivos de Aterros Sanitários. In: Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, Porto Alegre: Anais... ABES, setembro, pp. 51-54.
- KAVAZANJIAN, E. (2003) Evaluation of MSW properties using field measurements. In: Koerner, R.M., Koerner, G.R., Hsuan, Y., Ashley, M.V. (Eds.). Geosynthetic Research Institute Conference, Hot Topics in Geosynthetics – IV, 17.
- 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, pp. 437-444.
- KAVAZANJIAN, E.; MATASOYIC, N.; BONAPARTE, R. & SCHMERTMAM, G.R. (1995) Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis. Geoenvironmental 2000. Geotechnical Special Publication n° 46, ASCE, Yalcin B. Acar and David E. Daniel (eds), New Orleans, vol.2, pp 1126-1142.
- KELLER, A.H., VERA, R.A. & BRIONES, M.E. (2002) Estudio a Escala de Laboratorio para la Determinación de los Parámetros Hidrológicos Óptimos para la Generación de Metano en Rellenos Sanitarios en Chile. Proyecto de Investigación. n° 202.788/2001. Universidad Católica de Valparaíso, Chile.
- KLEIN, A. (2003) Geotechnical and Geoenvironmental Consultant. M. Sc. Meshilah.com. 49 Einstein St. Haifa 34602 Israel.
- KNOCHENMUS, G.; WOJNAROWICZ, M. & VAN IMPE, W (1998) Stability of Municipal Solid Wastes. In: Proc. of the Third International Congress in Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, Seco e Pinto (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 905809 006x, pp. 977-1000.
- KOCASOY, G. & CURI, K. (1995). The Úmraniye - Hekimbasi Open Dump Accident. Waste Management & Research. 13, pp. 305-314.

- KÖCKEL, R & JESSBERGER, H. (1995) Stability Evaluation of Municipal Solid Waste Slopes. Proc. 11th ECSMFE, Copenhagen, Denmark, Danish Geotechnical Society, Bulletin 11, vol.2.
- KÖCKEL, R. (1995) Scherfestigkeit von Mischabfällen in Hinblick auf die Standsicherheit von Deponien. Schriftenreihe des Institute für Geotechnik, Ruhr Universität Bochum, Heft 24.
- KOERNER, R. M. & SOONG, T.-Y. (2000) Stability Assessment of Ten Large Landfill Failures. In: Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics, Proceedings of Sessions of Geo Denver 2000, ASCE Geotechnical Special Publication n.103, pp.1–38.
- KOERNER, R.M., & SOONG, T.-Y. (2000). Leachate in Landfills: The Stability Issues. Journal of Geotextiles and Geomembranes, Vol. 18, pp. 293-309.
- KÖLSCH, F (2005). Landslides Standsicherheitsversagen. Geo Und Umwelttechnik GmbH. Pág. web: <http://www.dr-koelsch.de/>
- KÖLSCH, F. & ZIEHMANN, G. (2004) Landfill Stability, Risks and Challenges. Waste Management World ISWA. 4.
- KÖLSCH, F. (1990). Materialkennwerte von Abfall im Hinblick auf die Standsicherheit von Mülldeponien". Diplomarbeit am FB Bauingenieurwesen, TU Braunschweig, Deutschland. (não publicado).
- KÖLSCH, F. (1993) The Bearing Behaviour of Domestic Waste and Related Consequences for Stability. CISA (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy), Vol.2, pp. 1393-1410.
- KÖLSCH, F. (1995) Material Values for Some Mechanical Properties of Domestic Waste. CISA (Hrsg.): Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy), Vol.2, pp. 711-729.
- KÖLSCH, F. (1996) Der Einfluß der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall. Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig, Heft 133/96, ISSN 0343-1223, 158p. (Dissertation)
- KÖLSCH, F. (1997) Standsicherheitsberechnung für Siedlungsabfalldeponien unter Berücksichtigung anisotroper Stoffeigenschaften. Geotechnik 20, Heft 3, Essen: Glückauf.
