



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES DE REFORÇO
NA RESISTÊNCIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS**

AUTORA: STELA PAULINO FUCALE

ORIENTADOR: JOSÉ FERNANDO THOMÉ JUCÁ

CO-ORIENTADOR: KAI MÜNNICH

RECIFE, SETEMBRO DE 2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

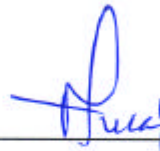
Milhares de livros grátis para download.

**INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES DE REFORÇO NA RESISTÊNCIA DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

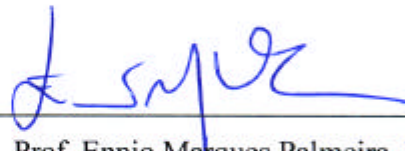
Stela Paulino Fucale

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

Aprovada por:



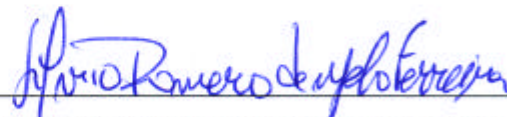
Prof. José Fernando Thomé Jucá, D.Sc.
(Presidente)



Prof. Ennio Marques Palmeira, PhD.



Prof. Gustavo Ferreira Simões, D.Sc.



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



Profa. Maria Cristina Moreira Alves, D.Sc.

Recife, PE - Brasil

Setembro de 2005

F949i

Fucale, Stela Paulino

Influência dos componentes de reforço na resistência de resíduos sólidos urbanos / Stela Paulino Fucale. – Recife: O Autor, 2005.

xxviii, 216 f., il., figs., tabs., gráfs., fots.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, 2005.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil. 2. Geotecnia Ambiental. 3. Resíduos Sólidos Urbanos. 4. Aterros Sanitários. 5. Resistência. I. Título.

621 CDD 22. ed.

BCTG/2006-41

DEDICATÓRIA

Ao meu esposo e queridíssimo amigo Emilio Luiz Sukar Neto, que foi imprescindível para a realização deste trabalho, estando ao meu lado em todos os momentos, incentivando e colaborando. Não mediu nenhum esforço em me acompanhar no meu Doutorado Sandwich na Alemanha, que consistiu num grande desafio pessoal e profissional. Acreditou sempre em minha capacidade e mostrou-me que o crescimento e maturidade são conquistados com disciplina, perseverança e amor pelo que se faz.

AGRADECIMENTOS

Ao meu querido Deus, que esteve sempre ao meu lado, principalmente nos momentos que mais necessitava, dando força, inspiração, tranquilidade e esperança.

Ao meu esposo Emilio, por seu amor, compreensão, paciência e estímulo, fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Giacomo e Josmei, e todos familiares por acreditarem em meu potencial profissional, não medindo esforços em me apoiar e incentivar.

Ao Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá, mestre e orientador, pelas valiosas e determinantes orientações, sugestões e críticas, pelo constante apoio, amizade e estímulo para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Klaus Fricke da Universidade Técnica de Braunschweig (TUBS), Alemanha, por ter permitido o desenvolvimento dos estudos experimentais desta pesquisa no laboratório do Leichtweiss Institut durante o Doutorado Sandwich.

Ao Dr. Kai Münnich da Universidade Técnica de Braunschweig, Alemanha, pelo apoio na orientação, por suas sugestões e pelo acompanhamento durante a realização dos ensaios laboratoriais.

Ao engenheiro civil e doutorando Jan Bauer da Universidade Técnica de Braunschweig, Alemanha, pelos esclarecimentos prestados para a execução dos ensaios de laboratório.

Ao Dr. Florian Kölsch pelas valiosas sugestões para minha pesquisa e discussões nas análises dos ensaios de resistência em resíduos sólidos, além da amizade e alegria que me proporcionou durante a fase do meu Doutorado Sandwich.

Aos Professores Washington Amorin e Ézio Araújo do Departamento de Engenharia Civil da UFPE pelo apoio no desenvolvimento do projeto de uma caixa de cisalhamento direto de maiores dimensões, que servirá posteriormente para futuras pesquisas.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da UFPE, área Geotecnia, por todo apoio, incentivo e amizade.

À equipe técnica do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE, em especial Antônio Brito e Severino Costa (“Fufu”), e do Laboratório do Leichtweiss Institut da TUBS, em especial Ulrich Schiemann, pela amizade e atenção recebida durante todo o curso.

Aos amigos e amigas da Pós-Graduação da UFPE pela convivência e incentivos recebidos durante esta pesquisa, em especial: Sylvana, Keila, Joãozinho, Odete, Kalliny Felipe, Veruschka, Marília.

Aos funcionários do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE, pela convivência e amizade.

Ao CNPq pelo suporte financeiro através das bolsas de estudo no Brasil e na Alemanha, que foram imprescindíveis durante a realização deste trabalho.

Ao DAAD pelo suporte financeiro através de bolsa de estudo para aprendizado do idioma Alemão no interDaf, na cidade de Leipzig – Alemanha.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho.

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

INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES DE REFORÇO NA RESISTÊNCIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Stela Paulino Fucale

Setembro de 2005

Orientador: José Fernando Thomé Jucá (UFPE, Brasil)

Co-orientador: Kai Münnich (TUBS, Alemanha)

Programa: Engenharia Civil

Esta tese apresenta os resultados de uma investigação de laboratório em resíduos sólidos urbanos, no que diz respeito ao estudo do comportamento mecânico da matriz básica (materiais granulares) e matriz de reforço (fibras), que são os componentes típicos encontrados neste tipo de material, com a finalidade de observar a influência destes elementos de reforço na resistência ao cisalhamento. Ensaios de cisalhamento direto convencionais e de maiores dimensões foram conduzidos em amostras de resíduos sólidos velhos e de resíduos sólidos resultante de pré-tratamento mecânico e biológico para verificar a influência da incorporação de diferentes porcentagens de fibras no comportamento mecânico e nos parâmetros de resistência. Uma série de ensaios de resistência (cisalhamento direto convencional) foi também realizada em amostras de solo, sem e com inclusão de fibras, no intuito de investigar o comportamento mecânico de solos reforçados com fibras plásticas distribuídas aleatoriamente e verificar uma possível analogia entre o comportamento destes materiais e dos resíduos sólidos. O estudo permitiu confirmar que os elementos de reforços (plásticos, têxteis, fibras, dentre outros), que compõem a massa de resíduos sólidos nos aterros, desempenham um papel muito importante no comportamento mecânico do material como um todo. Eles são responsáveis pelos altos valores dos parâmetros de resistência e das tensões cisalhantes, mobilizadas também devido às forças de tração destas fibras, bem como pelas condições de estabilidade observadas na maioria dos casos de taludes de resíduos sólidos.

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

INFLUENCE OF THE REINFORCEMENT COMPONENTS IN THE RESISTANCE OF
MUNICIPAL SOLID WASTE

Stela Paulino Fucale

September/2005

Advisor: José Fernando Thomé Jucá (UFPE, Brasil)

Co-advisor: Kai Münnich (TUBS, Alemanha)

Department: Civil Engineering

This thesis presents the results of a laboratory study of the mechanical behavior of the basic matrix (granular materials) and reinforcement matrix (fibers) of urban solid waste (these being the typical components found in this type of material), with the goal of observing the influence of these reinforcement elements on shear strength. Conventional and large-scale direct shear tests were conducted on samples of old solid waste and solid waste resulting from mechanical and biological pre-treatment in order to verify the influence of the incorporation of different percentages of fiber on the mechanical behavior and on the strength parameters. A series of strength tests (conventional direct shear) were also conducted on soil samples, with and without the inclusion of fibers, in order to investigate the mechanical behavior of soils reinforced with randomly distributed plastic fibers and verify a possible similarity between the behavior of these materials and of solid wastes. The study confirmed that the reinforcement elements (plastics, textiles, fibers, among others), which compose the bulk of solid waste in landfills, perform a very important role in the mechanical behavior of the material as a whole. They are responsible for the high strength and shear stress parameter values, caused by the tensile forces of these fibers, which are also responsible for the conditions of stability observed in the majority of slopes composed of solid wastes.

ÍNDICE

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais.....	1
1.2. Objetivo e Metodologia.....	4
1.3. Estrutura da Tese.....	6

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Propriedades Geotécnicas dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	8
2.2. Modelos Geotécnicos.....	10
2.3. Parâmetros de Resistência.....	13
2.4. Investigação Geotécnica.....	19
2.4.1 Ensaio de Laboratório.....	19
2.4.1.1. Ensaio de Cisalhamento Direto.....	20
2.4.1.2. Ensaio Triaxial.....	38
2.4.2. Ensaio de Campo.....	51
2.4.2.1. SPT.....	52
2.4.2.2. CPT.....	57
2.4.2.3. Ensaio de Cisalhamento Direto.....	64
2.5. Parâmetros de Resistência Cisalhamento Compilados da Literatura.....	68

CAPÍTULO III – MODELO GEOTÉCNICO BASEADO NO EFEITO DE REFORÇO DAS FIBRAS PARA ESTUDO DA RESISTÊNCIA DOS RSU – EXPERIÊNCIA ALEMÃ

3.1. Introdução.....	76
3.2. Resistência ao Cisalhamento de Material Reforçado.....	76
3.3. Descrição do Modelo.....	81
3.4. Características de Reforço.....	84
3.4.1. Definição.....	84
3.4.2. Parâmetros do Material.....	85
3.4.2.1. Cálculo da Coesão Ativada pelas Fibras.....	87
3.5. Resultados de Ensaio de Tração.....	90
3.6. Procedimentos de Cálculo de Estabilidade.....	91
3.7. Considerações Finais.....	93

CAPÍTULO IV – METODOLOGIA DOS ENSAIOS E MATERIAIS

4.1. Introdução.....	95
4.2. Programa de Investigação.....	95
4.3. Ensaios de Laboratório.....	97
4.3.1. Ensaios em Solo e Mistura Solo-Fibra.....	97
4.3.1.1. Ensaios de Caracterização.....	97
4.3.1.2. Ensaios de Resistência (Cisalhamento Direto Convencional).....	98
4.3.1.2.1. Preparação das Amostras.....	99
4.3.2. Ensaios em Resíduos Sólidos Urbanos.....	101
4.3.2.1. Ensaios de Caracterização.....	101
4.3.2.1.1. Identificação.....	102
4.3.2.1.2. Análise dos Constituintes.....	103
4.3.2.1.3 Descrição do Estado.....	104
4.3.2.1.4. Compactação.....	106
4.3.2.2. Ensaios de Cisalhamento Direto.....	108
4.3.2.2.1. Equipamento Convencional.....	108
4.3.2.2.1.1. Preparação das Amostras.....	110
4.3.2.2.2. Equipamento de Maiores Dimensões.....	113
4.3.2.2.2.1. Preparação das Amostras.....	117

CAPÍTULO V – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Introdução.....	122
5.2. Ensaios em Amostras de Solo e Mistura Solo-Fibra.....	122
5.2.1. Caracterização e Compactação.....	122
5.2.2. Cisalhamento Direto Convencional.....	123
5.3. Ensaios em Amostras de Resíduos Sólidos Urbanos.....	132
5.3.1. Ensaios de Caracterização.....	132
5.3.1.1. Análise dos Constituintes.....	132
5.3.1.2. Distribuição do Tamanho das Partículas.....	135
5.3.1.3. Forma dos Constituintes.....	137
5.3.1.4. Teor de Sólidos Voláteis.....	138
5.3.1.5. Compactação.....	138
5.3.2. Ensaios de Resistência.....	142

5.3.2.1. Equipamento de Cisalhamento Direto Convencional.....	142
5.3.2.1.1. Matriz Básica dos Resíduos Sólidos Velhos - Aterro de Ihlenberg	142
5.3.2.2. Equipamento de Cisalhamento Direto de Maiores Dimensões.....	151
5.3.2.2.1. Resíduos Sólidos Velhos - Aterro de Ihlenberg.....	151
5.3.2.2.1.1. Matriz Básica.....	151
5.3.2.2.1.2. Matriz Composta.....	158
5.3.2.2.1.3. Matriz Composta Reforçada.....	162
5.3.2.2.1.4. Comparação dos Ensaios.....	167
5.3.2.2.2. Resíduos Sólidos Pré-tratados Mecânica e Biologicamente - Aterro de Buchen.....	173
5.3.2.2.2.1. Matriz Básica.....	173
5.3.2.2.2.2. Matriz Composta 1.....	177
5.3.2.2.2.3. Matriz Composta 2.....	181
5.3.2.2.2.4. Comparação dos Ensaios.....	184
5.3.2.2.3. Considerações Finais dos Ensaios em Amostras de Resíduos Sólidos Velhos e Resíduos Sólidos Pré-tratados Mecânica e Biologicamente.....	192

CAPÍTULO VI – PRINCIPAIS CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

6.1. Principais Conclusões.....	196
6.1.1. Ensaios de Resistência em Solo e Mistura Solo-Fibra.....	196
6.1.2. Ensaios de Resistência em Resíduos Sólidos Urbanos.....	197
6.1.2.1. Equipamento Convencional (Resíduos Sólidos Velhos – Aterro de Ihlenberg).....	197
6.1.2.2. Equipamento de Maiores Dimensões (Resíduos Sólidos Velhos - Aterro de Ihlenberg e Resíduos Sólidos Pré-tratados Mecânica e Biologicamente – Aterro de Buchen).....	198
6.2. Sugestões para Pesquisas Posteriores.....	202

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	204
--	------------

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura II.1 – Representação esquemática dos vários estágios de deformação volumétrica de uma amostra de RSU – GRISOLIA & NAPOLEONI (1996).....	12
Figura II.2 - Modelo esquemático da composição de RSU semelhante a solos reforçados – JESSBERGER et al. (1995) e KÖNIG & JESSBERGER (1997).....	13
Figura II.3 – Relação tensão-deformação típica dos RSU em ensaios triaxiais – MANASSERO et al. (1996).....	15
Figura II.4 – Tensão desviatória em função da deformação axial para areias, areias + fibras e RSU – MANASSERO et al. (1996).....	16
Figura II.5 – Deformação dependente da ativação do ângulo de atrito e do intercepto coesivo – KOCKEL (1995).....	17
Figura II.6 – Envoltórias de resistência de resíduos sólidos com idade entre 1 e 3 anos – JESSBERGER et al. (1995).....	18
Figura II.7 – Envoltória de ruptura para diferentes materiais – MANASSERO et al. (1996).....	18
Figura II.8 – Ensaio de cisalhamento em resíduo sólido modelado – Processo de cisalhamento característico – KÖLSCH (1990).....	22
Figura II.9 – Ensaio de resistência em resíduo sólido modelado – KÖLSCH (1990).....	22
Figura II.10 – Ensaio de cisalhamento direto em amostras de resíduos em aterros do Canadá – LANDVA e CLARK (1990).....	23
Figura II.11 – Esquema do equipamento de cisalhamento direto: (1) armação de aço; (2) parede de concreto; (3) macaco de tensão normal; (4) macaco de tensão cisalhante; (5) fardos de resíduos; (6) placa com rolamento; (7) e (8) placas de aço; (9) ancoragem do fardo inferior – DEL GRECO & OGGERI (1993).....	25
Figura II.12 – Diagramas $\tau - \sigma$ de ensaios de cisalhamento direto realizados em fardos de resíduos sólidos: A) Baixa densidade. B) Alta densidade. – DEL GRECO & OGGERI (1993).....	25
Figura II.13 – Equipamento para ensaio de cisalhamento direto. A) Início do ensaio. B) Fase de cisalhamento – COLLINS & KÖLSCH (1996).....	27

Figura II.14 – Diagrama tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – COLLINS & KÖLSCH (1996).....	28
Figura II.15 – Ensaio de cisalhamento de grandes dimensões em resíduo sólido novo – COLLINS & KÖLSCH (1996).....	28
Figura II.16 - Ensaio de cisalhamento de grandes dimensões em resíduo sólido antigo – COLLINS & KÖLSCH (1996).....	28
Figura II.17 – Diagrama de tensão cisalhante versus deformação, séries 1 e 2 – MÜNNICH (2001).....	31
Figura II.18 – Envoltórias de resistência de resíduos pré-tratados - FEHRER (2002) e ZIEGLER & FEHRER (2003).....	35
Figura II.19 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal de resíduos pré-tratados. A) Material passado na peneira 3/4". B) A) Material passado na peneira 3/8". – LAMAREDO NETO (2004).....	36
Figura II.20 – Envoltórias de resistência de resíduos pré-tratados. A) Material passado na peneira 3/4". B) Material passado na peneira 3/8". – LAMAREDO NETO (2004).....	36
Figura II.21 – Ensaio triaxiais em resíduos sem seus componentes de reforço – JESSBERGER & KOCKEL (1991).....	40
Figura II.22 – Resultados de ensaios de compressão triaxial – JESSBERGER & KOCKEL (1993).....	41
Figura II.23 –Variação dos parâmetros de resistência ao longo de deformação axial de resíduos de diferentes idades – KOCKEL (1995), JESSBERGER et al. (1995) e KONIG & JESSBERGER (1997).....	42
Figura II.24 – Resistência ao cisalhamento mobilizada sob várias condições – Modificada por KOCKEL (1995).....	43
Figura II.25 – Variação do intercepto de coesão com o teor de umidade – GABR e VALERO (1995).....	44
Figura II.26 – Curvas tensão – deformação obtidas de ensaios triaxiais – GRISOLIA et al. (1995).....	45
Figura II.27 – Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial – GRISOLIA et al. (1995).....	45
Figura II.28 – Diagrama $q \times p'$ para diferentes níveis de deformação dos RSU – GRISOLIA et al (1995).....	46

Figura II.29 – Ensaio triaxiais CD em amostras de RSU do aterro Bandeirantes - SP – CARVALHO (1999).....	48
Figura II.30 – Resultados de ensaios triaxiais em RSU – CAICEDO et al. (2002)..	49
Figura II.31 – Ensaio SPT executado em um aterro controlado, Geórgia, USA – SOWERS (1968).....	52
Figura II.32 – Ensaio de penetração dinâmica (SPT) realizados no aterro sanitário “El Molle”, Valparaíso, Chile – ESPINACE et al. (1991).....	53
Figura II.33 – Resistência à penetração do SPT para o Aterro Meruelo (Espanha) – SÁNCHEZ-ALCITURRI et al. (1993).....	54
Figura II.34 – Resistência à penetração (SPT) do resíduo sólido no Aterro Ano Liossia, Atenas (Grécia) - COUMOULOS et al. (1995).....	55
Figura II.35 – Perfil do furo de sondagem típico, incluindo SPT e torques – Aterro Sanitário Bandeirantes – CARVALHO (1999).....	56
Figura II.36 – Variação dos valores de SPT com a profundidade (GRS/UFPE) - JUCÁ (2003) e JUCÁ et al. (2005).....	57
Figura II.37 – Ensaio de penetração estática (CPT) no aterro controlado de Arnouville-lès-Mantes – CARTIER & BALDIT (1983).....	58
Figura II.38 – Ensaio CPT realizado no aterro controlado de Monterey Park, Califórnia, USA - SIEGAL et al. (1990).....	59
Figura II.39 – Resultado típico de CPT em resíduos sólidos no Aterro de Maldegem (Bélgica) – BOUAZZA et al. (1996).....	60
Figura II.40 – Ensaio de penetração do cone (CPT-01) – Aterro Sanitário Bandeirantes – CARVALHO (1999).....	62
Figura II.41 – Ensaio de penetração do cone (CPT-02) – Aterro Sanitário Bandeirantes – CARVALHO (1999).....	62
Figura II.42 – Resultados de ensaios CPT - Célula 1 do Aterro da Muribeca - JUCÁ et al. (2005).....	63
Figura II.43 – Equipamento de cisalhamento direto - MAZZUCATO et al. (1999).....	65
Figura II.44 – Resultados de ensaios em amostras indeformada e reconstruída de resíduos sólidos – MAZZUCATO et al. (1999).....	66
Figura II.45 – A) Deslocamento horizontal versus tensão cisalhante. B) Tensão cisalhante versus tensão normal – Aterro Sanitário Dona Juana, Colômbia – CAICEDO et al. (2002).....	68

Figura II.46 – Parâmetros de resistência de ensaios de laboratório – SINGH e MURPHY (1990).....	69
Figura II.47 – Gráfico sumário de vários ensaios com faixa de parâmetros recomendados para projeto - SINGH e MURPHY (1990).....	70
Figura II.48 – Resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos, recomendação de valores para projeto - SÁNCHEZ-ALCITURRI et al. (1993).....	70
Figura II.49 – Resultados de resistência ao cisalhamento de RSU obtidos de várias fontes – MANASSERO (1997).....	71
Figura II.50 – Envoltórias de ruptura proposta para RSU – KNOCHENMUS et al. (1998).....	72

CAPÍTULO III – MODELO GEOTÉCNICO BASEADO NO EFEITO DE REFORÇO DAS FIBRAS PARA ESTUDO DA RESISTÊNCIA DOS RSU – EXPERIÊNCIA ALEMÃ

Figura III.1 – Efeito de reforço através da mobilização de tensões de tração interna – KÖLSCH (1996).....	77
Figura III.2 – Mecanismo de Ruptura de um muro reforçado (SERÉ & THAMM, 1992).....	78
Figura III.3 – Efeito da adição de fibras no comportamento de ruptura de uma areia (MAHER & GRAY, 1990).....	79
Figura III.4 – Anisotropia da coesão do TEXSOL - HEUN & SCHMIDT (1990)..	80
Figura III.5 – Ativação da coesão das fibras em dependência do ângulo ϑ – JEWELL & WROTH (1987).....	81
Figura III.6 – Comportamento do resíduo sólido – Modelo de interação entre as forças de atrito e tração – KÖLSCH (1993, 1995, 1996).....	82
Figura III.7 – Comportamento do resíduo sólido – Aumento da resistência ao cisalhamento devido às forças de tração – KÖLSCH (1993, 1995, 1996).....	82
Figura III.8 – Definição para a descrição das propriedades de tração – KÖLSCH (1996).....	84
Figura III.9 – Sobreposição das resistências ao cisalhamento – KÖLSCH (1997).....	85
Figura III.10 – Ensaio de tração dependente da pressão – KÖLSCH (1996).....	87

Figura III.11 – Equilíbrio de forças em um elemento reforçado horizontalmente - KÖLSCH (1996).....	88
Figura III.12 – Grau de ativação teórico da coesão das fibras – KÖLSCH (1996)..	89
Figura III.13– Ensaio de tração – Tensões e ângulos de tração – KÖLSCH (1996).....	91

CAPÍTULO V – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Figura V.1 – Resultados dos ensaios de compactação para amostras de argila e mistura argila-fibras geotécnicas (2%).....	123
Figura V.2 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Argila – Umidade Ótima.....	124
Figura V.3 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Argila + Fibras Geotécnicas (2%) – Umidade Ótima.....	124
Figura V.4 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Argila + Fibras de Resíduos sólidos (2%) – Umidade Ótima.....	125
Figura V.5 – Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal em diferentes tensões normais aplicadas – Argila e misturas argila-fibra.....	125
Figura V.6 – Envoltórias de resistência para as amostras de argila e misturas argila-fibra – Umidade Ótima.....	127
Figura V.7 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Argila – Ramo Úmido.....	129
Figura V.8 – Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Argila – Umidade Ótima e Ramo Úmido.....	129
Figura V.9 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Argila + Fibras Geotécnicas (2%) – Ramo Úmido.....	130
Figura V.10 – Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Argila + Fibras Geotécnicas (2%) – Umidade Ótima e Ramo Úmido.	130
Figura V.11 – Envoltórias de resistência para as amostras de argila e amostras de argila + fibras geotécnicas (2%) – Umidade Ótima e Ramo Úmido.....	131
Figura V.12 – Distribuição dos constituintes dos resíduos velhos depositados no aterro.....	132

Figura V.13 - Distribuição dos constituintes da matriz composta ($\phi < 30$ mm) – Resíduos velhos.....	132
Figura V.14 – Distribuição dos constituintes dos RSU que chegam ao Aterro de Buchen antes do pré-tratamento mecânico-biológico.....	134
Figura V.15 - Distribuição dos constituintes da matriz composta ($\phi < 40$ mm) – Resíduos pré-tratados.....	134
Figura V.16 – Distribuição do tamanho das partículas dos resíduos velhos (Aterro de Ihlenberg) e resíduos pré-tratados (Aterro de Buchen).....	136
Figura V.17 - Distribuição das dimensões dos resíduos pré-tratados. DIM 0 (grão), DIM 1 (fibra, fio), DIM 2 (folha, planar), DIM 3 (forma de caixa).....	137
Figura V.18 – Curva de compactação da matriz básica ($\phi < 8$ mm) dos resíduos velhos.....	138
Figura V.19 – Curva de compactação da matriz composta ($\phi < 30$ mm) dos dos resíduos velhos.....	139
Figura V.20 – Curva de compactação da matriz composta 1 ($\phi < 40$ mm) dos resíduos sólidos pré-tratados.....	141
Figura V.21 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz básica – Resíduos sólidos velhos - Umidade ótima.....	143
Figura V.22 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz básica com adição de fibras (3,5 %) – Resíduos sólidos velhos - Umidade ótima...	143
Figura V.23 – Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para $s_N = 200$ kN/m ² – Matriz básica e com adição de fibras (3,5 %) – Resíduos sólidos velhos - Umidade ótima.....	144
Figura V.24 – Envoltórias de resistência no diagrama t-s, obtidas para a matriz básica reforçada, em diferentes níveis de deslocamento horizontal - Resíduos sólidos velhos – Umidade Ótima.....	145
Figura V.25 – Envoltórias de resistência – Matriz básica e com adição de fibras (3,5 %) – Resíduos sólidos velhos - Umidade ótima.....	146
Figura V.26 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz básica – Resíduos sólidos velhos - Ramo úmido.....	147
Figura V.27 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz básica com adição de fibras (3,5 %) – Resíduos sólidos velhos - Ramo Úmido.....	147

Figura V.28 – Envoltórias de resistência no diagrama t-s, obtidas para a matriz básica reforçada, em diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos sólidos velhos - Ramo úmido.....	149
Figura V.29 – Envoltórias de resistência – Matriz básica e com adição de fibras (3,5 %) – Resíduos sólidos velhos – Ramo Úmido.....	150
Figura V.30 – Comparação das envoltórias de resistência – Matriz básica e com adição de fibras (3,5 %) – Resíduos sólidos velhos - Umidade ótima e ramo úmido.....	150
Figura V.31 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz básica – Resíduos sólidos velhos.....	152
Figura V.32 – Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos.....	152
Figura V.33 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos.....	153
Figura V.34 – Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica – Resíduos sólidos velhos.....	154
Figura V.35 – Envoltória de resistência – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos.....	155
Figura V.36 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Sem os dados da tensão de 50 kN/m^2 – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos.....	157
Figura V.37 – Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal -- Sem os dados da tensão de 50 kN/m^2 - Resíduos sólidos velhos.....	157
Figura V.38 – Envoltória de resistência da matriz básica - Sem os dados da tensão de 50 kN/m^2 – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos.....	158
Figura V.39 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos.....	159
Figura V.40 – Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos.....	159
Figura V.41 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta – Resíduos sólidos velhos.....	160
Figura V.42 – Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos.....	160

Figura V.43 – Envoltória de resistência – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos.....	161
Figura V.44 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos.....	163
Figura V.45 – Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal – Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos.....	163
Figura V.46 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos.....	164
Figura V.47 – Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal - Matriz composta reforçada – Resíduos sólidos velhos.....	165
Figura V.48 – Envoltória de resistência – Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos.....	166
Figura V.49 – Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal das amostras dos resíduos sólidos velhos.....	168
Figura V.50 – Comparação da variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos sólidos velhos.....	170
Figura V.51 – Comparação das envoltórias de resistência das amostras de resíduos sólidos velhos obtidas pelos dados de ensaio e por aqueles sugeridos pela interpretação.....	170
Figura V.52 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz básica – Resíduos sólidos pré-tratados.....	174
Figura V.53 – Envoltória de resistência – Matriz básica – Resíduos sólidos pré-tratados.....	175
Figura V.54 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos pré-tratados.....	176
Figura V.55 – Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica – Resíduos sólidos pré-tratados.....	176
Figura V.56 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz composta 1 - Resíduos sólidos pré-tratados.....	178
Figura V.57 – Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal – Matriz composta 1 - Resíduos sólidos pré-tratados.....	178
Figura V.58 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 1 - Resíduos sólidos pré-tratados.....	179

Figura V.59 – Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 1 - Resíduos sólidos pré-tratados..	179
Figura V.60 – Envoltória de resistência – Matriz composta 1 - Resíduos sólidos pré-tratados.....	180
Figura V.61 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz composta 2 – Resíduos sólidos pré-tratados.....	181
Figura V.62 – Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal – Matriz composta 2 - Resíduos sólidos pré-tratados.....	181
Figura V.63 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 2 - Resíduos sólidos pré-tratados.....	182
Figura V.64 – Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 2 - Resíduos sólidos pré-tratados..	183
Figura V.65 – Envoltória de resistência – Matriz composta 2 - Resíduos sólidos pré-tratados.....	184
Figura V.66 – Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal das amostras dos resíduos sólidos pré-tratados.....	185
Figura V.67 – Comparação da variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Amostras de resíduos sólidos pré-tratados.....	186
Figura V.68 – Comparação das envoltórias de resistência das diferentes amostras de resíduos sólidos pré-tratados investigadas.....	187
Figura V.69 – Envoltórias de resistência das amostras dos resíduos sólidos pré-tratados, levando-se em consideração o efeito das fibras, segundo modelo de GRAY & OHASHI (1983) e MAHER & GRAY (1990) para solos reforçados.....	190
Figura V.70 – Envoltórias de resistência das amostras dos resíduos sólidos pré-tratados, levando-se em consideração o efeito das fibras, segundo modelo de KÖLSCH (1993, 1995, 1996) para resíduos sólidos urbanos.....	190
Figura V.71 – Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Resíduos sólidos velhos (Aterro de Ihlenberg) e pré-tratados (Aterro de Buchen).....	192

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela II.1 – Componentes do RSU em percentagem de peso para diferentes cidades (adaptada por BOUAZZA et al., 1996).....	8
Tabela II.2 – Parâmetros de resistência para resíduos sólidos de diferentes idades - TURCZYNSKI (1988).....	20
Tabela II.3 – Coesão aparente e ângulo de atrito – Ensaios de cisalhamento direto - MATSUMOTO et al. (1987) apud SHIMIZU (1997).....	21
Tabela II.4 – Parâmetros de resistência de resíduos sólidos pré-tratados em função dos deslocamentos horizontais - SCHEELHAASE et al. (2001)), citado por DE LAMARE NETO (2004).....	33
Tabela II.5 – Parâmetros de resistência de resíduos pré-tratados em função do diâmetro máximo das partículas – KLÜMPER (1998).....	34
Tabela II.6 – Parâmetros de resistência de resíduos pré-tratados – FEHRER (2002) e HEISS-ZIEGLER & FEHRER (2003).....	34
Tabela II.7 – Parâmetros de resistência de resíduos pré-tratados – DE LAMARE NETO (2004).....	36
Tabela II.8 – Resumo de ensaios de cisalhamento direto realizados por diversos autores.....	38
Tabela II.9 – Coesão aparente, ângulo de atrito e deformação – Ensaios triaxiais - MATSUMOTO et al. (1987) apud SHIMIZU (1997).....	39
Tabela II.10 – Resumo de alguns ensaios triaxiais obtidos da literatura.....	50
Tabela II.11 – Resistência ao cisalhamento de RSU (modificado por VAN IMPE, 1998).....	73
Tabela II.12 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento em RSU obtidos por diversos autores – STRAUSS (1998).....	73

CAPÍTULO III – MODELO GEOTÉCNICO BASEADO NO EFEITO DE REFORÇO DAS FIBRAS PARA ESTUDO DA RESISTÊNCIA DOS RSU – EXPERIÊNCIA ALEMÃ

Tabela III.1 – Parâmetros geotécnicos para aterros sanitários – GDA E 2-35, conforme DGGT (1994).....	94
---	----

CAPÍTULO IV – METODOLOGIA DOS ENSAIOS E MATERIAIS

Tabela IV.1 – Programa de investigação.....	96
Tabela IV.2 – Série de ensaios de cisalhamento direto convencional – Argila e mistura argila-fibra.....	99
Tabela IV.3 – Resumo dos ensaios de compactação – Proctor.....	108
Tabela IV.4 – Série de ensaios de cisalhamento direto convencional – Resíduos sólidos.....	110
Tabela IV.5 – Série de ensaios de cisalhamento direto de maiores dimensões – Resíduos sólidos.....	117

CAPÍTULO V – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tabela V.1 – Propriedades da argila.....	122
Tabela V.2 – Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal – Umidade ótima e ramo úmido – Argila, Argila + Fibras Geotécnicas (2%), Argila + Fibras de RSU (2%).....	123
Tabela V.3 – Resumo dos parâmetros de resistência e dados de ensaio – Umidade Ótima.....	127
Tabela V.4 – Resumo dos parâmetros de resistência e dados de ensaio – Ramo Úmido.....	131
Tabela V.5 – Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal – Umidade ótima e ramo úmido - Matriz básica e básica reforçada – Resíduo sólido velho (< 8 mm).....	139
Tabela V.6 – Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal – Umidade ótima - Matriz composta e composta reforçada – Resíduo sólido velho (<30 mm). 139	139
Tabela V.7 – Resumo dos dados obtidos nos ensaios de compactação Proctor – Matriz básica, composta 1 e 2 – Resíduo sólido pré-tratado.....	142
Tabela V.8 – Resumo dos dados antes e após ensaio – Matriz básica e reforçada dos resíduos sólidos velhos – Umidade Ótima.....	144
Tabela V.9 – Resumo dos dados antes e após ensaio – Matriz básica e reforçada dos resíduos sólidos velhos – Ramo Úmido.....	148

Tabela V.10- Valores da tensão cisalhante ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas – Matriz básica – Resíduos sólidos velhos.....	154
Tabela V.11 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos.....	155
Tabela V.12 – Resumo dos dados de ensaio de resistência – Matriz básica - Resíduos velhos.....	155
Tabela V.13 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos.....	157
Tabela V.14 - Valores de tensão cisalhante ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos.....	160
Tabela V.15 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos.....	161
Tabela V.16 – Resumo dos dados de ensaio de resistência – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos.....	161
Tabela V.17- Valores de tensão cisalhante ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas - Matriz composta reforçada – Resíduos sólidos velhos.....	164
Tabela V.18 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal - Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos...	165
Tabela V.19 – Resumo dos dados de ensaio de resistência – Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos.....	166
Tabela V.20 – Resumo dos parâmetros de resistência para as amostras de resíduos sólidos velhos.....	171
Tabela V.21 – Resumo dos dados de ensaio de resistência – Matriz básica - Resíduos sólidos pré-tratados.....	175
Tabela V.22- Valores de tensão cisalhante ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas – Matriz Básica - Resíduos sólidos pré-tratados.....	176
Tabela V.23 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos pré-tratados.....	177

Tabela V.24 - Valores de tensão cisalhante ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas – Matriz composta 1 – Resíduos pré-tratados.....	179
Tabela V.25 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 1 - Resíduos sólidos pré-tratados.....	180
Tabela V.26 – Resumo dos dados de ensaio de resistência – Matriz composta 1 - Resíduos sólidos pré-tratados.....	180
Tabela V.27- Valores de tensão cisalhante ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas – Matriz composta 2 - Resíduos sólidos pré-tratados.....	183
Tabela V.28 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 2 - Resíduos sólidos pré-tratados.....	183
Tabela V.29 – Resumo dos dados de ensaio de resistência – Matriz composta 2 - Resíduos sólidos pré-tratados.....	184
Tabela V.30 – Resumo dos parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de cisalhamento das amostras de resíduos sólidos pré-tratados.....	187
Tabela V.31 – Resumo dos resultados dos ensaios após análises e interpretações – Resíduos sólidos velhos (Aterro de Ihlenberg) e pré-tratados (Aterro de Buchen).....	193

LISTA DE FOTOS

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foto II.1 – Caixa de cisalhamento direto utilizada em laboratório – CAICEDO et al. (2002).....	30
Foto II.2 - Equipamento experimental em laboratório para ensaio triaxial de grande escala – CAICEDO et al. (2002).....	49
Foto II.3 – Caixa de cisalhamento de grande escala para medições em campo – CAICEDO et al (2002).....	67

CAPÍTULO III – METODOLOGIA DOS ENSAIOS E MATERIAIS

Foto IV.1 – Amostras provenientes de ensaio de compactação. A) Argila. B) Mistura argila-fibra de resíduos sólidos.....	98
Foto IV.2 – Preparação da mistura argila-fibra geotécnica (polietileno de baixa densidade; largura: 5-10 mm e comprimento: 10–20 mm; porcentagem de fibras: 2 %)......	100
Foto IV.3 – Preparação da mistura argila- fibra de resíduo sólido (largura: 5-10 mm e comprimento: 15-30 mm; porcentagem de fibras: 2 %)......	100
Foto IV.4 – Aspecto da amostra de argila (A) e mistura argila-fibra geotécnica (B) no final do ensaio de cisalhamento direto.....	101..

.....

Foto IV.11 – Preparação das amostras de resíduos sólidos velhos + fibras. A) Amostra de resíduos sólidos (correspondente à matriz básica). B) Plásticos cortados. C) Mistura resíduo sólido-fibra (matriz básica reforçada).....	112
Foto IV.12 – Caixa de cisalhamento direto de média escala (300 x 300 x 150mm).....	114
Foto IV.13 – Sistema de aplicação de carga normal.....	114
Foto IV.14 – Sistema de aquisição automática de dados “Datenlogger” e dois dispositivos de medição (horizontal e vertical).....	114
Foto IV.15 – A) Montagem da amostra na caixa de cisalhamento com ajuda de martelo do Proctor. B) Amostra de resíduos sólidos antes de ser compactada. C) Amostra de resíduos sólidos no final de ensaio de cisalhamento.....	115
Foto IV.16 – Tira de folha plástica entre as partes inferior e superior da caixa de cisalhamento.....	116
Foto IV.17 – Amostras de resíduos sólidos velhos (Aterro de Ihlenberg). A) Matriz básica. B) Matriz composta ($MR/MB = 3\%$). C) Matriz composta reforçada ($MR/MB = 8\%$).....	118
Foto IV.18 – Vista dos resíduos sólidos (pré-tratados) depositados no Aterro Sanitário de Buchen - Alemanha.....	119
Foto IV.19 – Amostras dos resíduos sólidos pré-tratados (Aterro de Buchen). A) Matriz básica. B) Matriz composta 1 ($MR/MB = 20\%$). C) Matriz composta 2 ($MR/MB = 10\%$).....	121

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - Área;
- a_f - Grau de ativação da coesão das fibras;
- $a_{f,max}$ - Taxa de ativação máxima da coesão das fibras;
- b - Largura;
- c - Coesão;
- c' - Coesão efetiva;
- $c_{\epsilon 1}$ - Coesão para uma determinada deformação $\epsilon 1$;
- c_{MB} - Coesão da matriz básica;
- CH₄ - Gás Metano;
- dh/h - Deformação;
- D - Diâmetro;
- DIM - Dimensão dos constituintes do resíduo sólido;
- E_s - Módulo de Rigidez;
- FS - Fator de Segurança;
- G - Peso próprio;
- H - Altura;
- h - Altura do corpo de prova;
- k_f - Coeficiente de permeabilidade;
- MB - Matriz básica;
- MBA - Mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle: Resíduos sólidos pré-tratados mecânico e biologicamente;
- MR - Matriz de reforço;
- N - Número de golpes (ensaio SPT);
- P - Força de tração;
- P_i - Peso inicial;
- P_f - Peso final, peso da amostra seca a 105°;
- p - $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$;
- q - $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$;
- qc - Resistência de ponta;
- R^2 - Coeficiente de correlação;
- RSU - Resíduos sólidos urbanos;
- s - Deformação;

- T - Força cisalhante;
- t - Tempo;
- w - Teor de umidade;
- Z - Parcela de resistência devida às fibras;
- z - Tensão de tração no reforço;
- z_0 - Resistência à tração independente da carga;
- $z_{máx}$ - Resistência à tração específica das fibras;
- a - Ângulo da superfície de ruptura com a direção horizontal das fibras;
- a - Inclinação da base da fatia;
- η/h - recalque do corpo de prova após fase de adensamento;
- η - Deslocamento horizontal;
- ε - Deformação;
- ε_1 - Deformação na direção da tensão principal σ_1 ;
- ε_v - Deformação volumétrica;
- ϕ - Ângulo de atrito;
- ϕ' - Ângulo de atrito efetivo;
- $\phi_{\varepsilon 1}$ - Ângulo de atrito para uma determinada deformação $\varepsilon 1$;
- ϕ_{MB} - Ângulo de atrito da matriz básica;
- γ - Peso específico;
- γ_d - Peso específico seco;
- γ_{seco} - Peso específico seco;
- $\gamma_{úmido}$ - Peso específico úmido;
- φ - Ângulo de atrito;
- σ - Tensão normal;
- σ' - Tensão normal efetiva;
- σ_N - Tensão normal;
- σ_1 - Tensão normal principal;
- $\sigma_1 - \sigma_3$ - Tensão desviatória;
- $s_{crít}$ - Tensão normal crítica;
- τ - Tensão cisalhante ou resistência ao cisalhamento;
- $t_{máx}$ - Tensão cisalhante máxima;
- t_z - Tensão cisalhante devido à tensão de tração no reforço;

$t(z)$ - Tensão cisalhante (*coesão das fibras*) devido ao efeito de reforço, dependente da carga;

$t(z)_\alpha$ - Tensão cisalhante (*coesão das fibras*) ativada em dependência do ângulo α ;

$t_R(z)$ - Tensão de atrito adicional;

ϑ - Ângulo entre o plano de ruptura e a direção das fibras;

ζ - Ângulo devido à tensão de tração;

\emptyset - Tamanho das partículas;

$\emptyset_{\text{máx}}$ - Tamanho máximo das partículas.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os resíduos sólidos urbanos, gerados por atividades domésticas, comerciais e industriais, merecem uma especial atenção, pelo seu volume e potencial contaminante, cada vez maior, necessitando de um tratamento adequado. A contaminação ambiental devida aos resíduos depositados incorretamente é um problema que pode afetar consideravelmente a qualidade de vida, sendo justificável dedicar esforços especiais e investimentos para sua solução. Para atingir esta finalidade é necessário unir conhecimentos e profissionais de diversos ramos da engenharia, dentre os quais a engenharia civil é fundamental.

O desenvolvimento de sistemas mais seguros para a disposição de resíduos sólidos tem crescido nas últimas décadas, devido ao aumento das exigências de proteção ambiental. A disposição em aterros sanitários tornou-se uma prática comum em todo mundo, por representar uma solução técnica, ambiental e economicamente viável. No Brasil, esta prática tem sido utilizada nas principais capitais do país. As conseqüências mais importantes decorrentes de uma inadequada disposição dos resíduos sólidos são: poluição da água subterrânea e superficial, poluição do ar e do solo, escorregamentos de massas implicando perdas materiais e humanas e degradação de áreas adjacentes. Os fatores que estão associados a estas conseqüências vão desde um estudo ineficiente do meio físico até a não consideração dos parâmetros característicos dos resíduos, na maioria das vezes desconhecidos.

As principais propriedades mecânicas dos resíduos sólidos urbanos, como a resistência e compressibilidade, são bastante influenciadas pela composição dos resíduos, bem como pelo comportamento de cada componente. Os estudos sobre estas propriedades são escassos e, em alguns casos, os dados publicados são contraditórios (KNOCHENMUS et al., 1998). A quantificação destas propriedades consiste numa difícil tarefa em função da heterogeneidade dos resíduos sólidos, da alteração de suas propriedades com o tempo devido a diferentes características de biodegradação de cada material, e da presença de componentes com diferentes formas e dimensões, que dificultam a obtenção de amostras de boa qualidade, a definição do tamanho das amostras, além dos tipos de ensaios mais apropriados. A maioria

dos dados da literatura é resultado de “estimativas”, sendo poucos os derivados de retro-análise ou ensaios de laboratório e campo. A interpretação de resultados obtidos de ensaios em resíduos sólidos continua sujeita a muitas incertezas devido à falta de um modelo conceitual de referência do comportamento deste material.

De uma forma geral, são utilizados métodos convencionais de ensaios (campo e laboratório) desenvolvidos para solos na avaliação das propriedades mecânicas dos resíduos sólidos. SÁNCHEZ-ALCITURRI et al. (1993), MANASSERO et al. (1996), KONIG & JESSBERGER (1997), dentre outros, alertam para o cuidado que se deve ter quando da utilização dos conceitos e das teorias clássicas da Mecânica dos Solos para o estudo dos resíduos sólidos, diante das significativas diferenças existentes entre estes dois materiais. Os resíduos sólidos urbanos apresentam um alto índice de vazios, ou seja, uma grande compressibilidade, com partículas de diferentes naturezas. Algumas destas partículas são muito deformáveis e podem degradar, ocasionando uma auto-consolidação e variação das propriedades com o tempo.

Vários autores têm avaliado a resistência dos resíduos sólidos por meio de ensaios de campo, tais como CPT, SPT e Vane Test (SOWERS 1968, SIEGAL et al. 1990, SÁNCHEZ-ALCITURRI et al. 1993, COUMOULOS et al. 1995, BOUAZZA et al. 1996, FUCALE & JUCÁ 2003, JUCÁ 2003, JUCÁ et al. 2005, dentre outros). Estes ensaios, na maioria dos casos, são difíceis de serem executados devido à presença de materiais resistentes como madeira, pedra, metal e outros, os quais ocasionam grandes picos na resistência medida, além de desvio das hastes dos equipamentos e avarias nos amostradores, paletas e ponteiras. Em campo, também são realizados ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões (RICHARDSON & REYNOLDS 1991, GOTTELAND et al. 1995, WITHIAM et al. 1995, CAICEDO et al. 2002), em amostras deformadas e indeformadas, garantindo resultados mais representativos. Em laboratório, ensaios de cisalhamento direto e triaxiais em amostras de grandes dimensões têm sido realizados para obter os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos, conforme LANDVA & CLARK (1990), GABR & VALERO (1995), JESSBERGER et al. (1995), KÖLSCH (1996), CARVALHO (1999), MÜNNICH (2001), DE LAMARE NETO (2004), dentre outros.

Aterros sanitários consistem em construções de elevadas e volumosas quantidades de resíduos sólidos constituídas por matéria orgânica, componentes granulares e fibrosos. Devido

às técnicas de construção utilizadas em obras de aterros (construção por camadas horizontais), os mesmos são considerados como tendo estrutura anisotrópica. Por estas razões, a capacidade de carga dos aterros sanitários pode ser comparável à capacidade de carga anisotrópica de obras cujas técnicas são bem conhecidas da Mecânica dos Solos, a correspondente aos “Solos Reforçados”. É evidente que existem diferenças no comportamento mecânico de aterros de resíduos sólidos urbanos, consequência das propriedades específicas dos seus componentes fibrosos e granulares. Para exemplificar, há a heterogeneidade dos resíduos sólidos, apresentando tamanho de partículas maiores e de diferentes dimensões, com as suas propriedades físicas, químicas e biológicas dependentes do tempo.

Ao contrário de materiais tipo solo, a resistência ao cisalhamento em aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) é originada não apenas pelo atrito entre os grãos, mas também em grande parte pelo efeito semelhante ao reforço de materiais tipo fibras e folhas, os quais constituem a matriz fibrosa. Os efeitos da capacidade de carga dos resíduos sólidos podem, já há certo tempo, ser observados e constatados nos próprios aterros, por meio, por exemplo, da alta resistência e estabilidade de taludes e da própria massa de RSU, embora sejam submetidos a altos níveis de deformações. Isto mostra que as teorias clássicas da Mecânica dos Solos não são adequadas para esclarecer e avaliar os fenômenos mecânicos que são conduzidos neste tipo de material.

Segundo KÖLSCH (1993, 1995, 1996), existem muitos problemas em cálculos de estabilidade para aterros de resíduos sólidos baseados em métodos usuais da Mecânica dos Solos, devido a grande diferença entre as propriedades do solo e dos resíduos. O autor considera que os resíduos sólidos apresentam comportamento de resistência, para grandes deformações, semelhante ao de solos reforçados, ou seja, a resistência ao cisalhamento total é composta pelo atrito no plano cisalhante e pelas forças de tração nas fibras. Neste sentido, o resíduo sólido é considerado um material constituído de duas componentes: uma matriz básica, compreendida pelas partículas de granulação fina a média, que apresentam comportamento de atrito, e a outra, a matriz de reforço contendo os componentes fibrosos do resíduo sólido (plásticos, tecidos, galhos de madeira). A realização de ensaios separados, distinguindo a parte friccional e de tração da resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos, ou seja, a execução de ensaios de cisalhamento direto e de tração de grandes dimensões em laboratório, respectivamente, tem sido proposta pelo autor e parece ser, no presente momento, um melhor caminho para a investigação deste tipo de material.

Nos estudos geotécnicos de resíduos sólidos urbanos, além da necessidade de uma melhor compreensão e esclarecimento do comportamento mecânico de aterros sanitários, há também uma outra dificuldade para o entendimento do assunto, visto que existem alterações da massa de RSU e das propriedades dos seus constituintes, ocasionadas pelos processos de degradação dos materiais orgânicos existentes. Ainda não há uma exata compreensão da influência deste processo no comportamento mecânico e na resistência dos resíduos sólidos. Uma explicação para isto é a ausência de modelos consolidados para estudo do comportamento mecânico, que leve em consideração esta influência, e de métodos específicos de investigação e análises sobre a resistência.

No Brasil, o estudo da resistência de RSU ainda é muito recente. Embora seja usada sistematicamente a disposição de resíduos em aterros sanitários, raros trabalhos experimentais têm sido desenvolvidos com o intuito de estudar o comportamento frente à deformabilidade e resistência destes materiais, bem como procedimentos construtivos adequados. Em geral, devido às dificuldades na sua obtenção, os projetos de novos aterros sanitários, ou mesmo a avaliação da segurança de aterros antigos, utilizam parâmetros de resistência de resíduos sólidos oriundos da literatura internacional, que na maioria dos casos referem-se a resíduos de composição completamente diferente dos nossos, além das condições climáticas bastante diversas. Nesse contexto, torna-se necessário um conhecimento mais apurado do comportamento geotécnico de maciços de resíduos sólidos, a fim de caracterizar e determinar os parâmetros a serem empregados nas análises de estabilidade e modelagens, visando permitir a execução de aterros novos ou ampliações dentro de padrões mais seguros e econômicos.

1.2. OBJETIVO E METODOLOGIA

A tese tem como objetivo principal estudar a resistência de resíduos sólidos urbanos, levando em consideração o efeito de reforço dos materiais fibrosos constituintes do resíduo, apresentando desta forma uma avaliação mais realística do comportamento mecânico. Os objetivos específicos consistem em:

- i) compreender o comportamento mecânico de solo e misturas solo-fibra, bem como verificar a influência destas fibras, servindo assim de embasamento teórico no estudo de solos reforçados e posterior analogia ao caso de resíduos sólidos;

- ii) estudar a resistência da matriz básica ou granular (componente responsável pelas propriedades de atrito) de resíduos sólidos velhos, e sua alteração em função da incorporação de fibras provenientes do próprio resíduo, por meio de ensaios de cisalhamento direto convencional (pequena escala);
- iii) estudar a resistência de resíduos sólidos velhos e resíduos sólidos pré-tratados mecânica e biologicamente por meio de ensaios de cisalhamento direto de média escala, avaliando-se as propriedades de atrito por meio da matriz básica e as propriedades de tração através da matriz de reforço;
- iv) verificar a influência da incorporação de diferentes porcentagens de fibras (plásticos, têxteis, fios, filamentos, galhos de madeira, dentre outros) no comportamento mecânico e nos parâmetros de resistência de amostras de resíduos sólidos velhos e resíduos pré-tratados mecânica e biologicamente;
- v) comparar os resultados em relação às dimensões dos equipamentos de cisalhamento direto utilizados;
- vi) comparar os resultados dos ensaios de resistência realizados em ambos os resíduos sólidos investigados, velhos e pré-tratados;
- vii) comparar a resistência das amostras estudadas nesta pesquisa com os resultados da literatura.

A metodologia aplicada para a consecução desses objetivos constou de forma resumida dos seguintes itens:

- i) revisão bibliográfica sobre os temas envolvidos, reunindo informações de publicações nacionais e internacionais, e também informações de relatórios técnicos;
- ii) realização de ensaios de laboratório (cisalhamento direto convencional) em solo e mistura solo-fibra;
- iii) execução de ensaios de caracterização para descrição dos materiais constituintes das amostras de resíduos sólidos investigadas;
- iv) realização de ensaios de laboratório (cisalhamento direto convencional e de maiores dimensões) em amostras de resíduos sólidos velhos e de resíduos provenientes de um pré-tratamento mecânico e biológico;
- v) análise e interpretação dos resultados obtidos de ensaios de resistência nas amostras de resíduos sólidos com os da literatura.

É importante ressaltar que esta pesquisa foi iniciada em Recife, na Universidade Federal de Pernambuco, sendo posteriormente a fase experimental e de complemento da revisão bibliográfica conduzida na Universidade Técnica de Braunschweig, Alemanha, como parte do programa de Doutorado Sandwich.

1.3. ESTRUTURA DA TESE

A apresentação da tese está dividida em capítulos com a distribuição dos conteúdos abaixo.

No capítulo II será apresentada uma revisão bibliográfica que consta de: propriedades geotécnicas dos resíduos sólidos urbanos (RSU); modelos geotécnicos desenvolvidos para solos, que servem para a compreensão do comportamento mecânico do RSU; resistência como um parâmetro fundamental na descrição das propriedades dos resíduos sólidos; vários ensaios de laboratório da literatura para determinação da resistência, em termos de coesão e ângulo de atrito, de diferentes resíduos sólidos; e uma compilação da literatura de parâmetros de resistência ao cisalhamento para a adoção em projetos de aterros sanitários.

No capítulo III é apresentado um novo modelo geotécnico para resíduos sólidos desenvolvido pela comunidade científica da Alemanha, o qual foi baseado no efeito de reforço das fibras constituintes deste tipo de material para estudo da resistência.

O programa de investigação realizado nesta tese está apresentado no capítulo IV, o qual inclui os ensaios de caracterização e resistência em equipamento de cisalhamento direto convencional de amostras de solo e misturas solo-fibra, bem como os ensaios de caracterização e resistência em equipamento convencional e de maiores dimensões de amostras de resíduos sólidos velhos e de resíduos pré-tratados mecânica e biologicamente.

A apresentação e análise dos resultados obtidos por meio dos ensaios de resistência para avaliar a interação material granular-fibra, assim como a comparação dos resultados das diferentes amostras de resíduos sólidos investigadas entre si e com a literatura são expostas no capítulo V. Os ensaios realizados em solo e mistura solo-fibra são também analisados e interpretados.

Um resumo das principais conclusões da tese e sugestões para futuros estudos está apresentado no capítulo VI.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas citadas ao longo da tese.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. 1. PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O projeto e operação de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos envolvem uma variedade de problemas geotécnicos, onde o conhecimento de suas propriedades geotécnicas (peso específico, compressibilidade, resistência) é fundamental para a realização de análises básicas, MANASSERO et al. (1996). A determinação destas propriedades é difícil em função dos seguintes fatores:

- i) o resíduo sólido urbano (RSU) é heterogêneo e variável para as diferentes localizações geográficas (Tabela II.1);

Tabela II.1 – Componentes do RSU em percentagem de peso para diferentes cidades (adaptada por BOUAZZA et al., 1996).

MSW	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Metal	1	1	3	3	5	2	2,5	4	1	3
Papel Papeloão	25	5	12	3	22	10	31	19	2	16
Plástico	-	1	5	-	-	3	9,5	7	3	20
Couro Madeira Borracha	7	1	-	7	3	6	4	4	1	-
Tecido	3	-	-	10	-	3	5	-	-	-
Material Putrescível	44	45	74	15	20	61	28	59	71	58
Vidro	1	1	4	10	6	1	9	2	1	2
Outros	19	46	2	22	46	14	11	5	21	1

1. Bangkok (Thailand); 2. Pekin (China); 3. Nairobi (Kenya); 4. Hong Kong; 5. New York (USA); 6. Istanbul (Turkey); 7. Geneva (Switzerland); 8. Athens (Greece); 9. Cochabamba (Bolivia); 10. Wollongong (Australia)

- ii) dificuldade de obtenção de amostras de tamanho relevante, representativas das condições “in-situ”;
- iii) não existem, geralmente, procedimentos de amostragem e ensaios padrões para RSU;
- iv) as propriedades dos resíduos sólidos urbanos mudam com o tempo;
- v) elevado nível de treinamento e educação de pessoal no local para a interpretação e compreensão das medições.

De acordo com KNOCHENMUS et al. (1998), as principais propriedades mecânicas a serem consideradas na estabilidade de taludes de resíduos sólidos urbanos (RSU) são a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade. Da mesma forma que nas propriedades físicas, existe apenas informações limitadas e algumas vezes contraditórias relacionadas às propriedades mecânicas dos resíduos sólidos urbanos. Estas propriedades são influenciadas pela composição do RSU assim como do comportamento mecânico individual de seus componentes, que pode ser significativamente diferente daqueles normalmente aplicados a solos. Além disso, os parâmetros mecânicos são também dependentes do tempo e estão relacionados ao estado de decomposição da matéria orgânica. Deve-se tomar cuidados quando da aplicação das teorias clássicas da Mecânica dos Solos e dos métodos analíticos no estudo dos resíduos sólidos.

Conforme mencionado, a determinação das propriedades geotécnicas dos RSU é uma tarefa difícil devido à influência de vários fatores. A maioria dos dados da literatura sobre as propriedades mecânicas e a deformabilidade dos resíduos sólidos são resultados de “estimativas”, poucos são os dados derivados de retro-análises ou de medidas vindas de ensaios de laboratório e campo.

A interpretação dos resultados dos ensaios em resíduos sólidos continua sujeita a muitas incertezas devido à falta de um modelo conceitual de referência do comportamento deste material. A análise ainda é feita, geralmente, partindo-se de modelos e métodos estabelecidos para solos, possivelmente com algum reforço. Na verdade, a maioria dos resíduos sólidos é composta de “partículas” individuais com um certo entrosamento (plásticos ou têxtil), e é esta condição que permite a utilização de tais modelos e métodos. Entretanto, existem significativas diferenças com relação aos solos (SÁNCHEZ-ALCITURRI et al. 1993, MANASSERO et al. 1996, KONIG & JESSBERGER 1997): o índice de vazios do resíduo sólido é muito alto, o que implica em uma elevada compressibilidade; as “partículas” são de diferentes naturezas, algumas delas são fracas e muito deformáveis ou quebradiças; existe um processo de decomposição com o tempo, que causa um adensamento pelo peso próprio e variação das propriedades.

