

**JÚLIO CÉSAR FIALHO DO NASCIMENTO**

**Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Geotecnia.

**Orientador: Prof. Tit. Orencio Monje Vilar**

**São Carlos  
2007**



**FOLHA DE JULGAMENTO**

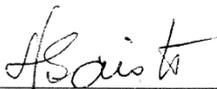
Candidato: Engenheiro **JULIO CESAR FIALHO DO NASCIMENTO**

Dissertação defendida e julgada em 06/06/2007 perante a Comissão Julgadora:



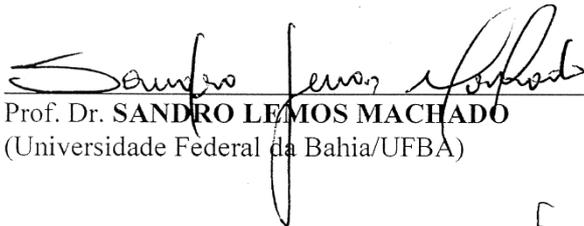
Prof. Titular **ORENCIO MONJE VILAR (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



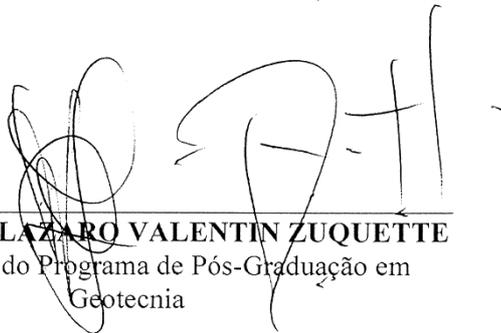
Prof. Titular **NÉLIO GAIOTO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



Prof. Dr. **SANDRO LEMOS MACHADO**  
(Universidade Federal da Bahia/UFBA)

Aprovado



Prof. Associado **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Geotecnia



Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**  
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC



## DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais, João Pedro e Edneuza, e aos meus adorados irmãos, Cris e Pedro, com muito carinho e amor.



## AGRADECIMENTOS

Ao professor Drº Orencio Monje Vilar, pelos ensinamentos, pelo apoio, confiança irrestrita e orientação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa de Mestrado.

Ao Laboratório de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal da Bahia, por fornecer a estrutura física e humana necessária à realização deste trabalho.

Ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, por disponibilizar suas instalações físicas e o seu acervo intelectual, que foi de grande valor ao meu desenvolvimento profissional.

Ao professor e amigo, Sandro Lemos Machado, pela confiança depositada e pelos valiosos ensinamentos durante minha iniciação científica. Foi o grande idealizador deste projeto e presença imprescindível nesta empreitada.

À querida professora, Mirian de Fátima Carvalho, pelos conselhos e pelo exemplo de profissionalismo.

Ao amigo, Kleber Azevedo Dourado, pela admirável generosidade e pela grande ajuda na realização dos ensaios.

Aos grandes amigos da turma de Mestrado, Ana Elisa, Ana Paula, Cleber, Eder, Fagner, Julio, Juliana, Val, Lívia, Alberto, Crisley, Marina e Lizandra, pelo companheirismo e por todos os momentos vividos ao longo destes dois anos.

Aos demais amigos do Departamento de Geotecnia, pela convivência repleta de muitos ensinamentos.

À todos que fazem ou fizeram parte da equipe Geoamb, Nelson, Carlos, Marcelo, Breno, Tiago, Maíra, André, Patrícia, Larissa, Fernandinha, Help, Julian, Átila, Luciano, Gilson, Rodrigo, Maurício, Fernando, Jeová, pelo companheirismo e pelo apoio durante os ensaios.

Às demais pessoas, que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.



*"A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original."*

Albert Einstein



## **RESUMO**

NASCIMENTO, J. C. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 2007. 160p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Este trabalho apresenta um estudo das propriedades de resistência e de deformabilidade dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Amostras de resíduo de diferentes idades, obtidas no Aterro Metropolitano Centro (Salvador-BA), foram submetidas a ensaios de compressão triaxial e de compressão confinada em equipamentos de grandes dimensões. Os resultados dos ensaios triaxiais demonstraram que os RSU não apresentam pico ou valor máximo de resistência, mesmo para grandes deformações. Os parâmetros de resistência foram obtidos a partir de níveis específicos de deformação. Não foi possível observar a influência do processo de decomposição na resistência ao cisalhamento do RSU, porém observou-se um aumento de resistência com o acréscimo do peso específico. Dos ensaios em resíduos sem fibras (plásticos, têxteis, etc.), verificou-se uma redução nos parâmetros de resistência em comparação com os do resíduo composto, indicando a grande influência do material fibroso no comportamento mecânico do RSU. Ensaio não drenados mostraram grande desenvolvimento de pressão neutra, que provocaram distorções nas envoltórias efetivas, fazendo com que os ângulos de atrito obtidos fossem maiores que aqueles obtidos nos ensaios drenados. Duas amostras de RSU novo foram submetidas a ensaios de compressão confinada. Uma das amostras foi submetida à recirculação de chorume para avaliação do efeito da decomposição nos recalques medidos. Os resíduos apresentaram uma rápida compressão primária e deformações secundárias que se desenvolveram durante todo o ensaio, sem tendência de estabilização. A recirculação de chorume não provocou acréscimos nas deformações secundárias, provavelmente devido ao pequeno volume de chorume utilizado e ao ambiente não favorável à decomposição.

Palavras-chave: Resíduo sólido urbano, Resistência ao cisalhamento, Compressibilidade, Ensaio de laboratório.



## ***ABSTRACT***

NASCIMENTO, J. C. F. **Mechanical behaviour of municipal solid waste**. 2007. 160p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

This work deals with the shear strength and compressibility properties of Municipal Solid Waste (MSW). Four years old end new waste samples recovered from Metropolitan Center Sanitary Landfill (Salvador, Brazil) were submitted to triaxial and confined compression tests using large dimension specimens. Triaxial test results showed that a peak or an ultimate shear stress value was not reached even for the largest deformation attained in the tests and thus, shear strength parameters were derived to different strain levels. It was shown that the shear strength was not too much affected by waste decomposition process, but increased with the waste unit weight. The waste without plastic fibres tended to show reduced shear strength as compared to the whole waste, showing the large influence of this materials on MSW mechanical behavior. Undrained tests showed large pore pressures build up and tended to yield effective shear strength parameters larger than that obtained in drained tests. Confined compression tests were performed using samples of fresh waste with and without leachate recirculation to investigate the influence of the waste degradation on MSW compressibility. It was observed that the waste showed a quick primary compression and secondary compression that extended throughout the test period without reaching equilibrium. The leachate recirculation did not increase secondary deformation probably by the low volume of leachate used during the test and due the ambient conditions not suitable to the degradation.

Key-words: Municipal solid waste, Shear strength, Compressibility, Laboratory tests.



## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

Figura 2.1. Percentual da população, PIB e geração de resíduos sólidos por região (JUCÁ, 2003).....	35
Figura 2.2. Classificação dos resíduos sólidos urbanos segundo a sua origem (SCHALCH, 1992).....	36
Figura 2.3. Classificação do RSU usando o diagrama triangular (GIRISOLIA et al., 1995) .....	37
Figura 2.4. Evolução da destinação final dos resíduos sólidos no Brasil (JUCÁ,2003).....	38
Figura 2.5. Tipos de aterros sanitários (TCHOBANOGLIOUS et al. 1993).....	44
Figura 2.6. Diâmetros equivalentes dos componentes do RSU (TCHOBANOGLIOUS et al. 1993).....	46
Figura 2.7. Distribuição do tamanho das partículas do RSU com 15 anos de aterro do aterro Bandeirantes de São Paulo (CARVALHO, 1999).....	47
Figura 2.8. Teor de umidade para o resíduo sólido urbano (CARVALHO, 1999).....	50
Figura 2.9. Variação da temperatura do RSU com a profundidade, Aterro Ano Liossia, Atenas (Grécia), (COUMOULOS et al., 1995).....	51
Figura 2.10. Variação da temperatura do RSU com a profundidade, Aterro da Muribeca, Recife (Brasil), (MARIANO & JUCÁ, 1998).....	51
Figura 2.11. Variação do peso específico com a idade do resíduo (AZEVEDO et al., 2003).....	53
Figura 2.12. Coeficiente de permeabilidade do RSU em função da profundidade (CARVALHO, 1999).....	55
Figura 2.13. Curva teórica de compressibilidade do RSU (Grisolia e Napoleoni, 1996).....	58
Figura 2.14. Modelo composto para a avaliação da compressibilidade dos RSU (VILAR et al., 2006).....	65
Figura 2.15. Mobilização do intercepto de coesão e ângulo de atrito com as deformações axiais (König & Jessberger, 1997).....	66
Figura 2.16. Resultados de ensaios SPT em maciços de RSU de algumas cidades do Brasil (JUCÁ, 2003).....	70

Figura 2.17. Classificação do RSU usando a Carta de Schmertmann (CARVALHO, 1999).....	71
Figura 2.18. Curvas tensão-deformação típicas para o resíduo sólido urbano (MANASSERO et al. 1996).....	72
Figura 2.19. Relação tensão - deformação obtida para resíduos sólidos urbanos a partir de ensaios de cisalhamento direto (MANASSERO et al. 1996).....	73
Figura 2.20. Envoltórias de resistência obtidas para resíduos sólidos urbanos a partir de ensaios de cisalhamento direto (VAN IMPE et al., 1998).....	74
Figura 2.21. Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial (GRISOLIA et al. 1995b). .....	75
Figura 2.22. Resistência ao cisalhamento do RSU para diferentes deformações obtidas a partir de ensaios triaxiais (KÖNIG & JESSBERGER, 1997).....	76
Figura 2.23. Faixa de valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU. Valores recomendados para projetos por Sánches-Alciturri (1993).....	77
Figura 2.24. Faixa de envoltórias de resistência obtida por diversos pesquisadores. Envoltórias de resistência propostas para projetos (DIXON & JONES, 2005).....	78
Figura 3.1. Foto aérea com detalhes de localização do Aterro Metropolitano Centro.....	80
Figura 3.2. Fotografia aérea do Aterro Metropolitano Centro.....	81
Figura 3.3. Manta plástica utilizada para a homogeneizado do resíduo e evitar a sua contaminação com solo.....	83
Figura 3.4. Coleta, homogeneização, quarteamento e armazenamento do resíduo novo.....	84
Figura 3.5. Escavação do solo de cobertura para a retirada de material com 4 anos de aterrado.....	85
Figura 3.6. Separação manual dos componentes do resíduo com 4 anos de aterrado.....	86
Figura 3.7. Consolidômetro de grandes dimensões utilizado para a realização dos ensaios de compressão confinada em amostras de grande dimensão.....	90
Figura 3.8. Compactação do resíduo para realização do ensaio de compressão confinada.....	91
Figura 3.9. Mudanças realizadas no consolidômetro para a realização do ensaio de compressão confinada com recirculação de chorume.....	92

Figura 3.10. Sistema de aquisição de dados e servo controle utilizado para a realização de ensaios triaxiais e de compressão confinada em amostras de grandes dimensões.....	94
Figura 3.11. Supervisório: tela da fase de cisalhamento de um ensaio triaxial do tipo CD.....	95
Figura 3.12. Câmara utilizada nos ensaios triaxiais.....	96
Figura 3.13. Painel de controle utilizado para a realização dos ensaios triaxiais.....	97
Figura 3.14. Prensa EMIC utilizada para aplicação da tensão desviadora ao corpo de prova, a uma taxa de deformação constante.....	97
Figura 3.15. Curva de calibração da célula de compressão triaxial.....	98
Figura 3.16. Procedimento de compactação estática empregado na moldagem dos corpos de prova.	100
Figura 3.17. Aspecto do corpo de prova logo após a retirada do molde de compactação (a); Corpo de prova com a grade de geotêxtil (b); Com a membrana de látex (c).....	101
Figura 3.18. Curvas de adensamento obtidas da fase de consolidação do ensaio triaxial, realizados em amostras de resíduo novo e com 4 anos de aterrado.....	103
Figura 3.19. Aspecto dos corpos de prova após a aplicação da tensão desviadora.....	104
Figura 3.20. Câmara triaxial utilizada nos ensaios na matriz básica do RSU novo.....	106
Figura 3.21. Amostra da matriz básica de RSU novo após a compactação a); Amostra revestida com a membrana de látex b); Amostra após o cisalhamento.....	107
Figura 4.1. Teor de umidade global das amostras de resíduo novo e com quatro anos de aterrado.....	110
Figura 4.2. Curvas granulométricas obtidas para o resíduo novo e com 4 anos de aterrado.....	113
Figura 4.3. Volume percolado ao longo do tempo sob carga constante. RSU novo com peso específico de 10 kN/m <sup>3</sup> .....	114
Figura 4.4. Volume percolado ao longo do tempo sob carga constante. RSU novo com peso específico de 8 kN/m <sup>3</sup> .....	115
Figura 4.5. Volume percolado ao longo do tempo sob carga constante. RSU com 4 anos de aterrado e peso específico de 14 kN/m <sup>3</sup> .....	115
Figura 4.6. Volume percolado ao longo do tempo sob carga constante. RSU com 4 anos de aterrado e peso específico de 10 kN/m <sup>3</sup> .....	116

Figura 4.7. Curvas de índice de vazios versus raiz do tempo do ensaio convencional em resíduo novo compactado na umidade natural com peso específico de 7,1 kN/m <sup>3</sup> .....	118
Figura 4.8. Curvas de índice de vazios versus logaritmo do tempo do ensaio convencional, em resíduo novo compactado na umidade natural com peso específico de 7,1 kN/m <sup>3</sup> .....	119
Figura 4.9. Curvas de índice de vazios versus raiz do tempo do ensaio com recirculação de chorume, em resíduo novo compactado na umidade natural com peso específico de 7,4 kN/m <sup>3</sup> .....	120
Figura 4.10. Curvas de índice de vazios versus logaritmo do tempo do ensaio com recirculação de chorume, em resíduo novo compactado na umidade natural com peso específico de 7,4 kN/m <sup>3</sup> .....	121
Figura 4.11. Curva de índice de vazios versus o logaritmo da tensão vertical para as amostras de resíduo novo ensaiadas, compactadas com peso específico de 7 kN/m <sup>3</sup> .....	123
Figura 4.12. Curvas tensão versus deformação e deformação volumétrica versus deformação axial obtidas para as amostras NovoCD10sat.....	126
Figura 4.13. Curvas tensão versus deformação e deformação volumétrica versus deformação axial obtidas para as amostras 4anosCD10sat.....	127
Figura 4.14. Envoltórias obtidas no plano t x s' para a amostra NovoCD10sat (a) e 4anosCD10sat (b). .....	128
Figura 4.15. Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial das amostras NovoCD10sat e 4anosCD10sat.....	129
Figura 4.16. Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial obtidas para a amostra NovoCD8sat.....	130
Figura 4.17. Envoltórias obtidas no plano t x s' para a amostra NovoCD8sat (a) e NovoCD10sat (b)...	131
Figura 4.18. Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial das amostras NovoCD8sat e NovoCD10sat.....	132
Figura 4.19. Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial obtidas para a amostra 4anosCD14sat.....	133
Figura 4.20. Envoltórias obtidas no plano t x s' para a amostra 4anosCD10sat (a) e 4anosCD14sat (b). .....	134
Figura 4.21. Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial das amostras 4anosCD10sat e 4anosCD14sat.....	135
Figura 4.22. Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial obtidas para a amostra NovoCD10nat.....	136

Figura 4.23. Envoltórias obtidas no plano $t \times s'$ para a amostra NovoCD10nat (a) e NovoCD10sat (b). .....	137
Figura 4.24. Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial das amostras NovoCD10nat e NovoCD10sat.....	137
Figura 4.25. Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial, obtidas para as amostras NovoMBCD12sat e NovoCD10sat.....	139
Figura 4.26. Envoltórias obtidas no plano $t \times s'$ para a amostra NovoCD12MBSat (a) e NovoCD10sat (b). .....	140
Figura 4.27. Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial das amostras NovoCD12satMB e NovoCD10sat.....	140
Figura 4.28. Curvas tensão versus deformação axial e pressão neutra versus deformação axial obtida para a amostra NovoCU10sat.....	141
Figura 4.29. Curvas tensão versus deformação axial e pressão neutra versus deformação axial obtida para a amostra 4anosCU10sat.....	142
Figura 4.30. Variação do parâmetro A de Skempton versus a deformação axial para a amostra NovoCU10sat.....	143
Figura 4.31. Variação do parâmetro A de Skempton versus a deformação axial para a amostra 4anosCU10sat.....	143
Figura 4.32. Envoltórias obtidas nos planos $t \times s$ e $t \times s'$ para a amostra NovoCU10sat.....	143
Figura 4.33. Envoltórias obtidas nos planos $t \times s$ e $t \times s'$ para a amostra 4anosCU10sat.....	144
Figura 4.34. Relação entre a resistência não drenada e a tensão de confinamento obtidas do ensaio CU para as amostras NovoCU10sat (a) e 4anosCU10sat (b).....	146
Figura 4.35. Parâmetro de resistência ao cisalhamento dos RSU, faixas de valores de diversos pesquisadores e valores obtidos dos ensaios realizados.....	149
Figura 4.36. Envoltórias de resistência dos ensaios CD realizados em resíduos sólidos novo e com 4 anos de aterramento para diferentes níveis de deformação axial. Envoltória proposta por Kavazanjian et al. (1995).....	150
Figura 4.37. Envoltórias de resistência dos ensaios CD realizados em resíduos sólidos novo e com 4 anos de aterramento para o nível de deformação axial de 20 %. Envoltória proposta por Kavazanjian et al. (1995).....	151



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Geração de resíduos sólidos (JUCÁ, 2003).....	34
Tabela 2.2 - Composição do resíduo sólido urbano para diferentes cidades (CARVALHO, 1999).....	46
Tabela 2.3 - Umidade dos componentes do RSU (CARVALHO, 1999).....	49
Tabela 2.4 - Coeficientes de permeabilidade para o RSU (CARVALHO, 1999).....	54
Tabela 2.5 - Modelos para previsão dos recalques em aterros sanitários e seus respectivos autores (LIU et al., 2006).....	59
Tabela 2.6 - Métodos de determinação da resistência ao cisalhamento do RSU (DIXON et al. 2005)....	67
Tabela 2.7 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do RSU obtidas a partir de retro- análise (VAN IMPE, 1998).....	68
Tabela 3.1 - Amostragens e ensaios realizados.....	82
Tabela 3.2 - Características das amostras submetidas aos ensaios de compressão confinada.....	93
Tabela 3.3 - Principais características das amostras e dos ensaios realizados.....	99
Tabela 3.4 - Características iniciais dos corpos de prova submetidos aos ensaios de compressão triaxial.....	105
Tabela 3.5 - Características iniciais dos corpos de prova da matriz básica de resíduo novo submetidos aos ensaios de compressão triaxial.....	107
Tabela 4.1 - Teor de umidade de cada componente das amostras de resíduos coletados.....	109
Tabela 4.2 - Composição física dos resíduos estudados.....	112
Tabela 4.3 - Peso específico das partículas sólidas dos resíduos coletados.....	113
Tabela 4.4 - Características dos corpos de prova e valores dos coeficientes de permeabilidade.....	116
Tabela 4.5 - Valores de $C_{\alpha}$ e $C'_{\alpha}$ obtidos para as amostras ensaiadas para cada estágio de carregamento.....	122

Tabela 4.6 - Valores médios de $C_c$ e de $C'_c$ .....	124
Tabela 4.7 - Parâmetros de resistência das amostras NovoCD10sat e 4anosCD10sat.....	129
Tabela 4.8 - Parâmetros de resistência das amostras NovoCD8sat e NovoCD10sat.....	129
Tabela 4.9 - Parâmetros de resistência das amostras 4anosCD10sat e 4anosCD10sat.....	134
Tabela 4.10 - Parâmetros de resistência obtidos para resíduo sólido urbano coletado do aterro Metropolitano Centro.....	145
Tabela 4.11 - Características dos corpos de prova submetidos aos ensaios de compressão triaxial, após adensamento.....	147
Tabela 4.12 - Características dos corpos de prova submetidos aos ensaios de compressão triaxial, após cisalhamento.....	148

## ***LISTA DE SÍMBOLOS***

$w$	teor de umidade em termos de base seca
$w_w$	umidade calculada em termos de base úmida
$M_w$	massa de água
$M$	massa total
$M_s$	massa seca das partículas sólidas
$C_\alpha$	índice de compressão secundária
$C'_\alpha$	coeficiente de compressão secundária
$C_c$	índice de compressão primária
$C'_c$	coeficiente de compressão primária
$\rho_1$	recalque devido a compressão primária
$\rho_2$	recalque devido a compressão secundária
$t_1$	tempo inicial da consolidação secundária, (SOWERS, 1973)
$\Delta t$	acrécimo de tempo
$V_{CH_4}$	volume de metano gerado no tempo $t$
$k$	taxa de geração de metano
$L_o$	potencial de geração do metano
$f_{CH_4}$	fração de metano no gás gerado, igual a 0,5 (SOLER et al., 1995)
$\gamma_s$	densidade dos sólidos biodegradáveis; (SOLER et al., 1995)
$M(t)$	parcela biodegradável do resíduo, (SOLER et al., 1995)
$\Delta V_s$	perda de volume de sólidos devido a decomposição
$H_o$	espessura inicial da camada de RSU
$\Delta H$	recalque total da camada de RSU
$\Delta \sigma'_{vo}$	acrécimo de tensão vertical efetiva
$\sigma'_{vo}$	tensão vertical efetiva inicial
CD	ensaio triaxial consolidado drenado
$\Phi$	ângulo de atrito
$\Phi'$	ângulo de atrito efetivo
$c$	coesão
$c'$	coesão efetiva

$S_u$	coesão não drenada
$\sigma_v$	tensão vertical
STV	sólidos totais voláteis
$k$	coeficiente de permeabilidade à água
$k_{20}$	coeficiente de permeabilidade à água, normalizado para a temperatura de 20 °C.
$\sigma'_{3c}$	pressão de confinamento na amostra
$h$	altura inicial do corpo de prova
$D$	diâmetro inicial do corpo de prova
$\epsilon_a$	deformação axial
$\gamma_o$	peso específico inicial do corpo de prova
$\gamma$	peso específico (kN/m <sup>3</sup> )
$\gamma_d$	peso específico seco
$\gamma_s$	peso específico das partículas sólidas do RSU
$e$	índice de vazios do corpo de prova
$e_o$	índice de vazios inicial
$S_{ro}$	grau de saturação inicial do corpo de prova
$S_r$	grau de saturação do corpo de prova
$B$	parâmetro de Skempton
CU	ensaio triaxial consolidado não drenado
$\Delta u$	variação da pressão neutra
$\Delta \sigma_1$	variação da tensão principal maior
$A$	parâmetro de pressão neutra
$\sigma_1$	tensão principal maior
$\sigma_3$	tensão principal menor

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	29
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	33
<b>2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS</b> .....	33
<b>2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS</b> .....	35
<b>2.3 MÉTODOS DE DESTINAÇÃO FINAL DOS RSU</b> .....	38
2.3.1 Compostagem.....	39
2.3.2 Incineração.....	39
2.3.3 Lixões ou vazadouros.....	40
2.3.4 Aterros controlados.....	41
2.3.5 Aterros sanitários.....	41
<b>2.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS RSU</b> .....	45
2.4.1 Composição.....	45
2.4.2 Distribuição do tamanho das partículas.....	46
2.4.3 Teor de umidade.....	48
2.4.4 Temperatura.....	50
2.4.5 Peso específico in situ.....	51
2.4.6 Permeabilidade do RSU.....	53
<b>2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS RSU</b> .....	56
2.5.1 Introdução.....	56
2.5.2 Compressibilidade dos RSU.....	56
2.5.2.1 Modelos para previsão dos recalques em aterros de RSU.....	58
2.5.2.2 Bioconsolidação.....	61
2.5.3 Resistência ao cisalhamento dos RSU.....	66
2.5.3.1 Retro-análise de dados de campo.....	68
2.5.3.2 Ensaios in situ.....	69

2.5.3.3 Ensaio de laboratório.....	72
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>81</b>
<b>3.1 LOCAL DE ESTUDO.....</b>	<b>81</b>
<b>3.2 COLETA DOS MATERIAIS.....</b>	<b>83</b>
<b>3.2.1 Caracterização física dos resíduos.....</b>	<b>86</b>
3.2.1.1 Determinação da composição gravimétrica dos resíduos.....	87
3.2.1.2 Determinação do teor de umidade natural dos resíduos.....	88
3.2.1.3 Determinação da distribuição granulométrica dos resíduos.....	88
3.2.1.4 Determinação dos sólidos totais voláteis (STV).....	89
3.2.1.5 Determinação do peso específico das partículas sólidas.....	89
<b>3.3 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE.....</b>	<b>90</b>
<b>3.4 ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA.....</b>	<b>90</b>
3.4.1 Ensaio convencional.....	91
3.4.2 Ensaio com recirculação de chorume.....	93
<b>3.5 ENSAIOS TRIAXIAIS.....</b>	<b>95</b>
3.5.1 Equipamentos utilizados.....	95
3.5.2 Execução dos ensaios.....	100
3.5.2.1 Ensaio CD e CU nos RSU.....	101
3.5.2.2 Ensaio CD na matriz básica do RSU novo.....	106
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>109</b>
<b>4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS RESÍDUOS.....</b>	<b>109</b>
<b>4.2 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE.....</b>	<b>114</b>
<b>4.3 ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA.....</b>	<b>118</b>
<b>4.4 ENSAIOS TRIAXIAIS.....</b>	<b>125</b>
<b>4.4.1 Ensaio triaxiais drenados (CD).....</b>	<b>125</b>
4.4.1.1 Influência da idade.....	125
4.4.1.2 Influência do peso específico.....	130

4.4.1.3 <i>Influência do grau de saturação</i> .....	135
4.4.1.4 <i>Influência dos componentes de reforço</i> .....	138
4.4.2 <b>Comportamento não drenado dos RSU</b> .....	141
<b><i>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES</i></b> .....	153
<b><i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i></b> .....	155



# Capítulo 1

## ***INTRODUÇÃO***

---

O crescimento populacional, associado ao aumento do processo de industrialização e às mudanças dos padrões de consumo, vem contribuindo para a geração, cada vez maior, de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Estes materiais, subprodutos de diversas atividades, vêm se transformando num grande problema para a sociedade e para os gestores públicos.

Diversos estudos apontam caminhos alternativos para minimizar os efeitos da geração e do descarte dos resíduos sólidos urbanos. Técnicas como a reutilização, a reciclagem e a compostagem têm sido incentivadas como alternativas de destinação destes materiais. Estes métodos buscam dar um tratamento final aos resíduos menos impactante ao meio ambiente e à sociedade.

Mesmo com a adoção de políticas voltadas para a redução e o reaproveitamento dos resíduos sólidos urbanos, devido a sua grande quantidade produzida, principalmente nas grandes cidades, torna inevitável a implantação de sistemas de destinação final.

Os métodos mais comuns de destinação final dos resíduos sólidos urbanos são os lixões, os aterros controlados e os aterros sanitários. Existem ainda outros métodos de destinação, como a compostagem e a incineração, porém muito menos utilizados devido aos custos envolvidos na operação destes sistemas. Os lixões são caracterizados por não apresentarem qualquer característica sanitária ou de proteção ambiental na disposição dos RSU. Apesar dos aterros controlados possuírem melhores características que o lixões na disposição dos resíduos sólidos, eles não garantem total proteção ao meio ambiente.

Neste contexto, a utilização de aterros sanitários como método de disposição final para os RSU têm sido uma alternativa economicamente viável e ambientalmente mais segura, principalmente para países menos desenvolvidos.

Os aterros sanitários constituem obras de engenharia que visam ao armazenamento dos RSU de maneira segura, garantindo a proteção das águas superficiais e subsuperficiais, do solo, do ar e do próprio homem. Ele é constituído de sistemas que permitem o tratamento dos líquidos e gases gerados pela decomposição dos resíduos, além de apresentar aspectos visuais menos impactantes se comparados a outros métodos de disposição.

No Brasil, o aterro sanitário é o principal sistema de destinação final dos RSU, ele é responsável pelo armazenamento de 37 % dos resíduos produzidos. No entanto, para a grande maioria das pequenas cidades ou mesmo para o caso de algumas capitais, os resíduos são dispostos de forma inadequada, se transformando em uma ameaça não só para o meio ambiente como também para o próprio homem.

A demanda crescente de áreas para disposição dos resíduos e a carência de locais adequados a este propósito induzem à exigência de otimizar a capacidade de disposição dos locais disponíveis. Dessa forma, os aterros sanitários estão sendo construídos com alturas cada vez maiores, sendo comum encontrar aterros com mais de 100 metros de altura. Devido à estas características, problemas envolvendo operação, funcionamento, estabilidade e deformabilidade de aterros sanitários são constantes

Por se tratar de uma obra de engenharia, é necessário que se conheça as características dos materiais que são utilizados na sua construção. No caso dos aterros sanitários, os próprios resíduos sólidos constituem os principais materiais de sua construção e, portanto, precisam ter suas propriedades bem definidas para que estas estruturas sejam construídas sobre critérios de segurança aceitáveis.

Os resíduos sólidos urbanos são formados por componentes das mais diversas origens. Assim, eles são caracterizados por apresentarem uma grande heterogeneidade dos seus constituintes, tanto com relação aos tipos de materiais, como na variedade de formas e dimensões. Na sua fase sólida, por exemplo, os RSU são constituídos por materiais inertes

estáveis, com características semelhantes a de materiais geotécnicos convencionais, materiais muito deformáveis e componentes biodegradáveis.

Alguns materiais presentes nos RSU estão sujeitos a diferentes formas de decomposição causadas por processos físico-químicos ou biológicos. Estes mecanismos provocam o surgimento de outras substâncias, que ao interagir com os demais componentes presentes nos RSU pode influenciar nas propriedades de todo o conjunto.

As características físicas e mecânicas dos resíduos sólidos urbanos têm sido obtidas de diferentes formas, porém o completo entendimento dos mecanismos que governam o seu comportamento ainda está longe de ser alcançado. Em geral, estas propriedades têm sido avaliadas empregando-se teorias e conceitos advindos da Mecânica dos Solos. No entanto, diversas pesquisas têm demonstrado que existem diferenças significativas entre estes dois materiais. Dessa forma, a simples extensão destes conceitos aos RSU podem levar à interpretações equivocadas sobre o comportamento do material, portanto eles devem ser aplicados com certas restrições.

Para a avaliação das propriedades de resistência e de deformabilidade, por exemplo, muitos pesquisadores têm utilizado de ensaios típicos da mecânica dos solos, como ensaios de compressão triaxial, cisalhamento direto, compressão confinada e etc.

Este trabalho teve como objetivo a obtenção de parâmetros de resistência e de compressibilidade de amostras de RSU coletados do Aterro Metropolitano Centro (Salvador - BA). Foram analisados a influência da idade, do peso específico, do grau de saturação, do desenvolvimento de pressões neutras e também da presença dos materiais de reforço na sua resistência ao cisalhamento. As propriedades de compressibilidade foram avaliadas através de ensaios de compressão confinada, onde foi analisada a influência da recirculação de chorume nos seus parâmetros de deformabilidade.



## Capítulo 2

### ***REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

---

#### **2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

O constante crescimento dos centros urbanos, a forte industrialização, as mudanças nos níveis de renda da população de uma forma geral, vêm provocando uma aceleração na geração de lixo. A palavra lixo vem do Latim *lix*, que significa cinzas ou lixívia, porém o termo mais usado na comunidade científica para estes subprodutos, resultante das diversas atividades, é Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Na realidade, este termo é bastante amplo, englobando, além dos materiais no estado sólido que o termo sugere, também os materiais no estado semi-sólido, tais como lodos e até líquidos.

Zanta e Ferreira (2003) definem resíduos sólidos urbanos como sendo os materiais resultantes das inúmeras atividades desenvolvidas em áreas com aglomerações humanas, abrangendo resíduos de várias origens, como residencial, comercial, de estabelecimentos de saúde, industriais, da limpeza pública (varrição, capina, poda e outros), da construção civil e, finalmente, os agrícolas. Outros autores consideram que os resíduos sólidos urbanos compreendem, estritamente, os resíduos de origem residencial, comercial, de serviços de varrição, de feiras livres, de capinação e poda (BIDONE & POVINELLI, 1999; SCHALCH, 1992).

Segundo dados do PNSB - Pesquisa Nacional sobre Saneamento Básico, realizado pelo IBGE em 2000, coleta-se diariamente no Brasil cerca de 228.413 toneladas de resíduos

sólidos, sendo 125.258 toneladas referentes aos resíduos domiciliares. O valor médio dos resíduos domiciliares produzidos no Brasil era de 0,74 kg por habitante por dia, destacando-se a região Norte com a menor taxa (0,58 kg/hab./dia) e a região Sudeste por possuir a maior taxa, correspondente à 1,3 kg por habitante por dia (JUCÁ, 2003). Isso, de certa forma, reflete a influência do nível de desenvolvimento do local na produção de resíduos sólidos. A Tabela 2.1 apresenta a população brasileira e sua distribuição regional, a distribuição da geração total de resíduos entre as regiões do Brasil e a geração per capita.

Tabela 2.1 - Geração de resíduos sólidos (JUCÁ, 2003).

	População Total		Geração de Resíduos (t/dia)		Geração per capita (kg/hab.dia)
	Valor	(%)	Valor	(%)	
Brasil	169.799.170	-	228.413	100	1,35
Norte	12.900.704	7,6	11.067	4,8	0,86
Nordeste	47.741.711	28,1	41.568	18,2	0,87
Sudeste	72.412.411	42,6	141.617	62	1,96
Sul	25.107.616	14,8	19.875	8,7	0,79
Oeste	11.636.728	6,9	14.297	6,3	1,23

Jucá (2003) apresenta dados que relacionam a distribuição regional da população brasileira, seu PIB e sua geração de resíduos, podendo-se destacar a Região Sudeste com 42,6% da população brasileira, sendo responsável pela geração de 62% dos resíduos sólidos no País (Figura 2.1).

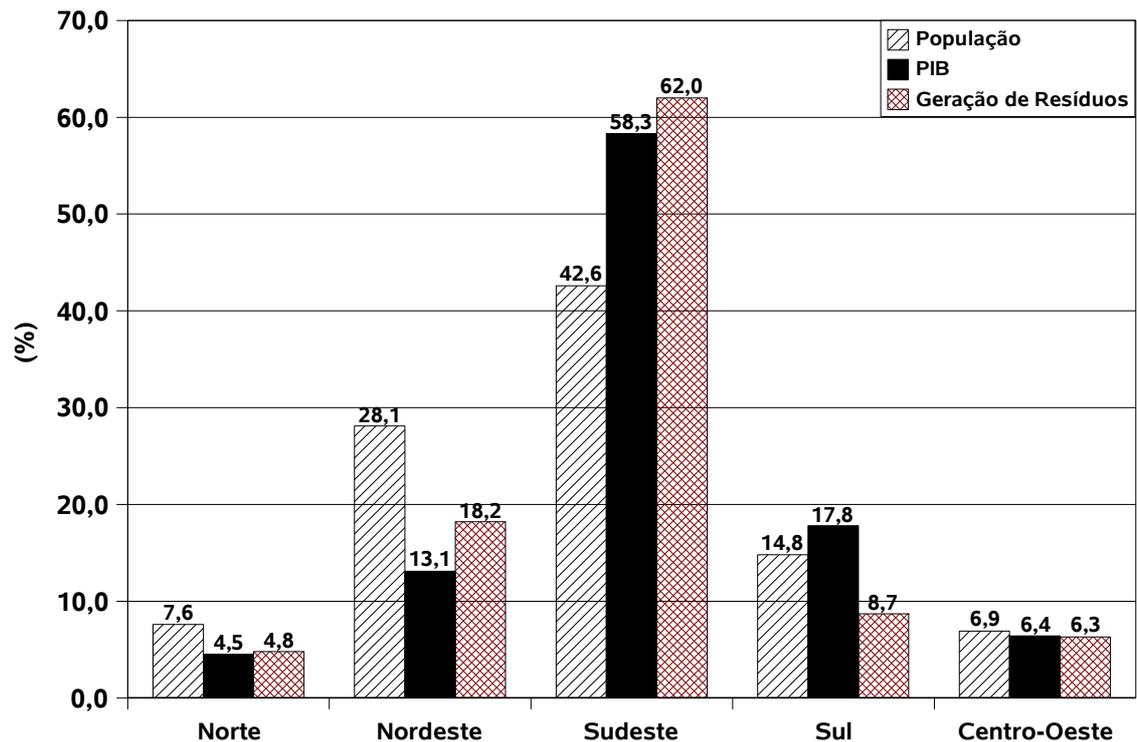


Figura 2.1. Percentual da população, PIB e geração de resíduos sólidos por região (JUCÁ, 2003).

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma NBR 10004

- Resíduos Sólidos: Classificação - de 2004 define os resíduos sólidos como sendo

[...] resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Schalch (1992), com base na NBR 10004 de 1987, apresenta uma forma de classificação dos resíduos sólidos em função da sua origem (Figura 2.2).

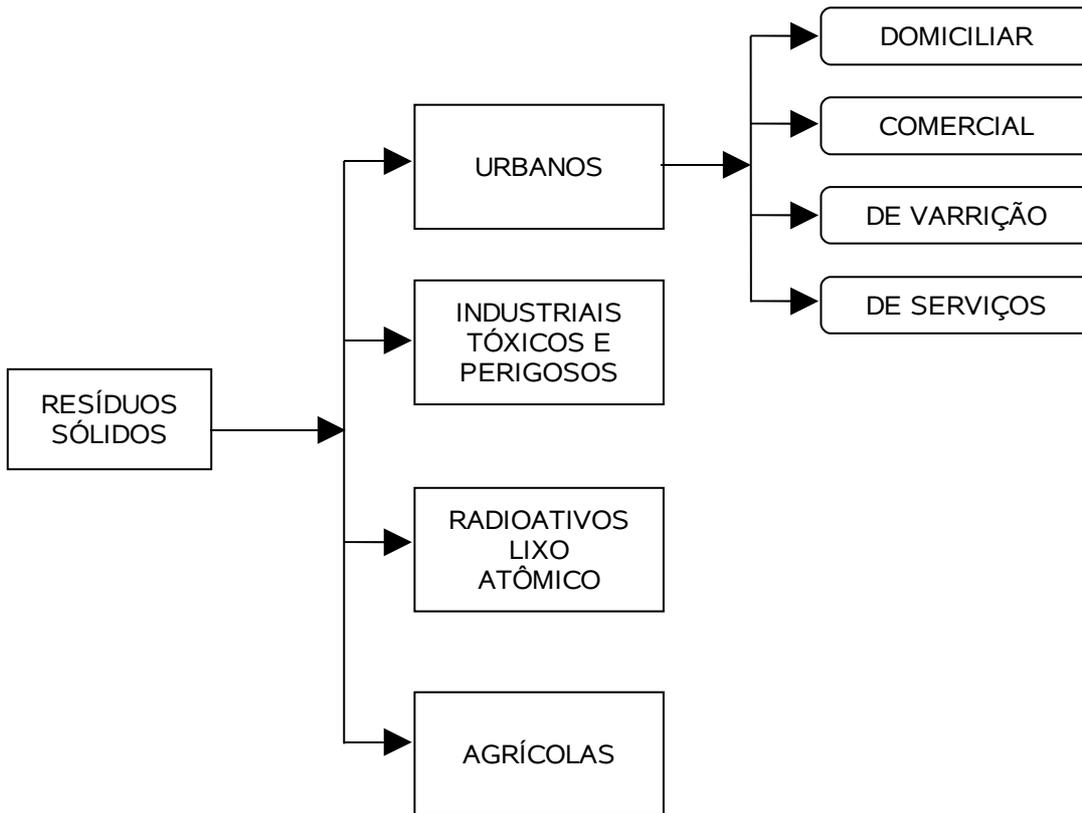


Figura 2.2. Classificação dos resíduos sólidos urbanos segundo a sua origem (SCHALCH, 1992).

A NBR 10004 de 2004, que substitui a antiga versão de 1987, apresenta uma proposta de classificação dos resíduos sólidos mais voltada às questões gerenciais destes materiais, ela classifica os resíduos sólidos nas seguintes classes:

- Resíduos Classe I – se enquadram os resíduos perigosos de acordo com os critérios de periculosidade estabelecidos pela norma (inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade);
- Resíduos Classe II A – resíduos não perigosos e não inertes, podendo apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Estão incluídos nessa categoria os papéis, papelão, restos vegetais e outros;
- Resíduos Classe II B – se enquadram os resíduos não perigosos e inertes. São as rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostos facilmente.

Uma outra forma de classificação está relacionada com o grau de degradabilidade dos resíduos sólidos: a) facilmente degradáveis: matéria orgânica presente nos resíduos sólidos de origem urbana; b) moderadamente degradáveis: papéis, papelão e material celulósico; c) dificilmente degradáveis: são os pedaços de pano, retalhos, aparas e serragens de couro, borracha e madeira; d) não-degradáveis: vidros, metais, plásticos, pedras, solo, entre outros (BIDONE & POVINELLI, 1999).

Existe ainda uma classificação baseada nas características físicas do RSU: teor de umidade, distribuição do tamanho das partículas e identificação das diferentes categorias de materiais contido em uma amostra representativa (composição gravimétrica ou volumétrica) (KNOCHENMUS et al. 1998).

Grisolia et al. (1995a) propuseram uma sistemática de classificação para o resíduo, usando um diagrama triangular formado por três classes de materiais: materiais inertes, materiais muito deformáveis e materiais orgânicos biodegradáveis (Figura 2.3). Essa classificação consiste em plotar os dados de composição de cada classe do RSU no diagrama triangular e a partir da determinação da posição de cada amostra no diagrama, pode-se avaliar as propriedades mecânicas esperadas para o material.