- KÖLSCH, F. (2003) Festigkeitsuntersuchungen – Projekt: Deponie Ihlenberg Ostböschung. Bericht N° 1, Dr. Kölsch Geo- und Umwelttechnik.
- KÖLSCH, F.; FRICKE, K.; MAHLER, C. & DAMANHURI, E. (2005) Stability of Landfills – The Bandung Dumpsite Disaster. Proceedings Sardinia 2005, Tenth International

- Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; October, pp. 3-7.
- KÖNIG, D. & JESSBERGER, H. L. (1997) Waste Mechanics. In: ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, pp. 35-76.
- LAMARE NETO, A. (2004) Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de Materiais Granulares com Fibras. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 190p.
- LANDVA A & CLARK J (1986) Geotechnical Testing of Waste Fill. In: 9th Canadian Geotechnical Conference, August, pp 371–385
- LANDVA, A. O. & CLARK, J. I. (1990) Geotechnics of Waste Fills. Theory and Practice. ASTM STP 1070 – Arvid Landva, G. David Knowles, editors, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 86-103.
- LANDVA, A. O.; PELKEY, S. G. & VALSANGKAR, A. J. (1998) Coefficient of Permeability of Municipal Refuse. In: Sêco e Pinto, P.S. (ed). Environmental Geotechnics. Rotterdam, Holanda: Balkema.
- LANDVA, A. O.; VALSANGKAR, A. J. & PELKEY, S. G. (2000) Lateral Earth Pressure at Rest and Compressibility of Municipal Solid Waste. Can. Geotech. Journal n.37, pp.1157-1165.
- LASSINI, P.; SALA, G. & SARTORI, F. (1999) Reclamation of Old and News Landfills and Their Integration with the Environment. International Waste Management and Landfill Symposium. Sta. Margherita di Paula, Cagliari, Italy.
- LEMOINE, C. H. (2003). Bioreactor Landfills. An innovative Solution or a Riski Experiment? Alternative Service Delivery in Kampala City Council. Kampala City, Uganda.
- LEVINE, A. D.; HARWOOD, V. J.; CARDOSO, A. J.; RHEA, L. R.; KAYAK, B. S.; DODGE, B. M.; DECHER, M. L.; DZAMA, M. L.; DZAMA, G.; JONES, L.; HALLER, E. (2005) Assessment of Biogeochemical Deposits in Landfill Leachate Drainage Systems: University of South Florida.
- LIMA, A. L.; JUCÁ, J. F. T.; BRITO, A. R. & MELO, M. C. (2002) Estudos Comparativos de Diferentes Metodologias para Determinação de Umidade e Sólidos Voláteis Aplicadas em Resíduos Sólidos Urbanos. In: VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – SIBESA. ABES, Vitória, setembro, 11p.
- LIMPURB (1999) Departamento de Limpeza Urbana do Município de São Paulo – SP.
- LING, H. I.; LESHCHINSKY, D.; MOHRI, Y. E. & KAWABATA, T. (1998). Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement. In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 124, n. 1, pp. 21-28.

- LOPES, M. A. J. (2008). Incorporação de Lodo de Esgoto e seus Efeitos sobre Alguns Atributos do Solo Cultivado com Rabanetes. Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais – UNICAP: Recife, 99p.
- MACIEL, F. J. (2003) Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, CTG, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, novembro, 173p.
- MACIEL, F. J. (2009) Geração de Biogás e Energia em Aterro Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de doutorado em Engenharia Civil, CTG, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, dezembro, 330p.
- MAHLER, C. & AGUILAR, A. B. (2001). Determinação da Permeabilidade in Situ em Aterros de Resíduos Sólidos”, 21 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES.
- MANASSERO, M. (1997) Controlled Landfill Design. ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, TC5 Report, pp. 77-111.