Segundo KÖLSCH (1997), é importante que se leve em consideração as propriedades mecânicas específicas dos resíduos sólidos quando do uso e aplicação dos métodos e modelos de capacidade de carga para solos reforçados como base para os estudos da resistência em

aterros sanitários. Isto se deve ao fato das diferenças que existem entre estes dois tipos de materiais:

i) *grau de reforço*: enquanto em solos reforçados com fibras o teor de fibras situa-se em valores inferiores a 5 % em peso, é de se esperar teores superiores a 50 % em peso no caso de aterros sanitários;

ii) *não homogeneidade*: o material e as propriedades de resistência das fibras (comportamento tensão-deformação, resistência à tração) podem ser muito variável dentro da massa de resíduos sólidos, por haver em sua composição diferentes materiais (papel, diversos tipos de plásticos, madeira, metal);

iii) *tamanho das partículas*: as dimensões dos constituintes do resíduo sólido são evidentemente maiores do que em solos reforçados com fibras, resultando assim em uma mais ampla zona de deformação;

iv) *compressibilidade*: a alta compressibilidade em aterros de resíduos sólidos conduz a altas deformações;

v) *alteração com o tempo*: a composição e estado dos resíduos sólidos variam com os processos de decomposição da matéria orgânica, o que vem a influenciar nas propriedades de resistência da matriz dos grãos e das fibras e suas relações;

vi) *permeabilidade*: a deposição em camadas de resíduos sólidos pode gerar poropressão em determinados locais da massa de resíduos sólidos;

vii) *cargas*: enquanto em obras de solos reforçados têm-se, em sua maioria, pequenas alturas (= 10 m), embora haja casos de obras com geotêxteis que atingem alturas de aproximadamente 40 m, em aterros sanitários pode-se atingir mais que 100 m. É de se esperar que as altas cargas resultantes de uma elevada massa de resíduos sólidos, ou seja, as tensões normais influenciem a capacidade de carga por meio da densidade devido ao peso próprio e da destruição dos próprios componentes, este último definido em solos como ruptura dos grãos.

2.2. MODELOS GEOTÉCNICOS

Na ausência de modelos constitutivos desenvolvidos especificamente para RSU, diversos autores têm sugerido a adoção do comportamento mecânico do solo como referência para o estudo de resíduos. De acordo com GRISOLIA et al. (1995), pode-se supor que os

RSU, bem como os solos, são constituídos por três fases: sólida, líquida e gasosa. A fase sólida pode ser dividida em:

- i- materiais inertes estáveis, cujo comportamento mecânico pode ser considerado como o de um solo altamente heterogêneo de granulometria grosseira. São típicos, neste caso, vidros, metais, restos de construção, etc;
- ii- materiais bastante deformáveis, que sofrem grandes recalques sob pequenos carregamentos, como por exemplo, tecidos, papéis e plásticos;
- iii- materiais facilmente degradáveis, que são aqueles que sofrem profundas transformações bio-físico-químicas em um curto espaço de tempo, justamente o oposto do que acontece nos solos, onde qualquer transformação é produzida por processos muito lentos. Exemplo: matéria orgânica em geral, vegetais e restos de alimento.

Segundo MANASSERO et al. (1996), é a fase sólida que proporciona as maiores diferenças entre os RSU e os solos. A fase líquida dos resíduos compreende água e lixiviado, e a fase gasosa é constituída pelo ar e pelos gases formados durante a decomposição dos materiais biodegradáveis.

GRISOLIA & NAPOLEONI (1996) descreveram um modelo didático para as variações observadas em uma amostra de RSU ao longo do tempo, sob a ação de uma tensão vertical inicial. Os autores propuseram que, num estágio inicial, somente alguns pontos dos chamados “materiais inertes estáveis” estão em contato, Figura II.1A. Os elementos deformáveis do resíduo sólido (papel, tecido, plástico mole, matéria orgânica), sob a ação de uma sobrecarga, causam um acentuado e acelerado decréscimo no volume total da amostra de RSU, e assim, um maior contato entre os materiais inertes estáveis (Figura II.1B). Ao final do processo de decomposição ($t = \infty$), os materiais degradáveis terão se transformado em inertes e se concentrarão em um volume bem menor. Por sua vez, os materiais deformáveis terão atingido seu volume mínimo. Neste estágio, os materiais inertes terão uma área de contato considerável e características semelhantes às de um solo natural (Figura II.1C).

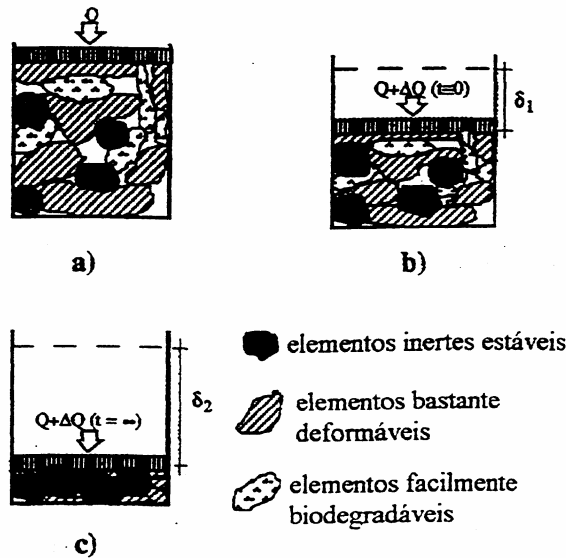


Figura II.1 – Representação esquemática dos vários estágios de deformação volumétrica de uma amostra de RSU – GRISOLIA & NAPOLEONI (1996).

Ao final do processo de decomposição dos RSU, é principalmente a presença dos materiais compressíveis que ainda os diferencia dos solos. Estes materiais compressíveis, após as deformações sofridas, acabam gerando uma estrutura de reforço à tração, proporcionando um comportamento à massa de RSU similar ao de um solo reforçado (COWLAND et al., 1993 apud GRISOLIA & NAPOLEONI, 1996).

JESSBERGER et al. (1995) e KÖNIG & JESSBERGER (1997) sugerem que o comportamento de resistência que o RSU apresenta, para grandes deformações, pode ser comparado ao comportamento de solo reforçado. Os componentes fibrosos do resíduo sólido (plásticos, têxteis, papel e papelão) podem atuar como reforço da massa de resíduos sólidos e, neste caso, contribuir para o ganho de intercepto de coesão ou de resistência, como ocorre em solo reforçado. Dessa forma, os RSU poderiam ser modelados conforme a Figura II.2, um material composto, constituído de duas componentes: uma matriz básica compreendida pelas partículas de granulação fina a média que apresentam comportamento de atrito, e a outra, a matriz de reforço contendo os componentes fibrosos do resíduo sólido. Fazendo uma comparação com o modelo apresentado por GRISOLIA & NAPOLEONI (1996), a matriz básica seria constituída por materiais inertes estáveis e pela maioria dos materiais facilmente biodegradáveis, enquanto as fibras seriam constituídas por materiais bastante deformáveis.

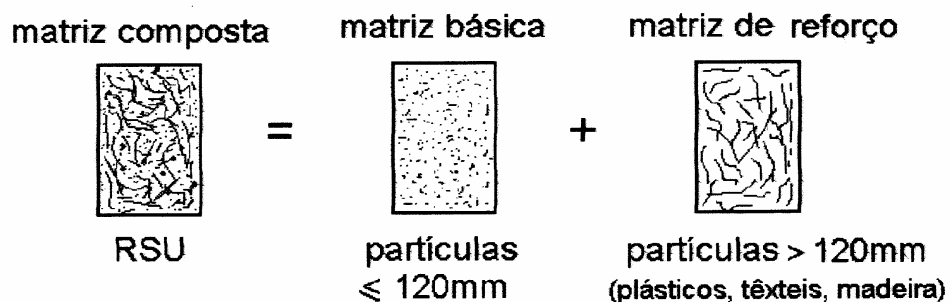


Figura II.2 – Modelo esquemático da composição de RSU semelhante a solos reforçados – JESSBERGER et al. (1995) e KÖNIG & JESSBERGER (1997).

JESSBERGER & KOCKEL (1993) afirmam que os elementos fibrosos presentes nos RSU estão intercalados nas camadas e atuam como reforço. Por esta razão, rupturas com planos de cisalhamento definidos na massa de resíduos só podem ocorrer quando houver planos de fraqueza ou situações hidráulicas que reduzam a estabilidade.

Segundo MANASSERO et al. (1996), o modelo apresentado na Figura II.2 sugere que os parâmetros geotécnicos obtidos de uma amostra de RSU sejam dependentes principalmente da composição inicial, a qual determina a quantidade de componentes da fase sólida, e do tempo de decomposição (tempo de disposição no aterro), o qual determina o quanto de material biodegradável ainda existe. Portanto, os parâmetros geotécnicos obtidos de uma dada amostra de RSU serão representativos daqueles resíduos com mesma composição inicial e mesmo tempo de decomposição que a amostra utilizada.

KÖLSCH (1993, 1995, 1996) desenvolveu um modelo geotécnico que associa o efeito de reforço das fibras existentes nos resíduos sólidos urbanos ao seu comportamento resistente. Este modelo é descrito no capítulo III, tendo em vista sua importância, e consiste no estado atual da arte em uma análise mais realística da capacidade de carga de aterros sanitários.

2.3. PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

O projeto e operação de um aterro sanitário requerem o conhecimento do comportamento tensão-deformação, e resistência-tempo do material, sendo este constituído muitas vezes por camadas intercaladas de resíduos sólidos e solo de cobertura. Para atingir este objetivo pode-se recorrer às técnicas tradicionalmente empregadas na Geotecnia, contudo, a obtenção dos parâmetros de resistência da massa de resíduos sólidos consiste em

uma das tarefas mais difíceis de se analisar. O item 2.4 apresenta as diferentes técnicas de investigação e ensaios para a determinação da resistência de resíduos sólidos urbanos.

A resistência dos resíduos sólidos urbanos, da mesma forma que para solos, é um parâmetro geotécnico de interesse fundamental na descrição de suas propriedades. Apesar de existirem diferenças significativas entre resíduos sólidos e solos, a interpretação dos ensaios em resíduo sólido mediante conceitos da Mecânica dos Solos clássica pode ser proveitosa, e constitui numa das ferramentas mais utilizadas pelos pesquisadores, ao menos para o presente estado de conhecimento. Sobre esta base, a resistência ao cisalhamento de maciços de RSU é normalmente associada a um ângulo cisalhante, ou ângulo de atrito interno “ ϕ ”, e uma coesão, “ c ”, definidos a partir da envoltória de resistência Mohr-Coulomb. Embora os RSU não tenham comportamento idêntico aos solos, um critério de ruptura de Mohr-Coulomb modificado tem sido reconhecido como útil, segundo OWEIS (1993) e MANASSERO et al. (1996). O grande número de pesquisadores adotando este critério em trabalhos com RSU demonstra que tal abordagem possui uma expressiva aceitação internacional.

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

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

De acordo com HOWLAND & LANDVA (1992), a resistência dos resíduos sólidos é de caráter principalmente friccional, porém, MITCHELL & MITCHELL (1992) apontam que embora a natureza coesiva dos resíduos não tenha sido ainda adequadamente caracterizada, (estes autores acreditam que provavelmente não é uma “verdadeira coesão”, mas o resultado da união das partículas que compõem o resíduo sólido), é razoável incluir um componente coesivo nas avaliações de resistência ao cisalhamento. Esta suposição está baseada no fato de

que existem cortes, praticamente verticais, em aterros de resíduos sólidos e que permanecem estáveis por longo período de tempo.

Apesar de naturalmente os RSU não apresentarem “coesão”, por serem basicamente granulares, o intercepto coesivo apresentado por vários autores deve ser entendido como similar ao de um solo granular reforçado com fibras orientadas aleatoriamente, também conhecido como “efeito-fibra”. MANASSERO et al. (1996) apresentam a relação tensão-deformação típica dos RSU a partir de ensaios triaxiais realizados por GRISOLIA et al. (1991), em amostras de 250 mm de diâmetro e 600 mm de altura, e JESSBERGER & KOCKEL (1993), em amostras de 300 mm de diâmetro e 600 mm de altura, conforme Figura II.3. A relação tensão-deformação obtida dos ensaios de JESSBERGER & KOCKEL (1993) não apresenta um pico que defina claramente a ruptura, ao contrário do que acontece em ensaios realizados com solos. Na verdade, o RSU pode sustentar grandes deformações cisalhantes, excedendo 15 % a 20 %, sem mobilizar a tensão cisalhante de pico, ou seja, sem atingir a ruptura. Já nos ensaios triaxiais realizados por GRISOLIA et al. (1991), as curvas tensão-deformação para deformações axiais muito elevadas mostraram uma leve inflexão para cima (ascendente), sugerindo um enrijecimento do material.

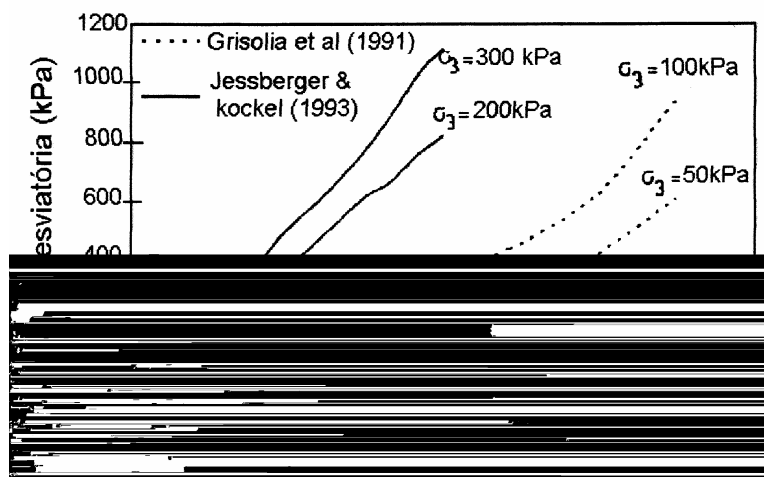


Figura II.3 – Relação tensão-deformação típica dos RSU em ensaios triaxiais – MANASSERO et al. (1996).

Segundo SÁNCHEZ-ALCITURRI et al. (1993), há duas explicações para a aparente contradição entre a afirmação de que RSU não rompem e a utilização do critério de ruptura de Mohr-Coulomb. A primeira explicação é que os RSU na verdade rompem (fato observado em casos reais), embora ensaios de laboratório, em função dos fatores de escala e da

impossibilidade de alcançar taxas de deformação muito elevadas, não demonstrem este comportamento. A segunda é que muitos autores utilizam um nível de deformação máxima permissível para determinar os parâmetros de critério de ruptura, sendo os níveis de deformação entre 15 % e 20 % os mais usados em ensaios de laboratório.

MANASSERO et al. (1996) apresentam resultados obtidos por GRISOLIA et al. (1991) e BOUAZZA e AMOKRANE (1995), exemplificando o comportamento “efeito-fibra”. A Figura II.4 mostra que os componentes fibrosos dos resíduos sólidos podem agir como “reforço” da massa como um todo, e neste caso contribuir para um ganho de “coesão” ou resistência, como acontece em solos reforçados. A Figura II.4 mostra ainda que um ponto de resistência de pico para o RSU não foi caracterizado, contrariamente ao que ocorre com os materiais granulares e com os materiais granulares reforçados com fibras. Os parâmetros de resistência do RSU são desta forma usualmente definidos com base em critérios de deformação.

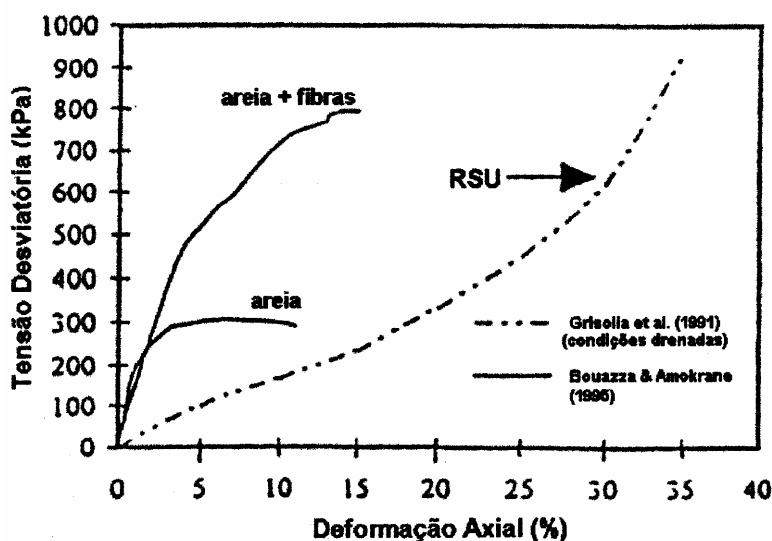


Figura II.4 – Tensão desviatória em função da deformação axial para areias, areias + fibras e RSU – MANASSERO et al. (1996).

Considerando o modelo que admite os RSU como uma matriz básica reforçada por materiais fibrosos, KOCKEL (1995) mostra que é a matriz básica que comanda a parcela de resistência por atrito interno dos RSU, com um ângulo de atrito interno máximo que varia de 42° a 45° (Figura II.5). Este valor é levemente influenciado pelos materiais de reforço (plásticos). O intercepto coesivo, por sua vez, é essencialmente dependente da matriz reforçada e pode ser definido como uma “coesão devida à resistência à tração” dos

componentes fibrosos (Figura II.5). A ativação da coesão requer grandes deformações axiais, em torno de 20 %, quando a resistência por atrito interno já está praticamente mobilizada. Desta maneira, a matriz fibrosa não tem influência significativa nas propriedades de atrito do resíduo, mas promove um significativo aumento de coesão. As dimensões das amostras de resíduos sólidos investigadas pelo autor, por meio de ensaios triaxiais, foram 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

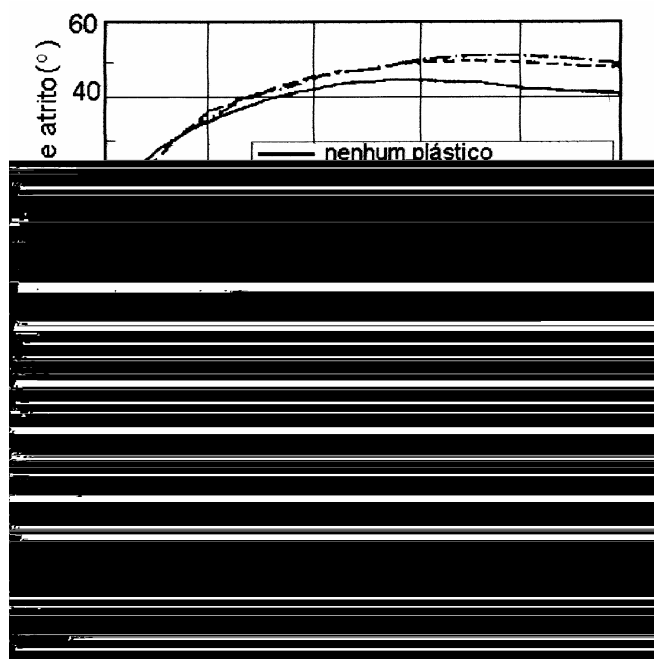


Figura II.5 – Deformação dependente da ativação do ângulo de atrito e do intercepto coesivo – KOCKEL (1995).

O aumento da coesão em função da presença dos materiais fibrosos pode ser compreendido pela análise da Figura II.6 (JESSBERGER et al., 1995). Num diagrama $q - p'$, a resistência ao cisalhamento do resíduo sólido propriamente dito (matriz básica + fibras) apresentou um intercepto coesivo e um movimento de linha de ruptura aproximadamente paralelo em relação à matriz básica do resíduo. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento variaram de $\phi = 42^\circ$ a 49° e $c = 51$ a 41 kPa para resíduos sólidos com idade entre 1 e 3 anos. As amostras ensaiadas possuíam diâmetro de 300 mm e altura de 600 mm.

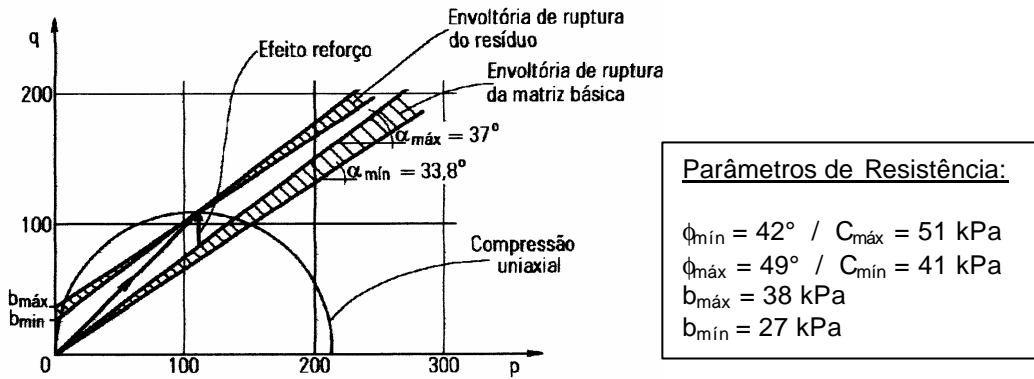


Figura II.6 – Envoltórias de resistência de resíduos sólidos com idade entre 1 e 3 anos – JESSBERGER et al. (1995).

MANASSERO et al. (1996) apresentaram alguns resultados obtidos em RSU triturado, matriz básica e mistura de solo-fibra (Figura II.7). É interessante notar que o resíduo sólido não mostra uma envoltória de ruptura significativamente bilinear, como acontece em solos reforçados. Este fato é devido a massa do RSU ser “reforçada” por plásticos de tamanhos e comportamento tensão-deformação diferentes. A envoltória de ruptura para o resíduo triturado é paralela à envoltória da matriz básica do RSU, o que vem a sugerir que o “reforço” não afeta as propriedades de atrito do RSU triturado, porém aumenta o valor do intercepto de coesão.

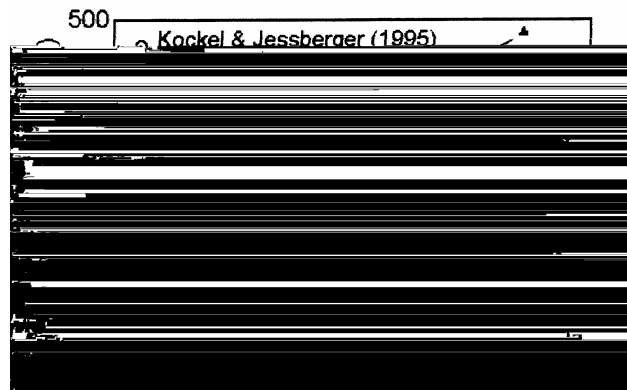


Figura II.7 – Envoltória de ruptura para diferentes materiais – MANASSERO et al. (1996).

O modelo de solo reforçado evidencia, como já citado, que a resistência ao cisalhamento de RSU tem que estar associada à sua composição inicial e ao tempo de decomposição. De acordo com STRAUSS (1998), deve estar associada à composição inicial, porque esta determina a quantidade de material fibroso, que rege a resistência coesiva; e ao tempo de decomposição, porque este comanda a redução do material biodegradável em meio

à matriz básica, gerando significativas mudanças na resistência dos resíduos sólidos em função do tempo.

2.4. INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

Um dos maiores problemas na obtenção dos parâmetros geotécnicos de RSU, segundo MITCHELL et al. (1995), é a dificuldade em obter e ensaiar amostras de dimensões suficientes para representar as condições in-situ. Além do mais, não existem procedimentos de amostragem ou ensaios que sejam considerados padrão por pesquisadores e engenheiros geotécnicos.

Quatro aproximações gerais são utilizadas para estimar a resistência ao cisalhamento dos RSU (MITCHELL & MITCHELL 1992, MANASSERO et al. 1996):

- i- Ensaios de laboratórios;
- ii- Retro-análises de ensaios de campo e registros operacionais;
- iii- Ensaios de campo;
- iv- Ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões.

2.4.1. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios de laboratório mais utilizados na avaliação da resistência dos resíduos sólidos urbanos são os ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais. Estes ensaios vêm sendo executados em amostras preparadas em laboratórios e amostras deformadas coletadas de aterros sanitários. Segundo KÖNIG & JESSBERGER (1997) e KNOCHENMUS et al. (1998), a maior limitação na realização destes ensaios consiste na dificuldade em obter amostras de boa qualidade, no que se refere à distribuição do tamanho dos grãos e à composição representativa do total, assim como no emprego de equipamentos de grandes dimensões.

No atual estado de conhecimento, MANASSERO et al. (1996) consideram de grande utilidade os conceitos teóricos derivados do comportamento de solos para a interpretação dos ensaios com resíduo sólido. Desta forma, os conceitos de ângulo de atrito e intercepto de coesão são normalmente utilizados.

2.4.1.1. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Os ensaios de cisalhamento direto vêm sendo executados por alguns pesquisadores a fim de determinar os parâmetros de resistência dos RSU e para obter, em alguns casos, os parâmetros de resistência na superfície de contato entre o resíduo sólido e geossintético (DEL GRECO & OGGERI 1993). De acordo com SIEGEL et al. (1990) e MANASSERO et al. (1996), este tipo de ensaio não reproduz o real comportamento dos resíduos no aterro, mas serve como uma aproximação inicial para procedimentos mais exatos.

LANDVA et al. (1984) e LANDVA & CLARK (1987) observaram que o resíduo sólido apresentou resistência mais baixa quando reensaiado, em ensaio de cisalhamento direto, após um ano de decomposição. O ângulo de atrito que variava originalmente de 38° a 42° havia decrescido para 33°; já a coesão que havia variado de 16 a 19 kPa, manteve-se em 16 kPa. Segundo os autores são necessários mais resultados para a confirmação do decréscimo da resistência com a decomposição do resíduo sólido.

TURCZYNSKI (1988) analisando os aspectos geotécnicos de construção de aterros de resíduos sólidos determinou os parâmetros de resistência em diferentes idades das amostras. A Tabela II.2 mostra os dados obtidos pelo autor. A variação dos parâmetros é mais representativa para a coesão, tendo como justificativa o fato que os materiais de reforço, ou seja, as fibras existentes no resíduo sólido tornam-se menos resistentes com o tempo.

Tabela II.2 – Parâmetros de resistência para resíduos sólidos de diferentes idades - TURCZYNSKI (1988).

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

A Tabela II.3 mostra os resultados de ensaios de cisalhamento direto realizados em amostras de resíduos sólidos de *Tokyo Port*, segundo MATSUMOTO et al. (1987) *apud* SHIMIZU (1997). Não foi verificada nos ensaios uma clara ruptura ao cisalhamento, como se observa em amostras de solo. Isto sugere que os parâmetros determinados, tais como coesão aparente e ângulo de atrito, não servem como indicadores absolutos de resistência ao cisalhamento, mas simplesmente se referem a uma condição específica de deformação.

Tabela II.3 – Coesão aparente e ângulo de atrito – Ensaio de cisalhamento direto - MATSUMOTO et al. (1987) apud SHIMIZU (1997).

ATERRO	MÉTODO DE ENSAIO	ANO	d (%)	c (kPa)	f (°)	OBSERVAÇÃO
Aterro Nº 15, Tokyo Port	Ensaio de cisalhamento direto	1972	15	47 – 67	30 - 37	No fim do aterramento
Aterro atrás do Central Breakwater, Tokyo Port	Ensaio de cisalhamento, ϕ 20 cm	1974	15	48 – 114	47	Nos estágios iniciais do aterramento

Obs: d – deslocamento horizontal.

KÖLSCH (1990) realizou ensaios de resistência em resíduo sólido modelado através de ensaios de cisalhamento direto (100 mm x 100 mm), com o objetivo de verificar a suposição de condição limite (de ruptura) não linear deste tipo de material, bem como para obter mais conhecimentos sobre a influência das fibras na resistência ao cisalhamento. O resíduo sólido modelado foi composto de 05 (cinco) diferentes materiais (papel, sacos plásticos, batata, madeira e areia), sendo eles bastante frequentes em aterros sanitários. Este

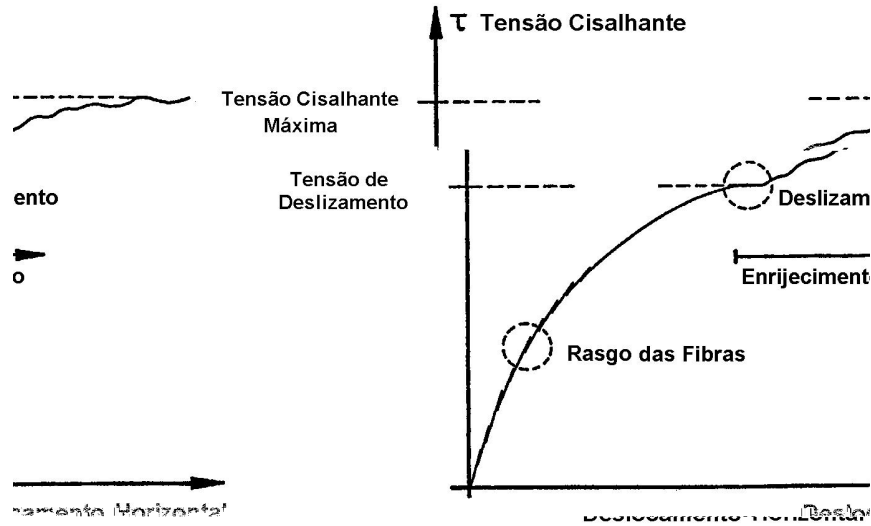


Figura II.8 – Ensaio de cisalhamento em resíduo sólido modelado – Processo de cisalhamento característico – KÖLSCH (1990).

No diagrama da Figura II.9 está apresentada a relação tensão cisalhante (deslizamento) versus tensão normal, determinada por KÖLSCH (1990) em ensaios com amostras de resíduo sólido modelado, fresco e velho. Observa-se que há correlações não lineares, isto significa que ocorrem quebras (rupturas) da linha de cisalhamento. No resíduo fresco (novo) identificam-se duas quebras, uma em região de tensões normais mais baixas, em 200 kN/m^2 , onde as fibras de papel contribuem para a resistência ao cisalhamento, e outra em faixas de tensões normais mais altas ($= 400 \text{ kN/m}^2$), quando as fibras de plásticos são quem contribuem para a resistência. Em resíduo sólido velho modelado, o qual contém apenas fibras plásticas como materiais de reforço, reconhece-se apenas uma quebra. Os valores de ângulo de atrito determinados nos ensaios foram de $26,4^\circ$ para resíduo sólido fresco e $17,7^\circ$ para resíduo sólido velho.

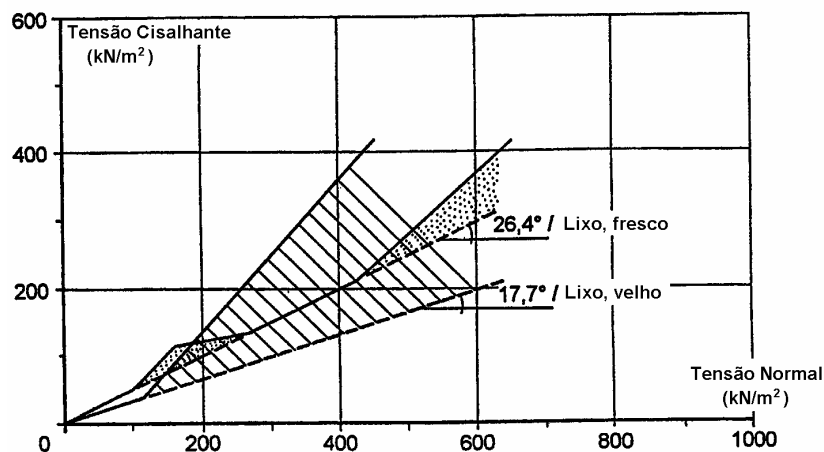


Figura II.9 – Ensaio de resistência em resíduo sólido modelado – KÖLSCH (1990).

LANDVA & CLARK (1990) realizaram ensaios de cisalhamento direto drenados em resíduos sólidos de diferentes idades em aterros do Canadá. O equipamento de laboratório utilizado para os ensaios possui caixa de cisalhamento de 287 mm x 434 mm. A velocidade em que as amostras foram cisalhadas foi de aproximadamente 1,5 mm/minuto. Com relação aos materiais do RSU, em ambas condições natural e seca, os mesmos possuíam natureza granular e fibrosa. De acordo com a Figura II.10, foi obtido um ângulo de atrito variando entre 24° a 41° e uma coesão entre zero e 23 kPa. Analisando-se a figura, verifica-se que: (i) no caso do resíduo novo triturado de *Edmonton*, o ângulo de atrito foi 24°, inferior quando comparado ao resíduo antigo; (ii) a medida que o resíduo sólido fica mais velho, ocorre uma tendência de redução da resistência ao cisalhamento, quando comparam-se os dados de 1983 e 1984; no caso de *Blackfoot*, foi de $c = 19$ kPa e $\phi = 39^\circ$ para $c = 16$ kPa e $\phi = 33^\circ$; (iii) os resultados obtidos de ensaios de cisalhamento realizados em sacos plásticos empilhados horizontalmente, admitindo-se escorregamento ao longo do plano cisalhante, forneceram um ângulo de atrito de 9°; e (iv) nos ensaios realizados em resíduos de madeira, os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram $c = 0$ e $\phi = 36^\circ$. Os autores afirmam que a resistência ao cisalhamento do RSU é altamente variável, dependendo do tipo de material envolvido. Não se verificou nenhuma evidência direta de que a resistência ao cisalhamento modifica significativamente com o tempo.

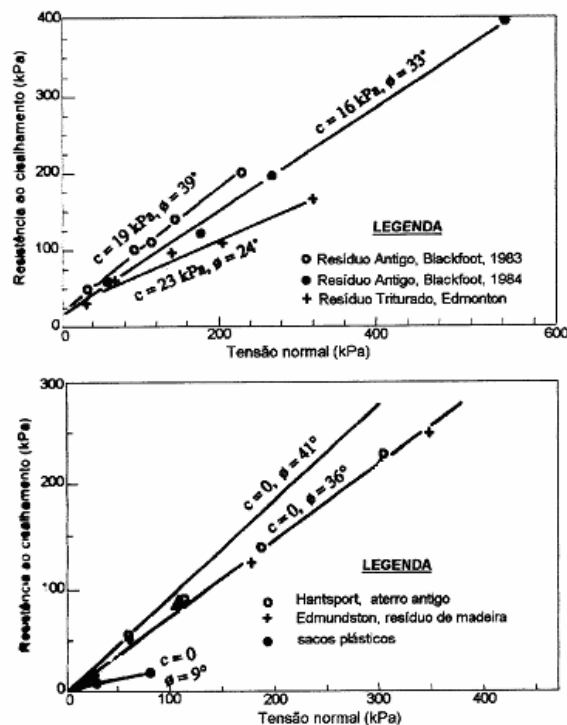


Figura II.10 – Ensaio de cisalhamento direto em amostras de resíduos sólidos em aterros do Canadá – LANDVA e CLARK (1990).

SIEGEL et al. (1990) realizaram ensaios de cisalhamento direto em amostras de RSU velho do aterro *OII (Operating Industries, Inc.)* no Monterey Park (Califórnia). O aterro é constituído de resíduo sólido municipal e industrial/comercial, coberto com solo de várias espessuras. Os ensaios foram conduzidos sob condições consolidadas drenadas em amostras de resíduos sólidos com altura de 76 a 102 mm e 130 mm de diâmetro. Devido à variabilidade do resíduo sólido, os ângulos de atrito e coesão derivados do critério Mohr-Coulomb foram considerados inapropriados. O ângulo de atrito variou de 39 a 53°, e admitiu-se nos ensaios não haver coesão. Este último valor do ângulo de atrito é significativamente superior aos valores publicados na literatura.

Segundo os autores, os resultados dos ensaios de cisalhamento devem ser usados com cautela em função dos seguintes motivos: (i) em geral, o equipamento do ensaio de cisalhamento direto, utilizado neste programa de ensaios, não foi bem adaptado para os grandes deslocamentos cisalhantes que seriam necessários para mobilizar a resistência ao cisalhamento do resíduo sólido; (ii) a presença de grandes partículas, relativamente resistentes, produziu resultados elevados de resistência ao cisalhamento; (iii) o tamanho das amostras ensaiadas foi significativamente menor do que muitas partículas existentes no resíduo sólido do aterro.

DEL GRECO & OGGERI (1993) realizaram ensaios de cisalhamento direto utilizando dois fardos de RSU compactados, com dimensões de 400 mm x 500 mm x 600 mm, sendo o peso de cada fardo aproximadamente 50 kg. O esquema do aparelho está apresentado na Figura II.11. O procedimento utilizado para o ensaio consiste em: aplicar tensão vertical sobre os fardos; aguardar seu adensamento; aplicar carga horizontal; medir a deformação lateral dos fardos e o deslocamento relativo dos mesmos. As tensões verticais aplicadas variaram normalmente de 10 a 60 kPa, alcançando um valor máximo de 100 kPa. Este valor corresponde a uma pilha de resíduos sólidos de cerca 15 m de altura com uma densidade de 7,0 kN/m³. O cisalhamento foi induzido para um comprimento de aproximadamente 100 mm. Os ensaios desenvolvidos permitiram a análise do comportamento cisalhante dos fardos de resíduo sólido em contato direto, com dois níveis de compactação diferentes ($\gamma_1 = 5,0 \text{ kN/m}^3$ e $\gamma_2 = 7,0 \text{ kN/m}^3$). Os valores medidos das tensões verticais e cisalhantes nestes ensaios estão mostrados na Figura II.12. Observa-se nesta figura que a compactação do resíduo sólido influencia os parâmetros de resistência, ou seja, quanto maior o nível de compactação maior será a resistência. Em ambos os casos a distribuição dos valores mostram um comportamento

cisalhante similar ao de uma massa de rocha com descontinuidade rugosa (áspera). Segundo os autores existem duas possibilidades de interpolação para a obtenção das envoltórias de resistência das amostras investigadas. Em baixos níveis de tensão normal, um maior valor de ângulo de atrito é mobilizado, em função das asperezas na superfície de cisalhamento, enquanto que para maiores níveis de tensão normal estas asperezas são niveladas e o cisalhamento ocorre em condições de atrito residual. Os valores baixos de ângulo de atrito residual poderiam ser explicados pela grande quantidade de materiais plásticos nestes fardos, segundo os autores.

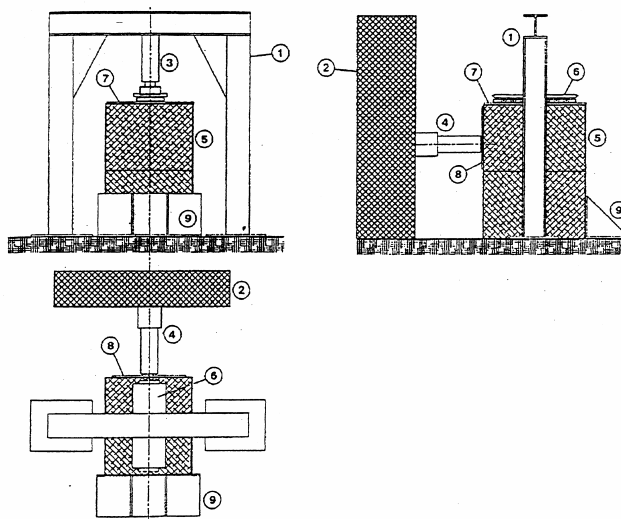


Figura II.11 – Esquema do equipamento de cisalhamento direto: (1) armação de aço; (2) parede de concreto; (3) macaco de tensão normal; (4) macaco de tensão cisalhante; (5) fardos de resíduos; (6) placa com rolamento; (7) e (8) placas de aço; (9) ancoragem do fardo inferior – DEL GRECO & OGGERI (1993).

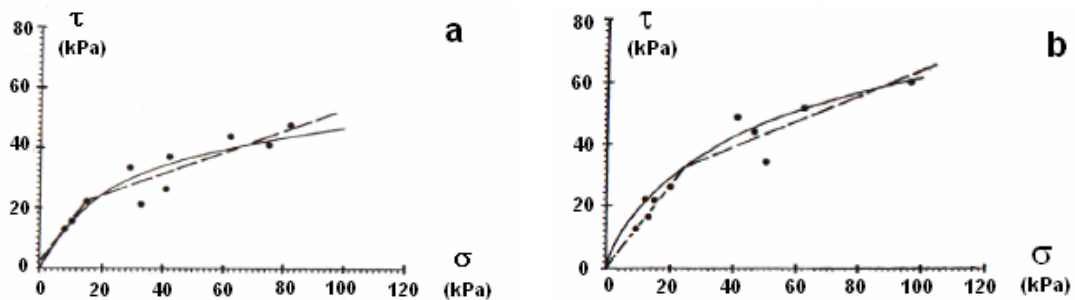


Figura II.12 – Diagramas τ - σ de ensaios de cisalhamento direto realizados em fardos de resíduo sólido: A) Baixa densidade. B) Alta densidade. – DEL GRECO & OGGERI (1993).

GABR & VALERO (1995) apresentaram resultados de ensaios de cisalhamento direto executados em resíduos velhos (15 a 30 anos de aterramento) do aterro de *Pioneer Crossing* (Pensilvânia), compactados diretamente em uma caixa de cisalhamento de 63,5 mm de diâmetro e 23 mm de espessura. A velocidade de deslocamento foi baixa, visando a dissipação da pressão neutra durante o cisalhamento (como por exemplo, para uma tensão normal de 69 kPa foi utilizada uma velocidade de 0,024 mm/min). As amostras ensaiadas apresentaram um aumento do ângulo de atrito com o deslocamento horizontal, sendo que a coesão permaneceu constante. O ângulo de atrito variou de 20,5° a 39° e a coesão de 0 a 27,5 kPa. A grande variação dos resultados, segundo os autores, é em função da diferença de idade, composição, tamanho e densidade das amostras.

Uma investigação da componente friccional dos resíduos sólidos foi realizada por COLLINS & KÖLSCH (1996), através de ensaios de cisalhamento direto em laboratório, utilizando-se uma grande caixa de cisalhamento com dimensões de 2,0 m x 1,0 m x 1,5 m (comp x larg x alt). O volume de resíduo sólido ensaiado foi aproximadamente 3 m³, com uma superfície cisalhante de 2,0 m². A Figura II.13 mostra o equipamento utilizado para realização dos ensaios de cisalhamento direto. O procedimento do ensaio não difere dos ensaios de cisalhamento direto em caixas menores, normalmente utilizadas em solos. Por meio destes ensaios, os autores constataram que materiais fibrosos, não coesivos, podem admitir forças de tração.

Foram investigados por COLLINS & KÖLSCH (1996) quatro tipos de materiais nestes ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões, com o objetivo de avaliar a diferença entre resíduo sólido fresco (novo) e degradado (antigo), bem como entre resíduo granular e com conteúdo de materiais de reforço. Os resíduos novos possuíam 23,7 % (Novo 1) e 18,6 % (Novo 2) de teor de fibras, enquanto que os resíduos antigos tinham 21,6 % (Antigo 1) e 0 % (Antigo 2). A porcentagem de material, cujo tamanho de partículas era inferior a 40 mm, foi de 45,5 % (Novo 1) e 73,4 % (Novo 2), para os resíduos novos, e de 65,3 % (Antigo 1) e 100 % (Antigo 2), no caso dos resíduos antigos.

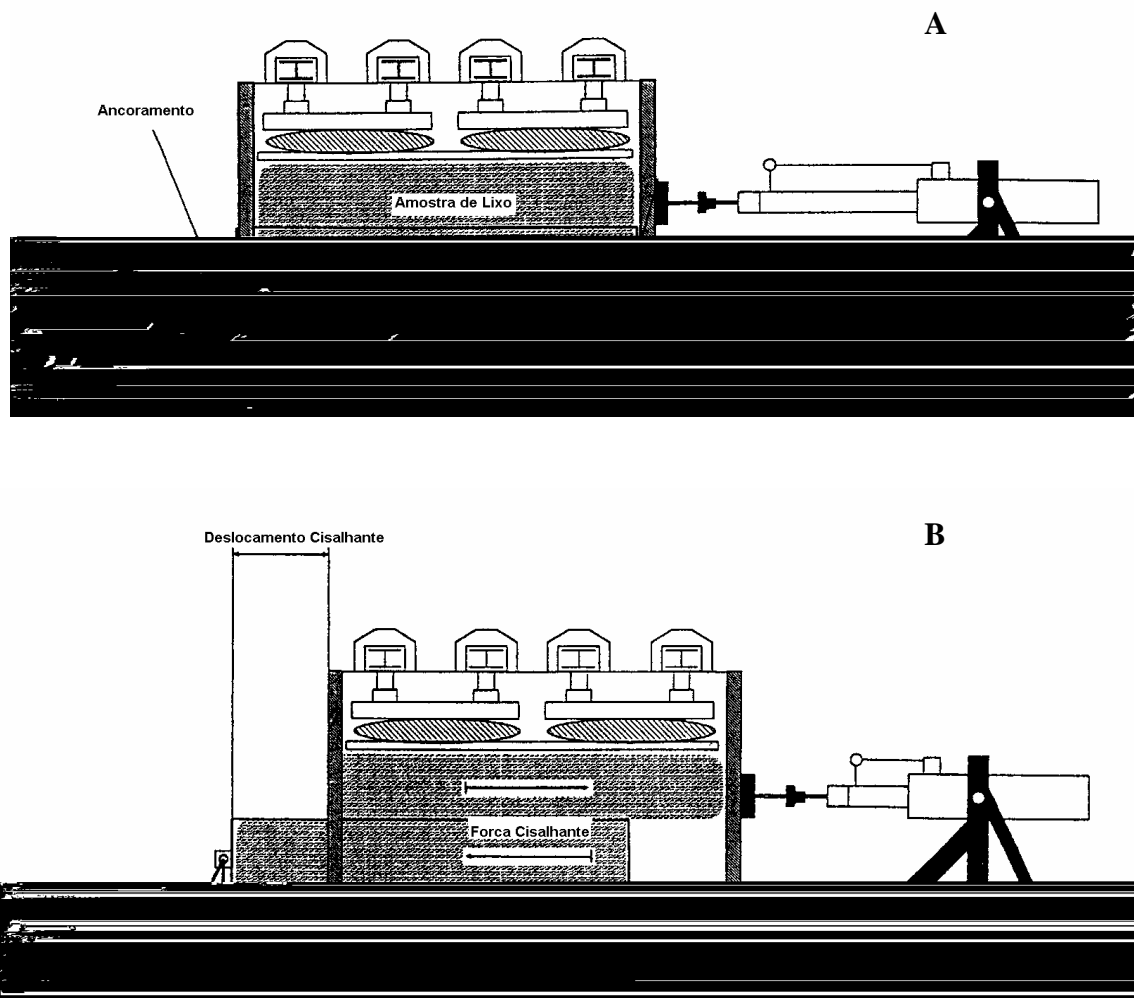


Figura II.13 – Equipamento para ensaio de cisalhamento direto. A) Início do ensaio. B) Fase de cisalhamento – COLLINS & KÖLSCH (1996).

A Figura II.14 mostra o resultado do ensaio na tensão normal de 188 kN/m^2 da amostra “Novo 2”. O deslocamento horizontal atingiu 200 mm, que corresponde a 10 % do comprimento da amostra, fornecendo uma tensão cisalhante de 157 kN/m^2 . A tensão máxima cisalhante neste caso foi de 143 kN/m^2 , pois foi determinado um valor de 14 kN/m^2 decorrente do atrito do equipamento vazio. Os resultados dos ensaios em diagramas τ - σ são mostrados nas Figuras II.15 e II.16, respectivamente, para as amostras de resíduos novos e antigos.

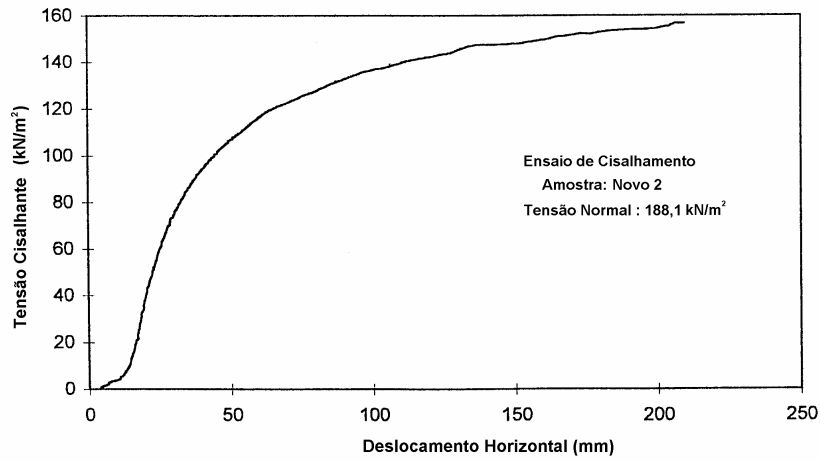


Figura II.14 – Diagrama tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – COLLINS & KÖLSCH (1996).

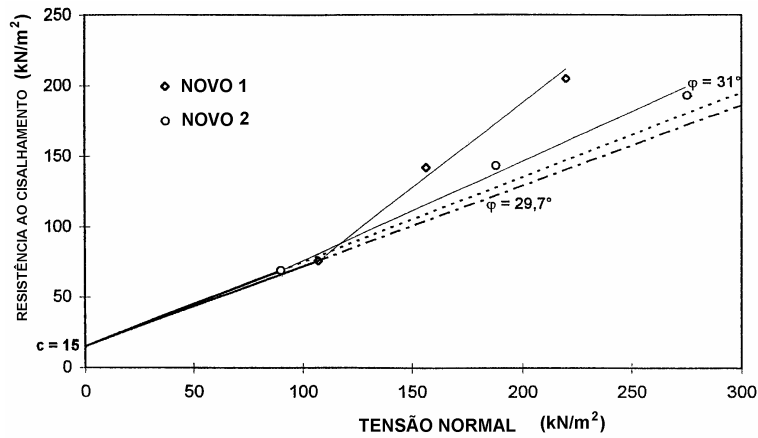


Figura II.15 – Ensaios de cisalhamento de grandes dimensões em resíduo sólido novo – COLLINS & KÖLSCH (1996).

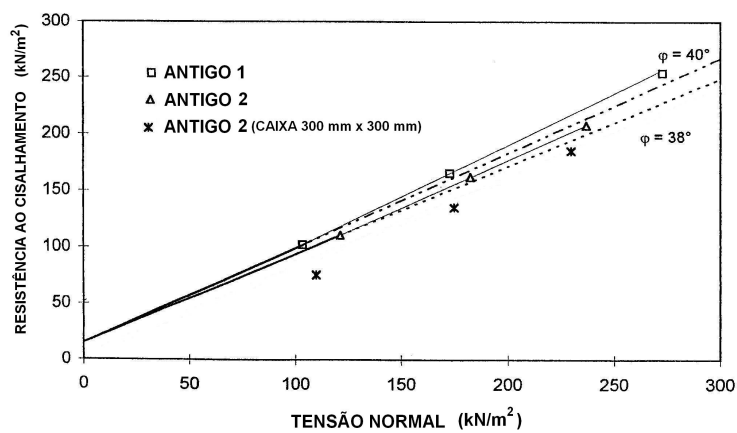


Figura II.16 - Ensaios de cisalhamento de grandes dimensões em resíduo sólido antigo – COLLINS & KÖLSCH (1996).

Para as amostras dos resíduos “Novo 2”, que possui menos teor de fibras em relação à “Novo 1”, o ângulo de atrito foi $37,1^\circ$ e a coesão 1 kN/m^2 (Figura II.15). As amostras “Novo 1”, embora tenham maior teor de fibras, apresentaram tensão cisalhante semelhante à “Novo 2” para a primeira tensão normal aplicada, cerca de 100 kN/m^2 . Contudo, com o aumento das tensões normais, verifica-se um aumento do ângulo de atrito, que atingiu um

parâmetros de resistência dos resíduos sólidos obtidos foram, aproximadamente, coesão 26 kPa e ângulo de atrito 24°.

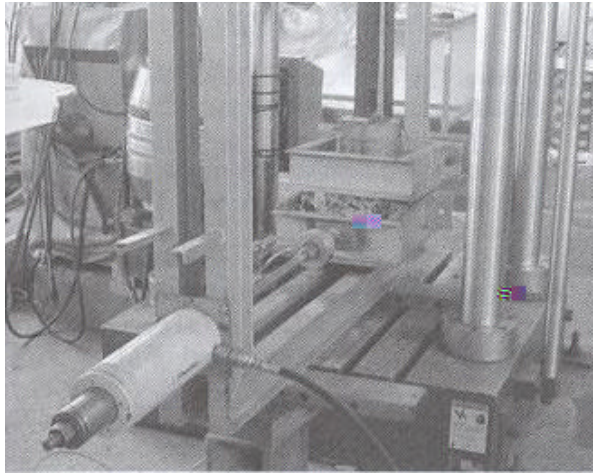


Foto II.1 – Caixa de cisalhamento direto utilizada em laboratório – CAICEDO et al. (2002).

Ensaio de cisalhamento direto também vêm sendo realizados para estudo do comportamento mecânico e determinação de parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos resultantes de pré-tratamento mecânico e biológico. Na Alemanha, esta prática é bastante comum, e vem se tornando uma tendência mundial, pois o pré-tratamento mecânico-biológico gera uma série de benefícios, segundo HEERENKLAGE & STEGMANN (1995): redução do volume pela separação e reciclagem dos componentes do resíduo sólido e pela degradação da matéria orgânica; redução do potencial de emissão de chorume e gás do aterro pela transformação da matéria orgânica em um material inerte; melhoria da operação do aterro pela redução da emissão de poeira e odor; menores custos de compactação pela melhoria das

5396 Two mKLAs auto gea melh. delgea CANTUÁRIA COSTA5 -20.2503-0.0523 Tc 1.64415 Tw () Tjapact21 3o Tesalameva Tj am3de25 TD () Tj 35.25.81094 Tw (C6406 Two m150 gân 600 kN/m5 TD88) TTj 35.2

ultrapassada ou quando era atingido o deslocamento horizontal máximo permitido pelo equipamento, 20 % do comprimento da amostra. Foram utilizados cerca de 70 kg de resíduo sólido, em peso úmido, para cada amostra ensaiada. Após a primeira série de ensaios (tensões normais: 150, 300 e 600 kN/m²), foi utilizado o mesmo material para a segunda série, nas mesmas tensões normais, tendo em vista que a quantidade de material amostrado não havia sido suficiente para a realização de ensaios em amostras virgens. Neste caso, o material foi retirado do equipamento, homogêneo e preparado no teor de umidade desejado. Na série 1 o peso específico seco foi de 11,5 kN/m³ e teor de umidade de 26,3 %, em termos de substâncias úmidas, enquanto que na série 2 foi também de 11,5 kN/m³ e 25,4 %, respectivamente. A fase de adensamento durou 48 horas e a velocidade de cisalhamento adotada nos ensaios foi 0,05 mm/min. As Figuras II.17A e B ilustram os diagramas tensão - deslocamento para os três níveis de carregamento para a série 1 e 2, respectivamente. As curvas indicam que são necessários grandes deslocamentos horizontais das amostras para se atingir a ruptura. Utilizando-se o critério de Mohr-Coulomb, foram determinados os parâmetros de resistência (20 % do comprimento da amostra): i) $\phi' = 22,9^\circ$ e $c' = 59,7$ kN/m² (Série 1), ii) $\phi' = 26,4^\circ$ e $c' = 17$ kN/m² (Série 2). As curvas de resistência de ambas séries 1 e 2, apresentadas na Figura II.17, mostram o comportamento típico de um material elasto-plástico. No início dos deslocamentos horizontais a tensão cisalhante cresce fortemente; em seguida, a evolução das curvas nivela e as tensões cisalhantes crescem a partir de então mais discretamente ao longo dos deslocamentos.

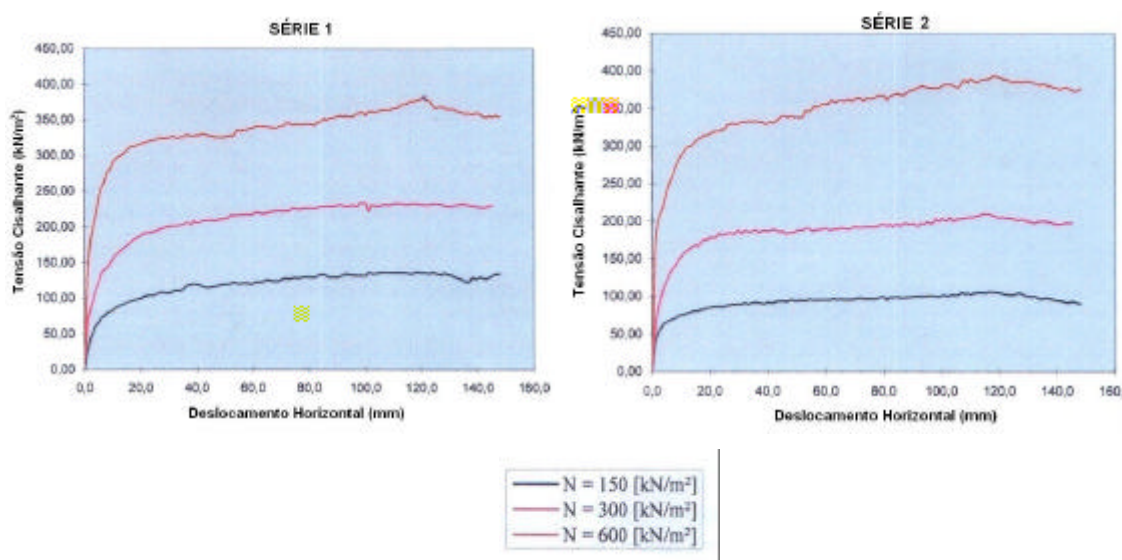


Figura II.17 – Diagrama de tensão cisalhante versus deformação, séries 1 e 2 – MÜNNICH (2001).

Os dados da Figura II.17 mostram ainda que nenhum valor de pico da resistência foi alcançado. Comparando-se os parâmetros de resistência entre as duas séries, verifica-se que os dados não coincidem, embora tenha sido utilizado o mesmo material nos ensaios. A diferença em termos de ângulo de atrito é menor. O alto valor da coesão obtido na Série 1 foi provavelmente devida parte à ativação das tensões de tração. O reuso do mesmo material para a Série 2 provocou alterações de tal forma que as tensões de tração não foram mais ativadas. O autor afirma que tal situação também foi observada em outros ensaios, porém as causas exatas para isto ainda não são conhecidas. O valor da coesão de 17 kN/m^2 , obtido na Série 2, é adequado para este tipo de resíduo sólido.