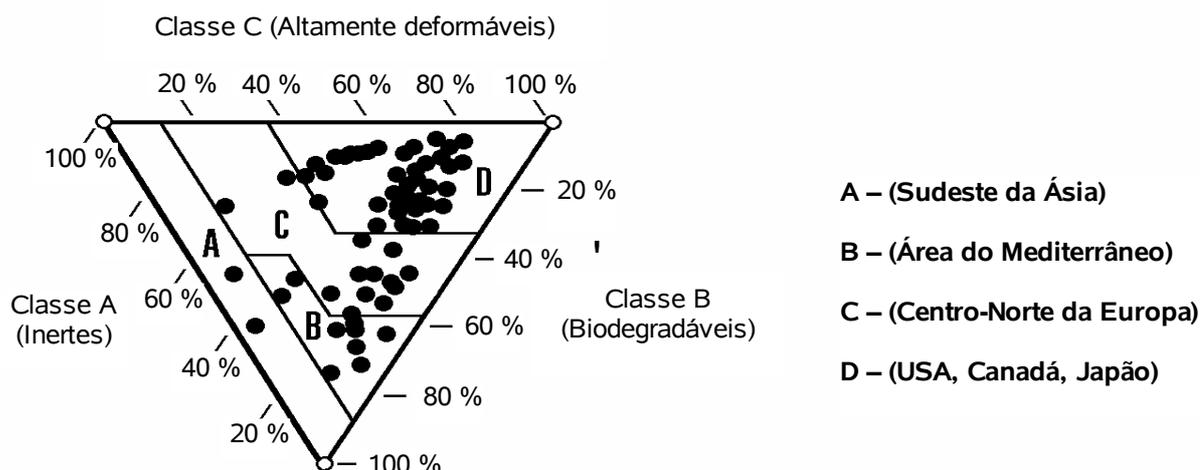


Figura 2.3. Classificação do RSU usando o diagrama triangular (GRISOLIA et al., 1995a)

## 2.3 MÉTODOS DE DESTINAÇÃO FINAL DOS RSU

Dentro de uma visão mais ampla a respeito do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, a destinação final seria, como o próprio nome sugere, a última fase a ser cumprida com relação a todos os processos que envolvem estes materiais. Neste ponto de vista, a implantação de políticas voltadas à redução da produção dos resíduos, ao seu reúso, e posteriormente a sua reciclagem, constituem medidas de extrema importância na minimização dos problemas que envolvem a disposição final dos resíduos sólidos urbanos, como por exemplo, na obtenção de áreas para a implantação de aterros.

Baseado nos dados do PNSB 2000, Jucá (2003) apresenta a evolução da destinação final dos resíduos sólidos domiciliares no Brasil desde 1991 até o ano de 2000, sendo observado o aumento acentuado da quantidade de resíduos produzidos em decorrência de uma melhora no quadro político econômico do Brasil e o aumento de métodos de disposição mais adequados, como os aterros controlados e os aterros sanitários (Figura 2.4).

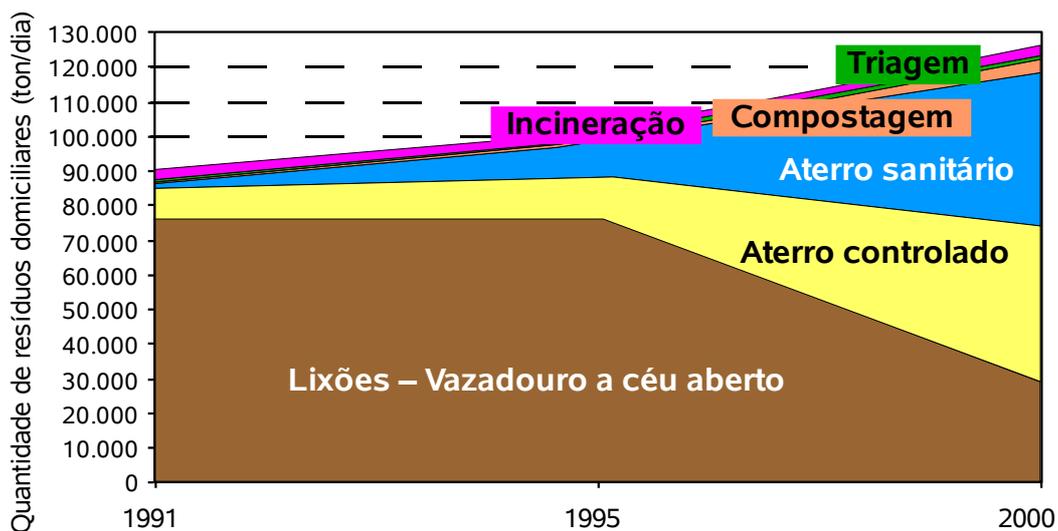


Figura 2.4. Evolução da destinação final dos resíduos sólidos no Brasil (JUCÁ, 2003).

Os métodos mais comuns de destinação final dos resíduos sólidos são: Compostagem, Incineração, Lixões ou Vazadouros, Aterros Controlados e Aterros Sanitários.

### **2.3.1 Compostagem**

A compostagem é uma reciclagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, transformando estes materiais em uma substância com aplicação mais nobre. Tem como objetivo, além da recuperação, o preparo da fração orgânica, favorecendo a ação de agentes biológicos.

Segundo Bidone e Povinelli (1999), a compostagem consiste de um processo biológico aeróbio e controlado de transformação da matéria orgânica em um material estabilizado com propriedades distintas daquele material que lhe deu origem. Algumas substâncias são volatilizadas, outras são utilizadas pelos microrganismos para formação de seus tecidos e outras, ainda, transformadas biologicamente em uma substância escura, uniforme, com consistência amanteigada e aspecto de massa amorfa, com propriedades físicas, químicas e físico-químicas inteiramente diferente da matéria-prima original.

### **2.3.2 Incineração**

A incineração é definida como um processo de redução da massa e do volume dos resíduos através da combustão controlada.

Países com pequena disponibilidade de área, como Japão, Suíça e Suécia, apresentam um grande número de incineradores e uma tendência acentuada de crescimento deste tipo de destinação dos RSU (IPT, 2000).

Apesar de possuir inúmeras vantagens com relação aos outros métodos de destinação, sendo uma boa alternativa para países que apresentam escassez de áreas para a implantação de aterros sanitários, este método apresenta algumas desvantagens: i) custo elevado de instalação e de operação; ii) exigência de mão-de-obra qualificada para garantir a qualidade da operação; iii) presença de materiais nos resíduos que geram compostos tóxicos e corrosivos.

### **2.3.3 Lixões ou vazadouros**

É uma forma de disposição final dos RSU, na qual estes são lançados sobre o solo, sem qualquer medida de proteção ao meio ambiente ou a saúde pública. Não existem controles sobre o tipo, volume ou grau de periculosidade dos resíduos depositados. Os resíduos são simplesmente lançados sobre o solo natural sem receber qualquer tipo de tratamento mecânico para redução de seu volume.

Esta forma de disposição facilita a proliferação de inúmeros vetores (moscas, ratos, mosquitos), geração de maus odores e, principalmente, a contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais, pela infiltração dos líquidos gerados pela decomposição do RSU.

### **2.3.4 Aterros controlados**

É uma forma de disposição final dos RSU no solo, na qual precauções tecnológicas executivas adotadas durante o desenvolvimento do aterro, como o recobrimento dos resíduos com argila (quase sempre sem compactação), aumentam a segurança do local, minimizando os riscos de impactos ao meio ambiente e à saúde pública. Este método é preferível ao lixão, mas devidos aos problemas ambientais que podem causar em consequência da quase inexistência da aplicação de técnicas sanitários adequadas, principalmente para o tratamento dos efluentes, este método também deve ser evitado. Constitui uma técnica aceitável para pequenos municípios que não possuem equipamentos compactadores ou arrecadação suficiente para contratação de empresas especializadas na implantação e operação de aterros sanitários. Nas cidades do semi-árido brasileiro, com suas características de baixa pluviosidade e por constituírem regiões que apresentam baixo desenvolvimento econômico, a implantação deste método de disposição final está sendo muito estimulada.

### **2.3.5 Aterros sanitários**

Em todo o mundo, sabe-se que o método de disposição de resíduos sólidos urbanos denominado de Aterro Sanitário constitui o principal sistema de destinação para grande parte dos resíduos produzidos. Trata-se de obras de engenharia nas quais os resíduos sólidos gerados nos Centros Urbanos são dispostos, respeitando-se as suas características peculiares e tomando-se todas as medidas cabíveis para que o solo, a água, o ar e as pessoas que vivem em seu entorno sejam o menos impactados possível. Devido ao caráter bio-degradável do material armazenado e aos sub-produtos gerados no processo de

decomposição deste material (basicamente chorume e gases), estas obras são inequivocamente multidisciplinares, exigindo profissionais de diversas áreas para a sua boa execução.

A norma NBR 8419 (ABNT,1992) define aterro sanitário como sendo uma

[...] técnica de disposição de resíduos sólidos no solo sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou intervalos menores se necessário.

A obra de um aterro sanitário compreende um conjunto de componentes e técnicas operacionais tais como: divisão em células, compactação dos resíduos, cobertura, sistema de impermeabilização do solo de fundação, sistema de coleta e drenagem de líquidos e gases, tratamento do chorume, monitoramento geotécnico e ambiental entre outros.

Segundo Leite (1995), a implantação de um aterro sanitário tem como principais objetivos evitar:

- o aparecimento e a proliferação de roedores, moscas, baratas, etc;
- o estabelecimento de catadores na área;
- o espalhamento de papéis e lixo pela redondeza, pela ação do vento;
- a criação e a engorda de animais, como porcos e aves, que podem transmitir doenças ao homem;
- a poluição das águas superficiais e subsuperficiais.

Pode-se classificar os aterros sob duas formas: quanto ao tipo de material a ser aterrado e quanto ao método de aterramento.

**a) Quanto ao tipo de aterro:** destacam-se os aterros sanitários convencionais para resíduos sólidos, para resíduos sólidos triturados e para resíduos especiais.

Os aterros convencionais são aqueles usados para disposição de resíduos sólidos urbanos e materiais inertes, empregando os processos de compactação. Já os aterros de resíduos sólidos triturados, recebem resíduos previamente triturados, perdendo muitas características consideradas insatisfatórias num aterro convencional. Estes tipos de aterros podem atingir altas densidades, cerca de 35% maior que em aterros convencionais. Além disso, dependendo da legislação local, os resíduos podem ser dispostos sem recobrimento diário, aumentando a vida útil do aterro. Os aterros de resíduos específicos são aterros conhecidos como monoaterros, pois são exclusivos para um tipo de material. Os aterros de resíduos de saúde constituem um exemplo deste tipo de aterro (TCHOBANOGLIOUS et al. 1993).

**b) Quanto ao método de aterramento:** quanto ao método de aterramento os aterros podem ser classificados como de célula escavada ou trincheira, de área ou de superfície e de depressão (Figura 2.5).

Segundo Tchobanoglous et al. (1993) o método da trincheira ou de célula escavada deve ser aplicado quando o local de aterro for plano ou levemente inclinado, sendo próprio para pequenas comunidades onde a produção diária não ultrapassa 10 t. O lençol freático também não deve ser muito elevado, para evitar que possíveis líquidos que venham a percolar pela base do aterro possam alcançá-lo.

Este tipo de aterro é muito utilizado no Brasil, pois se busca através deste método aproveitar ao máximo a área de disposição, acondicionando o maior volume possível de resíduos. Quantidades diárias muito superiores à 10 t são dispostas nestes aterros.

Nas trincheiras de grande porte o RSU é descarregado em seu interior e com o auxílio de um trator esteira o mesmo é empurrado de baixo para cima, sendo compactado em uma rampa de aproximadamente 1:3. No final da jornada de trabalho o mesmo é coberto com solo formando dessa forma uma célula do aterro (BIDONE & POVINELLI, 1999).

O método da área ou aterro de superfície é usado em locais de topografia plana onde não é apropriada a execução de trincheiras e células. Os resíduos são descarregados e

compactados, formando uma elevação em forma de tronco-de-pirâmide, que recebe a cobertura de solo no final do dia. Os desníveis para disposição dos resíduos são obtidos com um dique de terra ou do próprio resíduo. Esse método é bastante oneroso, pois requer cuidados especiais, como por exemplo, construção de diques, bombeamento constante do lençol freático, etc.

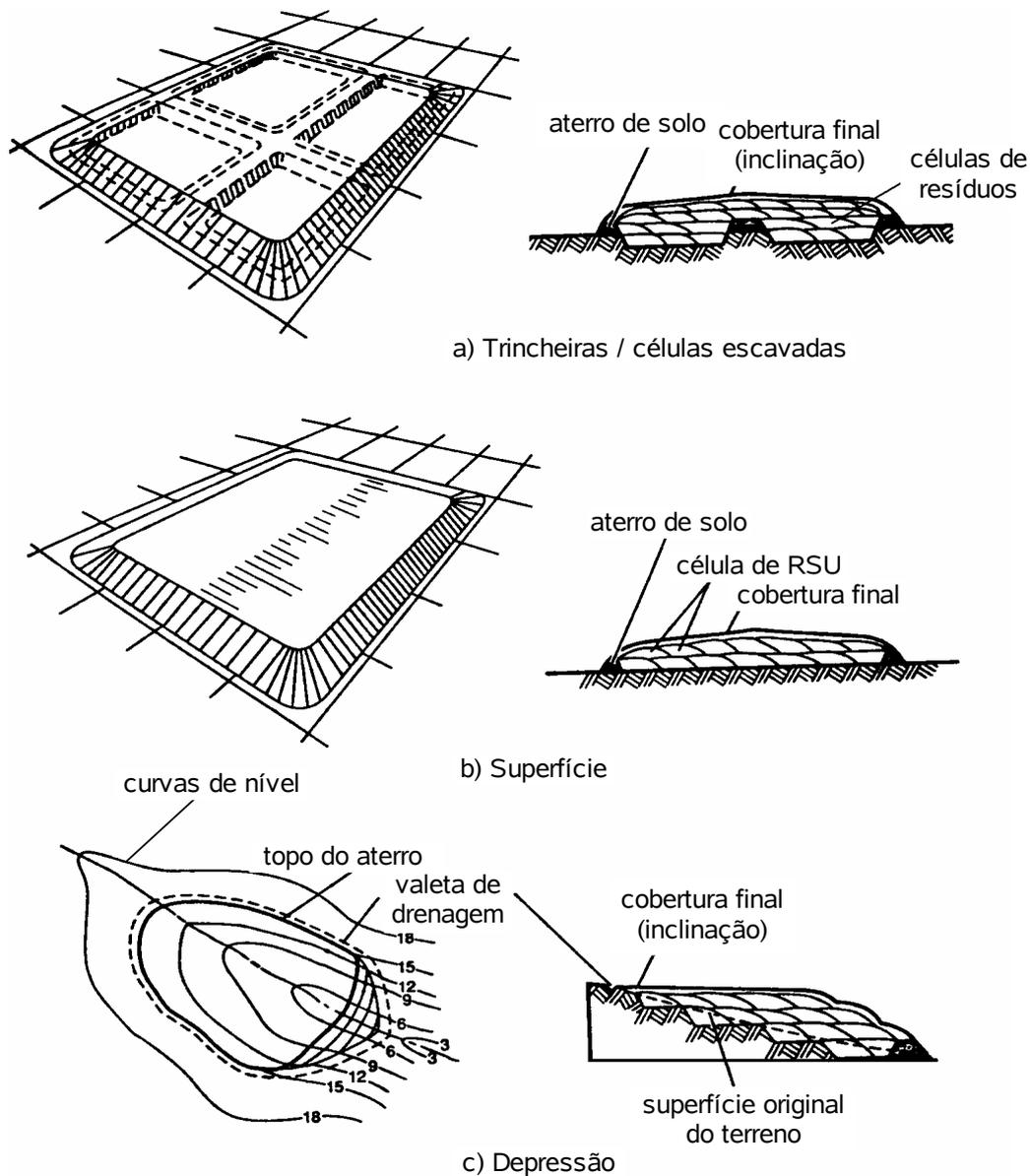


Figura 2.5. Tipos de aterros sanitários (TCHOBANOGLIOUS et al. 1993).

Os aterros de depressão são usados em regiões de topografia acidentada, como depressões, ravinas, pedreiras abandonadas e encostas. As técnicas de disposição e compactação do resíduo variam com a geometria do local, as características de disponibilidade de materiais para cobertura, com a hidrologia e geologia do local, compatibilidade aos sistemas de drenagem de gás e de líquidos e características de acesso ao local (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 1993).

Segundo Leite (1995) e Assis (1999), um fator restritivo ao uso de aterros sanitários como método de disposição dos resíduos sólidos é o custo cada vez mais elevado à sua implantação, advindo do alto preço da terra, principalmente nas regiões urbanas e industrializadas e das condicionantes impostas pelos órgãos ambientais visando a proteção do meio ambiente. Apesar disso, em comparação aos outros métodos de disposição final, os aterros sanitários ainda representa uma boa alternativa, principalmente para os países em desenvolvimento que apresentam boa disponibilidade de terra.

## **2.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS RSU**

### **2.4.1 Composição**

A composição física ou gravimétrica define o percentual dos diversos componentes presentes no lixo. A composição gravimétrica normalmente espelha o nível de renda da população; deste modo, é de se esperar que regiões mais ricas apresentem, por exemplo, um menor percentual de material orgânico, em consequência de uma menor manipulação de alimentos, isto é, maior utilização de alimentos semi-prontos. Em contra-partida, os percentuais de vidro e de materiais plásticos tendem a ser mais elevados.

Neste contexto, a fase sólida dos RSU é constituída por uma mistura de materiais de diferentes tipos, formas e dimensões, tais como, papel, plástico, papelão, tecidos, borracha, madeira, vidro, metais, resíduos alimentares e de feiras, entulho e outros. A composição do RSU é muito heterogênea e pode variar de pequenos materiais orgânicos até grandes materiais inorgânicos. Carvalho (1999) apresenta dados compilados de alguns autores da composição dos RSU de diversas localidades, representados na Tabela 2.1.

Tabela 2.2 - Composição do resíduo sólido urbano para diferentes cidades (CARVALHO, 1999).

Componetes	Cidade / País									
	Bangkok	Pekin	Nairobi	Hong kong	New York	Istanbul	Atenas	Cochabamba	Brasil	
	Tailândia	China	Kenia		USA	Turquia	Grecia	Bolivia	São Paulo	Recife
Metal	1	1	3	3	5	2	4	1	5	2
Papel	25	5	12	3	22	10	19	2	14	15
Plástico	-	1	5	-	-	3	7	3	14	8
Borracha, couro e madeira	7	1	-	7	3	6	4	1	7	-
Têxteis	3	-	-	10	-	3	-	-	3	-
Matéria org.	44	45	74	15	20	61	59	71	51	60
Vidro	1	1	4	10	6	1	2	1	1	2
Outros	19	46	2	22	46	14	5	21	5	13

#### 2.4.2 Distribuição do tamanho das partículas

Devido a grande heterogeneidade e variedade dos resíduos sólidos urbanos, um procedimento para determinação da distribuição das dimensões de seus componentes é bastante limitado. Para uma primeira aproximação, tem-se procurado correlacionar os componentes individuais do resíduo a diâmetros equivalentes (TCHONOBANOGLIOUS et al., 1993) (Figura 2.6).

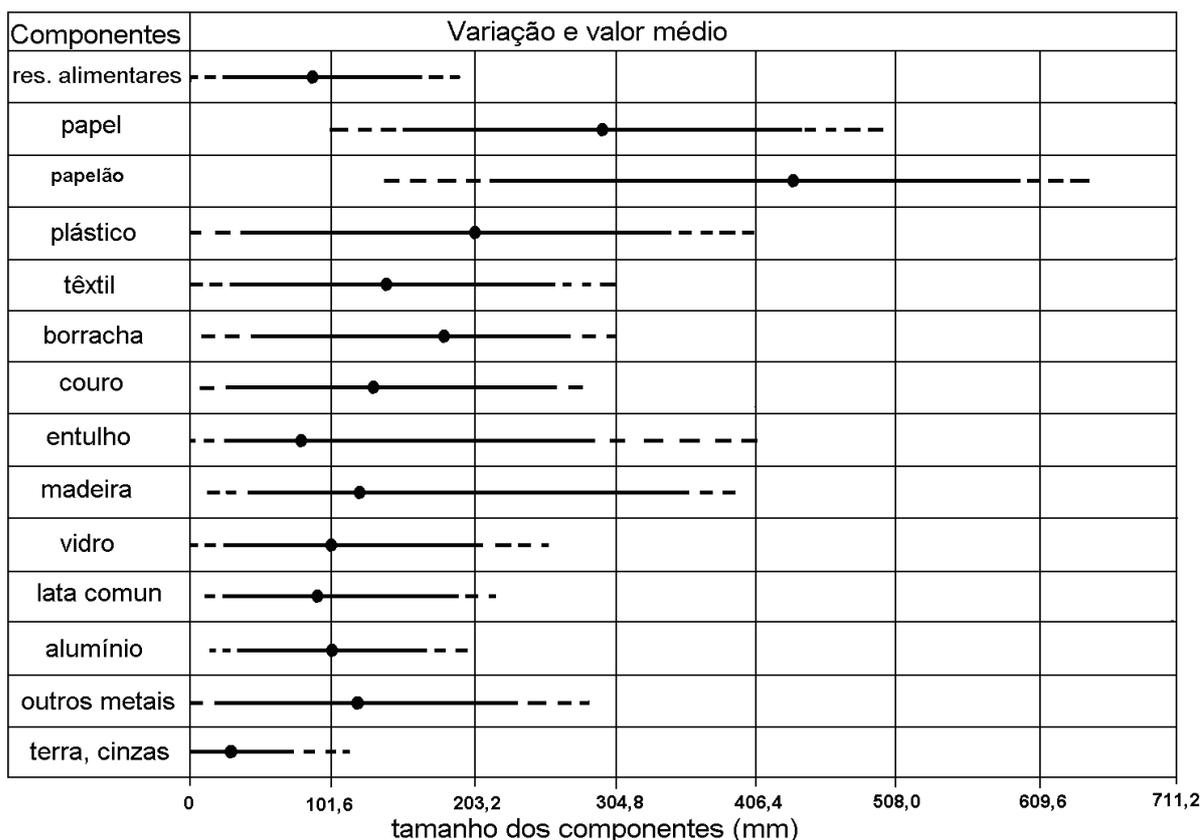


Figura 2.6. Diâmetros equivalentes dos componentes do RSU (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

Muitos pesquisadores têm utilizado o processo clássico do peneiramento e traçado a curva de distribuição dos tamanhos dos grãos. Segundo Knochenmus et al. (1998), o tamanho dos constituintes pode variar entre partículas com dimensões de pedregulho até partículas com dimensões inferiores a 0,075mm. Existe contudo, uma tendência no aumento da porcentagem da fração mais fina do RSU com o tempo, como resultado da biodegradação da matéria orgânica (KNOCHENMUS et al.,1998; MACHADO et al., 2005).

Para representação da distribuição granulométrica do RSU do aterro Bandeirantes em São Paulo, Carvalho (1999) utilizou uma série de peneiras pré-selecionadas (2", 1<sup>1/2</sup>",1", 5/8", 3/8", 4,76 mm, 2mm e 0,59), medindo manualmente os componentes com dimensões maiores que 2". Foram utilizadas amostras de RSU com 15 anos de aterrado, secas em estufa a uma temperatura de 70°C. Foram excluídos os materiais plásticos e têxteis (estes materiais representavam 20% em peso da amostra total). A Figura 2.7 apresenta as curvas

granulométrica dos resíduos estudados por Carvalho (1999), juntamente com a faixa de ocorrência sugerida por Jessberger (1997).

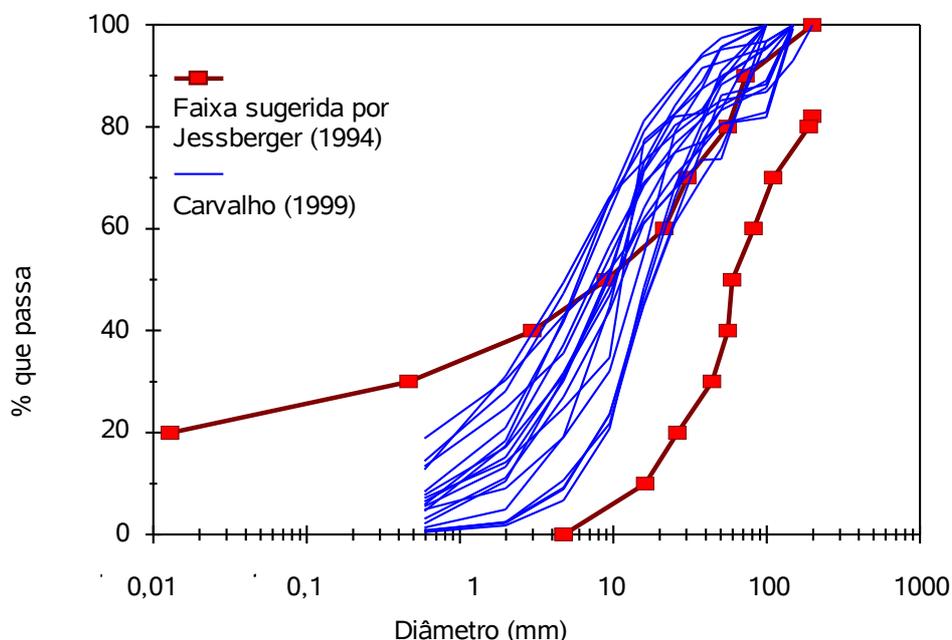


Figura 2.7. Distribuição do tamanho das partículas do RSU com 15 anos de aterrado (CARVALHO, 1999).

### 2.4.3 Teor de umidade

O teor de umidade do RSU, dentro de todas as outras propriedades, talvez seja a que apresente a maior quantidade de fatores que possam influenciar no seu valor, que depende, dentre outras coisas, da sua composição inicial, condições climáticas locais, do processo de operação dos aterros, da taxa de decomposição biológica, da capacidade e funcionamento dos sistemas de coleta de líquidos percolados e do sistema de *liner* de recobrimento. Num mesmo aterro sanitário o teor de umidade pode variar significativamente entre um ponto e outro, tornando-se relevante a obtenção do perfil de umidade com a profundidade, o qual pode ser obtido através de secagem de amostras representativas em estufa ou de

outros métodos de determinação da umidade, como da sonda de nêutrons. Quando se trata de RSU, a umidade é expressa tanto em base seca, como adotado em geotecnia, ou seja,  $w = (M_w/M_s) \times 100$  (%), como em base úmida,  $w_w = (M_w/M) \times 100$  (%). Os dois índices estão relacionados, pois  $w_w = w / (1+w)$ . É importante especificar o tipo de umidade que se está utilizando, pois a depender da área de estudo é mais comum se utilizar de uma ou da outra forma de representação.

Carvalho (1999) encontrou valores de teor de umidade entre 50% e mais de 100% para resíduos do aterro Bandeirantes em São Paulo. Em seu estudo, ela apresenta os valores de umidade para os diferentes constituintes do resíduo (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Umidade dos componentes do RSU (CARVALHO, 1999)

Componentes	Umidade (%)	
	Base seca	Base úmida
Metais	19,6	16,4
Papel	74,8	42,8
Vidro	5,9	5,57
Plástico	41,5	29,3
Borracha	24,5	19,6
Têxteis	55,0	35,5
Pedra	12,6	11,2
Madeira	69,8	41,1
Pasta Orgânica	47,0	32,0

Existe uma grande variação nos valores de umidade entre os diferentes componentes do RSU, sendo a matéria orgânica responsável pelos maiores valores encontrados. Segundo Knochenmus et al. (1998), o teor de umidade do RSU é basicamente o resultado de altas porcentagens de lixo orgânico (resíduos alimentares, de jardim e poda), e o seu valor tende a aumentar com o aumento do conteúdo orgânico do material. Azevedo et al. (2003) comprovam esse fato, apresentando resultados de teores de umidade para resíduos de diversas idades do aterro de Santo André, São Paulo, onde observaram uma diminuição dos valores com o aumento da idade ( $w$  (%) =  $-0,63.t$  (meses) + 59,3), provavelmente causada pela diminuição da quantidade de matéria orgânica devido a sua decomposição, pois durante o processo há o consumo de água tanto intrínseca (água presente na composição da matéria orgânica) como da água livre.

Na Figura 2.8 estão apresentados resultados publicados por alguns autores do teor de umidade em função da profundidade.

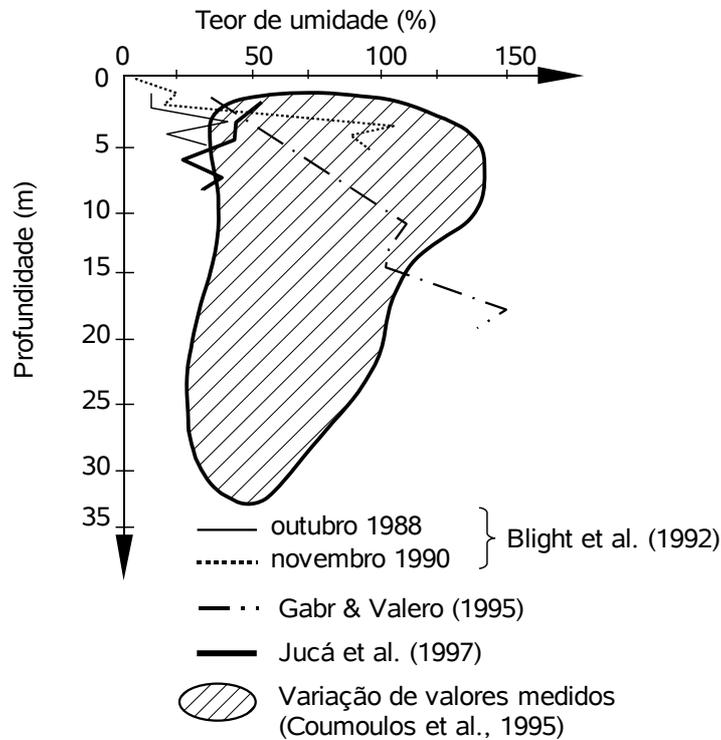


Figura 2.8. Teor de umidade para o resíduo sólido urbano (CARVALHO, 1999).

Os componentes inorgânicos, tais como papéis e produtos plásticos, geralmente, têm um teor de umidade abaixo de 10%. Assim, o teor de umidade tende a aumentar com o aumento do conteúdo orgânico do material.

#### 2.4.4 Temperatura

As temperaturas dos aterros de resíduos sólidos urbanos normalmente variam entre 30° e 60°, apresentando valores crescentes com o aumento da profundidade. Após profundidades entre 5 e 10 m, estes valores tendem a se estabilizar e a variação da

temperatura ambiente perde parte de sua importância, conforme verificado em estudos de Coumolos et al. (1995) (Figura 2.9) e Mariano e Jucá (1998) (Figura 2.10).

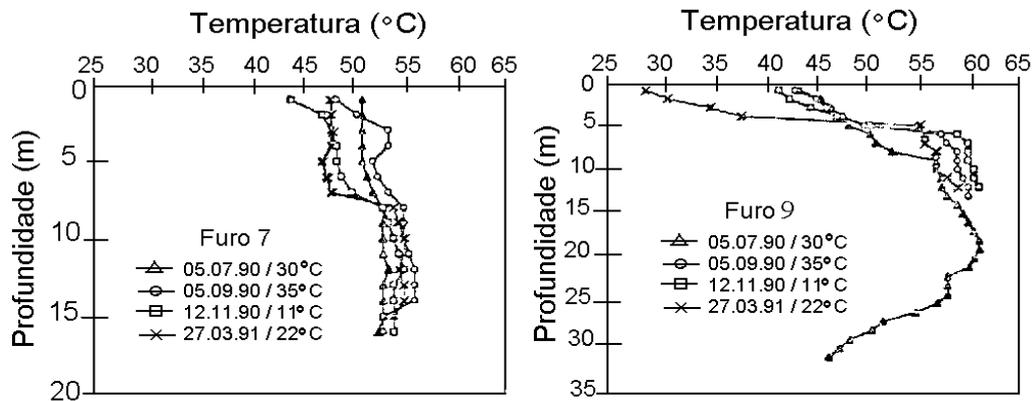


Figura 2.9. Variação da temperatura do RSU com a profundidade, Aterro Ano Liossia, Atenas (Grécia), (COUMOULOS et al., 1995).

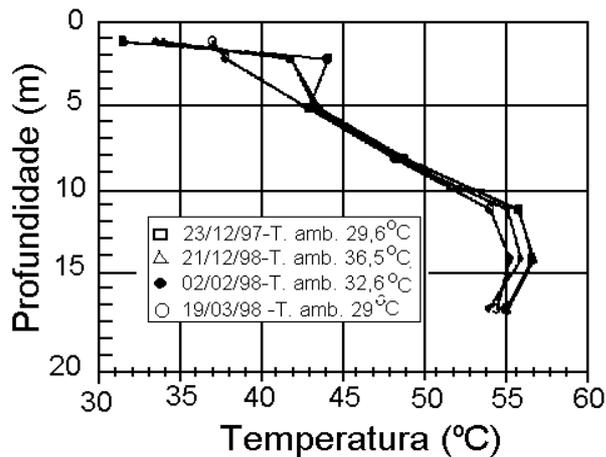


Figura 2.10. Variação da temperatura do RSU com a profundidade, Aterro da Muribeca, Recife (Brasil), (MARIANO & JUCÁ, 1998).

### 2.4.5 Peso específico in situ

Existem várias técnicas para determinação do peso específico *in situ*, dentre elas destacam-se os ensaios em poços escavados (2 a 4 m de profundidade) ou trincheira e aqueles empregando radiação gama. Os ensaios em poços consistem na pesagem do

material e determinação do volume a partir do preenchimento da cava com água, antes devidamente impermeabilizada com manta sintética. Devido as características peculiares do RSU, nenhum dos métodos é realmente preciso, podendo haver variações significativas nos resultados obtidos.

O peso específico dos maciços de RSU é influenciado pela composição e umidade do RSU, pelas camadas de cobertura de solo utilizadas diariamente, pelo grau de compactação e pela decomposição e consolidação do resíduo com o tempo. Em aterros mais antigos, o peso específico depende do grau de decomposição, fatores ambientais e profundidade da amostra e este, geralmente, aumenta com a profundidade como resultado do processo de compressão e bioconsolidação do RSU (KÖNIG & JESSBERGER, 1997).

Manassero et al. (1996) apresentaram valores de pesos específicos em função do grau de compactação dos aterros: 3 a 9 kN/m<sup>3</sup> para aterros mal compactados, de 5 a 8 kN/m<sup>3</sup> para moderadamente compactados e de 9 a 10,5 kN/m<sup>3</sup> para aterros bem compactados.

Os pesos específicos obtidos para os resíduos sólidos urbanos aterrados apresentam uma ampla faixa de variação, desde pequenos valores como 3 kN/m<sup>3</sup>, para aterros não compactados a pobremente compactados, até valores como 17 kN/m<sup>3</sup>, para aterros com alto grau de compactação (KÖNIG & JESSBERGER, 1997).

Carvalho (1999) relata as dificuldades em se determinar o peso específico do RSU em campo. Em seu trabalho foram encontrados valor de peso específico entre 8 e 15 kN/m<sup>3</sup>, por meio da pesagem de material obtido de furos de sondagem e da estimativa do volume do furo. Comenta da imprecisão na determinação destes valores, porém observa a tendência do aumento do peso específico com a profundidade.

Resultados de Azevedo et al. (2003), comprovam o aumento do peso específico do RSU com a idade (Figura 2.11).

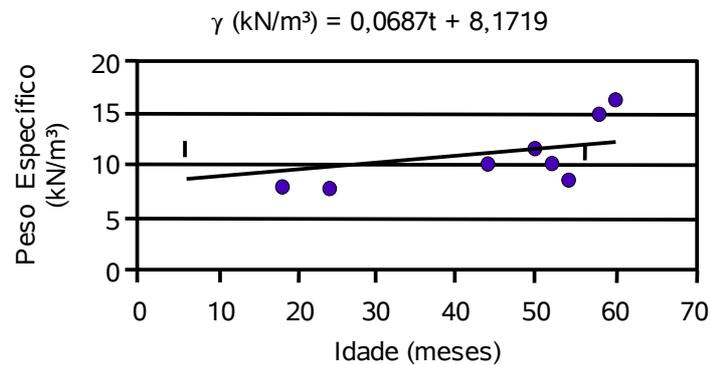


Figura 2.11. Variação do peso específico com a idade do resíduo (AZEVEDO et al., 2003).

#### 2.4.6 Permeabilidade do RSU

A determinação do coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) é de fundamental importância para o dimensionamento dos sistemas de drenagem interna de chorume e gás dos aterros sanitários de RSU.

A permeabilidade é normalmente avaliada por meio de ensaios de laboratório e ensaios *in situ*, executados em trincheiras e poços escavados de grande diâmetro ou em furos de sondagem.

Carvalho (1999) apresenta dados de condutividade hidráulica de RSU publicados por vários autores (Tabela 2.4).

Knochenmus et al. (1998) alertam para o fato de que a permeabilidade do maciço de RSU é altamente dependente do procedimento de aterramento, grau de compactação, nível de tensões, idade e composição do RSU, portanto, deve ser determinada de caso para caso. Manassero et al. (1996) sugere o uso de um coeficiente de permeabilidade de  $10^{-3} \text{ cm/s}$  como uma primeira aproximação nos projetos.

Tabela 2.4 - Coeficientes de permeabilidade para o RSU obtidos por diferentes autores (CARVALHO, 1999).

Referência	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Coeficiente de permeabilidade (m/s)	Método de ensaio
Fungaroli et al. (1979)	1,1 - 4	$1 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$	Determinação em lisímetros
Koriaties et al. (1983)	8,6	$3,15 \times 10^{-5} - 5,10 \times 10^{-5}$	Ensaio de laboratório
Oweis & Khera (1986)	6,45	$1 \times 10^{-5}$	Estimativa de dados de campo
Oweis et al. (1990)	6,45 9,4 - 14 6,3 - 9,4	$1 \times 10^{-5}$ $1,5 \times 10^{-6}$ $1,1 \times 10^{-5}$	Ensaio de bombeamento Ensaio de campo com carga variável Ensaio em poço
Landva & Clark (1990)	10,1 - 14,4	$1 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-4}$	Ensaio em poço
Gabr & Valero	-	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-5}$	Ensaio de laboratório
Blengino et al. (1996)	9 - 11	$3 \times 10^{-7} - 3 \times 10^{-6}$	Ensaio de campo em furos profundos (30 - 40 m) e com carga variável
Manassero et al. (1990)	8 - 10	$1,5 \times 10^{-5} - 2,6 \times 10^{-4}$	Ensaio de bombeamento (15 - 20m de profundidade)
Beaven & Powrie (1995)	5 - 13	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-4}$	Ensaio de laboratório com pressão conf. De 0 - 600 kPa
Brandi (1990)	11 - 14 13 - 16	$7 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-6}$ (comp. Rolo) $5 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-7}$ (comp. dinâmica)	Ensaio de campo com carga variável Ensaio em poço
Brandi (1994)	9 - 12 9 - 12 13 - 17	$2 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-6}$ $5 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-5}$ (pré-tratado) $2 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-5}$ (muito compactado)	Ensaio de laboratório
Jessberger (1984)	RSU mist. com entulho (ensaio I)	$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-3}$ $3 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-5}$	Antes da comp. dinâmica Depois da comp. dinâmica
Jessberger (1984)	RSU mist. com entulho (ensaio II)	$4 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-3}$ $1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-4}$	Antes da comp. dinâmica Depois da comp. dinâmica
Santos et al. (1998)	14 - 19	$1 \times 10^{-7}$	Ensaio <i>in situ</i> em furo de sondagem
Blengino et al. (1996)	-	$3 \times 10^{-7} - 2,5 \times 10^{-6}$	Ensaio <i>in situ</i> em furo de sondagem

Os ensaios para determinação do coeficiente de permeabilidade em campo apresentam inúmeras dificuldades em virtude do caráter heterogêneo que o RSU apresenta. Realizando ensaios de perda d'água em furos de sondagem, Simões et al. (2003) avaliaram a permeabilidade do resíduo da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos em Belo Horizonte, obtendo para este resíduo valores situados na faixa de  $10^{-4}$  cm/s.

Realizando ensaios de infiltração em dois furos de sondagem, Carvalho (1999) observou uma grande variação nos valores do coeficiente de permeabilidade, atribuindo à este comportamento a heterogeneidade do material. Observou também a tendência do coeficiente de permeabilidade reduzir com a profundidade em virtude do efeito da consolidação do RSU, resultante da sobrecarga provocada pelas camadas subjacentes. Os valores situaram-se na faixa de  $8 \times 10^{-4}$  a  $5 \times 10^{-6}$  cm/s.

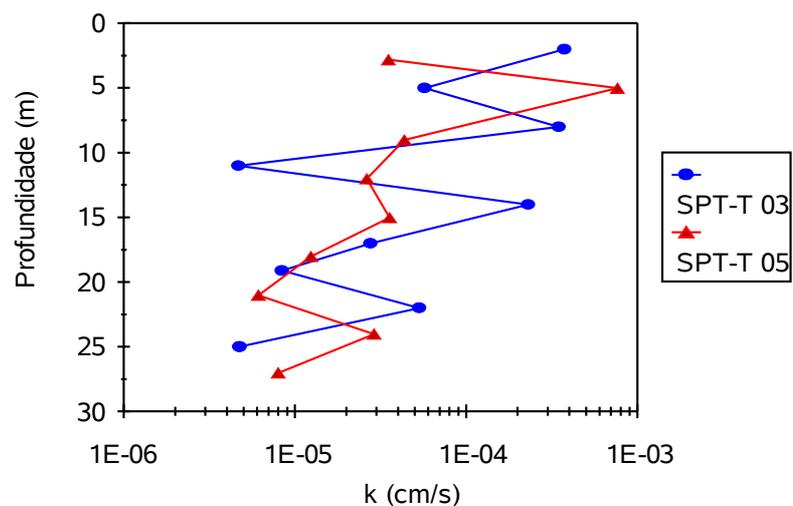


Figura 2.12. Coeficiente de permeabilidade do RSU em função da profundidade (CARVALHO, 1999).

Utilizando um permeâmetro especial, capaz de obter amostras indeformadas (as amostras, na verdade, eram pouco deformadas), Azevedo et al. (2003) tentaram avaliar o comportamento da permeabilidade do RSU com sua idade. Os valores obtidos da condutividade hidráulica praticamente não variaram com a idade dos resíduos, obtendo-se o valor médio de  $9,5 \times 10^{-4}$  cm/s.

## **2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS RSU**

### **2.5.1 Introdução**

As principais propriedades mecânicas do RSU (resistência ao cisalhamento e compressibilidade) são bastante influenciadas pela composição e estado de alteração do resíduo, bem como pelo comportamento mecânico individual de cada componente. As informações sobre essas propriedades dos RSU são escassas e, em alguns casos, os dados publicados são contraditórios (KNOCHENMUS et al., 1998 e DIXON, 2005).

Em geral, as propriedades mecânicas dos resíduos sólidos urbanos são avaliadas empregando, para esses materiais, os métodos convencionais de ensaios, tanto de campo como de laboratório, desenvolvidos na Mecânica dos Solos.