- MANASSERO, M.; VAN IMPE, W. F. & BOUAZZA, A. (1996) Waste Disposal and Containment. In: Proc. Of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, Preprint of special lectures, Osaka, Japan, A. A. Balkema, v.3, pp. 1425-1474.
- 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 Geotecnia, v.3, novembro, Brasília, pp. 1671-1678.
- MARIANO, M. O. H.; MACIEL, F. J.; FUCALE, S.P.; JUCÁ, J. F. T. & BRITO, A. R. (2007) Estudo da Composição dos RSU do Projeto Piloto para Recuperação do Biogás no Aterro da Muribeca/PE. In: VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental 6, Recife – PE.
- MARTINS, H. L. (2006) Avaliação da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por Meio de Ensaios de Cisalhamento Direto em Equipamento de Grandes Dimensões. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, setembro, 116p.
- MATA-ALVAREZ, J., & MARTINEZ-VITURTIA, A. (1986) Laboratory Simulation of Municipal Solid Waste Fermentation with Leachate Recycle. J. Chem. Tech. Biotechnol., vol. 36, pp. 547-556.
- MATSUMOTO, Y. *et al.* (1987) Geotechnical Study in the Tokyo Port (2) – Soil Engineering Properties of Refuse Landfill. 22th Japan Conference Soil Mech. Found. Engg., pp. 35-38.

- MAZZUCATO, A.; SIMONINI, P. & COLOMBO, S. (1999) Analysis of Block Slide in a MSW Landfill. Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy: 4-8 October, Vol. 3, pp. 537- 544.
- McCARTY, P. L. (1964a) Anaerobic Waste Treatment Fundaments II. Environmental Requerimens and control. Public Works, v.95, 123p.
- McCARTY, P. L. (1964b) The Methane Fermentation. In: HENKELEKIAN, H.; DONDERO, N. C. (ed.) Principles and applications in Aquetin Microbiology. New York: John Wiley and Sons.
- McCREANOR, P. T. & REINHART, D. R. (1997) Design and Operational Guidance for Landfill Leachate Recirculation Systems. Proceedings of the 2nd Annual SWANA Landfill Symposium, Sacramento, California, August 4-6.
- MELO, M. C. (2003) Uma análise de recalques associada a Biodegradação no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE. 160p.
- MELO, V. L. A. & JUCÁ, J. F. T. (2001) Diagnóstico Ambiental em Aterros de Resíduos sólidos de Referência. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa: ABES.
- MERRY, S. M. (2000) Proyect Description: Field Reconnaissance of Payatas Landfill Wasteslide in Quezon City, Philippines.
- MERRY, S.M. & KAVAZANJIAN, E. (2006) Influence of Landfill Gas on the Stability of Wet Landfills. Proc. 11th Annual Landfill Symposium, Solid Waste Association of North America, Silver Springs, Maryland Solid Waste Association of North America, Nashville, TN, June, pp. 5-7.
- MERRY, S.M.; FRITZ, W.U.; BUDHU, M.; & JESIONEK, K. (2006) Effect of Gas on Pore Pressures in Wet Landfills. J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 32, No. 5, May.
- MERRY, S.M., KAVAZANJIAN, E., JR., & FRITZ, W. (2005) Reconnaissance of the July 10, 2000 Payatas Landfill Failure. Journal of Constructed Facilities, ASCE, V. 19, N. 2, pp. 100-107.
- MERZ, R. C. & STONE, R. (1962) Landfill Settlement Rates. Public Works, v.93, n.9, pp. 103-106, 210-212.
- MITCHELL, J. K. & VILLET, W. C. B. (1987) Reinforcement of Earth Slopes and Embankments. NCHRP Report No. 290, Transportation Research board, Washington, 323p.

- MONTEIRO, V. E. D. (2003) Análises Físicas, Químicas e Biológicas no Estudo do Comportamento do Aterro Sanitário da Muribeca. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, dezembro, 232p.