SCHEELHAASE et al. (2001), citado por DE LAMARE NETO (2004), analisaram através de ensaios de cisalhamento direto ($300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$) a influência do tempo de duração de pré-tratamento mecânico e biológico (16 a 36 semanas) e de diferentes teores de umidade de resíduos sólidos na resistência ao cisalhamento. As amostras tratadas durante 16 semanas possuíam diâmetro máximo de partículas igual a 100 mm e umidade de 36% , enquanto que as amostras tratadas durante 36 semanas tinham respectivamente 60 mm e 37% . Um maior tempo no tratamento das amostras implicou uma melhor distribuição granulométrica (redução do diâmetro máximo das partículas de 100 mm para 60 mm e aumento da porcentagem de partículas finas, de $13,2 \%$ para $39,1 \%$). A Tabela II.4 indica os valores dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito), e também a tensão cisalhante para a tensão normal de 100 kN/m^2 . Os dados mostram que nas amostras com idade de pré-tratamento de 16 semanas, independente do teor de umidade, o valor da resistência ao cisalhamento na tensão normal de 100 kN/m^2 aumenta ao longo do deslocamento horizontal, sem atingir um valor máximo, até mesmo para deformações da ordem de 30% , ou seja, deslocamentos em torno de 100 mm . As amostras com idade de pré-tratamento de 36 semanas, por sua vez, indicaram que a resistência ao cisalhamento cresce, alcançando o máximo para o deslocamento de 80 mm , e em seguida sofre uma redução. Quanto aos parâmetros de resistência, de uma forma geral, há uma tendência de crescimento do ângulo de atrito com o aumento dos deslocamentos, independente da idade de pré-tratamento e do teor de umidade, enquanto que a coesão atinge valores máximos para deslocamentos de 60 mm , neste último caso com exceção das amostras 3 e 4. O ângulo de atrito para o deslocamento máximo, para as amostras com idade de pré-tratamento de 16 semanas, foi reduzido quando do aumento do teor de umidade, enquanto que o mesmo não aconteceu para a amostra (36

sem.). O aumento do teor de umidade gerou também redução da coesão, exceto para a amostra (16 sem.) na umidade de 45 %.

Tabela II.4 – Parâmetros de resistência de resíduos sólidos pré-tratados em função dos deslocamentos horizontais - SCHEELHAASE et al. (2001), citado por DE LAMARE NETO (2004).

AMOSTRA	PARÂMETROS	DESLOCAMENTO HORIZONTAL (mm)				
		20	40	60	80	100
1 16 sem. w = 20 %	ϕ' (°)	22,54	28,10	33,90	38,87	43,35
	c' (kN/m ²)	30,41	42,07	48,33	46,55	39,34
	τ (kN/m ²)	134,17	175,56	216,32	248,06	275,34
2 16 sem. w = 36 %	ϕ' (°)	24,08	28,94	34,99	39,28	42,08
	c' (kN/m ²)	33,96	46,83	46,82	36,43	26,52
	τ (kN/m ²)	145,69	185,07	221,81	240,91	252,25
3 16 sem. w = 45 %	ϕ' (°)	25,13	30,79	35,07	37,09	39,04
	c' (kN/m ²)	25,73	35,83	43,77	51,62	54,18
	τ (kN/m ²)	143,00	184,80	219,28	240,62	256,92
4 36 sem. w = 20 %	ϕ' (°)	28,81	34,57	40,16	41,28	38,55
	c' (kN/m ²)	26,82	35,23	34,26	33,08	45,04
	τ (kN/m ²)	164,32	207,50	245,23	252,56	244,26
5 36 sem. w = 37 %	ϕ' (°)	26,20	32,25	36,91	40,40	40,33
	c' (kN/m ²)	31,29	39,44	39,44	32,74	32,86
	τ (kN/m ²)	154,31	197,18	227,21	245,51	245,10

Estudos da influência do diâmetro máximo das partículas constituintes de resíduos sólidos pré-tratado mecânica e biologicamente na resistência ao cisalhamento foram realizados na Alemanha, a partir de ensaios de cisalhamento direto, conforme KLÜMPER (1998), FEHRER (2002) e HEISS-ZIEGLER & FEHRER (2003).

KLÜMPER (1998) obteve parâmetros de resistência de resíduos pré-tratados mecânica e biologicamente em função do diâmetro máximo das partículas, de acordo com a Tabela II.5. O aumento do diâmetro das partículas dos resíduos causa uma pequena redução do ângulo de atrito e um aumento no valor da coesão. Espera-se que quanto maior o diâmetro das partículas constituintes de um resíduo, neste caso 100 mm, maior seja a quantidade da matriz fibrosa, que é composta de materiais como plásticos, têxteis, ocasionando em valores mais elevados de coesão, devido às forças de tração desenvolvidas, quando comparados ao material com menor diâmetro de partículas (60 mm). Com relação ao ângulo de atrito, verificou-se que o mesmo foi mais elevado para o material com menor diâmetro de partículas, provavelmente por se tratar de um material mais homogêneo, com maior entrosamento dos constituintes, e conseqüentemente maior peso específico.

Tabela II.5 – Parâmetros de resistência de resíduos pré-tratados em função do diâmetro máximo das partículas – KLÜMPER (1998).

DIÂMETRO MÁXIMO DAS PARTÍCULAS (mm)	COESÃO (kN/m ²)	ÂNGULO DE ATRITO (°)
60	32,7	41,3
100	36,4	39,3

Este tipo de análise também foi realizado através de ensaios de cisalhamento direto, dimensões 500 mm x 500 mm x 200 mm, em resíduos resultantes de pré-tratamento mecânico-biológico, segundo FEHRER (2002) e HEISS-ZIEGLER & FEHRER (2003). As amostras de resíduos sólidos investigadas foram provenientes de dois locais de pré-tratamento de resíduos, *Oberpullendorf* (OP) e *Allerheiligen* (AH), cujos diâmetros máximos de partículas estudados foram 25 mm para o primeiro caso, e 12, 40 e 80 mm para o segundo caso. Além disto, também foram executados ensaios de cisalhamento direto em equipamento de menores dimensões (101,1 mm de diâmetro e 27 mm de altura) em amostras de 2 mm de diâmetro máximo de partículas para ambos os resíduos. Os resultados são mostrados na Tabela II.6.

Tabela II.6 – Parâmetros de resistência de resíduos pré-tratados – FEHRER (2002) e HEISS-ZIEGLER & FEHRER (2003).

AMOSTRA	DIÂMETRO MÁXIMA DAS PARTÍCULAS (mm)	COESÃO (kN/m ²)	ÂNGULO DE ATRITO (°)
OP 2	2	4,8	36,4
OP 25	25	6,0	32,6
AH 2	2	4,9	35,9
AH 12	12	9,5	31,5
AH 40	40	6,7	36,2
AH 80	80	4,2	39,5

De acordo com os autores, verifica-se na Tabela II.6 que a coesão decresce, enquanto que o ângulo de atrito cresce, com o aumento do diâmetro máximo das partículas do resíduo sólido, para as amostras AH 12, 40 e 80. Tal situação não foi verificada porém para as amostras com diâmetro máximo de 2 mm, para os dois locais estudados, pois o alto teor de material mineral presente nas amostras, responsável por um melhor entrosamento entre as partículas constituintes do material, deve ter ocasionado valores mais altos de ângulo de atrito.

A Figura II.18 apresenta as envoltórias de resistência para o caso das amostras dos resíduos de *Allerheiligen* (AH), nas dimensões de partículas de 12, 40 e 80 mm. Para tensões normais até cerca de 50 kN/m², verifica-se que as envoltórias são praticamente coincidentes,

pois as fibras constituintes do material não haviam ainda sido mobilizadas. Já para as tensões entre 50 e 100 kN/m², é provável que as fibras tenham sido mobilizadas, porque há um ganho de resistência mais relevante, sendo este comportamento mais evidente para a amostra AH 80. E com o aumento das tensões normais, neste caso superior a 100 kN/m², o ganho de resistência tende a diminuir, e as envoltórias de resistência se tornam praticamente paralelas. Os autores afirmam que o modelo proposto por KÖLSCH (1996) pode também ser válido para resíduos pré-tratados mecânica e biologicamente no que diz respeito à influência das fibras na resistência ao cisalhamento do RSU.

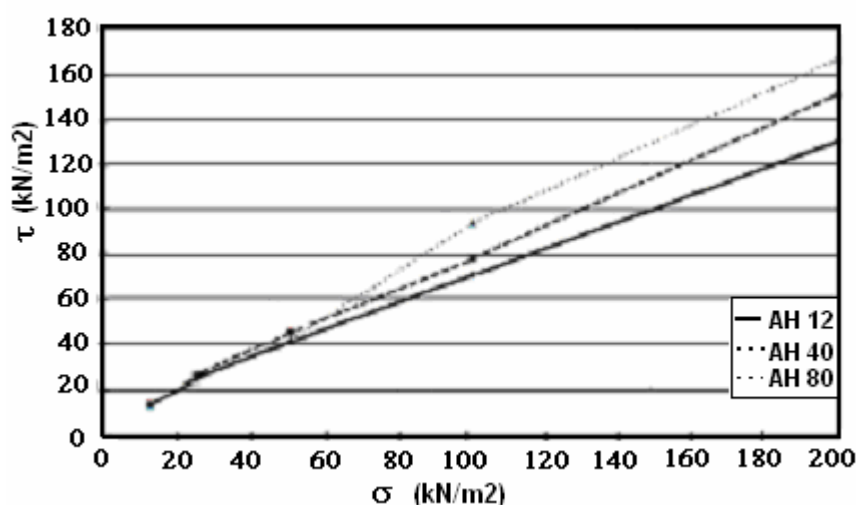


Figura II.18 – Envoltórias de resistência de resíduos pré-tratados - FEHRER (2002) e HEISS-ZIEGLER & FEHRER (2003).

DE LAMARE NETO (2004) investigou amostras de resíduos sólidos provenientes de um pré-tratamento mecânico e biológico em caixa de cisalhamento direto, cujas dimensões eram 450 mm x 200 mm x 250 mm, para o material passando na peneira 3/4", e em caixa de cisalhamento convencional (100 mm x 100 mm x 70 mm) para o material passando na peneira 3/8". A moldagem das amostras nas caixas de cisalhamento foi efetuada em camadas delgadas com ligeira compactação para a melhor acomodação do material, com peso específico de 8,49 kN/m³. A velocidade adotada de ensaio foi 2,41 mm/min. Segundo o autor, optou-se por uma velocidade mais rápida para agilizar os ensaios, já que a mesma pouco influenciaria os resultados obtidos, no caso de material seco com predominância granular. As curvas de resistência ao longo do deslocamento horizontal, bem como as envoltórias de resistência para ambos materiais estão apresentadas respectivamente nas Figuras II.19 e II.20. A Tabela II.7 indica os parâmetros de resistência para os ensaios realizados.

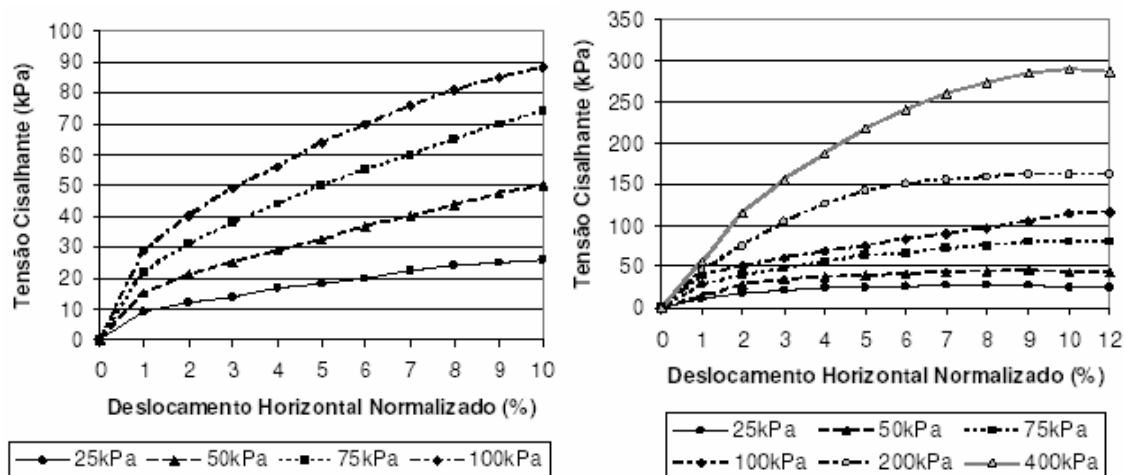


Figura II.19 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal de resíduos pré-tratados. A) Material passado na peneira 3/4". B) Material passado na peneira 3/8" – DE LAMARE NETO (2004).

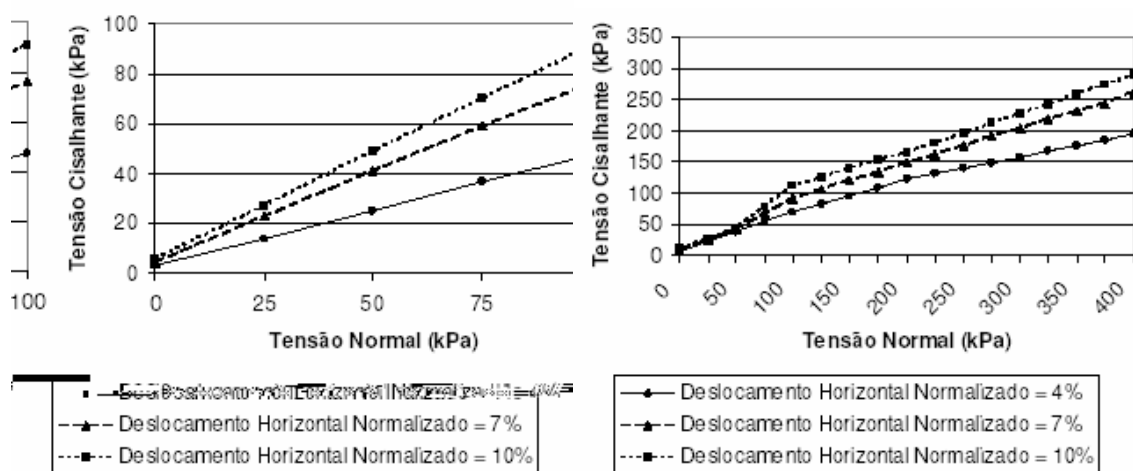


Figura II.20 – Envoltórias de resistência de resíduos pré-tratados. A) Material passado na peneira 3/4". B) Material passado na peneira 3/8" – DE LAMARE NETO (2004).

Tabela II.7 – Parâmetros de resistência de resíduos pré-tratados – DE LAMARE NETO (2004).

AMOSTRA	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	DESLOCAMENTO HORIZONTAL (%)		
		4	7	10
	ϕ' (°)	25° 25'	37° 14'	42° 36'
	c' (kPa)	3,0	4,5	6,0

Na Figura II.19, as curvas de resistência não demonstram comportamento de pico, para ambas amostras, mas sim uma tendência de crescimento até o máximo de deslocamento horizontal medido nos ensaios, em torno de 10 %. As envoltórias de resistência para o material passando na peneira 3/4", Figura II.20A, para os níveis de tensão normal ensaiados, com máximo em 100 kPa, foram lineares. Já no caso do material passando na peneira 3/8", onde foram realizados ensaios para níveis de tensões mais elevados, observa-se a existência de dois trechos distintos, levando o autor a levar as seguintes considerações:

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

ii) para tensões normais (σ') entre 50 e 100 kPa a resistência ao cisalhamento é acrescida de uma parcela (Z) devida à resistência à tração das fibras, ou seja, a resistência ao cisalhamento total pode ser representada pela por $\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi' + Z$. Esta parcela de resistência devida às fibras (Z) é função da tensão normal e do deslocamento horizontal considerado, podendo ser representada pela seguinte expressão: $Z = (\sigma' - 50) \cdot \operatorname{tg} (\delta - \phi')$, onde δ corresponde ao ângulo entre a envoltória considerada e a horizontal. No caso presente, esta parcela só começa a ser mobilizada para deslocamentos horizontais normalizados iguais ou superiores a 4%.

De acordo com o autor, os parâmetros de resistência aumentam com os deslocamentos horizontais, conforme Tabela II.7. Estes parâmetros são influenciados pelas fibras existentes no material, pois a medida que se aumentam os deslocamentos, há a mobilização destas fibras de forma crescente.

A Tabela II.8 sumariza alguns ensaios de cisalhamento direto realizados em amostras de resíduos sólidos, obtidos da literatura e apresentados nesta pesquisa. Estão especificadas algumas características dos ensaios, como por exemplo, dimensão da amostra, tipo de resíduo, velocidade de ensaio, parâmetros de resistência e critérios de ruptura. Verifica-se que não há uma padronização das dimensões das amostras investigadas, assim como dos critérios de definição de velocidade dos ensaios e dos critérios de ruptura. A heterogeneidade dos resíduos sólidos, caracterizada pela sua composição e tamanho das partículas, assim como o tipo de infra-estrutura existente em laboratórios de pesquisa, para este tipo de material, são fatores fundamentais na definição das dimensões dos corpos de prova, na escolha do equipamento e

no procedimento de ensaio a ser adotado. Enquanto não existir uma metodologia de ensaio e amostragem padrão para a realização de ensaios de resistência em resíduos sólidos, sempre haverá dificuldades para se conduzir análises comparativas dos demais estudos na área de RSU.

Tabela II.8 – Resumo de ensaios de cisalhamento direto realizados por diversos autores.

FONTE	DIMENSÃO DA AMOSTRA	TIPO DE RESÍDUO/ IDADE/ TRATAMENTO	VELOCIDADE DE ENSAIO (mm/min)	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA		CRITÉRIOS DE RUPTURA
				c (kN/m ²)	f (°)	
Kölsch (1990)	100 x 100 x 30 mm (comp x larg x alt)	Resíduo fresco	1,0	-	26,4	$\epsilon = 20 \%$
		Resíduo velho		-	17,7	
Landva & Clark (1990)	434 x 287mm (comp x larg)	Resíduo novo triturado	1,5	23	24	NI
		Resíduo velho		16	33	
Gabr & Valero (1995)	63,5 x 23 mm (diâm x alt)	Resíduo velho (15 a 30 anos)	0,024	0 - 27,5	20,5 - 39	$\epsilon = 5$ e 10%
Collins & Kölsch (1996)	2 x 1 x 1,5 m (comp x larg x alt)	Resíduo novo	NI	15	29,7 - 31	$\epsilon = 10 \%$
		Resíduo antigo		15	38 - 40	
Münnich (2001)	555 x 365 x 190 mm (comp x larg x alt)	Resíduo pré-tratado (2 anos)	0,05	59,7	22,9	$\epsilon = 20 \%$
				17	26,4	
Scheelhaase et al. (2001)	300 x 300 x 200 mm (comp x larg x alt)	Resíduo pré-tratado (16 a 36 semanas)	NI	26,52 – 54,18	38,55 – 43,35	$\epsilon = 30 \%$
De Lamare Neto (2004)	450 x 200 x 250 mm (comp x larg x alt)	Resíduo pré-tratado	2,41	6	42	$\epsilon = 10 \%$
	100 x 100 x 70 mm (comp x larg x alt)			11	37	

Obs: Os resíduos pré-tratados correspondem àqueles resultantes de processos mecânicos e biológicos.

NI – Não informado.

2.4.1.2 ENSAIO TRIAXIAL

Da mesma forma que o ensaio de cisalhamento direto convencional, o ensaio triaxial convencional utiliza amostras de pequenas dimensões, o que gera problemas e limitações no estudo de resistência dos RSU, necessitando assim de amostras representativas da massa. Diversos pesquisadores (SINGH & MURPHY 1990, GRISOLIA et al. 1995, GABR & VALERO 1995, KNOCHENMUS et al. 1998, VAN IMPE 1998 e WOJNAROWICZ et al. 1998) têm estudado a resistência ao cisalhamento dos RSU a partir de ensaios triaxiais. Na Universidade Ruhr de Bochum, na Alemanha, foram conduzidos no começo dos anos 90 um grande número de ensaios triaxiais, os quais estão relatados por JESSBERGER (1990a e 1990b), JESSBERGER & KOCKEL (1991 e 1993), KOCKEL & JESSBERGER (1994). Um trabalho sobre o estudo do comportamento mecânico de materiais tipo resíduos sólidos foi também realizado em conjunto entre as Universidades de Bochum, Aachen e Braunschweig, todas alemãs, e está apresentado por JESSBERGER et al. (1992).

Com base nos resultados dos ensaios triaxiais em RSU, as condições de ruptura não podem ser definidas com facilidade. Sendo assim, os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) devem ser determinados para níveis de deformação, sendo os valores de 10 a 20 % os mais utilizados. De acordo com GRISOLIA et al. (1995) e KONIG & JESSBERGER (1997), uma forma de apresentar os resultados de ensaios triaxiais em resíduos sólidos é o emprego das trajetórias de tensões, uma vez que elas facilitam a visualização dos resultados. Por meio dos pontos obtidos das trajetórias, pode-se traçar diversas envoltórias de resistência para diferentes deformações.

STOLL (1971) realizou ensaios triaxiais em corpos de prova consolidados anisotropicamente de resíduo sólido com dois anos de aterramento. Os resultados forneceram ângulo de atrito efetivo de 44° e coesão “zero”.

A Tabela II.9 mostra os resultados de ensaios triaxiais realizados em amostras de resíduos sólidos (diâmetro: 300 mm) do aterro de Tokyo Port, após 10 anos de seu fechamento (em 1983), segundo MATSUMOTO et al. (1987) apud SHIMIZU (1997).

Tabela II.9 – Coesão aparente, ângulo de atrito e deformação – Ensaios triaxiais - MATSUMOTO et al. (1987) apud SHIMIZU (1997).

MÉTODO DE ENSAIO	e (%)	c (kPa)	f (°)
Ensaio de compressão triaxial, UU	10	25,5	5,7
Ensaio de compressão triaxial, UU	15	33,3	6,4
Ensaio de compressão triaxial, UU	20	35,3	4,3
Ensaio de compressão triaxial, CD	10	14,7	8,0
Ensaio de compressão triaxial, CD	15	21,6	8,5
Ensaio de compressão triaxial, CD	20	25,5	11,3
Ensaio de compressão triaxial, CD	40	89,2	16,5
Ensaio de compressão triaxial, CD	10	15,7	16,9
Ensaio de compressão triaxial, CD	15	28,4	20,4

JESSBERGER & KOCKEL (1991) realizaram ensaios triaxiais em resíduos sólidos cujos materiais de reforço, fibras e folhas, foram retirados. A Figura II.21 apresenta o diagrama de tensões em dependência com os diferentes níveis de deformação do material. O ângulo de atrito cresce continuamente até 45° ao longo das deformações, enquanto que a coesão durante todo o processo de cisalhamento situa-se entre 17 e 25 kPa. Dentro desta série de ensaios de compressão triaxial, também foram investigados resíduos, cujos componentes foram reduzidos de tamanho através de um equipamento específico (Müller, Moleiro, Moinho). Os resultados obtidos para estes resíduos reduzidos foram contrários aos verificados

naqueles, cujos reforços foram retirados, pois a coesão atingiu valores mais elevados e o ângulo de atrito valores mais baixos. Uma explicação para esta diferença não foi dada pelos autores.

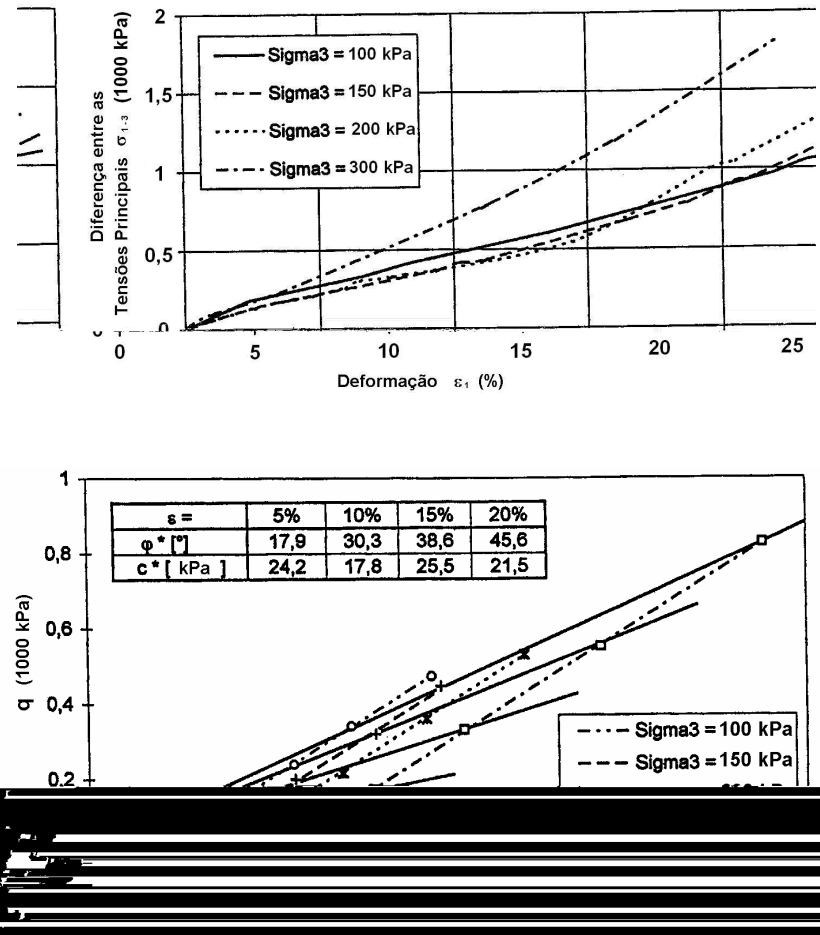


Figura II.21 – Ensaio triaxiais em resíduos sem seus componentes de reforço – JESSBERGER & KOCKEL (1991).

JESSBERGER & KOCKEL (1993) executaram ensaios de compressão triaxial em amostras de RSU triturado e não triturado (1 a 3 anos de idade), empregando células de maiores dimensões ($D = 300 \text{ mm}$, $h = 600 \text{ mm}$) e convencionais ($D = 100 \text{ mm}$, $h = 200 \text{ mm}$). Foram executados ensaios drenados (CD) com velocidade de deformação de 1 \% /min , onde foram medidas σ_1 , σ_3 , ϵ_1 (deformação vertical) e ϵ_v (deformação volumétrica). Na Figura II.22 estão apresentadas as curvas tensão-deformação para o RSU triturado, onde observou-se que a ruptura não ocorreu, até mesmo para grandes deformações. Segundo os autores, este comportamento é decorrente da alta compressibilidade do RSU, que no início do ensaio apresenta poros relativamente grandes e superfície de contato efetiva partícula-partícula relativamente pequena. Quando do incremento de tensão desviatória ($\sigma_1 - \sigma_3$), ocorre a

compressão vertical (ϵ_1) e volumétrica (ϵ_v) da amostra, resultando em um incremento da superfície de contato efetiva entre as partículas, mas tendendo a conservar o estado de tensões.

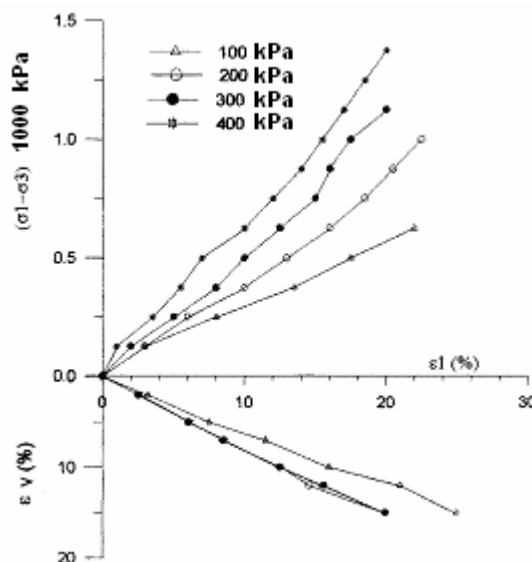


Figura II.22 – Resultados de ensaios de compressão triaxial – JESSBERGER & KOCKEL (1993).

KOCKEL (1995), JESSBERGER et al. (1995) e KONIG & JESSBERGER (1997) apresentaram parâmetros de resistência de RSU, de diferentes idades, obtidos por meio de ensaios de compressão triaxial, cujos equipamentos foram as células de maiores dimensões também utilizadas por JESSBERGER & KOCKEL (1993). As amostras de RSU triturado possuíam idades variando de 9 meses, 1 – 3, 7 – 10, 15 – 20 anos, com o objetivo de avaliar a resistência com respeito ao tempo de deposição dos resíduos. Segundo a Figura II.23, os parâmetros de resistência para os diferentes resíduos estudados mostraram uma grande variação: para uma deformação axial de 20 %, o ângulo de atrito variou de 10° a 40° e a coesão de 25 a 200 kPa. Não foi evidenciada, claramente, a redução da resistência com a idade do resíduo sólido. Os autores comentaram que o valor limite do ângulo de atrito é usualmente mobilizado para deformações axiais menores que 20 %. Já para a coesão, não foi observado nenhum valor limite, mesmo para grandes deformações.

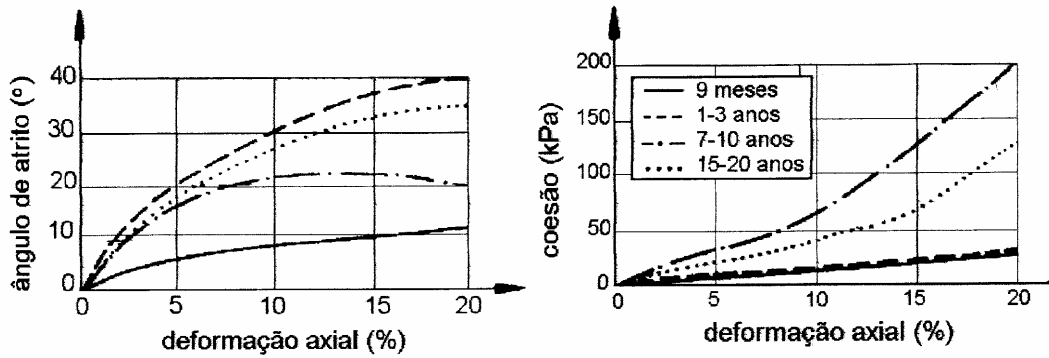


Figura II.23 –Variação dos parâmetros de resistência ao longo de deformação axial de resíduos de diferentes idades – KOCKEL (1995), JESSBERGER et al. (1995) e KONIG & JESSBERGER (1997).

Ensaio de laboratório em RSU, de acordo com vários autores, têm demonstrado que a resistência ao cisalhamento é afetada por vários parâmetros que têm influências ambientais (idade do resíduo sólido, composição, teor de umidade e teor de matéria orgânica) e por fatores físicos (compactação e tamanho das partículas). Como resultado do entrosamento das partículas, a resistência ao cisalhamento dos RSU geralmente aumenta com a tensão normal. Além disso, um aumento da densidade com o tempo pode melhorar as propriedades da resistência do resíduo sólido. Este efeito da densidade pode, entretanto, ser compensado pela biodegradação do resíduo sólido, que reduz os parâmetros de resistência. O trabalho de BRANDL (1995) demonstrou que o ângulo de atrito para resíduo sólido compactado é significativamente maior que o do resíduo sólido não compactado, especialmente para baixas deformações axiais (Figura II.24). Os resultados de ensaios triaxiais realizados por KOCKEL (1995), JESSBERGER et al. (1995) e KONIG & JESSBERGER (1997), conforme discutidos anteriormente, também estão inclusos na Figura II.24, em termos de ângulo de atrito para resíduos de diferentes idades, e demonstram um aumento do ângulo de atrito com a idade do resíduo sólido, com exceção para resíduos muito antigos (neste caso, 15-20 anos). Os resultados de ensaios de cisalhamento simples segundo GAY et al (1981) e LANDVA et al. (1984) mostraram também um aumento do ângulo de atrito com a idade do resíduo sólido, mas um decréscimo da coesão para resíduo sólido mais antigo.

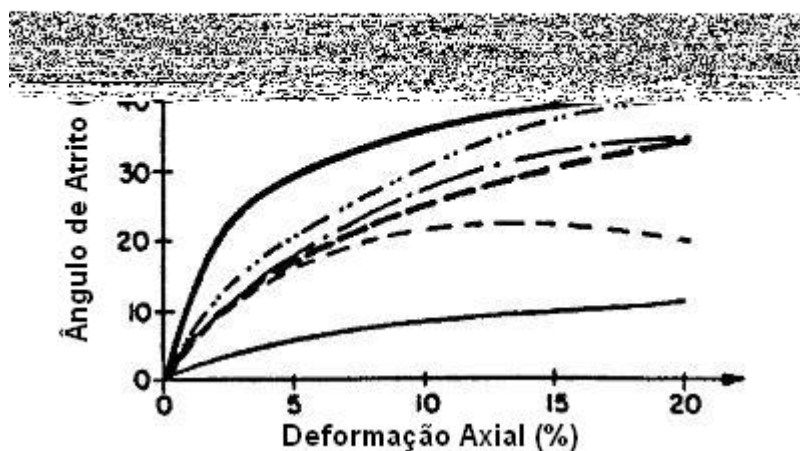


Figura II.24 – Resistência ao cisalhamento mobilizada sob várias condições – Modificada por KOCKEL (1995).

GABR e VALERO (1995), a fim de não afetar demasiadamente os resultados dos ensaios triaxiais, retiraram as partículas com diâmetro maior que 1/6 do diâmetro de amostras de RSU. O resíduo apresentava alto grau de decomposição, coletado do aterro Pioneer Crossing (Pensilvânia), com 15 a 30 anos de aterrado. No caso dos ensaios CU, sem medição de poro-pressão, os autores realizaram a saturação do corpo de prova aplicando um pequeno gradiente hidráulico entre suas extremidades, aguardando: (1) que percolasse um volume de água igual a pelo menos três vezes o volume de vazios da amostra, e (2) que o fluxo de água inserido fosse praticamente igual ao que saía da amostra. Já nos ensaios CU, com medição de poro-pressão, a saturação do corpo de prova foi realizada pelo aumento da contra-pressão e pelo acompanhamento do coeficiente B, até a constância deste. Os ensaios triaxiais demonstraram que ocorreu uma redução da coesão mobilizada devido ao acréscimo no teor de umidade, Figura II.25. Vários autores (GABR & VALERO 1995, MANASSERO et al. 1996 e KÖNIG & JESSBERGER 1997) afirmaram que quando o efeito reforço deixa de existir ou torna-se menos intenso, o conteúdo de umidade passa a desempenhar um papel predominante no comportamento de resistência do resíduo sólido.

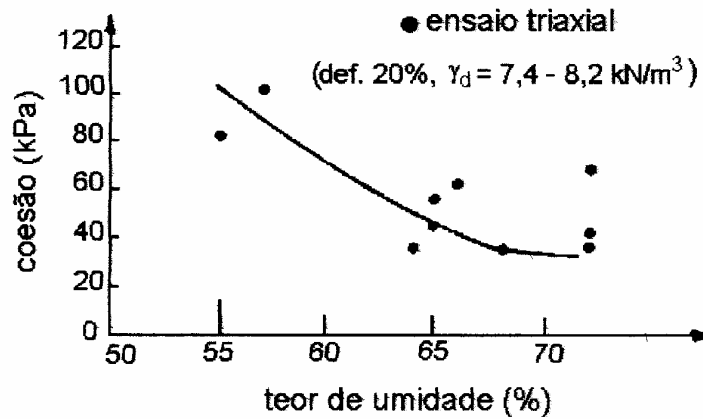


Figura II.25 – Variação do intercepto de coesão com o teor de umidade – GABR e VALERO (1995).

GRISOLIA et al. (1995) avaliaram os parâmetros de resistência de RSU da Itália por meio de ensaios triaxiais em células de maiores dimensões ($D = 250$ mm, $h = 650$ mm). As amostras de resíduos sólidos ensaiadas foram fabricadas artificialmente em laboratório e sua composição consistia em: 6 % (pau e madeira), 32 % (papel), 8 % (plástico), 32 % (cascalho) e 22 % (matéria orgânica); o teor de umidade médio foi de 40 %. A compactação dinâmica dos corpos de prova foi obtida através de um soquete de 43 N caindo 25 vezes de uma altura de 46 cm, onde apresentaram peso específico entre 6,0 e 7,4 kN/m^3 . A Figura II.26 apresenta as curvas tensão versus deformação, onde foram empregadas três tensões de confinamento (50, 100 e 300 kPa) para a execução dos ensaios triaxiais. As curvas tensão-deformação para deformações axiais muito elevadas mostraram uma leve inflexão para cima (ascendente), sugerindo um enrijecimento do material. Tal comportamento também foi constatado por JESSBERGER & KOCKEL (1993), segundo Figura II.22. Os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios são apresentados em função das deformações axiais, Figura II.27. Observa-se nesta figura que quando a deformação axial aumenta de 10 % para 15 %, ocorre um aumento no ângulo de atrito de 15° para 25° , já quando a deformação passa de 20 % para 35 %, o ângulo de atrito aumenta de 30° para 40° . Com relação a coesão, há também uma significativa variação com as deformações axiais, apresentando valores entre 2 e 3 kPa para 10 % de deformação, aumentando rapidamente para 10 kPa, em deformações de 20 %, e quando atingem deformações da ordem de 35 % chegam a 50 kPa. Os resultados obtidos num diagrama $q \times p'$, para diferentes deformações axiais (10 – 40 %), e a reta de melhor ajuste para a envoltória de resistência, para cada caso, são apresentados na Figura II.28.

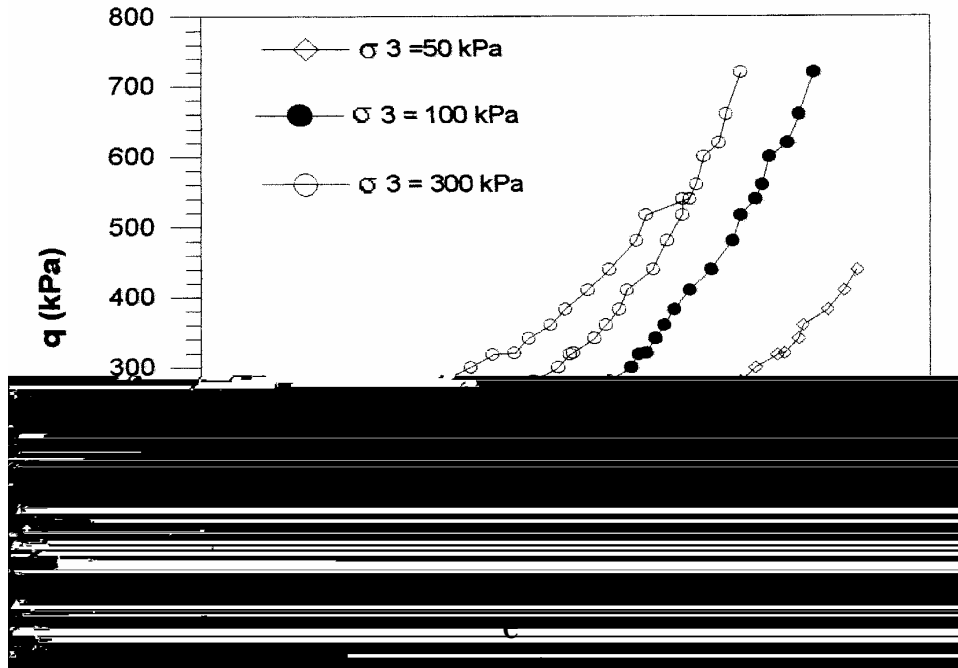


Figura II.26 – Curvas tensão – deformação obtidas de ensaios triaxiais – GRISOLIA et al. (1995).

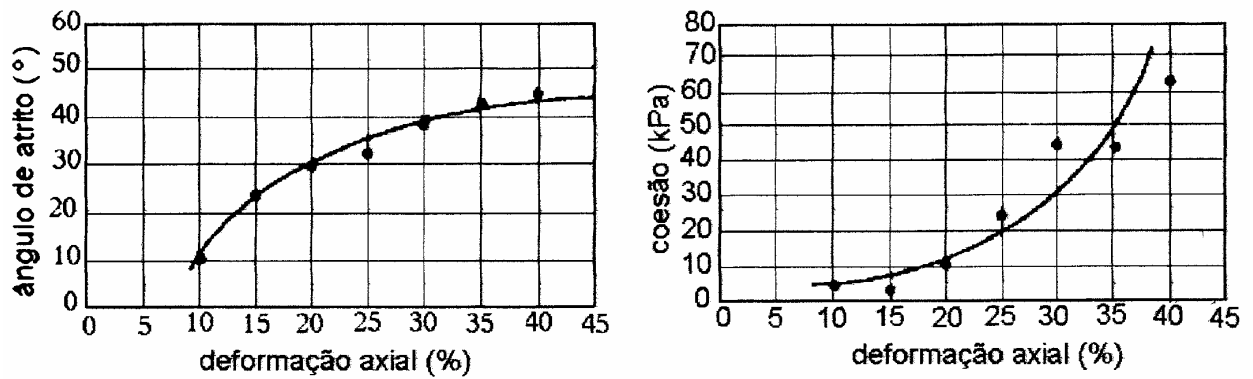


Figura II.27 – Variação dos parâmetros de resistência com a deformação axial – GRISOLIA et al. (1995).

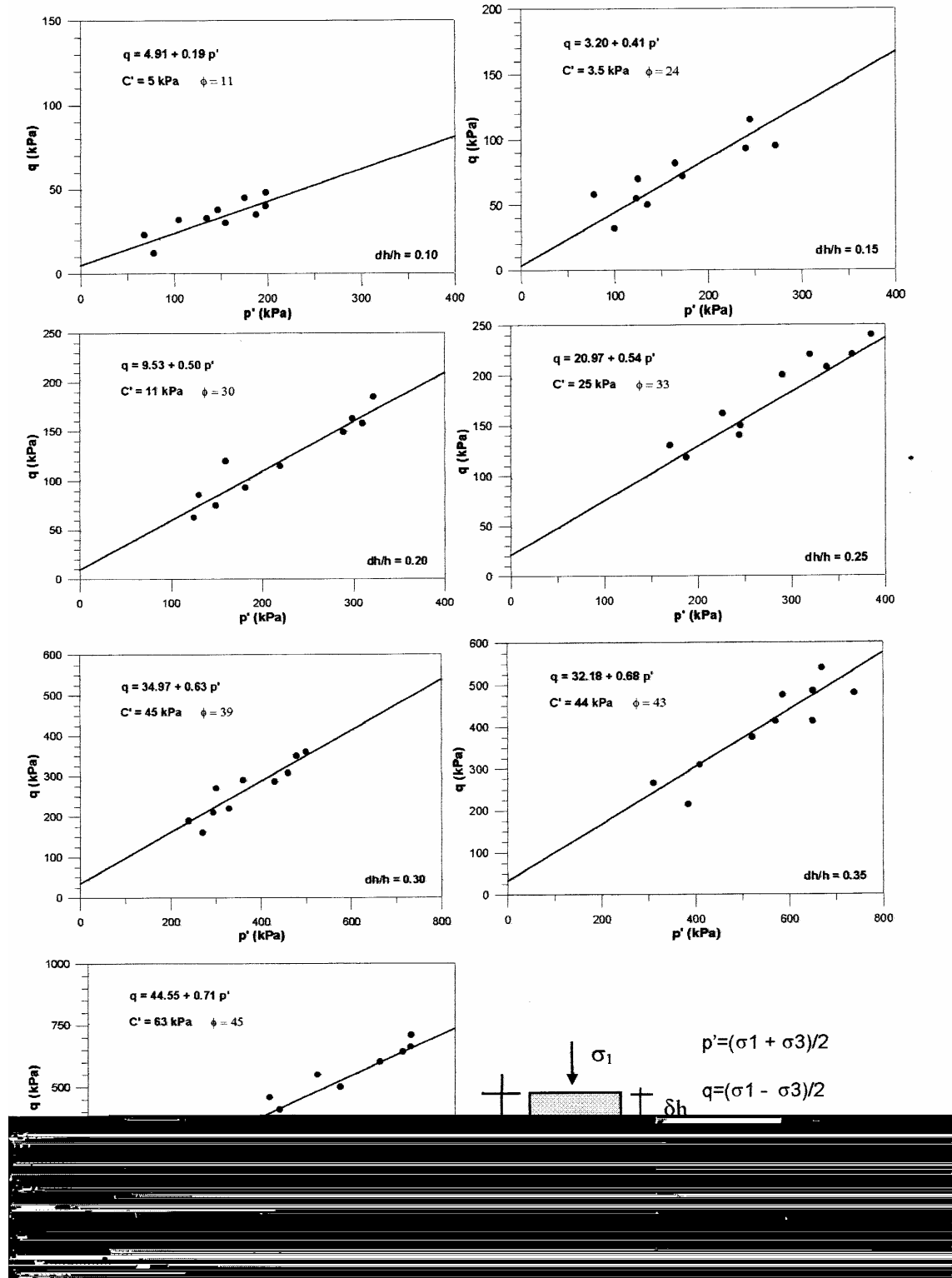


Figura II.28 – Diagrama q x p' para diferentes níveis de deformação dos RSU – GRISOLIA et al (1995).

CARVALHO (1999) realizou ensaios de compressão triaxial (CD) em amostras de resíduos sólidos do aterro sanitário Bandeirantes-SP. Os parâmetros de resistência médios obtidos para as três amostras (T2A, T1B e T2B), utilizando-se corpos de prova de 150 mm e 200 mm de diâmetro por 300 mm e 400 mm de altura, respectivamente, são apresentados na Figura II.29. As nomenclaturas T1 e T2 referem-se às tradagens 1 e 2; A - horizonte mais superficial (entre 0 – 18 m); e B - horizonte mais profundo (entre 18 - 30 m). Os parâmetros de resistência obtidos aumentaram com as deformações axiais, sem atingir um pico de ruptura, onde o ângulo de atrito, para 20 % de deformação, variou entre 17° a 27° e a coesão entre 39 a 60 kPa. A amostra T2B apresentou valores de ângulo de atrito bem destoantes das demais, em decorrência de apresentar razoável quantidade de solo em sua composição. Excluindo os resultados da amostra T2B, observa-se que ambos os valores de ângulo de atrito e coesão, para as amostras T2A e T1B (mesmo diâmetro de corpo de prova), estão bem próximos, principalmente para o intervalo de deformações entre 15 % a 25 %. Embora haja uma diferença visual no estado de alteração dos resíduos dos dois horizontes, A (menos degradado) e B (mais degradado), não foi observada nenhuma alteração significativa no comportamento mecânico das amostras no que se refere à redução da resistência em função da degradação. Com relação às dimensões dos corpos de prova, estas parecem influenciar os resultados de resistência ao cisalhamento obtidos para o resíduo em questão, visto que os corpos de prova de menor dimensão (150 mm x 300 mm) apresentaram maior resistência que àqueles de 200 mm x 400 mm. Para as amostras T2A e T2B, os valores obtidos foram até 25 % maiores, enquanto que a amostra T1B atingiu valores superiores a 40 %. Segundo o autor, os valores de resistência obtidos nestes ensaios apresentaram-se, em geral, superiores àqueles obtidos por BENVENUTO et al. (1994), $c'=13,5$ kPa e $\phi'=22^\circ$, por meio de estudos de retro-análise de um escorregamento que ocorreu em 1991 no sub-aterro AS-1 do aterro Bandeirantes.

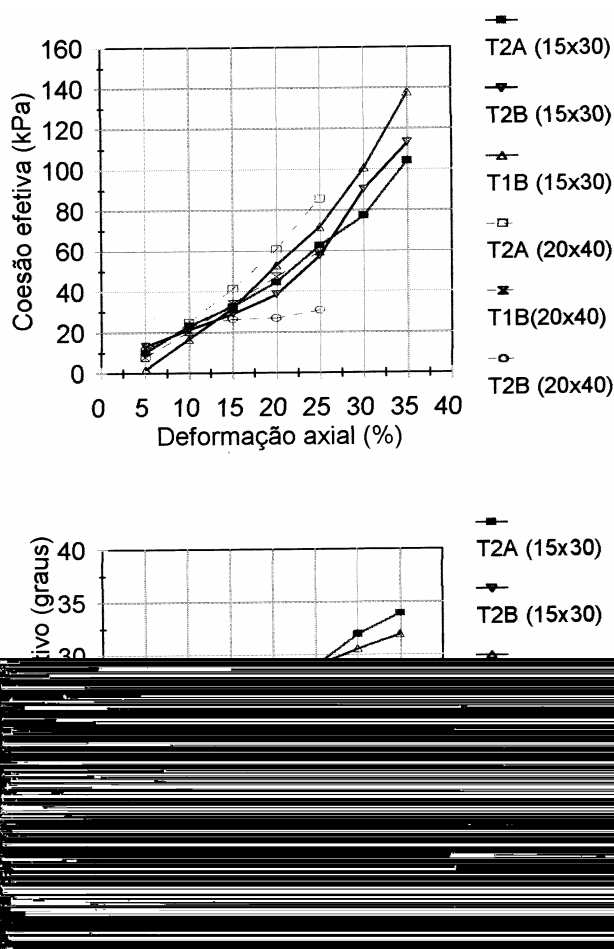


Figura II.29 – Ensaio triaxiais CD em amostras de RSU do aterro Bandeirantes -SP – CARVALHO (1999).

Ensaio triaxiais consolidados não drenados com medição de poro-pressão foram executados por CAICEDO et al. (2002) nos resíduos sólidos urbanos do Aterro Sanitário Donã Juana, na cidade de Bogotá, Colômbia. O material amostrado foi retirado da Zona II, local onde ocorreu o deslizamento de resíduos sólidos em 1997. A Foto II.2 apresenta o equipamento experimental utilizado. As amostras possuíam as dimensões seguintes: 300 mm de diâmetro e 600 mm de altura. Os resultados típicos deste ensaio estão apresentados na Figura II.30. A forma da curva tensão desviatória versus deformação mostra que o material não sofreu ruptura para deformações de até 15 %, mas sim um endurecimento contínuo do material, concordando com GRISOLIA et al. (1995) e JESSBERGER & KOCKEL (1993). A poro-pressão cresce com a deformação axial da amostra, indicando uma estabilização para um nível máximo, enquanto que as trajetórias de tensão desviatória aumentam uniformemente com as deformações sem mostrar uma ruptura do material.



Foto II.2 - Equipamento experimental em laboratório para ensaio triaxial de grande escala – CAICEDO et al. (2002).

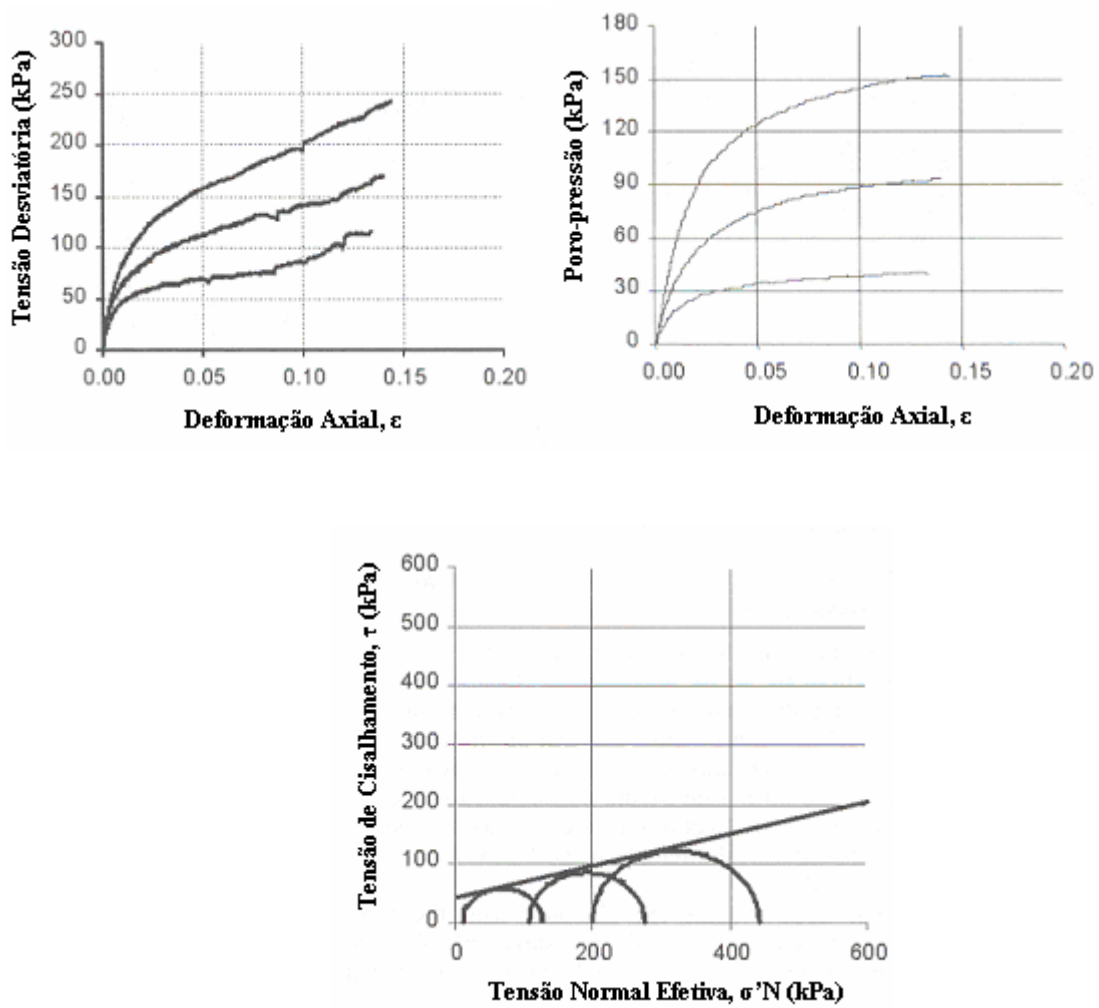


Figura II.30 – Resultados de ensaios triaxiais em RSU – CAICEDO et al. (2002).

A Tabela II.10 apresenta um resumo de alguns ensaios triaxiais realizados em amostras de resíduos sólidos urbanos, obtidos da literatura e comentados neste trabalho. Estão especificadas algumas características dos ensaios, como por exemplo: dimensão da amostra, tipo de resíduo, parâmetros de resistência e critérios de ruptura. Verifica-se que os ensaios foram realizados em amostras de diferentes dimensões e que os critérios de ruptura/deformação utilizados para determinação dos parâmetros de resistência foram variáveis, ou seja, não há ainda uma padronização na execução destes ensaios para materiais do tipo resíduos sólidos.

Tabela II.10 – Resumo de alguns ensaios triaxiais obtidos da literatura.

FONTE	DIMENSÃO DA AMOSTRA	TIPO DE RESÍDUO SÓLIDO/IDADE	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA		CRITÉRIOS DE RUPTURA/ DEFORMAÇÃO
			c (kN/m ²)	f (°)	
Matsumoto et al. (1987)	300 mm (diâm)	Resíduo velho (10 anos)	25,5	5,7	$\epsilon = 10 \%$
			33,3	6,4	$\epsilon = 15 \%$
			35,3	4,3	$\epsilon = 20 \%$
			14,7	8,0	$\epsilon = 10 \%$
			25,5	11,3	$\epsilon = 20 \%$
			89,2	16,5	$\epsilon = 40 \%$
Gabr & Valero (1995)	70,6 mm x 152 mm (diâm x alt)	Resíduo velho (15 a 30 anos)	42 - 68	0	$\epsilon = 20 \%$
Grisolia et al. (1995)	250 mm x 650 mm (diâm x alt)	Resíduos artificiais	5	11	$\epsilon = 10 \%$
			11	30	$\epsilon = 20 \%$
			45	39	$\epsilon = 30 \%$
			63	45	$\epsilon = 40 \%$
Kockel (1995)	300 mm x 600 mm (diâm x alt)	Resíduo triturado: (9 meses)	25	10	$\epsilon = 20 \%$
		(1 – 3 anos)	25	40	
		(7 – 10 anos)	200	20	
		(15 – 20 anos)	125	35	
Carvalho (1999)	150 mm x 300 mm (diâm x alt)	Resíduo velho (15 anos)	39 - 60	17 - 27	$\epsilon = 20 \%$
	200 mm x 400 mm (diâm x alt)				

Os ensaios de resistência (cisalhamento direto e triaxial) obtidos da literatura evidenciam que o estado de ruptura dos resíduos sólidos (matriz básica + matriz de reforço) não é atingido, nem mesmo para altos níveis de deformação. Inclusive medições e observações de campo não evidenciam deslizamentos que sejam causados por planos de ruptura dentro da massa de resíduos sólidos. Assim, os critérios de Mohr-Coulomb não podem ser utilizados como a única ferramenta para o estudo em resíduos sólidos, mas sim como um ponto de partida para determinados casos, como por exemplo, no estudo da matriz básica dos resíduos sólidos, que é a responsável pelas propriedades de atrito. Para se levar em consideração o efeito dos elementos de reforço existentes na massa de resíduos sólidos, uma

melhor opção no presente momento é a utilização de modelos desenvolvidos para solos reforçados, ou até mesmo os modelos para resíduos sólidos urbanos. Neste último caso, é essencial que o estudo da resistência do resíduo sólido seja realizado separadamente em ensaios de cisalhamento ou triaxiais e ensaios de tração.

2.4.2. ENSAIOS DE CAMPO

Uma outra forma de obter parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos consiste em realizar ensaios de campo, por meio dos quais pode-se conseguir dados mais representativos da realidade do terreno e estabelecer correlações com as informações obtidas em laboratório.

Entre as experiências desenvolvidas *in situ*, as mais conhecidas são os ensaios de penetração e provas de carga, que têm sido empregadas em lugares distintos com variações. Os ensaios de penetração SPT e CPT, por exemplo, estão entre as propostas mais comuns para caracterizar os materiais de um aterro de resíduos sólidos, e resultam na via mais prática, por seus baixos custos, para estimar o comportamento mecânico de um aterro por meio de ensaios de campo, SIEGEL et al. (1990), SÁNCHEZ-ALCITURRI et al. (1993), COUMOULOS et al. (1995), JUCÁ et al. (1997 e 2003), dentre outros. A execução destes ensaios, porém, na maioria das vezes, é difícil devido à presença de materiais resistentes como madeira, metal, pedra, dentre outros, que provocam grandes picos na resistência, desvio das hastes dos equipamentos e avarias nos amostradores, paletas e ponteiros. Além disso, não há uma adequada interpretação das medidas obtidas destes ensaios que permita deduzir valores dos parâmetros de resistência. Assim, os resultados destes ensaios possuem no momento apenas um sentido qualitativo, o qual possibilita definir a estratigrafia da massa de resíduos sólidos e a evolução da qualidade de um tratamento adotado ao longo do tempo. Há também conhecimento do uso de dados de ensaios SPT e CPT com correlações clássicas para solos, porém isto necessitaria de melhores comprovações.