### **2.5.2 Compressibilidade dos RSU**

Uma propriedade mecânica muito importante dos RSU para a previsão do comportamento dos aterros sanitários está relacionada às suas características de deformabilidade. A previsão dos recalques em aterros sanitários de RSU é de grande importância para a avaliação da integridade dos seus componentes, tais como camadas de cobertura final e sistemas de drenagem de líquidos e gases, além de possibilitar a avaliação do desempenho desses empreendimentos após o seu fechamento. Além disso, a previsão dos recalques ao longo do tempo permite uma estimativa da vida útil dos aterros sanitários, aspecto importante no contexto do gerenciamento dos resíduos sólidos (SIMÕES & CAMPOS, 2003).

De acordo com Sowers (1973), nos aterros sanitários ocorrem os seguintes mecanismos responsáveis pelos recalques:

1. Solicitações mecânicas, como distorções, dobramentos, esmagamentos e reorientação dos materiais, que ocasionam processos similares à consolidação dos solos orgânicos;
2. Carreamento e erosão interna, fazendo com que as partículas mais finas ocupem os espaços compreendidos entre as partículas maiores;
3. Mudanças físico-químicas, tais como, oxidações, corrosões e combustões;
4. Degradação bioquímica: fermentação e decomposição, tanto anaeróbia como aeróbia;
5. Interação entre os diversos mecanismos, como por exemplo, o metano gerado pela biodecomposição pode entrar em combustão espontânea pelo calor gerado no interior do aterro, ou ainda os ácidos orgânicos da decomposição podem acelerar ou desencadear processos de corrosão e erosão.

Os aterros sanitários de RSU recalcam, sob peso próprio, entre 10 a 30% da altura original e a maioria dos recalques ocorre nos primeiros anos após o seu fechamento (GRISOLIA & NAPOLEONI, 1996).

Grisolia e Napoleoni (1996) apresentam uma curva de compressibilidade teórica para explicar os diversos mecanismos responsáveis pelos recalques nos aterros sanitários de RSU, Figura 2.13.

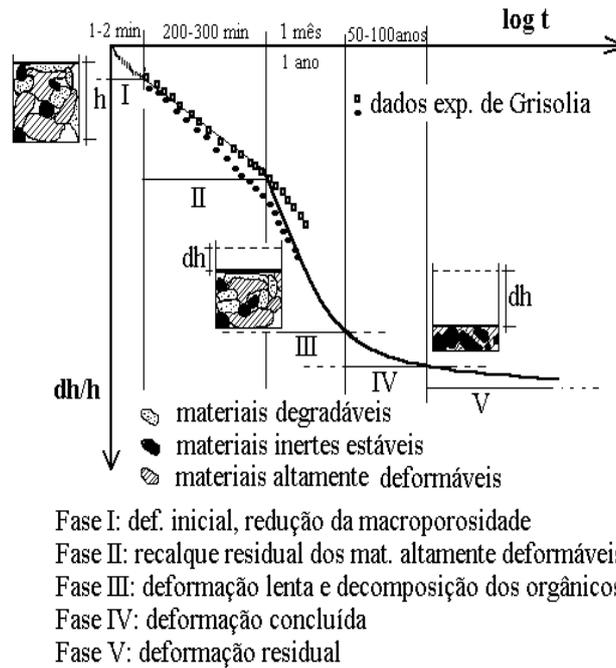


Figura 2.13. Curva teórica de compressibilidade do RSU (Grisolia e Napoleoni, 1996).

Após a sua disposição no aterro, o resíduo apresenta uma estrutura porosa que pode variar bastante de forma e volume. Com o acréscimo das sobrecargas, ocorre uma acentuada redução de volume dos materiais altamente deformáveis e deslocamento dos inertes estáveis (Fase II). Mantendo a sobrecarga constante, ocorrem deformações por fluência e transformações da matéria orgânica (Fase III), até que estabeleçam, no fim do processo, contatos diretos entre os elementos inertes estáveis.

### 2.5.2.1 Modelos para previsão dos recalques em aterros de RSU

Existem diversos modelos na literatura utilizados para a previsão dos recalques em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos com diferentes formas de abordagens dos mecanismos responsáveis por esses recalques. A maioria dos modelos existentes podem ser divididos nas seguintes categorias: i) modelo de consolidação, no qual a teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi normalmente é utilizada; ii) modelos que se

apoiam na descrição do processo reológico, como por exemplo, o modelo exponencial de creep (Power creep law) de Gibson e Lo; iii) modelo de biodegradação, onde a degradação da matéria orgânica provoca uma redução de volume da massa de resíduos, podendo ser avaliada através de modelos de geração de gás; iv) modelos baseados em regressões (por exemplo, logarítmicas, hiperbólicas, bi-linear, multi-linear), obtidas a partir de dados de recalques dos aterros sanitários. Liu et al. (2006) apresenta um tabela com alguns modelos utilizados na previsão dos recalques dos aterros sanitários e seus respectivos pesquisadores (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 - Modelos para previsão dos recalques em aterros sanitários e seus respectivos autores (LIU et al., 2006).

Categoria do modelo		Pesquisador
Modelo de base reológica	Função logarítmica	Edil et al. (1990) Bleiker et al. (1995) Chen & Chou (1998) Yen & Scanlon (1975)
	Modelo exponencial de creep	Edil et al. (1990) Punyamurthula (1995) Zhao et al. (2001)
Método da regressão	Função hiperbólica	Ling et al. (1998)
	Função bi-linear	Bjarngard & Edgers (1990) Jesserberger & Kockel (1991) Stulgis et al. (1995)
	Função multi-linear	Deutsch, Jr. et al. (1994) Sowers (1973) Yen & Scanlon (1975) Rao et al. (1977) Oweis & Khera (1986) Bjarngard & Edgers (1990) Edil et al. (1990) Landva & Clark (1990) Morris & Woods (1990)
Teoria da consolidação	Wall & Zeiss (1992) Deutsch, Jr. et al. (1994) Fasset <i>et al.</i> (1994) Boutwell & Fiore (1995) Stulgis et al. (1995) Ourry & Page (2005) Gourc & Olivier (2005) Wall & Zeiss (1992) Park & Lee (1997)(202)	
Bioconsolidação	Edgers et al. (1992) Afonso et al. (2003)	

Os modelos mais tradicionais consideram que os recalques ao longo do tempo podem ser divididos em algumas fases distintas:

- A) Compressão inicial ou imediata, associada às cargas impostas nos processos de operação dos aterros sanitários;
- B) Compressão primária, provocada pela drenagem dos fluidos, sendo analisada através das teorias do adensamento de Terzaghi. Segundo Sewors (1973), a compressão primária é relativamente rápida, ocorrendo em aproximadamente 30 dias. A avaliação dos recalques totais devido à compressão primária utilizando essas teorias têm fornecido estimativas razoáveis (SIMÕES & CAMPOS, 1998). A compressão primária dos RSU pode ser estimada com auxílio da Equação (2.1):

$$\rho_1 = \frac{H_o}{1+e_o} \cdot C_c \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma'_{vo}}{\sigma'_{vo}}\right) \quad (2.1)$$

Onde:  $\rho_1$  - Recalque devido à compressão primária da camada de espessura  $H_o$ ;  
 $e_o$  - Índice de vazios inicial;  $C_c$  - Índice de compressão primário;  $\sigma'_{vo}$  = tensão vertical efetiva inicial e  $\Delta\sigma'_{vo}$  = Acréscimo de tensão vertical efetiva;

- C) Compressão secundária, causada por deformações viscosas e pela decomposição da matéria orgânica. De acordo com Sowers (1973), a compressão secundária é responsável pela maior parcela das deformações nos aterros sanitários e os recalques secundários estão associados a combinação da compressão secundária mecânica, da ação físico-química e da degradação biológica. De acordo com o autor, o índice de compressão secundária ( $C_a$ ) é proporcional ao índice de vazios inicial do resíduo e à condições favoráveis a degradação. Condições favoráveis a decomposição da matéria orgânica acarretam elevados valores do coeficiente de compressão secundária e, conseqüentemente, altas taxas de recalques. Permanecendo constantes os

parâmetros relacionados à degradação dos resíduos, os recalques decorrentes da compressão secundária podem ser previstos a partir da Equação 2.2:

$$\rho_2 = \frac{H_o}{1+e_o} \cdot C_\alpha \cdot \log\left(\frac{t_1 + \Delta t}{t_1}\right) \quad (2.2)$$

O recalque final é a soma das parcelas dos efeitos da compressão imediata, primária e secundária. Existe uma grande dificuldade no emprego dessa modelo na previsão dos recalques de aterros sanitários, pois os parâmetros requeridos  $C_c$ ,  $C_\alpha$  e  $e_o$  à sua aplicação são difíceis de serem determinados, visto que os resíduos apresentam grande heterogeneidade e presença de materiais de grandes dimensões, necessitando equipamentos de ensaios de dimensões maiores e que contemplem esses aspectos particulares (MACHADO et al, 2005; SIMÕES & CAMPOS, 1998).

Simões et al. (1996) e Simões e Campos (1998) chamam a atenção para a aplicação de modelos para previsão dos recalques em aterros de RSU que levam em consideração aspectos mais realistas das características destes maciços, como, por exemplo, a existência de deformações finitas e de se tratar de meios não saturados.

### **2.5.2.2 Bioconsolidação**

A composição dos RSU pode variar bastante com o local e com o tempo de disposição, e isso depende de inúmeros fatores, como por exemplo, as condições sócio-econômicas, condições climáticas, coleta dos resíduos, métodos de disposição, procedimentos de amostragem e de separação (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993). Apesar da variabilidade na composição, a porcentagem de matéria orgânica presente na composição dos RSU é bastante elevada. Essa matéria orgânica biodegradável pode ser

reduzida a componentes mais simples pela ação de microorganismos aeróbios e anaeróbios.

Durante o processo aeróbio, o qual é relativamente curto, a matéria orgânica biodegradável reage com o oxigênio para formar dióxido de carbono, água, e outros subprodutos. A redução do oxigênio no meio indica o início do processo microbiano anaeróbio, que persiste por um longo tempo. No meio anaeróbio a degradação da matéria orgânica prossegue sequencialmente, iniciando com a hidrólise dos materiais complexos, transformando-os em substâncias mais simples, como as proteínas, os carboidratos e os lipídios, os quais são ainda mais hidrolisados. Altas concentrações de ácidos orgânicos, amônia, hidrogênio, água e calor são produzidos. À medida que o processo de biodegradação evolui, chegando a fase conhecida como fase metanogênica, ocorre uma intensificação na produção de gases, principalmente dióxido de carbono e metano (MCBEAN et al., 1995; BIDONE & POVINELLI, 1999).

O processo de biodegradação anaeróbio é influenciado por diversos fatores, os quais incluem as próprias características do resíduo, seu teor de umidade, a temperatura do meio, pH, disponibilidade de nutrientes e microorganismos, como também a presença de inibidores, assim como oxigênio, metais, e sulfatos (BIDONE & POVINELLI, 1999; EL-FADEL et al., 1999). Segundo Bidone e Povinelli (1999) é possível que exista um grau de compactação ótimo dos resíduos associado a um teor de umidade que favoreça a metanogênese.

As fases do processo de biodegradação mencionadas anteriormente estão bem definidas. É de se esperar, que a contínua perda de massa da fase sólida resulte em significantes alterações nas propriedades geotécnicas do RSU, tais como permeabilidade e compressibilidade (SOLER et al., 1995). Segundo Soler et al. (1995), a fase metanogênica, onde predomina a geração de metano e dióxido de carbono, é a mais longa, portanto é a que mais interfere nos processos de bioconsolidação. Desta forma os modelos de geração e transporte de gases no interior dos aterros sanitários têm se concentrado nessa fase.

Alguns métodos para previsão dos recalques que incorporam em suas formulações aspectos da biodegradação são baseados nos modelos de geração de gases, uma vez que a perda de massa, e conseqüentemente a redução de volume ao longo do tempo (bioconsolidação), são função da taxa de produção de gases no interior dos aterros sanitários. Existem vários métodos e modelos que podem ser usados para a estimativa da taxa de geração de biogás nos aterros sanitários, como o modelo Scholl Canyon, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), reconhecidamente o mais difundido. O modelo Scholl Canyon é derivado da seguinte equação geral:

$$V_{CH_4} = k \cdot L_o \int_{t=0}^{t=i} M(t) \cdot e^{-k \cdot t} \cdot dt \quad (2.3)$$

Onde:  $V_{CH_4}$  ( $m^3$ ) é o volume de metano gerado no tempo  $t$ ;  $k$  (1/ano) é a taxa de geração de metano;  $L_o$  ( $m^3 CH_4 / t$  RSU) é o potencial de geração do metano, expresso em volume por unidade de massa do resíduo;  $M(t)$  é a parcela biodegradável do resíduo.

Os modelos que se baseiam na teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi incorporam nas suas formulações os efeitos das compressões secundárias, que são a combinação entre as compressões mecânicas secundárias, ações físico-químicas, e os processos bio-químicos de decomposição. Toda essa associação de fatores, responsáveis pelas compressões secundárias, são incorporadas à um único parâmetro, o índice de compressão secundária ( $C_\alpha$ ). Segundo Sowers (1973), a relação entre os recalques e o logaritmo do tempo será linear se não houverem mudanças drásticas nas condições ambientais do meio.

Os modelos mais atuais, utilizados na avaliação dos recalques em aterros de RSU, incorporam nas suas formulações, não só parâmetros mecânicos, mas também parâmetros biológicos e de operação dos aterros. Soler et al. (1995), a partir do modelo Scholl Canyon de geração de metano, determinam a perda de volume de sólidos devido a biodegradação através da equação:

$$\Delta V_s(t) = \frac{k}{f_{CH_4} \cdot \rho_s} \cdot \int_{t=0}^{t=i} M(t) \cdot e^{-k \cdot t} \cdot dt \quad (2.4)$$

Onde:  $f_{CH_4}$  é a fração de metano no gás gerado, que geralmente está na ordem de 0,5;  $\rho_s$  é a densidade dos sólidos biodegradáveis.

O modelo proposto Simões e Campos (2003) é um modelo simples unidimensional, no qual o recalque nos aterros de RSU é o resultado de duas componentes: uma devido ao comportamento mecânico e a outra devido a degradação biológica. A componente mecânica é composta de um recalque imediato, no qual a aplicação de cargas resulta na redução da macroporosidade e na drenagem de líquidos e gases, e uma componente de longo prazo, associada a deformação lenta da estrutura do resíduo (fluência). A componente biológica resulta dos processos de decomposição das frações orgânicas no interior da massa de resíduos e é derivada da equação de geração de gás. A Equação (2.5) apresenta o modelo proposto pelo autor.

$$\Delta H = \frac{H_o}{1+e_o} \cdot C_c \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta \sigma'_{vo}}{\sigma'_{vo}}\right) + \frac{H_o}{1+e_o} \cdot C_\alpha \cdot \log\left(\frac{t_1 + \Delta t}{t_1}\right) + M(t) \cdot (1 - e^{-k \cdot (t-t_o)}) \quad (2.5)$$

O modelo considera ainda as etapas de construção das diversas camadas do aterro, onde os seus parâmetros variam de acordo com as características dos resíduos de cada camada e do seu tempo de disposição. A aplicação do modelo em dois aterros sanitários apresentou boa concordância com os dados de campo.

Marques et al. (2002) apresentam um modelo reológico para a previsão dos recalques em aterros de resíduos sólidos, o qual considera as parcelas de compressão mecânica primária e secundárias, bem como a compressão devido à biodegradação. As compressões mecânicas primárias são avaliadas de acordo com as abordagens tipicamente usadas para argilas normalmente adensadas, inicialmente aplicadas para os RSU por Sowers (1973). As deformações mecânicas secundárias, devido à fenômenos viscosos, são avaliados de

acordo com o modelo empírico de Gibson e Lo (1991). As compressões secundárias biológicas relacionadas a degradação são calculadas a partir da proposta de Park e Lee (1997), o qual relaciona o processo da perda de massa através da degradação biológica.

De acordo com Marques et al. (2002) o modelo reológico proposto pode ser associado a três elementos reológicos (Figura 2.14): i) um elemento Hooke com coeficiente de mola não-linear, definido pela coeficiente de compressão primário ( $C'_c$ ); ii) um elemento Kelvin com uma constante de mola  $b$  paralelo a um amortecedor Newtoniano com coeficiente de viscosidade  $c$ ; iii) um terceiro elemento, relacionado a compressão secundária biológica, representada por uma associação em paralelo de um elemento de compressão infinita (máxima compressão biológica,  $E_{DG}$ ) e um amortecedor com coeficiente de viscosidade  $d$ .

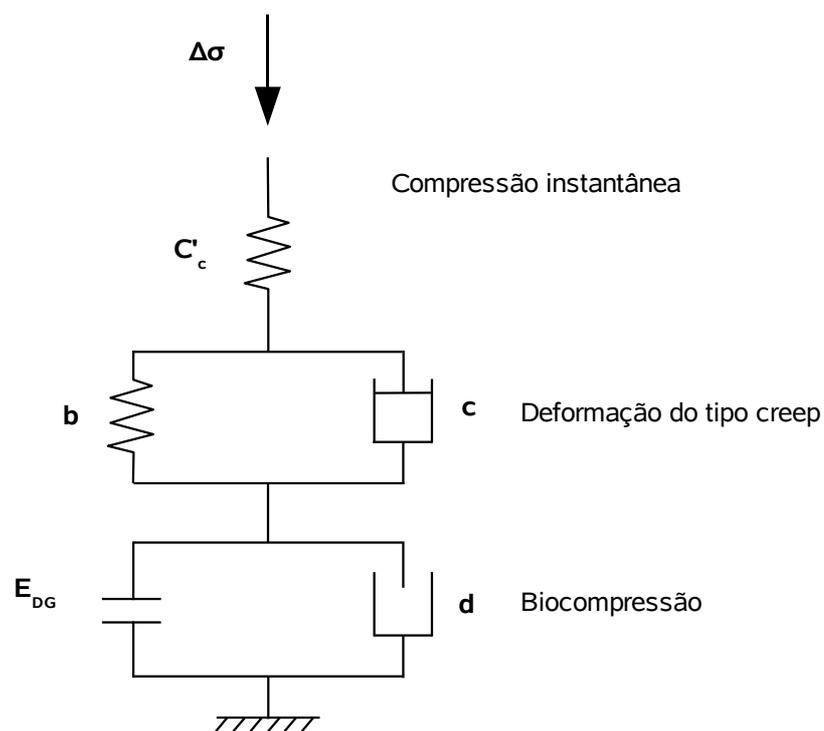


Figura 2.14. Modelo composto para a avaliação da compressibilidade dos RSU (VILAR et al., 2006).

### 2.5.3 Resistência ao cisalhamento dos RSU

Com relação às propriedades de resistência, mesmo com diferenças na composição, idade e estado de alteração, os RSU apresentam um comportamento bastante peculiar que o distingue dos outros materiais geotécnicos, pois a sua curva tensão-deformação não apresenta pico de ruptura, mesmo para grandes deformações (KÖNIG & JESSBERGER, 1997). À medida que as deformações evoluem o material apresenta-se mais resistente, sendo que os materiais fibrosos (plásticos, têxteis, etc), presentes em sua constituição, parecem exercer uma grande influência neste comportamento, como mostra a Figura 2.15. Como é possível observar dessa figura, o intercepto de coesão é altamente dependente da quantidade de plástico da amostra, porém esta não tem influência significativa nas propriedades de atrito do resíduo.

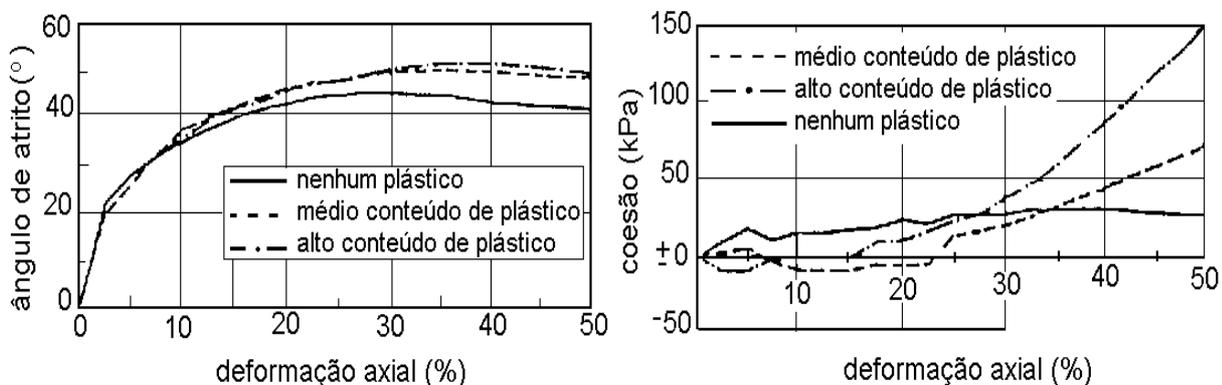


Figura 2.15. Mobilização do intercepto de coesão e ângulo de atrito com as deformações axiais (KÖNIG & JESSBERGER, 1997).

A resistência ao cisalhamento do RSU é usualmente determinada por meio de ensaios *in situ*, ensaios de laboratório (triaxiais, cisalhamento direto) e retro-análise de dados de campo. No presente momento, existem limitadas informações a respeito da resistência ao cisalhamento dos RSU. Dixon et al (2005) apresentou os métodos mais usuais de determinação da resistência ao cisalhamento dos RSU (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 - Métodos de determinação da resistência ao cisalhamento do RSU (DIXON et al. 2005).

Local de Ensaio	Método de Medida	Comentários	Referência
Campo	Retro-análise de Ruptura de Taludes	Informações adequadas raramente disponíveis	Koener & Soong (2000)
	Retro-análise de ensaios de corte em taludes	Grandes deformações observadas, mas sem apresentar ruptura	Singh & Murphy (1990), Cowland et al. (1993), Gotteland et al. (2002)
	Retro-análise de taludes estáveis	Mudando a composição dos resíduos, as experiências passadas não servem como guia para futuros desempenhos	
	Cisalhamento Direto <i>in situ</i>	Dificuldade na execução e resultados relacionados a baixos níveis de tensão	Por exemplo Jessberger & Kockel (1993)
	SPT, CPT e <i>Vane test</i>	Relação não muito clara entre a resistência a penetração e a resistência ao cisalhamento do RSU	
Laboratório	Compressão Triaxial	Amostras deformadas, não há a obtenção da resistência de pico devido a compressão e densificação da amostra	Jessberger (1994), Grisolia et al. (1995)
	Cisalhamento Direto	Requer equipamentos de grande porte (1 x 1 x 1m), amostras deformadas, grandes deslocamentos para mobilizar a resistência de pico	
	Cisalhamento Simples	Equipamentos de grande porte, amostras deformadas, informação útil do módulo de rigidez cisalhante	Kavazanjian et al. (1999)

A resistência destes materiais é usualmente definida usando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, muito utilizado na Mecânica dos Solos e no estudo de outros materiais particulados. Os parâmetros de resistência que definem a envoltória de ruptura são o ângulo de atrito ( $\Phi$ ), que corresponde a inclinação da envoltória, e o intercepto de coesão ( $c$ ), correspondente ao cruzamento da envoltória com o eixo  $y$ . Este intercepto,  $c$ , pode ser denotado como uma coesão entre as partículas, mas é freqüentemente uma função de um ou mais fatores: curvatura da envoltória de ruptura, variação entre as amostras, erros de medidas, ou uma indicação de uma resistência a tração. Desta forma é comum na sua definição o termo “coesão aparente” ou “intercepto de coesão”. Deve-se tomar cuidado na transferência dos conhecimentos a respeito do comportamento de resistência dos solos aos

RSU, pois estes possuem, diferentemente dos solos, partículas que são altamente compressíveis, outras que suportam grandes deformações de tração, e ainda partículas que mudam suas características com o tempo devido à processos de biodegradação (DIXON et al., 2005).

### 2.5.3.1 Retro-análise de dados de campo

Segundo König e Jessberger (1997) e Manassero et al. (1996) deve-se tomar um cuidado especial com o emprego de parâmetros de resistência obtidos de retro-análise, pois existe um número infinito de combinações de resistência ao cisalhamento o qual satisfaz a equação de equilíbrio (uma equação e duas incógnitas) e portanto, a solução não pode ser obtida precisamente.

As informações para a obtenção dos parâmetros de resistência do RSU, a partir de retro-análise do comportamento do maciço, são raramente disponíveis (DIXON et al., 2005). Van Impe (1998) apresenta alguns parâmetros de resistência ao cisalhamento resultantes de retro-análise (Tabela 2.7).

Tabela 2.7 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do RSU obtidas a partir de retro- análise (VAN IMPE, 1998).

Referência	Parâmetros de resistência		Comentários
	c' (kPa)	$\Phi'$ (°)	
Cowland et al. (1993)	10	25	corte no RSU em trincheira profunda
Kavazanjian et al (1995)	-	25 - 34	45 kPa < $\sigma_v$ < 180 kPa
Van Impe et al. (1996)	20	0	sobrecarga $\leq$ 20 kPa
Van Impe et al. (1996)	0	38	20 kPa < sobrecarga $\leq$ 60 kPa
Van Impe et al. (1996)	20	30	sobrecarga > 60 kPa
Benvenuto e Cunha (1991)	13,5	22	peso específico 10 – 13 kN/m <sup>3</sup>

### 2.5.3.2 Ensaio *in situ*

As dificuldades de se avaliar a resistência do RSU através da execução de ensaios campo, tais como CPT, SPT e *vane test*, estão vinculadas a heterogeneidade do material, com a presença de componentes resistentes como madeira, pedra, metal e outros, os quais provocam grandes picos na resistência medida, desvio das haste dos equipamentos e avarias nos amostradores, paletas e ponteiras.

Segundo Manassero et al. (1996), os resultados obtidos dos ensaios de *vane* não são representativos da resistência do RSU, pois as palhetas usadas neste ensaio são muito pequenas comparadas com as dimensões dos componentes do RSU.

A maioria dos ensaios apresentam um alto grau de dispersão nos resultados o que torna difícil sua interpretação e obtenção das propriedades de resistência do RSU através, por exemplo, de correlações entre o número de golpes do ensaio de SPT (KNOCHENMUS et al. 1998).

Embora as medidas do CPT apresentem picos de resistência, indicando que o cone frequentemente encontra objetos rígidos (madeira, metal, pedras, etc), pode-se observar uma tendência geral onde, na maioria dos casos, a resistência de ponta aumenta com profundidade (MANASSERO et al. 1996).

Jucá (2003) apresenta uma série de resultados de ensaios de SPT em três aterros e em um lixão de algumas cidades do Brasil. Em dois dos aterros e no lixão os resultados de resistência permaneceram praticamente constantes ao longo da profundidade, sendo que apenas um dos aterros verificou-se uma elevação dos valores de resistência à penetração com o aumento da profundidade (Figura 2.16). Para os três primeiros casos o número de golpes do ensaio SPT apresentaram-se ente 2 e 10, e no segundo caso o número de golpes foi de 5 a 10 nas profundidades iniciais (até 4 m) e de 10 a 20 golpes com o acréscimo da profundidade.

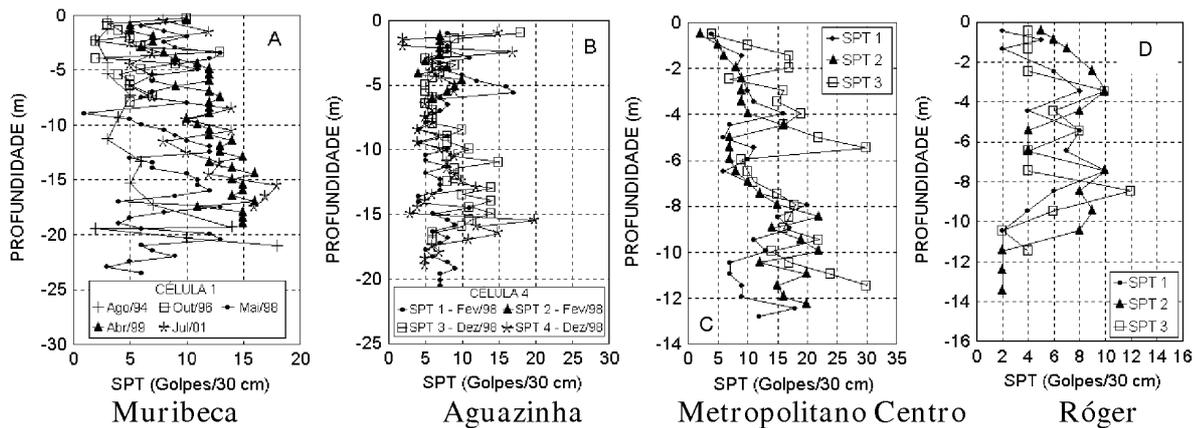


Figura 2.16. Resultados de ensaios SPT em maciços de RSU de algumas cidades do Brasil (JUCÁ, 2003).

Através de ensaios de SPT com medidas de torque, realizados no Aterro Sanitário Bandeirantes em São Paulo, Carvalho (1999) inferiu os parâmetros de resistência do material, sempre destacando as limitações do procedimento. Empregando as correlações existentes entre valores de  $N$  e  $\phi$  propostos para solos arenosos, obteve-se uma faixa de variação de  $26^\circ - 32^\circ$  para o ângulo de atrito efetivo. Já considerando o material puramente coesivo ( $\phi = 0$ ), obtiveram-se valores de resistência ao cisalhamento não-drenada ( $s_u$ ) variando entre 90 a 150 kPa. Verificou-se também, neste caso, uma tendência de aumento da resistência à penetração média e do torque com a profundidade.

Através de correlações entre os valores de resistência de ponta e de atrito lateral nos ensaios de CPT, aplicados para solos arenosos, foram obtidos valores de ângulo de atrito efetivo entre  $29^\circ$  e  $33^\circ$ . Correlacionando os resultados a solos puramente coesivos estimou-se os valores de coesão não drenada ( $s_u$ ) variando entre 45 a 120 kPa (CARVALHO, 1999).

Alguns autores têm utilizado a Carta de Schmertmann para uma classificação geotécnica do RSU. Nesta carta são plotados os resultados médios obtidos dos ensaios de penetração do cone, excluindo os picos de resistência causados pela presença de objetos rígidos do lixo. Resultados de ensaios de penetração contínua (CPT) obtidos para RSU, por vários autores e plotados na Carta de Schmertmann, situam o RSU dentro de uma variação de areia fofa a argila siltosa e arenosa (CARVALHO, 1999), Figura 2.17.

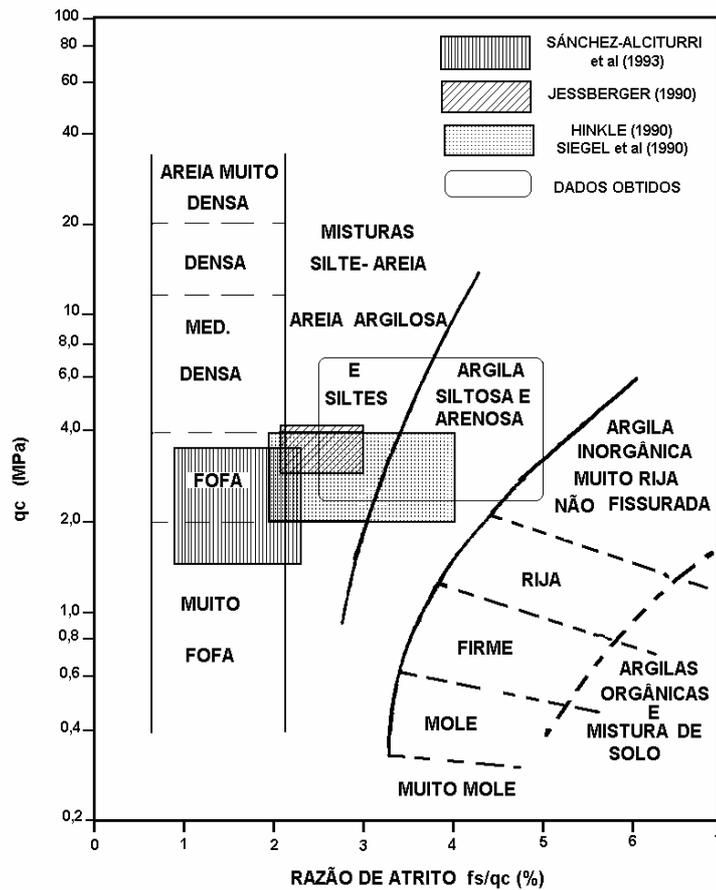


Figura 2.17. Classificação do RSU usando a Carta de Schmertmann (CARVALHO, 1999).

Foi realizada uma tentativa de ruptura controlada de um talude de resíduos com 6 m de altura em um aterro de Belo Horizonte com o objetivo de se obter seus parâmetros de resistência. Foram aplicadas sobrecargas no topo do talude por meio de recipientes preenchidos com entulho. A tentativa não foi bem sucedida, verificando-se apenas pequenos deslocamentos verticais e horizontais (SIMÕES et al., 2003). Este caso demonstra as dificuldades que se têm na determinação dos parâmetros de resistência do RSU por meio de ensaios de campo.

### 2.5.3.3 Ensaios de laboratório

Na avaliação da resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos, os ensaios laboratoriais de compressão triaxial e de cisalhamento direto têm sido os mais usados. Estes vêm sendo executados em amostras de lixo reconstituídas, coletadas em aterros sanitários. A maior limitação desses ensaios reside na dificuldade de se obter amostras representativas do maciço, bem como na necessidade do emprego de equipamentos especiais de grandes dimensões (KÖNIG & JESSBERGER 1997; KNOCHENMUS et al., 1998; MACHADO et al., 2006).

Conforme expõe Manassero et al. (1996), a interpretação dos ensaios com RSU usando os conceitos teóricos derivados do comportamento de solos, é bastante útil no atual estado de conhecimento. Dessa forma, os conceitos de ângulo de atrito e intercepto de coesão são normalmente utilizados.

Manassero et al. (1996) apresenta resultados de ensaios de compressão triaxial em resíduos sólidos de alguns pesquisadores. Verifica-se que os RSU apresentam grandes deformações sem demonstrar uma mobilização de pico da tensão cisalhante (Figura 2.18)

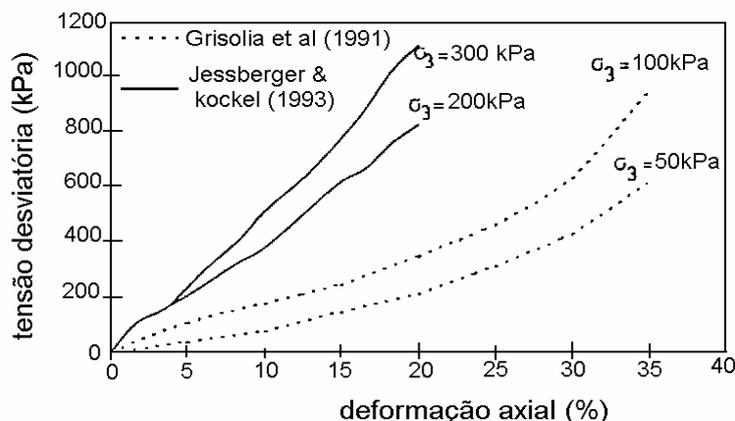


Figura 2.18. Curvas tensão-deformação típicas para o resíduo sólido urbano (MANASSERO et al. 1996).

Curvas tensão-deformação típicas obtidas de ensaios de cisalhamento direto com RSU, apresentadas por vários autores, são mostradas na Figura 2.19 (MANASSERO et al.

1996). As curvas exibem ganho contínuo de resistência com a deformação medida e nenhuma delas apresentou pico de resistência. Nesse caso, similarmente aos ensaios triaxiais, os parâmetros de resistência serão determinados a partir de uma deformação considerada admissível. Para esses ensaios, em geral, tem-se empregado deformações de 10% e 15%. Na Figura 2.20 são apresentados resultados de ensaios de cisalhamento direto obtidos por vários autores, para níveis de deformação de 10 e 15% (VAN IMPE et al., 1998).

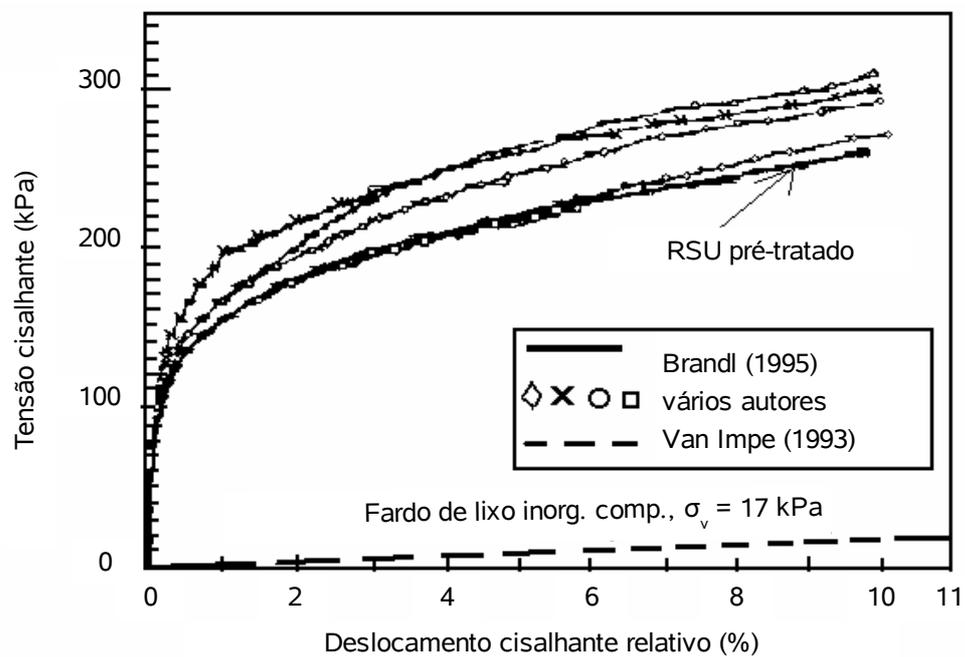


Figura 2.19. Relação tensão - deformação obtida para resíduos sólidos urbanos a partir de ensaios de cisalhamento direto (MANASSERO et al. 1996).

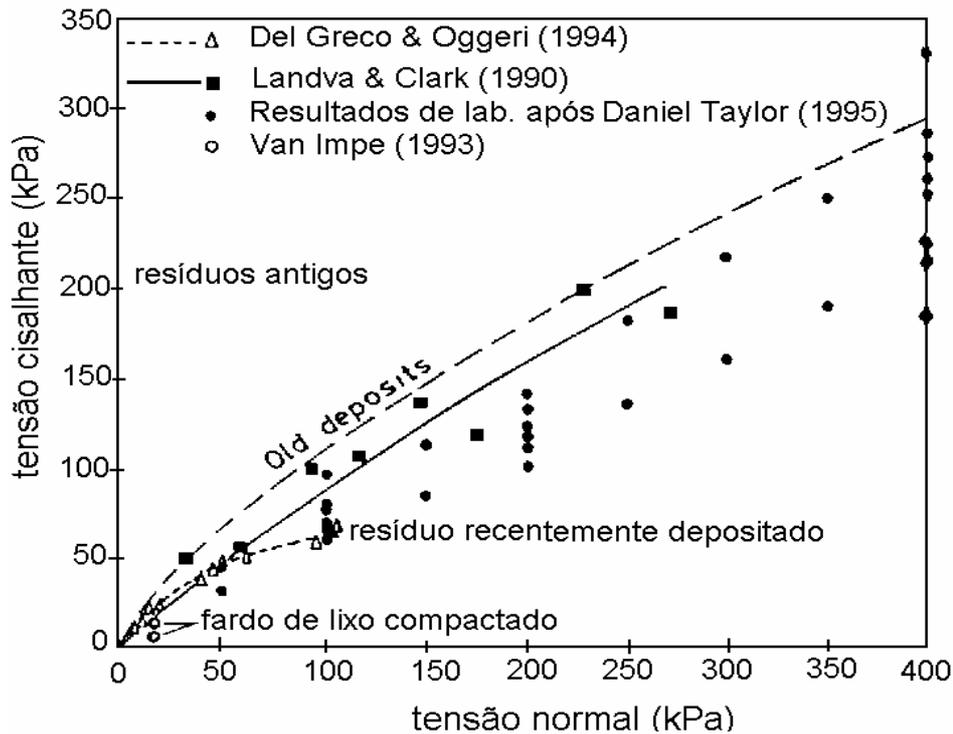


Figura 2.20. Envoltórias de resistência obtidas para resíduos sólidos urbanos a partir de ensaios de cisalhamento direto (VAN IMPE et al., 1998).

Com base nos resultados dos ensaios triaxiais de RSU não se pode definir com facilidade as condições de ruptura. Dessa forma, os parâmetros de resistência ( $c$  e  $\phi$ ) devem ser determinados diferentes níveis de deformação, sendo os valores de 10 a 20%, os mais comuns. Segundo König e Jessberger (1997) uma forma interessante de apresentar os resultados de ensaios triaxiais de RSU é o emprego das trajetórias de tensões, pois estas facilitam a visualização dos resultados. Pode-se ainda traçar diversas envoltórias de resistência, para diferentes deformações, através dos pontos obtidos das trajetórias. Os parâmetros de resistência obtidos seriam apresentados em função das deformações axiais como se ilustra na Figura 2.21.

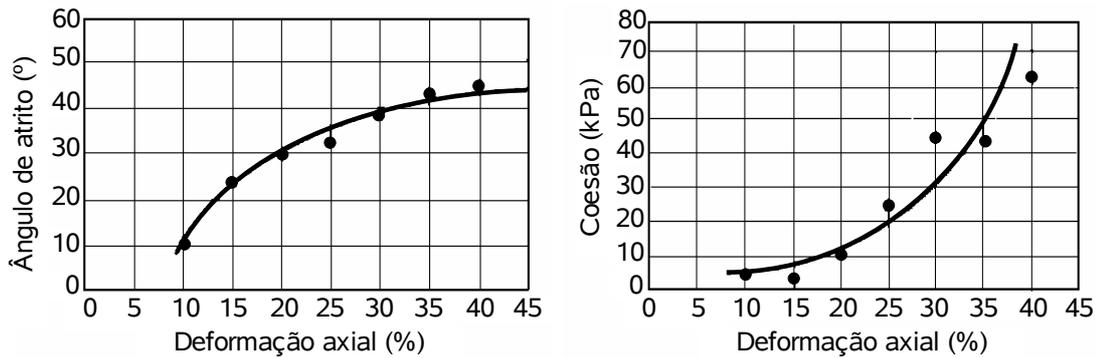


Figura 2.21. Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial (GRISOLIA et al. 1995b).