- MÜNNICH, K. (2001) "Bericht über Versuche zur mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Restabfälle – Deponie Pinnow. Leichtweiß-Institut, TU Braunschweig, DE, 13p. (não publicado)
- NASCIMENTO, J. C. F. (2007) Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 160p.
- NAVAL, L. P. & GONDIM, S. M. (2001) Caracterização Física e Físico-Química dos Resíduos Sólidos Urbanos Domésticos e Comerciais da Cidade de Palmas – TO. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa: ABES, pp. 1-7.
- OLIVEIRA, D. A. F. (2002) Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 154p.
- OLIVIER, F. & GOURC, J. (2007) Hydro-mechanical Behavior of Municipal Solid Waste Subject to Leachate Recirculation in a Large-Scale Compression Reactor Cell. Waste Management. V. 27, n. 4, pp. 40-58.
- OWEIS, I. S. (1993) Stability of Landfills. Geotechnical Practice for Waste Disposal, D. Daniel (ed.), pp. 224-254.
- OWEIS, I. S.; SMITH, D. A.; ELLWOOD, R. B. & GREENE, D. S. (1990) Hydraulic Characteristics of Municipal Refuse. Journal Geotechn. Eng. ASCE, v. 116, n. 4, pp. 539-553.
- OWEIS, L. S. & KHERA, R. P. (1990) Geotechnology of Waste Management. Butterworth and Co. Ltd., London.
- PAES, R. F. C. (2003) Caracterização do Chorume produzido no Aterro da Muribeca – PE. Dissertação de Mestrado - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 150p
- PALMA, J. H. (1995) Comportamiento Geotécnico de Vertederos Controlados de Resíduos Sólidos Urbanos, Tesis de Doctorado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos – Universidad de Cantabria, 300p.
- PALMISANO, A. C. & BARLAZ, M. A. (1996) Microbiology of Solid Waste. New York: CRC Press, 224p.

- PARDO DE SANTAYANA, F. & VEIGA, A. A. (1998) Behaviour of a Slide Area at a Lisbon's MSW Landfill After Implementation of Stabilizing Measures. Proceedings of the Third International Congress on Environmental Geotechnics. Lisbon, Portugal.
- PARK, H. I. & LEE, S. R. (1997) Long-term Settlement Behavior of Landfills with Refuse Decomposition. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, v. 24, n.4, pp. 159-165.
- PARKER, A. (1983) Behavior of Waste in Landfill Leachate and Behavior of Waste in Landfill – Methanegeneration. In: HOLMES, J. (ed.) *Practical Waste Management*. England: John Wiley & Sons.
- PARSONS, P. (1993) Options for Landfill Containment. Proceeding of Harwell Waste Management Symposium. AEA Technology. Harwell.
- POHLAND, F. G. (1987) Critical review and summary leachate and gás production from landfills. EPA/600/S2-86/073, US EPA Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH.
- POHLAND, F. G. (1991) Fundamental Principles and Management Strategies for Landfill Codisposal Practice. In: *International Landfill Symposim*, 3, 1991. Proceedings... Imola, Italy, v. 2, pp. 1445-1460.
- POVINELLI, J. & GOMES, L. P. (1991) Caracterização Física dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de São Carlos – SP. *Estudos Tecnológicos Unisinos: Arquitetura*, v.14, n.9, pp.91-106.
- POWRIE, W. & BEAVEN, R. P. (1999) Hydraulic Properties of Household Waste and Implications for Landfills. *Proc. Institution of Civil Engineering, Geotechnical Engineering*, London, v.137, October, pp. 235-247.
- POWRIE, W.; BEAVEN, R. P. & HUDSON, A. P. (2005) Factors Affecting the Hydraulic Conductivity of Waste. In: *International Workshop on Hydro-Physico-Mechanics of Landfills*, Grenoble. Proceedings...
- PROIS, T. A. (2003) Emergency Relief to Victims of Floods & Landslides. Balance Requested from the ACT Alliance. ACT International. Action by Churches Together. Geneve, Switzerland.