Alguns autores (RICHARDSON & REYNOLDS 1991, GOTTELAND et al. 1995, WITHIAM et al. 1995 e CAICEDO et al. 2002) têm estudado a resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos através de ensaios de cisalhamento direto “*in situ*”, que utilizam caixas de grandes dimensões. Este tipo de ensaio seria talvez o procedimento de investigação mais indicado para aterros sanitários, com a determinação de parâmetros de resistência mais

próximos da realidade, porém há uma série de problemas que dificultam a condução dos mesmos.

A seguir estão apresentados alguns ensaios de penetração (SPT e CPT) e de cisalhamento direto em campo, realizados em diferentes aterros de resíduos sólidos.

2.4.2.1. SPT

Entre as primeiras referências conhecidas com relação aos ensaios de penetração em resíduos sólidos, está o artigo publicado por SOWERS (1968), que apresenta os resultados de ensaios SPT executados em dois lixões e um aterro controlado da Geórgia, EUA. Os valores típicos variam de 4 a 10 golpes/30 cm, salvo quando atinge a camada de silte arenoso duro, sem mostrar nenhuma tendência definida ao longo da profundidade. Na Figura II.31 pode-se observar os resultados obtidos no aterro controlado.

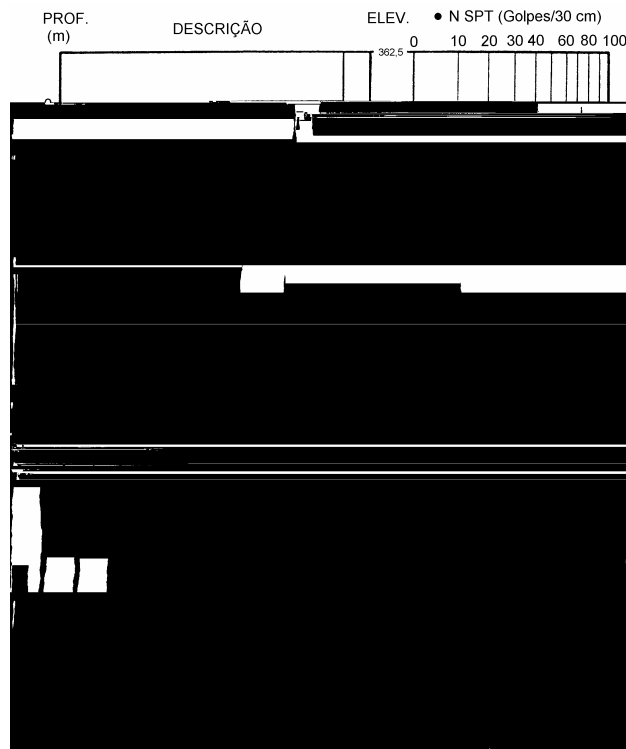


Figura II.31 – Ensaio SPT executado em um aterro controlado, Geórgia, USA – SOWERS (1968).

MATSUMOTO et al. (1987) apud SHIMIZU (1997) apresentam resultados de ensaios de penetração SPT realizados em RSU em Tokyo Port. Os valores do número de golpes (N)

foram obtidos para aterros de diferentes idades, após o fechamento. Os aterros de resíduo sólido mais novo, onde a degradação da matéria orgânica do resíduo sólido ainda era prematura, possuem maiores valores de N em relação aos aterros de resíduos sólidos mais velhos.

ESPINACE & PALMA (1991), em ensaios de penetração dinâmica (SPT) no aterro sanitário “El Molle” de Valparaíso-Chile, observaram que, apesar do terreno ser constituído de material heterogêneo, uma série de pontos dos ensaios em uma mesma área do aterro proporcionou resultados coerentes entre si, indicando que a massa, ainda que quando em pequena escala pode ser heterogênea, se comporta em grande escala como um todo homogêneo, exceto nos locais onde se encontram resíduos de características diferentes dos resíduos sólidos habituais. Na Figura II.32 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios efetuados nos anos de 1986 e 1990, em uma mesma área do aterro. Deve ser destacado o aspecto linear do crescimento da resistência à penetração com a profundidade, em contraste com os resultados obtidos por SOWERS (1968), Figura II.31. De acordo com a Figura II.32, pode-se também constatar que a resistência à penetração (N/30 cm), após um período de 04 (quatro) anos, não apresentou variações significativas. Segundo os autores, é provável que as modificações das propriedades resistentes dos resíduos com o tempo necessitariam de um período mais prolongado para serem evidenciadas, ou seja, quando o processo de estabilização da massa de resíduos sólidos fosse atingido.

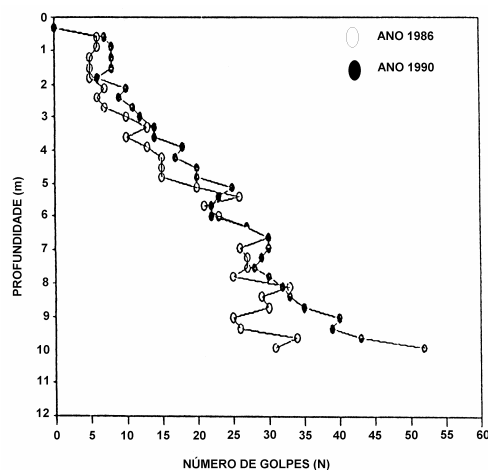


Figura II.32 – Ensaios de penetração dinâmica (SPT) realizados no aterro sanitário “El Molle”, Valparaíso, Chile – ESPINACE & PALMA (1991).

Os resultados de ensaio SPT executado no Aterro Meruelo (Espanha) por SÁNCHEZ-ALCITURRI et al. (1993) estão apresentados na Figura II.33. Nestes estudos, os autores

obtiveram valores de N_{SPT} crescentes com a profundidade, variando de 10 golpes para os metros iniciais até 30 golpes em 12,0 m de profundidade.

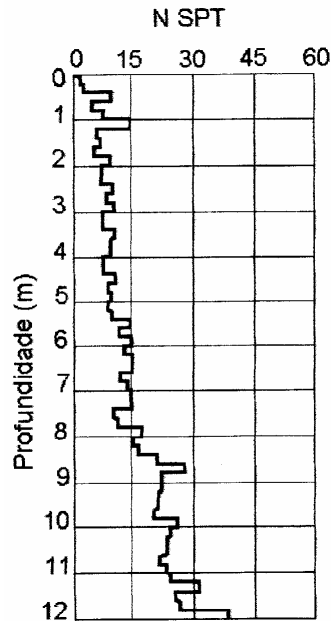


Figura II.33 – Resistência à penetração do SPT para o Aterro Meruelo (Espanha) – SÁNCHEZ-ALCITURRI et al. (1993).

SINGH e MURPHY (1990), GIFFORD et al. (1992) e COUMOULOS et al. (1995) relataram os resultados de ensaios de palheta e SPT que foram realizados em vários aterros de resíduos sólidos. Em função do equipamento do ensaio de palheta ser pequeno quando comparado às inclusões que compõe os resíduos sólidos, os resultados da resistência ao cisalhamento obtidos destes ensaios podem não ser representativos das condições de escala natural. Além disto, tais ensaios requerem material homogêneo para conduzir a resultados úteis. No caso do SPT, existem consideráveis incertezas em especificar parâmetros de resistência para resíduos sólidos baseados neste tipo de ensaio, uma vez que não existem correlações publicadas entre o número de golpes (N) e os parâmetros de resistência (c e ϕ). A Figura II.34 apresenta resultados típicos de SPT realizados em RSU do Aterro Ano Liossa (Atenas), onde verifica-se uma grande dispersão, com valores situados na faixa de 5 a 100 golpes a cada 30 cm, tornando-se difícil a sua adequada interpretação. Foi determinada uma média entre 20 e 80 golpes, a cada 30 cm.

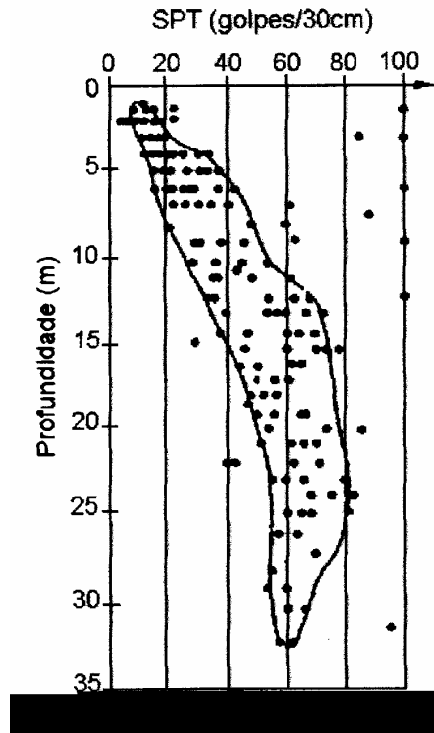


Figura II.34 – Resistência à penetração (SPT) dos resíduos sólidos no Aterro Ano Liossia, Atenas (Grécia) - COUMOULOS et al. (1995).

CARVALHO (1999) realizou medições de SPT-T no resíduo sólido do Aterro Bandeirantes-SP, o qual possui aproximadamente 15 anos de idade. Os furos de sondagem usados para estas medições alcançaram uma profundidade de 30 m. Os resultados típicos destes ensaios, e também o perfil de sondagem estão apresentados na Figura II.35, onde a espessura das camadas de resíduos sólidos variou entre 2,8 a 15 m, e as camadas de cobertura de solo entre 0,25 e 2,0 m de espessura. Analisando-se a figura, verifica-se um aumento da resistência (SPT) com a profundidade. Desconsiderando-se os valores superiores a 20 golpes, que correspondem ao esforço para ultrapassar materiais mais resistentes (pedra, borracha e madeira), a média do SPT é aproximadamente 7 golpes, para as duas camadas superficiais. O SPT alcança cerca de 12 golpes para as 3ª e 4ª camadas de resíduos sólidos (entre 10 e 30 m de profundidade). Os valores de SPT obtidos estão de acordo com aqueles encontrados na literatura (SOWERS, 1968; SINGH e MURPHY, 1990; SÁNCHEZ-ALCITURI et al. 1993). Com relação às medições de torque, estas foram maiores que 400 N.m, que correspondem a materiais mais resistentes (Figura II.35). Da mesma forma que os valores de SPT, o torque também aumentou com a profundidade. Uma estimativa do ângulo de atrito efetivo foi feita considerando-se a correlação existente para areias, os valores admitidos variaram entre 26° e 32°.

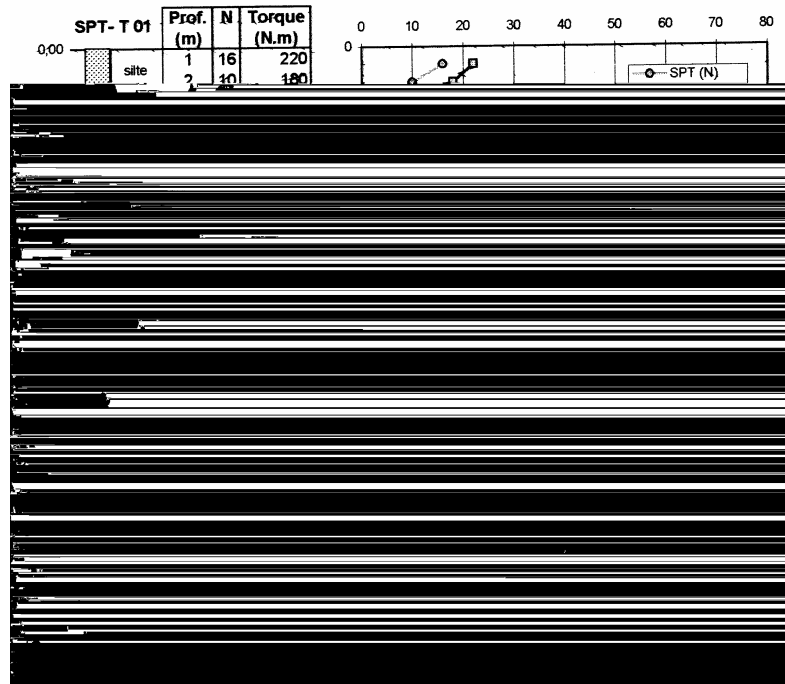


Figura II.35 – Perfil do furo de sondagem típico, incluindo SPT e torques – Aterro Sanitário Bandeirantes – CARVALHO (1999).

JUCÁ (2003) e JUCÁ et al. (2005) apresentam resultados de ensaios de penetração SPT, conduzidos pelo grupo de resíduos sólidos da Universidade Federal de Pernambuco (GRS/UFPE), em diferentes aterros de resíduos sólidos urbanos no Brasil (aterros controlados da Muribeca e Aguazinha em Pernambuco; aterro sanitário Metropolitano Centro na Bahia; e lixão do Róger na Paraíba). Uma comparação dos resultados obtidos nas sondagens SPT realizadas nestes locais está apresentada na Figura II.36. Os valores de resistência à penetração (SPT) obtidos na Célula 1 do Aterro da Muribeca, na Célula 4 do Aterro de Aguazinha e no Lixão do Róger apresentaram-se baixos e típicos de resíduos sólidos velhos (2 a 10 golpes), onde a decomposição da matéria orgânica está bastante avançada. Os resultados de SPT mostraram também que os mesmos não variaram significativamente com a profundidade, apresentando-se praticamente constante dentro de uma determinada faixa de valores. Comparando-se os resultados de resistência (SPT) dos ensaios realizados na célula piloto do Aterro Metropolitano Centro, Salvador, com os valores obtidos nos aterros de resíduos sólidos de Pernambuco (Muribeca e Aguazinha) e no lixão da Paraíba (Róger), observa-se que a resistência do primeiro é superior a dos demais. Este comportamento pode ser atribuído ao fator idade do resíduo sólido, uma vez que os resíduos depositados no Aterro Metropolitano Centro são muito recentes (1997-1998), com praticamente 1 ano de deposição. Associado a idade, está o fato de que os resíduos da célula piloto são melhores compactados,

conforme um aterro sanitário deve exigir. Os valores mais elevados (pico) de SPT, observados praticamente em todos os aterros investigados, indicam a presença de materiais mais resistentes como restos de material de construção, plástico, borracha, metais e pedras, e caracterizam, em realidade, a energia necessária para a ultrapassagem das obstruções. De uma forma geral, os valores de SPT obtidos nos locais estudados estão de acordo com aqueles encontrados na literatura (SOWERS, 1968; SINGH & MURPHY, 1990; SÁNCHEZ-ALCITURRI et al., 1993).

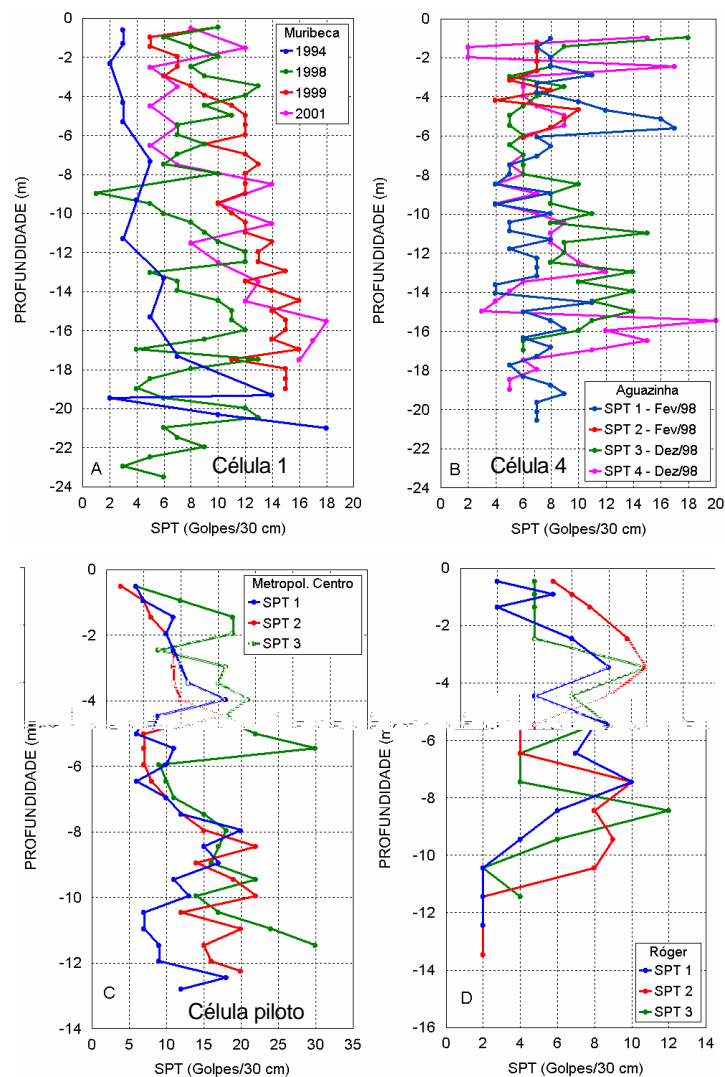


Figura II.36 – Variação dos valores de SPT com a profundidade (GRS/UFPE) - JUCÁ (2003) e JUCÁ et al. (2005).

2.4.2.2. CPT

Os ensaios de penetração contínua (CPT) podem ser utilizados para a identificação de áreas de menor resistência no interior do aterro e também para avaliar a variação da

resistência com o tempo, segundo SIEGEL et al. (1990), MANASSERO et al. (1996) e KNOCHENMUS et al. (1998).

CARTIER & BALDIT (1983) realizaram ensaios CPT em um aterro controlado de resíduos sólidos de Arnouville-lès-Mantes, França. Cinco destes ensaios CPT foram executados em fevereiro de 1980, e os outros seis ensaios em junho de 1981. Os resultados estão apresentados na Figura II.37, com uma diferença de período de medição de aproximadamente um ano e meio. Os valores médios da resistência de ponta variaram entre 5.000 e 6.000 kPa, com valores extremos que variaram entre 1.600 e 15.000 kPa. Observa-se que, embora os ensaios tenham sido executados em diferentes épocas, não existem diferenças significativas. Os autores compararam os resultados obtidos com valores de solos coesivos, sugerindo que as resistências obtidas corresponderiam neste caso a uma argila medianamente compacta.

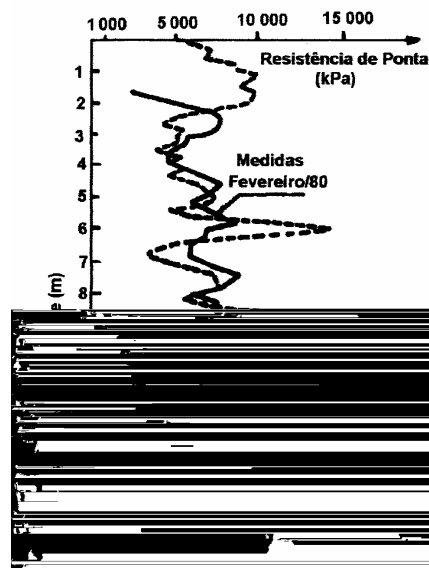


Figura II.37 – Ensaios de penetração estática (CPT) no aterro controlado de Arnouville-lès-Mantes – CARTIER & BALDIT (1983).

Na investigação executada no aterro controlado de Monterey Park, Califórnia – USA (SIEGEL et al. 1990), foram realizados ensaios de penetração estática para descrever a estratigrafia e as zonas saturadas dentro do terreno. Os resultados dos ensaios realizados em nove locais, alcançando profundidades entre 5,0 e 36,0 m, estão apresentados na Figura II.38.

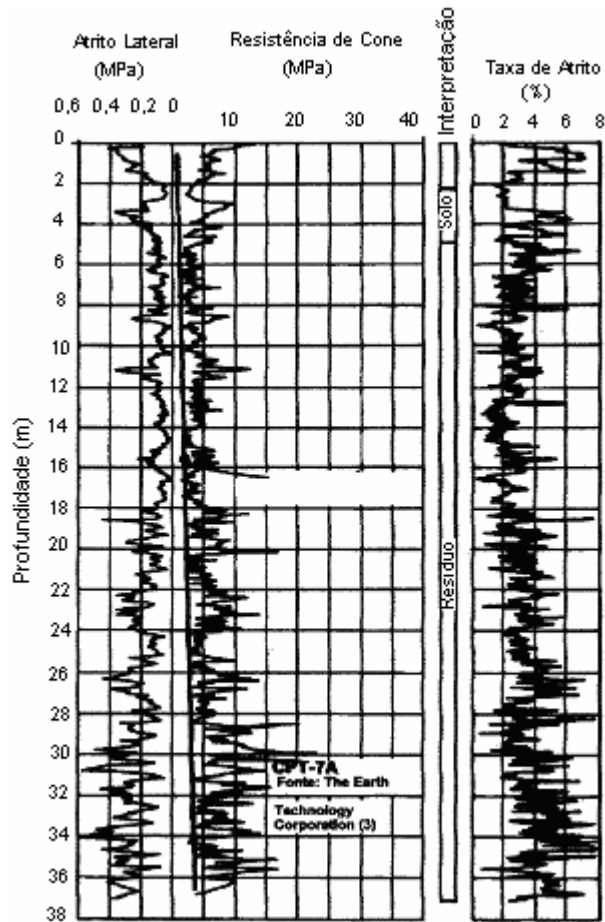


Figura II.38 – Ensaio CPT realizado no aterro controlado de Monterey Park, Califórnia, USA - SIEGEL et al. (1990).

Estes ensaios eram interrompidos sempre que se detectava deflexão das barras ou quando a resistência à penetração era excessiva. Os resultados dos ensaios CPT indicaram que o cone encontrou, frequentemente, objetos duros, rijos, os quais produziram acréscimos nas medidas de resistência de ponta, resultando em leituras altamente variáveis. Os valores mais baixos da resistência de ponta com a profundidade mostram limite em 0,08 MPa (80 kPa), Figura II.38. Por causa das leituras relativamente erráticas (irregulares) do CPT, a cobertura diária ou provisória de solo não podia ser distinguida do resíduo sólido. Com respeito à tendência de aumento da resistência de ponta com a profundidade, considerando-se a envoltória de valores mínimos das medições, ela se ajusta em um valor de 0,125 MPa (125 kPa). Ao comparar os resultados obtidos com a classificação de solos, a partir de resultados de penetrômetros eletrônicos, os resíduos sólidos se comportam como um solo arenoso ou silte argiloso. Da mesma forma que os ensaios de penetração dinâmica, os autores concluem que os ensaios de penetração CPT podem ser utilizados para identificar zonas fracas

dentro do aterro (estabelecer perfis qualitativos ou semi-quantitativos), ou também para avaliar, qualitativamente, se a resistência dos resíduos varia com o tempo.

SÁNCHEZ-ALCITURRI et al. (1993) obteve para o aterro de Meruelo (Espanha) resistência de ponta variando de 1 a 3 MPa, e a relação de atrito (atrito na luva / resistência de ponta) variando de 1 % a 2 %. Através destes resultados e do emprego das correlações existentes para areias entre q_c e ϕ , os autores estimaram um ângulo de atrito para o RSU que variou entre 28° e 35°. Segundo os autores, estes resultados foram plotados na carta de Schmertmann, onde permitiu uma classificação para os resíduos sólidos do local variando de areias fofas a areia argilosa e siltes.

BOUAZZA et al. (1996) apresentaram resultados típicos de CPT realizados em RSU no Aterro Sanitário de Maldegem (Bélgica), conforme mostra a Figura II.39. Os pontos máximos nas medições de resistência de ponta indicam que o cone encontrou objetos rijos, duros, e como consequência, foram obtidas leituras erráticas, embora possa ser observada uma tendência geral.

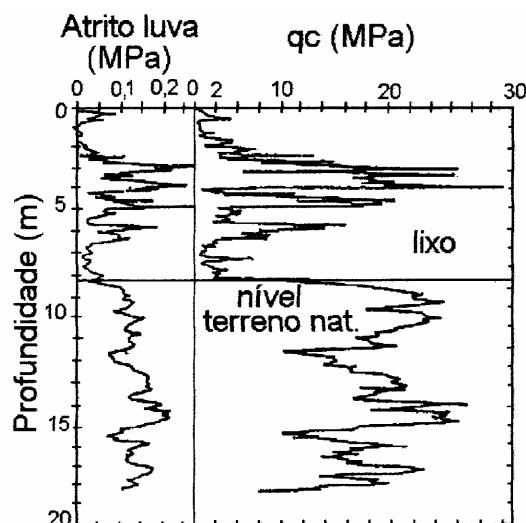


Figura II.39 – Resultado típico de CPT em resíduos sólidos no Aterro de Maldegem (Bélgica) – BOUAZZA et al. (1996).

GRISOLIA & NAPOLEONI (1996) obtiveram medidas de resistência de ponta através de ensaios de cone em RSU que variaram entre 2 e 4 MPa, com oscilações de 1 a 8 MPa. Os autores observaram que houve um ligeiro aumento da resistência do resíduo sólido com a profundidade.

KODA (1998) realizou ensaios de penetração do cone (CPT) até a profundidade de 25 m, na parte norte do aterro de resíduos sólidos em Radiowo, localizado próximo de Warsaw. Foram adotados para as medições no aterro de resíduos sólidos os procedimentos de interpretação dos ensaios CPT, amplamente usados para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos. O ângulo de atrito efetivo para o resíduo sólido variou de 25° a 45°, com locais apresentando valores mais baixos (20° - 25°). Estes valores foram obtidos após ter considerado o resíduo sólido como solo não-coesivo. Resultados de ensaios de resistência (cisalhamento direto, triaxial, dentre outros) publicados na literatura confirmam a existência de coesão no resíduo sólido, portanto, os valores reais de ϕ' seriam menores.

CARVALHO (1999) realizou ensaios de penetração do cone (CPT) no Aterro Sanitário Bandeirantes-SP. Os ensaios foram realizados em dois locais, com profundidades variando de 19 a 26 m. Os resultados de CPT, Figuras II.40 e II.41, indicaram que o cone geralmente encontrava objetos rígidos, os quais produziram picos acentuados nas medidas da resistência de ponta. Os resultados são altamente variáveis, onde a resistência lateral variou entre 56 e 1.056 kPa e a resistência de ponta de 1.200 a 18.000 kPa. Em ambos os casos, uma envoltória para os valores mínimos mostra uma tendência de aumento dos valores de resistência com a profundidade. No caso de CPT-02 (Figura II.41), a partir da profundidade de 17 m ocorreu uma deflexão das hastes do equipamento, não sendo considerados representativos os valores abaixo desta profundidade. Resistências de ponta típicas variaram entre 2.500 – 7.500 kPa e a razão de atrito (atrito lateral / resistência de ponta) de 2,5 – 5 % (valores maiores que 10.000 kPa para resistência de ponta e 400 kPa para resistência lateral foram considerados não ser representativos do resíduo sólido). Estes valores plotados na carta de Schmertmann caem na região de areia argilosa a silte e argila siltosa e arenosa. Correlações existentes com a resistência do cone, para solos arenosos, permitiram estimar valores de ângulo de atrito efetivo entre 29° - 33° para o RSU estudado. O autor sugere que deve-se ter cuidados ao utilizar a correlação do solo para estimar parâmetros de resistência para resíduos sólidos, visto que os resultados obtidos a partir desta correlação podem ser superestimados.

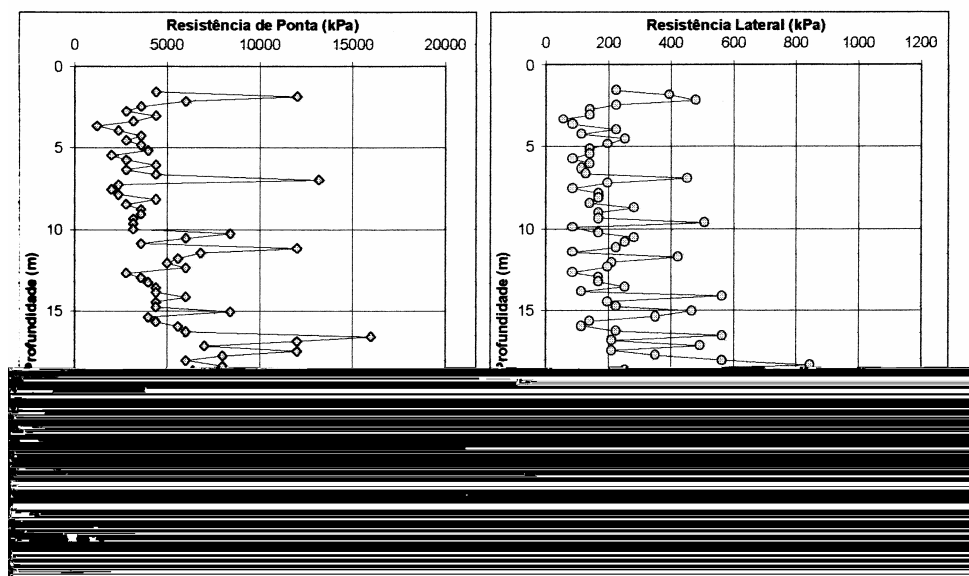


Figura II.40 – Ensaios de penetração do cone (CPT-01) – Aterro Sanitário Bandeirantes – CARVALHO (1999).

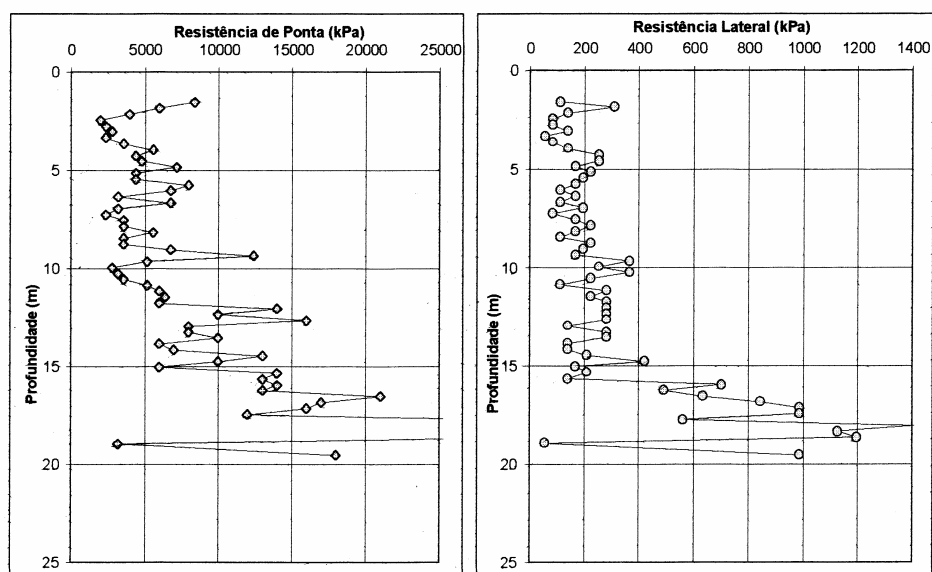


Figura II.41 – Ensaios de penetração do cone (CPT-02) – Aterro Sanitário Bandeirantes – CARVALHO (1999).

Alguns resultados de ensaios penetrométricos (CPT) realizados na Célula 1 (resíduo sólido velho) do Aterro da Muribeca, em 2002, são apresentados na Figura II.42, conforme FUCALE & JUCÁ (2003), JUCÁ (2003) e JUCÁ et al. (2005). De uma forma geral, os ensaios CPT atingiram profundidades em torno de 19,0 m e mostraram que o cone geralmente encontrava objetos rígidos (madeira, metal, pedras, etc), os quais produziram picos acentuados nas medidas da resistência de ponta.

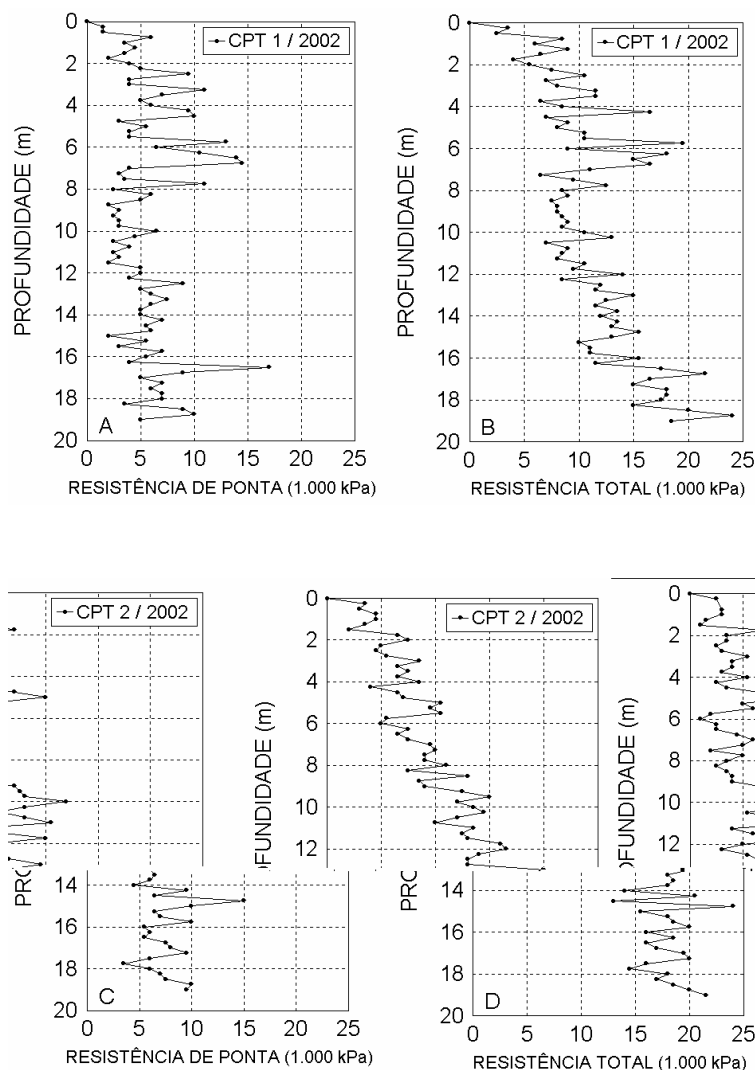


Figura II.42 – Resultados de ensaios CPT - Célula 1 do Aterro da Muribeca - JUCÁ et al. (2005).

Os valores relativamente baixos de resistência de ponta estão provavelmente associados à matriz básica dos resíduos sólidos, enquanto que os valores de pico referem-se a materiais fibrosos (plásticos, galhos de madeira), devido a sua maior resistência à tração, e também a metais e pedras. Estes resultados são altamente variáveis, onde a resistência de ponta variou entre 1.000 e 17.000 kPa (Figura II.42A e II.42C), enquanto que a resistência total variou de 2.000 a 24.000 kPa (Figura II.42B e II.42D). Considerando-se a envoltória para os valores mínimos da resistência de ponta (Figura II.42A e II.42C), verifica-se uma tendência de constância dos resultados, dentro de uma determinada faixa de valores, ao longo da profundidade (comportamento também observado nos SPT da Célula 1 da Muribeca, Figura II.36A). A resistência de ponta típica observada nos ensaios CPT é cerca de 2.000 a 6.500 kPa, onde valores maiores que 10.000 kPa foram considerados não representativos para os resíduos em estudo, sendo portanto excluídos. Os valores de resistência obtidos para os

resíduos em estudo, apresentam-se de acordo com os reportados na literatura, por exemplo, SÁNCHEZ-ALCITURRI et al. (1993) e CARVALHO (1999).

2.4.2.3. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

RICHARDSON & REYNOLDS (1991) apresentaram medidas de coesão de 10 kPa e ângulo de atrito variando de 18 a 43°, através de ensaios de cisalhamento direto *in situ* de grandes dimensões (1,5 m x 1,5 m). O resíduo sólido foi ensaiado a um peso específico em torno de 15 kN/m³ e submetido à tensão normal variando entre 14 e 38 kPa, a qual foi conseguida pela aplicação de blocos de concreto.

GOTTELAND et al. (1995) realizaram ensaios de cisalhamento direto *in situ* em aterros de RSU do sul da França. Para tanto, foi utilizada uma caixa de cisalhamento com área de 1 m² e altura de 350 mm, para cada seção da caixa, e as amostras de resíduos sólidos ensaiadas foram deformadas e indeformadas. Segundo os autores, as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal não apresentaram pico de ruptura, até mesmo para níveis de 35 %. Este comportamento está em conformidade com os resultados obtidos de ensaios triaxiais relatados por COWLAND et al. (1993), GRISOLIA et al. (1993) e JESSBERGER & KOCKEL (1993). Os resultados obtidos por GOTTELAND et al. (1995) apresentaram a mesma ordem de grandeza dos publicados por COWLAND et al. (1993), coesão de 10 kPa e ângulo de atrito de 25°.

WITHIAM et al. (1995) realizaram ensaios de cisalhamento direto *in situ* no Aterro *Dekorte Park* (New Jersey), em blocos indeformados de resíduos sólidos, utilizando uma caixa de cisalhamento de grandes dimensões (1,5 m x 1,5 m x 1,5 m). A amostra de resíduos sólidos envolvida no ensaio estava 1,5 m abaixo da superfície do aterro. A seção inferior da caixa foi ancorada num aterro de argila compactada e a seção superior foi presa por um sistema de cabos de aço à uma retro-escavadeira, pelo qual se aplicava a força horizontal. A força normal foi obtida através do uso de blocos de madeira e pesos de concreto. Foram realizados 05 (cinco) ensaios, em uma única amostra, utilizando o procedimento de múltiplo estágio, e variando as tensões normais de 0 a 21 kPa. Com este procedimento, foi possível eliminar o efeito da variabilidade dos resultados associado ao uso de diferentes amostras para cada ensaio. A envoltória de ruptura foi definida por um intercepto de coesão de cerca 10 kPa

e ângulo de atrito de 30° . Segundo os autores, os valores obtidos são coerentes com aqueles apresentados por SINGH & MURPHY (1990).

Ensaio de cisalhamento direto foram executados por MAZZUCATO et al. (1999) em um aterro de resíduos sólidos urbanos, localizado em Pescantina, Verona, no Nordeste Italiano. Um novo equipamento de grandes dimensões foi desenvolvido para este propósito, com caixa de cisalhamento cilíndrica. O equipamento é composto de dois anéis de aço, cada um com diâmetro interno de 810 mm e altura de 220 mm, conforme Figura II.43. Podem ser realizados ensaios em amostras deformadas ou indeformadas. A tensão vertical é aplicada sobre a amostra através de pistão suportando pesos estáticos. Durante a aplicação da carga vertical, não são permitidos movimentos horizontais entre os anéis superior e inferior, até que a compressão vertical seja estabilizada. O cisalhamento no plano horizontal é então aplicado através de macaco hidráulico, levando a amostra até a ruptura.

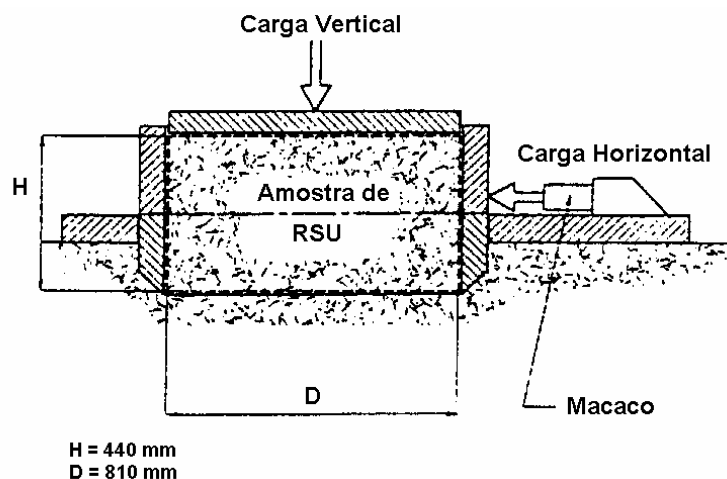


Figura II.43 – Equipamento de cisalhamento direto - MAZZUCATO et al. (1999).

A extrema heterogeneidade do material a ser ensaiado causa vários problemas na fase de preparação da amostra. Dois procedimentos de preparação foram utilizados neste caso. O primeiro deles foi escolher o local adequado para obter amostras indeformadas de resíduos sólidos. Para este propósito, o equipamento foi localizado sobre o topo do aterro e empurrado para dentro do resíduo sólido, até o preenchimento completo da cavidade cilíndrica (altura total da amostra: 440 mm). O segundo procedimento consistiu em preparar amostras reconstruídas. Neste caso, o equipamento foi colocado em solo natural, próximo do aterro, onde o resíduo sólido foi introduzido na caixa de cisalhamento por meio de uma máquina escavadeira. O peso específico dos resíduos sólidos antes do cisalhamento foi difícil de ser estimado, e depende fortemente dos elementos do resíduo sólido na caixa. Foi obtido dos ensaios um valor médio de aproximadamente $7,0 \text{ kN/m}^3$. Os resultados dos ensaios de

cisalhamento em termos de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal estão plotados na Figura II.44A, para ambas amostras indeformadas e reconstruídas. Verifica-se que as amostras reconstruídas mostram um comportamento tensão cisalhante-deslocamento horizontal não linear. Comportamento de pico foi verificado apenas no caso de amostras indeformadas em níveis mais elevados de tensão vertical. A envoltória da máxima tensão cisalhante versus tensão vertical obtida dos seis ensaios está apresentada na Figura II.44B, onde uma envoltória linear Coulomb, típica de materiais friccionais, foi usada para ajustar os dados experimentais, como sugerido por vários outros pesquisadores (GRISOLIA et al. 1991; DEL GRECO & OGGERI 1993; JESSBERGER & KOCKEL 1993). Os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito, foram $c = 22$ kPa e $\phi = 17^\circ$ (amostras reconstruídas) e $c = 24$ kPa e $\phi = 18^\circ$ (amostras indeformadas). Estes valores são um pouco menores do que aqueles sugeridos por TC5-SC3 para uso nas análises de estabilidade de aterros de resíduos sólidos (VAM IMPE, 1998).

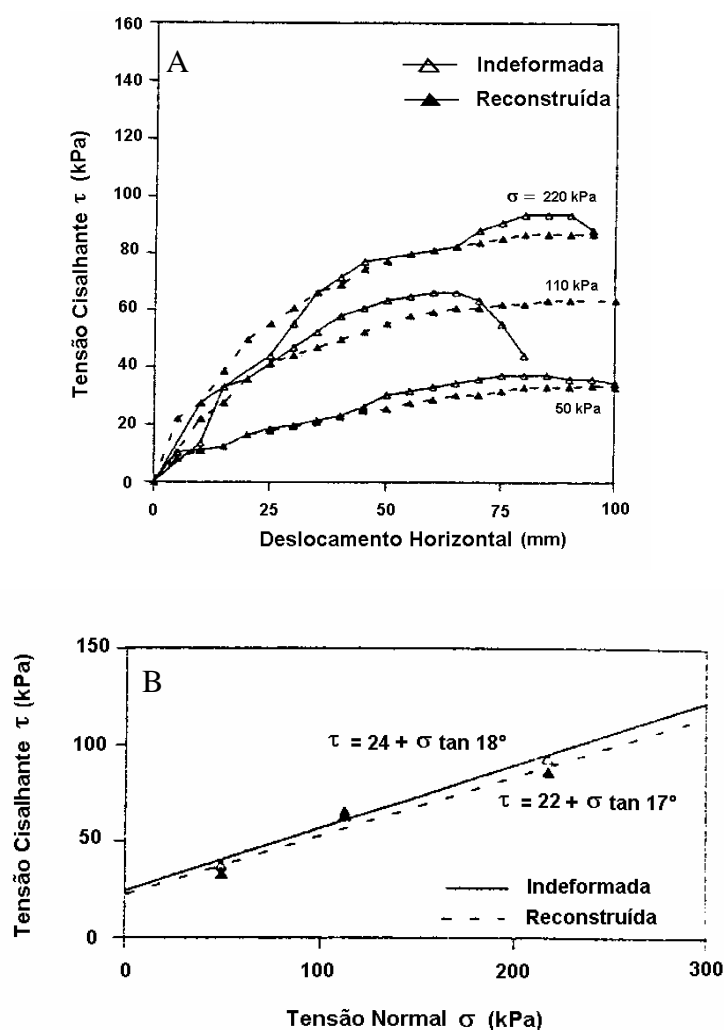


Figura II.44 – Resultados de ensaios em amostras indeformada e reconstruída de resíduos sólidos – MAZZUCATO et al. (1999).

Ensaio de cisalhamento de grande escala (Foto II.3) foram executados por CAICEDO et al. (2002) em amostras de resíduos sólidos não alteradas (indeformadas) de 900 mm de diâmetro (área de seção transversal: $0,63 \text{ m}^2$), com um ano de deposição. Esta caixa de cisalhamento foi utilizada para determinar a resistência ao cisalhamento do resíduo sólido na superfície do aterro. O processo de medição foi realizado em quatro estágios:

- i) a amostra de resíduo sólido foi “esculpida” no local do aterro, sendo posteriormente envolvida pelas duas partes da caixa de cisalhamento;
- ii) a estrutura de aplicação das cargas vertical e horizontal era colocada no local e então instrumentada;
- iii) uma tensão era aplicada e mantida constante até o tempo de duração do ensaio;
- iv) a força cisalhante era progressivamente aplicada, aumentando-se a carga até a tensão máxima, a qual ocorreu em cerca de 60 mm de deslocamento.

As curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, Figura II.45A, foram obtidas pelo ensaio de cisalhamento direto em campo, cujas tensões aplicadas foram: 6, 13, 56 e 117 kPa. A relação tensão cisalhante versus tensão vertical obtida para estes ensaios forneceu os seguintes parâmetros de resistência para resíduos sólidos de 01 (um) ano de deposição: coesão de 78 kPa e ângulo de atrito de 23° , Figura II.45B.

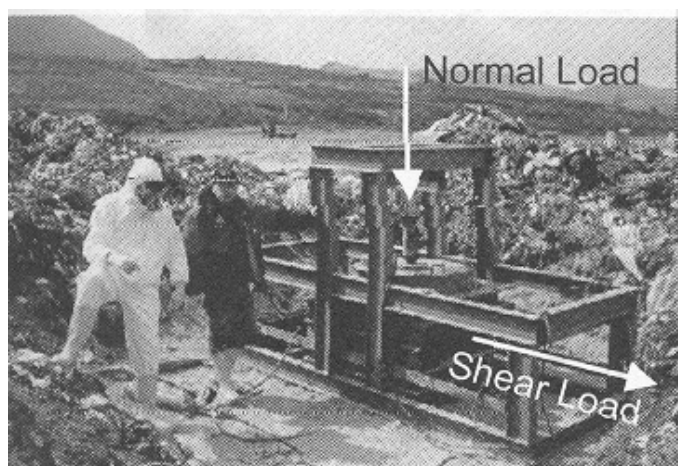


Foto II.3 – Caixa de cisalhamento de grande escala para medições em campo – CAICEDO et al. (2002).

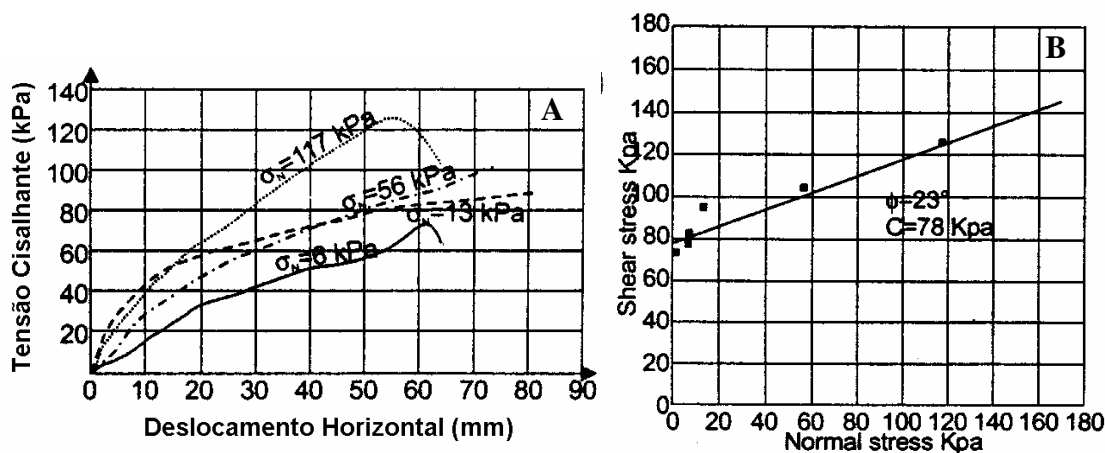


Figura II.45 – A) Deslocamento horizontal versus tensão cisalhante. B) Tensão cisalhante versus tensão normal – Aterro Sanitário Dona Juana, Colômbia – CAICEDO et al. (2002).

2.5 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO COMPILADOS DA LITERATURA

Vários pesquisadores (LANDVA & CLARK 1990, GABR & VALERO 1995, GRISOLIA et al. 1995, KAVAZANJIAN et al. 1995, JESSBERGER & KOCKEL 1993 e JESSBERGER et al. 1995) têm apresentado valores para a resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbano, obtidos a partir de ensaios de laboratório, de campo e retro-análise. Para cada caso, estes valores variam consideravelmente em função das características do material do resíduo sólido, tipo de ensaio adotado e condições de tensões aplicadas, dentre outros. De uma forma geral, encontram-se valores para coesão variando de 0 a 67 kPa e ângulo de atrito entre 10° e 53° (KÖNIG & JESSBERGER 1997, KNOCHENMUS et al. 1998).

SINGH e MURPHY (1990) mostram na Figura II.46 os resultados obtidos de ensaios de laboratório, em amostras de resíduos sólidos, realizados por vários autores. O LOS ANGELES SANITARY DISTRICT (1984) ensaiou amostras de resíduos sólidos nas quais várias substituições foram feitas, por exemplo, pedra por areia, recipientes de vidros por vidros quebrados, roupas por emplastro, borracha por fios de borracha, dentre outros. Estas amostras foram ensaiadas em um equipamento de cisalhamento direto de dimensões: 61,5 mm de diâmetro e 25,4 mm de altura. FANG et al. (1977) ensaiaram feixes (pacotes) de resíduos sólidos compactados no *Fritz Engineering Laboratory* da Universidade de Leigh. COOPER ENGINEERS (1986) realizaram ensaios triaxiais em amostras de resíduos sólidos (tipo Shelby). SAARELA (1987) apresenta resultados de ensaios da Finlândia. LANDVA et al. (1984) realizaram ensaios de cisalhamento direto de dimensões (280 mm x 430 mm) em

amostras de resíduos sólidos. Um ano depois, LANDVA e CLARK (1987) reensaiaram na mesma caixa cisalhante, onde observaram um decréscimo da resistência. EARTH TECHNOLOGY CORPORATION (1988) utilizaram um amostrador cravado Califórnia para obter amostras de resíduos sólidos e executaram ensaio triaxial de multiestágio em uma destas amostras.

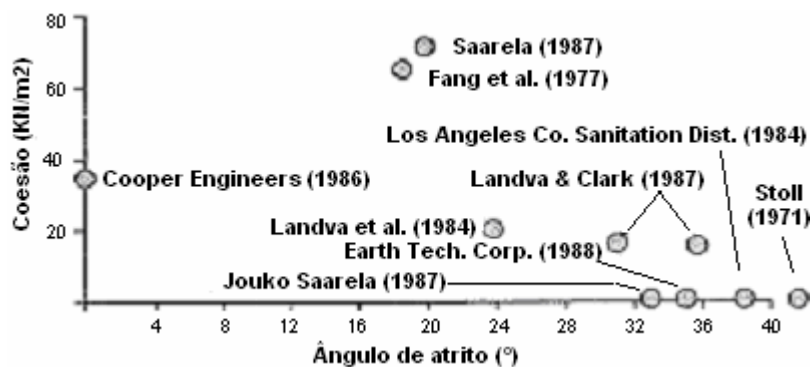


Figura II.46 – Parâmetros de resistência de ensaios de laboratório – SINGH e MURPHY (1990).

Para os autores, existe uma grande dispersão nos resultados de laboratório apresentados na Figura II.46. Vários fatores são responsáveis por esta variação: composição altamente heterogênea do resíduo sólido; método pelo qual a amostra foi obtida; e amostras de tamanho pequeno, não sendo representativas do conjunto do resíduo sólido.

Resultados de resistência dos resíduos sólidos obtidos por diversos autores em ensaios de laboratório, campo e de retro-análise, até então disponíveis na época estão apresentados na Figura II.47, conforme SINGH e MURPHY (1990). Baseados nestes resultados, os autores traçaram uma faixa recomendada para projetos. Por causa da dispersão e escassez dos resultados, é difícil obter conclusões definitivas sobre as propriedades de resistência do resíduo sólido urbano. Desta forma, muitos pontos têm sido acrescentados neste diagrama, inclusive com novas sugestões para a faixa recomendada. De acordo com SÁNCHEZ – ALCITURRI et al. (1993), algumas tendências são observadas através da Figura II.47: os resultados de ensaios de laboratório indicam que um significativo ângulo de atrito é mobilizado ($25^{\circ} \leq \phi \leq 35^{\circ}$); nenhum valor de ϕ foi inferior a 17° (os valores compilados de SINGH & MURPHY 1990 e GABR & VALERO 1995 que apresentaram valor de $\phi = 0$ correspondem aos ensaios UU); o intercepto coesivo é variável, mas para os ensaios de laboratório, a maioria de seus valores se concentra abaixo de 60 kPa.

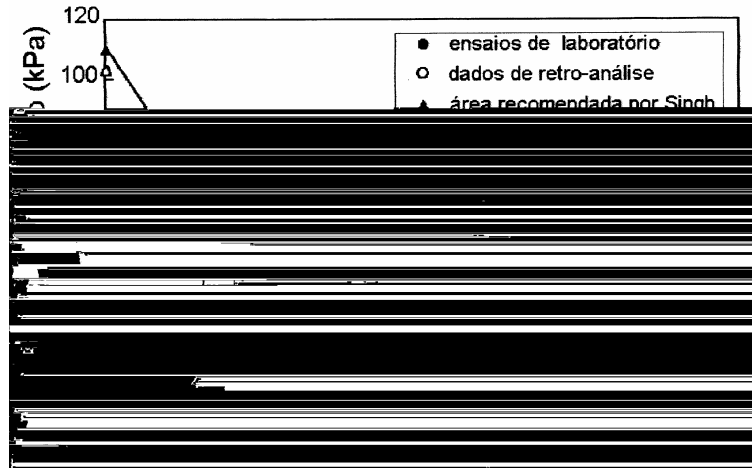


Figura II.47 – Gráfico sumário de vários ensaios com faixa de parâmetros recomendados para projeto - SINGH e MURPHY (1990).

SÁNCHEZ-ALCITURRI et al. (1993) propuseram um novo diagrama com os valores de parâmetros de resistência recomendados para projetos, baseados em algumas direções, sendo o uso seguro destes valores muito questionável (Figura II.48). De acordo com os autores, a área hachurada coincide, grosseiramente, com a faixa proposta por SINGH & MURPHY (1990).

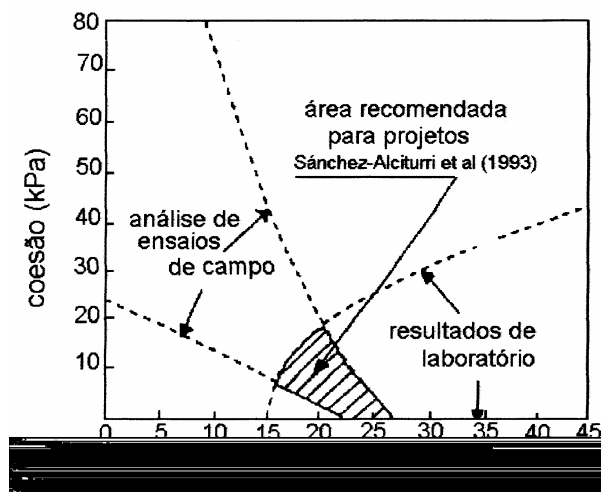


Figura II.48 – Resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos, recomendação de valores para projeto - SÁNCHEZ-ALCITURRI et al. (1993).

Com relação aos diagramas apresentados nas Figuras II.47 e II.48, SÁNCHEZ – ALCITURRI et al. (1993), KÖNIG & JESSBERGER (1997), MANASSERO et al. (1996) e KNOCHENMUS et al. (1998) alertam que deve-se tomar cuidado com o uso deles. Nestes diagramas, como já citado anteriormente, estão plotados resultados de ensaios de laboratório

(cisalhamento direto e triaxial), campo e dados de retro-análise. No caso de ensaios de laboratório, os pares de valores dos parâmetros de resistência (c e ϕ) são determinados; já em ensaios de campo e dados de retro-análise, existem infinitos pares de valores de c e ϕ que podem satisfazer as condições de equilíbrio (uma equação e duas incógnitas). De uma forma geral, são feitas suposições de valores individuais para c e ϕ do RSU para ensaios de campo, considerando-se o resíduo puramente coesivo ($\phi = 0$) ou puramente não coesivo ($c = 0$). Este procedimento é válido para solos, onde existem bases para essas suposições (SÁNCHEZ – ALCITURRI et al. 1993), já no caso do RSU, não existem bases firmes para essa tomada de decisão e assim a análise mais adequada é em termos de c e ϕ .

KAVAZANJIAN et al. (1995) ajustou uma envoltória de ruptura baseada em dados de resistência obtidos através de ensaios de cisalhamento direto (laboratório e campo), ensaios em placas de carga e dados de retro-análise, conforme apresentada na Figura II.49 (MANASSERO, 1997). Esta envoltória de ruptura não linear para resíduos sólidos urbanos é assumida bi-linear por questão de simplicidade. Duas zonas podem ser distinguidas na Figura II.49: i) zona A correspondente a baixos níveis de tensão, onde há valores maiores para o ângulo de atrito e valores menores para a coesão; i) zona B correspondente a níveis de tensões mais altos, onde há menores valores de ϕ e maiores valores de coesão. Embora os dados correspondam a uma aproximação da estimativa dos parâmetros de resistência dos resíduos sólidos, os autores salientam que os mesmos não devem ser usados como referência para análises.