Diversos autores vêm procurando avaliar os efeitos do envelhecimento nas propriedades de resistência dos RSU. Um dos principais efeitos desse fenômeno é a mudança na composição dos resíduos, causada principalmente pela decomposição da matéria orgânica. De uma forma geral, diminui-se a fração orgânica e aumenta-se a proporção de fibras, pois esses, na sua grande maioria constituída de plásticos, necessitam de um tempo muito maior para se decompor. Isso pode ter uma consequência direta no comportamento do RSU ao longo do tempo, visto a influência que estes materiais têm na sua resistência ao cisalhamento.

König e Jessberger (1997) apresentaram parâmetros de resistência para os RSU com diferentes idades a partir de ensaios de compressão triaxial em câmaras de grandes dimensões (Figura 2.22). Os autores comentam que a redução da resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos com a idade não está claramente evidenciada e conclui que a idade do resíduo não é o fator mais importante nas suas propriedades de resistência.

König e Jessberger (1997) comentaram que o valor limite do ângulo de atrito é usualmente mobilizado para deformações axiais abaixo de 20% e, por outro lado, não se pode observar nenhum valor limite para a coesão, mesmo para grandes deformações.

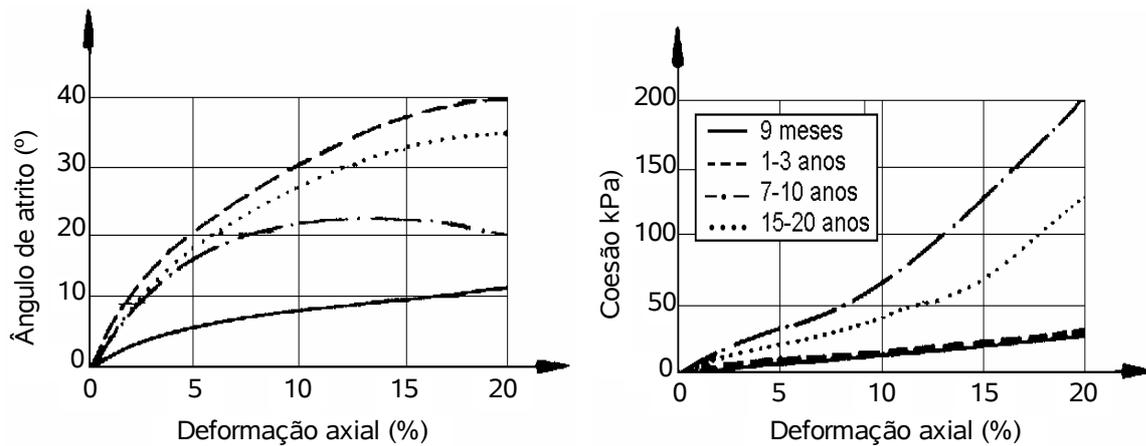


Figura 2.22. Resistência ao cisalhamento do RSU para diferentes deformações obtidas a partir de ensaios triaxiais (KÖNIG & JESSBERGER, 1997).

König e Jessberger (1997), Manassero et al. (1996) dentre outros autores, chamam a atenção para o fato de que o RSU não apresenta uma envoltória de ruptura significativamente bilinear, como acontece para solos reforçados com fibras. De acordo com os autores, isto pode ser explicado pelo fato de que o RSU é reforçado por plásticos com tamanhos e com propriedades tensão-deformação diferentes. Fucale e Jucá (2006) chamam a atenção para o fato de que, por serem materiais diferentes (solos reforçados e resíduos), a interação entre o tipo de material e os elementos de reforço podem gerar diferentes comportamentos tensão-deformação.

Machado et al. (2002) apresentam um modelo constitutivo, o qual considera que o comportamento dos RSU é comandado pelo efeito combinado dos componentes de reforço e a sua matriz básica. Machado et al. (2006), a partir de ensaios de tração simples nas fibras de resíduos novos e nas fibras de resíduos com quatro anos de degradação (resíduo aterrado por quatro anos), tentaram relacionar as mudanças nas propriedades mecânicas das fibras, provocadas pela degradação, na resistência ao cisalhamento dos RSU. Os resultados obtidos não demonstraram diferenças significativas dos parâmetros de resistência entre os resíduos de diferentes idades. Portanto, não se constatou a relação entre a redução das propriedades mecânicas dos componentes de reforço com as propriedades de resistência de resíduos de diferentes idades.

Diversos autores têm apresentado os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos num diagrama que relaciona a coesão com o ângulo de atrito. Sánchez-Alciture et al. (1993), a partir de dados de ensaios de campo e de laboratório de diversos pesquisadores, propõem uma faixa de valores para os parâmetros de coesão e ângulo de atrito que podem ser utilizados em projetos (Figura 2.23).

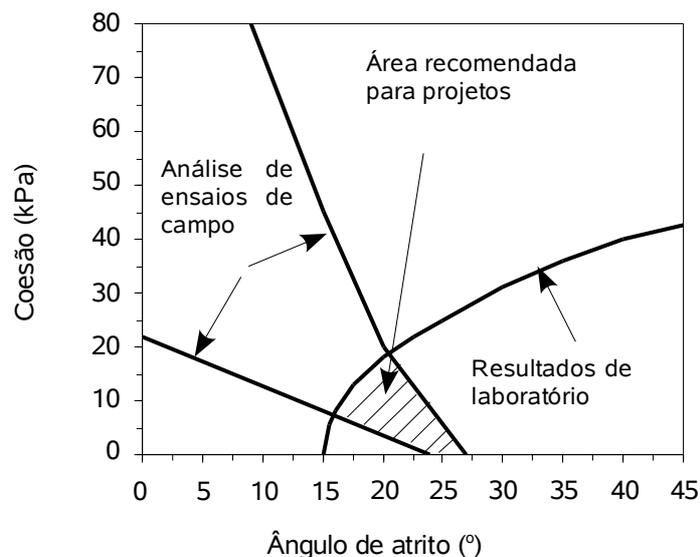


Figura 2.23. Faixa de valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU. Valores recomendados para projetos por Sánchez-Alciturri (1993).

Em um trabalho de referência realizado no Brasil, Carvalho (1999) apresentou um estudo sobre as características geotécnicas do RSU. O seu estudo reuniu uma compilação de uma ampla faixa de informações a respeito das principais características dos RSU disponíveis na época. Através de um grande número de ensaios triaxiais em amostra de grandes dimensões (15 x 30 cm e 20 x 40 cm), variando inúmeros parâmetros, foi obtida uma grande quantidade de informações a respeito do comportamento resistente dos RSU.

Dos ensaios executado em corpos de provas com dimensões de 15 x 30 cm, considerando deformações de axiais de 20%, foram obtidos valores de ângulo de atrito de cerca de 27° e coesão variando de 42 a 55 kPa.

De forma mais sistemática, têm sido encontrados valores para o ângulo de atrito entre 10° e 53° e valores de coesão variando entre 0 e 67 kPa, porém valores maiores que estes

não raramente são reportados. Presume-se que a grande variabilidade nos parâmetros de resistência dos RSU seja motivada pela sua heterogeneidade, a idade e grau de processamento, o nível de deformação escolhido nos ensaios, o processo de escolha de amostras representativas e o tipo de ensaio realizado (VILAR & CARVALHO, 2004; MACHADO et al., 2006).

Dixon e Jones (2005) apresentam uma faixa de envoltórias de resistência ao cisalhamento dos RSU, obtida de dados reportados na literatura de diversos pesquisadores (Figura 2.24). Nesta figura é mostrado também as envoltórias de resistência propostas por Kavazanjian et al. (1995), Manassero et al. (1996) e Jones et al. (1997)

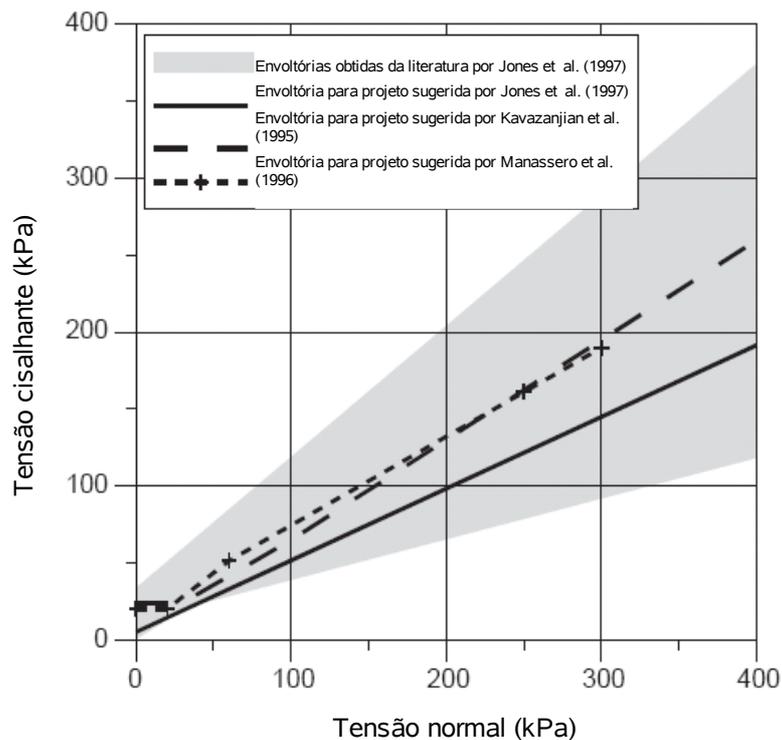


Figura 2.24. Faixa de envoltórias de resistência obtida por diversos pesquisadores. Envoltórias de resistência propostas para projetos (DIXON & JONES, 2005).

Kavazanjian et al. (1995) propõem o uso de uma envoltória bi-linear, onde consideram que para tensões normais abaixo de 30 kPa o RSU é puramente coesivo ( $c = 24$  kPa) e para tensões acima deste valor, o material é não coesivo com ângulo de atrito de  $30^\circ$ . Na proposta de Manassero et al. (1996), considera-se a aplicação de uma envoltória de ruptura com três partes:  $c = 20$  kPa para  $0 < \sigma_v < 20$  kPa;  $c = 0$  e  $\phi \approx 38^\circ$  para  $20 < \sigma_v < 60$  kPa;  $c$

$\geq 20$  kPa e  $\Phi \approx 30^\circ$  para  $\sigma_v \geq 60$  kPa. Jones et al. (1997) são mais conservadores e sugerem para projetos a utilização de uma envoltória linear com  $c = 5$  kPa e  $\Phi = 25^\circ$ .

Devido as dificuldade na realização de ensaios de laboratório em RSU, causada pela heterogeneidade deste material, da necessidade de utilização de equipamentos especiais, dentre outros aspectos, alguns pesquisadores buscam estudar o comportamento do RSU através de ensaios realizados em outros tipos de matérias que possuam comportamento similar à do RSU. SIMONINI & RONCH (2004), por exemplo, realizam ensaios de cisalhamento direto utilizando grãos de EPS sobre diferentes condições de drenagem.

Vários autores têm apresentado valores para os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos, obtidos a partir de ensaios de campo, de laboratório e de retro-análise. Os valores apresentados para cada caso variam consideravelmente em virtude das características do material, tipo de ensaio adotado e condições de tensões aplicadas, etc, portanto devendo-se tomar muito cuidado ao se fazer uma análise dos resultados pelos vários métodos através da simples comparação dos valores obtidos.



# Capítulo 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 LOCAL DE ESTUDO

As amostras de resíduo estudadas foram oriundas do Aterro Metropolitano Centro (AMC), localizado na cidade de Salvador-BA, no quilômetro 6,5 da BA-526 (Estrada CIA-Aeroporto). A Figura 3.1 apresenta uma foto aérea com detalhes de localização do local de estudo.



Figura 3.1. Foto aérea com detalhes de localização do Aterro Metropolitano Centro.

Grande parte dos resíduos sólidos urbanos produzidos na cidade de Salvador é levada por caminhões compactadores para uma estação de transbordo localizada no bairro de Canabrava, na área do antigo lixão da cidade. Da estação de transbordo o resíduo é transportado por carretas, com capacidade para grandes volumes, direto para o AMC. No caso de locais mais próximos ao aterro e das cidades vizinhas atendidas pelo AMC, os resíduos são transportados diretamente em caminhões compactadores.

O AMC é o maior aterro sanitário da Bahia e um dos maiores do Brasil em termos de quantidade diária de resíduos recebidos. Ele atende não só a capital baiana como também os municípios de Simões Filho e Lauro de Freitas. O aterro possui uma área de 250 hectares e recebe diariamente cerca de 2500 toneladas de resíduos sólidos urbanos. O AMC foi inaugurado em Outubro de 1997 e sua vida útil estimada é de 20 anos. A empresa que administra o AMC é a Battre - Bahia Transferência e Tratamento de Resíduos S/A, que detém a concessão para o período de operação do aterro, devendo permanecer na área por mais 20 anos para o seu monitoramento após fechamento.

A Figura 3.2 apresenta uma fotografia aérea, com uma visão geral do AMC. Vale lembrar, no entanto, que estas estruturas são muito dinâmicas, mudando suas características e feições num tempo relativamente muito curto.



Figura 3.2. Fotografia aérea do Aterro Metropolitano Centro.

A Battre possui um convênio de cooperação técnica com o laboratório de Geotecnia Ambiental - Geoamb da Universidade Federal da Bahia. O laboratório é responsável pelo monitoramento geotécnico do aterro, bem como pela realização de estudos relacionados à caracterização, resistência e compressibilidade dos resíduos que são depositados no AMC.

### 3.2 COLETA DOS MATERIAIS

Para a realização dos ensaios triaxiais, de compressão confinada e para os demais ensaios de caracterização dos resíduos, foram realizadas quatro campanhas de coleta no Aterro Sanitário Metropolitano Centro de Salvador.

Estas campanhas ocorreram em épocas diferentes devido as dificuldades no armazenamento destes materiais. Foram realizadas três campanhas para coleta de amostras de resíduo novo e uma para a obtenção de amostras de resíduos com 4 anos de aterrado. Na primeira e quarta campanha coletou-se material para a realização dos ensaios de caracterização e para os ensaios de compressão confinada no resíduo novo. A segunda campanha teve como objetivo a obtenção de amostras para a realização dos ensaios de compressão triaxial. Na terceira campanha foram obtidos amostras de resíduos com 4 anos de aterrado. A Tabela 3.1 apresenta um resumo das campanhas de coletas efetuadas e dos ensaios realizados para cada amostragem.

Tabela 3.1 - Amostragens e ensaios realizados.

<b>Amostragem</b>	<b>1<sup>a</sup></b>	<b>2<sup>a</sup></b>	<b>3<sup>a</sup></b>	<b>4<sup>a</sup></b>
Resíduo	Novo	Novo	4 anos	Novo
Data da coleta	Mar/2006	Mai/2006	Jul/2006	Out/2006
Quantidade (kg)	200	150	250	200
Ensaio de caracterização	✓		✓	✓
Umidade natural	✓	✓	✓	✓
Ensaio triaxiais		✓	✓	
Ensaio de compressão confinada	✓			✓

✓ - Ensaio realizado.

As amostragens foram realizadas tendo como base as recomendações da NBR 10007 (ABNT, 2004) e de acordo com a metodologia adotada pelo laboratório de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal da Bahia.

As amostras de resíduo novo foram obtidas de carretas provenientes da estação de transbordo de Canabrava e de caminhões compactadores. Com auxílio de uma retro-escavadeira, foram coletados cerca de 250 l de cada uma das duas carretas e mais 250 l de cada um dos dois caminhões compactadores. Os materiais foram coletados no momento da descarga no aterro sanitário. Todo o resíduo foi colocado sobre uma manta plástica para evitar sua mistura com o solo e para a homogeneização da amostra, Figura 3.3.



Figura 3.3. Manta plástica utilizada para a homogeneização do resíduo e evitar a sua contaminação com solo.

Com a própria retro-escavadeira o material foi homogeneizado e quarteado, acondicionando em tambores a parcela destinada a realização dos ensaios laboratoriais (Figura 3.4). Foram coletadas três amostras para a determinação da umidade natural dos resíduos, sendo que estas foram acondicionadas em sacos plásticos.



Figura 3.4. Coleta, homogeneização, quarteamento e armazenamento do resíduo novo.

Todo o material foi levado para uma estação de apoio, localizada no próprio aterro, para a separação das parcelas destinadas à cada ensaio. Os resíduos destinados à realização dos ensaios de compressão triaxial e de compressão confinada foram pesados e acondicionados em sacos plásticos, assim como as amostras para determinação da umidade natural. A massa necessária para a composição de um corpo de prova, para o ensaio de compressão triaxial, foi dividida e armazenada em quatro sacos plásticos, correspondentes a cada camada de compactação empregada no processo de modelagem do corpo de prova.

Na terceira campanha foi coletado material com aproximadamente quatro anos de aterrado. Neste caso foi necessário a escavação do material, que se encontrava confinado sob uma camada de cobertura de solo de aproximadamente 1 m (Figura 3.5). Novamente o material foi colocado em uma manta plástica para a homogeneização e quarteamento. O

resíduo foi levado para a estação de apoio, onde uma parcela foi separada manualmente para a determinação de sua composição, e outra parcela foi pesada e armazenada em sacos plásticos para a realização dos ensaios de compressão triaxial e de compressão confinada. Excetuando-se a etapa de separação manual, todos os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal da Bahia.



Figura 3.5. Escavação do solo de cobertura para a retirada de material com 4 anos de aterrado.

### 3.2.1 Caracterização física dos resíduos

A caracterização física do resíduo foi realizada por meio da execução de ensaios para a determinação da sua composição gravimétrica, teor de umidade, distribuição granulométrica, massa específica das partículas sólidas, dentre outras.

### 3.2.1.1 Determinação da composição gravimétrica dos resíduos

As composições gravimétricas dos resíduos estudados foram obtidas por meio da separação manual e quantificação, em peso seco, dos componentes presentes, tais como madeira, papel, pedra, materiais têxteis, borracha, plástico, vidro, metal e fração pastosa. O termo fração pastosa foi utilizado para definir a parcela da amostra remanescente da segregação manual, constituída de restos alimentares, podas de jardim, eventuais quantidades de solo de cobertura, componentes em diferentes estágios de degradação e outros não facilmente identificáveis.

Na estação de apoio foi feita a separação dos constituintes do resíduo para a obtenção de sua composição. Aproximadamente 100 kg de cada resíduo foi separado manualmente em cada coleta. A Figura 3.6 apresenta o processo de separação dos constituintes. Posteriormente as frações do resíduo foram pesadas e armazenadas em sacos plásticos e levadas ao laboratório de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal da Bahia.



Figura 3.6. Separação manual dos componentes do resíduo com 4 anos de aterrado.

No laboratório de Geotecnia Ambiental realizou-se a secagem em estufa das diversas frações do resíduo. A temperatura utilizada na estufa foi de 70°C, a fim de evitar a queima de materiais orgânicos.

### ***3.2.1.2 Determinação do teor de umidade natural dos resíduos***

Conforme relatado, para todas as amostras coletadas foi obtido o teor de umidade natural global do resíduo, através da relação entre a massa total de água e a massa total seca. As amostras previamente pesadas no aterro foram levadas para o laboratório da UFBA, onde também foram colocadas na estufa a 70 °C para retirada da umidade. Devido ao mau cheiro emitido pelos resíduos, principalmente pelos resíduos novos, foi usada uma estufa com exaustão forçada, permitindo que os gases fossem expelidos para fora do laboratório. O teor de umidade de cada componente foi obtido da mesma forma que o teor de umidade global.

### ***3.2.1.3 Determinação da distribuição granulométrica dos resíduos***

Após a realização da composição gravimétrica, determinou-se a curva granulométrica do resíduo seco, através da passagem do material por uma série de peneiras pré-selecionadas (com aberturas de malhas de 101mm, 88,9mm, 76,2mm, 44,4mm, 31,7mm, 25,0mm, 11,2mm, 6,3mm, 4,75mm, 2,0mm, 1,4mm, 1,0mm, 0,71mm, 0,355mm, 0,25mm, 0,18mm, 0,125mm, 0,090mm e 0,075mm). Assim, obteve-se a percentagem das partículas que passavam em cada peneira, possibilitando o traçado da curva granulométrica representativa dos diâmetros dos componentes. Salienta-se que para a determinação da

distribuição granulométrica, os materiais fibrosos (têxteis e plásticos moles) não foram incluídos nos ensaios.

#### **3.2.1.4 Determinação dos sólidos totais voláteis (STV)**

Além dos demais testes, foram realizados ensaios para a determinação dos sólidos totais voláteis, cujos resultados servem de suporte na avaliação do potencial de geração de metano do RSU.

A fração pastosa, a qual, conforme definido anteriormente, possui a maior parte da matéria orgânica, foi utilizada para a determinação do teor de sólidos totais voláteis - STV. Inicialmente, essa fração foi triturada para a diminuição de sua textura original. Logo após, pequenas quantidades (10 g) de material triturado foram colocadas em estufa a 70 °C por um hora e depois calcinadas em mufla a 600 °C por duas horas. O valor do STV foi obtido pela relação entre a massa perdida durante a calcinação na mufla (material não inerte) e o material após secagem na estufa (material inerte + não inerte).

#### **3.2.1.5 Determinação do peso específico das partículas sólidas**

O peso específico das partículas sólidas dos resíduos estudados foi obtido através das técnicas utilizadas na mecânica dos solos, tendo como base a NBR 6508 (ABNT, 1984).

O material secado em estufa à 70 °C, destinado à obtenção do teor de umidade natural, foi picado e triturado com auxílio de um pequeno triturador para tornar possível ser inserido no picnômetro. Após a sua trituração, uma pequena quantidade de material de aproximadamente 120 g foi obtida com auxílio de um repartidor de amostras. Para cada

resíduo foram realizados pelo menos três determinações para obtenção do peso específico médio das partículas sólidos presentes nos resíduos.

### **3.3 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE**

Os ensaios de permeabilidades foram realizados aproveitando-se a fase de saturação dos ensaios triaxiais dos tipos CD e CU. Isso só foi possível graças às características do sistema supervisor e dos equipamentos destinados à realização dos ensaios triaxiais. Por meio destes aparatos, foi possível obter a leitura do volume de água percolado através do corpo de prova juntamente com o seu tempo de duração.

A câmara medidora de variação de volume foi conectada às entradas da base do corpo de prova e aplicada uma pressão de 10 kPa. Foi conectada uma mangueira à saída de topo do corpo de prova e deixada aberta para a atmosfera. Dessa forma mantinha-se um gradiente constante de 2,5.

### **3.4 ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA**

Foram realizados dois ensaios de compressão confinada em amostras de resíduo novo, coletados na frente de lançamento do aterro. Um ensaio foi do tipo convencional, com aplicação de estágios de tensões verticais e medidas de deslocamento. No segundo ensaio, foram realizados, além dos estágios de aplicação das tensões verticais, a recirculação do chorume drenado da amostra. As amostras foram nomeadas como: RN – Resíduo novo; RN-R – Resíduo novo submetido a recirculação de chorume.

### 3.4.1 Ensaio convencional

Para estudo da compressibilidade do resíduo sólido urbano em laboratório, foi utilizado um consolidômetro de grandes dimensões, com diâmetro interno de 548 mm e altura de 497 mm. O corpo do consolidômetro é constituído de um tubo de aço carbono galvanizado, cuja seção interna foi revestida com uma chapa de aço inox, soldada e usinada para adquirir uma seção circular. O equipamento possui também uma câmara de pressão para aplicação, através de um pistão, da tensão vertical e saídas de base e pelo topo. O êmbolo do pistão possui dois o'rings para vedar a passagem de ar para o RSU. À medida que o ar comprimido é aplicado na câmara de pressão, o êmbolo reage contra o resíduo, fazendo-o deformar. As deformações são medidas por meio de um relógio comparador posicionado no topo do pistão. A Figura 3.7 apresenta uma vista geral do consolidômetro utilizado.

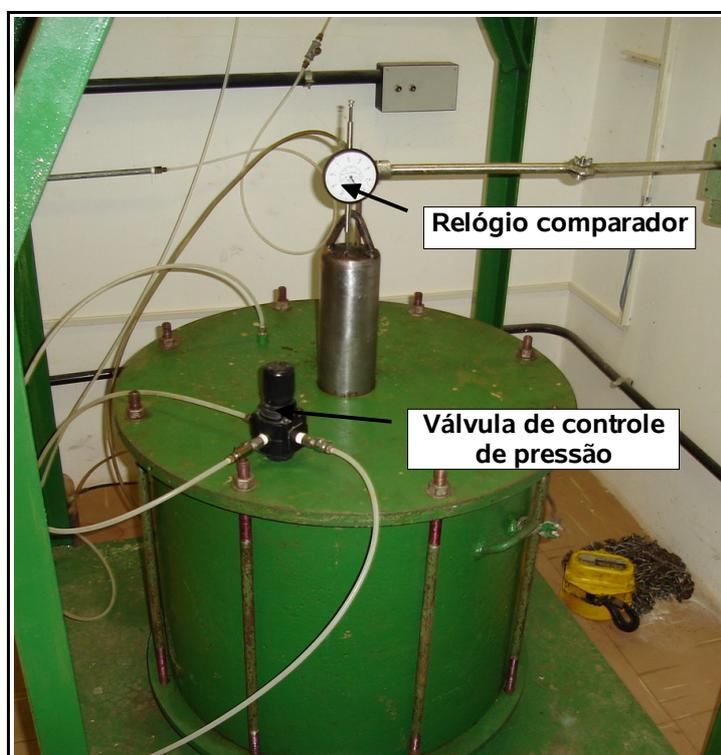


Figura 3.7. Consolidômetro de grandes dimensões utilizado para a realização dos ensaios de compressão confinada em amostras de grande dimensão.

Para facilitar a drenagem e evitar o carreamento de partículas finas, foi colocado na base e no topo do consolidômetro um geocomposto (geotêxtil e geodreno). O resíduo foi colocado manualmente no consolidômetro em 4 camadas e comprimido até atingir o peso específico de  $7 \text{ kN/m}^3$  (Figura 3.8). Em seguida, aplicaram-se vários estágios de pressão vertical na amostra, sempre dobrando o seu valor a cada novo estágio (20, 40, 80, 160, 320 e 640 kPa). As deformações verticais foram medidas por meio de um relógio comparador de 50 mm, com sensibilidade de 0,01mm, posicionado no topo do pistão.



Figura 3.8. Compactação do resíduo para realização do ensaio de compressão confinada.

Cada estágio de carregamento teve em média duração de 25 dias, sendo que alguns estágios foram prolongados por mais tempo para caracterizar adequadamente as compressões secundárias.

### 3.4.2 Ensaio com recirculação de chorume

Para a aplicação da recirculação do chorume no ensaio de compressão confinada foram feitas algumas modificações no consolidômetro. Foram instaladas três entradas na tampa do consolidômetro com mangueiras de polietileno de diâmetro de 3/8", que se estendem pelo espaço vazio entre a tampa e o êmbolo do consolidômetro. As mangueiras se conectam ao êmbolo do consolidômetro permitindo que o chorume seja injetado no topo da amostra. A Figura 3.9 mostra as mudanças realizadas no consolidômetro para a aplicação da recirculação do chorume. Foi utilizado um reservatório para o armazenamento do chorume com capacidade de 1300 ml localizado a um metro da tampa do consolidômetro.

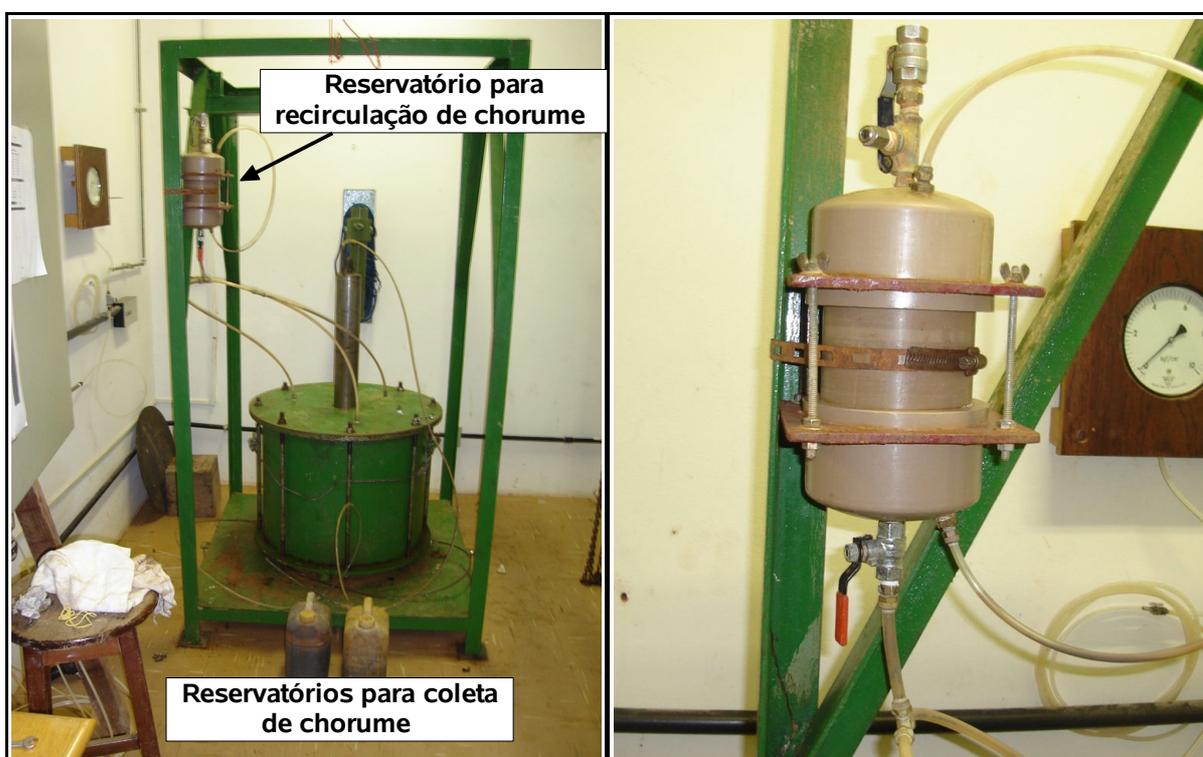


Figura 3.9. Mudanças realizadas no consolidômetro para a realização do ensaio de compressão confinada com recirculação de chorume.

Com a abertura da válvula, o chorume infiltrava a partir do topo da amostra e era coletado nas saídas da base do consolidômetro. Durante cada estágio de carregamento, o

chorume que era drenado era coletado e, posteriormente, era feita a sua recirculação. No reservatório existe uma entrada de ar que possibilitava a aplicação de uma pressão extra para aumentar o gradiente hidráulico na amostra. A partir do 5º estágio, a taxa de percolação do chorume reduziu-se bastante, sendo necessário a aplicação de uma pressão adicional. Para os estágios 5 e 6 foi aplicada uma pressão de ar de 20 kPa, triplicando a carga hidráulica no topo da amostra.

O volume recirculado através da amostra variou de estágio para estágio, sendo que no 1º estágio (20 kPa) não houve recirculação, pois não houve saída de chorume durante o carregamento. Nos três estágios seguintes (40, 80 e 160 kPa) percolou-se uma média diária de 2600 ml, e para os estágios 5 e 6 (320 e 640 kPa, respectivamente) a média diária de chorume percolado foi de 1300 ml. Cabe salientar, no entanto, que os volumes percolados foram relativamente pequenos se comparados ao volume de vazios da amostra, que para o início do 2º estágio, por exemplo, era de 67000 ml, aproximadamente, ou seja, o volume diário percolado de chorume para este estágio representava apenas 3,9 % do volume de vazios da amostra. A Tabela 3.2 apresenta as principais características das amostras submetida aos ensaios de compressão confinada.

Tabela 3.2 - Características das amostras submetidas aos ensaios de compressão confinada.

<b>Amostra</b>	<b>w</b> (%)	<b><math>\gamma_o</math></b> (kN/m <sup>3</sup> )	<b><math>\gamma_d</math></b> (kN/m <sup>3</sup> )	<b><math>\gamma_s</math></b> (kN/m <sup>3</sup> )	<b><math>e_o</math></b>	<b><math>S_{ro}</math></b> (%)
RN	114	7,11	3,37	17,29	4,13	46,4
RN-R	80	7,37	4,05	17,29	3,27	43,3

### 3.5 ENSAIOS TRIAXIAIS

#### 3.5.1 Equipamento utilizado

Para a realização dos ensaios triaxiais em RSU foram utilizados equipamentos especialmente desenvolvidos para a realização de ensaios em amostras de grandes dimensões, juntamente com um sistema de aquisição de dados servo-controlado. O sistema envolve um conjunto de dispositivos desenvolvidos para a realização de ensaios triaxiais e de compressão confinada com controle de tensão e deformação. O equipamento permite a coleta automatizada dos dados obtidos, controle das taxas de imposição de tensões e variação da tensão confinante em função da variação da tensão desviadora, conforme explicitado pela inclinação da trajetória de tensões escolhida (diagrama  $q \times p$  de Cambridge). A Figura 3.10 apresenta fotos do conjunto de equipamentos utilizados para a aquisição de dados e servo controle dos ensaios.



Figura 3.10. Sistema de aquisição de dados e servo controle utilizado para a realização de ensaios triaxiais e de compressão confinada em amostras de grandes dimensões.

O sistema é composto basicamente de uma CPU, uma placa controladora de motores de passo, motores de passo conectados a válvulas controladoras de pressão, válvulas on/off, válvula proporcional e um micro computador.

Foi utilizado um sistema supervisorio desenvolvido no programa ELIPSE Scada. Através do supervisorio é possível acompanhar todas as variáveis do ensaio: tensões aplicadas, variações de volume, deslocamento e duração de cada fase do ensaio. Após cada fase era gerado um arquivo no formato .csv, contendo todas as informações da fase. Isso facilitou bastante a realização dos ensaios, evitando um dispêndio maior de tempo. A Figura 3.11 apresenta uma das telas do programa supervisorio.

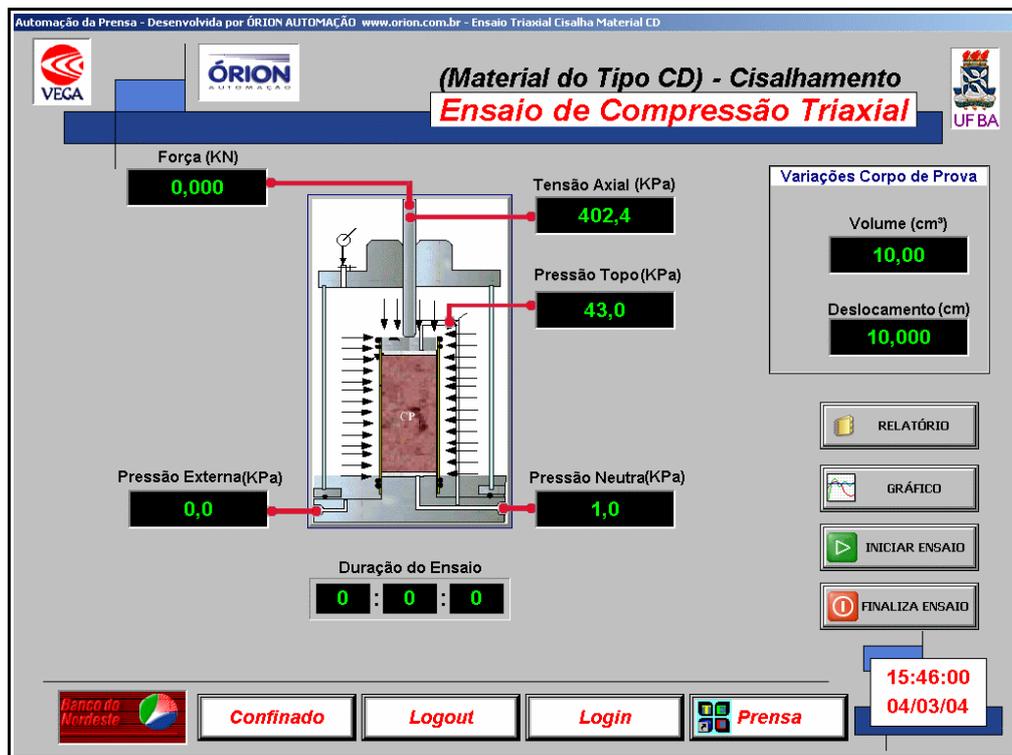


Figura 3.11. Supervisorio: tela da fase de cisalhamento de um ensaio triaxial do tipo CD.

As Figuras 3.12 à 3.14 apresentam os principais equipamentos utilizados para a realização dos ensaios triaxiais nas amostras de RSU. A Figura 3.12 apresenta a câmara triaxial utilizada para a realização dos ensaios. A câmara é composta por um corpo em PVC; tampas inferior e superior em alumínio fundido e uma base também em alumínio; duas entradas que se conectam à base do corpo de prova; uma entrada que se conecta ao

espaço entre o interior do tubo da câmara e o corpo de prova (entrada para aplicação da pressão confinante) e uma entrada que se conecta ao topo do corpo de prova. A base da câmara possui dois tipos de pedestal, um para a realização de ensaios em amostras de 200 mm de diâmetro e outro para amostras de 150 mm.

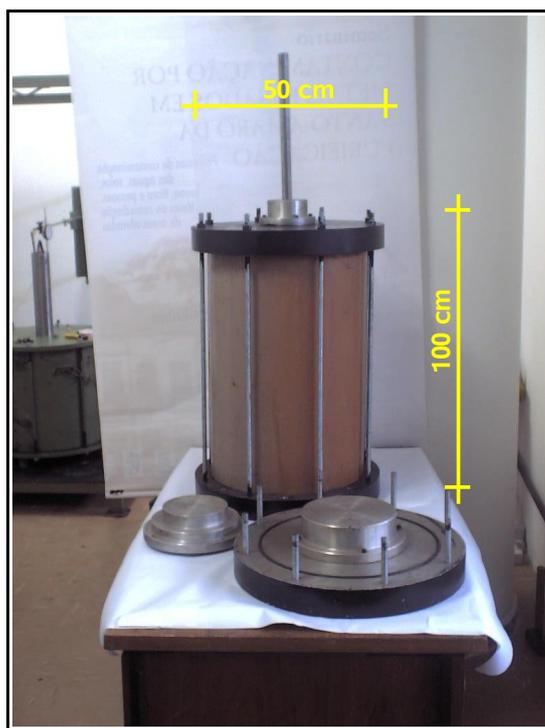


Figura 3.12. Câmara utilizada nos ensaios triaxiais.

A Figura 3.13 apresenta um painel com os outros equipamento utilizados para a realização dos ensaios. Estão apresentados os transdutores de pressão utilizados (fundo de escala de 1000 kPa), as válvulas automáticas on/off, os medidores de volume, a interface ar/água, os cabos que levam a informação medida para a CPU do sistema de aquisição de dados, etc. A Figura 3.14 apresenta a prensa utilizada para a aplicação da tensão desviadora aos corpos de prova. A capacidade da prensa é de 30 toneladas e o controle de deformação é capaz de aplicar taxas de deformação variando em um largo intervalo. Uma célula de carga com capacidade de 10 toneladas foi utilizada para as medidas da tensão desviadora.

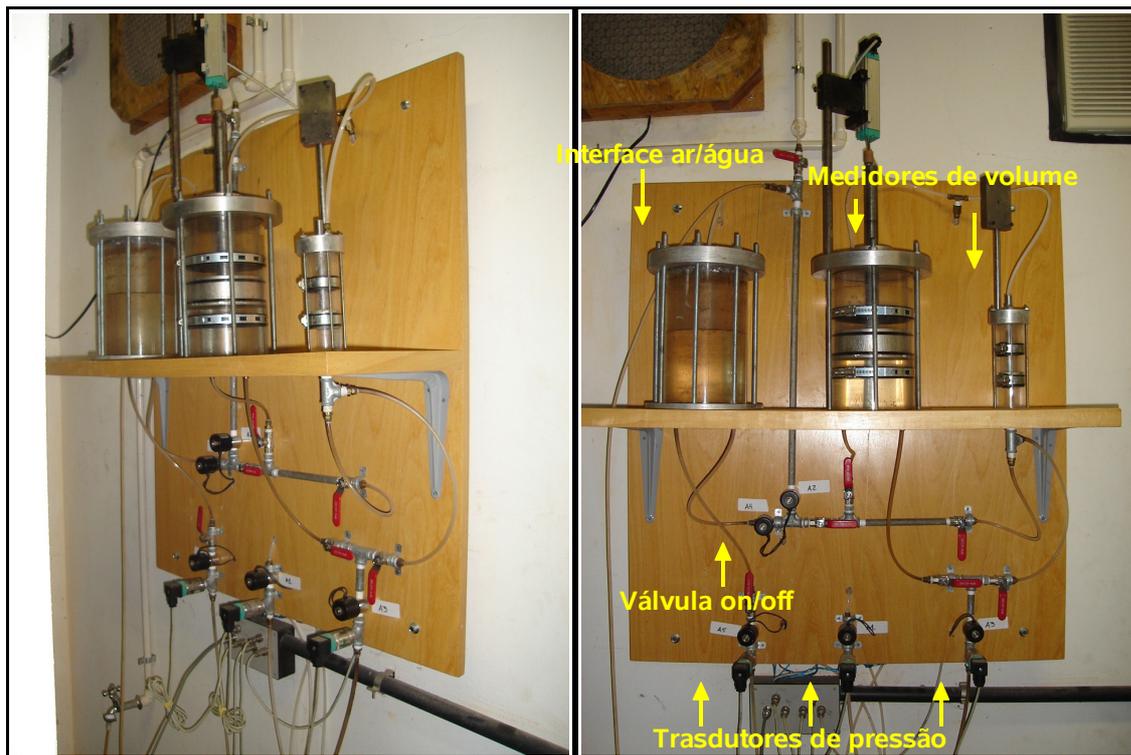


Figura 3.13. Painel de controle utilizado para a realização dos ensaios triaxiais.



Figura 3.14. Prensa EMIC utilizada para aplicação da tensão desviadora ao corpo de prova, a uma taxa de deformação constante.

Por se tratar de um equipamento de grande porte, as deformações volumétricas devidas às variações de pressão no interior da célula triaxial são bastante significativas. Estas deformações volumétricas são o somatório entre as deformações das hastes que prendem a tampa superior ao anel da base, das hastes que prendem a base da célula ao seu corpo e principalmente pela deformação do tubo de pvc.