- RÉGIS, P. A. (2010) Apresentação do Sistema para Aquisição de Dados - *Spider 8 e software Catman 4.5*, da HBM. Comunicação Pessoal.
- REINHART, D. R. & AL-YOUSFI, A. B. (1996) The Impact f Leachate Recirculation on Municipal Solid Waste Landfill Operating Characteristics. *Waste Management & Research*. V. 14, pp. 337-346.

- REUTNER, E. (1995) Verformungsanalyse und standsicherheitsbeurteilung für die Zentraldeponie Hannover. Geotechnische Probleme beim Bau von Abfall - Deponien, 11. Nummer deponieseminar, Mullner, B. (ed.) Eigenverlag LGA.
- RICHARDSON, G. & REYNOLDS, D. (1991) Geosynthetic Consideration in a Landfill on Compressible Clays. In: GEOSYNTHETICS 91, Proceedings... Atlanta: IFAI.
- RUSHBROOK, P. (1999) Getting from Subsidence Landfill to Sophisticated Landfill. Waste Management & Research. ISWA. 17, pp. 4-9.
- SÁNCHEZ-ALCITURRI, J. M.; PALMA, J.; SAGASETA, C. & CAÑIZAL, J. (1993) "Mechanical Properties of Wastes in a Sanitary Landfill". In: Proc. of International Conference Green' 93 – Waste Disposal by Landfill. Sarsby (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 356 6, pp. 357-363.
- SANEPAR – COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (1997) Manual Técnico para Utilização Agrícola do Lodo de Esgoto no Paraná. Curitiba, 96p.
- SANTOS, A. D. (2003). Estudo das Possibilidades de Reciclagem dos Resíduos de Tratamento de Esgoto da Região Metropolitana de São Paulo. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Escola Politécnica, USP: São Paulo, 265p.
- SANTOS, L. A. & PRESA, E. P. (1995) Compressibilidade de Aterros Sanitários Controlados. III Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos REGEO'95, v.II, Ouro Preto.
- SAVAGE, G. M.; DIAZ, L. F.; GOLUEKE, C. G.; MARTONE, C. & HAM, R. K. (1998) Guidance for Landfilling Waste in Economically Developing Countries. Washington: USEPA, (Report EPA/600/R-98-040).
- SCHEELHAASE, T.; BIDLINGMAIER, W.; KLUMPER, A.; MAILE, A. & RECHBERGER, M. (2001) Geotechnical Behaviour of Mechanically Pretreated Residual Waste - Proceedings 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, 5th European Conf. On Soil Mechanics and Foundations, Madrid, Espanha, vol.1, pp.299-306.
- SCHOMAKER, N. B. (1972) Construction Techniques for Sanitary Landfills. Waste Age Magazine, March/April, pp.24-25; 42-44.
- SEGAL, J. P. (1987) Testing Large Landfill Sites before Construction of Gas Recovery Facilities. Waste Mgmt. Res., vol. 5, pp. 123-131.
- SEPA – SCOTTISH ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (2004) Waste Data Digest 4. Stirling, UK.

- SEWARD, T. (2000) Guadalupe Landfill Landslide. San Francisco Bay Regional Water Quality Control Board. Executive Officer's Report. San Francisco.
- SIEGEL, R. A.; ROBERTSON, R. J. & ANDERSON, D. G. (1990) Slope Stability Investigations at a Landfill in Southern California. *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, Arvid Landva and G. David Knowles, Eds., Philadelphia, pp. 259-284.
- SILVA, A. B. (2008). Planejamento Experimental e Modelagem Estatística do Efeito do Uso de Lodo em Solos. Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais – UNICAP: Recife, 54p.
- SILVA, F. V. B. (2005) Avaliação da influência da correção do teor de umidade na degradação anaeróbia de resíduos sólidos urbanos. Belo Horizonte: EE-UFMG. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. UFMG, Belo Horizonte, 133p.