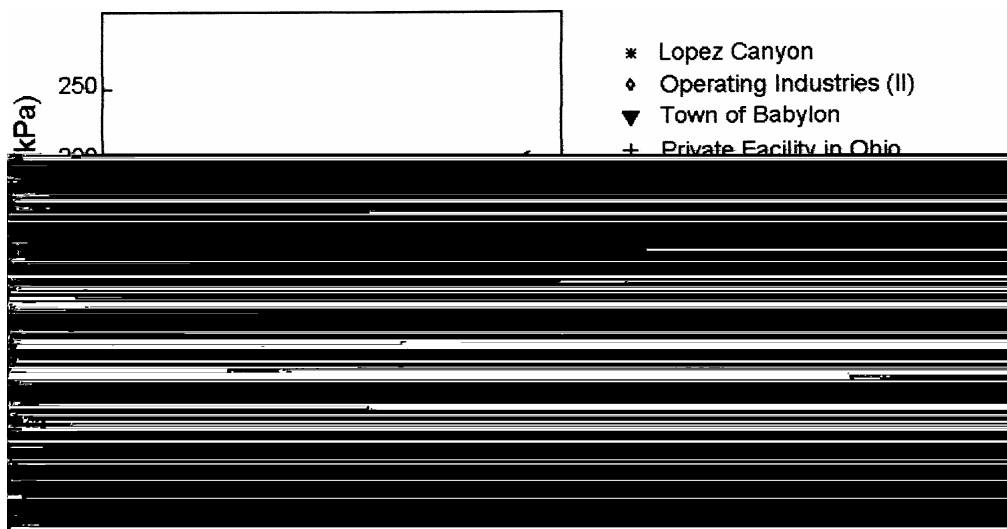


Figura II.49 – Resultados de resistência ao cisalhamento de RSU obtidos de várias fontes – MANASSERO (1997).

KNOCHENMUS et al. (1998) apresentam duas envoltórias de ruptura para resíduos sólidos (II.50), que foram obtidas por KAVAZANJIAN et al. (1995), Figura II.49, e VAN IMPE et al. (1996) por meio da análise de dados de resistência disponíveis na literatura. De acordo com a envoltória bi-linear proposta por KAVAZANJIAN et al. (1995), o comportamento da massa de resíduos sólidos, neste caso, pode ser considerado como puramente “coesivo” ($c = 24$ kPa; $\phi = 0$) para tensões normais abaixo de 30 kPa; para tensões normais acima deste valor, o resíduo sólido é considerado não coesivo ($c = 0$) com um ângulo de atrito de 33° . Já VAN IMPE et al. (1996) propôs uma envoltória de ruptura tri-linear, na qual o resíduo sólido é puramente coesivo ($c = 20$ kPa; $\phi = 0$) para tensão normal abaixo de 20 kPa, e não coesivo ($c = 0$; $\phi = 38^\circ$) para $20 \text{ kPa} < \sigma \leq 60 \text{ kPa}$. Para tensões normais acima de 60 kPa, o resíduo sólido apresenta ambos componentes de atrito e coesão ($c \geq 20$ kPa; $\phi = 30^\circ$).

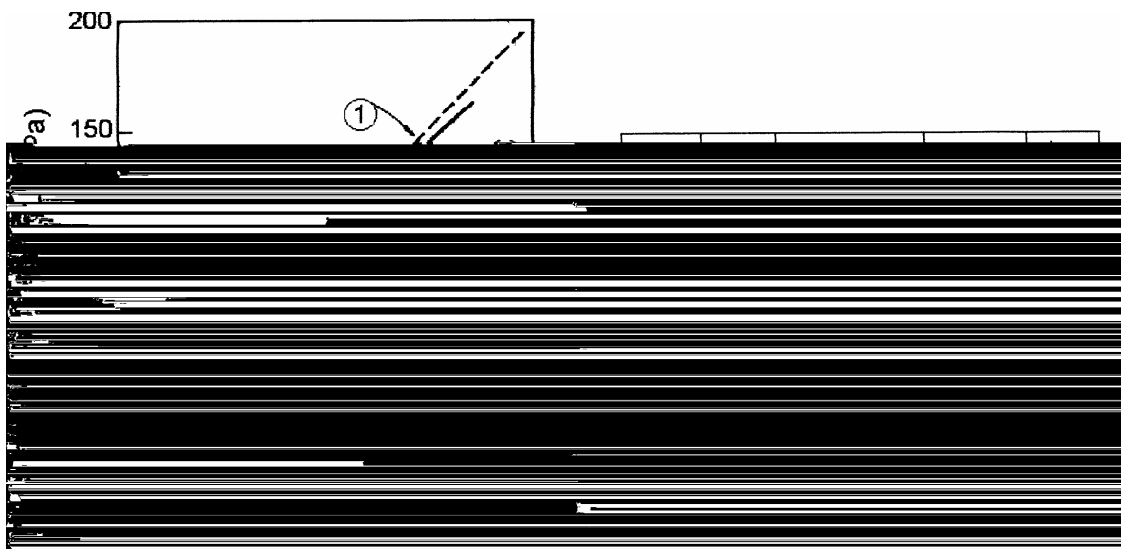


Figura II.50 – Envoltórias de ruptura proposta para RSU – KNOCHENMUS et al. (1998).

VAN IMPE (1998) apresenta valores de parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU obtidos por vários pesquisadores. A Tabela II.11 apresenta estes valores, os quais variaram consideravelmente. O ângulo de atrito variou de 10° a 53° , enquanto que a coesão variou de 0 a 67 kPa. É importante notar, entretanto, que muitos dos baixos valores relatados são contraditórios à observações de campo de taludes de aterros estáveis.

Tabela II.11 – Resistência ao cisalhamento de RSU (modificado por VAN IMPE, 1998).

FONTE	c' (kPa)	f (°)	MÉTODO DE ENSAIO	COMENTÁRIOS
Gay et al. (1981)	7 28	42 26,5	Cisalhamento Simples	RSU: 9 meses de idade RSU fresco (novo)
Del Greco e Oggen (1994)	15,7 23,5	21 22	Cisalhamento Direto	Fardos de RSU - baixa densidade Fardos de RSU - alta densidades
Landva e Clark (1986)	16 – 19 16 23	38 – 42 33 24	Cisalhamento Direto	RSU velho RSU velho + 1 ano RSU novo, fragmentado
Landva e Clark (1990)	19 – 22	24 – 39	Cisalhamento Direto	$\sigma = 480$ kPa
Golder Associates (1993)	0	41	Cisalhamento Direto	-
Richardson e Reynolds (1991)	10	18 – 43	Cisalhamento Direto "in situ"	14 kPa < σ < 38 kPa
Cowland et al. (1993)	10	25	Retro-análises	Trincheira profunda
Kavazanjian et al. (1995)	-	25 - 34	Retro-Análises	45 kPa < σ < 180 kPa

STRAUSS (1998), através de uma pesquisa bibliográfica intensa, montou um banco de dados que reúne um número considerável de resultados de ensaios (laboratório, campo e retro-análise), visando a obtenção de parâmetros de resistência ao cisalhamento em RSU (Tabela II.12).

Tabela II.12 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento em RSU obtidos por diversos autores – STRAUSS (1998).

f (°)	c (kN/m ²)	g (kN/m ³)	TIPO DE RESÍDUOS E/OU ENSAIO	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA
32,7	24	10 – 12,1	Cisalhamento direto drenado. 63,5 mm diâm. X 23 mm esp.	Gabr & Valero -0.15301 Tw (Gabr.0799 Tc 0.1076

42	7	9 – 12	Cisalhamento direto. Resíduos com 9 meses de decomposição.	Gay et al. (1981)
26,5	28	8 – 11	Cisalhamento direto. Resíduos municipais novos.	Gay et al. (1981)
24	23	-	Cisalhamento direto. Resíduos novos.	Landva et al. (1984)
38	16	-	Cisalhamento direto. Resíduos antigos.	Landva et al. (1984)
0	34,5	-	Triaxial UU. Amostras recolhidas por Shelby.	Cooper Engineers (1986) em Gabr & Valero (1995)
18,2	65	-	Cisalhamento direto. Dois fardos de resíduos.	Fang et al. (1977) em Gabr & Valero (1995)
35,1	0	-	Triaxial multi-estágio. Amostra indeformada.	Earth Techn. Corp. (1988) em Gabr & Valero (1995)
34	0	-	Triaxial CU.	Duplanic (1990) em Gabr & Valero (1995)
26,3	1	-	Prova de carga in-situ.	Converse, Davis, Dixon Associates (1975) em Gabr & Valero (1995)
13,2	40,5	-	Prova de carga in-situ.	Converse, Davis, Dixon Associates (1975) em Gabr & Valero (1995)
0,5	79	-	Prova de carga in-situ.	Converse, Davis, Dixon Associates (1975) em Gabr & Valero (1995)
28	16	-	Retro-análise de ruptura no aterro Bandeirantes (1991). Resíduos novos.	Kaimoto & Cepollina (1996)
22	16	-	Retro-análise de ruptura no aterro Bandeirantes (1991). Resíduos antigos – boa drenagem.	Kaimoto & Cepollina (1996)
22	13,5	-	Retro-análise de ruptura no aterro Bandeirantes (1991). Resíduos antigos – má drenagem.	Kaimoto & Cepollina (1996)
0	34	-	Retro-análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975).	Cooper Engineers (1986) em Gabr & Valero (1995)
0	37	-	Retro-análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975).	Cooper & Clark (1982) em Gabr & Valero (1995)
3	58	-	Retro-análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975).	Purcell et al. (1983) em Gabr & Valero (1995)
19,6	27	-	Retro-análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975).	Harding-Lawson and Assoc. (1987) em Gabr & Valero (1995)
20	21	-	Retro-análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975).	Dames & Moore (1988) em Gabr & Valero (1995)
25,2	2	-	Retro-análise de talude estável durante terremoto de 1971.	Purcell et al. (1987) em Gabr & Valero (1995)
4,5 – 14,9	59	-	Retro-análise de talude estável durante terremoto de 1987.	Purcell et al. (1987) em Gabr & Valero (1995)
13,8	35	-	Retro-análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975).	EMCON (1986) em Gabr & Valero (1995)
19,9	17	-	Retro-análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975).	EMCON (1987) em Gabr & Valero (1995)
20,2	23,5	-	Retro-análise conservadora, baseada em Converse et al. (1975).	EMCON (1989) em Gabr & Valero (1995)
0	98	-	SPT	Earth Techn. Corp. (1988) em Gabr & Valero (1995)
0	78	-	Ensaio de palheta	Earth Techn. Corp. (1988)
0	42; 55;	7,1 – 7,6	Triaxial CU (sem medida de u).	Gabr & Valero (1995)

	62; 66; 68		Parâmetros à 20% de desl. vert.	
34	16	7,1 – 7,6	Triaxial CU (c/ medidas de w/u).	Gabr & Valero (1995)
29	5	-	Retro-análise de taludes de aterros não rompidos. FS = 2	GeoSyntec Consultants (1993) apud Kavazanjian et al. (1995)
34	5	-	Retro-análise de taludes de aterros não rompidos. FS = 2	GeoSyntec Consultants (1993) apud Kavazanjian et al. (1995)
37	5	-	Retro-análise de taludes de aterros não rompidos. FS = 2	GeoSyntec Consultants (1993) apud Kavazanjian et al. (1995)
38	5	-	Retro-análise de taludes de aterros não rompidos. FS = 2	GeoSyntec Consultants (1993) apud Kavazanjian et al. (1995)
18 – 43	10	15	Cisalhamento direto in-situ	Richardson & Reynolds (1991) apud Kavazanjian et al. (1995)
19 – 24	16 – 32	-	Valores recomendados de cálculo	Landva et al. (1984)

CAPÍTULO III

MODELO GEOTÉCNICO BASEADO NO EFEITO DE REFORÇO DAS FIBRAS PARA ESTUDO DA RESISTÊNCIA DOS RSU – EXPERIÊNCIA ALEMÃ

3.1. INTRODUÇÃO

A problemática da capacidade de carga de aterros sanitários foi estudada e analisada em um projeto de pesquisa da comunidade científica da Alemanha (*DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft*), cujo tema foi “*Geotechnik der Abfallstoffe*” (Geotecnia dos Materiais do Resíduo Sólido), entre os anos de 1990 e 1997 nas Universidades Aachen, Bochum e Braunschweig (DGGT, 1994; JESSBERGER & KOCKEL, 1993; JESSBERGER et al., 1995; KOCKEL, 1995; COLLINS & KÖLSCH, 1996; KÖLSCH, 1995, 1996, 1997; dentre outros). Baseando-se nos resultados destas pesquisas foram desenvolvidos procedimentos de cálculos e análises de estabilidade de taludes para diferentes tipos de resíduos. Especialmente pelo fato da anisotropia do corpo da massa de resíduos sólidos (em função da deposição do resíduo sólido em camadas), foi desenvolvido na Universidade Técnica de Braunschweig um novo modelo e seu respectivo procedimento de cálculo para este tipo de material. Este modelo possibilita uma análise mais realística da capacidade de carga de aterros sanitários e de taludes de resíduos sólidos rompidos.

Desta forma, apresenta-se neste capítulo uma revisão do comportamento mecânico de materiais reforçados e de material de aterros sanitários, a descrição do modelo geotécnico e o método de cálculo de estabilidade para resíduos sólidos urbanos, e a aplicação deste novo modelo e cálculo para um caso prático em aterro de resíduos sólidos na Alemanha.

3.2. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE MATERIAL REFORÇADO

Na área de solos reforçados, a resistência ao cisalhamento do material é causada não apenas pelas propriedades de atrito e coesão, mas também pelo efeito do reforço. Quando o material reforçado sofre uma deformação por cisalhamento, são produzidas tensões de tração interna através da deformação dos componentes de reforço. Estas tensões de tração aumentam a resistência ao cisalhamento. A mobilização destas tensões é apresentada na Figura III.1 através de um exemplo de um material granular reforçado.

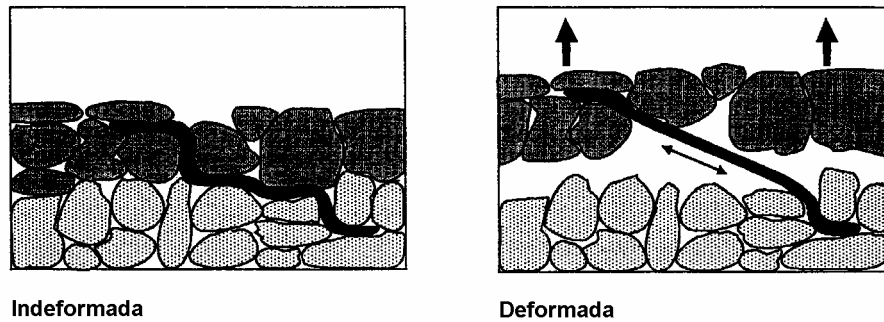


Figura III.1 – Efeito de reforço através da mobilização de tensões de tração interna – KÖLSCH (1996).

Materiais reforçados são obtidos através de diferentes formas de construção. Como definição, entende-se por um solo com reforço, por exemplo em forma de ligamentos de aço ou plásticos, que incorporam tensões de cisalhamento através da mobilização de tensões de tração interna do reforço. O método de construção de Terra Armada já havia sido empregado há 3500 anos para a construção de Pirâmides. Este procedimento esquecido no começo da era moderna, foi novamente descoberto por VIDAL (1966), que continuou sistematicamente o desenvolvimento desta técnica. A partir de então, em função da divulgação do emprego de geotêxteis, por exemplo para a construção de muros de contenção, houve uma grande expansão do uso desta técnica.

O comportamento de ruptura de muros e corpos de talude de terra com geotêxteis foi pesquisado por SERÉ & THAMM (1992), citado em KÖLSCH (1996). Em um ensaio de grande porte, carregou-se um muro vertical reforçado, de 10,0 m de altura, até atingir a ruptura. O mecanismo de ruptura do muro é apresentado na Figura III.2. O mecanismo de ruptura observado mostra claramente a existência de tensões de tração nas camadas de reforço. Na parte superior do muro ocorrem deformações horizontais maiores do que na região abaixo do muro. Este fato faz supor que o efeito do reforço é dependente da carga, ou seja, que a carga aplicada no topo do muro influencia as forças de reforço. O cálculo de estabilidade de muros reforçados com geotêxteis e muros de contenção reforçados de aço é realizado separadamente para o solo, reforço e a ligação. Isto é apenas possível porque as fibras são inseridas sistematicamente em camadas e a resistência do solo e do reforço são conhecidas. As investigações da resistência são realizadas separadamente. A determinação da resistência ao cisalhamento do sistema em conjunto através de técnicas de ensaios não é possível, correspondentemente não se aplica nenhuma condição limite Mohr-Coulomb para o material composto.



Figura III.2 – Mecanismo de ruptura de um muro reforçado (SERÉ & THAMM, 1992).

Contudo, existem também misturas de grãos e fibras, estas distribuídas aleatoriamente, onde a resistência do reforço não pode ser obtida separadamente, nem mesmo nos cálculos. Estas propriedades de reforço ocorrem em casos especiais de terra armada, conhecida como terra armada por fibras. Neste caso, consistem de materiais compostos obtidos através da mistura de solo e filamentos contínuos de Poliester, por exemplo. As fibras contribuem para um aumento da resistência ao cisalhamento através da incorporação de tensões de tração.

Para a avaliação e determinação da resistência ao cisalhamento de materiais reforçados por fibras existem dois diferentes princípios e procedimentos básicos. Para o caso em que o material comporta-se com propriedades isotrópicas de resistência, a resistência ao cisalhamento pode ser determinada através de simples investigações em ensaios de cisalhamento direto ou ensaios triaxiais. Com base nestes tipos de ensaios, foi verificada uma condição limite bi-linear do material reforçado, conforme GRAY & OHASHI (1983) e MAHER & GRAY (1990), Figura III.3. Curvas semelhantes também foram encontradas por SCHLOSSER & GUILLOUX (1981) e AL-REFEAL (1991). Segundo o modelo de ruptura bi-linear, o material reforçado com fibras mostra primeiramente um ângulo de atrito maior do que o material sem reforço para tensões normais menores que a tensão normal crítica. Acima da tensão normal crítica, o ângulo de atrito para ambos materiais (com ou sem reforço) é igual.

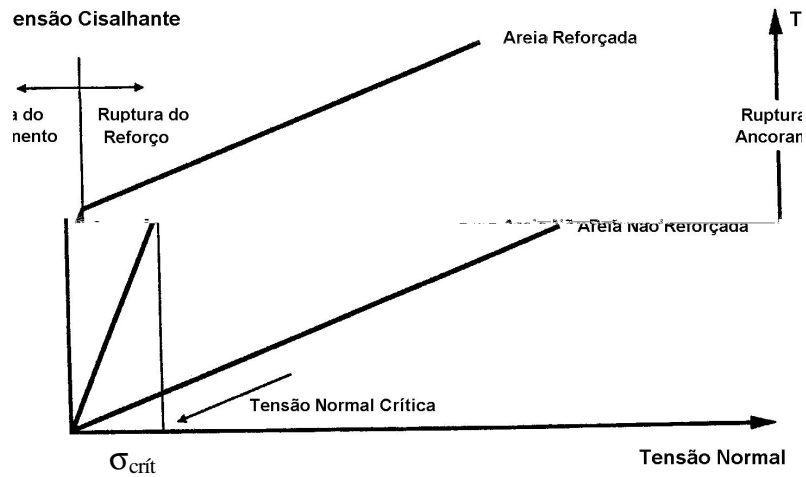


Figura III.3 – Efeito da adição de fibras no comportamento de ruptura de uma areia (MAHER & GRAY, 1990).

Neste modelo, há a suposição de que solo e reforço rompem ao mesmo tempo, onde o reforço mostra dois diferentes mecanismos de ruptura: i) na área abaixo da tensão normal crítica há a ruptura da ancoragem, ou seja, o reforço é puxado do solo (ruptura por deslizamento); ii) acima da tensão normal crítica há a ruptura das fibras, ou seja, do reforço. Como a ruptura da ancoragem é dependente da carga, ocorre um crescimento da linha de ruptura para o solo reforçado com fibras, traduzido pelo aumento do ângulo de atrito.

As investigações da resistência ao cisalhamento de solos reforçados isotropicamente apresentam também alguns problemas. Não é possível estimar com certeza nestes tipos de ensaios se a isotropia admitida corresponde a que realmente existe. Resultados de ensaios de cisalhamento em argila reforçada com fibras realizados por MEYER (1990) mostraram que nem sempre a condição de limite bi-linear apresentada pelo modelo é verificada no comportamento resistente do material. Uma outra questão é sobre a condição de ruptura descontínua, pois embora haja uma dependência da resistência do material em função da carga, não são indicadas porém as respectivas causas. A determinação da componente da resistência decorrente do efeito de reforço pode ser feita apenas com a comparação dos resultados referentes ao material sem reforço.

As investigações de resistência de material reforçado com fibras tornam-se mais complexas quando o comportamento da resistência é admitido anisotrópico. Isto vale para determinados materiais, cujas fibras são predominantemente alinhadas horizontalmente através da deposição em camadas. A anisotropia estrutural do TEXSOL foi analisada por

HEUN & SCHMIDT (1990) através de ensaios de cisalhamento em uma caixa de 450 x 450 x 180 mm. A relação entre o ângulo ϑ (entre o plano de ruptura e a direção das fibras) e a coesão é apresentada na Figura III.4, onde encontra-se para o TEXSOL uma coesão máxima para um ângulo ϑ de 90°.

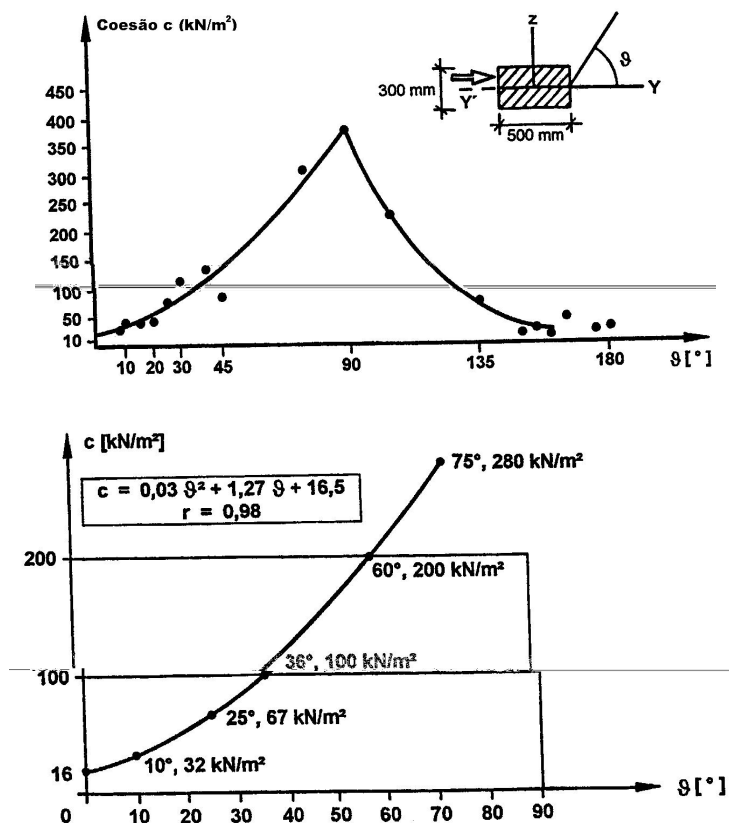


Figura III.4 – Anisotropia da coesão do TEXSOL - HEUN & SCHMIDT (1990).

JEWELL & WROTH (1987) determinaram em ensaios semelhantes em areia com reforços metálicos, orientados na horizontal, uma relação, onde a máxima coesão provocada pelo reforço ocorreu para um ângulo de 60° (Figura III.5). Como pode-se constatar, a determinação das propriedades anisotrópicas é também problemática.

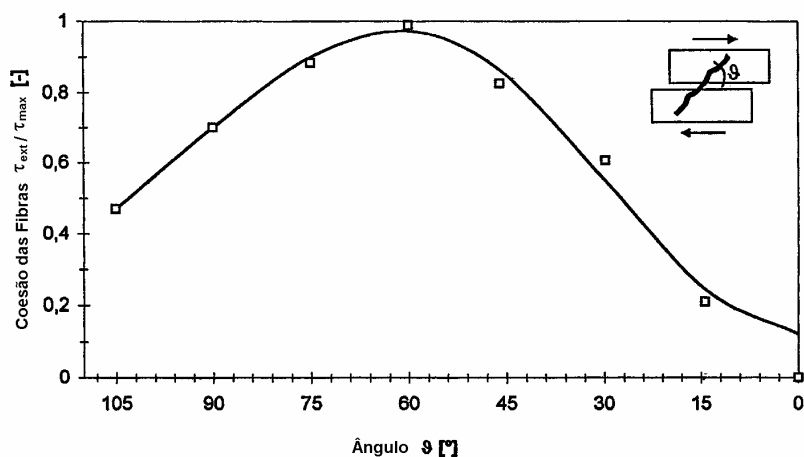


Figura III.5 – Ativação da coesão devido ao reforço em dependência do ângulo ϑ – JEWELL & WROTH (1987).

Segundo KÖLSCH (1996), os ensaios de resistência que levam a contribuição anisotrópica do reforço são descritos em termos de coesão, enquanto que o efeito do reforço nas investigações de misturas isotrópica na condição de ruptura bilinear é dado pelo ângulo de atrito. A coesão baseada nas tensões de reforço é calculada como a diferença da resistência ao cisalhamento com e sem reforço. O emprego do conceito de coesão serve assim para caracterizar o crescimento da resistência ao cisalhamento como uma consequência da adição das correspondentes forças de tração.

Mais informações sobre o efeito conjunto da resistência devido ao atrito e à “coesão” anisotrópica produzida pelo reforço, bem como a dependência da coesão anisotrópica pelas cargas não são mencionadas pelos autores, HEUN & SCHMIDT (1990) e JEWELL & WROTH (1987). Assim, não pode ser dada nenhuma condição limite (de borda) para solos reforçados com fibras e solos com reforços metálicos, distribuídos anisotropicamente. Contudo, pode se supor que a condição limite não linear precisaria em princípio ser semelhante para solos reforçados com fibras isotrópica e anisotrópica.

3.3. DESCRIÇÃO DO MODELO

Baseado no conhecimento da capacidade de carga de fibras de resíduos sólidos e outros materiais que contêm fibras foi desenvolvido um modelo estrutural a partir de ensaios de compressão triaxial e cisalhamento direto, conforme mostrado nas Figuras III.6 e III.7, KÖLSCH (1993, 1995, 1996). O modelo estrutural admite que materiais fibrosos são capazes de incorporar forças de tração. Além disso, o modelo considera que o desenvolvimento de

forças de tração nas fibras tem o mesmo efeito que um reforço, dependendo da ligação das fibras que é dependente da tensão normal. A resistência total ao cisalhamento é composta do atrito no plano cisalhante e da força de tração nas fibras. Dependendo da transmissão das forças nas fibras, que aumentam com a tensão normal, e também dependendo da resistência à tração das fibras, a resistência total ao cisalhamento em um determinado intervalo de tensão normal é maior do que a resistência friccional (devido ao atrito). Como existe uma correlação linear entre a resistência friccional e a tensão normal (descrita pelo ângulo de atrito interno ϕ), uma correlação não linear, descontínua entre a resistência total ao cisalhamento e a tensão normal é produzida nas fibras.

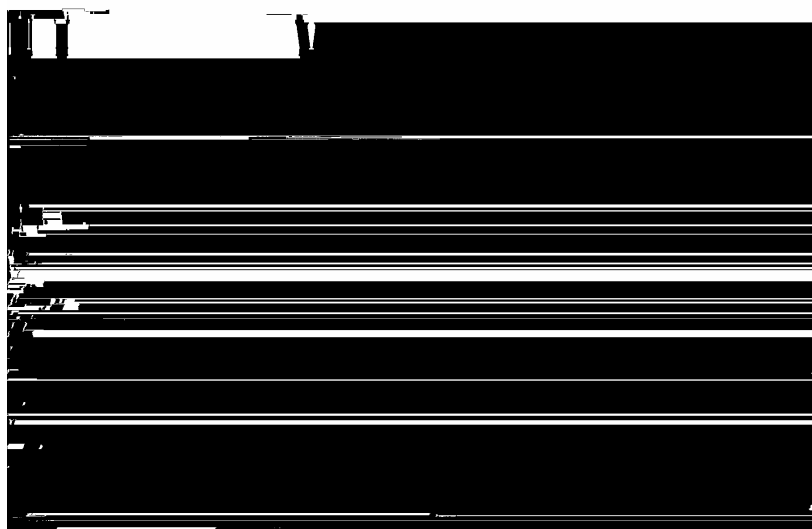


Figura III.6 – Comportamento do resíduo sólido – Modelo de interação entre as forças de atrito e tração – KÖLSCH (1993, 1995, 1996).

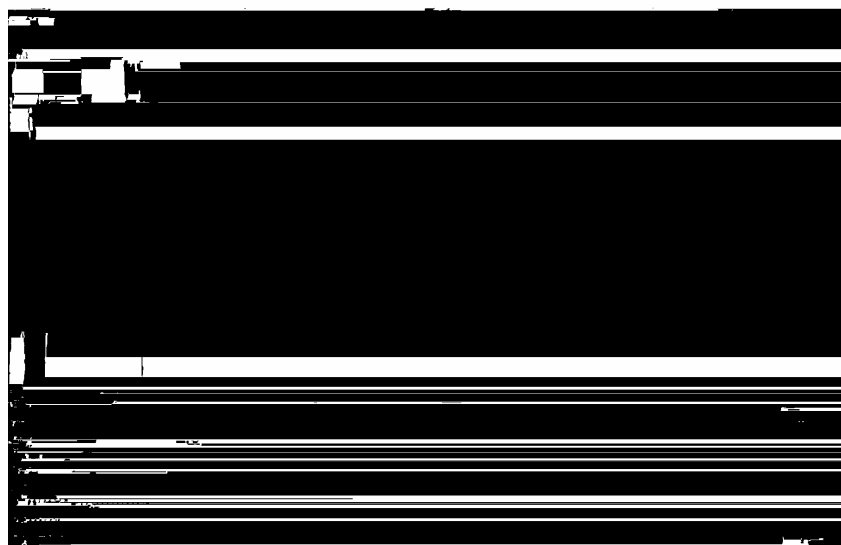


Figura III.7 – Comportamento do resíduo sólido – Aumento da resistência ao cisalhamento devido às forças de tração – KÖLSCH (1993, 1995, 1996).

A Figura III.6 mostra o modelo de uma interação potencial entre as forças de atrito e tração durante a deformação por cisalhamento de um material fibroso numa determinada tensão normal constante. Durante a deformação, apenas as forças de atrito surgem no início do ensaio (I), com o aumento da deformação (II) as fibras são gradualmente mais solicitadas, e como consequência, as forças de tração aumentam (efeito semelhante ao reforço). Excedendo-se a resistência à tração das fibras, elas se rompem (III), e neste caso, a máxima resistência ao cisalhamento é alcançada. Com as deformações que se seguem, as tensões cisalhantes caem, sendo devidas somente ao atrito (IV).

A magnitude do atrito é determinada pela carga normal e obedece uma relação linear com a força normal. A resistência à tração cresce também com o aumento da tensão normal, porque a transmissão das forças de tração se torna mais eficaz quando da intensa ligação das fibras. A incorporação das forças de tração nas fibras é limitada pela resistência à tração das mesmas, portanto, existe uma determinada tensão normal onde o valor da força à tração é máximo. Várias combinações de forças de atrito e tração (dependendo das condições de tensão normal) resultam deste mecanismo.

A Figura III.7 mostra a interação das forças de atrito e tração para várias tensões normais, onde os círculos indicam os máximos valores de forças de tração e os triângulos indicam a fricção máxima para uma determinada tensão normal. Para tensão normal mais baixa (σ_1), têm-se forças de tração baixas (falta de ligação das fibras), enquanto que para tensão normal mais alta, as forças de tração nas fibras aumentam (ligação mais compacta), até que elas atinjam um valor máximo para uma tensão normal σ_2 . Para tensões normais onde $\sigma \geq \sigma_2$, apenas a componente de atrito da resistência total ao cisalhamento é que aumenta. Dependendo das proporções entre as forças de atrito e tração, a resistência total ao cisalhamento é determinada pelas forças de tração ($\sigma_1 \leq \sigma \leq \sigma_4$) ou pelas forças de atrito (σ_4). Neste intervalo de tensão normal ($\sigma_1 \leq \sigma \leq \sigma_4$), onde a resistência total ao cisalhamento é determinada pelas forças de tração, a envoltória linear de cisalhamento mostra uma quebra, que é característica dos materiais fibrosos. A magnitude e extensão desta quebra dependem das propriedades do material (resistência das fibras, características do atrito).

3.4. CARACTERÍSTICAS DE REFORÇO

3.4.1. DEFINIÇÃO

A resistência ao cisalhamento em aterros sanitários é ao contrário de materiais tipo solo causada não apenas pelo atrito entre os grãos, mas por grande parte pelo efeito tipo “reforço” das fibras contidas nos resíduos sólidos. A resistência ao cisalhamento produzida através da tensão de tração nos componentes fibrosos é denominada como coesão das fibras. A coesão das fibras cresce como o atrito em função do acréscimo de carga, pois as fibras podem admitir grandes tensões de tração por meio de uma melhor ancoragem.

Para a descrição das propriedades de resistência da matriz de reforço, ou seja, as propriedades de reforço das fibras existentes nos resíduos sólidos, novas definições e novos parâmetros do material foram estabelecidos, KÖLSCH (1996), Figura III.8. A dependência linear da tensão de tração nas fibras pela tensão normal, que atua nas fibras, é descrita através do ângulo de tensão de tração α . O valor limite da tensão de tração (ruptura/rasgo das fibras), ativada em dependência com a carga aplicada, é denominado como resistência à tração específica das fibras z_{\max} , e a carga necessária para o alcance desta resistência à tração é denominada tensão normal crítica $s_{\text{crít}}$. Para as tensões de tração dependentes da carga pode haver uma parte não dependente da carga, denominada z_0 .

.....

Figura III.8 – Definição para a descrição das propriedades de tração – KÖLSCH (1996).

Para levar em consideração as características das propriedades de resistência dos resíduos sólidos, deve-se determinar a magnitude de ambas componentes da resistência ao cisalhamento (atrito e reforço) em ensaios separados, assim como descrever a resistência através de diferentes parâmetros. Com estes dados, pode-se conduzir os cálculos de estabilidade de talude.

3.4.2. PARÂMETROS DO MATERIAL

Para a descrição da resistência ao cisalhamento de aterros de resíduos sólidos (constituente de fibras) é necessário o conhecimento de 5 (cinco) parâmetros do material estudado. As propriedades de atrito são descritas através dos parâmetros coesão c_{MB} e ângulo de atrito ϕ_{MB} da matriz básica (MB) do resíduo sólido. A coesão das fibras é calculada pela tensão à tração ativada nas fibras. As propriedades de tração são descritas através do ângulo de tensão à tração ζ e da tensão à tração independente da carga z_0 . A transformação da tensão à tração em coesão das fibras resulta da consideração da anisotropia bem como da resistência à tração específica das fibras z_{max} . A resistência ao cisalhamento obtida por estes cinco parâmetros do material está apresentada conforme a Figura III.9, KÖLSCH (1997).

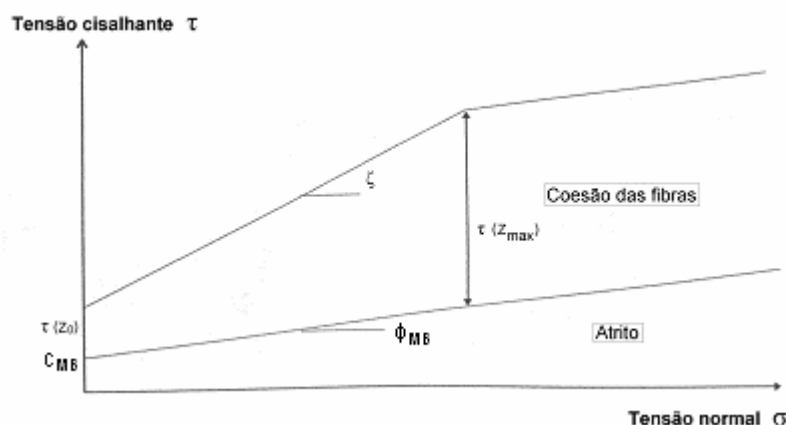


Figura III.9 – Sobreposição das resistências ao cisalhamento – KÖLSCH (1997).

A determinação dos parâmetros de resistência é conduzida de forma separada para as propriedades de atrito e reforço do resíduo sólido. As propriedades de atrito podem ser determinadas pelo deslizamento horizontal das fibras em ensaios de cisalhamento direto. Alternativamente, pode-se realizar também análises em ensaios de cisalhamento e triaxial em amostras de resíduos sólidos com tamanho reduzido, contendo estas amostras nenhum constituinte fibroso com dimensões > 40 mm. Estes ensaios fornecem bons resultados quando

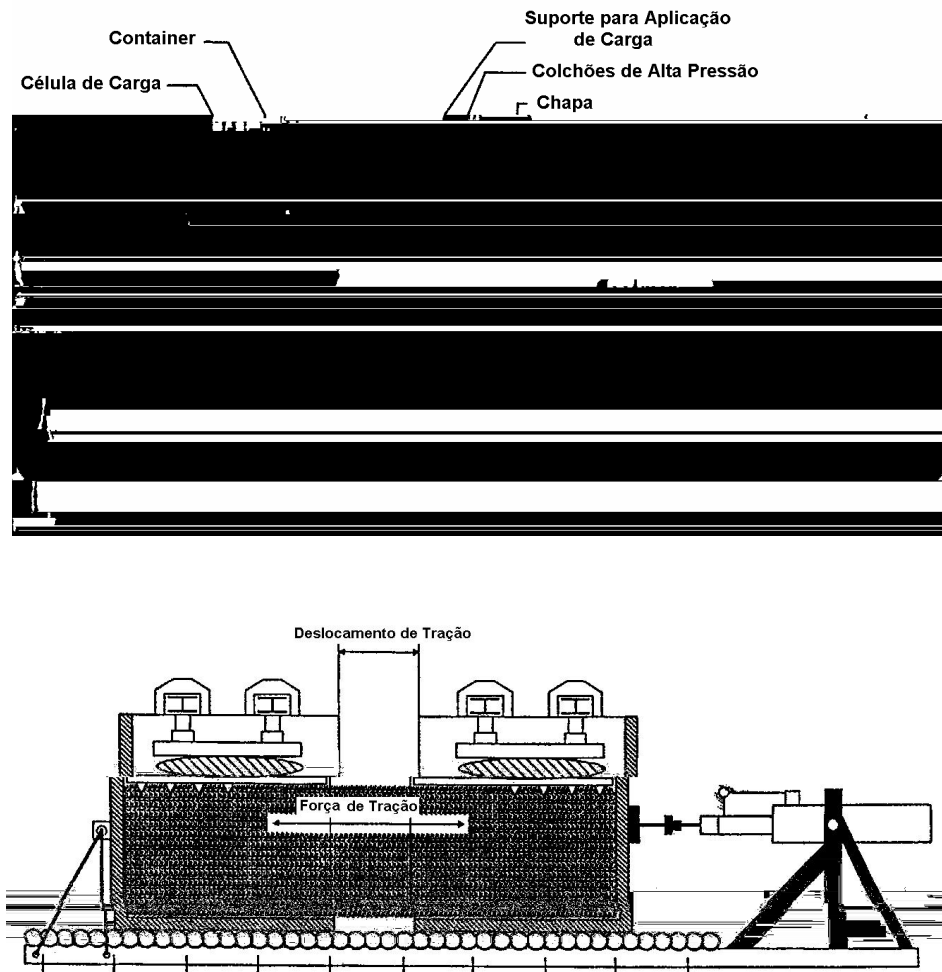


Figura III.10 – Ensaio de tração dependente da pressão – KÖLSCH (1996).

A ruptura da amostra em aterros não é causada pela quebra das fibras, mas sim predominantemente pela extração das fibras da matriz básica. O ensaio de tração é por esta razão interrompido após o início da extração das fibras, a parte elástica da tensão de tração retorna ao material através do descarregamento/alívio das tensões devido ao retorno de uma das metades da caixa. Em seguida, a amostra é consolidada no nível seguinte de carga. Os níveis de carga são acrescidos a cada 100 kN/m^2 e a carga máxima pode atingir em torno de 600 kN/m^2 .

3.4.2.1. CÁLCULO DA COESÃO ATIVADA PELAS FIBRAS

Das tensões de tração determinadas pela técnica do ensaio de tração comentado anteriormente, pode ser calculada, sob o emprego de combinações mecânicas, a contribuição da matriz fibrosa para a resistência ao cisalhamento, e esta contribuição é denominada como coesão das fibras. A coesão das fibras $t(z)_a$ consiste de duas partes: t_z (tensão cisalhante

devido às forças de tração no reforço, que atua paralela ao plano de ruptura) e $t_R(z)$, tensão de atrito adicional que é causada por uma tensão normal s_z resultante das forças de equilíbrio. A tensão de tração no reforço é representada por z_a . A Figura III.11 mostra o equilíbrio de forças em um elemento reforçado horizontalmente, o qual é carregado através de uma força de tração P axial à direção das fibras e cisalhante (III.11A) e de uma força cisalhante T paralela ao plano de ruptura A_α (III.11B), KÖLSCH (1996).

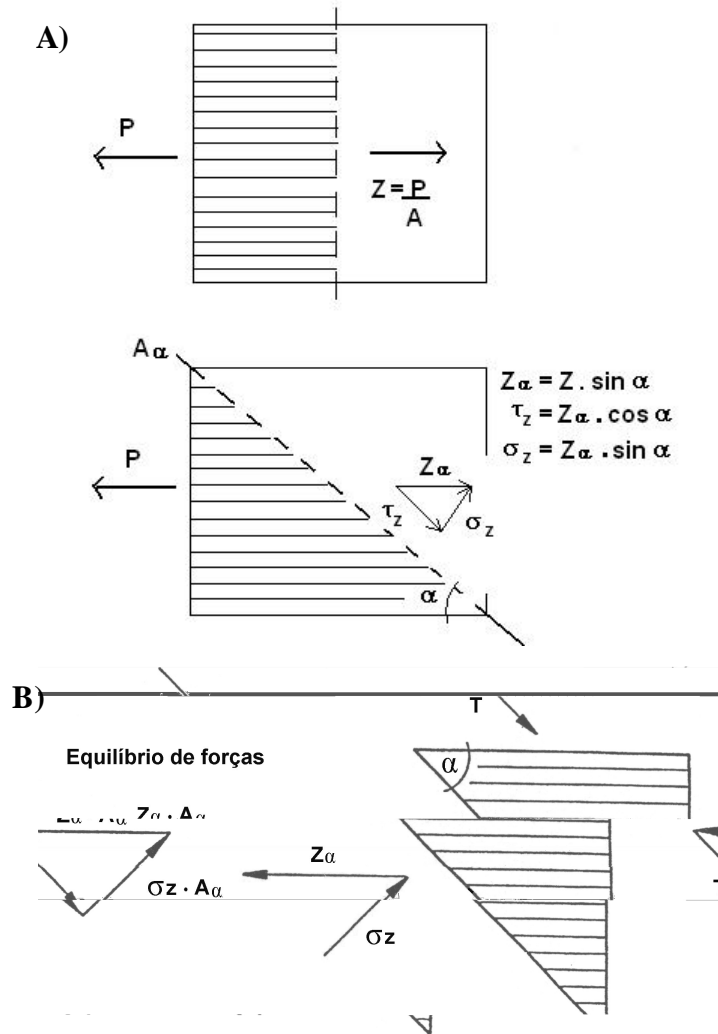


Figura III.11 – Equilíbrio de forças em um elemento reforçado horizontalmente - KÖLSCH (1996).

A coesão das fibras calcula-se como mostrado na Equação 1:

$$\begin{aligned}
 t(z)_a &= t_z + t_R(z) \\
 &= z_a \cdot \cos a + s_z \cdot \tan \phi \\
 &= z_a \cdot \cos a + z_a \cdot \sin a \cdot \tan \phi \\
 &= z_a \cdot (\cos a + \sin a \cdot \tan \phi) \dots \dots \dots (\text{Equação 1})
 \end{aligned}$$

Substituindo a relação $z_a = z \cdot \sin a$ na Equação 1, obtém-se a Equação 2 para a coesão das fibras.

$$t(z)_a = z \cdot \sin a \cdot (\cos a + \sin a \cdot \tan \phi) \dots \dots \dots (\text{Equação 2})$$

sendo,

$t(z)_a$ – tensão cisalhante (*coesão das fibras*) devido ao efeito de reforço;

t_z – tensão cisalhante devido ao efeito de reforço que atua paralela no plano de ruptura;

$t_R(z)$ – tensão de atrito adicional;

z – tensão à tração no reforço.

A coesão das fibras depende da posição do plano de ruptura em relação à direção das fibras (ângulo a), e também das propriedades de atrito do material. Isto pode ser representado pela Equação 3, decorrente da Equação 2, correspondendo ao grau de ativação da coesão das fibras a_7 . A relação entre a_7 para diferentes valores de ângulo de atrito ϕ em dependência com o ângulo a está apresentado na Figura III.12 (KÖLSCH, 1996). De acordo com esta figura, para ângulos de atrito entre 15° e 35° , o grau de ativação da coesão das fibras no plano de ruptura mostra-se entre 65 % e 96%. Os respectivos ângulos a de inclinação da superfície de ruptura com a direção das fibras correspondem a 52° e 62° .

$$t(z)_a / z = a_7 \quad , \quad \text{com } a_7 = \sin a \cdot (\cos a + \sin a \cdot \tan \phi) \dots \dots \dots (\text{Equação 3})$$

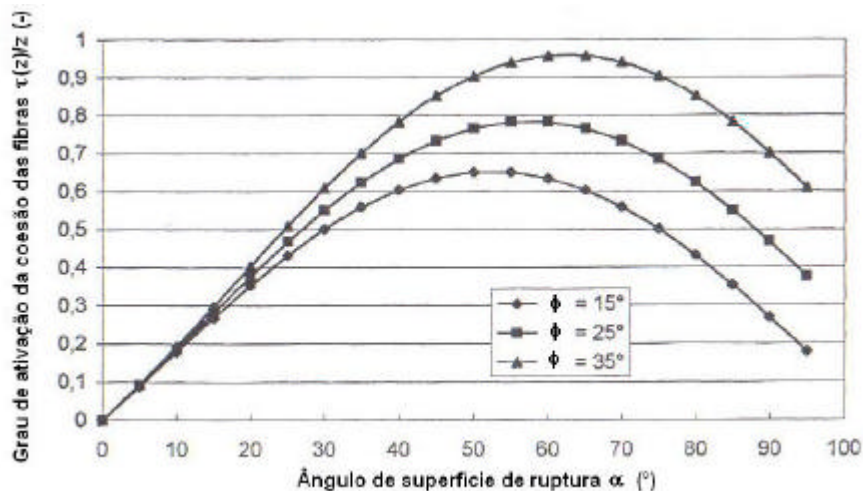


Figura III.12 – Grau de ativação teórico da coesão das fibras – KÖLSCH (1996).

Ao contrário do atrito, a coesão das fibras mostra uma clara anisotropia, isto é, sob determinados ângulos de deformação por cisalhamento (por exemplo: paralela ao comprimento da fibra) ativa-se apenas um baixo efeito do reforço. A suposição teórica é confirmada através de análises da resistência ao cisalhamento de solos reforçados anisotropicamente (JEWELL & WROTH, 1987). Baseando-se em teoria e análises, uma função da anisotropia foi deduzida da Figura III.5. A coesão ativada devido ao reforço em dependência com o ângulo a resulta conforme a Equação 4.

$$t(z)_a = z \cdot a_{\gamma, \max} \cdot \sin(1,5 \cdot a) \dots \dots \dots \text{(Equação 4)}$$

sendo,

$a_{\gamma, \max}$ – taxa de ativação máxima sob ângulo optimal a (varia entre 0,8 e 1,1);

a – ângulo da superfície de ruptura com a direção das fibras; admitindo-se ($a = \nu$).

3.5. RESULTADOS DE ENSAIOS DE TRAÇÃO

Ensaio de tração com o novo equipamento foram realizados por KÖLSCH (1996) em diferentes amostras de resíduos sólidos urbanos:

- Fresco: resíduo sólido novo, incluindo todos os componentes;
- Residual: resíduo sólido novo, sem matéria orgânica;
- Degradado 1: resíduo sólido degradado por meio de pré-tratamento anaeróbio;
- Degradado 2: resíduo sólido degradado resultante de pré-tratamento biológico aeróbio;
- Peneirado: corresponde ao resíduo Degradado 2, porém peneirado, sem seus componentes de reforço.

A relação tensão, devido à tração dos elementos de reforço, versus tensão normal obtida nestes ensaios, bem como a comparação dos valores dos ângulos da tensão de tração para os diferentes materiais estudados estão apresentados na Figura III.13. Os valores dos ângulos de tração situam-se entre $\alpha = 0^\circ$ (para resíduos peneirados sem componentes fibrosos) e $\alpha = 35^\circ$ (para resíduos novos com alto teor de fibras).

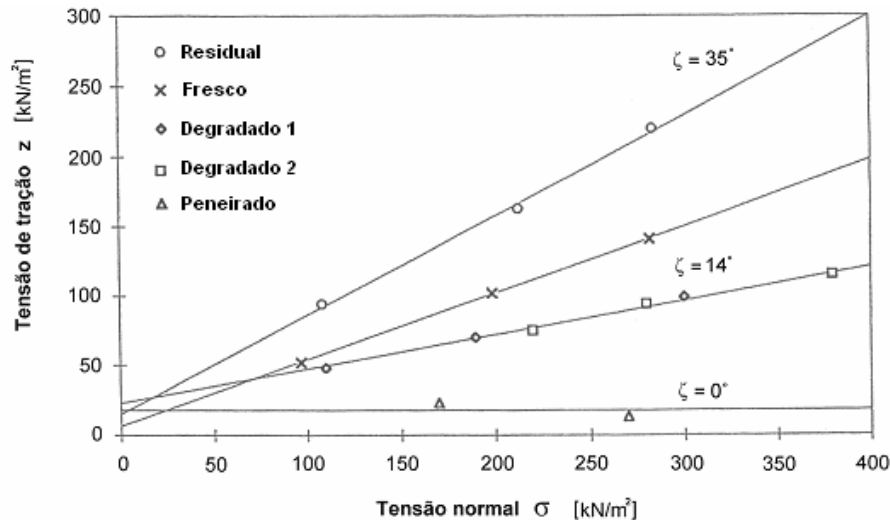


Figura III.13 – Ensaio de tração – Tensões e ângulos de tração – KÖLSCH (1996).

Embora o autor afirme que não tenha analisado as propriedades de atrito dos resíduos sólidos em igual amplitude, como realizou para as propriedades de tração, o mesmo indica que os resultados obtidos até hoje mostram ângulo de atrito para resíduos frescos (novos) da ordem de 30° , e para o caso de resíduos degradados (velhos) os valores são ainda maiores. Em função da pouca quantidade de ensaios e análises realizadas, os valores deveriam ser empregados de forma conservativa (com cautela), até porque encontram-se também na literatura valores evidentemente mais baixos, da ordem de $\phi = 15 - 20^\circ$. Além disto, em investigações de laboratório para estudo das propriedades de atrito (por exemplo em ensaios de cisalhamento direto), não é possível eliminar um registro parcial do efeito de reforço. Assim, deve-se garantir nos cálculos que a resistência baseada no efeito das fibras não seja considerada duplicada.

3.6. PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DE ESTABILIDADE

Como já comentado anteriormente, existem muitos problemas de cálculos de estabilidade para aterros de resíduos sólidos baseados em métodos usuais da Mecânica dos Solos em função das consideráveis diferenças entre as propriedades de solo e resíduo sólido. As razões para isto são de uma forma geral a heterogeneidade da composição do resíduo sólido, a anisotropia, que é resultante da deposição em camadas, e a mudança da composição e propriedades do resíduo sólido pelos processos bioquímicos ao longo do tempo. Desta forma, é de grande importância um preciso projeto geotécnico para aterros, inclusive no que se refere à análise de estabilidade.

Com base nos resultados do projeto de pesquisa realizado pela comunidade científica alemã, foi desenvolvido um procedimento para o cálculo da estabilidade de talude de resíduos sólidos, o qual considera a capacidade dos componentes fibrosos do resíduo (plásticos, folhas, papel) em incorporar forças de tração. Este procedimento é baseado no comportamento mecânico de RSU, levando-se em consideração o efeito de reforço das fibras e a anisotropia, a fim de que haja uma avaliação realística da estabilidade.

O princípio do cálculo de estabilidade de talude é o método de fatias segundo BISHOP (1955). Com a finalidade de utilizar o parâmetro da coesão das fibras nos cálculos computacionais, os métodos clássicos de cálculo de estabilidade de talude precisam ser modificados. O critério de ruptura baseado na fórmula de Bishop para o cálculo da força na fatia terá neste caso a adição de mais um termo, que corresponde à coesão das fibras. Nestes cálculos, a anisotropia das forças decorrente das fibras é dependente do ângulo α (entre a direção das fibras e o plano de ruptura), o qual descreve a inclinação da fatia (lamela). De acordo com estes termos e devido às investigações em solo reforçado (JEWELL & WROTH, 1987), o valor da coesão das fibras pode ser descrito de acordo com a Equação Simplificada 4. Com este termo adicional, que é obtido pelo uso das relações entre tensão à tração e carga normal em ensaios de tração, resulta a força de cisalhamento na fatia (T), conforme a Equação 5.

$$T = \frac{h}{\sin \alpha \cdot \tan \phi_{MB} + \cos \alpha} \cdot [G \cdot \tan \phi_{MB} + c_{MB} \cdot b + G \cdot \tan ? \cdot a_{?,max} \cdot \sin (1,5 \cdot \alpha)]$$

(Equação 5)

A Equação 5 é constituída pelos seguintes termos: o peso próprio G, a largura b e a inclinação α da base da fatia, e os parâmetros de resistência ao cisalhamento (ângulo de atrito ϕ_{MB} e coesão c_{MB} da matriz básica e o ângulo de tensão à tração ?). A obtenção desta equação está descrita em KÖLSCH (1996).

Inúmeras avaliações, utilizando-se o método modificado de cálculo de estabilidade de talude, foram realizadas pelo grupo alemão de pesquisa. KÖLSCH (1996) conduziu análises de estabilidade bem como retro-análises de diferentes ensaios de campo documentados na literatura. Os resultados levaram a afirmar que taludes de aterros de resíduos não degradados, cujos parâmetros teriam os valores: $\phi_{MB} = 15^\circ$, $c_{MB} = 15 \text{ kN/m}^2$, $? = 35^\circ$, $z_{max} = 225 \text{ kN/m}^2$, $? = 9,5 \text{ kN/m}^3$, com uma altura de até 100 m e inclinação de até 90° , sob condições normais

(nenhuma infiltração de água, nenhuma pressão devido a esta água) não sofreriam colapso, ruptura. Este resultado coincide com frequentes observações em aterros, onde taludes de resíduos sólidos verticais mostram estabilidade para um longo período de tempo. Este fato não é por acaso, mas sim um resultado das propriedades de reforço dos resíduos sólidos. Este novo método, que registra a resistência ao cisalhamento real do resíduo sólido, oferece a possibilidade de fazer melhor uso da capacidade de carga para projetos geotécnicos.

3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De uma forma geral, a escolha do procedimento para a determinação dos parâmetros de resistência, bem como os cálculos de estabilidade de materiais como resíduos sólidos, deve levar em consideração o tipo de deposição do resíduo sólido, ou seja, isotrópica ou anisotrópica. As recomendações alemãs GDA E 2-23 e E 2-29, segundo DGGT (1994), apresentam respectivamente a descrição destes procedimentos para os casos de RSU depositado isotrópica e anisotropicamente, e em quais situações deve-se adotar os métodos.

Espera-se um comportamento anisotrópico dos resíduos sólidos quando observam-se as seguintes considerações: variável tamanho de partículas dos constituintes; distintas distribuições dos componentes do resíduo sólido, diferentes relações entre os materiais constituintes, no que se refere a classificação por materiais em forma de grãos, fibras, folhas e caixa; e também a construção da massa de resíduos sólidos em camadas.

De acordo com GDA E 2-23, para os resíduos sólidos que apresentam comportamento isotrópico, pode-se utilizar os métodos conhecidos da Mecânica dos Solos, como por exemplo, as condições limites e de ruptura Mohr-Coulomb. Os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos depositados de forma isotrópica são desta forma dados em termos de coesão e ângulo de atrito, podendo ser obtidos por meio de ensaios de cisalhamento direto e triaxial de maiores dimensões.

Nos casos em que admite-se a construção anisotrópica da massa de resíduos sólidos (GDA E 2-29), além de se levar em consideração as variáveis propriedades dos materiais constituintes, não devem ser empregados simplesmente os métodos da Mecânica dos Solos. Partindo-se da suposição que os componentes dos resíduos sólidos com forma granular geram tensão cisalhante (devido ao atrito) semelhante ao caso de solos, e que os componentes de

maiores tamanhos possuem um efeito semelhante de reforço, incorporando a coesão das fibras, pode-se utilizar o modelo bi-linear para o estudo da resistência de RSU desenvolvido por KÖLSCH (1996), Figuras III.6 e III.7. Conforme já discutido, neste caso os parâmetros de resistência devido às propriedades de atrito e tração são determinados em ensaios separados. Nos cálculos de estabilidade, deve-se considerar nas fórmulas de força de cisalhamento o termo relativo à resistência devido à tração dos componentes de reforço do resíduo sólido. Um resumo de parâmetros geotécnicos para aterros sanitários, que foram sugeridos por GDA E 2-35, DGGT (1994), por meio de análises de uma extensa quantidade de ensaios em resíduos sólidos, tanto para resíduos sem tratamento, como também para resíduos resultante de pré-tratamento mecânico e biológico está apresentado na Tabela III.1.

Tabela III.1 – Parâmetros geotécnicos para aterros sanitários – GDA E 2-35, conforme DGGT (1994).