Para a realização da calibração da célula triaxial foi utilizada a câmara medidora de variação de volume. Inicialmente fez-se o completo enchimento da célula triaxial com água; posteriormente conectou-se a saída da câmara medidora de variação de volume a entrada da célula correspondente à de aplicação da pressão confinante; a célula então foi submetida a estágios de carregamento efetuando-se os respectivos valores de volume.

As deformações da câmara medidora de variação de volume e suas respectivas conexões foram supostas desprezíveis em relação as deformações volumétricas que os corpos de prova foram submetidos durante os ensaios. Na Figura 3.15 é apresentado o resultado da calibração da célula triaxial. É possível verificar uma grande variação de volume da célula quando a mesma é submetida a grandes pressões. A relação encontrada entre a variação de volume e o acréscimo de pressão foi de  $1,07 \text{ cm}^3/\text{kPa}$ .

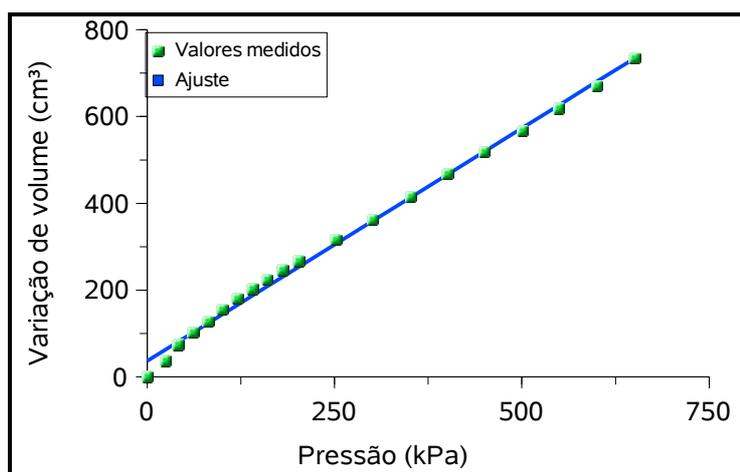


Figura 3.15. Curva de calibração da célula de compressão triaxial.

É importante observar que as medidas de variação de volume das amostras foram realizadas através das medidas dos volumes de água que entravam ou saíam dos corpos de

prova, ou seja, a câmara medidora de variação de volume era conectada na saída da base ou na saída do topo das amostras. Este método eliminava a influência da variação de volume da célula triaxial nas medidas de variação de volume dos corpos de prova. Este procedimento de medida das variações de volume, através do fluxo de água do interior dos corpos de prova, só é possível quando se tem uma completa saturação dos mesmos. No caso dos resíduos, que apresentam elevadas porosidades e elevadas permeabilidades, este método pôde ser usado sem grandes comprometimentos com relação às medidas.

### 3.5.2 Execução dos ensaios

Na Tabela 3.3 são apresentados os ensaios executados em resíduos novos e com 4 anos de aterramento. São mostradas as principais características das amostras e dos ensaios executados.

Tabela 3.3 - Principais características das amostras e dos ensaios realizados.

Resíduo	Amostra	Tipo de ensaio	$\gamma_c$ (kN/m <sup>3</sup> )	Teor de umidade no cisalhamento
Novo	NovoCD10sat	CD	10	Saturada
	NovoCD10nat	CD	10	Natural
	NovoCU10sat	CU	10	Saturada
	NovoCD8sat	CD	8	Saturada
	NovoCD12MBSat*	CD	12	Saturada
4 anos de aterramento	4anosCD10sat	CD	10	Saturada
	4anosCU10sat	CU	10	Saturada
	4anosCD14sat	CD	14	Saturada

\*Ensaio realizado na matriz básica do resíduo novo.

### 3.5.2.1 Ensaio CD e CU nos RSU

Para avaliação da resistência ao cisalhamento do resíduo, foram realizados ensaios triaxiais convencionais (tensão confinante constante), do tipo consolidado drenado (CD) e do tipo consolidado não-drenado (CU) em amostras deformadas de RSU novo (coletadas na frente de lançamento do aterro) e em resíduos com 4 anos de aterramento. Foram ensaiados corpos de prova com cerca de 200 mm de diâmetro e 400 mm de altura (posteriormente reduzido para 350 mm), com peso específico de 10 kN/m<sup>3</sup> e 8 kN/m<sup>3</sup>, compactados pelo processo estático, em quatro camadas, na própria base da célula triaxial. Durante o processo de compactação observou-se a saída de líquidos pelas fendas do molde, resultando numa perda de massa, não quantificada, que levava a uma redução do peso específico final. As dimensões finais dos corpos de prova também variaram em torno dos valores previstos. Devido à expansão da amostra quando da retirada do molde, normalmente os valores das dimensões dos corpos de prova se encontraram acima dos valores pré-determinados. O processo de compactação das amostras de RSU é ilustrado na Figura 3.16.



Figura 3.16. Procedimento de compactação estática empregado na moldagem dos corpos de prova.

Após a compactação, o molde foi removido e o corpo de prova foi revestido por uma grade de geotêxtil para proteger a membrana de látex de possíveis materiais pontiagudos. Em seguida, o corpo de prova foi revestido pela membrana de látex. A Figura 3.17 ilustra uma amostra de RSU logo após a retirada do molde de compactação e o aspecto do corpo de prova revestido com a tela de geotêxtil e logo depois com a membrana de látex.

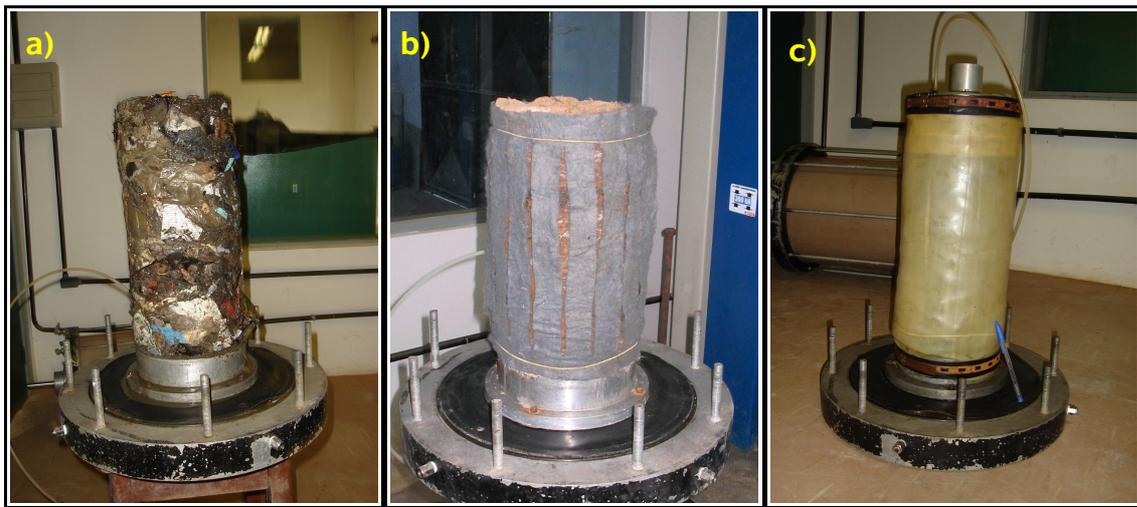


Figura 3.17. Aspecto do corpo de prova logo após a retirada do molde de compactação (a); Corpo de prova com a grade de geotêxtil (b); Com a membrana de látex (c).

Inicialmente, a câmara era preenchida com água, tomando-se o cuidado de retirar todo o ar presente em seu interior. Nos ensaios realizados em corpos de prova saturados, a saturação foi realizada com auxílio da câmara medidora de volume, sendo possível acompanhar os volumes percolados através dos corpos de prova. Para se evitar grandes deformações volumétricas durante a fase de saturação por fluxo, foi aplicada uma pressão confinante de 20 kPa e uma pressão de 10 kPa na base dos corpos de prova, ficando a saída do topo aberta para atmosfera, isso resultava em uma pressão efetiva média de 15 kPa.

Na etapa seguinte, os corpos de prova foram submetidos à saturação por aplicação de contra pressão, onde fizeram-se as medidas do parâmetro B de Skempton. Nesta fase, manteve-se sempre uma diferença de pressão de 10 kPa entre a pressão de confinamento e

a pressão de água no interior dos corpos de prova. Obtiveram-se valores de  $B$  acima de 0,90 para todos os corpos de prova ensaiados.

Mesmo adotando baixas diferenças entre as pressões de confinamento e as pressões do interior do corpo de prova para as etapas iniciais do ensaio, os corpos de prova apresentaram redução de volume significativa. Estas deformações foram acompanhadas por meio do deslocamento do pistão de aplicação da tensão desviadora, que era constantemente monitorado para garantir o seu contato com o cabeçote do topo da amostra. Desta forma, considerando que as deformações foram do tipo isotrópicas, foi possível corrigir as dimensões dos corpos de prova após as fases de saturação e de saturação por contra pressão. A deformação diametral da amostra foi considerada igual a sua deformação axial.

Os corpos de prova de RSU foram consolidados com pressões de confinamento efetiva de 50, 100 e 200 kPa e em seguida submetidos a ruptura com velocidade de cisalhamento de 0,8 mm/min. Esta velocidade foi obtida com auxílio da Equação (3.1), de acordo com Head (1986). Os valores de  $t_{100}$ , que corresponde ao tempo necessário para o completo adensamento primário, foram obtidos das curvas de adensamento na fase de consolidação dos ensaios triaxiais.

A Figura 3.18 apresenta duas curvas de adensamento obtidas da fase de consolidação durante os ensaios triaxiais. São mostradas as curvas de adensamento dos ensaios realizados em resíduo novo com 50 kPa de tensão confinante e em resíduo com 4 anos de aterramento com uma tensão de confinamento de 100 kPa. Os valores de  $t_{100}$  obtidos para ambos os resíduos foram muito próximos, adotando-se, dessa forma, a mesma velocidade de cisalhamento para os dois resíduos. Por questão de segurança, a velocidade de cisalhamento adotado foi um pouco menor que o valor calculado por meio da Equação (3.1).

$$v = \frac{\epsilon_a \cdot h}{\psi \cdot t_{100}} \quad (3.1)$$

Onde:  $\psi = 14$  para ensaio CD em amostras com drenos nas extremidades e na lateral; 8,5 para ensaios CD com drenos apenas nas extremidades; 1,8 para ensaios CU com drenos nas extremidades e na lateral.

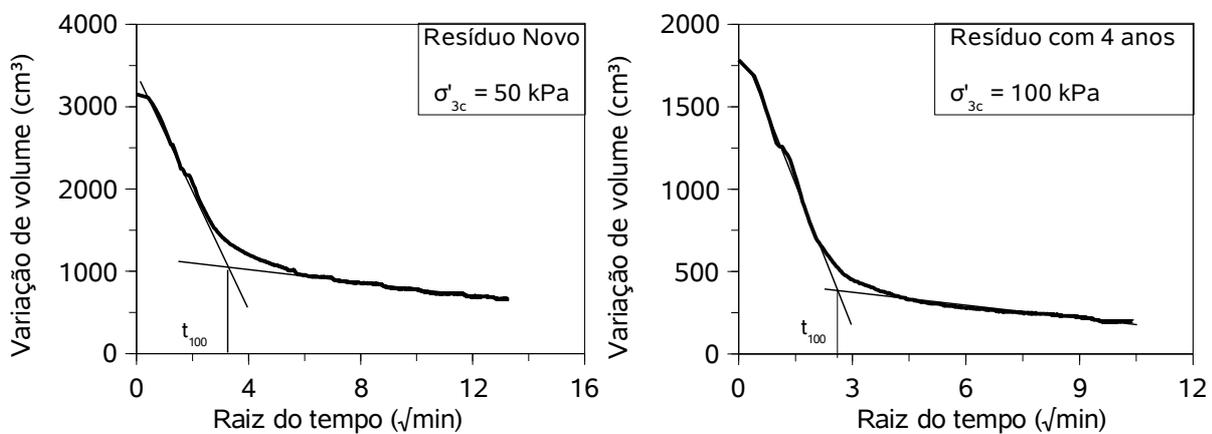


Figura 3.18. Curvas de adensamento obtidas da fase de consolidação do ensaio triaxial, realizados em amostras de resíduo novo e com 4 anos de aterrado.

O valor da velocidade de cisalhamento utilizado foi superior ao valor adotado por Carvalho (1999), que foi de 0,7 mm/min. Nos ensaios CU, a velocidade de cisalhamento foi de 1,5 mm/min, que é bem inferior ao valor obtido utilizando o procedimento de Head (1986) para ensaios não drenados.

Nos ensaios saturados, as variações de volume dos corpos de prova foram medidas através da saída ou entrada de água do interior da amostra, já nos ensaios em amostras com umidade natural (amostra NovoCD10nat), as variações de volume foram medidas por meio da entrada ou saída da água do interior da câmara, ou seja, a câmara medidora de variação de volume foi conectada à entrada de aplicação da pressão confinante.

Cabe ressaltar que alguns problemas ocorreram durante a execução dos ensaios, como perfurações nas membranas de látex e entortamento do corpo de prova durante a

aplicação da tensão desviadora na fase de cisalhamento, levando a perda de alguns ensaios. A Figura 3.19 mostra alguns aspectos dos corpos de prova após a aplicação da tensão desviadora. Nesta figura é possível observar a forma do corpo de prova de um ensaio mal sucedido devido ao seu entortamento. A solução adotada para resolver o problema do entornamento foi a redução na altura dos corpos de prova de 400 mm para 350 mm, conforme relatado anteriormente.

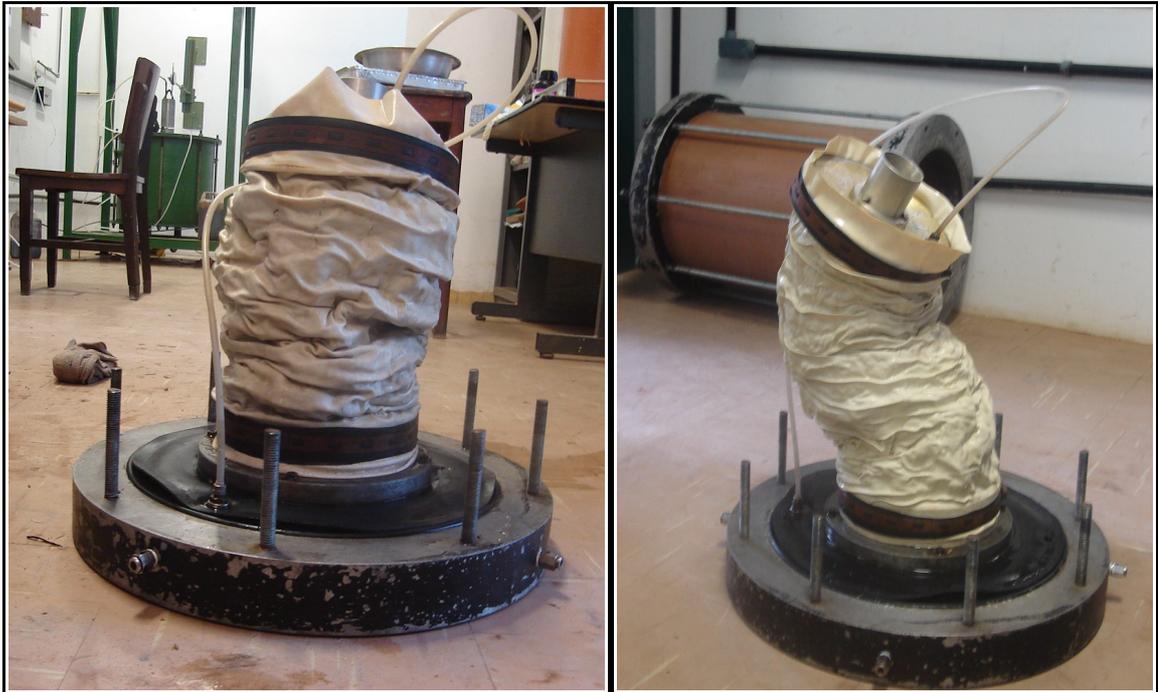


Figura 3.19. Aspecto dos corpos de prova após a aplicação da tensão desviadora.

A Tabela 3.4 apresenta as principais características dos corpos de prova submetidos aos ensaios de compressão triaxial. Os valores dos índices de vazios e graus de saturação para os corpos de prova do resíduo novo foram calculados adotando-se o valor do peso específico das partículas sólidas de  $17,3 \text{ kN/m}^3$ . Para o resíduo com quatro anos de aterrado, o valor do peso específico das partículas sólidas foi de  $20,3 \text{ kN/m}^3$ .

Tabela 3.4 - Características iniciais dos corpos de prova submetidos aos ensaios de compressão triaxial.

Amostra	Ensaio	$\sigma'_{3c}$ (kPa)	D (mm)	h (mm)	w <sub>o</sub> (%)	$\gamma_o$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e <sub>o</sub>	Sr <sub>o</sub> (%)
NovoCD10sat	1	50	214	378	84,11	8,08	4,39	2,94	49,51
	2	100	219	393	84,11	7,44	4,04	3,28	44,32
	3	200	214	365	84,11	8,35	4,54	2,81	51,75
NovoCD8sat	1	50	214	418	135,17	6,72	2,86	5,05	46,27
	2	100	214	409	135,17	6,81	2,90	4,97	47,03
	3	200	217	408	135,17	6,63	2,82	5,13	45,57
NovoCD10nat	1	50	215	424	135,17	8,16	3,47	3,99	58,64
	2	100	208	427	135,17	8,63	3,67	3,71	62,99
	3	200	212	431	135,17	8,25	3,51	3,93	59,52
NovoCU10sat	1	50	212	417	135,17	8,57	3,64	3,75	62,37
	2	100	209	424	135,17	8,67	3,69	3,69	63,34
	3	150	213	429	135,17	8,21	3,49	3,95	59,10
4anosCD10sat	1	50	214	310	53,15	7,46	4,87	3,56	33,14
	2	100	211	318	53,15	8,00	5,22	3,26	36,28
	3	200	214	310	53,15	7,99	5,22	3,26	35,25
4anosCD14sat	1	50	213	416	63,38	10,42	6,38	2,19	58,91
	2	100	210	401	63,38	11,09	6,79	2,00	64,53
	3	200	213	402	63,38	10,71	6,55	2,10	61,29
4anosCU10sat	1	50	212	429	63,38	8,30	5,08	3,00	42,93
	2	100	211	430	63,38	8,39	5,13	2,96	43,52
	3	200	215	419	63,38	7,24	4,43	3,59	35,93

### 3.5.2.2 Ensaio CD na matriz básica do RSU novo

O efeito dos materiais fibrosos no RSU pôde ser apreciado através da realização de ensaios triaxiais na matriz básica do RSU (resíduo sem o material fibroso). Foram realizados ensaios triaxiais do tipo CD em amostras saturadas da matriz básica do resíduo novo. A metodologia utilizada para a realização dos ensaios na matriz básica foi a mesma aplicada aos ensaios com os resíduos compostos, porém foram utilizadas amostras de menor dimensão e em uma célula triaxial convencional (Figura 3.20). Foram ensaiados corpos de provas com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, submetidos à tensões confinantes de

50, 100 e 200 Kpa, compactados estaticamente, com auxílio da prensa eletromecânica, em quatro camadas e com peso específico de  $12 \text{ kN/m}^3$ . Para efeito de comparação, o ideal seria a realização de ensaios em amostras com  $10 \text{ kN/m}^3$  (peso específico utilizado nos ensaios com amostras compostas de RSU novo), porém as amostras moldadas com esse peso específico não se mantinham íntegras após a retirada do molde. A umidade de compactação das amostras foi 185%, que foi a umidade natural encontrada para o material. Esta elevada umidade é justificada pela alta quantidade de matéria orgânica presente na matriz básica do resíduo.



Figura 3.20. Câmara triaxial utilizada nos ensaios na matriz básica do RSU novo.

A matriz básica era composta basicamente por restos alimentares, solo, metais, vidro, madeira e etc, e foi obtida a partir da retirada manual dos materiais fibrosos, tais como, plásticos (na sua grande maioria), têxteis e borrachas. Partículas com dimensões maiores que 20 mm também foram retiradas.

A Figura 3.21 mostra um corpo de prova da matriz básica do RSU novo após a compactação, com a membrana de látex e após o seu cisalhamento. As amostras foram

rompidas com uma velocidades de cisalhamento de 0,4 mm/min, obtida a partir da Equação (3.1). Nestes ensaios não houve a necessidade de utilização da tela de geotêxtil, pois os materiais pontiagudos, que poderiam danificar a membrana, também foram retirados na etapa de separação.

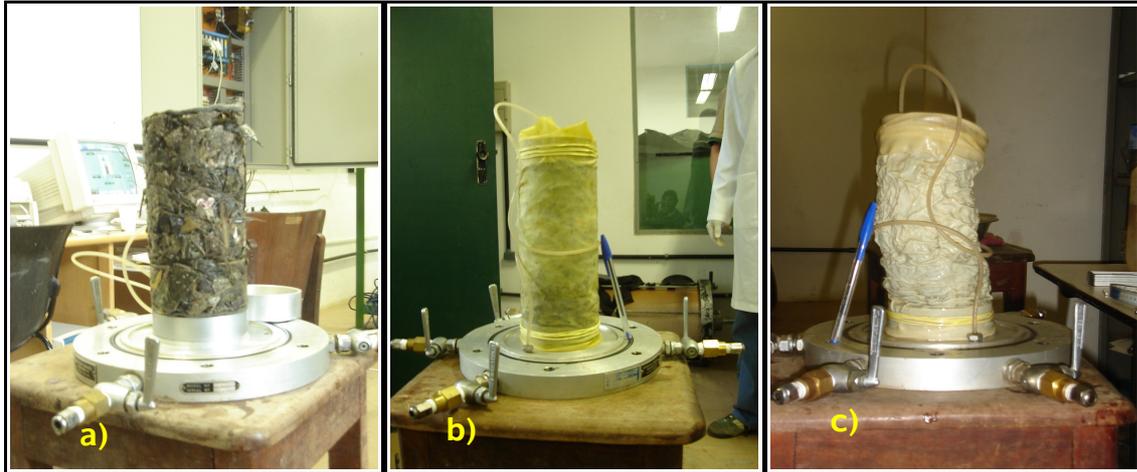


Figura 3.21. Amostra da matriz básica de RSU novo após a compactação a); Amostra revestida com a membrana de látex b); Amostra após o cisalhamento.

A Tabela 3.5 apresenta as principais características dos corpos de prova da matriz básica de resíduo novo submetidos aos ensaios de compressão triaxial. Os valores dos índices de vazios e graus de saturação dos corpos de prova foram calculados adotando-se o valor do peso específico das partículas sólidas de 17,7 kN/m<sup>3</sup>.

Tabela 3.5 - Características iniciais dos corpos de prova da matriz básica de resíduo novo submetidos aos ensaios de compressão triaxial.

Amostra	Ensaio	$\sigma'_{3c}$ (kPa)	$D$ (mm)	$h$ (mm)	$w_o$ (%)	$\gamma_o$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_o$	$S_{ro}$ (%)
NovoCD12MBsat	1	50	102	206	185,06	10,89	3,54	3,98	91,85
	2	100	102	204	185,06	11,04	3,67	3,82	93,04
	3	200	103	214	185,06	10,46	3,67	3,81	85,68

## Capítulo 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS RESÍDUOS

A Tabela 4.1 mostra o valor médio do teor de umidade gravimétrico de cada componente presente nas amostras dos resíduos coletados. Observa-se desta tabela uma grande variabilidade no teor de umidade de cada componente.

Tabela 4.1 - Teor de umidade de cada componente das amostras de resíduos coletados.

Componentes	w (%)*		
	RSU novo		RSU com 4 anos de aterrado
	Mar/2006	Out/2006	Jul/2006
Madeira	60,05	114,31	115,80
Pedra/cerâmica	11,99	12,34	15,36
Têxteis	98,79	181,81	138,48
Borracha	16,86	19,18	41,26
Plástico	77,24	42,97	52,22
Vidro	0,55	1,97	2,00
Metal	33,05	34,57	21,24
Papel/papelão	125,96	127,15	166,78
Fração pastosa	144,53	96,96	72,37

\*w (%) =  $(M_w / M_s) \times 100$ ,  $M_w$  = massa de água;  $M_s$  = massa de material seco.

Para as amostras de resíduo novo, verifica-se que os componentes vidro, pedra cerâmica, borracha, e metal são aqueles que apresentaram menores valores de teor de umidade, pois são os componentes que apresentam menor capacidade de absorção de

água. Já os componentes fração pastosa, papel/papelão, madeira e os têxteis apresentaram os teores de umidade mais elevados, em virtude de suas maiores capacidades de retenção. Os componentes do resíduo com quatro anos de aterrado também mostraram este comportamento.

Comparando os teores de umidade das amostras de resíduo novo coletadas em épocas diferentes, observa-se uma significativa variação nos resultados obtidos. Os componentes com menor capacidade de absorção de água não apresentaram grandes diferenças entre as duas amostras, porém os componentes com maior capacidade de absorção apresentaram diferenças significativas nos teores de umidade, como por exemplo os têxteis, que para a amostra coletada em Março de 2006 apresentou teor de umidade de 98,79 % e para a amostra coletada em Outubro de 2006 seu valor foi de 181,81 %.

A Figura 4.1 apresenta o teor umidade natural global para as amostras de resíduo novo e com quatro anos de aterrado.

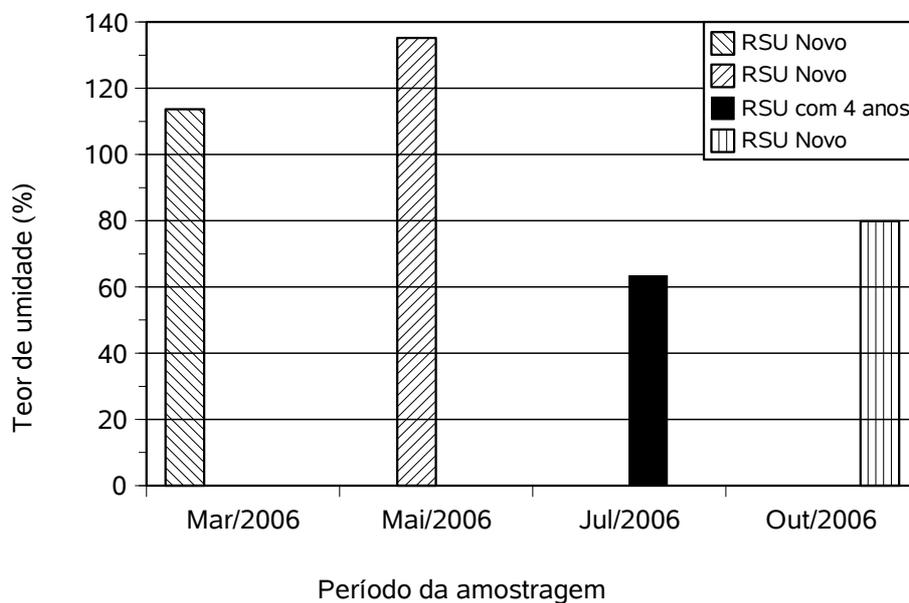


Figura 4.1. Teor de umidade global das amostras de resíduo novo e com quatro anos de aterrado.

Com relação ao resíduo novo, é importante ressaltar que o teor de umidade com que os resíduos chegam ao aterro dependem da composição inicial de seus componentes e das condições climáticas locais, principalmente nos períodos da coleta. Após a sua disposição, o

teor de umidade passará a depender também do processo de operação dos aterros, da taxa de decomposição biológica, da capacidade e funcionamento dos sistemas de coleta de líquidos percolados e do sistema de *liner* de recobrimento, etc (MACHADO et al, 2004).

Segundo Knochenmus et al (1998), o teor de umidade do RSU é basicamente o resultado de altas porcentagens de lixo orgânico (resíduos alimentares, de jardim e poda). Os componentes inorgânicos, tais como os produtos plásticos, vidros, metais e etc, geralmente têm um teor de umidade abaixo de 10%. Assim, o teor de umidade tende a aumentar com o aumento do conteúdo orgânico do material. Esse comportamento também foi observado por Landva e Clark (1990) para resíduos do Canadá. Cabe ressaltar que nas amostras estudadas obtiveram-se para a fração plástico teores de umidade bem superiores às indicações de Knochenmus et al (1998). Esse alto valor no teor de umidade dos componentes plásticos pode ser explicado pela presença de outros materiais aderidos à eles, como por exemplo matéria orgânica, e que não foram possíveis de serem retirados durante a fase de separação dos constituintes.

Na Tabela 4.2 apresenta-se a composição física obtida para os resíduos coletados na área do Aterro Metropolitano Centro. Observa-se que com o tempo ocorreu uma redução no percentual de papel/papelão enquanto que o plástico sofreu um aumento no seu percentual. Supondo que as duas amostras tivessem originalmente a mesma composição, pode-se afirmar que parcelas significativas de papel/papelão são incorporadas à fração pastosa à medida que o processo de degradação evolui. No entanto, é importante destacar a redução na porcentagem da fração pastosa, diferentemente dos resultados encontrados por Machado et al. (2005) para resíduos do mesmo aterro sanitário e com as mesmas idades. Os autores comentam que, apesar de haver uma incorporação de outros componentes à parcela da fração pastosa, aumentando assim sua porcentagem com relação à massa total do resíduo, parte do solo de cobertura do aterro pode ter sido incorporado ao material durante a fase de operação. Segundo os autores, isso pode ter contribuído para o aumento da porcentagem da fração pastosa do resíduo de mais idade. Contudo, chamam a atenção

para a redução do percentual da matéria orgânica biodegradável presente nesta fração, que também foi verificada nos resíduos estudados.

Para quantificar a porcentagem de matéria orgânica biodegradável presente na fração pastosa dos resíduos e sua variação com o tempo, foram realizados, para cada amostra, diversos ensaios de quantificação dos sólidos totais voláteis (STV). Obtiveram-se valores de STV médio de 23,2 % para o resíduo com 4 anos de aterramento, e de cerca de 56,8 % para o resíduo novo. Os resultados de STV obtidos estão de acordo com dados encontrados por Machado et al. (2005) para os resíduos do mesmo aterro e com as mesmas idades.

Tabela 4.2 - Composição física dos resíduos estudados.

Componentes	Porcentagem de ocorrência (%)		
	RSU novo		RSU com 4 anos de aterrado
	Mar/2006	Out/2006	Jul/2006
Madeira	4,22	3,85	12,64
Pedra / cerâmica	9,64	12,55	5,78
Têxteis	0,95	9,46	3,30
Borracha	0,03	0,11	0,99
Plástico	16,47	17,08	34,25
Vidro	5,23	1,21	3,55
Metal	1,36	0,83	2,55
Papel / papelão	15,60	10,68	5,50
Fração pastosa	42,31	44,23	31,45
Sólidos totais voláteis STV (%)	56,81	54,86	23,21
Matéria orgânica presente na fração pastosa (%)	24,04	24,28	7,30

Na Figura 4.2 são mostradas as curvas granulométricas dos resíduos estudados, obtidas pela passagem do material seco à temperatura de 70°C, através de uma série de peneiras pré-selecionadas, onde também está apresentado a faixa de ocorrência indicada por Jessberger (1994). Salienta-se que para o traçado destas curvas, o material fibroso (têxteis e plásticos moles) não foi incluído.

É possível observar uma pequena diferença na granulometria entre as duas amostras de resíduo novo estudadas, porém ambas se apresentaram dentro da faixa sugerida por Jessberger (1994). Essa diferença é justificada pela heterogeneidade intrínseca do material.

Nesta figura pode ser observado ainda uma diminuição da textura do resíduo com a sua idade.

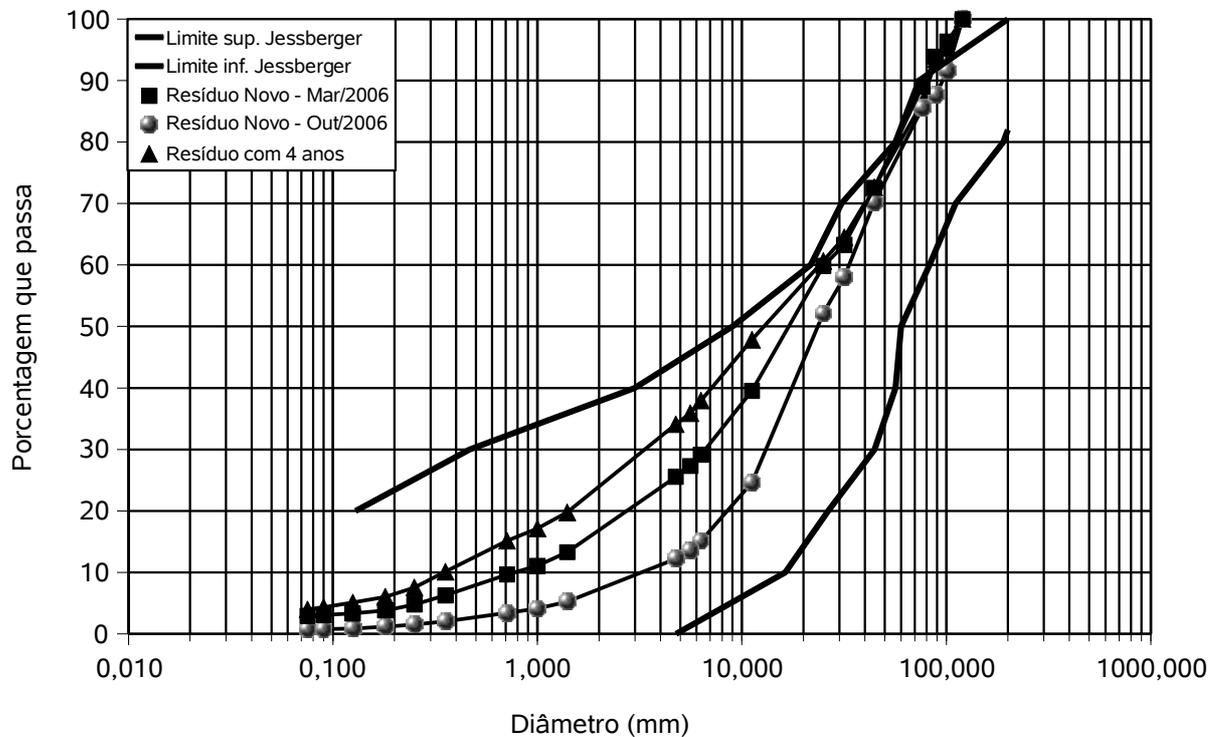


Figura 4.2. Curvas granulométricas obtidas para o resíduo novo e com 4 anos de aterrado.

O peso específico das partículas sólidas dos resíduos estudados foi obtido através das técnicas utilizadas na mecânica dos solos. Os pesos específicos das partículas sólidas para o resíduo novo e para o resíduo com 4 anos de aterrado são apresentados na Tabela 4.3. É apresentado também o valor encontrado para a matriz básica do resíduo novo.

Tabela 4.3 - Peso específico das partículas sólidas dos resíduos coletados.

Resíduo	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )
Novo - Mar/2006	17,3
Novo - Out/2006	17,2
Novo - Matriz Básica	17,6
4 anos de aterrado	20,3

## 4.2 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

As Figuras 4.3 à 4.6 apresentam os dados dos ensaios de percolação ao longo do tempo sob carga constante, fornecidos durante a fase de saturação dos corpos de prova, no decorrer da realização dos ensaios triaxiais na célula de grandes dimensões. Foram realizados ensaios em amostras de resíduo novo com 8 e 10 kN/m<sup>3</sup> de peso específico e em amostras de resíduo com 4 anos de aterrado com 10 e 14 kN/m<sup>3</sup> de peso específico, todos compactados na umidade natural.

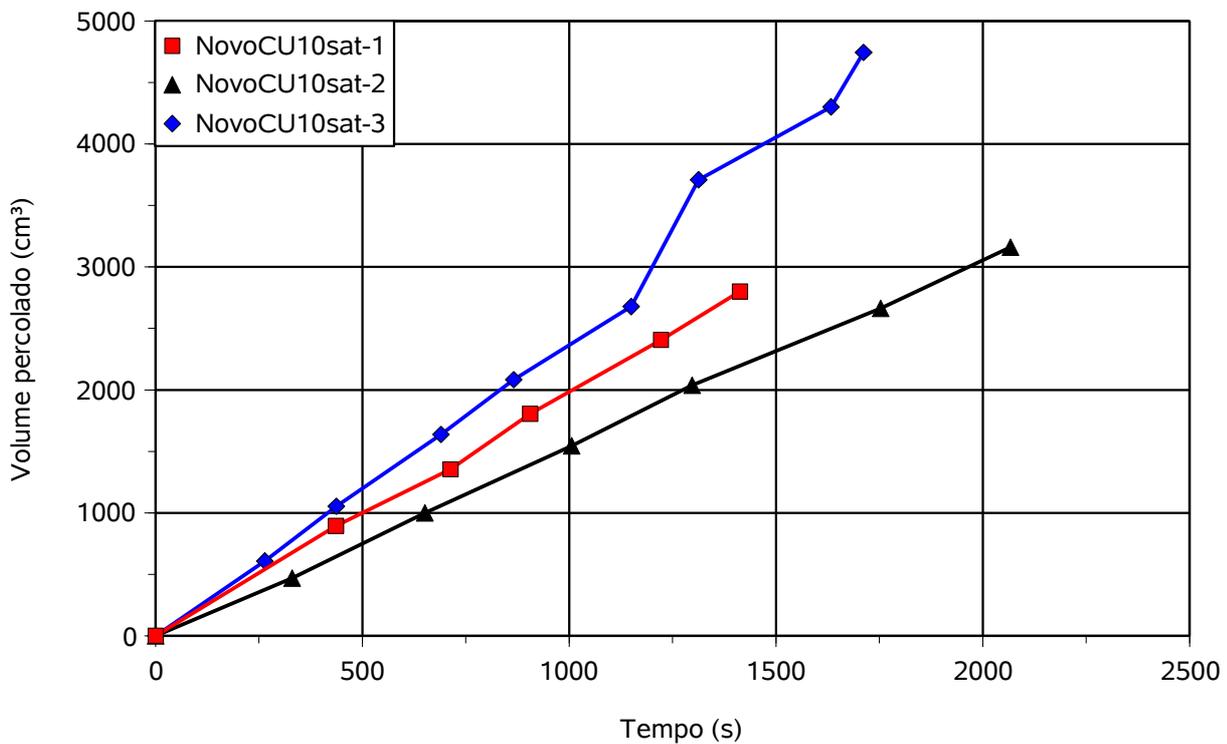


Figura 4.3. Volume percolado ao longo do tempo sob carga constante. RSU novo com peso específico de 10 kN/m<sup>3</sup>.

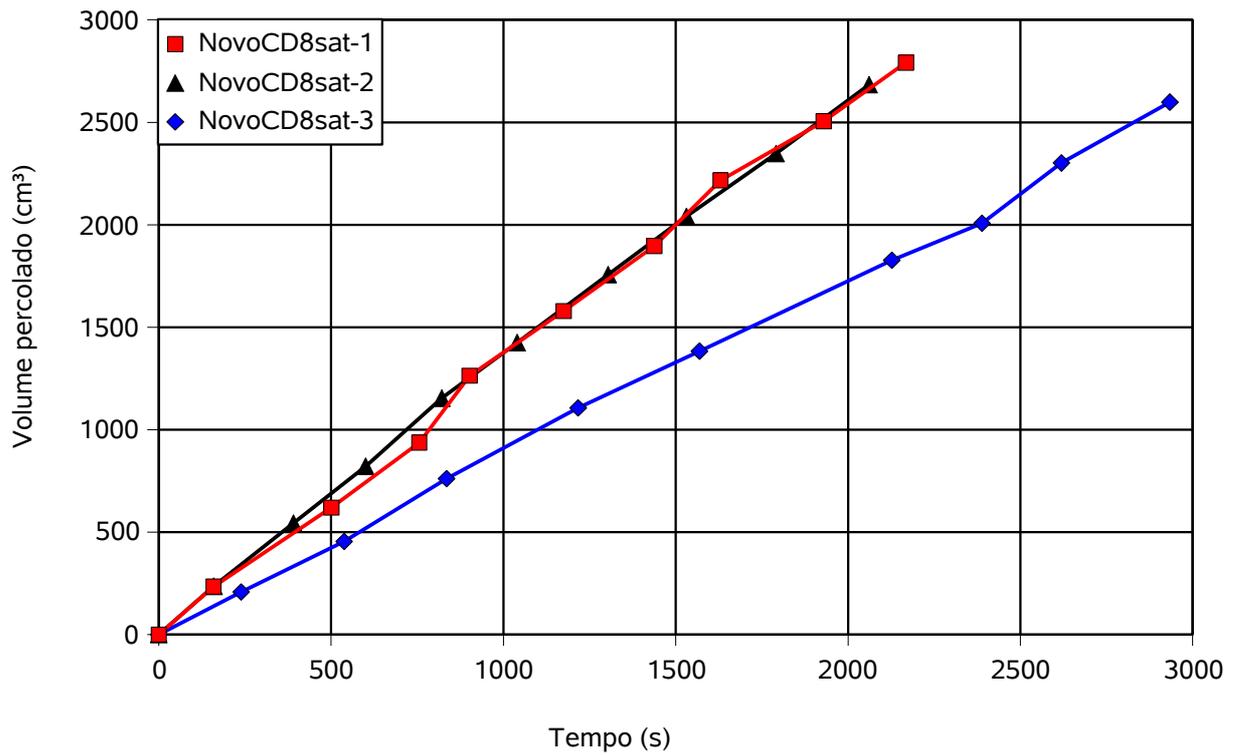


Figura 4.4. Volume percolado ao longo do tempo sob carga constante. RSU novo com peso específico de 8 kN/m<sup>3</sup>.