- SIMÕES, G. F. (2004) Avaliação da estabilidade de taludes de aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos utilizando análises probabilísticas. Relatório Final de Projeto de Pesquisa. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG.
- SIMÕES, G. V.; CAMPOS, T. M. P.; GALVÃO, T. C. B. & VARGAS JR, E. A. (1996) Considerações sobre o Fenômeno de Adensamento em Aterros Sanitários. In: *Simpósio Internacional da Qualidade Ambiental*, Porto Alegre, pp. 131-135.
- 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.
- SKEMPTON, A. W. (1954). The Pore-Pressure Coefficients A and B. *Géotechnique*, Vol. 4, nº. 4, pp. 143-147.
- SMLU - SECRETARIA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA. (2004) Caracterização dos Resíduos Sólidos de Belo Horizonte. Belo Horizonte: SMLU, 52 p.
- SOWERS, G. F. (1973) Settlement of Waste Disposal Fills. In: *International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering*, 8, 1973. Moscow, RU. Proceedings... Moscow, Part 2.
- SOWERS, G.F. (1968) Foundation Problems in Sanitary Landfills. *Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE*, v.4, pp. 103-116.
- STARK, T. D., EID, H. T., EVANS, W. D. & SHERRY, P. E. (2000). Municipal Solid Waste Slope Failure II: Stability Analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126, pp. 408-419.

- STOLL, U. W. (1971) Mechanical Properties of Milled Domestic Trash. National Water Resources Engineering Meeting, Phoenix, Arizona, USA.
- STULGIS, R. P.; SOYDEMIR, C. & TELGENER, R. J. (1995) Predicting Landfill Settlement. In: Geonviromental 2000. Geotechnical Special Publication n°.46, ASCE, vol.2, Ed. Yalcin B. Acar and David E. Daniel, New Orleans, pp. 980-993.
- SWA – SOLID WASTE ANALYSIS (2004) Methodology for the Analysis of Solid Waste. Project: Solid Waste Analysis – Tool European Commission, 5th Framework Program, England, 61p.
- TAY, J. H. (1987). Sludge Ash Filler for Portland Cement Concrete. Journal of Environmental Engineering, S. 1, v. 113, n. 2, pp. 345-351.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H. & VIGIL, S. (1993) Integrated Solid Waste Management, McGraw Hill International Editions, New York, N. Y., 978p.
- TENAX SpA., Gamma Verde (2004). TENAX International B.V. Geosynthetics Division. Via Feruccio Pelli, 14 CH-699. Lugano, Switzerland.
- TERRATV, VIDEOS ON LINE (2011). Aterro desaba e toneladas de lixo interditam via em SP. Disponível em: <http://terratv.terra.com.br/videos/Noticias/Brasil/4194-361620/Aterro-desaba-e-toneladas-de-lixo-interditam-via-em-SP.htm>
- TERZAGHI, K. & PECK, R. B. (1948) Soil Mechanics in Engineering Practice. New York: John Wiley & Sons.
- TSUTIYA, M. T. & HIRATA, A. Y. (2001). Aproveitamento e Disposição Final de Lodo de Estação de Água do Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21. João Pessoa. Anais... ABES: CD-ROM.
- TSUTIYA, M.T. (1999) Tecnologias Emergentes para Disposição Final de Biossólidos de ETEs. In: Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, I-141, maio.
- TUREK, M. KOROLEWICZ, T. & CIBA, J. (2005) Removal of Heavy Metals from Sewage Sludge Used as Soil Fertilizer. Soil & Sediment Contamination, 14.
- U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS (1995) Landfill off-gas collection and treatment system, Technical letter nº 1110-1160, Depart. of The Army, Washington DC, USA.
- UNECE (United Nations Economic Commission for Europe), (2004). Management of Waste and Contaminated Sites. Studies: Bosnia Herzegovina. 6, pp. 91-99.