		RESÍDUOS NÃO TRATADOS	RESÍDUOS TRATADOS MECÂNICO-BIOLÓGICO
Dimensão		Dim 1;2 ¹⁾ (E 1-7) > 30 % em peso	Dim 1;2 ¹⁾ (E 1-7) < 20 % em peso
Peso específico seco γ_{seco} (kN/m ³)	Sem compactação	2 – 5	2 – 7
	Após compactação	5 – 10	8 – 15
Resistência para resíduos depositados em condição anisotrópica ²⁾ (E 2-29)	? (°)	20 – 35	10 – 14
	ϕ_{MB} (°)	30 – 35	
	c_{MB} (kN/m ²)	10 - 15	
Resistência para resíduos depositados em condição isotrópica ³⁾ (E 2-23)	$\phi_{\epsilon 1}$ (°)	$\epsilon_1 = 0$ %: $\phi_{\epsilon 1} = 0$ $\epsilon_1 = 10$ %: $\phi_{\epsilon 1} = 20$ a 25 $\epsilon_1 = 20$ %: $\phi_{\epsilon 1} = 22$ a 35	$\phi_{\epsilon 1} = 0$ $\phi_{\epsilon 1} = 20$ a 25 $\phi_{\epsilon 1} = 22$ a 35
	$c_{\epsilon 1}$ (kN/m ²)	$\epsilon_1 = 0$ %: $c_{\epsilon 1} = 0$ $\epsilon_1 = 10$ %: $c_{\epsilon 1} = 11$ a 17,5 $\epsilon_1 = 20$ %: $c_{\epsilon 1} = 22$ a 35	$c_{\epsilon 1} = 0$ $c_{\epsilon 1} = 11$ a 17,5 $c_{\epsilon 1} = 22$ a 35
Módulo de rigidez (E 2-24)	E_s (kN/m ²) a e σ (kN/m ²)	$E_s = a + b \cdot \sigma$ a: - 100 até -300 b: 10 até 13	
Coefficiente de Permeabilidade	k_f (m/s)	10^{-3} até 10^{-6}	10^{-6} até 10^{-9}

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

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

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

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA DOS ENSAIOS E MATERIAIS

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o programa de investigação realizado em laboratório, utilizando-se amostras de resíduos sólidos urbanos provenientes de dois aterros da Alemanha (Ihlenberg e Buchen), no Instituto Leichtweiss, departamento de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, da Universidade Técnica de Braunschweig, Alemanha. A metodologia dos ensaios laboratoriais conduzidos nesta pesquisa, bem como a descrição das amostras investigadas são também apresentadas. Estas amostras foram submetidas a ensaios de resistência, por meio de equipamentos de cisalhamento direto convencional e de maiores dimensões, a fim de se verificar a influência dos materiais fibrosos (plásticos, têxteis, fios, filamentos) no comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos, como também nos parâmetros de resistência. Vale ainda frisar que uma série de ensaios de resistência ao cisalhamento direto convencional foi conduzida em amostras de solo, sem e com inclusão de fibras, no intuito de investigar as propriedades de resistência de solos reforçados com fibras plásticas distribuídas aleatoriamente, além de servir como base para o estudo do comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos e para posteriores comparações, visando-se estabelecer uma analogia entre os referidos materiais.

4.2. PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

Um resumo do programa de investigação realizado nesta pesquisa para estudar o comportamento mecânico, especialmente no que se refere à resistência, de resíduos sólidos urbanos está apresentado na Tabela IV.1. Os ensaios realizados em solo e mistura solo-fibra também estão indicados nesta tabela.

Os objetivos do programa de investigação consistiram inicialmente em avaliar o comportamento mecânico de material reforçado, neste caso solo e mistura solo-fibra por meio de ensaios de cisalhamento direto convencional, como base referencial para um posterior estudo em resíduos sólidos; caracterizar fisicamente os resíduos sólidos urbanos investigados; avaliar o comportamento mecânico de resíduos sólidos por meio de ensaios de resistência em

diferentes tipos de materiais, sem ou com inclusão de fibras, utilizando-se equipamentos de cisalhamento direto convencional e de maiores dimensões; e comparar os resultados de resistência de resíduos sólidos urbanos em diferentes condições, ou seja, resíduo velho e resíduo pré-tratado mecânica e biologicamente.

Tabela IV.1 – Programa de investigação.

ENSAIOS DE LABORATÓRIO		MATERIAL	VARIAÇÃO
Ensaio de Caracterização para Solos	i) Índices de Consistência; ii) Teor de Umidade; iii) Compactação (Proctor Normal).	SOLO	Argila
			Argila + 2% de Fibras Geotécnicas
			Argila + 2% de Fibras de RSU
Ensaio de Caracterização para RSU	i) Composição Gravimétrica; ii) Distribuição das Partículas; iii) Forma dos Constituintes; iv) Teor de Umidade e Sólidos Voláteis; v) Compactação (Proctor).	RSU VELHO ($\varnothing < 8\text{mm}$)	Matriz básica
			Matriz básica reforçada
		RSU VELHO ($\varnothing < 30\text{mm}$)	Matriz composta (MR/MB=3%)
			Matriz composta reforçada (MR/MB=8%)
		RSU MBA PRÉ-TRATADO ($\varnothing < 8\text{mm}$)	Matriz básica
		RSU MBA PRÉ-TRATADO ($\varnothing < 40\text{mm}$)	Matriz composta 1 (MR/MB = 20%)
Matriz composta 2 (MR/MB = 10%)			
Ensaio de Cisalhamento Direto com Equipamento Convencional (100 x 100 x 30 mm)		SOLO	Argila
			Argila + 2% de Fibras Geotécnicas
			Argila + 2% de Fibras de RSU
		RSU VELHO ($\varnothing < 8\text{mm}$)	Matriz básica
Matriz básica reforçada			
RSU MBA PRÉ-TRATADO ($\varnothing < 8\text{mm}$)	Matriz básica		
Ensaio de Cisalhamento Direto com Equipamento de Maiores Dimensões (300 x 300 x 150 mm)		RSU VELHO ($\varnothing < 8\text{mm}$)	Matriz básica
		RSU VELHO ($\varnothing < 30\text{mm}$)	Matriz composta (MR/MB=3%)
			Matriz composta reforçada (MR/MB=8%)
		RSU MBA PRÉ-TRATADO ($\varnothing < 40\text{mm}$)	Matriz composta 1 (MR/MB = 20%)
			Matriz composta 2 (MR/MB = 10%)

Obs: RSU velho (resíduos do Aterro de Ihlenberg) e RSU MBA (pré-tratado mecânica e biologicamente; resíduos do Aterro de Buchen).

Nos itens seguintes está descrita a metodologia dos ensaios de laboratório da pesquisa, incluindo os experimentos realizados para o estudo em solo e mistura solo-fibra.

4.3. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

4.3.1. ENSAIOS EM SOLO E MISTURA SOLO-FIBRA

4.3.1.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Ensaio de caracterização foram executados em um solo argiloso. A escolha por este tipo de material se justifica pelo fato que, em caso de solos argilosos, a resistência ao cisalhamento é dada em função dos dois parâmetros (coesão e ângulo de atrito), sendo assim mais viável para uma comparação com o comportamento mecânico de materiais como resíduos sólidos. Ensaio de índices físicos e compactação foram realizados para fins de caracterização do material, de acordo com a Norma Alemã para solos, conforme citados abaixo. São também indicadas as correspondentes normas brasileiras.

- i) Índices de Consistência (Norma alemã: DIN 18122-1; Norma Brasileira: NBR 6459 - Limite de Liquidez e NBR 7180 - Limite de Plasticidade);
- ii) Ensaio de Compactação (Norma alemã: DIN 18127; Norma Brasileira: NBR 7182).

O teor de umidade, antes e após os ensaios, foi obtido através do método da estufa para solos, em termos de peso seco do material.

Nas amostras de solo foram realizados ensaios de compactação com energia de Proctor
2Na ensa citados

plásticas provenientes de resíduos sólidos eram cortadas manualmente e que cada amostra não poderia ser reaproveitada nos ensaios, o trabalho de obtenção dos corpos de prova se tornaria bastante extenso para realizar ensaios para os demais pontos da curva, sendo assim optou-se em realizar apenas dois ensaios (umidade ótima e umidade no ramo úmido). A determinação do peso específico seco das amostras de argila foi realizada em função da base seca do material. O equipamento de Proctor utilizado era constituído de cilindro de compactação com diâmetro de 150 mm. A Foto IV.1 apresenta algumas amostras resultantes do ensaio de compactação.



Foto IV.1 – Amostras provenientes de ensaio de compactação. A) Argila. B) Mistura argila-fibra de resíduos sólidos.

4.3.1.2. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA (CISLHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL)

Ensaio de cisalhamento direto convencional foram conduzidos em amostras de argila e mistura argila-fibra para determinar o comportamento mecânico de materiais, sem e com inclusão de reforço, na condição de umidade ótima e para um teor de umidade no ramo úmido. Os ensaios seguiram os procedimentos descritos na norma alemã DIN 18137-3 (Determinação da Resistência). No Brasil é comum seguir as recomendações de HEAD (1984) para os procedimentos gerais dos ensaios de cisalhamento direto. Os corpos de prova utilizados possuíam área de 10.000 mm^2 e altura variando de 250 a 300 mm. A altura das amostras dependia da caixa de cisalhamento utilizada, pois havia três caixas para a condução

dos ensaios de resistência. O detalhamento deste equipamento está apresentado no item 4.3.2.2.1.

As tensões normais aplicadas nos ensaios de cisalhamento foram 100, 200 e 300 kN/m². A fase de adensamento durou 72 horas, período em que as deformações ficavam praticamente constantes. A velocidade de cisalhamento escolhida para estes ensaios de resistência está dentro do recomendado por SCHULTZE & MUHS (1967), onde a velocidade varia entre 0,01 a 0,1 mm/min no caso de cisalhamento lento e entre 0,25 até 1,0 mm/min para cisalhamento rápido. A velocidade utilizada foi 0,013 mm/min (cerca 0,8 mm/h), tendo como objetivo garantir a drenagem de água, eliminado desta forma a geração de poro-pressão durante o cisalhamento, e obtendo os parâmetros de resistência em termos efetivos.

Um resumo dos ensaios de resistência conduzidos em caixas de cisalhamento direto convencional em amostras de argila e mistura argila-fibra está indicado na Tabela IV.2. Os ensaios foram realizados em duas condições de umidade, ou seja, na umidade ótima e em um teor de umidade do ramo úmido da curva de compactação (cerca 27 % superior à ótima). Dois tipos de fibras foram utilizados nas misturas argila-fibra, em porcentagens de 2 %.

Tabela IV.2 – Série de ensaios de cisalhamento direto convencional – Argila e mistura argila-fibra.

MATERIAL	VARIAÇÃO	CONDIÇÃO DA UMIDADE	QUANTIDADE DE ENSAIOS
SOLO	Argila	Ótima	3
		Úmida	3
	Argila + 2 % de Fibras Geotécnicas	Ótima	3
		Úmida	3
	Argila + 2 % de Fibras de Resíduos Sólidos	Ótima	3
TOTAL DE ENSAIOS			15

4.3.1.2.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A obtenção das amostras de argila e misturas com os dois tipos de fibras foi feita mecanicamente. As fibras foram distribuídas aleatoriamente, procurando-se desta forma manter a condição de resistência isotrópica, com a ausência de planos potenciais de fraqueza que podem se desenvolver paralelamente à orientação do reforço, segundo GRAY & MAHER (1989). O reforço nas amostras de argila foi obtido através do uso e inclusão de dois tipos de fibras plásticas. Foram utilizadas primeiramente fibras geotécnicas (plásticos de polietileno de baixa densidade), planares, com largura que variou de 5–10 mm e comprimento de 10-20 mm,

para um teor de 2 % (em peso seco), e em seguida fibras de resíduos sólidos (teor de 2 %), as quais foram obtidas de plásticos e trapos coletados de amostras dos resíduos sólidos do Aterro de Ihlenberg, classificado como resíduo sólido velho, e cortadas manualmente em pedaços de 5-10 mm de largura e 15-30 mm de comprimento, além também de pequenas fibras vegetais. Sabe-se que o comprimento, diâmetro, rugosidade e resistência das fibras influenciam o comportamento de um solo reforçado, contudo, no presente estudo, estes fatores não foram considerados.

Uma visão dos processos de preparação das misturas de argila com fibras geotécnicas e fibras de resíduo sólido encontram-se respectivamente nas Fotos IV.2 e IV.3. Todos os corpos de prova foram moldados e compactados em uma única camada na caixa de cisalhamento. Os parâmetros de moldagem seguiram os dados das curvas de compactação obtidas dos ensaios Proctor Normal. A Foto IV.4 ilustra alguns corpos de prova no final do ensaio de cisalhamento direto, no caso de argila e mistura argila-fibra geotécnica (polietileno de baixa densidade).



Foto IV.2 – Preparação da mistura argila-fibra geotécnica (polietileno de baixa densidade; largura: 5-10 mm e comprimento: 10–20 mm; porcentagem de fibras: 2 %).



Foto IV.3 – Preparação da mistura argila- fibra de resíduo sólido (largura: 5-10 mm e comprimento: 15-30 mm; porcentagem de fibras: 2 %).

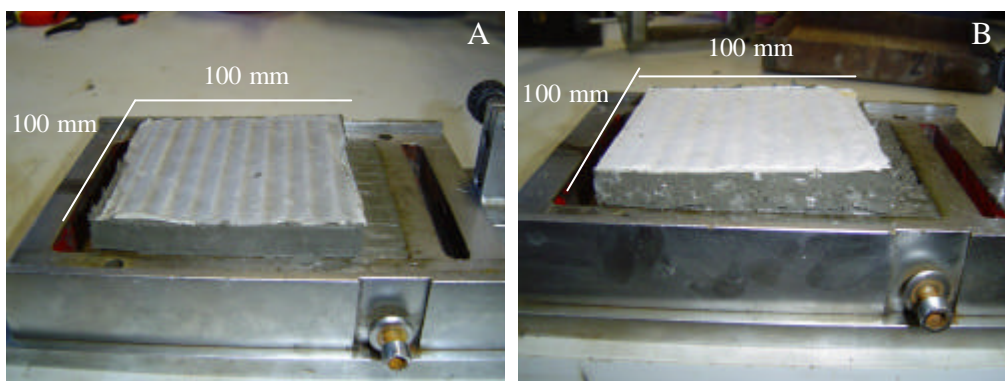


Foto IV.4 – Aspecto da amostra de argila (A) e mistura argila-fibra geotécnica (B) no final do ensaio de cisalhamento direto.

4.3.2. ENSAIOS EM RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

4.3.2.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A descrição do material é de grande importância à análise das propriedades mecânicas dos resíduos sólidos urbanos. Para ser possível uma comparação ou até mesmo a transferência de parâmetros de resistência, medidos em amostras de diferentes resíduos, é necessário verificar se as propriedades dos materiais constituintes, as quais influenciam o comportamento mecânico do resíduo sólido, são semelhantes. Desta forma, é de fundamental importância determinar as propriedades destes constituintes, para posteriormente descrever e classificar o correspondente resíduo sólido. Pelo fato das relações entre as propriedades de resistência destes materiais não estarem ainda bem definidas, torna-se necessário proceder de forma cuidadosa à escolha dos parâmetros para descrição das propriedades dos constituintes do resíduo sólido.

De acordo com KÖLSCH (1997), em análises de ensaios da literatura sobre a resistência de RSU, a descrição dos resíduos sólidos é realizada em sua maioria baseando-se no tipo de resíduo (doméstico, industrial, perigosos, dentre outros), na idade e na descrição de seu estado. Há casos em que inclui também a curva de distribuição das partículas dos constituintes para a descrição do material como um todo. Neste caso, porém, o autor considera que estes 04 (quatro) parâmetros (tipo, idade, estado geral e granulometria) não são suficientes para fins de classificação e de transferência dos valores específicos de resistência. Como se sabe, a maior parte das investigações em resíduos sólidos é conduzida em laboratórios de mecânica dos solos, onde normalmente não estão disponíveis equipamentos de

dimensões específicas para o estudo dos RSU (por exemplo: peneiras de grandes dimensões, cilindros para compactação de grandes dimensões, dentre outros), ou até mesmo aparelhos para estudos químicos e biológicos. Sendo assim, a fim de possibilitar a definição das propriedades do material que são relevantes para o estudo da resistência dos resíduos sólidos, foi adotado pelo Instituto Leichtweiss da Universidade Técnica de Braunschweig (Alemanha) um procedimento para a sua descrição, que está incluso no documento “Geotecnia de Aterros e Áreas Contaminadas”, da Sociedade Alemã para Geotecnia (GDA EMPFEHLUNGEN, 1997 e DGGT, 1994). A descrição do material é efetuada em três níveis: identificação, análise dos constituintes e descrição do estado. Os ensaios de compactação, que servem também para caracterização do material, são apresentados em seguida.

4.3.2.1.1. IDENTIFICAÇÃO

A identificação corresponde às informações relativas ao tipo, estado geral, origem e idade dos resíduos. A determinação do tipo de resíduo sólido realiza-se visualmente segundo os seguintes critérios de avaliação:

- i) Tipo de Coleta (não se aplica ao resíduo sólido já depositado): caminhão transportador de resíduos sólidos, container, etc;
- ii) Gerador: residências privadas, comercial, indústrias, estações de tratamento, obras de construção;
- iii) Estrutura: mistura de resíduo sólido urbano, lama, fibras/folhas;
- iv) Componentes predominantes: solo, resíduo sólido urbano, efluente de estação de tratamento de esgoto.

O estado geral indica as propriedades do resíduo sólido referente ao tipo de tratamento (não tratado, reduzido, separado, pré-tratado) e ao local de retirada do material (coletor de resíduo sólido, área do aterro, área de pesquisa, área de pré-tratamento dos resíduos). Em geral, a determinação da idade dos resíduos não se aplica aos resíduos recém chegados em um aterro, mas sim aos resíduos já depositados. Em conjunto com os dados bioquímicos do material, define-se o tipo de ambiente que há na massa de resíduos sólidos estudada.

4.3.2.1.2. ANÁLISE DOS CONSTITUINTES

A análise do grupo de constituintes (classificação/separação) é o instrumento mais importante para a descrição e mais tarde classificação dos resíduos sólidos. Neste estudo, a não homogeneidade do resíduo sólido é indicada através da análise da amostra em vários grupos, estes com propriedades específicas.

A análise dos constituintes, mais conhecida no Brasil como composição gravimétrica, para classificação dos resíduos sólidos investigados na Alemanha foi feita por meio da GDA-EMPFEHLUNGEN E 1-7 (1997 - Recomendações da Sociedade Alemã de Geotecnia). Pelo fato de não ser viável uma extensa separação de uma determinada amostra de resíduo sólido, admite-se grupos menores de materiais constituintes, os quais são quantificados por meio de peneiramento. Para a separação, os constituintes dos resíduos são classificados em 10 grupos distintos: papel/papelão, plástico (mole), plástico (duro), metal, mineral, madeira, material orgânico, lodo e resto. Os plásticos de característica mole compõem-se dos resíduos constituídos de materiais sintéticos moles ou de materiais cujas propriedades são dominadas por componentes, tais como sacos de leite, folhas sintéticas, borrachas, couro mole, têxtil, dentre outros. Os plásticos duros constituem-se de material sintético duro, como por exemplo, embalagens, assoalho, couro duro. Dentre os materiais que são denominados minerais estão o vidro, a cerâmica e solo (pedras). O resto é dividido em dois tipos, cujo tamanho das partículas situam-se: i) 8 – 40 mm e ii) = 8 mm. O equipamento utilizado para peneiramento tem dimensões de 1,5 x 1,5 m, com peneiras de aberturas 120 mm, 40 mm e 8 mm (Foto IV.5). Na peneira = 40 mm, o material retido é separado manualmente segundo os grupos constituintes e pesado em massa úmida. O material atravessado nas peneiras 40 mm e 8 mm

Embora não seja procedida a identificação dos constituintes de amostras de resíduos sólidos, cujas dimensões sejam inferiores a 40 mm, conforme GDA-EMPFEHLUNGEN E 1-7 (1997), foram realizados nesta pesquisa ensaios para a identificação dos grupos constituintes das amostras de resíduos sólidos utilizadas nos ensaios de resistência, as quais possuíam dimensões de partículas inferiores a 30 e 40 mm, respectivamente dos resíduos sólidos velho (Aterro de Ihlenberg) e pré-tratados mecânica e biologicamente (Aterro de Buchen).

4.3.2.1.3. DESCRIÇÃO DO ESTADO

Após a conclusão da análise do grupo de constituintes realizam-se as análises de descrição do estado dos resíduos. Neste estudo, os parâmetros químicos, físicos e biológicos dos demais constituintes são investigados e descritos. Estes parâmetros podem ser significativos para a compreensão do comportamento mecânico dos resíduos sólidos, dentre eles destacam-se forma e dimensões dos constituintes, teor de umidade, estabilidade bioquímica, composição química e curva de distribuição das partículas. Nesta pesquisa não foi objeto de estudo a determinação da estabilidade bioquímica e composição química das amostras de resíduos sólidos.

1) Forma dos Constituintes

Os grupos dos constituintes dos resíduos sólidos devem ser descritos não apenas pelo tamanho de seus componentes, mas também pela sua forma geométrica. A determinação da forma dos constituintes dos resíduos sólidos é conduzida segundo GDA-EMPFEHLUNGEN E 1-7 (1997), cuja descrição geométrica dos grupos está definida abaixo:

i) Dimensões

- Dim 0: Grão (nenhum lado comprido, ou seja, $\emptyset = 40$ mm)
- Dim 1: Fibra (um lado comprido, comparado aos outros lados)
- Dim 2: Folha (dois lados compridos, comparados ao terceiro lado)
- Dim 3: Caixa (3 lados compridos)

A determinação da dimensão efetua-se por meio de separação manual. Os grupos lodo e resto ($\emptyset = 40$ mm) não são analisados em termos de dimensões. A fração dos constituintes de uma determinada dimensão é dada com base no seu peso ou no peso total, ambos em

termos de substância seca. Embora este tipo de análise não seja realizado para resíduos cujo tamanho de partículas seja inferior a 40 mm, foi conduzido nesta pesquisa ensaio em amostras de resíduos sólidos pré-tratados do Aterro de Buchen ($\varnothing = 40$ mm). ZIEHMANN (2002) também analisou a forma dos constituintes de amostras de resíduos sólidos deste mesmo aterro, com igual tamanho das partículas.

II) Distribuição das Partículas

A distribuição das partículas foi determinada de acordo com a DIN 18123. Antes do peneiramento, as amostras foram secas em forno à temperatura de 105 °C durante 24 horas. As seguintes peneiras foram utilizadas:

- i) Material original do aterro: 500; 120; 40; 8 e 1 mm;
- ii) Material utilizado para ensaios de resistência em equipamento de cisalhamento direto de 300 x 300 x 150 mm: 31,5; 16; 8; 4; 2; 1 e 0,63 mm (resíduos velhos – Aterro de Ihlenberg) e 70; 60; 40; 25 e 8 mm (resíduos pré-tratados - Aterro de Buchen).

III) Teor de Umidade

O teor de umidade dos resíduos sólidos investigados foi determinado pelo método de base úmida, o mais comumente utilizado em resíduos sólidos, conforme a norma alemã DIN 18121-1. No Brasil, emprega-se a norma NBR 6457 (Preparação para ensaios de caracterização) na determinação da umidade de resíduos sólidos.

Uma quantidade representativa da amostra de resíduo sólido é pesada e em seguida levada a uma estufa a 105°C por, no mínimo, 24 horas. Após a estabilização do peso, o material é resfriado em um dessecador a vácuo, e posteriormente pesado. A determinação do teor de umidade é feita em termos do peso úmido do material.

IV) Teor de Sólidos Voláteis

A determinação do teor de sólidos voláteis das amostras de resíduos sólidos foi conduzida segundo WHO (1979). O método consistiu em acondicionar cerca de 5g de amostra do resíduo em um cadinho de porcelana e posteriormente colocá-lo em uma estufa para secagem em temperatura entre 60 e 65 °C. O conjunto é levado depois a uma mufla, cuja temperatura é de 550°C, por no mínimo 2 horas, e em seguida resfriado em um dessecador a

vácuo, para ser então determinado o peso seco do material. O valor do teor de sólidos voláteis (SV) dos resíduos foi determinado em porcentagem segundo a Equação (1).

$$SV (\%) = \frac{\textit{peso inicial} - \textit{peso final}}{\textit{peso inicial}} \cdot 100 \quad \text{Equação (1)}$$

O conhecimento do teor de umidade e da matéria orgânica (sólidos voláteis) presente em um aterro de resíduos sólidos urbanos é de fundamental importância para o acompanhamento do processo de decomposição dos resíduos, o qual afeta as suas propriedades. A umidade estabelece boas condições ou não para a biodegradação, e a determinação dos sólidos voláteis expressa se essa decomposição ocorreu ou se está em fase inicial. Estes teores variam significativamente entre um ponto e outro, visto que o resíduo sólido é um material bastante heterogêneo, tornando-se necessária a obtenção do perfil destes parâmetros ao longo da profundidade.

4.3.2.1.4. COMPACTAÇÃO

Os ensaios de compactação foram executados segundo a norma alemã DIN 18127 (no Brasil equivale a NBR 7182) em cilindros de compactação com diâmetro de 150 mm (para as amostras de resíduos sólidos com componentes de dimensões inferiores a 8 mm) e 250 mm (para as amostras de resíduos sólidos com componentes de dimensões inferiores a 30 e 40 mm). O cilindro de 250 mm foi escolhido para conduzir os ensaios de compactação nas amostras de resíduos sólidos cujas dimensões eram inferiores a 30 ou 40 mm, com objetivo de minimizar a influência do tamanho do material nos resultados. A Foto IV.6 apresenta os dois cilindros utilizados para a realização dos ensaios de compactação.

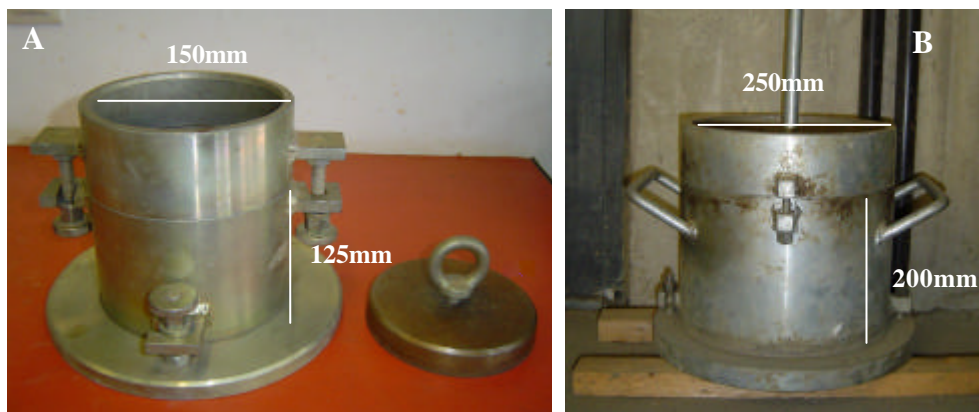


Foto IV.6 – Cilindros de compactação. A) 150 mm. B) 250 mm.

Para cada ensaio foram necessários cerca de 3-4 kg (amostras $\varphi < 8$ mm) e 13-16 kg (amostras $\varphi < 30$ e 40 mm), em peso úmido, para as amostras dos resíduos sólidos. Os corpos de prova foram utilizados uma única vez, a fim de evitar que as propriedades do material fossem alteradas por causa dos esforços de compactação, ou seja, a reutilização de mesma amostra do resíduo para a realização de um ponto adicional da curva de compactação poderia conduzir a um falseamento do peso específico do material. Foram determinados no mínimo 05 (cinco) pontos da curva de compactação em diferentes teores de umidade. O peso específico seco das amostras de resíduos sólidos foi determinado em função da base úmida do material.

A Foto IV.7 apresenta algumas amostras de resíduos sólidos após os ensaios de compactação. As Fotos IV.7A e C correspondem às amostras do resíduo sólido velho, respectivamente com dimensões inferiores a 8 mm e 30 mm, na condição de teor de umidade no ramo úmido ($w = 30\%$), e as Fotos IV.7B e D representam as amostras do resíduo sólido velho ($\varphi < 30$ mm) e pré-tratado ($\varphi < 40$ mm) com teor de umidade próximo da condição ótima, $w = 23\%$ e $w = 35\%$, respectivamente.



Foto IV.7 – Amostras de resíduos sólidos após ensaio de compactação. A) Resíduo velho ($\varphi < 8$ mm; $w = 30\%$). B) Resíduo velho ($\varphi < 30$ mm; $w = 23\%$). C) Resíduo velho ($\varphi < 30$ mm; $w = 30\%$). D) Resíduo pré-tratado ($\varphi < 40$ mm; $w = 35\%$).

A Tabela IV.3 apresenta um resumo dos ensaios de compactação (Proctor) realizados em amostras de resíduos sólidos provenientes do Aterro de Ihlenberg, cujos resíduos são classificados como velho e bastante estabilizado (idade entre 12 e 15 anos), e do Aterro de Buchen, no qual são depositados resíduos sólidos que passam anteriormente por um processo de pré-tratamento mecânico e biológico (MBA “*Mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle*”; Resíduos pré-tratados mecânica e biologicamente).

Tabela IV.3 – Resumo dos ensaios de compactação - Proctor.

CILÍNDRRO DE COMPACTAÇÃO	MATERIAL	VARIAÇÃO	QUANTIDADE
150 mm	Resíduo sólido velho	Matriz básica	5
		Matriz básica reforçada	1
	Resíduo sólido MBA Pré-tratado	Matriz básica	1
250 mm	Resíduo sólido velho	Matriz composta (MR/MB = 3%)	5
		Matriz composta reforçada (MR/MB = 8%)	1
	Resíduo sólido MBA Pré-tratado	Matriz composta 1 (MR/MB = 20%)	5
		Matriz composta 2 (MR/MB = 10%)	1
TOTAL DE ENSAIOS			19

MR: Matriz de reforço. MB: Matriz básica.

4.3.2.2. ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Para o estudo da resistência dos resíduos sólidos investigados nesta pesquisa, foi conduzida uma série de ensaios de cisalhamento direto em equipamento convencional (pequena escala) e equipamento de maiores dimensões (média escala) no Instituto Leichtweiss, Alemanha. A descrição dos equipamentos e procedimentos de ensaios é mostrada, para cada caso separadamente. Uma descrição das amostras de resíduos sólidos dos aterros de Ihlenberg (resíduo velho) e Buchen (resíduo pré-tratado) usadas nos ensaios também é feita seguir.

4.3.2.2.1. EQUIPAMENTO CONVENCIONAL

Nos ensaios de resistência de pequena escala foi utilizada uma caixa de cisalhamento direto, com seção de 10.000 mm² (100 x 100 mm) e altura de corpo de prova de aproximadamente 30 mm. A caixa é constituída de duas partes, uma parte inferior fixa que contém aproximadamente a metade da amostra, e uma parte superior móvel, a qual contém a

metade restante. Duas pedras porosas, uma localizada superior e outra inferior ao corpo de prova, permitem a drenagem livre de amostras saturadas. A parte superior (móvel) possui um elemento, no qual é possível a aplicação de uma carga horizontal no plano de separação das duas peças, provocando desta forma, a ruptura do corpo de prova ao longo deste plano bem definido. A aplicação da carga vertical é efetuada na parte superior da caixa de cisalhamento, proporcionando uma tensão normal ao plano de ruptura, S_N , com sistemas de cargas através de pesos em pendural. Os extensômetros (sensibilidade de 0,01mm) adicionados ao equipamento fornecem as medidas correspondentes aos deslocamentos da amostra na direção vertical e horizontal. A medição dos deslocamentos vertical e horizontal foi realizada manualmente, por não haver um sistema de aquisição de dados acoplado ao equipamento. Em função da construção do referido equipamento, não foi possível a medição do deslocamento vertical durante a fase de cisalhamento, tendo sido medido apenas durante o adensamento.

Neste tipo de ensaio são obtidas as curvas tensão cisalhante (t) versus deslocamento horizontal (Δh), para uma determinada tensão normal (S_N), a envoltória de ruptura do material, e a partir desta envoltória é possível determinar os parâmetros de resistência, como intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) do material. Os ensaios foram conduzidos sob condição drenada de acordo com a norma alemã DIN 18137-3. A Foto IV.8 apresenta o equipamento convencional de cisalhamento direto utilizado nos ensaios de resistência. Como havia três caixas de cisalhamento direto, era possível montar três corpos de prova para a fase de adensamento. A fase de cisalhamento era conduzida por apenas um motor, que era posicionado na direção de cada caixa.

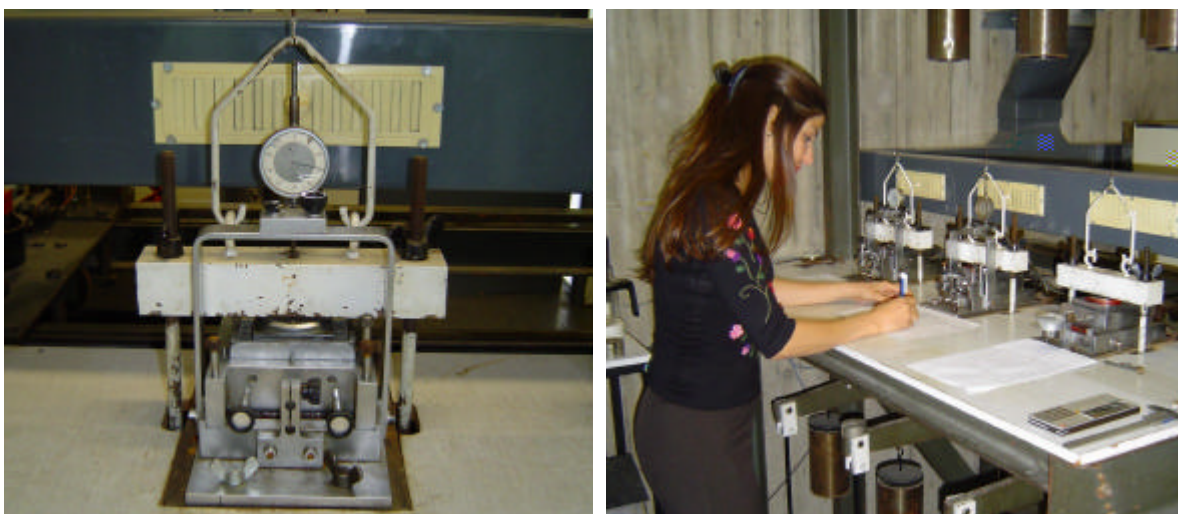


Foto IV.8 – Caixa de cisalhamento direto convencional.

As tensões normais aplicadas nos ensaios de cisalhamento foram 100, 200, 300 e 500 kN/m², neste último caso para as amostras com inclusão de fibras. Em cargas mais elevadas há uma melhor ancoragem do reforço e conseqüentemente ativam-se as propriedades de tração das fibras. A fase adensamento durou cerca 48 a 72 horas, dependendo da tensão normal, a qual era aplicada na amostra. Com a finalidade de garantir a drenagem de água, eliminado desta forma a geração de poro-pressão durante a fase de cisalhamento, e obtendo-se assim os parâmetros de resistência em termos efetivos, foi escolhida a velocidade de 0,05 mm/min (3 mm/h) para os ensaios de resistência em amostras de resíduos sólidos. A velocidade de cisalhamento usada nos ensaios está dentro da faixa recomendada por SCHULTZE & MUHS (1967). Um resumo dos ensaios de resistência executados no equipamento convencional está apresentado na Tabela IV.4.

Tabela IV.4 – Série de ensaios de cisalhamento direto convencional – Resíduos sólidos.

MATERIAL	VARIAÇÃO	CONDIÇÃO DA UMIDADE	QUANTIDADE DE ENSAIOS
RSU VELHO Aterro de Ihlenberg	Matriz básica	Ótima	3
		Ramo Úmido	3
	Matriz básica reforçada (MR/MB = 3,5%)	Ótima	4
		Ramo Úmido	4
TOTAL DE ENSAIOS			14

MR: Matriz de reforço. MB: Matriz básica.

4.3.2.2.1.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras de RSU utilizadas para os ensaios de resistência com equipamento convencional foram obtidas do Aterro Sanitário de Ihlenberg, Alemanha. O local onde está situado o aterro possui área total de 165 hectares, sendo 113 hectares destinados à construção da massa de resíduos sólidos. Pode-se depositar diariamente cerca de 4.000 toneladas de resíduos sólidos, e por ano no máximo 1 milhão de toneladas. O aterro possibilita ainda para os próximos anos a deposição de aproximadamente 16 milhões de m³. As camadas de resíduos sólidos depositadas são intercaladas por camadas de solo, que são dispostas em determinadas fases de construção do corpo de resíduos sólidos. Após atingir a altura de projeto, a camada de cobertura superficial é disposta, seguida de cobertura vegetal. O gás produzido no aterro é reaproveitado energeticamente. O chorume é tratado em estação localizada no próprio local do aterro. Uma vista do aterro sanitário de Ihlenberg está apresentada na Foto IV.9.



Foto IV.9 – Vista do Aterro Sanitário de Ihlenberg – Alemanha.

As amostras de resíduos sólidos investigadas possuíam idade entre 12 a 15 anos, consistindo de resíduos sólidos velhos, praticamente estabilizados. Para os ensaios de resistência em equipamento de cisalhamento direto convencional, os corpos de prova foram constituídos de partículas com dimensões inferiores a 8 mm, que corresponde a 60 % do material constituinte do resíduo sólido de Ihlenberg, no local onde foram retiradas as amostras. Os corpos de prova com tamanho inferior a 8 mm foram admitidos nesta pesquisa como a matriz básica dos resíduos sólidos. A matriz básica, ou seja, a matriz dos grãos é a responsável pelas propriedades de atrito do material. Estas amostras foram classificadas em 02 (dois) tipos diferentes para a realização de variações nos ensaios de resistência:

i) *Matriz Básica*: constituída pelas partículas de granulação fina a média que apresentam comportamento de atrito. Admite-se que neste material não são desenvolvidas tensões de tração ocasionadas por materiais fibrosos, embora haja em sua composição fibras (plásticos, madeira, têxtil, borracha) de curtas dimensões e em quantidade bastante pequena (menos que 2 %);

ii) *Matriz Básica Reforçada* ($MR/MB=3,5\%$): material composto pela matriz básica e inclusão de uma matriz de reforço, cujo teor de fibras adicionado à matriz básica foi de 3,5 %. As fibras foram distribuídas no material de forma aleatória.

As fibras adicionadas às amostras de resíduos sólidos consistiram de plásticos que foram obtidos dos próprios resíduos velhos do Aterro de Ihlenberg. Uma vista dos plásticos típicos destes resíduos é mostrada na Foto IV.10. A existência de furos em sua superfície evidencia o fato de se tratar de plásticos provenientes de resíduos velhos, com processo de degradação já bastante avançado, e devido também a danos mecânicos. A resistência à tração

destes plásticos não foi medida, porém verificou-se que eles eram mais facilmente rasgados quando comparados com plásticos novos. Os plásticos foram cortados manualmente com tesoura em largura de 5-10 mm e comprimento de 15-30 mm. O teor de fibras foi calculado em função do peso seco da amostra. As misturas (resíduos sólidos + fibras) foram realizadas manualmente, com os plásticos distribuídos aleatoriamente. A Foto IV.11 mostra uma seqüência da preparação destas amostras.

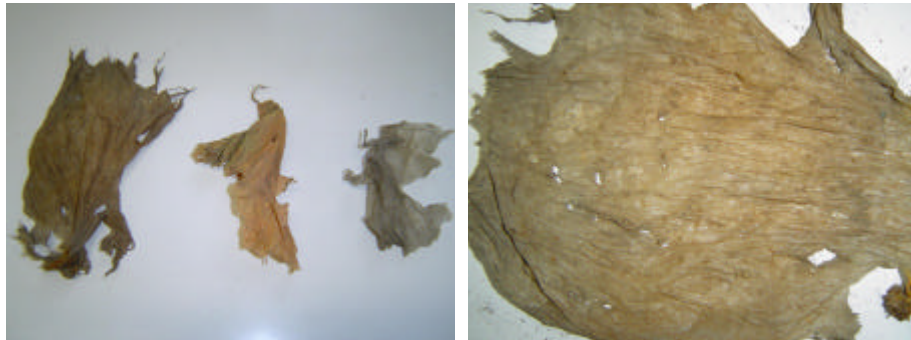


Foto IV.10 – Plásticos típicos dos resíduos velhos usados como elemento de reforço.

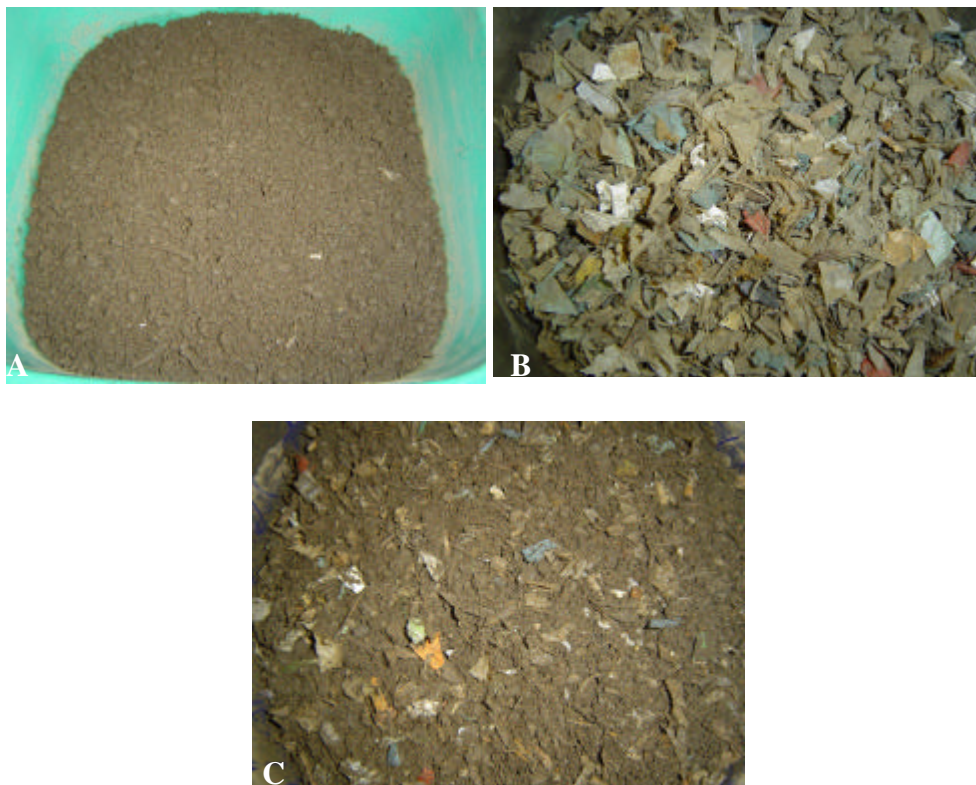


Foto IV.11 – Preparação das amostras de resíduos sólidos velhos + fibras. A) Amostra de resíduos sólidos (correspondente à matriz básica). B) Plásticos cortados. C) Mistura resíduo sólido-fibra (matriz básica reforçada).

Todos os corpos de prova, após preparados em função do teor de umidade ótima e para um determinado teor no ramo úmido da curva de compactação Proctor Normal, foram montados na caixa de cisalhamento, tendo sido compactados em uma única camada. Uma montagem direta dos corpos de prova do ensaio de compactação para a caixa de cisalhamento não foi possível pelo fato de não haver moldes compatíveis com as dimensões da amostra.

4.3.2.2.2. EQUIPAMENTO DE MAIORES DIMENSÕES

Ensaio de resistência em equipamento de cisalhamento direto de média escala foram conduzidos em amostras de resíduos sólidos urbanos. A caixa de cisalhamento direto possui seção de 90.000 mm^2 ($300 \times 300 \text{ mm}$) e altura total de 150 mm, Foto IV.12. O equipamento é composto de duas partes: a caixa inferior com altura de 60 mm e a superior com altura de 90 mm. Como o resíduo sólido é um material de alta compressibilidade, a caixa superior foi construída com altura maior para permitir que após a fase de adensamento a amostra atingisse altura equivalente em ambas as caixas, inferior e superior. A aplicação da força normal é conseguida através de um cilindro hidráulico. Um sistema de aplicação de pressão é utilizado para que o cilindro hidráulico forneça a força normal (Foto IV.13). A máxima força normal é dependente da máxima pressão hidráulica do cilindro, por exemplo, para uma pressão máxima de 200 bar corresponderia a uma tensão de cerca 1000 kN/m^2 . A força cisalhante é medida por meio de uma célula de carga, que pode medir no máximo cerca de 500 kN. Para a medição dos deslocamentos vertical (recalque) e horizontal (cisalhante) existem 02 (dois) dispositivos (sensores) de leitura automática, além de 02 (dois) extensômetros para a leitura manual dos deslocamentos vertical, os quais ficavam apoiados em posições opostas na tampa superior. A força horizontal (cisalhante), os deslocamentos vertical e horizontal, com exceção dos 02 (dois) extensômetros de leitura manual, são registrados diretamente em um sistema de aquisição automática de dados (*Datenlogger*, Foto IV.14).



Foto IV.12 – Caixa de cisalhamento direto de média escala (300 x 300 x 150 mm).

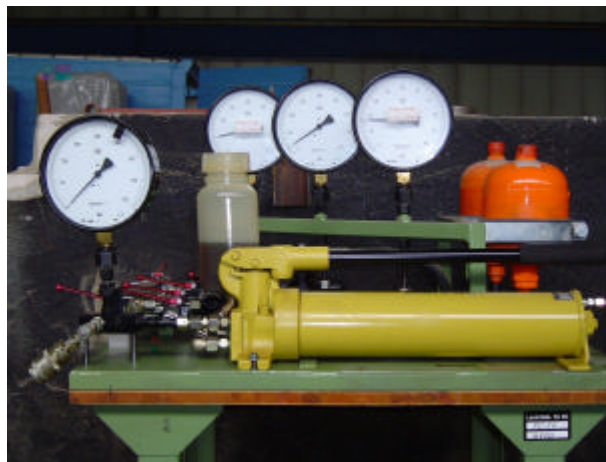


Foto IV.13 – Sistema de aplicação de carga normal.



Foto IV.14 – Sistema de aquisição automática de dados “Datenlogger” e dois dispositivos de medição (horizontal e vertical).

A fim de atender as recomendações da ASTM D 3080, o tamanho máximo das partículas das amostras foi admitido segundo a proporção: comprimento da caixa ≥ 12 vezes $\varnothing_{\text{máx}}$ das partículas constituintes do material. As amostras de resíduos sólidos foram montadas diretamente na caixa de cisalhamento, sendo compactadas na umidade ótima do ensaio Proctor. A Foto IV.15 mostra o processo de montagem de uma amostra, o aspecto da amostra durante este processo e após o ensaio de cisalhamento. As amostras foram compactadas em 3 (três) camadas, utilizando-se os martelos do Proctor (4,5 e 15 kg). Tomou-se o cuidado na escolha das alturas das 3 camadas, de tal forma que nenhuma divisão coincidissem com o plano de ruptura. A montagem da amostra em uma única vez foi inviável, pelo grande volume da amostra de resíduos sólidos. Para cada ensaio, foram necessários cerca de 14 a 20 kg, em termos de massa úmida, dependendo do tipo de material utilizado, ou seja, de amostras que possuíam dimensões de partículas inferiores a 8 mm, 30 mm ou 40 mm.

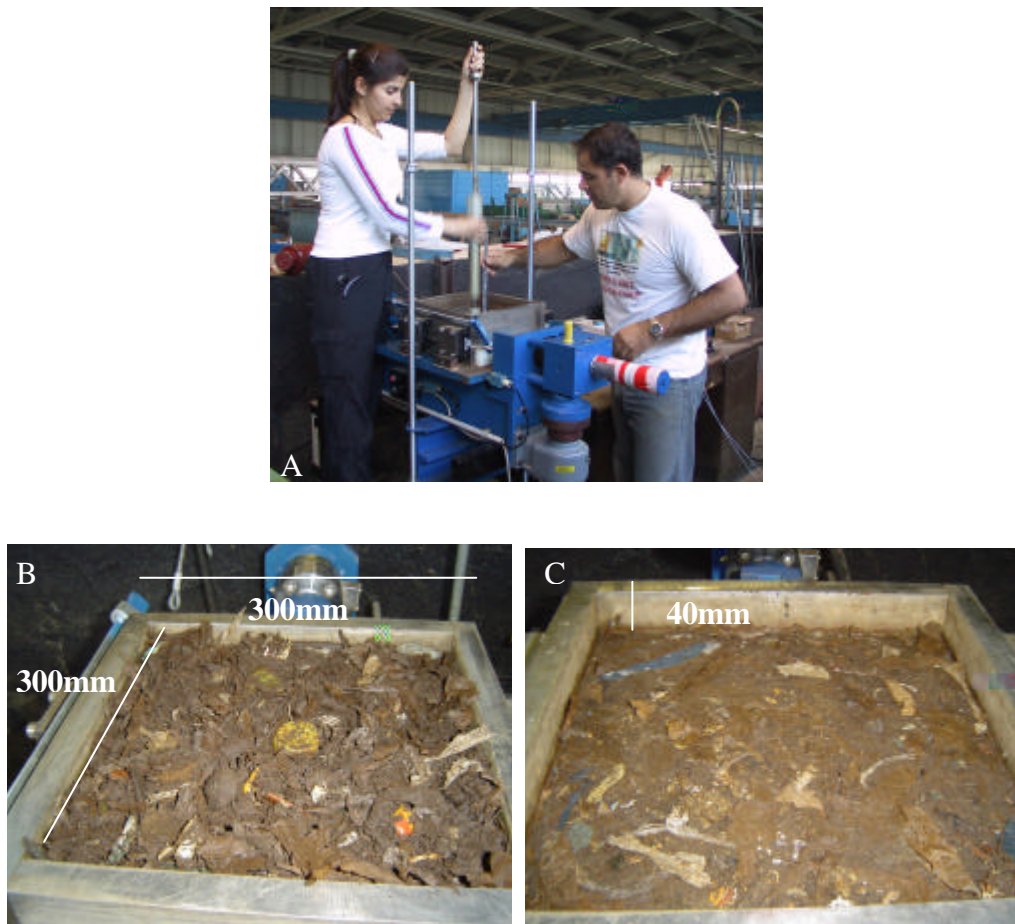


Foto IV.15 – A) Montagem da amostra na caixa de cisalhamento com ajuda de martelo do Proctor. B) Amostra de resíduos sólidos antes de ser compactada. C) Amostra de resíduos sólidos no final de ensaio de cisalhamento.

Para permitir a drenagem durante os ensaios, foram utilizadas duas placas perfuradas na parte inferior e superior da amostra. Entre as caixas de cisalhamento, na direção do deslocamento horizontal, foram colocadas tiras de folhas plásticas para evitar áreas de atrito entre as mesmas, embora houvesse espaço livre entre as caixas, Foto IV.16.

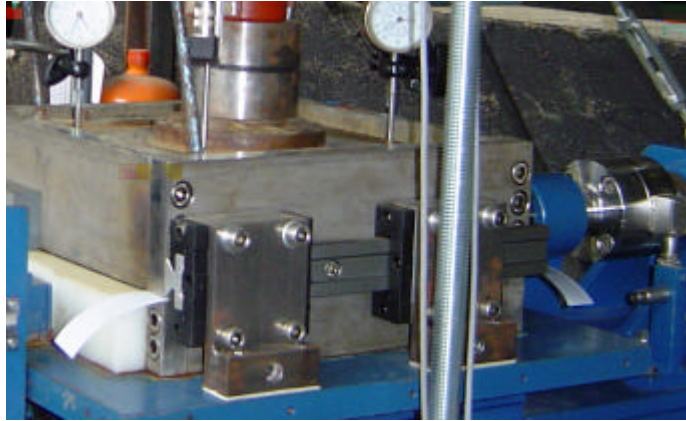


Foto IV.16 – Tira de folha plástica entre as partes inferior e superior da caixa de cisalhamento.

Na fase de adensamento, os 02 (dois) sensores automáticos de leitura e os 02 (dois) extensômetros de leitura manual eram colocados na tampa superior, posicionados respectivamente nas 04 (quatro) quinas, para a medição dos recalques. As amostras de resíduos sólidos foram deixadas durante 48 horas para a fase de adensamento, com exceção dos ensaios cuja tensão normal foi de 300 kN/m^2 , quando era necessário um período mínimo de 72 horas até que as deformações se estabilizassem. Após a fase de adensamento, dava-se início ao cisalhamento do corpo de prova, utilizando-se uma velocidade cisalhante de $0,05 \text{ mm/min}$. Esta mesma velocidade também foi utilizada nos ensaios de cisalhamento de pequena escala (convencional), o que permite uma comparação dos resultados.

Ensaio para calibração do equipamento como um todo foram conduzidos, tanto para a situação em que não havia corpo de prova, como também para o caso de solo (areia). Os ensaios sem amostra determinaram um valor de 5 kN/m^2 , decorrente do equipamento de cisalhamento vazio, e que foi levado em consideração quando da realização dos ensaios com resíduos sólidos, ou seja, os valores de tensão cisalhante medidos foram reduzidos em 5 kN/m^2 . Os ensaios com areia foram executados para determinar os parâmetros de resistência de um material conhecido, e assim verificar a confiabilidade dos dados obtidos neste equipamento.

A Tabela IV.5 mostra um resumo dos ensaios de resistência executados no equipamento de cisalhamento direto de maiores dimensões em amostras de resíduos sólidos urbanos dos aterros de Ihlenberg (resíduo velho) e Buchen (resíduo pré-tratado). As tensões normais aplicadas foram 50, 100, 200 e 300 kN/m². Na realidade, foram realizados mais que 17 ensaios no total, pois algumas repetições se fizeram necessárias para confiabilidade dos resultados obtidos.

Tabela IV.5 – Série de ensaios de cisalhamento direto de maiores dimensões – Resíduos sólidos.

MATERIAL	VARIAÇÃO	TENSÃO NORMAL (kN/m ²)	QUANTIDADE DE ENSAIOS
RSU VELHO Aterro de Ihlenberg	Matriz básica	50, 100, 200	3
	Matriz composta (MR/MB = 3%)	50, 100, 200 e 300	4
	Matriz composta reforçada (MR/MB = 8%)	50, 100, 200 e 300	4
RSU MBA PRÉ-TRATADO Aterro de Buchen	Matriz composta 1 (MR/MB = 20%)	100, 200 e 300	3
	Matriz composta 2 (MR/MB = 10%)	100, 200 e 300	3
TOTAL DE ENSAIOS			17

MR: Matriz de reforço. MB: Matriz básica.

4.3.2.2.2.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Resíduos Sólidos do Aterro de Ihlenberg

As amostras de RSU utilizadas para os ensaios de resistência com equipamento de maiores dimensões foram obtidas também do Aterro de Ihlenberg, com resíduos depositados há 12-15 anos, caracterizando-se como resíduo sólido velho, degradado. Os materiais investigados foram classificados em 03 (três) tipos diferentes:

i) Matriz Básica: constituída pelas partículas de granulação fina a média (partículas inferiores a 8 mm), a qual é responsável pelas propriedades de atrito. Representa aproximadamente 60 % do material constituinte destes resíduos. Este material também foi investigado no equipamento de cisalhamento convencional, conforme item 4.3.2.2.1;

ii) Matriz Composta (MR/MB=3%): corresponde ao material resultante do peneiramento em 30 mm, representando cerca de 85% do material constituinte, apresentando não apenas comportamento de atrito, mas também tendo a contribuição das fibras naturalmente

existentes, ou seja, da matriz de reforço. A porcentagem de fibras existente no material peneirado (dimensão das partículas < 30 mm) não ultrapassa o valor de 3 %;

iii) *Matriz Composta Reforçada (MR/MB=8%)*: material constituído pela matriz composta (dimensão das partículas < 30 mm) e a inclusão de mais 5 % de fibras plásticas, distribuída de forma aleatória na amostra, totalizando assim 8 % de material de reforço.

As fibras adicionadas para a composição da matriz composta reforçada dos resíduos velhos foram obtidas de plásticos moles e têxteis dos resíduos sólidos do Aterro de Buchen, cujo material consiste num resíduo sólido pré-tratado mecânica e biologicamente (MBA). Os resíduos pré-tratados foram peneirados entre as peneiras 20 mm e 40 mm, sendo o material proveniente deste peneiramento reservado e posteriormente realizada a separação manual das fibras nele existentes. Os resíduos pré-tratados foram selecionados para a aquisição das fibras pelo fato de haver em bastante quantidade, ao contrário dos resíduos velhos investigados nesta pesquisa, os quais são carentes de fibras.

A Foto IV.17 ilustra as amostras de resíduos sólidos velhos utilizadas nos ensaios de maiores dimensões, respectivamente, a matriz básica (A), matriz composta (B) e matriz composta reforçada (C). Uma descrição mais detalhada destes resíduos, ou seja, a sua caracterização está apresentada no Capítulo V.

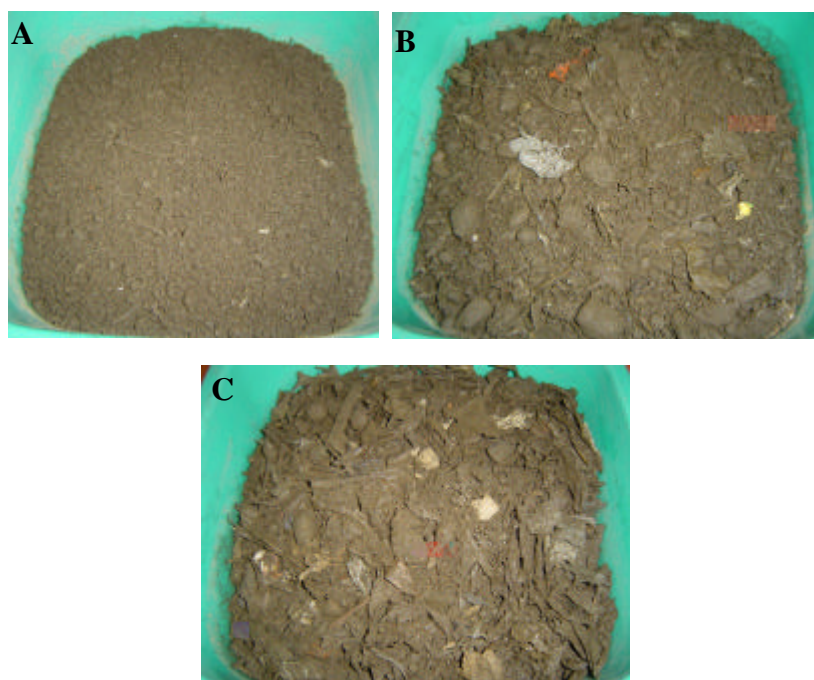


Foto IV.17 – Amostras de resíduos sólidos velhos (Aterro de Ihlenberg). A) Matriz básica. B) Matriz composta ($MR/MB = 3\%$). C) Matriz composta reforçada ($MR/MB = 8\%$).