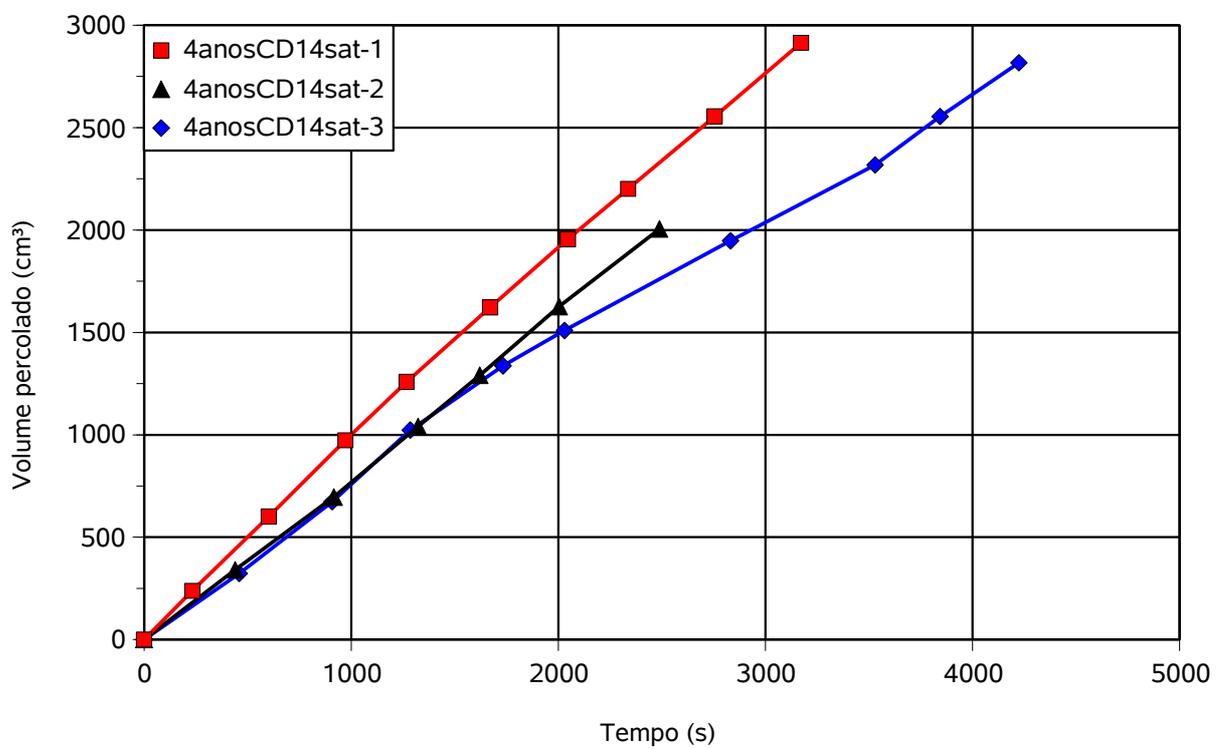


Figura 4.5. Volume percolado ao longo do tempo sob carga constante. RSU com 4 anos de aterrado e peso específico de 14 kN/m<sup>3</sup>.

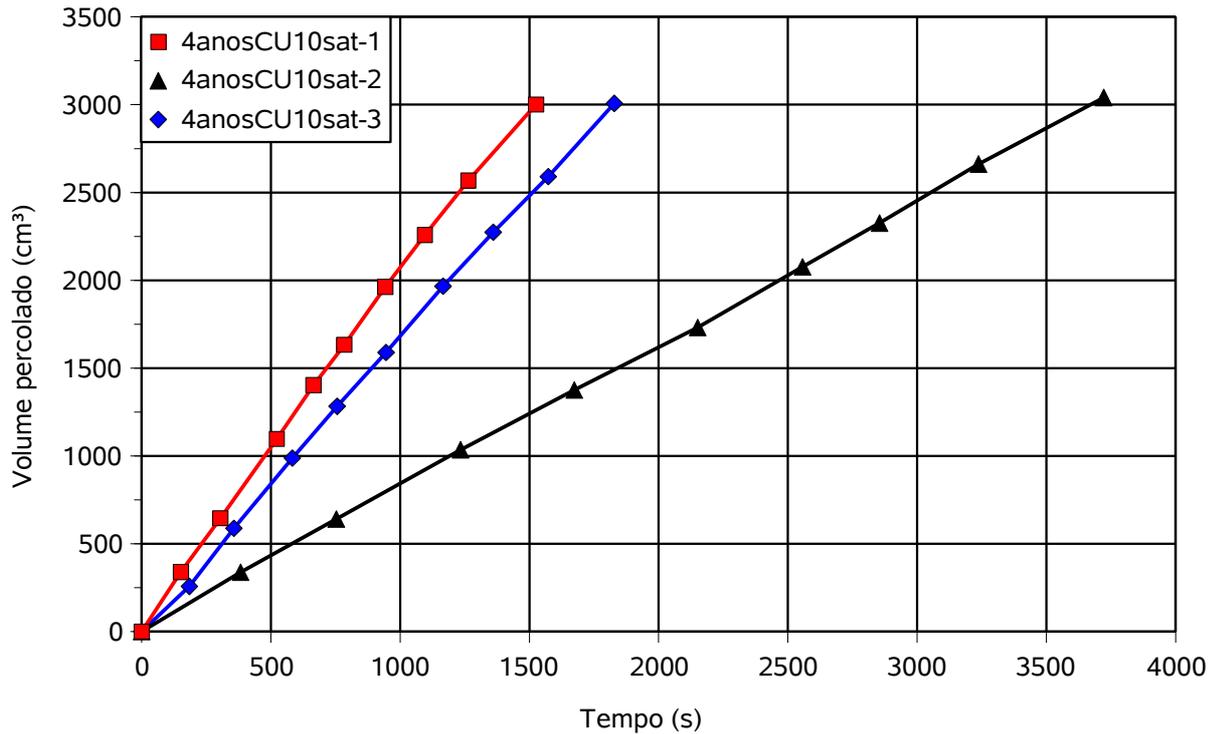


Figura 4.6. Volume percolado ao longo do tempo sob carga constante. RSU com 4 anos de aterrado e peso específico de 10 kN/m<sup>3</sup>.

Os valores dos coeficientes de permeabilidade foram determinados utilizando-se a Equação (4.1), baseada na lei de Darcy para fluxo laminar de água em solos.

$$k_{20} = \frac{Q}{A \cdot i} \cdot f \quad (4.1)$$

Onde:  $Q$  = vazão de água através da amostra, que é o coeficiente angular da reta ajustada para as curvas das Figuras 4.1 à 4.4;  $A$  = área da seção transversal da amostra;  $i$  = gradiente hidráulico utilizado no ensaio;  $f$  = coeficiente de correção da viscosidade da água para a temperatura de 20 °C.

As características das amostras ensaiadas, juntamente com os seus respectivos valores de coeficientes de permeabilidade, estão apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Características dos corpos de prova e valores dos coeficientes de permeabilidade.

Amostra	Ensaio	<i>D</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	<i>e</i>	<i>i</i>	<i>T</i> (°C)	<i>f</i>	<i>k</i> <sub>20</sub> (cm/s)
NovoCD8sat	1	206	381	7,5	4,43	2,5	25,0	0,887	1,4 x 10 <sup>-3</sup>
	2	197	376	8,8	3,64	2,7	23,0	0,930	1,5 x 10 <sup>-3</sup>
	3	203	381	8,2	3,99	2,6	24,5	0,898	9,2 x 10 <sup>-4</sup>
NovoCU10sat	1	203	400	9,7	3,19	2,5	22,0	0,952	2,3 x 10 <sup>-3</sup>
	2	199	404	10,0	3,06	2,5	25,0	0,887	1,8 x 10 <sup>-3</sup>
	3	211	399	9,0	3,51	2,5	26,5	0,857	2,7 x 10 <sup>-3</sup>
4anosCU10sat	1	201	407	9,7	2,41	2,5	24,5	0,898	2,3 x 10 <sup>-3</sup>
	2	199	407	9,9	2,35	2,5	24,0	0,908	9,6 x 10 <sup>-4</sup>
	3	201	392	8,8	2,76	2,6	25,0	0,887	1,8 x 10 <sup>-3</sup>
4anosCD14sat	1	195	382	13,5	1,46	2,6	24,0	0,908	1,1 x 10 <sup>-3</sup>
	2	196	375	13,6	1,44	2,7	25,0	0,887	8,9 x 10 <sup>-4</sup>
	3	197	371	13,6	1,44	2,7	26,0	0,867	6,9 x 10 <sup>-4</sup>

Como é possível observar da Tabela 3.4, não foi possível verificar diferenças pronunciadas entre os valores dos coeficientes de permeabilidade para as amostras com diferentes valores de peso específico. Também não foram verificadas diferenças significativas entre os valores dos coeficientes de permeabilidade do resíduo novo com os do resíduo com 4 anos de aterrado. Os valores dos coeficientes de permeabilidade variaram entre  $6,9 \times 10^{-4}$  e  $2,7 \times 10^{-3}$  cm/s. Estes resultados estão de acordo com os diversos valores encontrados na literatura e são equivalentes aos valores das areias finas. Azevedo et al. (2004) também não verificaram mudanças no coeficiente de permeabilidade para resíduos de diferentes idades, encontrando um valor médio de  $9,5 \times 10^{-4}$  cm/s. Carvalho (1999), através de ensaios de infiltração em furos de sondagens, verificou uma diminuição do coeficiente de permeabilidade com uma maior compactação do resíduo. Seus resultados, apesar de dispersos, são da mesma ordem de grandeza dos encontrados nos ensaios realizados neste trabalho.

### 4.3 ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA

A Figura 4.7 apresenta as curvas de índice de vazios versus raiz do tempo, obtidas do ensaio convencional para o resíduo novo compactado com  $7,1 \text{ kN/m}^3$ . Como é possível observar nas curvas, o adensamento primário ocorre nos primeiros minutos do ensaio, seguido das deformações secundárias, que se estendem por um período de tempo muito maior.

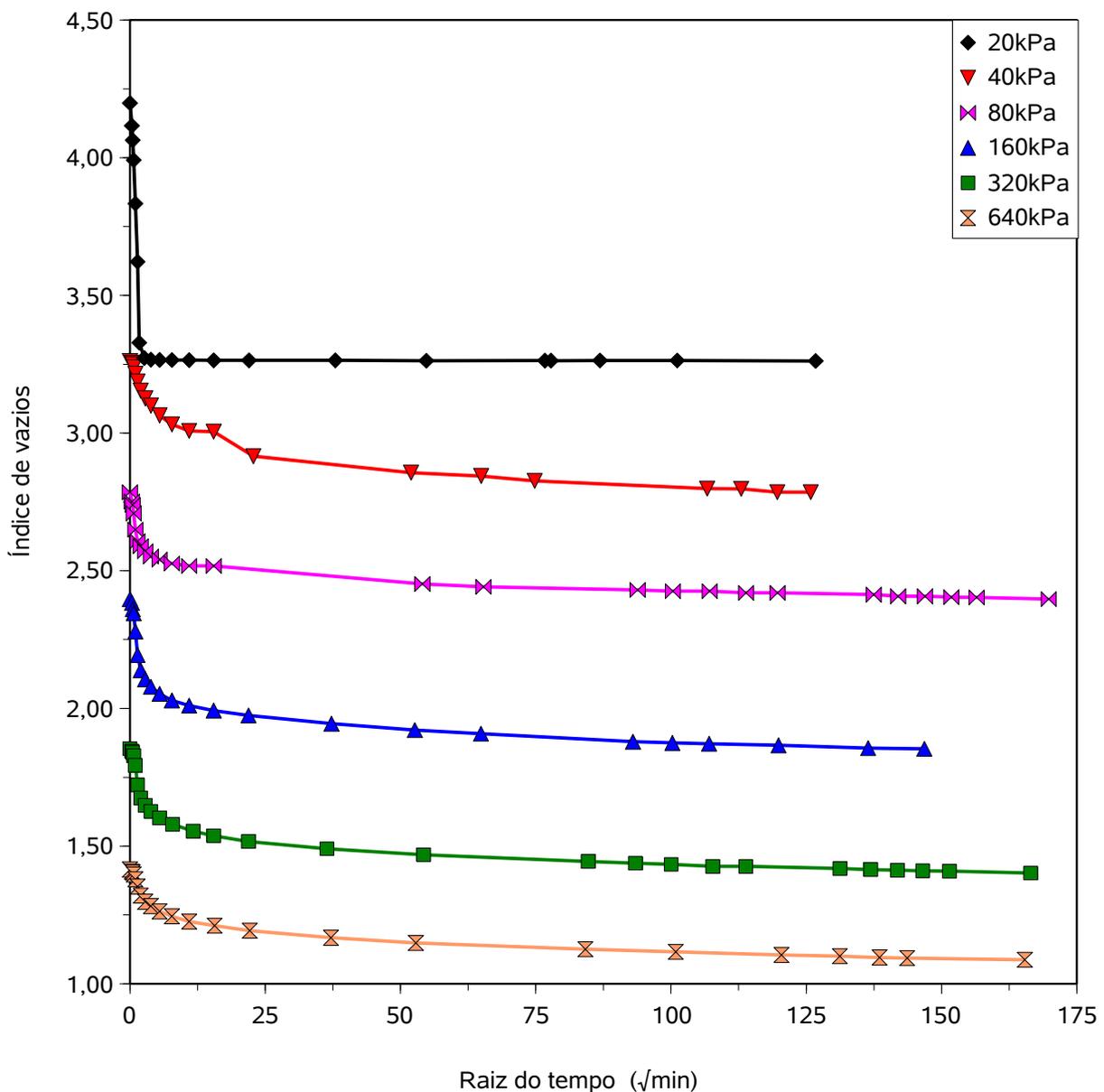


Figura 4.7. Curvas de índice de vazios versus raiz do tempo do ensaio convencional em resíduo novo compactado na umidade natural com peso específico de  $7,1 \text{ kN/m}^3$ .

A Figura 4.8 apresenta as curvas de índice de vazios versus o logaritmo do tempo do ensaio de compressão confinada convencional. Nestas curvas, pode-se observar um acentuado processo de compressão secundária que apresenta uma tendência de comportamento linear entre os índices de vazios e o logaritmo do tempo.

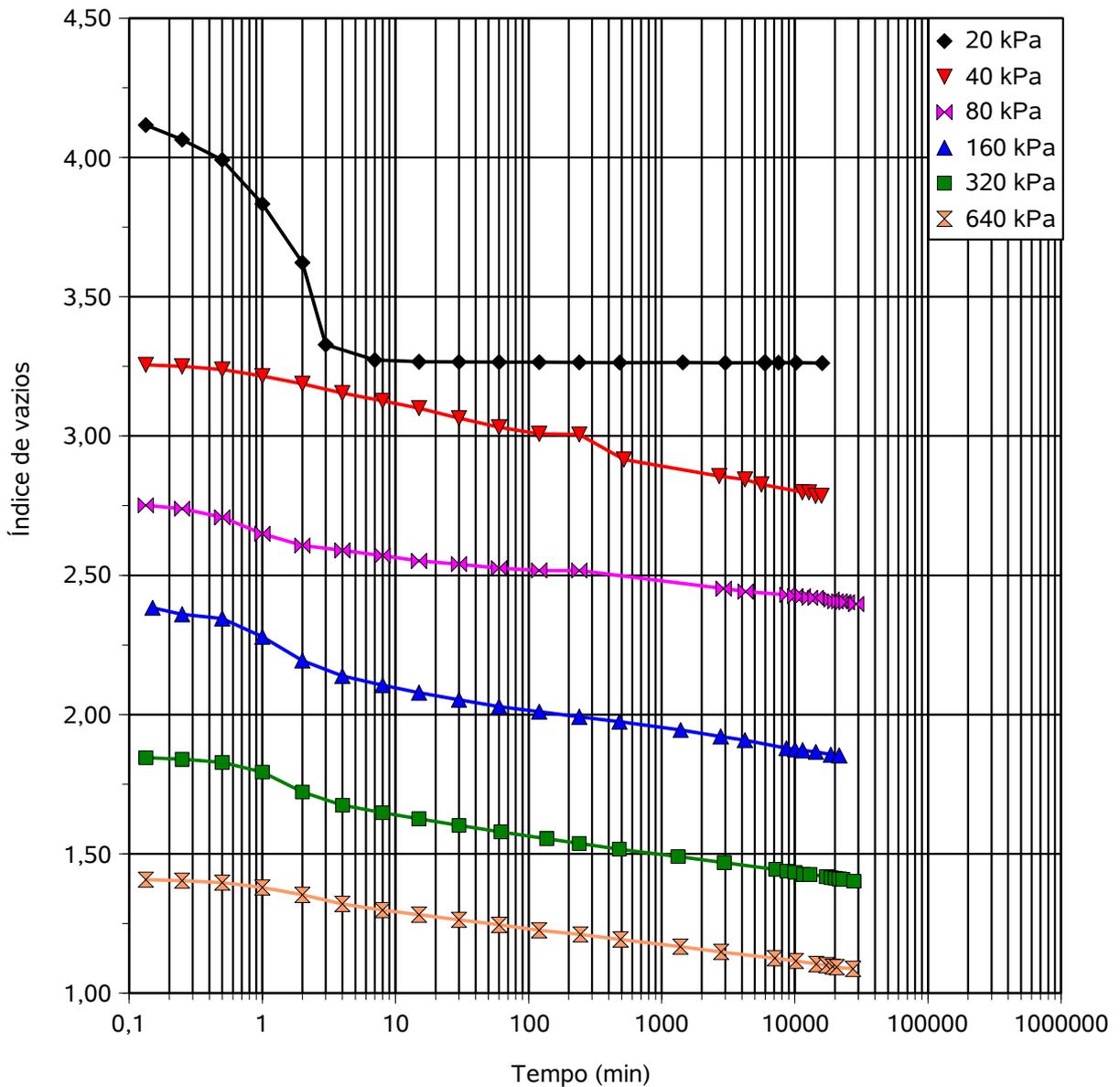


Figura 4.8. Curvas de índice de vazios versus logaritmo do tempo do ensaio convencional, em resíduo novo compactado na umidade natural com peso específico de 7,1 kN/m<sup>3</sup>.

A Figura 4.9 apresenta as curvas de índice de vazios versus raiz do tempo, obtidas do ensaio com recirculação de chorume para o resíduo novo compactado com 7,4 kN/m<sup>3</sup>.

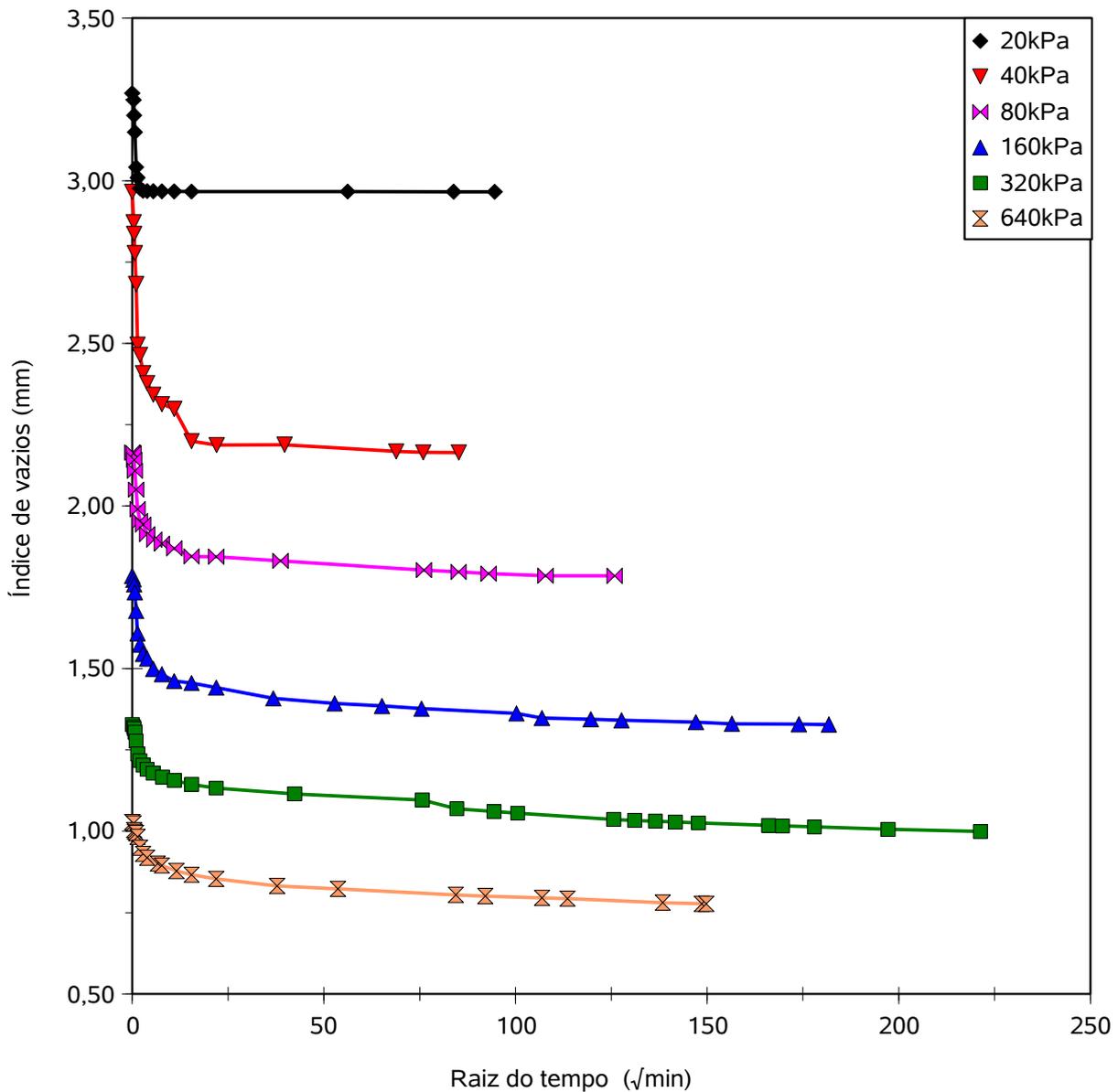


Figura 4.9. Curvas de índice de vazios versus raiz do tempo do ensaio com recirculação de chorume, em resíduo novo compactado na unidade natural com peso específico de  $7,4 \text{ kN/m}^3$ .

A Figura 4.10 apresenta as curvas de índice de vazios versus o logaritmo do tempo do ensaio de compressão confinada com recirculação de chorume, realizado em resíduo novo compactado com peso específico de  $7,4 \text{ kN/m}^3$ .

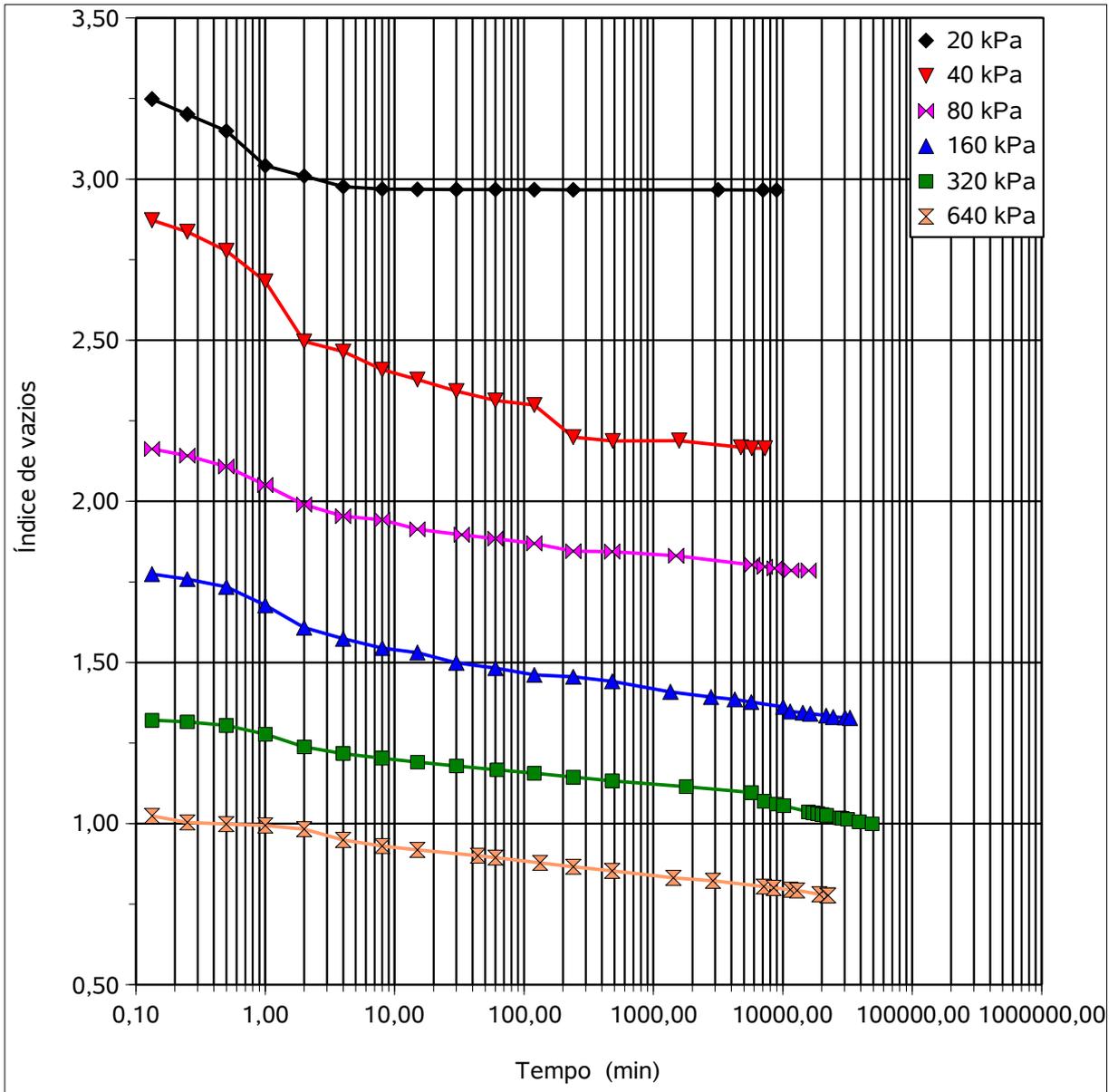


Figura 4.10. Curvas de índice de vazios versus logaritmo do tempo do ensaio com recirculação de chorume, em resíduo novo compactado na umidade natural com peso específico de 7,4 kN/m<sup>3</sup>.

A partir destes gráficos foi possível determinar os índices de compressão secundária  $C_\alpha$  ( $C_\alpha = \Delta e / \Delta \log t$ ) e os coeficientes de compressão secundária  $C'_\alpha$  ( $C'_\alpha = C_\alpha / (1 + e_0)$ ), onde  $e_0$  é o índice de vazios do início de cada estágio) para cada estágio de carregamento, os quais são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores de  $C_\alpha$  e  $C'_\alpha$  obtidos para as amostras ensaiadas para cada estágio de carregamento.

Amostra	$\gamma_0$ (kN/m <sup>3</sup> )	Tensão (kPa)	$C_\alpha$	$C'_\alpha$	$R^2$
RN	7,1	20	0,538	0,105	0,928
		40	0,098	0,023	0,993
		80	0,058	0,016	0,960
		160	0,096	0,029	0,953
		320	0,081	0,029	0,977
		640	0,062	0,026	0,996
RN-R	7,4	20	0,171	0,040	0,942
		40	0,148	0,037	0,886
		80	0,079	0,025	0,908
		160	0,077	0,028	0,958
		320	0,055	0,024	0,985

Descartando-se os valores obtidos para os estágios de 20 kPa, cujo resultados foram afetados muito provavelmente pela acomodação do pistão e também do próprio resíduo, verifica-se para o ensaio convencional que o valor de  $C_\alpha$  varia de 0,058 à 0,098, podendo-se adotar um valor médio de 0,079 e que o coeficiente de compressão secundária,  $C'_\alpha$ , varia de 0,016 a 0,029, com valor médio de 0,024. Para a amostra submetida a recirculação de chorume os valores do índice de compressão secundária variaram entre 0,055 e 0,148, sendo o valor médio de 0,090. O coeficiente de compressão secundária variou de 0,024 à 0,037, obtendo-se um valor médio de 0,028. Considerando os valores médios, houve um aumento nos valores de  $C_\alpha$  e de  $C'_\alpha$  de 13,94 % e 16,50 %, respectivamente, na amostra com recirculação.

Os valores de  $C_\alpha$  encontrados são menores que aqueles apresentados por Sowers (1973), mas apresentam-se dentro da faixa de valores encontrado por Gabr e Valero (1995), e são levemente superiores aos obtidos por Machado et. al. (2005) e por Vilar e Carvalho (2004).

Os efeitos da aceleração da decomposição nos parâmetros de deformabilidade foram observados por Olivier e Gourc (2007). Os autores observaram um aumento no valor do índice de compressão secundária de até 6 vezes.

A Figura 4.11 apresenta as curvas de compressão confinada obtidas para os resíduos estudados. Por meio desta curva, pôde-se determinar o índice de compressão primária  $C_c$  ( $C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma_v$ ) para o resíduo novo coletado do Aterro Metropolitano Centro, bem como o coeficiente de compressão primária,  $C'_c$  ( $C'_c = C_c / (1 + e_0)$ ). Os valores dos índices de vazios foram obtidos a partir dos estágios do ensaio de compressão confinada, que duraram em média 25 dias. Os valores do índice de compressão primária e do coeficiente de compressão primária, obtidos do ensaio convencional, foram de 1,459 e 0,284, respectivamente. No ensaio com recirculação os valores destes parâmetros foram de  $C_c = 1,585$  e  $C'_c = 0,371$ .

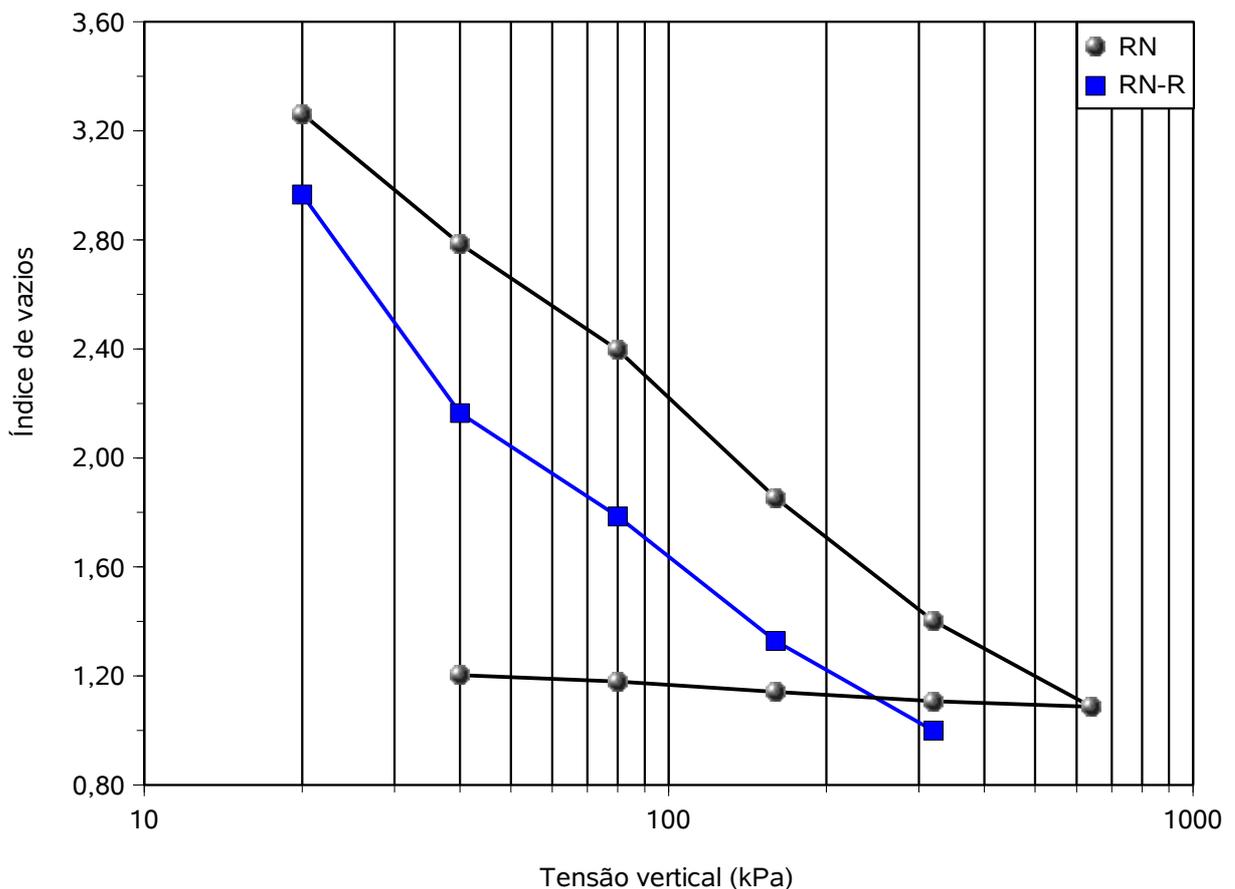


Figura 4.11. Curva de índice de vazios versus o logaritmo da tensão vertical para as amostras de resíduo novo ensaiadas, compactadas com peso específico de 7 kN/m<sup>3</sup>.

Os valores obtidos são similares aos reportados por Sowers (1973) e por Machado et. al (2005), porém são bem superiores que os apresentados por Gabr e Valero (1995) e Vilar e Carvalho (2004) para resíduos antigos, o que era de se esperar, pois nestes últimos casos os resíduos apresentam uma maior quantidade de materiais inertes que são menos deformáveis. Comparando os valores dos parâmetros de deformabilidade do ensaio convencional com os do ensaio com recirculação, é observado um aumento de 8,6 % no valor do índice de compressão primária, e de 30,6 % no valor do coeficiente de compressão primária. É importante observar que o coeficiente de compressão primária é afetado pelo valor do índice de vazios inicial da amostra, ou seja, o aumento de 30,6 % no valor de  $C'_c$  do ensaio convencional para o ensaio com recirculação de chorume foi, em grande parte, devido à diferença nos índices de vazios entre as duas amostras. Como já foi mencionado anteriormente, os volumes de chorume percolados foram pequenos se comparados ao volume da amostra e o tempo de duração do ensaio foi relativamente curto se comparado ao tempo necessário para a intensificação do processo de decomposição, além disso, as condições ambientais de laboratório não foram as mais propícias à biodegradação. Dessa forma, mesmo os parâmetros de deformabilidade apresentando valores ligeiramente superiores para o ensaio com recirculação, não se pode afirmar com clareza que esse aumento tenha sido causada pelo mecanismo da recirculação e, conseqüentemente, pela aceleração da decomposição. Na Tabela 4.6 são apresentados algumas das características iniciais das amostras submetidas aos ensaios de compressão confinada juntamente com seus parâmetros de deformabilidade. É apresentado também a perda de massa das amostras após a realização dos ensaios.

Tabela 4.6 - Valores médios de  $C_c$  e de  $C'_c$ .

Amostra	$\gamma_o$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_o$	$\Delta M_s$ (%)	$C_c$	$C'_c$	$R^2$
RN	7,11	4,05	4,134	13,9	1,459	0,284	0,9960
RN-R	7,38	3,33	3,269	4,4	1,585	0,371	0,9703

É importante observar que a amostra submetida à recirculação apresentou uma perda de massa menor do que a amostra submetida ao ensaio convencional. Imprecisões na determinação das umidades finais dos materiais, como por exemplo a perda de massa de material durante as pesagens, podem ter contribuído para esta diferença.

## **4.4 ENSAIOS TRIAXIAIS**

### **4.4.1 Ensaio triaxiais drenados (CD)**

#### **4.4.1.1 Influência da idade**

As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam os resultados obtidos dos ensaios triaxiais convencionais do tipo CD, realizados em amostra saturada de resíduo novo e em amostra saturada de resíduo com 4 anos de aterrado, ambas com peso específico de  $10 \text{ kN/m}^3$  (amostras NovoCD10sat e 4anosCD10sat).

As curvas tensão-deformação apresentadas permitem identificar um comportamento típico para o resíduo sólido urbano, onde as tensões aumentam continuamente com o aumento das deformações axiais, sem atingir qualquer pico na curva tensão-deformação ou alcançar um valor máximo, como normalmente ocorre em solos, fato já observado por Grisolia e Napoleoni (1996), em amostras deformadas de RSU e Jessberger e Kockel (1993), em RSU triturado e por Carvalho (1999), em resíduo do aterro Bandeirantes em São Paulo.

Devido às características das curvas tensão-deformação dos resíduos, não foi possível determinar os parâmetros de resistência empregando os critério de ruptura de Mohr-Coulomb, adotou-se então critérios de deformação para determinação destes parâmetros.

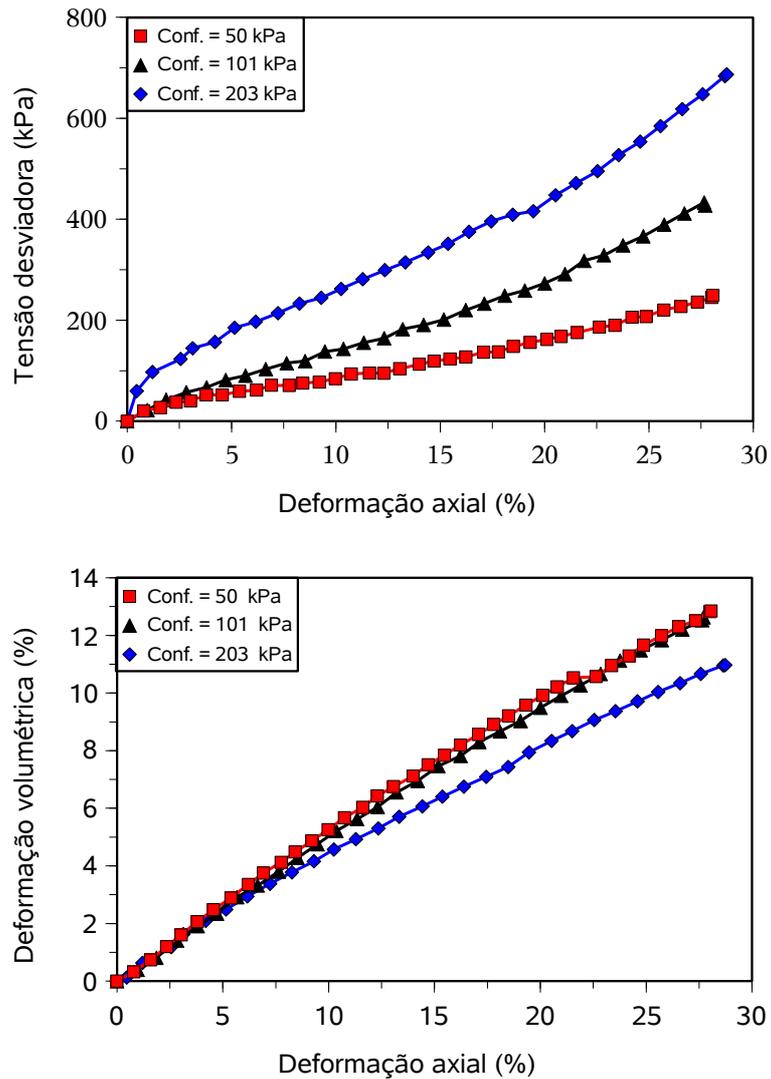


Figura 4.12. Curvas tensão versus deformação e deformação volumétrica versus deformação axial obtidas para as amostras NovoCD10sat.

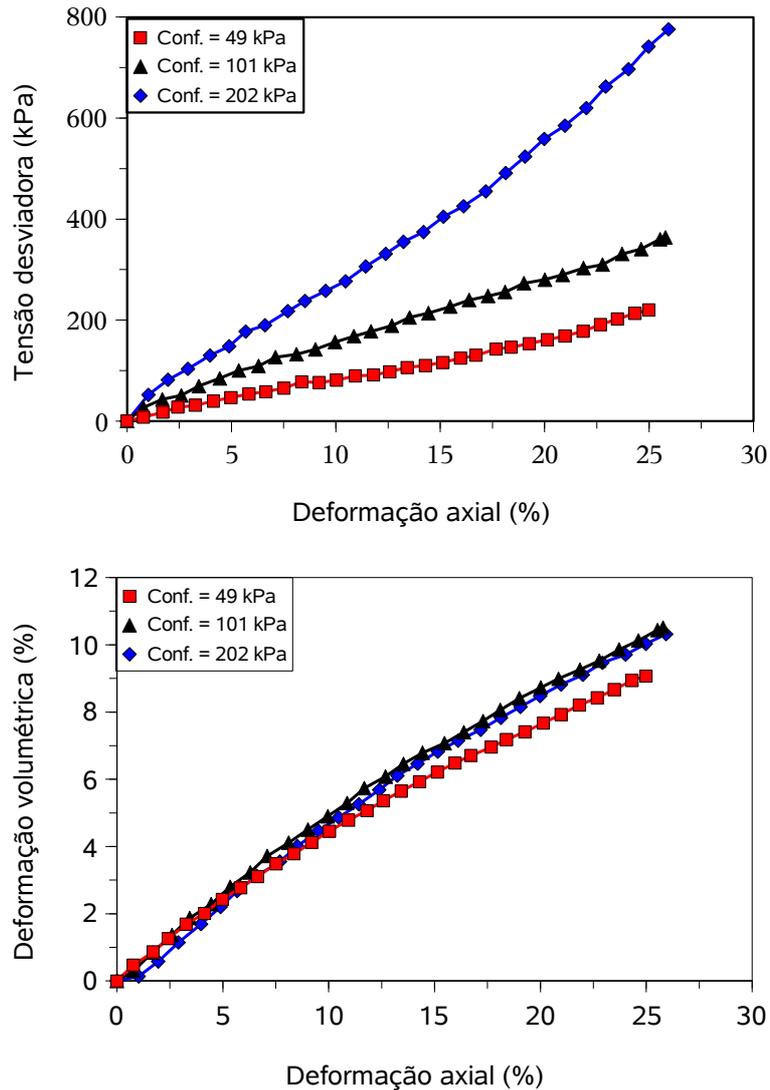


Figura 4.13. Curvas tensão versus deformação e deformação volumétrica versus deformação axial obtidas para as amostras 4anosCD10sat.