- VAN IMPE, W. F.; BOUAZZA, A. & HAEGEMAN, W. (1996) Quality Control of Dynamic Compaction in Waste Fills. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 2, Osaka, Japão, Proceedings. Rotterdam: A. A. Balkema, Vol. 2, pp. 635-640.

- VAN MEERTEN, J. J.; SELLMEJER, J. B. & PEREBOOM, D. (1995) Prediction of Landfill Settlements. In: International Landfill Symposium, 5, Cagliari, Sardinia. Proceedings... Cagliari: CISA.
- VERBRUGGE, J. C. (2000) La Geomecanique des Dechets Menagers. Faculte des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, pp.1-79.
- WALL, D. K. & ZEISS, C. (1995) Municipal Landfill Biodegradation and Settlement. Journal of Environmental Engineering, v. 121, n. 3, pp. 214-224.
- WARITH, M. (2002) Bioreactor Landfills: Experimental and Field Results. Waste Management, v. 22, pp. 7-17.
- WATER ENVIRONMENT FEDERATION (1991) Design of Municipal Treatment Plants. 2v. WEF Manual of Practice n° 8, ASCE Manual and Report on Engineering Practice n° 76, Alexandria: WEF.
- WATTS, K. S.; FISHER, A. R. J. & LEWICKI, R. A. (2001) A Large Scale Instrumented Test of the Behavior of Newly Placed Domestic Waste. In: International Landfill Symposium, 8, 2001 Cagliari, Italy. Proceedings of the Sardinia, Cagliari, v. 2, pp. 105-114.
- WATTS, K. S. & CHARLES, J. A. (1990) Settlement of Recently Placed Domestic Refuse Landfills. Proc. Institution of Civil Engineering, London, part 1, v. 88, Dec., pp. 971-993.
- WHITE, P.; FRANKE, M. & HINDLE, P. (1995) Integrated Solid Waste Management: a Lifecycle Inventory. London: Blackie Academic & Professional.
- WHO – World Health Organization (1979). Methods of Analysis of Sewage Sludge Solid Waste and Compost. International Reference Center for Waste Disposal. Switzerland.
- WITHIAM, J. L.; TARVIN, P. A.; BUSHELL, T. D.; SNOW, R. E. & GERMANN, H. W. (1995) Prediction and Performance of Municipal Landfill Slope. In: GEOENVIRONMENT 2000 – Characterization, Containment, Remediation, and Performance In Environmental Geotechnics. New Orleans, Louisiana: ASCE, Geotechnical Special Publication N° 46, pp. 1005-1019.
- WITTLE, A. (1998) UK Landfill; The future? The Environmentalist. Kluwer Academic Publishers. 18, pp. 263-265.
- YEN, B.C. & SCANLON, B. S. (1975) Sanitary Landfill Settlement Rates. In: Journal of the Geotechnical Engineering Division, v. 101, n. GT5, pp. 475-487.
- YOSHIMURA, D. (2002) Internal Audit Committee. New Mexico Risk Management Decision Department of Finance and Administration Land Acquisition 02-135. Albuquerque.

- ZHAO, A. & MONTANELLI, F. (1999) Effect of Soil Presence on Flow Capacity of Drainage Geocomposites under High Normal Loads. Tenax Corporation, Baltimore. Maryland, USA.
- 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, pp.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, pp.139-144.
- ZIGLIO, L. (2002) O Mercado da Reciclagem de Papel no Município de São Paulo, Brasil. Scripta Nova: Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, Universidad de Barcelona, v. 6, n. 119. Disponível em: <<http://www.ub.es/geocrit/sn/sn119-33.htm>>
- ZORNBERG, J.G.; JERNIGAN, B.L. SANGLERAT, T.R. & COOLEY, B.H. (1999) Retention of Free Liquids in Landfills Undergoing Vertical Expansion. ASCE GT7. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 125, n.7, July, pp 583-594.