Com os dados apresentados nas Figuras 4.12 e 4.13 foram traçados gráficos dos parâmetros  $t$  e  $s'$  para diferentes níveis de deformação axial (5%, 10%, 15%, 20%), Figura 4.14. Em alguns casos obtiveram-se, através da regressão linear, valores do coeficiente linear ( $a$ ) abaixo de zero, ou seja, valores de coesão negativos. Nestes casos, ajustaram-se envoltórias passando pela origem dos eixos. Os valores de  $t$  e  $s'$  foram obtidos a partir das seguintes equações:

$$s' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (4.2)$$

$$t = t' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (4.3)$$

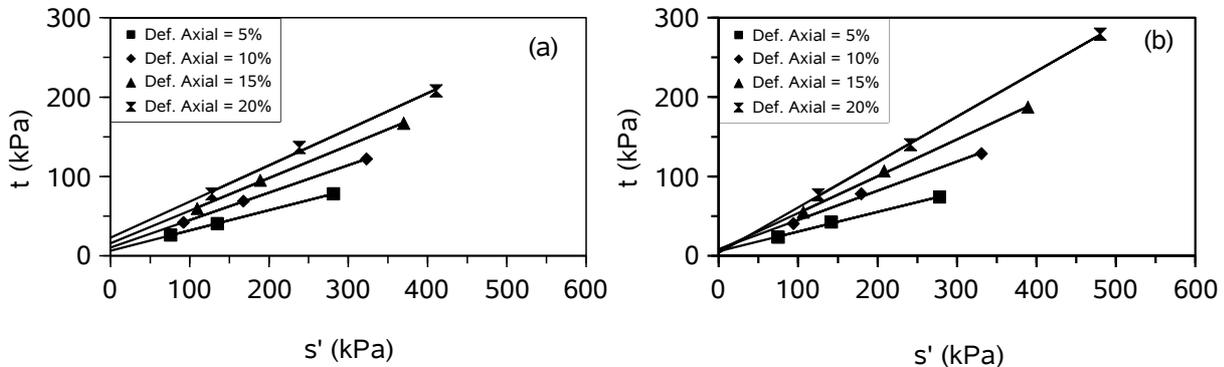


Figura 4.14. Envoltórias obtidas no plano  $t \times s'$  para a amostra NovoCD10sat (a) e 4anosCD10sat (b).

Os coeficientes linear ( $a'$ ) e angular ( $\alpha'$ ) das envoltórias podem ser transformados no ângulo de atrito e coesão mobilizados pelo RSU através das Equações 4.4 e 4.5, para cada nível de deformação. Nestas equações  $c'$  e  $\phi'$  correspondem à coesão e ao ângulo de atrito mobilizado pela amostra de RSU para o nível de deformação escolhido.

$$\phi' = \arcsen(tg(\alpha')) \quad (4.4)$$

$$c' = \frac{a'}{\cos(\phi')} \quad (4.5)$$

Como é possível observar na Figura 4.14, as envoltórias de resistência no plano  $t \times s'$  variam em função da deformação axial, ou seja, os parâmetros de resistência mudam a depender do nível de deformação aplicado. A Tabela 4.7 apresenta os valores da coesão e do ângulo de atrito para as amostras NovoCD10sat e 4anosCD10sat, para os diferentes níveis de deformação. Para ambas as amostras houve um aumento do ângulo de atrito com as deformações, sendo que para uma deformação de 20 % os valores obtidos foram de  $27,1^\circ$  para a amostra NovoCD10sat e de  $34,9^\circ$  para a amostra 4anosCD10sat. O valor da coesão para a amostra NovoCD10sat também apresentou um crescimento com as

deformações, atingindo um valor de 25,8 kPa para 20 % de deformação axial, diferentemente da amostra 4anos10, cujo valor se manteve abaixo de 10 kPa sem apresentar tendência de crescimento.

Tabela 4.7 - Parâmetros de resistência das amostras NovoCD10sat e 4anosCD10sat.

Amostra	$\epsilon_a$ (%)	Equação (kPa)	$R^2$	Parâmetros	
				$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
NovoCD10sat	5	$t = 0,2552 s' + 6,61$	1,000	6,8	14,8
	10	$t = 0,3455 s' + 10,66$	1,000	11,4	20,2
	15	$t = 0,4098 s' + 16,01$	0,999	17,6	24,2
	20	$t = 0,4906 s' + 23,01$	0,995	25,8	27,1
4anosCD10sat	5	$t = 0,2475 s' + 5,79$	0,997	6,0	14,3
	10	$t = 0,3684 s' + 8,31$	0,995	8,9	21,6
	15	$t = 0,4650 s' + 7,28$	0,999	8,2	27,7
	20	$t = 0,5725 s' + 4,05$	1,000	4,6	34,9

Para melhor visualizar o desenvolvimento dos parâmetros de resistência com as deformações, são apresentadas na Figura 4.15 as curvas de variação da coesão e variação do ângulo de atrito para os diferentes níveis de deformação axial para as amostras NovoCD10sat e 4anosCD10sat.

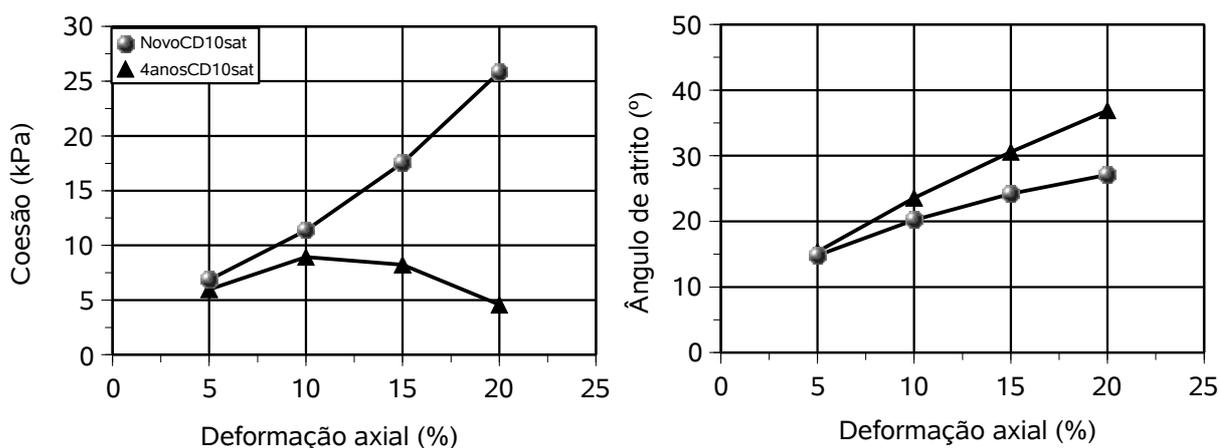


Figura 4.15. Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial das amostras NovoCD10sat e 4anosCD10sat.

#### 4.4.1.2 Influência do peso específico

##### a) Resíduo Novo

A Figura 4.16 apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios triaxiais drenados em amostra saturada de resíduo novo, compactadas na umidade natural com peso específico de  $8 \text{ kN/m}^3$  (amostra NovoCD8sat).

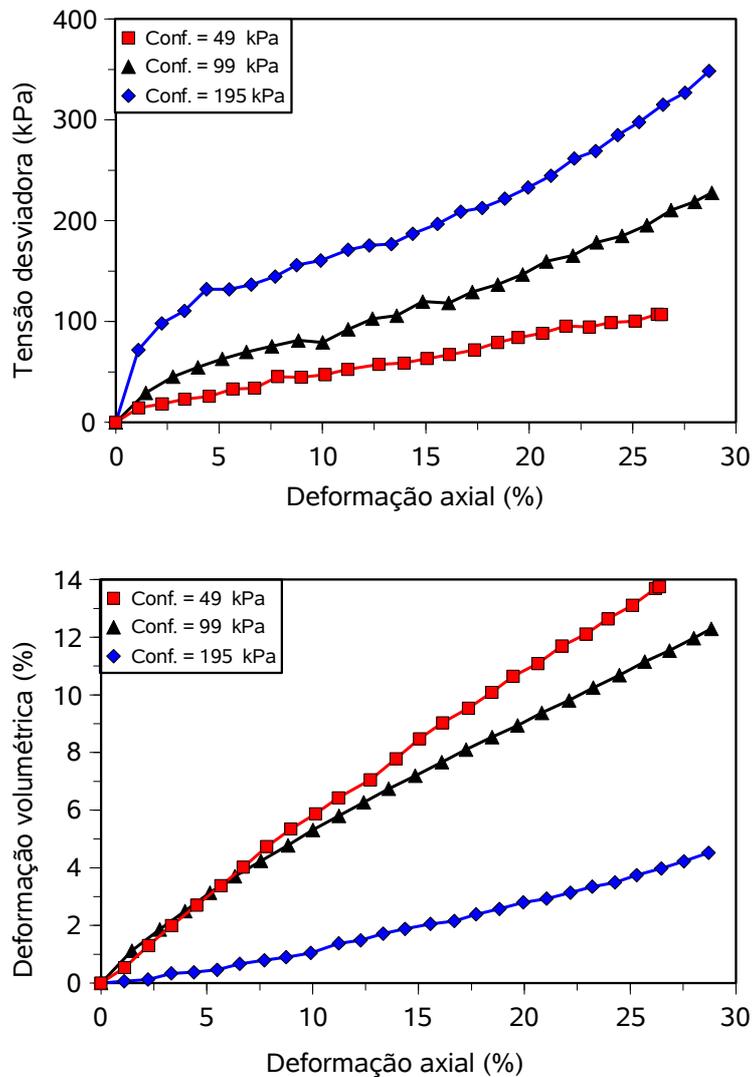


Figura 4.16. Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial obtidas para a amostra NovoCD8sat.

Como é possível verificar na Figura 4.16, comparando-se à Figura 4.12, as curvas tensão versus deformação da amostra de resíduo novo, compactada com peso específico de 8 kN/m<sup>3</sup>, apresentaram o mesmo comportamento da amostra de resíduo novo compactada com peso específico de 10 kN/m<sup>3</sup>. No entanto, os valores das tensões desviadoras foram menores.

As curvas de deformação volumétrica versus deformação axial também apresentaram comportamento similar aos do ensaio com maior peso específico, exceto o ensaio com tensão de confinamento de 200 kPa, que apresentou menores deformações volumétricas. Este comportamento pode ser explicado pela presença de materiais menos compressíveis na composição deste corpo de prova.

A influência do peso específico na resistência ao cisalhamento dos RSU pode ser observada na Figura 4.17. Nesta figura são apresentadas as envoltórias no plano  $t \times s'$  dos resultados dos ensaios triaxiais drenados em amostras saturadas de resíduos novo com 8 e 10 kN/m<sup>3</sup> de peso específico, estas últimas, já apresentadas na Figura 4.14 (a).

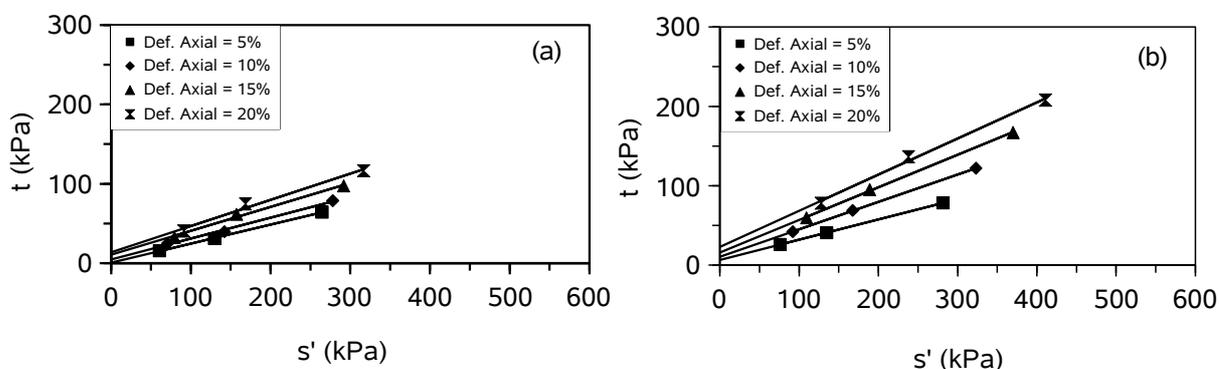


Figura 4.17. Envoltórias obtidas no plano  $t \times s'$  para a amostra NovoCD8sat (a) e NovoCD10sat (b).

Como é possível verificar na Figura 4.17, houve um aumento sensível nos parâmetros de resistência com o aumento do peso específico. Os valores da coesão e do ângulo de atrito para a deformação axial de 20% da amostra NovoCD8sat foram de 14,8 kPa e de 19,2°, respectivamente, bem inferiores aos da amostra NovoCD10sat. Estes resultados diferem dos encontrados para os resíduos do Aterro Bandeirantes-SP com 15 anos de

aterçado, que não apresentaram variação significativa nos parâmetros de resistência para diferentes valores de peso específico (VILAR & CARVALHO, 2002, 2004). A Tabela 4.8 apresenta os parâmetros de resistência para os diversos níveis de deformação das amostras NovoCD8sat e NovoCD10sat.

Tabela 4.8 - Parâmetros de resistência das amostras NovoCD8sat e NovoCD10sat.

Amostra	$\epsilon_a$ (%)	Equação (kPa)	$R^2$	Parâmetros	
				$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
NovoCD8sat	5	$t = 0,2398 s' + 0,64$	0,999	0,7	13,9
	10	$t = 0,2629 s' + 4,75$	0,994	4,9	15,2
	15	$t = 0,3011 s' + 10,72$	0,992	11,2	17,5
	20	$t = 0,3293 s' + 13,96$	0,985	14,8	19,2
NovoCD10sat	5	$t = 0,2552 s' + 6,61$	1,000	6,8	14,8
	10	$t = 0,3455 s' + 10,66$	1,000	11,4	20,2
	15	$t = 0,4098 s' + 16,01$	0,999	17,6	24,2
	20	$t = 0,4906 s' + 23,01$	0,995	25,8	27,1

São apresentadas na Figura 4.18 as curvas de variação da coesão e variação do ângulo de atrito para os diferentes níveis de deformação axial para as amostras de resíduo novo com 8 e 10 kN/m<sup>3</sup> de peso específico.

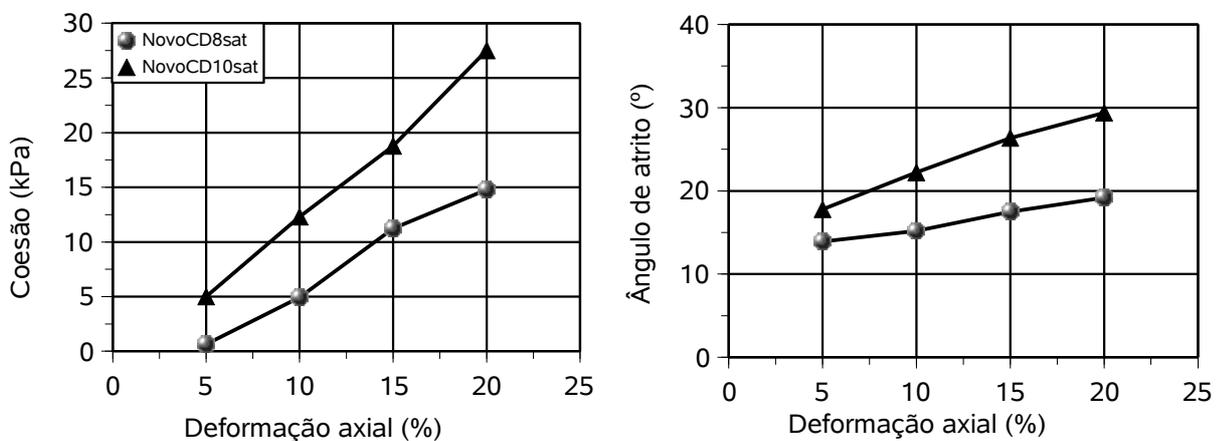


Figura 4.18. Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial das amostras NovoCD8sat e NovoCD10sat.

### b) Resíduo com 4 anos de aterrado

A Figura 4.19 apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios triaxiais drenados em amostra saturada de resíduo com 4 anos de aterrado, compactada na umidade natural com peso específico de  $14 \text{ kN/m}^3$  (amostra NovoCD14sat).

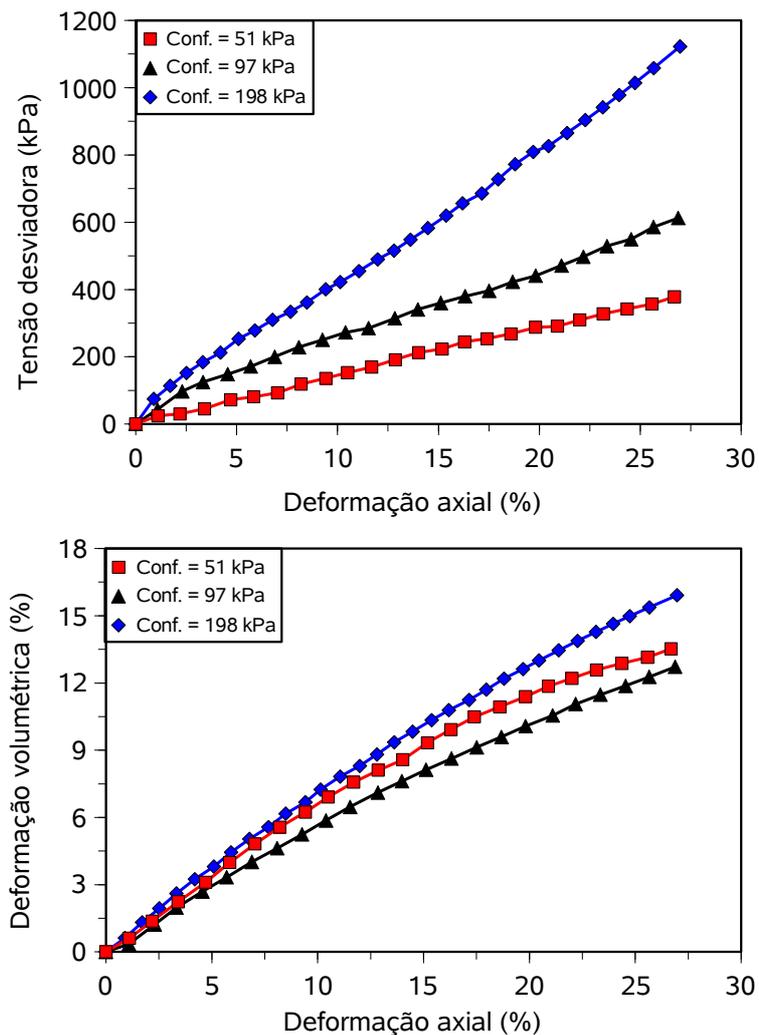


Figura 4.19. Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial obtidas para a amostra 4anosCD14sat.

Na Figura 4.20 são apresentadas as envoltórias no plano  $t \times s'$  dos resultados dos ensaios triaxiais drenados em amostras saturadas de resíduo com 4 anos de aterrado e com peso específico de  $10 \text{ kN/m}^3$ , cujos resultados já foram mostrados na Figura 4.13, e de  $14 \text{ kN/m}^3$ .

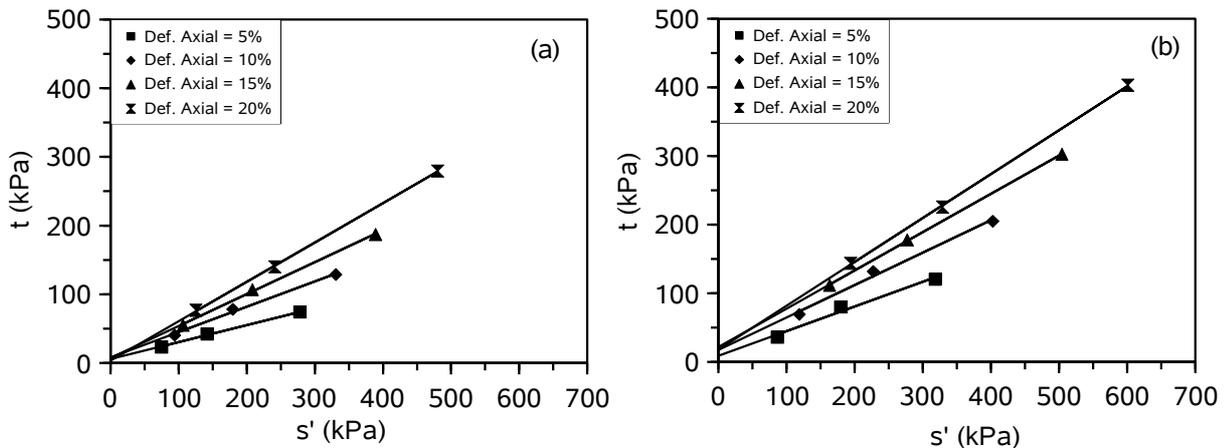


Figura 4.20. Envoltórias obtidas no plano  $t \times s'$  para a amostra 4anosCD10sat (a) e 4anosCD14sat (b).

Como é possível verificar na Figura 4.20, assim como observado para o resíduo novo, houve um aumento nos parâmetros de resistência com o aumento do peso específico da amostra. Os valores de coesão e do ângulo de atrito para a deformação axial de 20% da amostra 4anosCD10sat foram de 4,6 kPa e de 34,9°, respectivamente. Para a amostra 4anosCD14sat com peso específico de 14 kN/m<sup>3</sup> os valores de coesão e do ângulo de atrito foram de 22,9 kPa e 39,8°. A Tabela 4.9 apresenta os parâmetros de resistência para os diversas níveis de deformação das amostras 4anosCD10sat e 4anosCD14sat.

Tabela 4.9 - Parâmetros de resistência das amostras 4anosCD10sat e 4anosCD14sat.

Amostra	$\epsilon_a$ (%)	Equação (kPa)	$R^2$	Parâmetros	
				$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
4anosCD10sat	5	$t = 0,2475 s' + 5,79$	0,997	6,0	14,3
	10	$t = 0,3684 s' + 8,31$	0,995	8,9	21,6
	15	$t = 0,4650 s' + 7,28$	0,999	8,2	27,7
	20	$t = 0,5725 s' + 4,05$	1,000	4,6	34,9
4anosCD14sat	5	$t = 0,3582 s' + 9,00$	0,981	9,6	21,0
	10	$t = 0,4719 s' + 17,45$	0,992	19,8	28,2
	15	$t = 0,5579 s' + 21,55$	1,000	26,0	33,9
	20	$t = 0,6400 s' + 17,59$	1,000	22,9	39,8

São apresentadas na Figura 4.21 as curvas de variação da coesão e variação do ângulo de atrito para os diferentes níveis de deformação axial para as amostras de resíduo com 4 anos de aterrado com 10 e 14 kN/m<sup>3</sup> de peso específico.

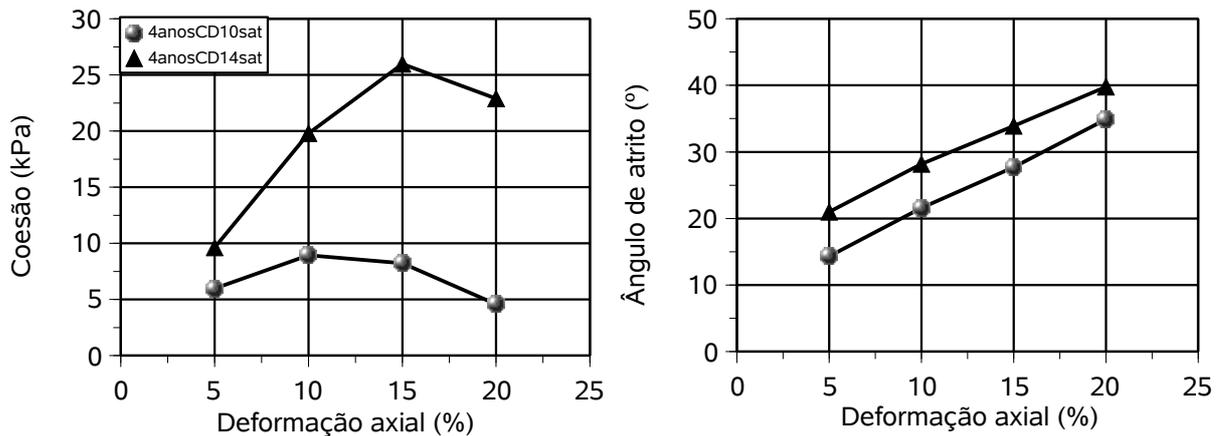


Figura 4.21. Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial das amostras 4anosCD10sat e 4anosCD14sat.

#### 4.4.1.3 Influência do grau de saturação

A Figuras 4.22 apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios triaxiais drenados em amostra de resíduo novo, compactada na umidade natural com peso específico de 10 kN/m<sup>3</sup> (amostra NovoCD10nat). O grau de saturação dos corpos de prova no início do ensaio ficou em torno de 55 %.

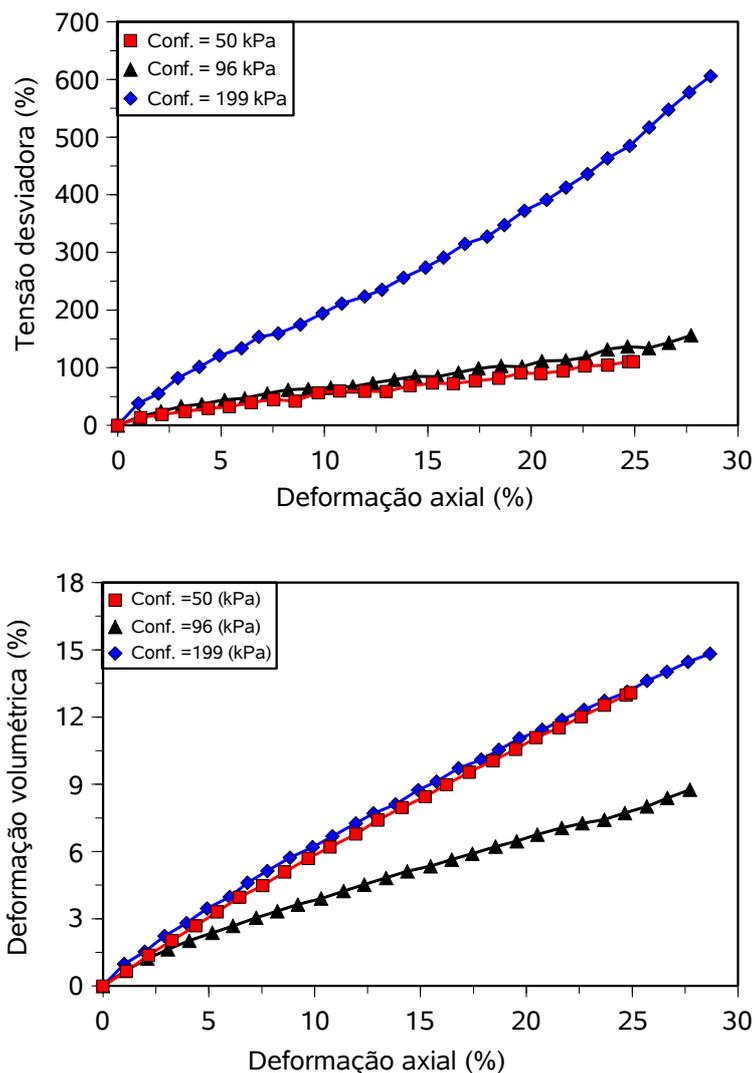


Figura 4.22. Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial obtidas para a amostra NovoCD10nat.

Como é possível observar na Figura 4.22, o ensaio com pressão de confinamento de 100 kPa apresentou praticamente a mesma resistência que o ensaio com pressão de confinamento de 50 kPa. Possivelmente houve algum problema durante a execução deste ensaio que não foi detectado, como por exemplo, o entortamento do corpo de prova durante o seu cisalhamento.

Na Figura 4.23 são apresentadas as envoltórias no plano  $t \times s'$  dos resultados dos ensaios triaxiais drenados em amostras de resíduo novo com peso específico de  $10 \text{ kN/m}^3$ , com grau de saturação de 55 % e na condição saturada (amostras NovoCD10nat e

NovoCD10sat). As envoltórias da amostra NovoCD10nat foram ajustadas apenas para os ensaios com pressão de confinamento de 50 kPa e de 200 kPa.

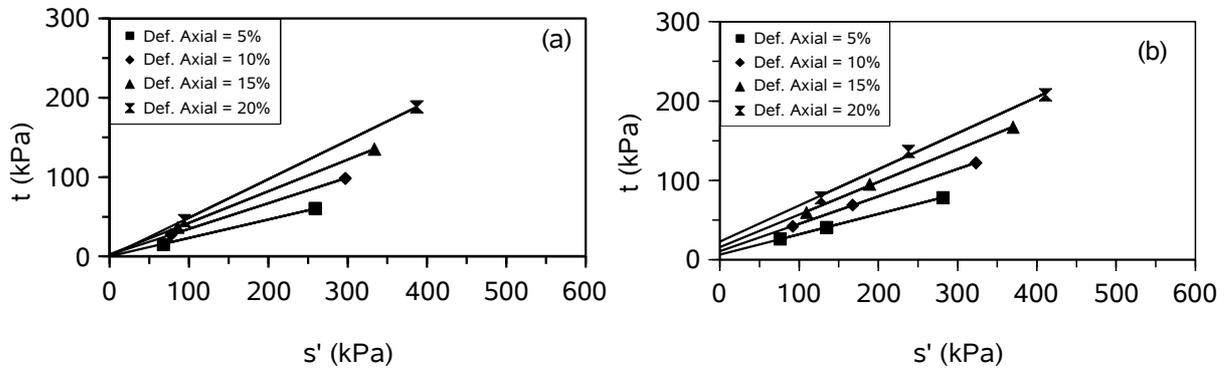


Figura 4.23. Envoltórias obtidas no plano  $t \times s'$  para a amostra NovoCD10nat (a) e NovoCD10sat (b).

Nota-se na Figura 4.24, que a amostra ensaiada na umidade natural apresentou praticamente os mesmos valores de ângulo de atrito que a amostra saturada, porém os valores de coesão foram bem menores. Para 20 % de deformação, por exemplo, a amostra NovoCD10sat apresentou ângulo de atrito e intercepto de coesão de  $27,1^\circ$  e 25,8 kPa, respectivamente, enquanto que a amostra NovoCD10nat apresentou ângulo de atrito de  $29,1^\circ$  e valor de intercepto de coesão nulo.

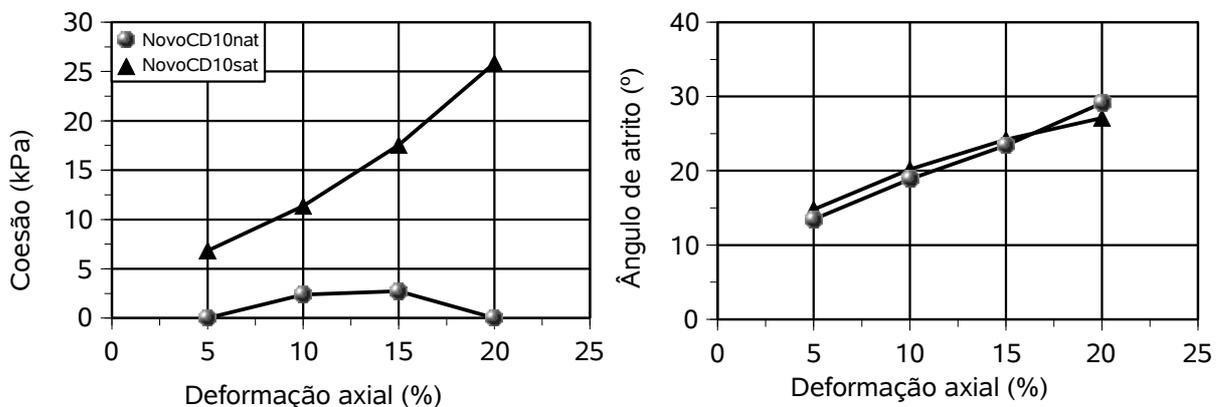


Figura 4.24. Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial das amostras NovoCD10nat e NovoCD10sat.

#### **4.4.1.4 Influência dos componentes de reforço**

A Figura 4.25 apresenta os resultados dos ensaios triaxiais realizados na matriz básica (resíduo sem o material fibroso) em amostras com peso específico de  $12 \text{ kN/m}^3$  e teor de umidade natural de 185 %. Este valor de peso específico foi adotado, por não se conseguir moldar amostras com peso específico de  $10 \text{ kN/m}^3$ , que para efeito de comparação seria mais adequado.

O efeito dos materiais fibrosos no RSU pode ser melhor percebido comparando-se os resultados do ensaio NovoCD10sat com o resultado do ensaio na matriz básica do resíduo novo (amostra NovoCD12satMB), Figura 4.25. Para maiores valores de confinamento é possível observar uma tendência no aparecimento de um valor máximo na curva tensão-deformação das amostras sem fibras, diferentemente dos ensaios com fibras, que apresentam, inclusive, concavidade voltada para cima. Este comportamento se reflete nos parâmetros de resistência que têm seus valores reduzidos, principalmente os de coesão. Segundo Manassero et al. (1996), o ganho de resistência causado pela presença dos materiais fibrosos pode ser considerado análogo ao comportamento de solos reforçados com fibras, porém, diferentemente destes últimos, os RSU não apresentam envoltória de ruptura significativamente bilinear devido à diferença nos tamanhos e no comportamento tensão-deformação de seus materiais de reforço. As deformações observadas nos ensaios sem fibras foram menores do que as do ensaio com o material composto. Possivelmente, isso se deve ao fato de que os materiais fibrosos (na grande maioria, plásticos), presentes no resíduo, são muito compressíveis. Para uma deformação axial de 20 %, por exemplo, as deformações volumétricas do ensaio sem a presença das fibras variaram entre 3,5 e 5,2 %, enquanto que para a amostra com o material composto estes valores variaram entre 8,2 e 9,9 %.

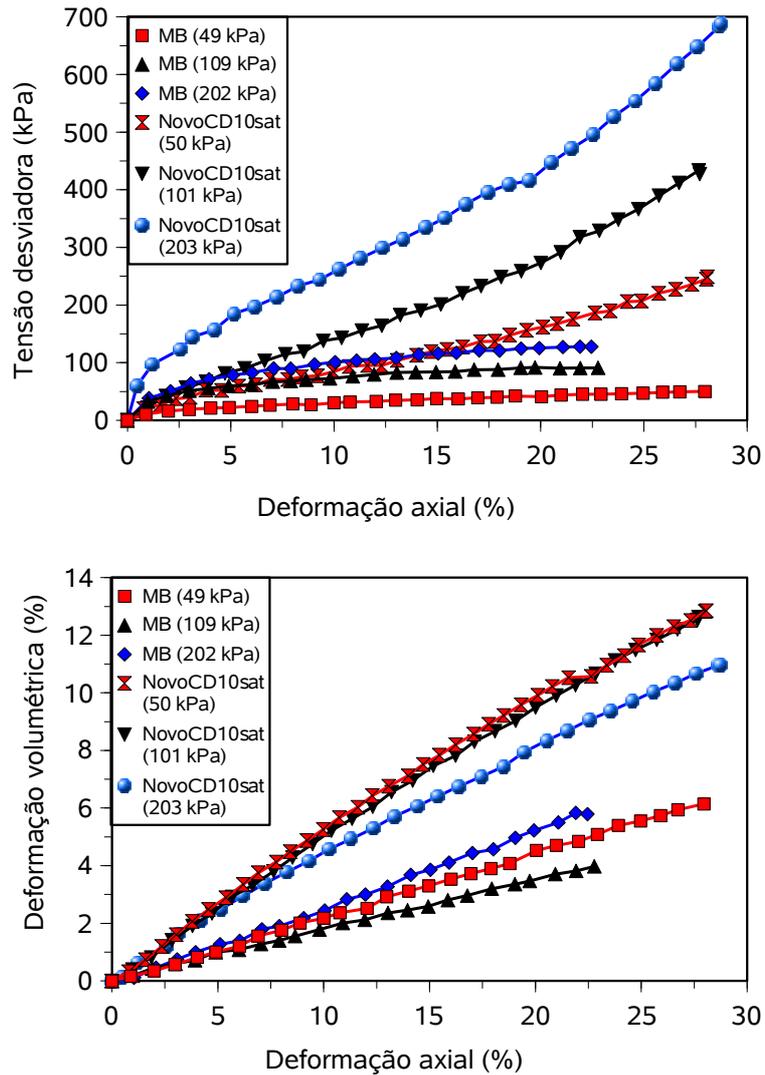


Figura 4.25. Curvas tensão versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial, obtidas para as amostras NovoMBCD12sat e NovoCD10sat.

Também para as curvas tensão-deformação do ensaio na amostra NovoCD12MBSat, foram traçadas no plano  $t \times s'$  as suas envoltórias para os diversos níveis de deformação, podendo-se, dessa forma, ter uma melhor apreciação da evolução dos seus parâmetros de resistência, Figura 4.26.

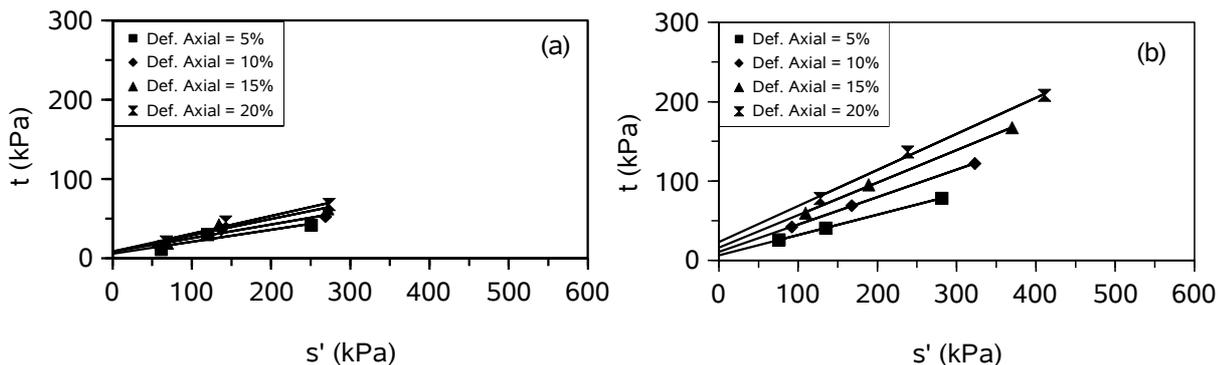


Figura 4.26. Envoltórias obtidas no plano  $t \times s'$  para a amostra NovoCD12MBsat (a) e NovoCD10sat (b).

Carvalho (1999) não observou diferenças significativas nos resultados de ensaios realizados em resíduos antigos com os ensaios na sua matriz básica. O autor credita a este comportamento a presença de fibras de tamanhos reduzidos que não foram possíveis de serem retirados manualmente.

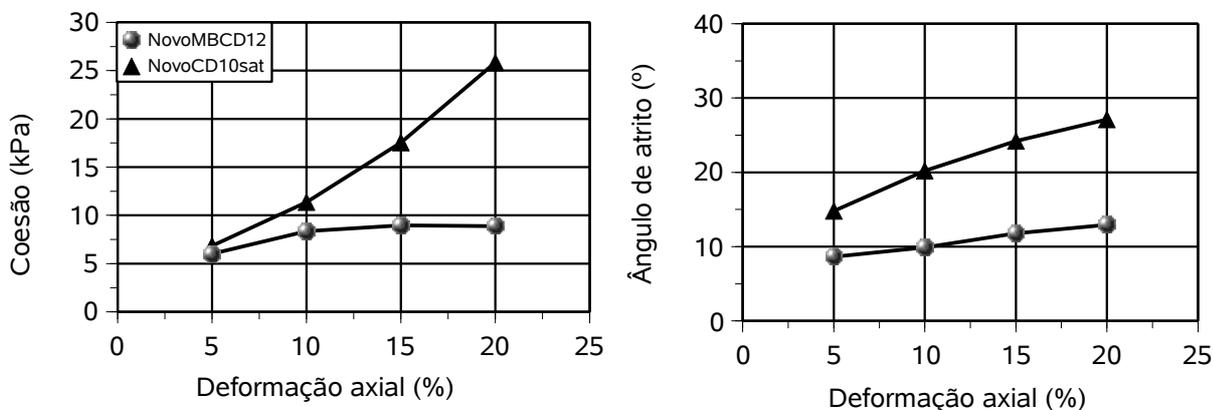


Figura 4.27. Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial das amostras NovoCD12satMB e NovoCD10sat.

Observa-se na Figura 4.27, que o valor da coesão do ensaio sem fibras se manteve praticamente constante para os diversos valores de deformação, e num valor mais baixo do que o do ensaio com os componentes de reforço, e mesmo o ângulo de atrito apresentou ser influenciado pela presença destes materiais, diferentemente dos resultados obtidos por Kockel e Jessberger (1995 apud König e Jessberger, 1997).

#### 4.4.2 Comportamento não-drenado dos RSU

As Figuras 4.28 e 4.29 apresentam os resultados dos ensaios CU nas amostra de resíduo novo e com 4 anos de aterrado. As duas amostras foram compactadas na umidade natural com peso específico de  $10 \text{ kN/m}^3$ .

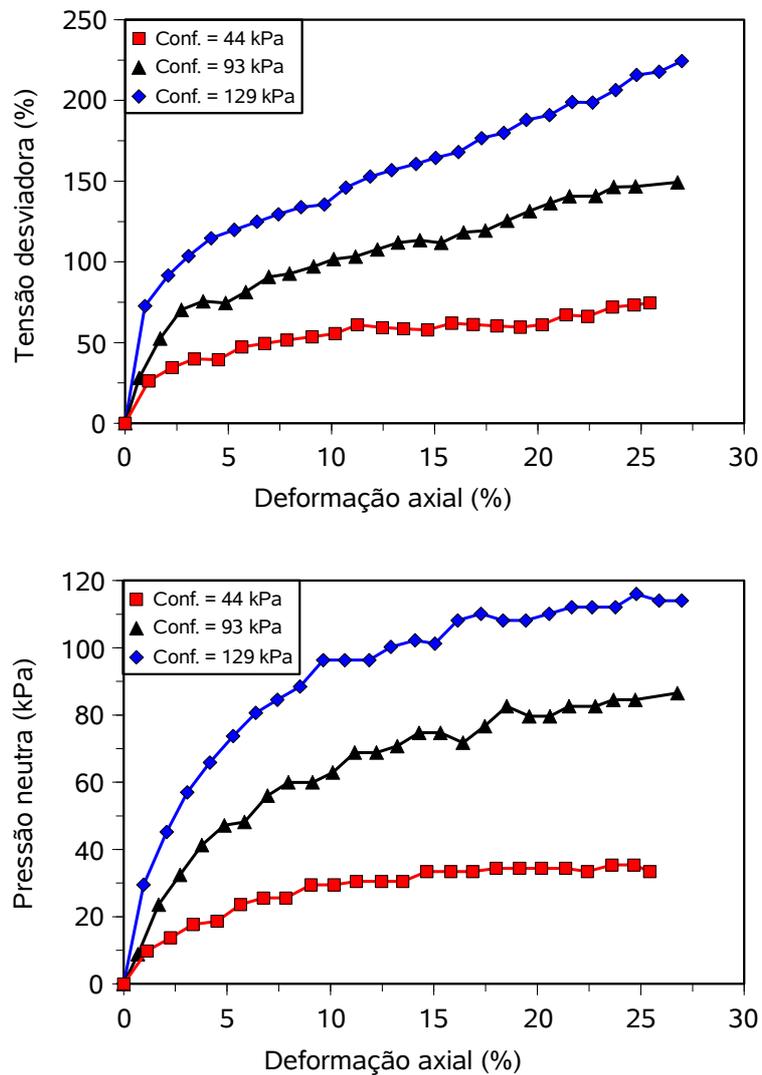


Figura 4.28. Curvas tensão versus deformação axial e pressão neutra versus deformação axial obtida para a amostra NovoCU10sat.

Como nos ensaios CD, as curvas tensão-deformação dos ensaios CU não apresentaram picos de ruptura, muito menos tendência de alcançar um valor máximo,

concordando com os resultados apresentados por Carvalho (1999), para resíduos com 15 anos de aterrado e por Caicedo et al. (2002) para resíduos com um ano de decomposição do Aterro Sanitário de Dona Juana em Bogotá. Durante o cisalhamento foram gerados altos valores de pressão neutra, com uma tendência de estabilização num valor próximo ao da tensão de confinamento.

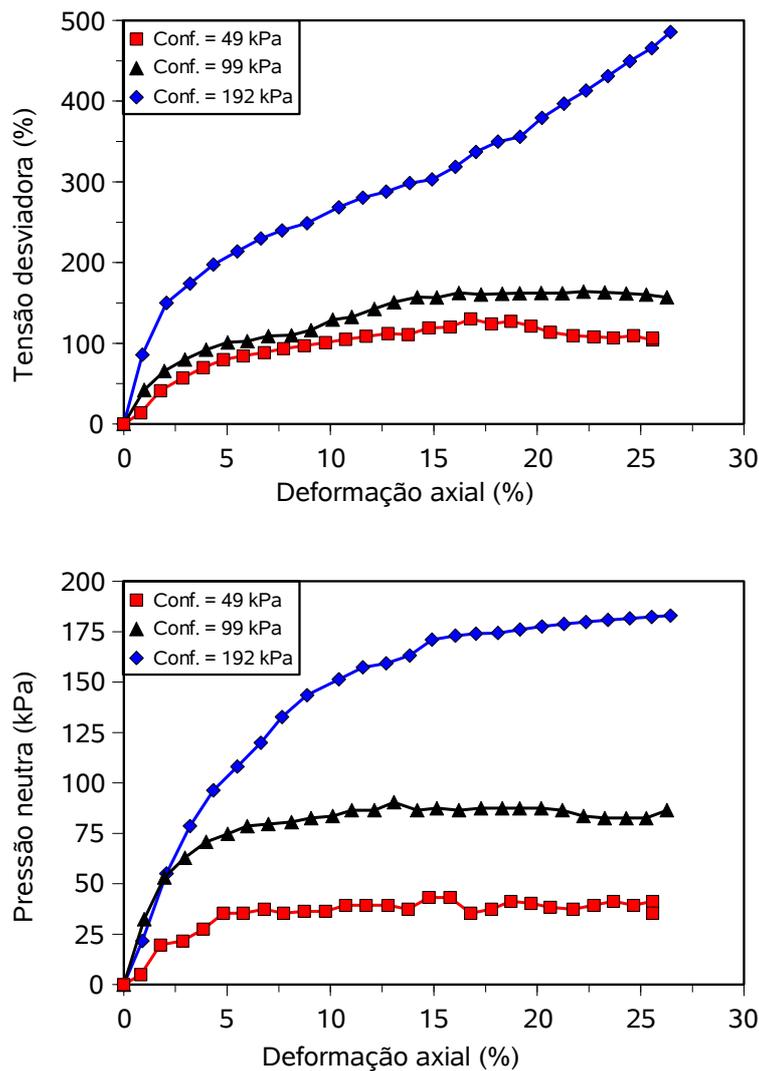


Figura 4.29. Curvas tensão versus deformação axial e pressão neutra versus deformação axial obtida para a amostra 4anosCU10sat.

Altos valores do parâmetro  $A$  de Skempton foram observados durante os ensaios, demonstrando um comportamento típico de materiais muito compressíveis que apresentam altos desenvolvimentos de pressão neutra quando submetidos ao cisalhamento (Figuras

4.30 e 4.31). Os valores dos parâmetros A de Skempton foram obtidos a partir da Equação (4.6).

$$A = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1} \quad (4.6)$$

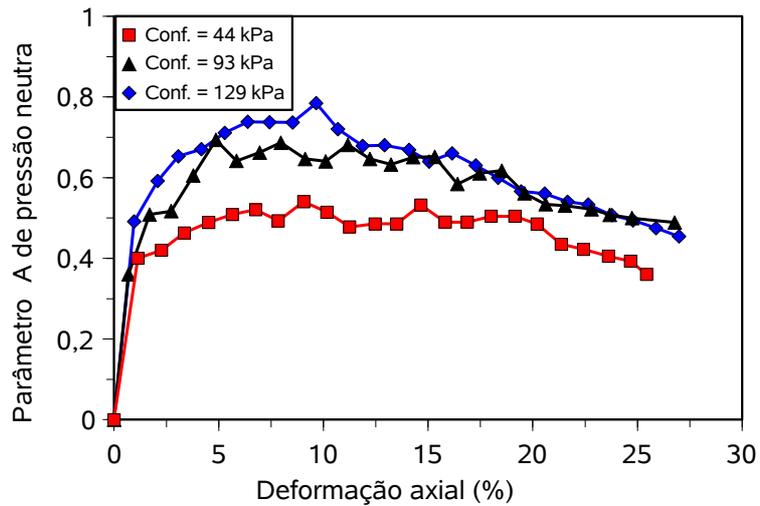


Figura 4.30. Variação do parâmetro A de Skempton versus a deformação axial para a amostra NovoCU10sat.

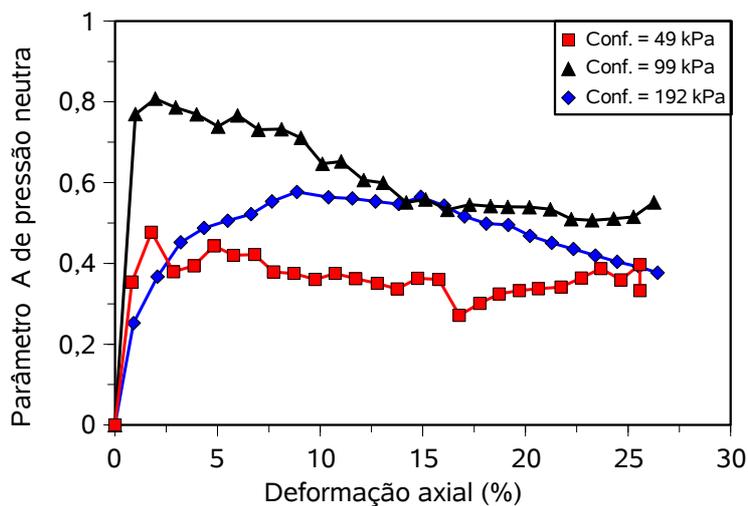


Figura 4.31. Variação do parâmetro A de Skempton versus a deformação axial para a amostra 4anosCU10sat.

A comparação entre as trajetórias de tensão totais e efetivas no plano  $t \times s$  e  $t \times s'$ , respectivamente, demonstram o efeito das elevadas pressões neutras positivas geradas

durante os ensaios, Figuras 4.32 e 4.33. É possível observar que, com o desenvolvimento das deformações axiais e das pressões neutras, as trajetórias efetivas se apresentam a esquerda das envoltórias totais, demonstrando um comportamento típico de materiais muito compressíveis.

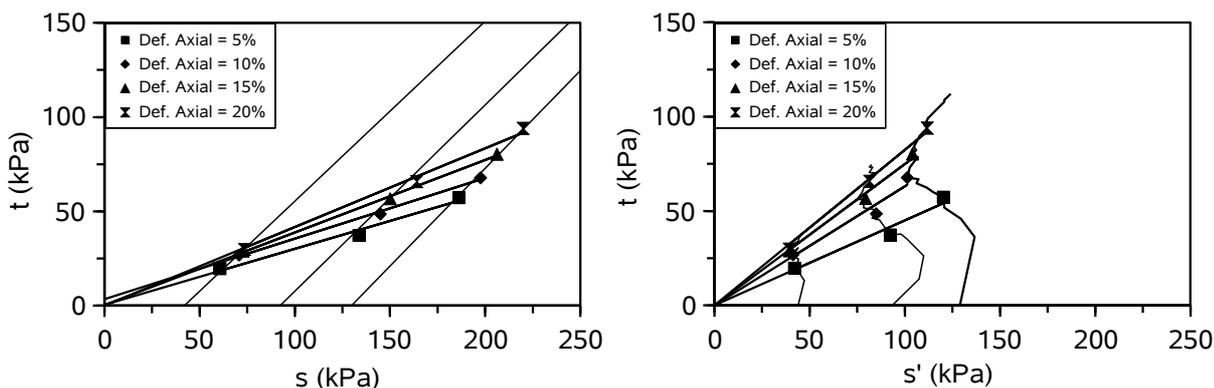


Figura 4.32. Envoltórias obtidas nos planos  $t \times s$  e  $t \times s'$  para a amostra NovoCU10sat.

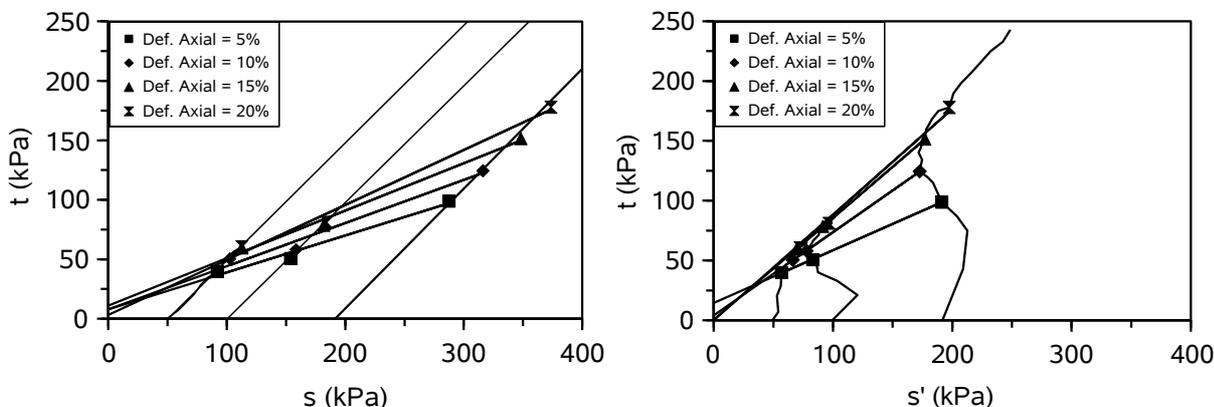


Figura 4.33. Envoltórias obtidas nos planos  $t \times s$  e  $t \times s'$  para a amostra 4anosCU10sat.

O desenvolvimento de elevados valores de pressão neutra durante o cisalhamento dos RSU provocam grandes distorções nas envoltórias efetivas das amostras. Isso dificulta bastante as análises em termos de tensões efetivas. Foram observados nos ajustes lineares das Figuras 4.32 e 4.33 elevados valores de ângulo de atrito e uma grande redução nos valores de coesão efetiva, inclusive com valores negativos, sendo, para estes casos, feitos ajustes obrigando as envoltórias a passar pela origem dos eixos coordenados. Para uma

deformação axial de 20 % na amostra de resíduo novo, seu valor de coesão efetiva foi nulo e seu ângulo de atrito foi 57,7°. O resíduo com 4 anos de aterrado também apresentou valor de coesão efetiva nulo, e seu ângulo de atrito foi de 66,0° para uma deformação axial de 20 %. Comparando estes resultados com os dos ensaios drenados, verifica-se um grande aumento nos valores dos ângulos de atrito efetivo para ambos os resíduos e uma redução nos valores de coesão.

A Tabela 4.10 apresenta, os valores de coesão e de ângulo de atrito, bem como a equação e o coeficiente de determinação, obtidos a partir dos gráficos apresentados nas Figuras 4.32 e 4.33, para diferentes níveis de deformação axial.

Tabela 4.10 - Parâmetros de resistência obtidos para resíduo sólido urbano coletado do aterro Metropolitano Centro.

Amostra	Trajetória	$\epsilon_a$ (%)	Equação (kPa)	$R^2$	Parâmetros	
					$c/c'$ (kPa)	$\phi/\phi'$ (°)
NovoCU10sat	Total	5	$t = 0,2990 s + 1,58$	0,9604	1,66	17,4
		10	$t = 0,3512 s + 1,33$	0,9871	1,42	20,6
		15	$t = 0,3782 s + 2,22$	0,9974	2,39	22,2
		20	$t = 0,4210 s$	0,9979	0,00	24,9
	Efetiva	5	$t = 0,4792 s' + 0,56$	0,9514	0,64	28,6
		10	$t = 0,6536 s'$	0,9907	0,00	40,8
		15	$t = 0,7683 s'$	1,0000	0,00	50,2
		20	$t = 0,8456 s'$	0,9997	0,00	57,7
4anosCU10sat	Total	5	$t = 0,3194 s' + 7,36$	0,9759	7,76	18,6
		10	$t = 0,3521 s' + 11,33$	0,9792	12,11	20,6
		15	$t = 0,3973 s' + 7,36$	0,9922	12,79	23,4
		20	$t = 0,4900 s'$	0,9889	0,00	29,3
	Efetiva	5	$t = 0,4823 s' + 11,70$	0,9996	13,36	28,8
		10	$t = 0,6812 s' + 6,89$	0,9995	9,41	42,9
		15	$t = 0,8527 s'$	0,9992	0,00	58,5
		20	$t = 0,9138 s'$	0,9990	0,00	66,0

É comum apresentar os resultados de ensaios CU em um gráfico que relaciona o parâmetro  $t$  ( $t = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ ) e a tensão efetiva de confinamento atuante no corpo de prova no início do

cisalhamento. O parâmetro  $t$  representa a resistência não drenada no ensaio CU para cada corpo de prova. São apresentadas na Figura 4.34 os valores da resistência não drenada em função da tensão confinante, obtidos dos ensaios CU, realizados nas amostras de resíduo novo e com 4 anos de aterrado. São mostrados os valores da resistência não drenada para diferentes níveis de deformação axial. No ensaio com resíduo novo, se verificou um bom ajuste linear entre o parâmetro  $t$  e a tensão confinante efetiva do início do cisalhamento. Para uma deformação axial de 20 %, a relação entre a resistência não drenada e a tensão de confinamento foi de 0,73. A amostra de resíduo com 4 anos de aterrado não apresentou a mesma relação. Como é possível observar na Figura 4.29, o corpo de prova ensaiado com tensão confinante de 100 kPa apresentou valores de tensão desviadora muito próximos do ensaio com tensão de confinamento de 50 kPa. Isso explica a não linearidade entre a relação da resistência não drenada e a tensão de confinamento para esta amostra.

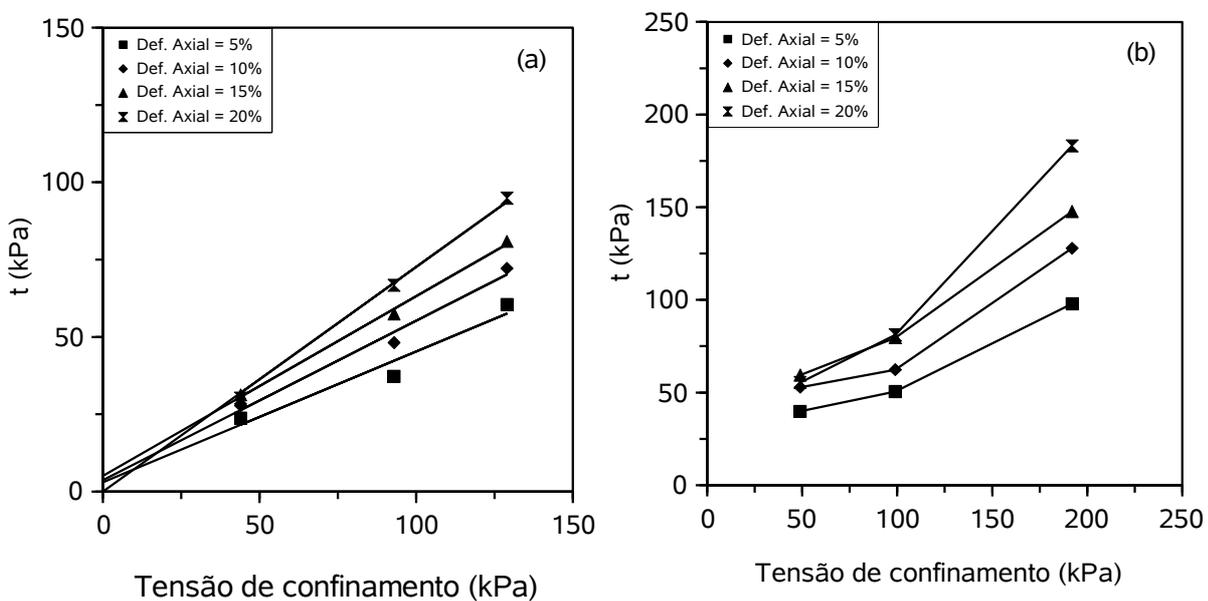


Figura 4.34. Relação entre a resistência não drenada e a tensão de confinamento obtidas do ensaio CU para as amostras NovoCU10sat (a) e 4anosCU10sat (b).

As Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam as condições de ensaio e as principais características dos corpos de prova submetidos aos ensaios de compressão triaxial, após o adensamento e após o seu cisalhamento.

Tabela 4.11 - Características dos corpos de prova submetidos aos ensaios de compressão triaxial, após adensamento.

Amostra	Ensaio	$\sigma'_{3c}$ (kPa)	$D$ (mm)	$h$ (mm)	$w$ (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e$	$S_r$ (%)
NovoCD10sat	1	50	201	331	-	-	5,71	2,03	-
	2	100	195	305	-	-	6,59	1,63	-
	3	200	186	297	-	-	7,46	1,32	-
NovoCD8sat	1	50	194	360	-	-	4,02	3,30	-
	2	100	182	320	-	-	5,12	2,38	-
	3	200	185	295	-	-	5,39	2,21	-
NovoCD10nat	1	50	205	371	-	-	4,36	2,96	-
	2	100	193	351	-	-	5,23	2,30	-
	3	200	167	350	-	-	7,02	1,46	-
NovoCD12MBsat	1	50	94	178	-	-	4,89	2,61	-
	2	100	90	165	-	-	5,76	2,07	-
	3	200	87	171	-	-	6,51	1,71	-
NovoCU10sat	1	50	192	367	111,33	10,64	5,03	2,43	79,08
	2	100	188	353	124,37	12,28	5,47	2,16	99,60
	3	150	179	337	101,37	12,75	6,33	1,73	101,21*
4anosCD10sat	1	50	202	285	-	-	6,36	2,49	-
	2	100	179	265	-	-	8,69	1,56	-
	3	200	181	255	-	-	8,81	1,52	-
4anosCD14sat	1	50	185	363	-	-	9,62	1,11	-
	2	100	183	367	-	-	9,81	1,07	-
	3	200	179	330	-	-	11,35	0,79	-
4anosCU10sat	1	50	196	399	89,18	12,07	6,38	2,19	82,92
	2	100	191	384	73,44	12,16	7,01	1,90	78,60
	3	200	176	328	77,66	15,00	8,44	1,41	112,06*

Tabela 4.12 - Características dos corpos de prova submetidos aos ensaios de compressão triaxial, após cisalhamento.

Amostra	Ensaio	$\sigma'_{3c}$ (kPa)	D (mm)	h (mm)	w (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	$S_r$ (%)
NovoCD10sat	1	50	224	228	100,6	13,42	6,69	1,58	109,74*
	2	100	218	202	53,28	12,11	7,90	1,19	77,67
	3	200	210	197	52,21	13,33	8,76	0,97	92,71
NovoCD8sat	1	50	211	260	117,87	10,22	4,69	2,69	75,86
	2	100	203	224	102,85	12,01	5,92	1,92	92,64
	3	200	219	194	72,92	13,22	5,84	1,96	99,97
NovoCD10nat	1	50	224	270	105,75	10,35	5,03	2,44	75,06
	2	100	217	250	46,94	8,48	5,77	2,00	40,65
	3	200	191	244	77,02	13,56	7,66	1,26	106,00*
NovoCD12MBsat	1	50	108	127	135,39	12,24	5,20	2,40	99,82
	2	100	101	127	106,06	12,37	6,00	1,94	96,42
	3	200	98	129	92,99	13,14	6,81	1,59	103,06
NovoCU10sat	1	50	222	274	111,33	10,64	5,03	2,43	79,08
	2	100	221	254	124,37	12,28	5,47	2,16	99,60
	3	150	214	235	101,37	12,75	6,33	1,73	101,21*
4anosCD10sat	1	50	227	202	44,72	10,32	7,13	2,12	46,96
	2	100	198	185	34,92	13,76	10,20	1,18	34,92
	3	200	201	179	28,23	13,06	10,18	1,18	53,04
4anosCD14sat	1	50	201	264	44,00	16,18	11,23	0,81	110,39*
	2	100	199	267	51,08	17,14	11,35	0,79	131,07*
	3	200	192	240	27,99	17,36	13,57	0,50	113,99*
4anosCU10sat	1	50	226	301	89,18	12,07	6,38	2,19	82,92
	2	100	223	281	73,44	12,16	7,01	1,90	78,60
	3	200	208	234	77,66	15,00	8,44	1,41	112,06*

Observam-se nas Tabelas 4.11 e 4.12 valores de grau de saturação superiores a 100 %, os quais representam um volume de água maior que o volume de vazios existente no corpo de prova, o que fisicamente não é possível de acontecer. Cabe lembrar que os demais índices físicos foram calculados, admitindo-se que o peso específico médio das partículas sólidas de cada corpo de prova não mudou, sendo igual ao obtido do ensaio de caracterização. Contudo, a composição de cada corpo de prova poderia variar de uma amostra para outra, alterando o peso específico médio das partículas sólidas e, conseqüentemente, o valor dos demais índices físicos.

Foram plotados no diagrama proposto por Sánchez-Alciturre et al. (1993) os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos estudados (Figura 4.34). Neste diagrama são mostrados as faixas de valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU para os diferentes métodos de ensaio. Foram plotados os pares de valores de coesão e ângulo de atrito referentes aos ensaios CD para os níveis de deformação de 10 ,15 e 20 %. Excetuando-se os resultados dos ensaios realizados na matriz básica, verificou-se que os dados obtidos se situaram dentro da faixa sugerida pro Sánchez-Alciturre et al. (1993) para os ensaios de laboratório.

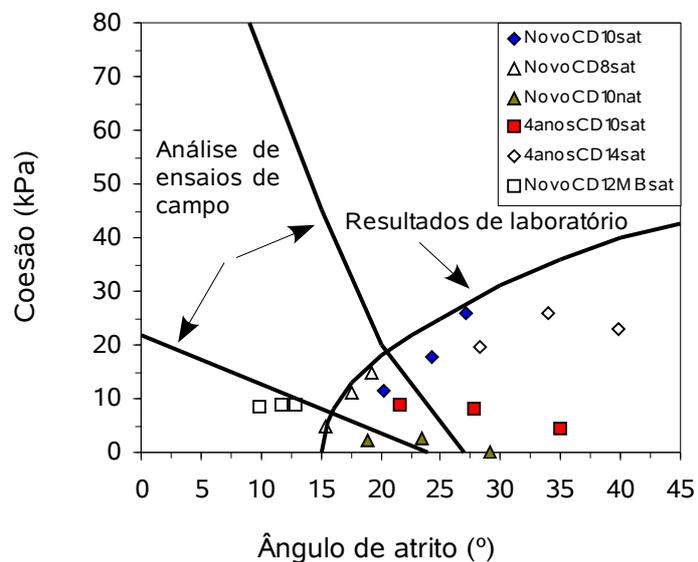


Figura 4.35. Parâmetro de resistência ao cisalhamento dos RSU, faixas de valores de diversos pesquisadores e valores obtidos dos ensaios realizados.

É apresentada na Figura 4.36 a envoltória de ruptura proposta por Kavazanjian et al. (1995), juntamente com as envoltórias obtidas para os resíduos estudados. É mostrado o conjunto de envoltórias no plano  $\sigma \times \tau$  obtidas a partir dos resultados dos ensaios drenados (CD) para os níveis de deformação de 10, 15 e 20%. As envoltórias dos ensaios realizados com a matriz básica de resíduo novo não foram incluídas na Figura 4.36, pois estes não representam o comportamento do RSU como um todo. Do conjunto de envoltórias obtido, é possível observar uma grande variação na inclinação e no coeficiente linear, que representam o ângulo de atrito e o intercepto de coesão, respectivamente. Observa-se que

a envoltória proposta por Kavazanjian et al. (1995) situa-se, praticamente, numa porção média do conjunto das envoltórias obtido.

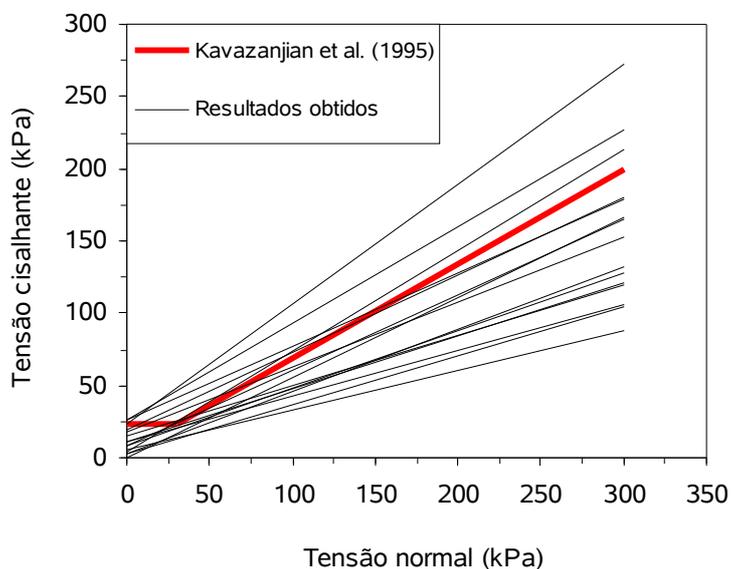


Figura 4.36. Envoltórias de resistência dos ensaios CD realizados em resíduos sólidos novo e com 4 anos de aterramento para diferentes níveis de deformação axial. Envoltória proposta por Kavazanjian et al. (1995).

Na Figura 4.37 são mostradas as envoltórias dos ensaios CD para o nível de deformação de 20 %, juntamente com a envoltória proposta por Kavazanjian et al. (1995). É possível observar que a amostra de quatro anos com peso específico de  $14 \text{ kN/m}^3$  foi a que apresentou maior ângulo de atrito, e a amostra de resíduo com  $10 \text{ kN/m}^3$  de peso específico, a que apresentou maior valor de intercepto de coesão. Para o nível de deformação de 20 % foram obtidos valores de ângulo de atrito variando de  $19,2$  à  $39,8^\circ$  e intercepto de coesão variando entre 0 e  $25,8 \text{ kPa}$ .

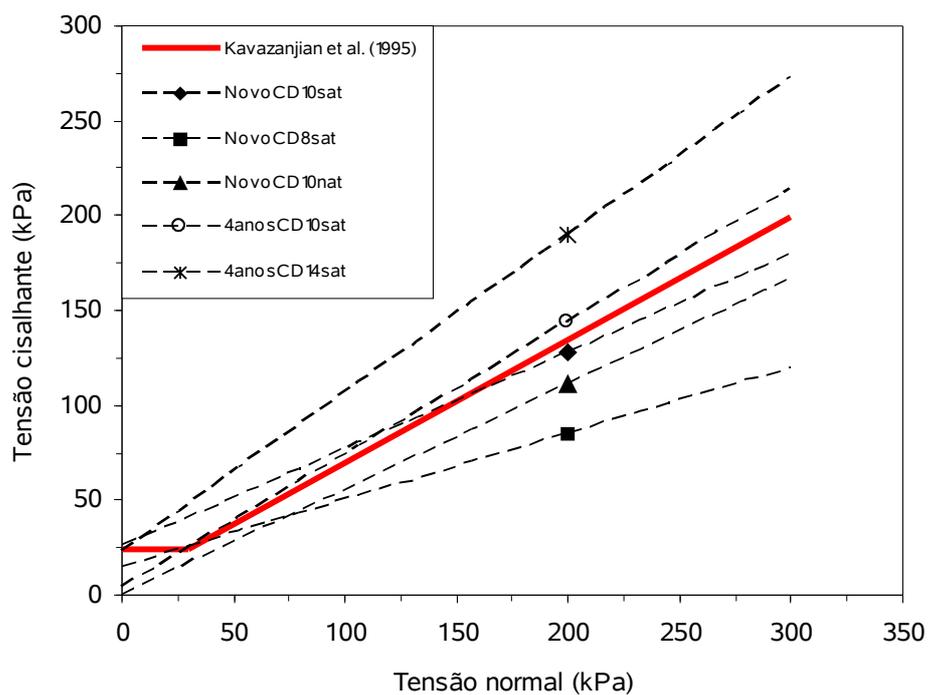


Figura 4.37. Envoltórias de resistência dos ensaios CD realizados em resíduos sólidos novo e com 4 anos de aterramento para o nível de deformação axial de 20 %. Envoltória proposta por Kavazanjian et al. (1995).



## Capítulo 5

### ***CONCLUSÕES***

---

Resíduos de diferentes idades, provenientes do Aterro Metropolitano Centro de Salvador, foram submetidos a diversos ensaios para a avaliação de suas propriedades mecânicas.

Foram realizados ensaios triaxiais e de compressão confinada em resíduos novos, coletados na frente de lançamento, e em resíduos com 4 anos de aterramento, obtidos através de escavação. Foram realizados ainda, durante os ensaios triaxiais, ensaios de permeabilidade em ambos os resíduos.

Os valores do coeficiente de permeabilidade encontrados para as mostras de resíduo novo e com 4 anos de aterramento situaram-se na ordem de  $10^{-3}$  cm/s e estão de acordo os diversos valores encontrados na literatura. Não foram observadas diferenças significativas entre os coeficientes de permeabilidade para os resíduos de diferentes idades. Comparando os resultados obtidos para resíduos com diferentes densidades, também não se observaram grandes mudanças nestes valores.

Foi feita uma tentativa de avaliar o efeito a biodegradação no comportamento de deformação dos RSU através da realização de ensaios de compressão confinada em resíduo novo. Para tentar incorporar o efeito da biodegradação, foi realizado um ensaio de compressão confinada com recirculação de chorume.

Apesar dos valores dos parâmetros de deformabilidade do ensaio com recirculação terem sido ligeiramente superiores aos do ensaio convencional, não ficou evidenciada a aceleração da decomposição do resíduo pelo processo de recirculação. A pequena variação nos resultados dos ensaios pode ter sido causada por diversos outros fatores, como a

própria composição das amostras. Dessa forma, a avaliação da influência da biodegradação nas características de deformabilidade do RSU ficou comprometida.

Comparando os resultados obtidos com os de outros trabalhos encontrados na literatura em resíduos de outras idades é possível verificar que os valores dos parâmetros de deformabilidade ( $C_\alpha$ ,  $C'_\alpha$ ,  $C_c$  e  $C'_c$ ) tenderam a diminuir com a idade do resíduo.

Dos ensaios de compressão triaxial foi possível observar que os parâmetros de resistência mobilizados tendem a aumentar com as deformações, num processo que parece ser comandado pelo efeito reforço dos materiais fibrosos (plásticos, têxteis).

Os ensaios triaxiais realizados em resíduos de diferentes idades não demonstraram diferenças pronunciadas nos parâmetros de resistência dos RSU, mesmo os materiais apresentando diferenças significativas em suas composições.

Os ensaios realizados em resíduos com diferentes idades tiveram como objetivo verificar os efeitos da decomposição do resíduo nas suas propriedades de resistência. No entanto, é importante observar que, apesar de pertencerem ao mesmo aterro sanitário, o resíduo com 4 anos de aterramento pode não apresentar as mesmas características do resíduo novo, caso este estivesse com a mesma idade de aterramento. Ou seja, para efeito de comparação, admitiu-se que o resíduo com 4 anos de aterramento seria o próprio resíduo novo estudado, após sofrer os processos de degradação.

O aumento do peso específico parece contribuir para o aumento da resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos, como verificado nos ensaios com diferentes pesos específico, demonstrando um comportamento similar ao dos solos.

Através de ensaios na matriz básica do resíduo novo, foi constatada a grande influência que os componentes de reforço atribuem ao RSU. Verificou-se que para a amostra sem a presença destes componentes, houve uma redução tanto nos valores de coesão como do ângulo de atrito.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR13292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR8419**: Apresentação de Projetos de Aterros de Resíduos Sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSIS, J. F. (1999). **Avaliação do uso de aterros, como alternativa para disposição de resíduos domiciliares e industriais**. 1999,126p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

AZEVEDO, R. F.; CARVALHO, A. R.; AZEVEDO, I. C. D.; MARQUES, E. A. G. (2003). **Varição 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, v.CD-ROM.

BIDONE, F. R. A. & POVINELLI, J. (1999). **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. São Carlos: EESC/USP, 120p.

CAICEDO, B., YAMIN, L., GIRALDO, E., CORONADO, O., SOLER, N. (2002) **Geomechanical Properties of Municipal Solid Waste in Doña Juana Sanitary Landfill**. 4th. International Congress on Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro, 2002. Proc. 4th. International Congress on Environmental Geotechnics. Amsterdam : Balkema v.1. p.177-182.

- CARVALHO, M. F. (1999). **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos. São Paulo.** 1999. 300p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- COUMOULOS, D. G.; KORYALOS, T. P.; METAXAS, I. L. & GIOKA, D. A. (1995). **Geotechnical Investigation at the Main Landfill of Athens.** Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995, p.885-895.
- DIXON, N.; JONES, R. D. V. (2005). **Engineering properties of municipal solid waste.** Geotextiles and Geomembranes, v.23, n.3, p.205-233.
- EL-FADEL, M.; SHAZBAK, S.; SALIBY, E.; LECKIE, J. (1999). **Comparative assessment models for municipal solid waste landfill applications.** Waste Management & Research, v 17, p.347-368.
- FUCALE, S. P.; JUCA, J. F. T. (2006). **Estudo Comparativo do Comportamento Resistente de Solos Reforçados e Resíduos Sólidos Urbanos.** In: XIII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba, v.3. p.1353-1358.
- GABR, M. A.; VALERO, S. N. (1995). **Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste.** Geotechnical Testing Journal, v.18, n.2, p.241-251.
- GRISOLIA, M.; NOPOLEONI, Q.; TANCREDI, G. (1995a). **Contribution to a Technical Classification of MSW.** Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, october 1995, p.705-710.
- GRISOLIA, M.; NOPOLEONI, Q.; TANCREDI, G. (1995b). **The Use of Triaxial Tests for the Mechanical Characterization of MSW.** Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, october 1995, p.761-768.
- GRISOLIA, M.; NOPOLEONI, 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 1996, v.2, p.641-646.
- HEAD, K. H. ( 1984). **Manual of Soil Laboratory Testing.** Vol 3: Effective Stress Tests. ELE International Limited, 1238p.

- IPT (2000). **Manual de gerenciamento integrado do lixo**. 2a Edição, São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, CEMPRE, 2000, 370p.
- JESSBERGER, H. L.; KOCKEL, R. (1993). **Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Materials**. Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, october 1993, p.1383-1392.
- JESSBERGER, H. L. (1994). **Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction. Part 1: Principles and Requirements**. Proc. Instn Civ. Engrs Geotechnical. Engineering, v.107, p.99-104.
- JONES, D.R.V., TAYLOR, D.P., DIXON, N., (1997). **Shear strength of waste and its use in landfill stability analysis**. In: Yong, R.N., Thomas, H.R. (Eds.), Proceedings Geoenvironmental Engineering Conference. Thomas Telford, p.343-350.
- JUCÁ, J. F. T (2003). **Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**. 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. REGEO 2003. Porto Alegre, Rio Grande de Sul.
- KÖNIG, D. & JESSBERGER, H.L. (1997). **Waste Mechanics**. In: ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics pg. 35-76.
- KNOCHENMUS, G.; WOJNAROWICZ, M. & VAN IMPE (1998). **Stability of Municipal Solid Wastes**. In: Proc. of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, Sêco e Pinto (ed.), Balkema, Rotterdam, p.977-1000.
- LANDVA, A. O. & CLARK, J. I. (1990). **Geotechnics of Waste Fill. Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice**, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, p.86-103.
- LEITE, J. C. (1995). **Metodologia para Elaboração da Carta de Susceptibilidade à Contaminação e Poluição das águas Subsuperficiais**. São Paulo, 1995, 219p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de SãoPaulo.
- LIU, C.; CHEN, R.; CHEN, K. (2006). **Unsaturated consolidation theory for the prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement**. Waste Management & Research, v 24, n 1, p 80-91.

- MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; VILAR, O. M. (2002). **Constitutive Model for Municipal Solid Waste**. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, ASCE, New York, v.128, n.11, p.940-951.
- MACHADO, S. L.; LEAL, L. R. B.; CARVALHO, M. F.; ROCHA, M. B.; LOPES, C. L.; NASCIMENTO, J. C. F. (2004). **CONVÊNIO DE COOPERAÇÃO TÉCNICA UFBA/VEGA. Relatório final de atividades – Primeiro biênio**. Disponível em: [http://www.geoamb.eng.ufba.br/ftp/arquivos/relatoriofinal\\_primeiro\\_bienio.pdf](http://www.geoamb.eng.ufba.br/ftp/arquivos/relatoriofinal_primeiro_bienio.pdf). Acesso em: 27 de abril de 2007.
- MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; DOURADO, K. A.; ROCHA, M. B.; LOPES, C. L. (2005). **Estudo da compressibilidade de resíduos sólidos urbanos da região metropolitana de Salvador/BA**. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005, Campo Grande.
- MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; NASCIMENTO, J. C. F.; DOURADO, K. A. (2006). **Aging effect on MSW mechanical behaviour**. In: VICEG: 5<sup>th</sup> International Congress on Environmental Geotechnics, Cardiff. v.2. p.1439-1446.
- 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, p. 1425 - 1474.
- MARIANO, M. O. H.; JUCÁ, J. F. T.(1998). **Monitoramento de Recalques no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca**. XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE GEOTÉCNICA, V.3, Brasília, p.1671-1678.
- MARQUES, A. C. M.; FILZ, G.; Vilar, O. M. (2002). **Landfill settlement calculations using a composite rheological model**. In: 4th. International Congress on Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro, 2002. Proc. 4th. International Congress on Environmental Geotechnics. Amsterdam : Balkema, v.1. p.21-26.
- MCBEAN, E. A.; ROVERS, F. A.; FARQUHAR, G. J. (1995). **Solid waste landfill engineering and desing**. Prentice Hall PTR. 521p.
- OLIVIER, F. & GOURC, J. P. (2007). **Hydro-mechanical behavior of Municipal Solid Waste subject to leachate recirculation in a large-scale compression reactor cell**. Waste Management, v 27, n 1, p 44-58.
- SÁNCHEZ-ALCITURRI, J.M.; PALMA, J.; SAGASETA, C. & CANIZAL, J. (1993). **Mechanical Properties of Wastes in a Sanitary Landfill**. In: Proc. International conference Green'93, Waste Disposal by Landfill – GREEN'93, Sarsby (ed), Balkema, Rotterdam, p.357-363.

- SCHALCH, V. (1992). **Análise Comparativa do Comportamento de Dois Aterros Sanitários e Correlações dos Parâmetros do Processo de Digestão Anaeróbia**. 1992. 220p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SIMÕES, G. F.; CAMPOS, T. M. P.; GALVÃO, T. C. B. e VARGAS JR, E. A. (1996). **Considerações Sobre o Fenômeno de Adensamento em Aterros Sanitários**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DA QUALIDADE AMBIENTAL, Porto Alegre. p.131-135.
- SIMÕES, G. F.; CAMPOS, T. M. P. (1998). **Modelos de Previsão de Recalques em Aterros Sanitários**. XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE GEOTÉCNICA, Brasília, Novembro de 1998. v.3 p.1679-1686.
- SIMÕES, G. F.; CAMPOS, T. M. P. (2003). **Proposta de Modelo Acoplado Mecânico e Biológico para a Previsão de Recalques em Aterros de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos**. In: 5 Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2003, Porto Alegre. Anais do 5 Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental.
- SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A.; GALVÃO, T. C. B.; BATISTA, H. P. (2003). **Monitoramento Geotécnico de Aterros Sanitários - A Experiência da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040 em Belo Horizonte - MG**. In: 5 Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2003, Porto Alegre. Anais do 5 Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2003.
- SIMONINI, P.; RONCH, M. (2004). **Use of EPS grains to simulate the behavior of MSW in simple shear**. Geotechnical Testing Journal, v.27, n.5, Setembro 2004, p.441-446.
- SOLER, N. D.; MAHER, A; CHAE, Y. S. & HAMIDI (1995). **A conceptual Model for Transient Settlements in Waste Fills**. In: Proc.UNSAT'95, Paris, Alonso & Delage (ed), p.411-416.
- SOWERS, G. F. (1973). **Settlement of Waste Disposal Fills**. In: Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering's, Moscow-URSS, 1973, v.2, parte 2, p.207-210.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. (1993). **Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues**. McGraw-Hill, Inc, 1993, 978p.
- VAN IMPE, W. F. (1998). **Environmental Geotechnics: ITC5 activities – State of the art**. In: Proc. of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, Sêco e Pinto (ed.), Balkema, Rotterdam, p.1163-1187.

- VILAR, O. M.; CARVALHO, M. F. (2002). **Shear Strength Properties of Municipal Solid Waste**. Proc. 4th. International Congress on Environmental Geotechnics. Amsterda: Balkema, v.1. p.59-64.
- VILAR, O. M.; CARVALHO, M. F. (2004). **Mechanical Properties of Municipal Solid Waste**. Geotechnical Testing Journal, ASTM, v.32, n.6, p.438-449.
- VILAR, O. M.; MARQUES, A. C. M. ; CARVALHO, M. F. ; MACHADO, S. L. (2006). **Some remarks on the mechanical properties and modeling of Municipal Solid Waste**. In: Simpósio Internacional de Tecnologias de Tratamento de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, 2006, v1.
- ZANTA, V.M.; FERREIRA, C. F. A. (2003). **Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos urbanos**. In: BORGES, A.C., ET AL. (Org.). Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte. 1 ed. Sao Carlos SP: Rima Artes e Textos, v.1, p.1-18.