Resíduos Sólidos do Aterro de Buchen

Os resíduos depositados no Aterro Sanitário de Buchen, Alemanha, consistem em resíduos sólidos urbanos que passaram por um processo de pré-tratamento mecânico e biológico. Inicialmente, os resíduos passam por um processo mecânico, onde há a separação de materiais de maiores volumes ($\varnothing > 140$ mm), havendo o reaproveitamento dos materiais recicláveis (metais, vidros, baterias, plásticos, papéis, papelão, dentre outros), com o objetivo de preparar o resíduo restante ($\varnothing < 140$ mm) para o processo biológico. Processos tais como a homogeneização, moagem, aglomeração, classificação, separação e o peneiramento servem para otimizar a degradação dos resíduos remanescentes através do aumento da superfície de contato. O tratamento biológico tem o objetivo de estabilizar o resíduo sólido bruto através da degradação da matéria orgânica existente. O grau de degradação da fração orgânica dependerá da composição do resíduo, do método e duração do tratamento aplicado. O tratamento biológico utilizado em Buchen é conduzido inicialmente através da percolação dos resíduos em um reator, seguida da digestão anaeróbia do líquido após a percolação, e do pós-tratamento aeróbio do resíduo sólido percolado (por exemplo, através de estabilização biológica). Destes procedimentos são gerados CO_2 , águas residuárias, biogás e minerais, além dos resíduos sólidos percolados. A descrição e detalhamento destes processos estão em SANTEN (2003). Por fim, obtém-se um resíduo sólido estabilizado que é posteriormente disposto no aterro, em pilhas que podem permanecer estáticas ou revolvidas, com o auxílio de máquinas específicas, em diferentes períodos de tempo. Uma vista dos resíduos sólidos pré-tratados depositados em Buchen, que opera desde o ano de 2000, pode ser verificada na Foto IV.18.



Foto IV.18 – Vista dos resíduos sólidos (pré-tratados) depositados no Aterro Sanitário de Buchen - Alemanha.

Há uma tendência mundial, do uso de processos de pré-tratamentos térmicos ou mecânico-biológicos para a transformação do resíduo sólido, em virtude de se obter materiais mais inertes para a deposição. Na Europa há diversos processos utilizados, principalmente na Alemanha, Áustria e Suíça.

As amostras dos resíduos sólidos (pré-tratados) investigadas nesta pesquisa passaram por um processo de pré-tratamento que durou aproximadamente 12 a 15 semanas, e haviam sido aterradas desde fevereiro de 2004. Para o presente estudo de resistência, em equipamento de cisalhamento de maiores dimensões, as amostras estudadas foram classificadas em 03 (três) tipos diferentes:

i) *Matriz Básica*: constituída pelas partículas de granulação fina a média (partículas inferiores a 8 mm), a qual é responsável pelas propriedades de atrito. Representa cerca de 60 % do material constituinte destes resíduos;

ii) *Matriz Composta 1 (MR/MB=20%)*: corresponde ao material resultante do peneiramento, cujo tamanho das partículas é inferior a 40 mm, representando pouco mais de 90 % do material depositado no aterro. Tanto as propriedades de atrito como também as de reforço podem ser registradas no seu comportamento mecânico. O material peneirado em 40 mm apresentou em sua composição cerca de 20 % de fibras, dentre elas, folhas plásticas, têxteis, pedaços de madeira, fios.

iii) *Matriz Composta 2 (MR/MB=10%)*: este material provém do peneiramento dos resíduos sólidos em peneira de 40 mm, sendo reduzida a quantidade original de 20 % de materiais fibrosos para a porcentagem de 10 %. A redução das fibras foi feita por processo manual, sendo primeiramente a amostra peneirada em 8 mm e esta parcela reservada, a fim de facilitar o processo de separação das fibras. No material retido em 8 mm, retiravam-se as fibras plásticas, têxteis e fios do material. Após atingida a porcentagem de fibras desejada, a amostra com dimensões de partículas inferior a 8 mm era misturada ao material resultante da retirada de parte da matriz de reforço.

As amostras de resíduos sólidos pré-tratados utilizadas nos ensaios de maiores dimensões, respectivamente, a matriz básica, matriz composta 1 (*MR/MB=20%*) e composta 2

($MR/MB=10\%$), estão mostradas na Foto IV.19. No capítulo V está apresentada a caracterização destas amostras.

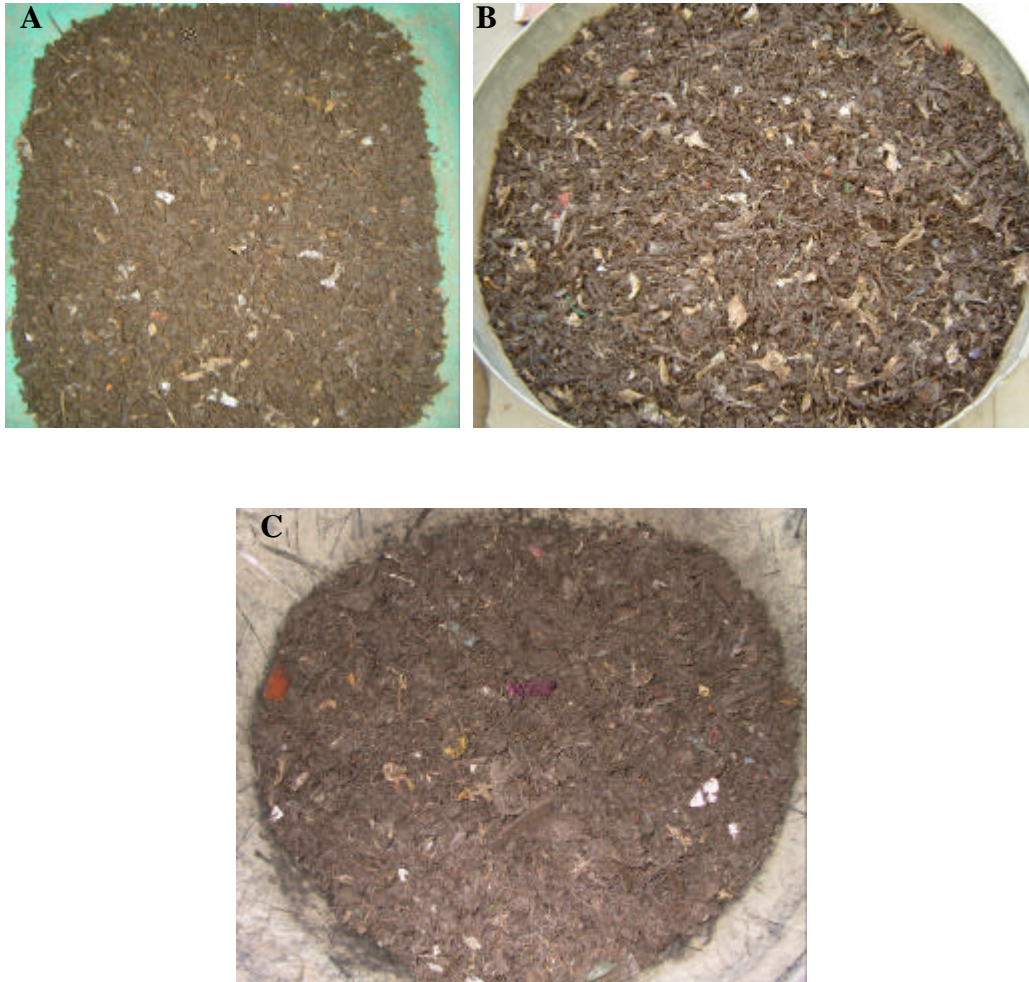


Foto IV.19 – Amostras dos resíduos sólidos pré-tratados (Aterro de Buchen). A) Matriz básica. B) Matriz composta 1 ($MR/MB = 20\%$). C) Matriz composta 2 ($MR/MB = 10\%$).

CAPÍTULO V

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo estão apresentados os resultados e as análises dos ensaios realizados em resíduos sólidos urbanos no laboratório do Instituto Leichtweiss da Universidade Técnica de Braunschweig – Alemanha, que consistiram: (I) ensaios de caracterização física dos resíduos sólidos (composição gravimétrica, distribuição do tamanho das partículas, compactação) e (II) ensaios de cisalhamento direto convencional (dimensões: 100 x 100 x 30 mm) e de maiores dimensões (300 x 300 x 150 mm). Serão apresentados inicialmente os ensaios executados em solo e solo reforçado, os quais serviram como base para o estudo do comportamento mecânico do resíduo sólido.

5.2. ENSAIOS EM AMOSTRAS DE SOLO E MISTURA SOLO-FIBRA

5.2.1. CARACTERIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO

Os resultados dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade (Tabela V.1) indicam que as amostras de argila apresentam limite de liquidez de 87,3 % e limite de plasticidade com valor de 32,7 %. O índice de plasticidade foi de 54,6 %. De acordo com a carta de plasticidade (Casagrande), a relação entre o limite de liquidez e índice de plasticidade localizou-se acima da Linha A, que consiste na reta definida por Casagrande, sugerindo que o solo consiste de uma argila de alta compressibilidade (CH).

Tabela V.1 – Propriedades da argila.

LIMITE DE LIQUIDEZ (%)	LIMITE DE PLASTICIDADE (%)	ÍNDICE DE PLASTICIDADE (%)	CLASSIFICAÇÃO (USCS)
87,3	32,7	54,6	CH

As curvas de compactação das amostras de argila não reforçadas e das amostras de argila reforçadas com as fibras geotécnicas (2%; fibras plásticas planares e curtas, de rigidez desprezível) estão apresentadas na Figura V.1. Os respectivos valores de teor de umidade e

peso específico, nos quais foram conduzidos os ensaios de resistência em todas as amostras utilizadas, estão indicados na Tabela V.2. As amostras de argila com reforço exibem curva de compactação semelhante ao das amostras de argila sem reforço, obtendo-se, porém, valores de peso específico seco menor. Esta redução deve-se à presença dos componentes plásticos. KOCKEL (1995) também verificou este tipo de redução no peso específico devido à inclusão da matriz de reforço em amostras de resíduos sólidos em relação à matriz básica.

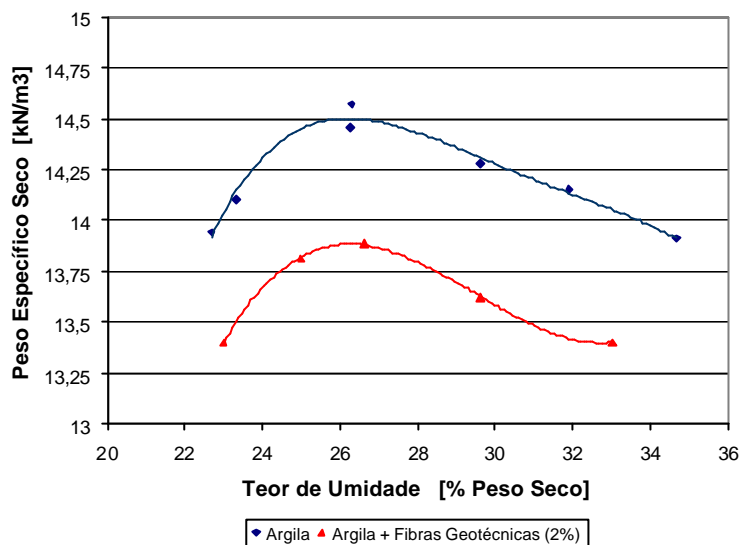


Figura V.1 – Resultados dos ensaios de compactação para amostras de argila e mistura argila-fibras geotécnicas (2%).

Tabela V.2 – Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal – Umidade ótima e ramo úmido – Argila, Argila + Fibras Geotécnicas (2%), Argila + Fibras de RSU (2%).

Material	Teor de Umidade (% Peso seco)	Peso Específico Úmido (kN/m ³)	Peso Específico Seco Máximo (kN/m ³)
Argila	26,3	18,3	14,5
	33,0	18,6	14,00
Argila + Fibras Geotécnicas (2%)	26,3	17,6	13,9
	33,0	17,8	13,4
Argila + Fibras de RSU (2%)	25,5	16,4	13,1

5.2.2. CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL

Os resultados dos ensaios de resistência, realizados em equipamento de cisalhamento direto convencional (pequenas dimensões), estão mostrados nas Figuras V.2, V.3 e V.4, com relação às curvas de tensão cisalhante ao longo do deslocamento horizontal das amostras de

argila e respectivas misturas argila-fibra (geotécnicas e de resíduo sólido), na condição de umidade ótima. Uma comparação entre as curvas dos três tipos de amostras investigadas, para cada tensão normal aplicada nos ensaios, pode ser vista na Figura V.5.

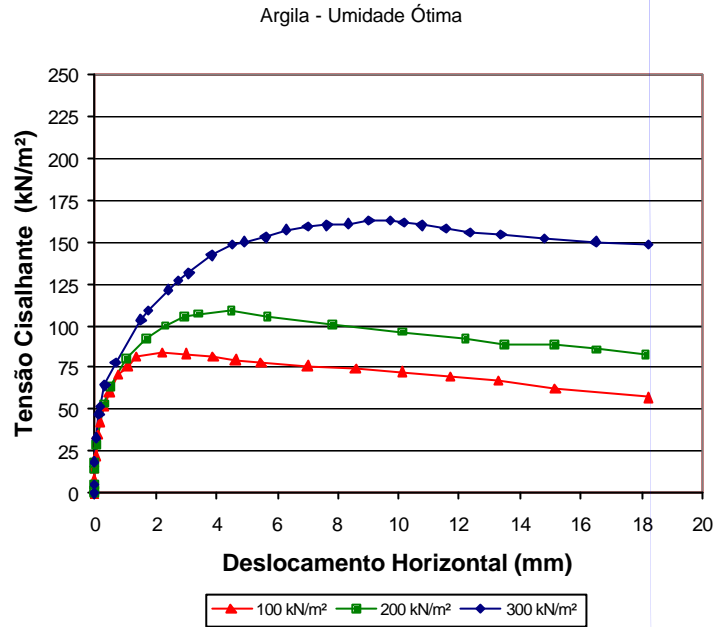
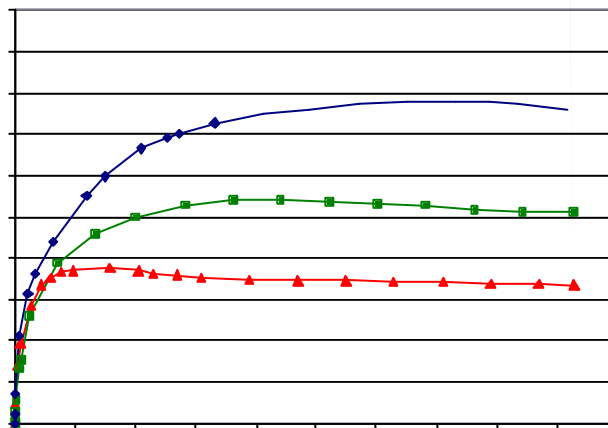
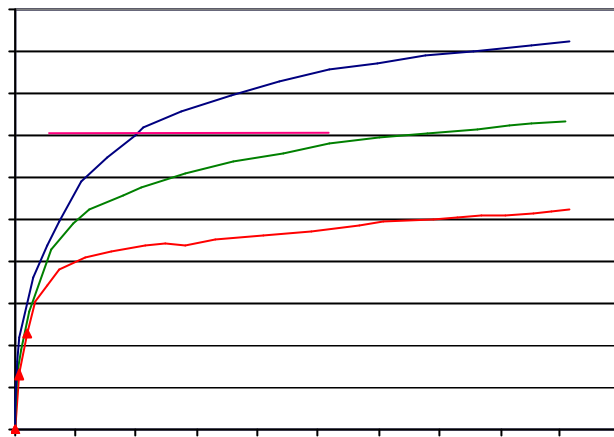


Figura V.2 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Argila – Umidade Ótima.





As curvas de resistência relativas às amostras de argila apresentam um acréscimo da tensão cisalhante até cerca de 2 mm de deslocamento horizontal ($\sigma_N = 100 \text{ kN/m}^2$), 4,5 mm ($\sigma_N = 200 \text{ kN/m}^2$), e na faixa de 8-10 mm para a tensão normal de 300 kN/m^2 . O máximo de resistência é atingido em todas as tensões normais, havendo posteriormente a redução da mesma até o final dos ensaios (Figura V.2). A adição de ambos os tipos de fibras causa um aumento da resistência, em todos os níveis de tensões normais, conforme se pode observar nas Figuras V.3 e V.4. No caso das amostras de argila reforçadas com resíduos sólidos, não foi alcançada a resistência máxima. Para atingir o máximo de resistência em ambos os materiais com reforço são necessários maiores deslocamentos horizontais das amostras comparados aos da amostra de argila sem reforço. Isto é uma característica marcante dos materiais reforçados, pois a ativação das fibras depende não somente da tensão normal aplicada, mas também dos níveis de deslocamento horizontal do material. Além disto, para níveis mais elevados de deslocamento horizontal, pode ser observada a redução da queda de resistência pós-pico para os materiais reforçados, neste caso para a argila reforçada por fibras geotécnicas. TEODORO & BUENO (1998) obtiveram também curvas com queda mínima de tensão pós-pico em ensaios com materiais reforçados, indicando que é um comportamento tensão-deformação do tipo elasto-plástico. No caso da argila reforçada com fibras de resíduo sólido não se verifica um comportamento de pico, as tensões cisalhantes crescem com o aumento do deslocamento horizontal sem atingir a ruptura (enrijecimento).

Quando se comparam as curvas de resistência dos três tipos de amostras na Figura V.5, verifica-se que para o início do deslocamento horizontal das amostras, o comportamento da tensão cisalhante é semelhante em todos os casos, pois até este momento as fibras dos materiais reforçados não haviam sido mobilizadas e a resistência era devida tão somente à parcela de atrito. Com o aumento dos deslocamentos horizontais, as curvas de resistência se diferenciam de comportamento, porque a mobilização das fibras inicia-se, causando um aumento da resistência para as amostras com fibras. A adição dos dois tipos de fibras aumentou a resistência de pico das amostras de argila, porém não na mesma proporção. Este aumento de resistência foi superior para o caso da argila misturada com fibras de resíduo sólido. É provável que as dimensões das fibras plásticas de resíduo sólido, por serem maiores que das fibras plásticas geotécnicas, principalmente no que tange ao comprimento, tenham sido a causa deste acréscimo maior na resistência.

As envoltórias de resistência de pico, para as amostras de argila e argila com fibras geotécnicas, e a envoltória de resistência para os níveis de deslocamento máximo das

amostras de argila com fibras de resíduo sólido estão apresentadas na Figura V.6. Os parâmetros de resistência, bem como os coeficientes de correlação (R

Na tentativa de avaliar a influência da variação de umidade na resistência do material, sem e com reforço, foram realizados ensaios de resistência em amostras de argila e argila reforçada com fibras geotécnicas (2%) para um teor de umidade no ramo úmido da curva de compactação, em torno de 33 %. As curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal da argila sem reforço nesta condição de umidade e a comparação das mesmas com as correspondentes no teor de umidade ótima (cerca 26 %) estão mostradas respectivamente nas Figuras V.7 e V.8. Já as curvas de resistência da argila com inclusão de fibras geotécnicas (2%), para a umidade no ramo úmido, e a comparação com os dados referentes à condição ótima do ensaio Proctor são mostradas nas Figuras V.9 e V.10, respectivamente.

A resistência máxima é atingida em todos os ensaios das amostras de argila sem e com reforço, para as tensões normais aplicadas de 100, 200 e 300 kN/m², na condição de teor de umidade de 33 %, segundo Figuras V.7 e V.9. O máximo da tensão cisalhante ocorre para deslocamentos em torno de 3 mm, ou seja, 3 % do comprimento das amostras de argila, e em torno de 4 - 6 % para as amostras de argila com reforço. O comportamento de pico é verificado em todas as curvas das amostras, com posterior queda da resistência ao longo dos deslocamentos. Pode-se observar que houve também uma redução da queda de resistência pós-ruptura para a argila com inclusão de fibras geotécnicas neste teor de umidade mais elevado (Figura V.7), quando comparada às amostras de argila, Figura V.9.

Nas Figuras V.8 e V.10 fica claro que o aumento no teor de umidade gerou um decréscimo da resistência das amostras de argila, com e sem reforço. A presença maior de água contribuiu para um quebra das ligações das partículas constituintes da argila, além do que no caso das amostras com reforço, o aumento de umidade prejudica as propriedades de tração das fibras. O aumento de cerca 7 % no teor de umidade das amostras de argila gerou uma redução na tensão cisalhante em média de 47 % para as tensões normais de 100, 200 e 300 kN/m², enquanto que com relação às amostras de argila com fibras geotécnicas esta redução foi em torno de 41 %.

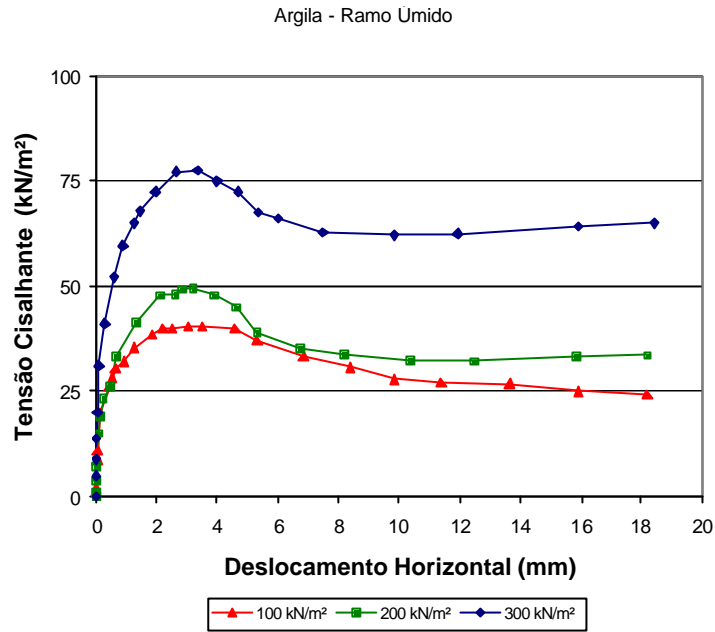


Figura V.7 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Argila – Ramo Úmido.

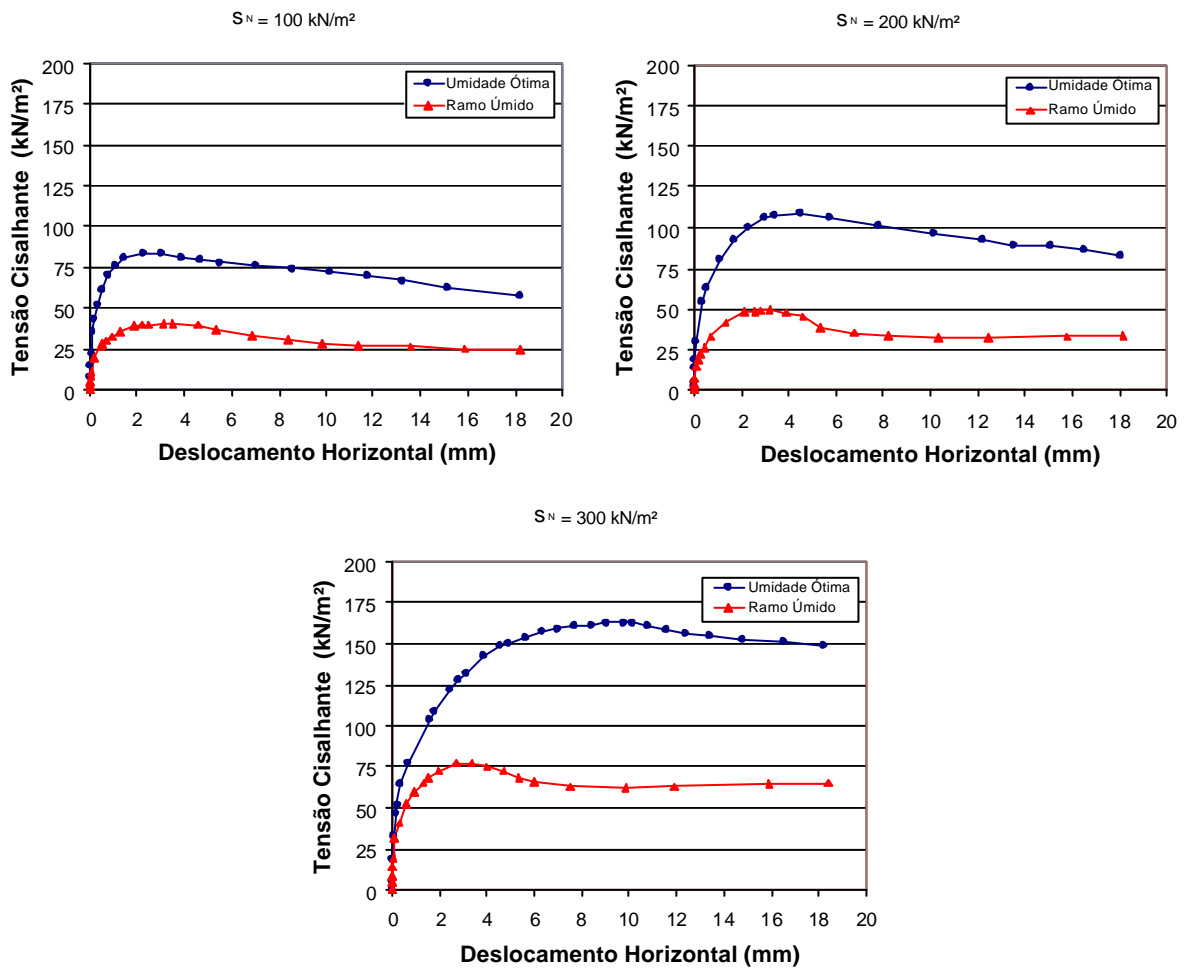
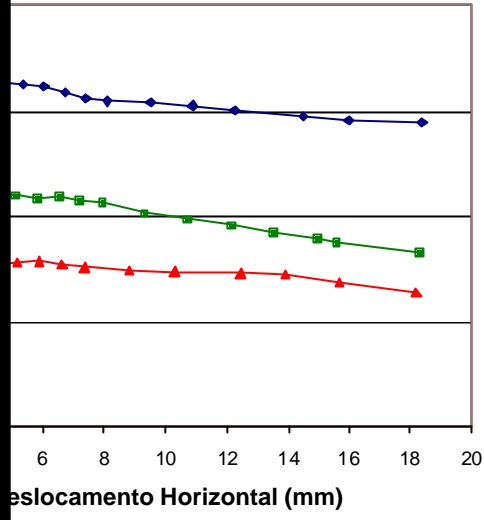


Figura V.8 – Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Argila – Umidade Ótima e Ramo Úmido.

Pruebas Geotécnicas (2 %) - Ramo Úmido



As envoltórias de resistência para as amostras de argila e mistura argila-fibra geotécnica, ambas preparadas para as duas condições de umidade (ótima e ramo úmido), estão na Figura V.11. Os parâmetros de resistência, bem como os coeficientes de correlação (R^2) e os dados antes e após ensaio, da argila sem e com reforço das fibras geotécnicas na condição de umidade de 33% são mostrados na Tabela V.4. Os parâmetros de resistência das amostras de argila, sem e com reforço, sofreram um decréscimo devido ao aumento de umidade. A coesão das amostras de argila sem reforço reduziu de aproximadamente 44 para 18,7 kN/m^2 , enquanto que o ângulo de atrito diminuiu de 19° para $10,2^\circ$. No caso das amostras de argila com reforço de fibras geotécnicas (2%), a coesão foi cerca de 51 kN/m^2 e ângulo de atrito $21,8^\circ$ para o teor de umidade ótima, e em torno de 15,7 kN/m^2 e $11,5^\circ$ devido ao aumento de umidade.

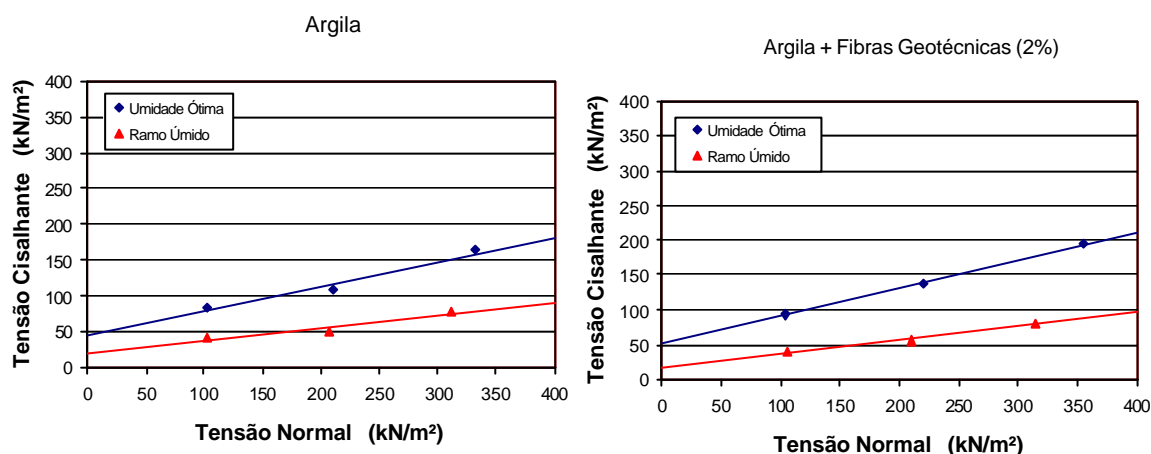


Figura 11 – Envoltórias de resistência para as amostras de argila e amostras de argila + fibras geotécnicas (2%) – Umidade Ótima e Ramo Úmido.

Tabela V.4 – Resumo dos parâmetros de resistência e dados de ensaio – Ramo Úmido.

MATERIAL	DADOS DE ENSAIO	s_N (kN/m^2)		
		100	200	300
Argila	$\gamma_{\text{úmido}}$ (kN/m^3)	18,62	18,62	18,62
	γ_{seco} (kN/m^3)	13,91	13,91	13,99
	w_{antes} (%)	33,39	33,39	33,08
	w_{depois} (%)	33,02	32,89	32,57
	c' (kN/m^2)	18,7		
	ϕ' ($^\circ$)	10,2		
	R^2	0,9223		
Argila + Fibras Geotécnicas (2%)	$\gamma_{\text{úmido}}$ (kN/m^3)	17,82	17,82	17,82
	γ_{seco} (kN/m^3)	13,38	13,38	13,41
	w_{antes} (%)	33,22	33,22	32,93
	w_{depois} (%)	32,96	32,55	32,14
	c' (kN/m^2)	15,7		
	ϕ' ($^\circ$)	11,5		
	R^2	0,9755		

5.3. ENSAIOS EM AMOSTRAS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os ensaios de resistência em amostras de resíduos sólidos urbanos dos aterros sanitários de Ihlenberg (resíduo velho) e Buchen (resíduo pré-tratado mecânica e biologicamente) foram realizados em equipamento de cisalhamento direto convencional e de grandes dimensões, conforme descritos no Capítulo IV. Ensaios para caracterização física dos resíduos sólidos foram executados para ambos os casos. A seguir estão apresentados os resultados destes ensaios.

5.3.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

5.3.1.1. ANÁLISE DOS CONSTITUINTES

Resíduos Sólidos Velhos (Aterro de Ihlenberg)

A distribuição dos constituintes (composição gravimétrica) dos resíduos sólidos velhos (Aterro de Ihlenberg) é apresentada na Figura V.12, enquanto que na Figura V.13 é mostrada a distribuição das amostras dos resíduos com tamanho de partículas inferior a 30 mm, denominada nesta pesquisa de matriz composta. No caso das amostras de resíduos sólidos, cujo tamanho de partículas foi inferior a 8 mm e que correspondem à matriz básica ou granular (definida assim nesta pesquisa), não foi realizada esta análise por se tratar de material com componentes bastante pequenos.

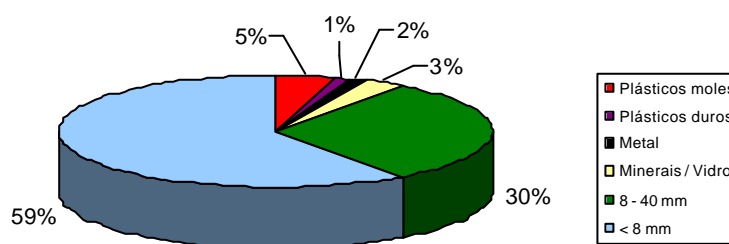


Figura V.12 – Distribuição dos constituintes dos resíduos velhos depositados no aterro.

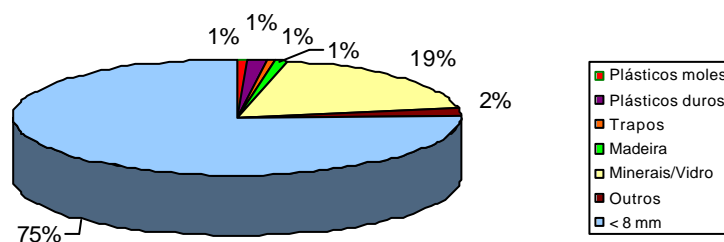


Figura V.13 - Distribuição dos constituintes da matriz composta (? < 30 mm) – Resíduos velhos.

Os resultados mostrados na Figura V.12 são típicos de resíduos antigos, onde não foram observados constituintes vegetais, e nenhuma quantidade de papel. A porcentagem de papel em resíduos velhos corresponde na Alemanha no máximo a 5 %. Nos resíduos velhos investigados nesta pesquisa, a quantidade de material com partículas de tamanho inferior a 40 mm é alta, cerca de 90 % em peso. Este valor está em conformidade com o que se observa em outros aterros de RSU velho, nos quais essas partículas correspondem em torno de 60 a 70 % do peso total. Esta grande quantidade de material com dimensões de partículas entre 8-40 mm e inferior a 8 mm é resultado do processo de degradação, além também neste caso da existência de solo em sua composição. A parcela correspondente ao material de dimensão inferior a 8 mm, denominada nesta pesquisa de matriz básica, representa quase 60 % dos resíduos sólidos depositados no Aterro de Ihlenberg. Os constituintes com características de reforço encontram-se na faixa de 6 %, sendo 5 % desta fração correspondente aos plásticos leves, moles. Cerca de 45 % dos constituintes de reforço provêm da fração 40-120 mm e os 55 % restantes correspondem à fração superior a 120 mm.

Em comparação aos resíduos sólidos depositados no aterro, a matriz composta ($\emptyset < 30\text{mm}$) destes resíduos apresenta um acréscimo dos constituintes de dimensão inferior a 8 mm, ou seja, da matriz básica, e dos constituintes minerais/vidro. Contudo, o peneiramento em 30 mm provocou uma redução dos constituintes de reforço, de 6 % para 3 %, conforme apresentado na Figura V.13.

Resíduos Sólidos Pré-tratados Mecânica e Biologicamente (Aterro de Buchen)

A distribuição dos constituintes (composição gravimétrica) dos resíduos sólidos que chegam ao Aterro de Buchen, antes de passarem pelo pré-tratamento mecânico e biológico, está apresentada na Figura V.14. Os ensaios realizados com o material do Aterro de Buchen utilizaram os resíduos após terem sido submetidos ao pré-tratamento, com partículas de no máximo 40 mm e 8 mm de dimensão. A Figura V.15 mostra a distribuição dos constituintes das amostras dos resíduos pré-tratados com $\emptyset < 40\text{ mm}$, que é denominada neste trabalho de matriz composta. Da mesma forma que no caso dos resíduos velhos, também não foram realizados este tipo de análise para as amostras com $\emptyset < 8\text{ mm}$.

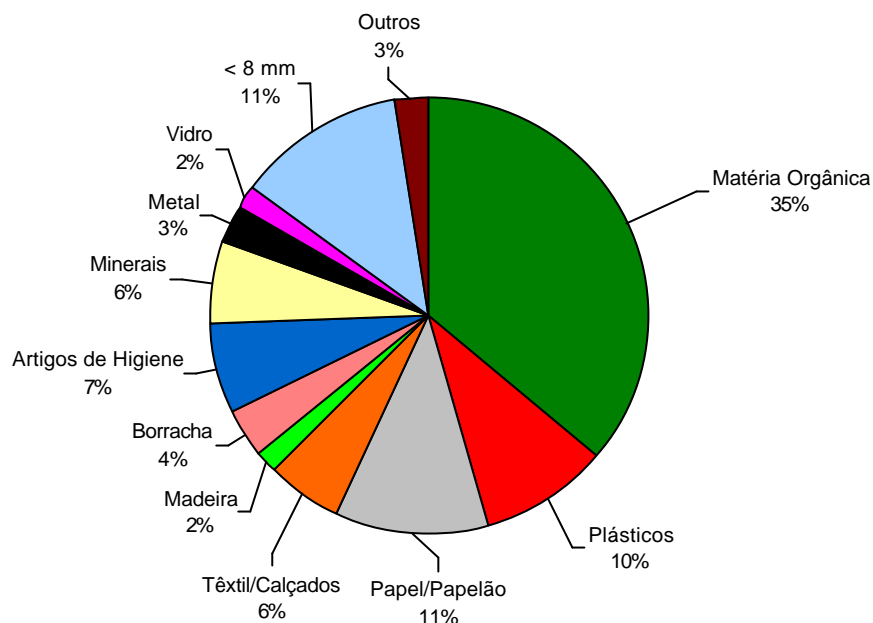


Figura V.14 – Distribuição dos constituintes dos RSU que chegam ao Aterro de Buchen antes do pré-tratamento mecânico-biológico.

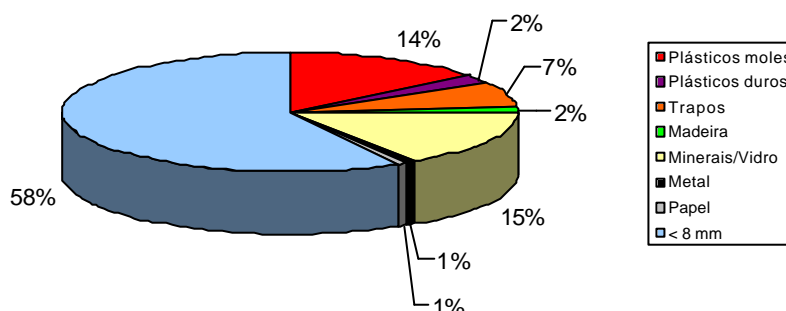


Figura V.15 - Distribuição dos constituintes da matriz composta ($\varnothing < 40$ mm) – Resíduos pré-tratados.

A maior parte constituinte dos resíduos sólidos que chega ao Aterro de Buchen corresponde à matéria orgânica, com 35 % (Figura V.14). Em seguida, com cerca 11 % e 10 % consistem as frações de papel/papelão e plásticos, respectivamente. A quantidade relativamente baixa de vidros pode ser justificada, pois quando houve a separação para os materiais inferiores a 20 mm, durante o processo de análise dos constituintes do resíduo sólido, não foram bem diferenciados os componentes entre vidros e minerais (pedra, louça, cerâmica). E assim, a fração de minerais deve ter provavelmente alguma contribuição da parcela de vidros. A parcela da fração fina ($\varnothing < 8$ mm) é de aproximadamente 11 %.

A Figura V.15 indica que o processo de peneiramento em 40 mm provocou um grande aumento na porcentagem da fração $\varnothing < 8$ mm, representando quase 60 % dos constituintes da amostra. A fração de plásticos e de têxteis (trapos) soma um valor pouco acima de 20 %, conferindo a esta amostra (matriz composta dos resíduos pré-tratados) uma quantidade de materiais de reforço superior à matriz composta dos resíduos velhos, que possui cerca de 3 %.

5.3.1.2. DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS

O conhecimento do tamanho das partículas constituintes dos resíduos sólidos é fundamental para as propriedades mecânicas, pois a redução do tamanho das mesmas em função de processos de peneiramento conduz a mudanças na sua resistência, e conseqüentemente tem efeito na construção de aterros. Como resultado tem-se muitas vezes menor resistência, mais baixa permeabilidade aos líquidos e um peso específico mais alto do material depositado.

Resíduos Sólidos Velhos (Aterro de Ihlenberg)

A curva de distribuição do tamanho das partículas típica dos resíduos sólidos depositados no Aterro de Ihlenberg está mostrada na Figura V.16, incluindo a curva correspondente ao material de dimensões inferiores a 30 mm (matriz composta). Os resíduos sólidos velhos depositados neste aterro são formados por uma mistura de materiais, os quais consistem em componentes de resíduo sólido urbano e solo. O alto teor de partículas finas é neste caso uma conseqüência do avançado processo de redução e degradação dos seus constituintes, cujos resíduos têm cerca de 12 a 15 anos de aterramento, além também da presença de solo misturado ao resíduo sólido no local de retirada das amostras. A distribuição do tamanho das partículas dos resíduos velhos mostra que a matriz básica ($\varnothing < 8$ mm) e composta ($\varnothing < 30$ mm) correspondem respectivamente a 60 % e 85 % do resíduo sólido original. Estas porcentagens demonstram que os materiais estudados nos ensaios de resistência desta pesquisa são relativamente representativos da massa total. A distribuição das partículas dos constituintes destes resíduos investigados apresenta semelhança quando comparada a resíduos sólidos pré- tratados mecânica e biologicamente, como por exemplo, os resíduos do Aterro de Buchen, apresentada a seguir.

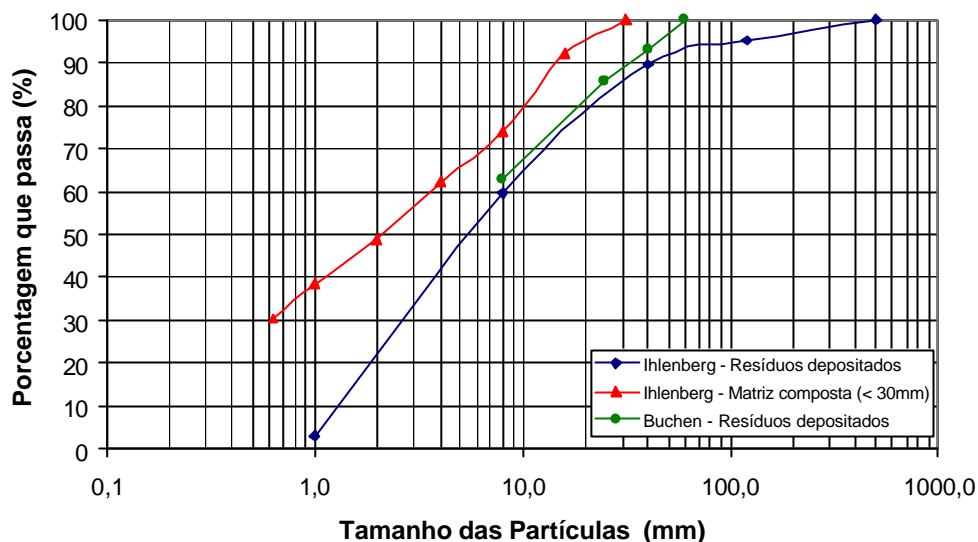


Figura V.16 – Distribuição do tamanho das partículas dos resíduos velhos (Aterro de Ihlenberg) e resíduos pré-tratados (Aterro de Buchen).

Resíduos Sólidos Pré-tratados Mecânica e Biologicamente (Aterro de Buchen)

A Figura V.16 mostra também a curva de distribuição do tamanho dos constituintes para a amostra dos resíduos sólidos pré-tratados depositados no Aterro de Buchen, os quais foram aterrados com um tamanho máximo de partículas inferior a 60 mm. Pouco mais de 60 % dos componentes apresentam tamanho de partículas inferior a 8 mm, já os componentes cujo tamanho é inferior a 40 mm representa um valor superior a 90 %. Estes valores indicam que tanto a matriz básica (? < 8 mm) quanto a matriz composta (? < 40 mm) compõem de forma significativa os resíduos sólidos pré-tratados investigados. De maneira semelhante ao observado nos resíduos velhos, há uma predominância de materiais com tamanho de partículas pequeno nos resíduos pré-tratados. De uma forma geral, resíduos resultantes de um pré-tratamento mecânico e biológico, como é o caso do resíduo sólido do Aterro de Buchen, geram um material resultante mais inerte, provenientes da redução biológica da matéria orgânica. Embora haja a semelhança do alto percentual de materiais finos entre os resíduos velhos e os resíduos pré-tratados estudados nesta pesquisa, há uma grande quantidade de materiais fibrosos na composição dos resíduos sólidos pré-tratados (? < 40 mm), superior a 20 %, conforme já citado no item anterior (5.3.1.1.). O mesmo já não acontece para o resíduo sólido velho (? < 30 mm), que tem apenas 3 % de constituintes com características de reforço. Esta diferença da quantidade de material de reforço entre os dois resíduos sólidos investigados irá provavelmente se refletir nos ensaios de resistência, que serão apresentados posteriormente.

5.3.1.3. FORMA DOS CONSTITUINTES

A descrição dos materiais constituintes das amostras dos resíduos sólidos pré-tratados estudados ($\varnothing < 40$ mm), em termos da distribuição das dimensões, está ilustrada na Figura V.17. Os materiais cujas dimensões correspondem a DIM 1 (forma de fibra, fio) e DIM 2 (forma de folha, planar) totalizam pouco mais que 20 % em peso do resíduo sólido. ZIEHMANN (2002) obteve porcentagem de aproximadamente 35 % para os materiais com forma de fibra e folha (DIM 1 e DIM 2), quando realizou investigações em amostras de resíduos sólidos pré-tratados ($\varnothing < 60$ mm) no mesmo aterro, ou seja, no Aterro de Buchen. Valores da ordem de 16 % foram encontrados por KÖLSCH (1996) para amostras de resíduos sólidos resultantes de pré-tratamento biológico do Aterro de Freiburg, também localizado na Alemanha. Para resíduos novos (frescos) encontram-se na literatura valores da ordem de 44 %, ou seja, o dobro comparado aos resíduos pré-tratados ensaiados nesta pesquisa, enquanto que para resíduos velhos, situa-se em torno de 24 %.

Devido a aceleração da decomposição orgânica através do pré-tratamento dos resíduos sólidos do Aterro de Buchen, pode-se afirmar que a porcentagem de constituintes de Dimensões 1 e 2 destes resíduos é semelhante à de resíduos velhos. De acordo com DIM 0 (constituintes em forma de grão), fica evidente que há uma significativa quantidade de material granular presente nas amostras dos resíduos pré-tratados (Figura V.17).

Embora não tenha sido realizada esta análise para os resíduos velhos (Aterro de Ihlenberg), a quantidade de constituintes, correspondentes às Dimensões 1 e 2, seria inferior aos resíduos pré-tratados. Já aqueles correspondentes à DIM 0, apresentaria valor semelhante.

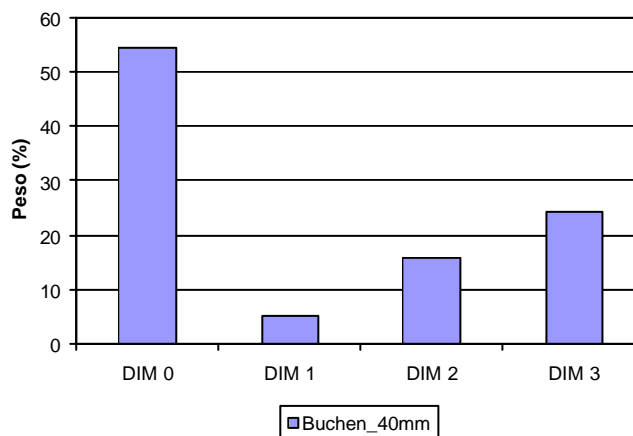


Figura V.17 – Distribuição das dimensões dos resíduos pré-tratados (Aterro de Buchen). DIM 0 (grão), DIM 1 (fibra, fio), DIM 2 (folha, planar), DIM 3 (forma de caixa).

5.3.1.4. TEOR DE SÓLIDOS VOLÁTEIS

Os valores do teor de sólidos voláteis correspondentes aos resíduos sólidos velhos e pré-tratados foram respectivamente 10,5 % e 16,0 %. Ambos resíduos possuem baixo teor de sólidos voláteis, decorrente de processos já avançados de degradação da matéria orgânica, assim como, no caso específico dos resíduos velhos, devido também a uma grande quantidade de minerais e solo que existe em sua composição. Estes parâmetros indicam o estado dos resíduos no momento em que foram realizadas as investigações.

5.3.1.5. COMPACTAÇÃO

Resíduos Sólidos Velhos (Aterro de Ihlenberg)

As curvas de compactação das amostras dos resíduos velhos (matriz básica e matriz composta) estão apresentadas nas Figuras V.18 e V.19, respectivamente. Ensaios de compactação também foram realizados para as amostras da matriz básica reforçada e da matriz composta reforçada, onde foram adicionados determinados teores de plásticos, têxteis, galhos de madeira, porém apenas nos teores de umidade correspondentes à condição ótima ($w = 20,5\%$ e $w = 23,5\%$, respectivamente), no caso de ambas amostras, e para dois pontos do ramo úmido ($w = 30,6\%$ e $w = 34,9\%$), no caso da matriz básica reforçada. Os dados provenientes dos ensaios de compactação na matriz básica e matriz básica reforçada estão mostrados na Tabela V.5, e os correspondentes à matriz composta e composta reforçada estão apresentados na Tabela V.6.

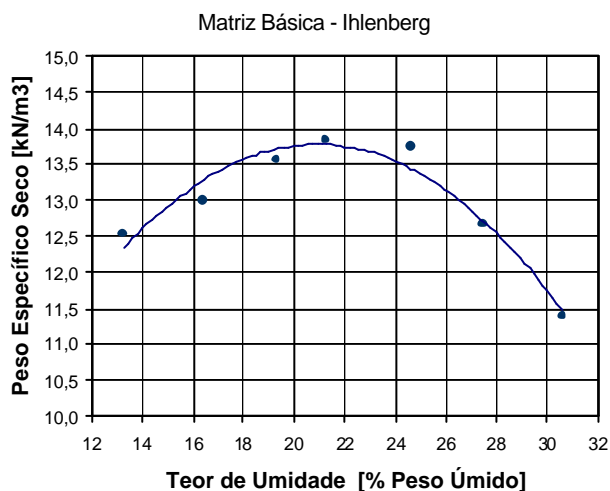


Figura V.18 – Curva de compactação da matriz básica ($\phi < 8\text{mm}$) dos resíduos velhos.

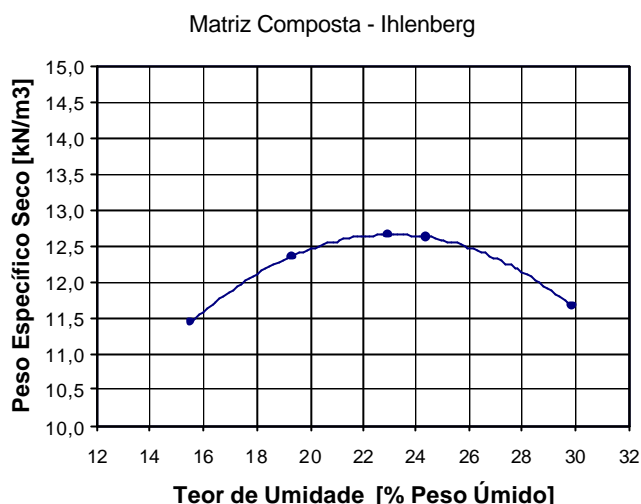


Figura V.19 – Curva de compactação da matriz composta ($\phi < 30$ mm) dos resíduos velhos.

Tabela V.5 – Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal – Umidade ótima e ramo úmido - Matriz básica e básica reforçada – Resíduo sólido velho (< 8 mm).

Ihlenberg (< 8 mm)	Teor de Umidade (% Peso úmido)	Peso Específico Úmido (kN/m^3)	Peso Específico Seco Máximo (kN/m^3)
Matriz básica	21,2	17,6	13,8
	30,6	16,4	11,4
Matriz básica reforçada (MR/MB = 3,5 %)	20,5	13,9	11,1
	30,6	16,1	11,1
	34,9	16,2	10,5

Tabela V.6 – Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal – Umidade ótima - Matriz composta e composta reforçada – Resíduo sólido velho (< 30 mm).

Ihlenberg (< 30 mm)	Teor de Umidade (% Peso úmido)	Peso Específico Úmido (kN/m^3)	Peso Específico Seco Máximo (kN/m^3)
Matriz composta (MR/MB = 3 %)	23,0	16,4	12,6
Matriz composta reforçada (MR/MB = 8 %)	23,5	14,8	11,3

A curva de compactação da matriz básica ($\phi < 8$ mm) dos resíduos sólidos velhos, Figura V.18, indica um peso específico seco máximo de $13,8 \text{ kN/m}^3$ e uma umidade ótima em torno de 21,2 %, conforme também apresentada na Tabela V.5. A existência de componentes minerais e solo na composição dos resíduos sólidos velhos depositados no Aterro de Ihlenberg contribui para um aumento do peso específico do material, uma vez que este valor é mais alto quando comparado à resíduos tipicamente domésticos, como também conduzem a faixas de teor de umidade mais baixas do que normalmente se encontra em aterros sanitários. Com relação à matriz básica reforçada, como não ocorreu uma significativa diferença entre os

valores de seu peso específico seco, entre as umidades na condição ótima (20,5 %) e no ramo úmido (30,6 %), então foi realizado um ensaio de compactação adicional para a umidade de 34,9 %, onde há uma redução no valor da densidade seca mais significativa que a obtida anteriormente. O valor de peso específico da matriz básica reforçada, na condição de umidade ótima, é inferior ao da matriz básica, tendo em vista a incorporação dos plásticos.

KÖLSCH (2003) em investigações da resistência de amostras dos resíduos sólidos velhos do Aterro de Ihlenberg encontrou valores de peso específico seco da ordem de 12 kN/m^3 e umidade de 26,8 % para o material com tamanho de partículas inferior a 8 mm, ou seja, correspondente a matriz básica. Estes valores são bem próximos quando comparados aos dados obtidos na matriz básica no ramo mais úmido, Figura V.18 e Tabela V.5.

Para a matriz composta ($\phi < 30\text{mm}$), o peso específico seco máximo atingiu o valor de $12,6 \text{ kN/m}^3$ para uma umidade ótima de cerca 23 %, Figura V.19 e Tabela V.6. A magnitude do peso específico seco da matriz composta foi inferior ao da matriz básica, por existir uma maior quantidade de plásticos no material resultante do peneiramento em 30 mm. Esta redução na densidade da matriz composta é devido à resistência de compactação das fibras, e ao fato que elas possuem mais baixo peso específico do que o material granular dos resíduos, como acontece também em relação às misturas entre solo e fibras. Tal comportamento foi observado por outros autores, dentre eles NATARAJ & MCMANIS (1997). O mesmo também é observado quando se compara os dados do ensaio de compactação da matriz composta reforçada (8 % de fibras) com a matriz composta (3 % de fibras), Tabela V.6. A redução do peso específico seco da matriz composta reforçada em aproximadamente 10 % é resultado da inclusão de mais 5 % de materiais como plásticos e têxteis na composição da matriz composta.

Resíduos Sólidos Pré-tratados Mecânica e Biologicamente (Aterro de Buchen)

A curva de compactação dos resíduos sólidos pré-tratados, equivalente ao material peneirado em 40 mm (matriz composta 1; teor de fibras 20 %), é mostrada na Figura V.20. Ensaio de compactação também foram realizados para as amostras da matriz básica ($\phi < 8 \text{ mm}$) e matriz composta 2 ($\phi < 40 \text{ mm}$; teor de fibras 10 %) dos resíduos pré-tratados, porém apenas para o teor de umidade que corresponde à umidade ótima da matriz composta 1.

O peso específico máximo úmido e seco na condição de umidade ótima está indicado na Tabela V.7, para cada tipo de material ensaiado.

A matriz composta 1 possui menor peso específico seco ($8,6 \text{ kN/m}^3$) quando comparado aos correspondentes à matriz básica ($9,2 \text{ kN/m}^3$) e composta 2 ($9,3 \text{ kN/m}^3$), Tabela V.7. A grande quantidade de materiais de reforço, mais que 20 %, da matriz composta 1 é responsável por ocasionar a redução do peso específico do material. Durante os ensaios de compactação, observou-se que quando as amostras de resíduos sólidos possuíam plásticos, têxteis, fios e filamentos, dentre outros, em porcentagem significativa, após aplicação de golpes com o martelo caindo a uma determinada altura de ensaio, o corpo de prova sofria um pouco de expansão mecânica. Isto porque as fibras são menos compressíveis do que os materiais granulares, e como consequência obtinha-se valores mais baixos de peso específico.

De acordo com FRICKE et al. (2000), o peso específico úmido de diferentes resíduos sólidos resultantes de pré-tratamento mecânico e biológico, com tamanho de partículas máximo de 40 mm, varia entre 14 e 18 kN/m^3 para uma faixa de teor de umidade de 30 a 40 %. Os valores obtidos para os resíduos pré-tratados estudados (Tabela V.7) concordam de uma forma geral aos encontrados pelos autores.

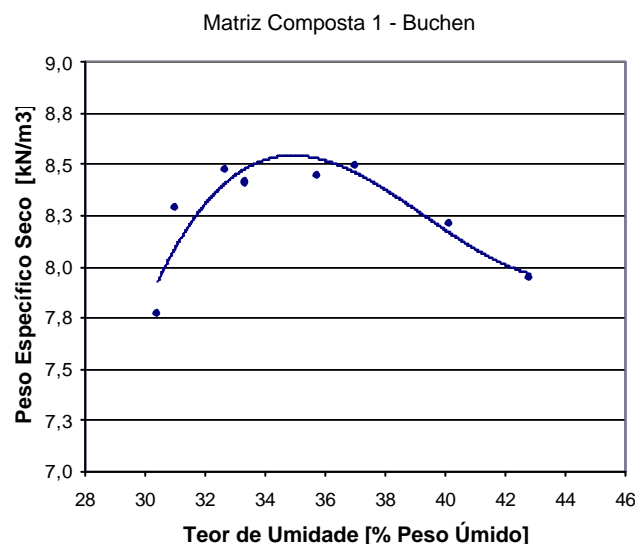


Figura V.20 – Curva de compactação da matriz composta 1 ($\phi < 40\text{mm}$) dos resíduos sólidos pré-tratados.

Tabela V.7 – Resumo dos dados obtidos nos ensaios de compactação Proctor – Matriz básica, composta 1 e 2 – Resíduo sólido pré-tratado.

Material	Teor de Umidade (% Peso úmido)	Peso Específico Úmido (kN/m ³)	Peso Específico Seco (kN/m ³)
Matriz básica	36,5	14,5	9,2
Matriz composta 1 (MR/MB = 20 %)	35,0	13,2	8,6
Matriz composta 2 (MR/MB = 10 %)	34,92	14,2	9,3

5.3.2. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

5.3.2.1. EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL

5.3.2.1.1. MATRIZ BÁSICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS VELHOS - ATERRO DE IHLENBERG

O comportamento tensão cisalhante versus deslocamento horizontal da matriz básica e com adição de fibras (3,5 %) dos resíduos sólidos velhos do Aterro de Ihlenberg, nas condições de umidade ótima, está mostrado nas Figuras V.21 e V.22, respectivamente. Os dados relacionados às condições antes e após a execução dos ensaios estão indicados na Tabela V.8.

As curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal da matriz básica nas condições de umidade ótima são crescentes com o aumento do deslocamento horizontal até valores em torno de 7 mm (no caso da $s_N = 100 \text{ kN/m}^2$) e 9 a 12 mm ($s_N = 200$ e 300 kN/m^2), quando atinge um valor máximo, Figura V.21. Com o aumento dos deslocamentos horizontais há uma leve redução da resistência, até a estabilização de seu valor. O mesmo tipo de evolução das curvas ao longo do deslocamento horizontal não acontece para a matriz básica reforçada com 3,5 % de fibras de resíduo sólido (plásticos, fibras vegetais, têxteis, dentre outros), conforme Figura V.22. O que se observa é um acréscimo da resistência ao longo do deslocamento horizontal das amostras, sem atingir o estado de ruptura, nem mesmo para o máximo permitido nos ensaios, cerca de 20 mm, que corresponde a 20 % do comprimento das amostras. De uma forma geral, verifica-se que a matriz reforçada confere à resistência do material um aumento de sua magnitude, embora apenas a partir de deslocamentos da ordem de 14 mm, para todas as tensões normais de ensaio, é que sua resistência supera a resistência devido a matriz básica. As fibras destas amostras necessitam de deslocamentos horizontais mais elevados para serem mobilizadas. Observa-se também, que quanto maior as tensões

normais aplicadas, melhor ancoradas estão as fibras para ativar suas propriedades de tração. Uma comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal dos dois tipos de amostras é apresentada na Figura V.23, sendo melhor visualizada a diferença do comportamento mecânico do material constituído pela matriz básica e pela matriz básica de reforço.

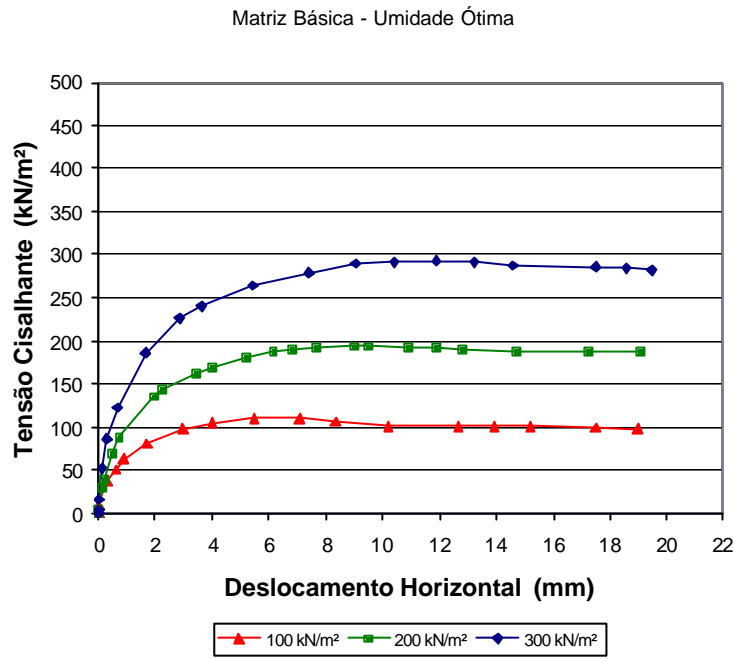


Figura V.21 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz básica – Resíduos sólidos velhos - Umidade ótima.

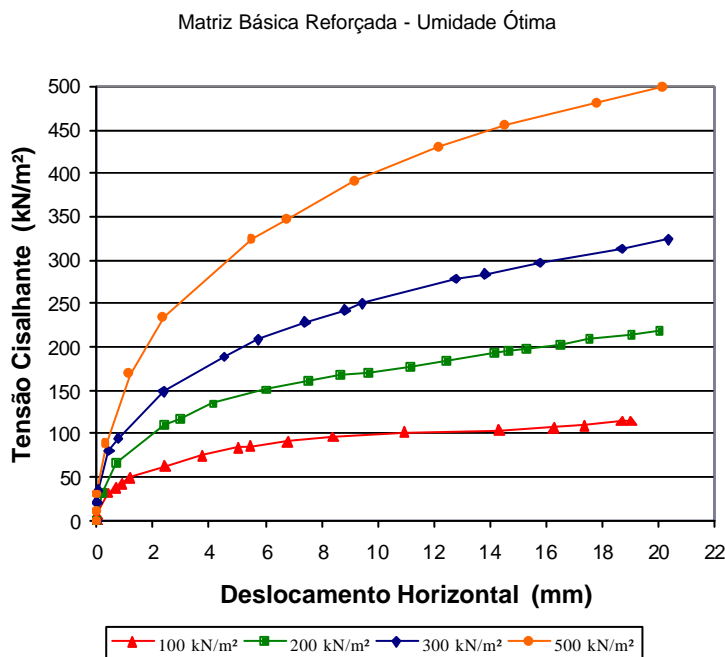


Figura V.22 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz básica com adição de fibras (3,5 %) – Resíduos sólidos velhos - Umidade ótima.

Tabela V.8 – Resumo dos dados antes e após ensaio – Matriz básica e reforçada dos resíduos sólidos velhos – Umidade Ótima.

MATERIAL	DADOS DE ENSAIO	s_N (kN/m ²)			
		100	200	300	500
Matriz Básica	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	17,6	17,6	17,6	-
	γ_{seco} (kN/m ³)	13,7	13,7	13,8	-
	w_{antes} (%)	22,00	22,00	21,51	-
	w_{depois} (%)	21,88	21,63	20,40	-
Matriz Básica Reforçada (3,5%)	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	13,9	13,9	13,9	13,9
	γ_{seco} (kN/m ³)	11,1	11,1	11,1	10,8
	w_{antes} (%)	20,31	20,31	20,31	21,99
	w_{depois} (%)	19,67	19,41	18,78	20,94

Umidade Ótima ($s_N = 200$ kN/m²)

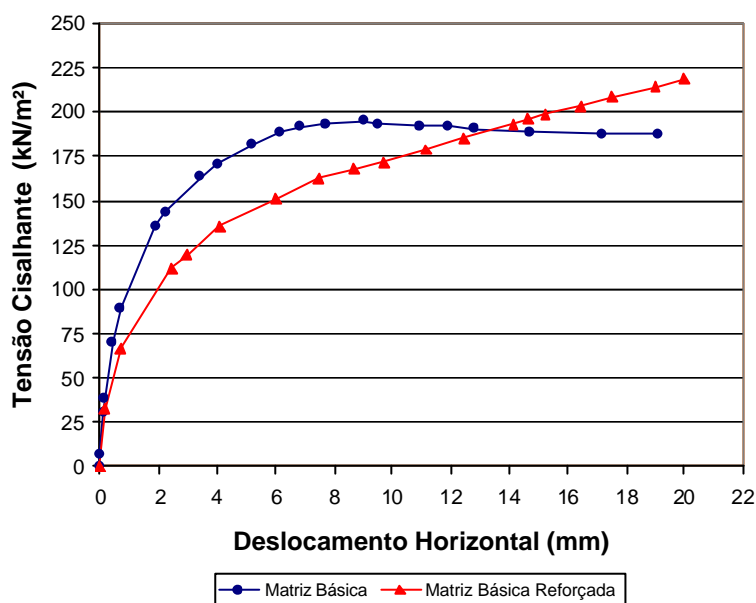


Figura V.23 – Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para $s_N = 200$ kN/m² – Matriz básica e com adição de fibras (3,5 %) – Resíduos sólidos velhos - Umidade ótima.

Fazendo-se uma referência aos ensaios de resistência em argila com fibras de resíduo sólido (Figura V.5), apresentados no item 5.2.2, a interação argila-fibra mostrou que as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal foram superiores aos da argila sem reforço, desde o início dos ensaios, como se constata normalmente em estudos de resistência em solos reforçados. Ao contrário, no caso da interação matriz básica do resíduo sólido velho com as fibras de resíduo sólido (Figura V.23), as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal foram superiores apenas a partir de deslocamentos horizontais mais elevados, quando comparadas às da matriz básica sem adição de reforço. Uma explicação exata sobre a causa deste comportamento necessitaria de mais estudos deste tipo na área de resíduos

sólidos. De qualquer maneira, pode-se afirmar que os valores de resistência da matriz básica do resíduo sólido e matriz básica reforçada foram superiores comparados aos da argila e argila com fibras de resíduo sólido. Isto está de acordo com o fato de que materiais como resíduos sólidos possuem altos valores de resistência, sendo na maioria dos casos superiores a solos.

As envoltórias de resistência das amostras da matriz básica reforçada dos resíduos sólidos velhos estão apresentadas na Figura V.24, para diferentes níveis (em porcentagem) de deslocamento horizontal. A coesão permanece constante dentro de uma faixa de valores entre 21 e 27,5 kN/m², enquanto que o ângulo de atrito cresce à medida que aumenta os níveis de deslocamento horizontal do material, como por exemplo, atingiu um valor de cerca 29° de atrito em 5 % de deslocamento e de aproximadamente 37° em 20 %. GABR & VALERO (1995) realizaram ensaios de cisalhamento direto em equipamento convencional em amostras de resíduos sólidos, avaliando-se os parâmetros de resistência em diferentes níveis de deslocamento horizontal (5 e 10 %). Os autores observaram também um aumento do ângulo de atrito (de 20 até 39°) com o acréscimo dos deslocamentos, enquanto que a coesão manteve-se essencialmente constante (cerca 27,5 kPa).

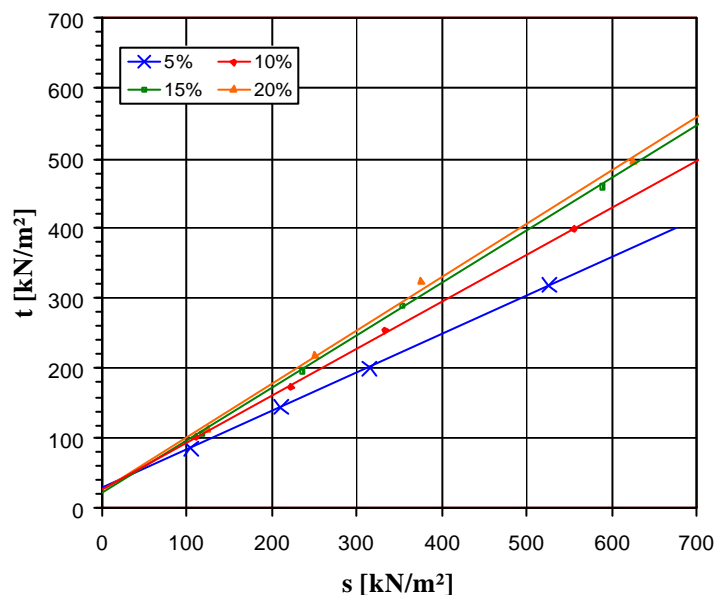


Figura V.24 – Envoltórias de resistência no diagrama t-s, obtidas para a matriz básica reforçada, em diferentes níveis de deslocamento horizontal - Resíduos sólidos velhos – Umidade Ótima.

Os parâmetros de resistência foram determinados para ambos materiais, tendo sido determinados para a matriz básica reforçada segundo um critério de deformação, neste caso

em 20 %, que equivale a 20 mm de deslocamento horizontal. As envoltórias de resistência para a obtenção da coesão e ângulo de atrito estão mostradas na Figura V.25. A matriz básica apresentou uma coesão de 23,3 kN/m² e ângulo de atrito de cerca 38,3° para as tensões normais de 100, 200 e 300 kN/m², já a matriz básica reforçada mostrou uma coesão de aproximadamente 26,8 kN/m² e ângulo de atrito de 37,4°, considerando além das tensões normais acima citadas a de 500 kN/m². Em termos de parâmetros de resistência não houve uma significativa diferença entre os dois materiais.

As curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal da matriz básica reforçada (Figura V.22) indicaram que as amostras não atingiram sua resistência máxima, porém supondo-se que se fosse possível maiores deslocamentos horizontais, é provável que os valores mais elevados de resistência provocariam alguma diferença entre os dois materiais, principalmente no que diz respeito ao aumento da coesão, que seria devido à incorporação dos elementos de reforço. Conforme ainda a Figura V.25, para os níveis de tensão normal investigados nestes ensaios, não foi observada envoltória bi-linear para o material reforçado, ou seja, para a matriz básica reforçada.

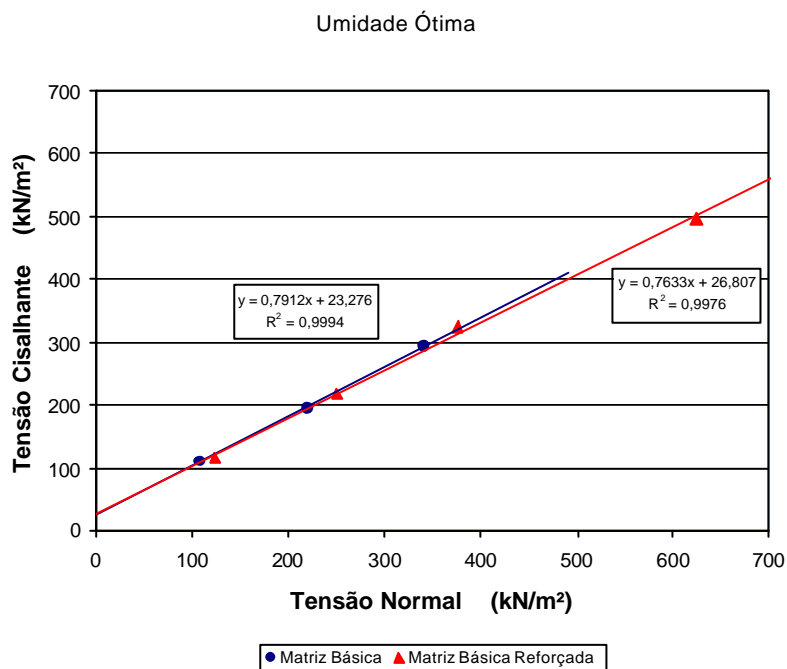


Figura V.25 – Envoltórias de resistência – Matriz básica e com adição de fibras (3,5 %) – Resíduos sólidos velhos - Umidade ótima.

As Figuras V.26 e V.27 ilustram as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal da matriz básica e com adição de fibras (3,5 %), respectivamente, nas condições de

uma determinada umidade do ramo úmido da curva de compactação do ensaio Proctor Normal, $w = 30,6\%$ para a matriz básica e $w = 34,9\%$ para a matriz básica reforçada. Os parâmetros relacionados às condições antes e após a execução dos ensaios estão indicados na Tabela V.9.

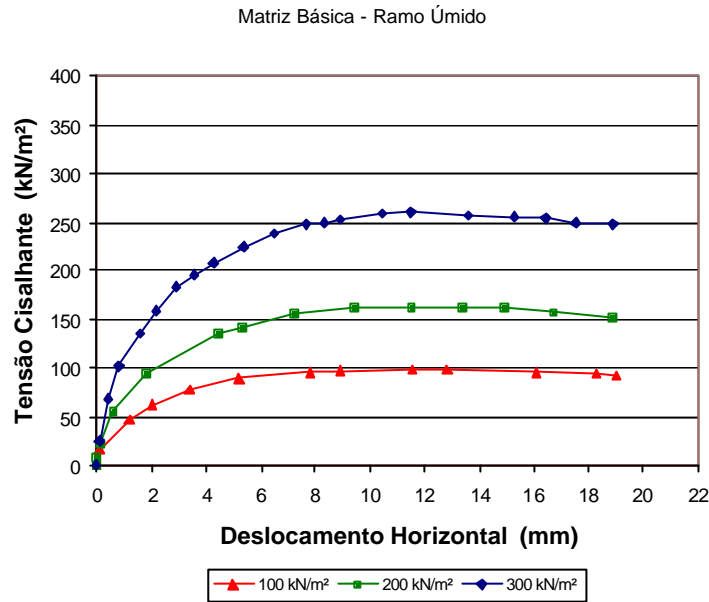


Figura V.26 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz básica – Resíduos sólidos velhos - Ramo úmido.

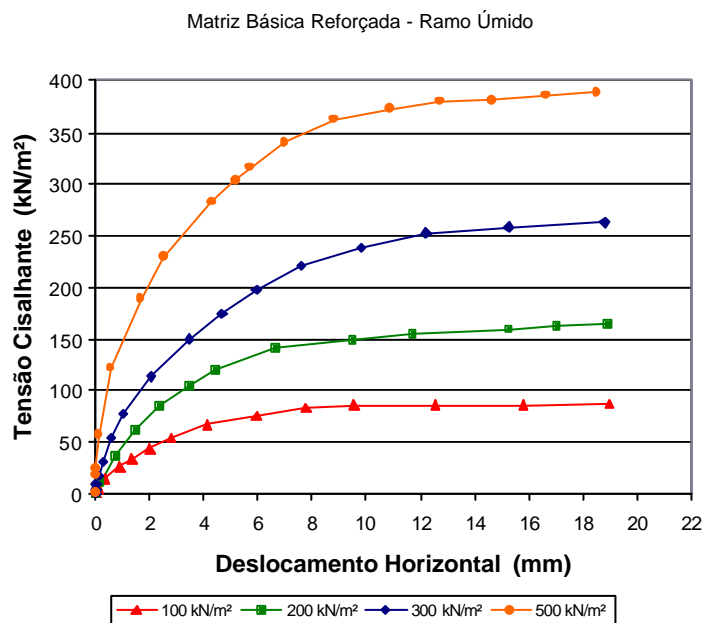


Figura V.27 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz básica com adição de fibras (3,5 %) – Resíduos sólidos velhos - Ramo Úmido.

Tabela V.9 – Resumo dos dados antes e após ensaio – Matriz básica e reforçada dos resíduos sólidos velhos – Ramo Úmido.

MATERIAL	DADOS DE ENSAIO	s_N (kN/m ²)			
		100	200	300	500
Matriz Básica	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	16,4	16,4	16,4	-
	γ_{seco} (kN/m ³)	11,4	11,4	11,4	-
	w _{antes} (%)	30,20	30,20	30,20	-
	w _{depois} (%)	25,65	24,71	23,60	-
Matriz Básica Reforçada (3,5%)	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	16,2	16,2	16,2	16,2
	γ_{seco} (kN/m ³)	10,6	10,6	10,6	10,7
	w _{antes} (%)	34,69	34,81	34,69	34,00
	w _{depois} (%)	29,35	27,24	26,78	25,22

As curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal da matriz básica, em teor de umidade mais elevado que à condição ótima, apresentam um crescimento com o deslocamento horizontal e atingem valores máximos para o intervalo entre 11 - 13 mm, Figura V.26. Estes valores máximos foram alcançados para níveis mais elevados de deslocamento horizontal quando comparados aos obtidos pela matriz básica, cujas amostras foram moldadas na umidade ótima (Figura V.21). O valor da resistência foi inferior em média 13 % devido ao aumento da umidade. É bem provável que esta redução poderia ter sido ainda maior se o teor de umidade de moldagem das amostras fosse mantido constante durante todo o ensaio. Como estes materiais investigados são tipo granulares, e como nestes ensaios de cisalhamento direto foi permitida a drenagem de líquidos, a umidade pós-ensaio atingiu valores próximos do teor na condição ótima.

Na Figura V.27, a resistência da matriz básica reforçada aumenta continuamente com o acréscimo do deslocamento, sem atingir um máximo na curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, com exceção do ensaio na tensão normal de 100 kN/m², o que indica uma tendência de estabilização dos valores a partir de 10 % de deslocamento do material (ou seja, 10 mm). Em tensões mais baixas, o efeito de reforço é normalmente menos pronunciado. Devido às amostras terem sido preparadas em condições mais úmidas que a ótima, houve uma redução da resistência da matriz básica reforçada, comparada à situação de umidade ótima. Os valores da resistência foram em média 22,5 % menores.

Embora o aumento do teor de umidade prejudique a resistência à tração de um material reforçado, ainda fica nítida a influência das fibras na resistência da matriz básica reforçada através da verificação do aumento do ângulo de atrito com o acréscimo dos níveis de deslocamentos horizontais, sem atingir um valor máximo definido. Tal afirmação pode ser

confirmada por meio da Figura V.28, que mostra as envoltórias de resistência da matriz básica reforçada dos resíduos velhos, no teor de umidade mais elevado, em diferentes níveis de deslocamento horizontal.

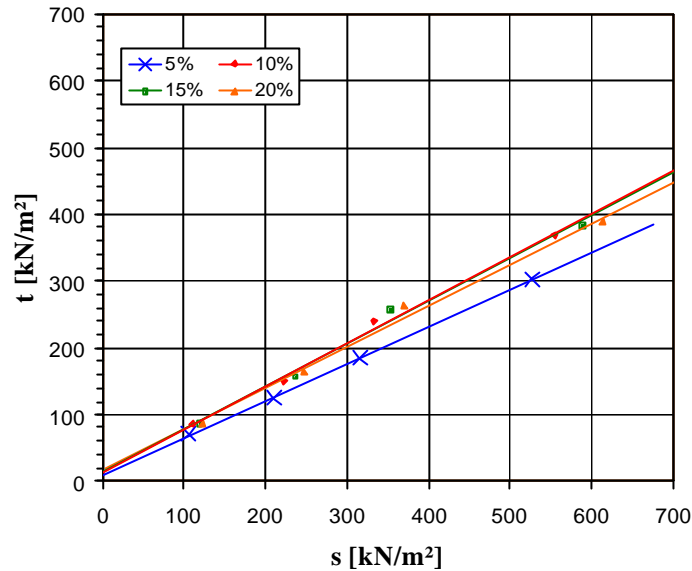


Figura V.28 – Envoltórias de resistência no diagrama t-s, obtidas para a matriz básica reforçada, em diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos sólidos velhos - Ramo úmido.

Os valores máximos da resistência da matriz básica e da resistência em 20 % de deslocamento horizontal da matriz básica reforçada, cujas amostras foram moldadas nos ensaios em teor umidade de 30,6 e 34,9 %, respectivamente, foram plotados no diagrama t-s para obtenção dos parâmetros c' e ϕ' , Figura V.29. Destas envoltórias obteve-se coesão de 9 kN/m² e ângulo de atrito de 35,7° para a matriz básica, enquanto cerca de 16 kN/m² e 31,7° para a matriz básica reforçada. Os resultados indicam um leve acréscimo da coesão devido à incorporação das fibras, porém uma leve redução do ângulo de atrito comparado à matriz básica. Da mesma forma como foi comentado anteriormente para o caso dos ensaios de resistência no teor de umidade ótima, o valor da resistência do material reforçado poderia ter sido superior ao sem reforço se houvesse maior deslocamento horizontal do material, já que as curvas de resistência indicaram crescimento sem alcance da ruptura. Devido às limitações do equipamento, quanto a permitir maior deslocamento horizontal, não foi possível esta verificação.

Uma comparação dos diagramas t-s, ou seja, das envoltórias de resistência de ambos materiais, em condições de umidade ótima e ramo úmido, está ilustrada na Figura V.30. O aumento na umidade provocou uma redução da coesão, assim como na magnitude do ângulo de atrito em ambos os casos.

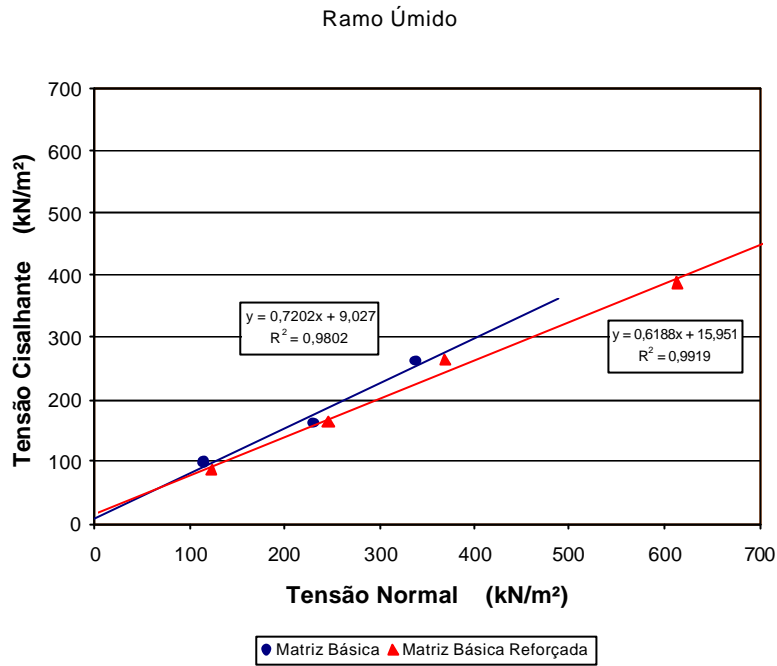


Figura V.29 – Envoltórias de resistência – Matriz básica e com adição de fibras (3,5 %) – Resíduos sólidos velhos – Ramo Úmido.

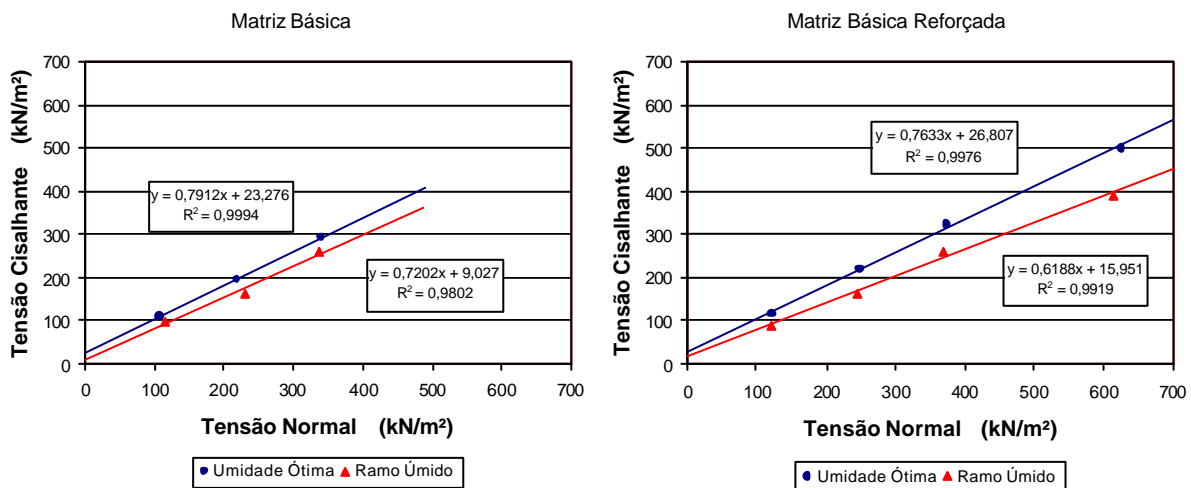


Figura V.30 – Comparação das envoltórias de resistência – Matriz básica e com adição de fibras (3,5 %) – Resíduos sólidos velhos - Umidade ótima e ramo úmido.

5.3.2.2. EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO DE MAIORES DIMENSÕES

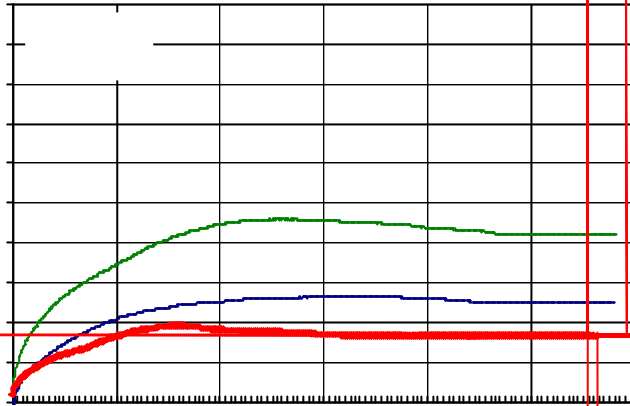
5.3.2.2.1. RESÍDUOS SÓLIDOS VELHOS - ATERRO DE IHLENBERG

Os ensaios de resistência em caixa de cisalhamento direto de maiores dimensões foram realizados em diferentes tipos de amostras dos resíduos sólidos velhos do Aterro de Ihlenberg. O procedimento e detalhamento destes ensaios, bem como a descrição das amostras investigadas, estão citados no capítulo de Metodologia dos Ensaios e Materiais. Os resultados destes ensaios são apresentados inicialmente para cada tipo de material estudado (matriz básica, matriz composta e matriz composta reforçada), e posteriormente comparados entre si e com dados da literatura.

5.3.2.2.1.1. MATRIZ BÁSICA

As curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e as curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal dos ensaios de resistência executados na matriz básica dos resíduos sólidos velhos estão apresentadas, respectivamente, nas Figuras V.31 e V.32.

As curvas apresentadas na Figura V.31 indicam que as amostras da matriz básica têm uma tendência de comportamento de pico ao longo dos deslocamentos horizontais, durante a fase de cisalhamento do material, principalmente no que se refere às tensões normais de 50 e 200 kN/m². Esta característica é justificada pelo fato que a matriz básica do resíduo sólido, que é responsável pelas propriedades de atrito do material, sem a presença de materiais de reforço, constitui-se de um material granular, cuja resistência sofre um aumento ao longo dos deslocamentos horizontais, atingindo um valor máximo, e em seguida uma redução até a estabilização, ou seja, tensão pós-pico do material. Comportamento de pico em amostras correspondentes à matriz básica do resíduo sólido foi verificado por KOCKEL (1995) em ensaios triaxiais, principalmente para níveis de tensões normais de 200 e 400 kN/m². Com respeito às curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, as amostras sofrem compressão no início do cisalhamento, mas posteriormente prevalece o comportamento de dilatância do material, conforme observado na Figura V.32. Quanto mais baixa a tensão normal aplicada, mais evidente foi a dilatância, como se verifica principalmente no caso da tensão normal de 50 kN/m². Os pontos de inflexão das curvas de deslocamento vertical coincidem aproximadamente com os pontos de máximo da resistência.



resultados obtidos na matriz básica dos resíduos sólidos velhos com equipamento de cisalhamento convencional (Item 5.3.2.1.1.), verifica-se que a tensão cisalhante na tensão normal de 100 kN/m² foi em torno de 107,6 kN/m², valor um pouco mais baixo comparado aos dos ensaios de cisalhamento de maiores dimensões ($\tau = 132,5$ kN/m²). Isto deve-se provavelmente ao fato das amostras terem sido ensaiadas em equipamentos de dimensões diferentes e pela heterogeneidade do material. Com o objetivo de estimar a tensão cisalhante da matriz básica na tensão normal de 50 kN/m², no caso de equipamento convencional, utilizou-se regressão linear da respectiva envoltória de resistência, obtendo-se um valor de cerca 62,8 kN/m², ou seja, cerca de 34 % menor que o obtido nos ensaios com a caixa de cisalhamento de maior escala. Este valor mais elevado da tensão cisalhante na tensão normal de 50 kN/m² da matriz básica (equipamento de maiores dimensões) levou a um aumento da coesão no deslocamento de 5 %, em relação aos outros níveis de deslocamento, como pode ser observado nas envoltórias de resistência, segundo a Figura V.33. Os valores da tensão cisalhante para estes níveis de deslocamento nas diferentes tensões normais aplicadas estão indicados na Tabela V.10.

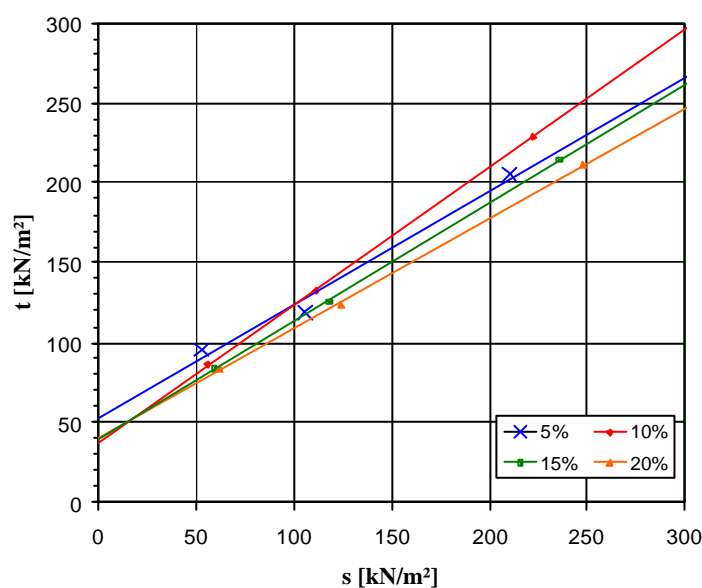


Figura V.33 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos.

Tabela V.10- Valores da tensão cisalhante ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas – Matriz básica – Resíduos sólidos velhos.

TENSÃO NORMAL DE CONSOLIDAÇÃO s_N (kN/m ²)	t (kN/m ²)			
	5%	10%	15%	20%
50	95,2	85,9	83,9	83,3
100	119,3	132	125,8	124,1
200	205,2	228,8	214,2	210,53

Esta coesão mais elevada é provavelmente decorrente da ativação das fibras, embora elas estejam presentes em pequenas quantidade e dimensões na matriz básica. Na realidade, não consiste na coesão do material, pois esta surgiria no início do ensaio e permaneceria praticamente constante até o final. Qualquer adição da coesão é decorrente das fibras, que ocasionalmente existam em um determinado material, e que só pode ser exatamente investigada e medida no equipamento de tração. Apesar de terem sido realizados nesta pesquisa ensaios na matriz básica com o objetivo de medir e analisar apenas as propriedades de atrito do material, sem o efeito das fibras, esta matriz básica para a amostra ensaiada na tensão de 50 kN/m² mostrou ainda um pouco deste efeito de reforço.

A variação dos parâmetros de resistência da matriz básica ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal também pode ser analisada conforme a Figura V.34, e os respectivos valores estão apresentados na Tabela V.11. Para o nível de 5 % houve um valor mais elevado da coesão (52,2 kN/m²), fora da tendência de valores entre 37,5 - 40 kN/m² mostrada ao longo dos demais níveis de deslocamento horizontal. O ângulo de atrito mostra um acréscimo de seu valor até níveis de 10 %, quando atinge o máximo e posteriormente decresce fornecendo a resistência pós-pico do material.

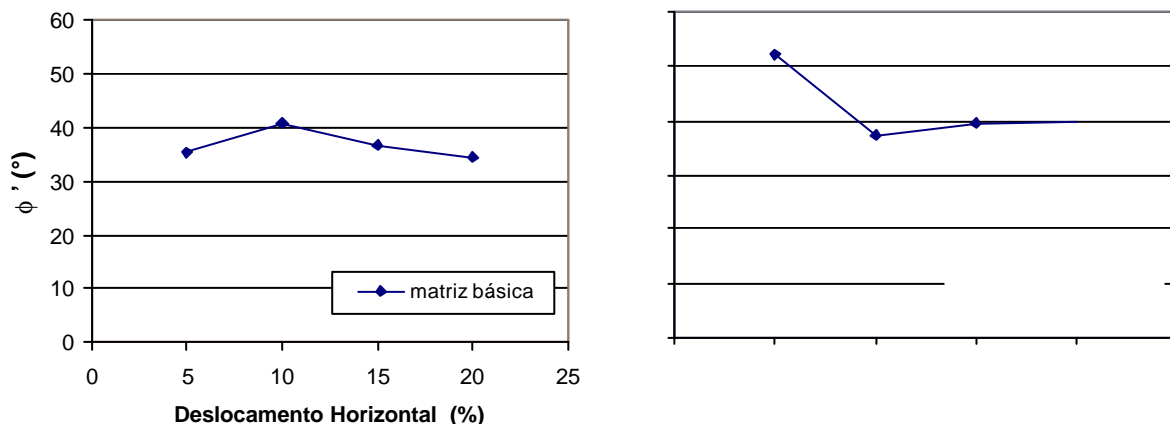


Tabela V.11 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos.

PARAMETROS DE RESISTÊNCIA	DESLOCAMENTO HORIZONTAL (%)			
	5	10	15	20
ϕ' (°)	35,5	40,7	36,5	34,5
c' (kN/m ²)	52,2	37,5	39,7	40,0

A envoltória de resistência da matriz básica dos resíduos sólidos velhos está indicada na Figura V.35. Um resumo dos dados de ensaio (peso específico úmido e seco, teor de umidade antes e após o ensaio, altura da amostra, recalque do corpo de prova após fase de adensamento, ângulo de atrito e coesão) das amostras da matriz básica para diferentes tensões normais aplicadas está mostrado na Tabela V.12. Os resultados indicam uma coesão de 47,3 kN/m² e ângulo de atrito de 39,5° para a matriz básica dos resíduos sólidos velhos.

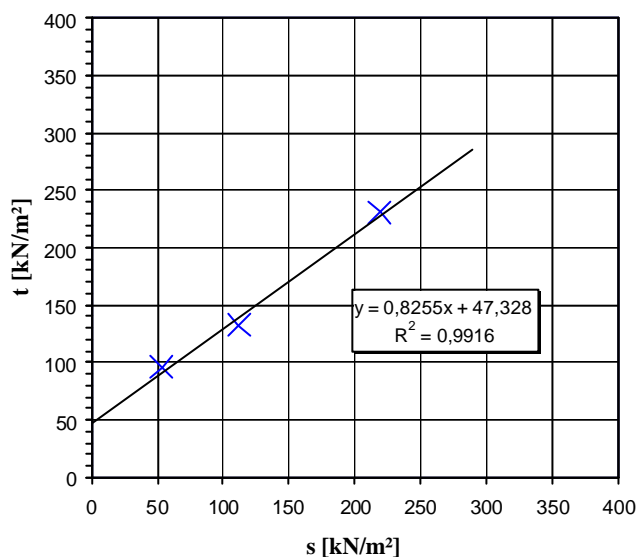


Figura V.35 – Envoltória de resistência – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos.

Tabela V.12 – Resumo dos dados de ensaio de resistência – Matriz básica - Resíduos velhos.

MATERIAL	DADOS DE ENSAIO	s_N (kN/m ²)		
		50	100	200
Matriz Básica Aterro de Ihlenberg	$\gamma_{\text{úmido}}$ (kN/m ³)	17,3	17,3	17,3
	γ_{seco} (kN/m ³)	13,4	13,3	13,4
	w_{antes} (%)	22,72	23,31	22,33
	w_{depois} (%)	22,34	22,64	21,97
	h_{amostra} (cm)	12,50	12,50	12,50
	γ_h (%)	2,50	3,82	6,22
	ϕ' (°)	39,5		
	c' (kN/m ²)	47,3		

Levando-se em consideração o que foi discutido sobre o ensaio de resistência na tensão normal de 50 kN/m^2 , onde não deveria provavelmente ter atingido valor tão elevado de resistência, quando comparados à tensão de 100 kN/m^2 , e também aos resultados das amostras da matriz básica ensaiadas em equipamento convencional, foi feita uma outra interpretação dos resultados, admitindo-se neste caso apenas os resultados dos ensaios nas tensões normais de 100 e 200 kN/m^2 . As envoltórias de resistência e a variação dos parâmetros de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal para esta nova situação seriam como mostrados nas Figuras V.36 e V.37. A Tabela V.13 resume os parâmetros de resistência para os diferentes níveis de deslocamento horizontal.

Os valores da coesão, ao longo dos diferentes níveis de deslocamento horizontal, indicam uma tendência de constância dos valores, numa faixa de 29 a 38 kN/m^2 , enquanto que o ângulo de atrito cresce com o aumento dos deslocamentos, atingindo um valor máximo em 10% , e posteriormente decresce (Figuras V.36, V.37 e Tabela V.13). A envoltória de resistência é representada pela Figura V.38, cujos parâmetros para a matriz básica foram: $c' = 29,7 \text{ kN/m}^2$ e $\phi' = 42,5^\circ$. O valor de $29,7 \text{ kN/m}^2$ seria então a coesão da matriz básica do resíduo sólido velho, sem a interferência de uma possível ativação das fibras na amostra submetida à tensão normal de 50 kN/m^2 , que havia provocado um acréscimo do valor da coesão. De uma forma geral, estes valores não diferem tão significativamente aos obtidos nos ensaios de cisalhamento direto de pequenas dimensões, realizados também nesta pesquisa, os quais determinaram valores de $23,3 \text{ kN/m}^2$ para a coesão e ângulo de atrito de cerca $38,3^\circ$ para as amostras da matriz básica de resíduos velhos. O discreto aumento dos parâmetros de resistência da matriz básica, ensaiada no equipamento de maiores dimensões, comparado ao convencional, pode ser função da heterogeneidade de materiais como resíduos sólidos porque, embora as amostras tenham sido preparadas nas mesmas condições em ambos os equipamentos de ensaio, esta não homogeneidade do material pode refletir no resultado da resistência. Além disto, o tamanho das caixas de cisalhamentos utilizadas neste trabalho é diferente.

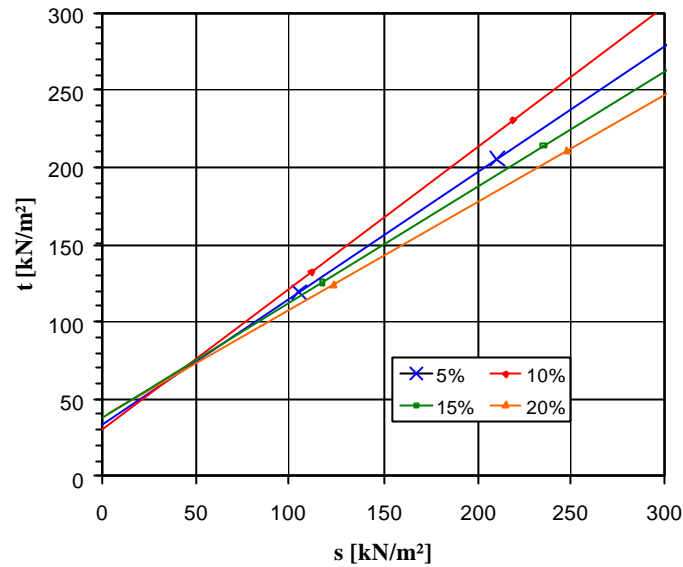


Figura V.36 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Sem os dados da tensão de 50 kN/m^2 – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos.

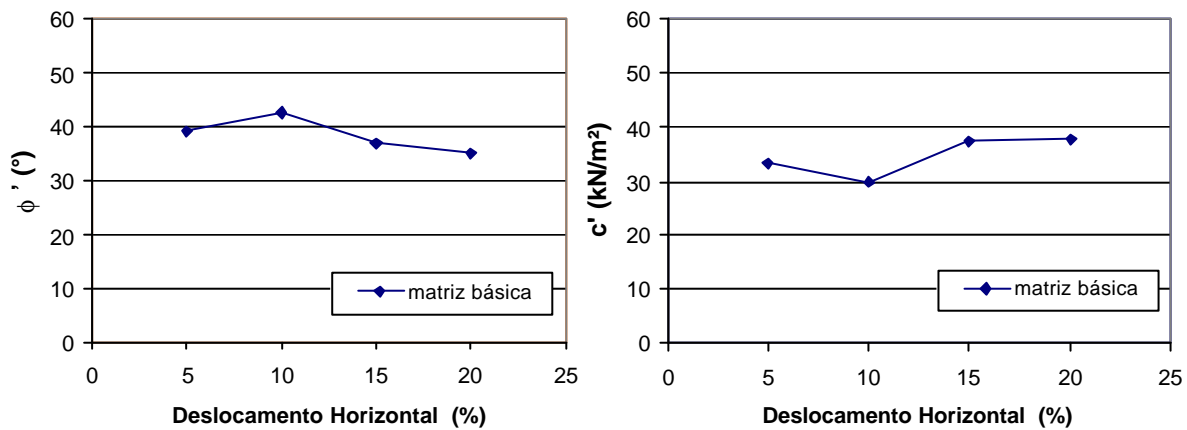


Figura V.37 – Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal -- Sem os dados da tensão de 50 kN/m^2 - Resíduos sólidos velhos.

Tabela V.13 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos.

PARAMETROS DE RESISTÊNCIA	DESLOCAMENTO HORIZONTAL (%)			
	5	10	15	20
ϕ' (°)	39,2	42,5	36,9	34,9
c' (kN/m ²)	33,3	29,7	37,5	37,8

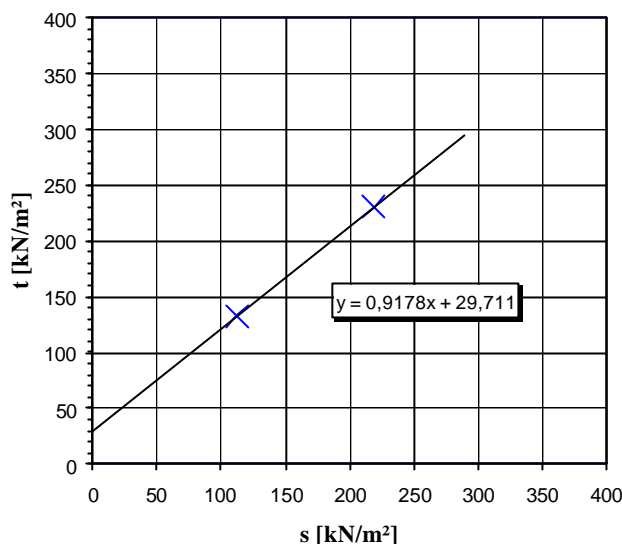


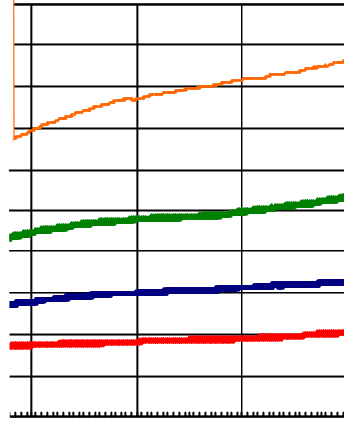
Figura V.38 – Envoltória de resistência da matriz básica - Sem os dados da tensão de 50 kN/m² – Matriz básica - Resíduos sólidos velhos.

5.3.2.2.1.2. MATRIZ COMPOSTA

As curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e as curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal dos ensaios de resistência executados na matriz composta dos resíduos sólidos velhos do Aterro de Ihlenberg são mostradas nas Figuras V.39 e V.40, respectivamente.

As curvas tensão cisalhante das amostras da matriz composta dos resíduos velhos ao longo do deslocamento horizontal (Figura V.39) mostram que a resistência cresce sem indicar um comportamento de pico, porém apresentando uma tendência de estabilização do valor máximo a partir de deslocamentos horizontais da ordem de 50 mm (cerca de 16,5 % do comprimento da amostra), como pode ser observado nos resultados referentes às tensões de 50 e 100 kN/m². Esta tendência de constância do valor máximo da resistência já não é evidenciada para as tensões de 200 e 300 kN/m², pois constata-se ainda um acréscimo da resistência até o final do ensaio. Isto deve ter acontecido porque as fibras, embora em porcentagens ainda pequenas, cerca de 3 %, precisam de um deslocamento horizontal maior da amostra para serem ativadas, além do que as fibras são melhor ancoradas para situações em que as cargas normais são mais elevadas. De acordo com a Figura V.40, as curvas de deslocamento vertical indicam que as amostras nas tensões de 50 e 100 kN/m² sofreram inicialmente compressão e em seguida comportamento de dilatação na fase de cisalhamento, enquanto que em maiores tensões, 200 e 300 kN/m², o comportamento de compressão

ocamento horizontal, sendo posteriormente



parâmetros de resistência em diferentes níveis de deslocamento horizontal, segundo Figura V.42 e Tabela V.15.

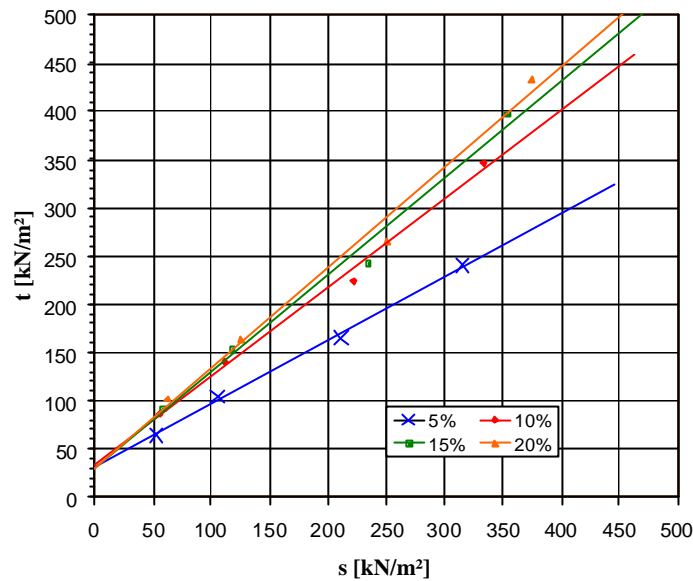


Figura V.41 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta – Resíduos sólidos velhos.

Tabela V.14 - Valores de tensão cisalhante ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos.

TENSÃO NORMAL DE CONSOLIDAÇÃO s_N (kN/m ²)	t (kN/m ²)			
	5%	10%	15%	20%
50	64,5	86,4	92,3	101,7
100	103,5	139,7	153	163,4
200	165,5	223,7	242,5	264,5
300	240,7	346,7	397,1	434,1

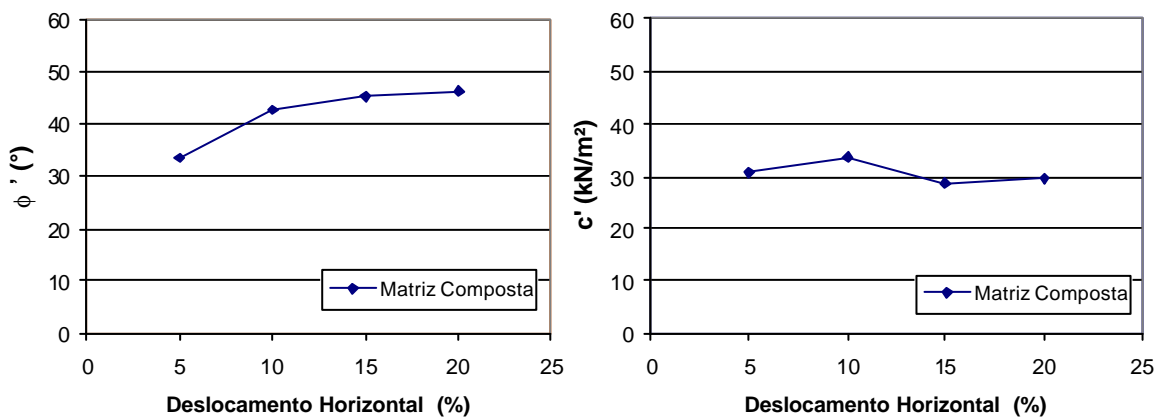


Figura V.42 – Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos.

Tabela V.15 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos.

PARAMETROS DE RESISTÊNCIA	DESLOCAMENTO HORIZONTAL (%)			
	5	10	15	20
ϕ' (°)	33,4	42,5	45,2	46,1
c' (kN/m ²)	30,8	33,5	28,5	29,6

A envoltória de resistência está indicada na Figura V.43, e um sumário dos dados de ensaio para cada tensão normal aplicada é apresentado na Tabela V.16. Os parâmetros de resistência da matriz composta dos resíduos sólidos velhos, para os níveis de tensões normais ensaiados, foram $c' = 29,6 \text{ kN/m}^2$ e $\phi' = 46,1^\circ$, conforme se observa na Figura V.43 e Tabela V.16.

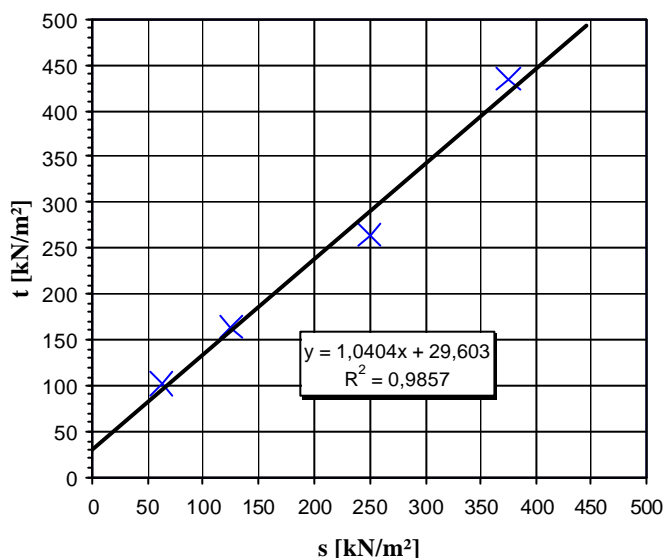


Figura V.43 – Envoltória de resistência – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos.

Tabela V.16 – Resumo dos dados de ensaio de resistência – Matriz composta - Resíduos sólidos velhos.

MATERIAL	DADOS DE ENSAIO	s_N (kN/m ²)			
		50	100	200	300
Matriz Composta Aterro de Ihlenberg	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	16,6	16,4	16,6	16,7
	γ_{seco} (kN/m ³)	12,7	12,6	12,7	12,9
	w_{antes} (%)	23,20	23,17	23,42	22,87
	w_{depois} (%)	22,94	22,38	22,17	20,98
	$h_{amostra}$ (cm)	13,00	12,50	12,00	12,00
	ϕ_h (%)	3,70	5,42	7,24	10,15
	ϕ' (°)	46,1			
	c' (kN/m ²)	29,6			

Analisando-se e comparando-se os parâmetros de resistência entre a matriz composta ($c' = 29,6 \text{ kN/m}^2$ e $\phi' = 46,1^\circ$) e básica ($c' = 29,7 \text{ kN/m}^2$ e $\phi' = 42,5^\circ$) dos resíduos sólidos velhos, neste último caso sem considerar a tensão normal de 50 kN/m^2 , verifica-se que em termos de coesão, ambos materiais mostraram não haver diferença. O acréscimo no ângulo de atrito, embora que pequeno, provém das forças de tração dos elementos de reforço existentes na matriz composta.

5.3.2.2.1.3. MATRIZ COMPOSTA REFORÇADA

As Figuras V.44 e V.45 ilustram as curvas tensão cisalhante e deslocamento vertical ao longo do deslocamento horizontal das amostras da matriz composta reforçada (adição de 5 % de fibras plásticas, têxteis, totalizando 8 % para a matriz de reforço) dos resíduos sólidos velhos do Aterro de Ihlenberg, em diferentes tensões normais aplicadas durante os ensaios de cisalhamento direto.

As curvas apresentadas na Figura V.44 mostram que a resistência do material tem um acréscimo com o aumento dos deslocamentos horizontais, sem demonstrar comportamento de pico. Tal comportamento, como já citado anteriormente, é notado normalmente em materiais que possuem em sua composição a inclusão de reforço. As curvas são rasas, indicando que a ativação das fibras requer um maior deslocamento horizontal do material para proporcionar um aumento da resistência devido à sua resistência à tração. Observa-se que para 20 % de deslocamento do material, ou seja, 60 mm (limite de ensaio), as curvas de resistência, principalmente para as maiores tensões normais, há uma tendência de que os valores continuariam a aumentar. Isto mostra que o critério de ruptura para este material não foi alcançado para tais níveis de deslocamento, nem para os níveis de tensão normal ensaiados. A ativação das fibras foi mais pronunciada nas tensões de 200 e 300 kN/m^2 , quando há uma melhor ancoragem das mesmas. Desde que não existe nenhuma ruptura, principalmente no caso das duas últimas tensões normais, é difícil avaliar a resistência ao cisalhamento deste material simplesmente em termos de parâmetros convencionais Mohr-Coulomb. Por isto deve ser levada em consideração a existência de forças de tração no comportamento mecânico do resíduo sólido.

As curvas de deslocamento vertical ao longo do deslocamento horizontal na fase de cisalhamento dos ensaios na matriz composta reforçada (Figura V.45) mostraram

comportamento semelhante ao observado na matriz composta, Figura V.40. Nas tensões de 50 e 100 kN/m², os corpos de prova sofreram inicialmente compressão e posteriormente dilatação, enquanto que nas maiores tensões de ensaio (200 e 300 kN/m²) a compressão prevaleceu no comportamento do material.

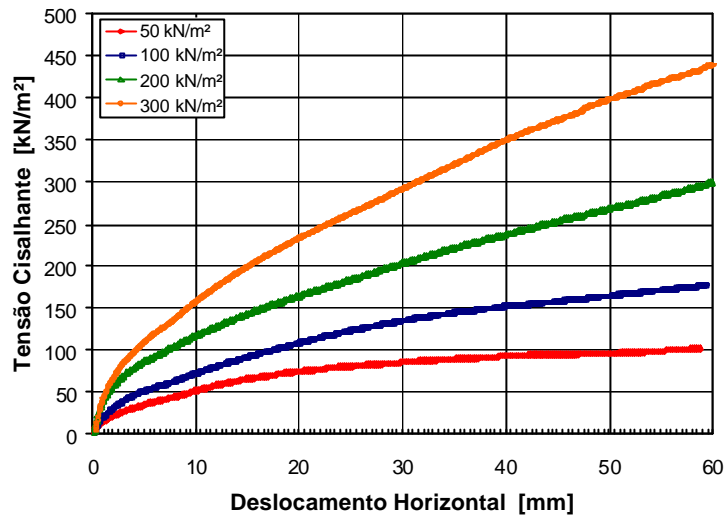
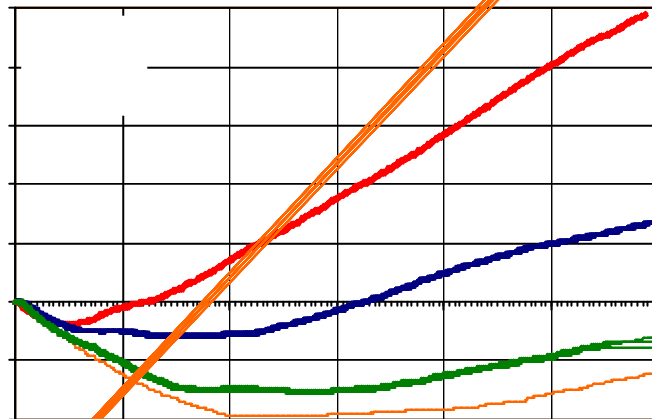


Figura V.44 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos.



ângulo de atrito e da coesão da matriz composta reforçada ao longo dos diferentes níveis de deslocamento horizontal está apresentada na Figura V.47, e os respectivos valores estão na Tabela V.18.

A coesão concentra-se num intervalo de valores entre 37-42 kN/m², com exceção do deslocamento horizontal em 10 % ($c' = 48,1$ kN/m²), enquanto que o ângulo de atrito cresce com o aumento dos deslocamentos durante todo o processo de ensaio, atingindo cerca de 47°, segundo as Figuras V.46 e Tabela V.17. Este comportamento também é verificado através da Figura V.47 e Tabela V.18. O ângulo de atrito poderia ter alcançado valores ainda mais elevados para maiores níveis de deslocamento horizontal.

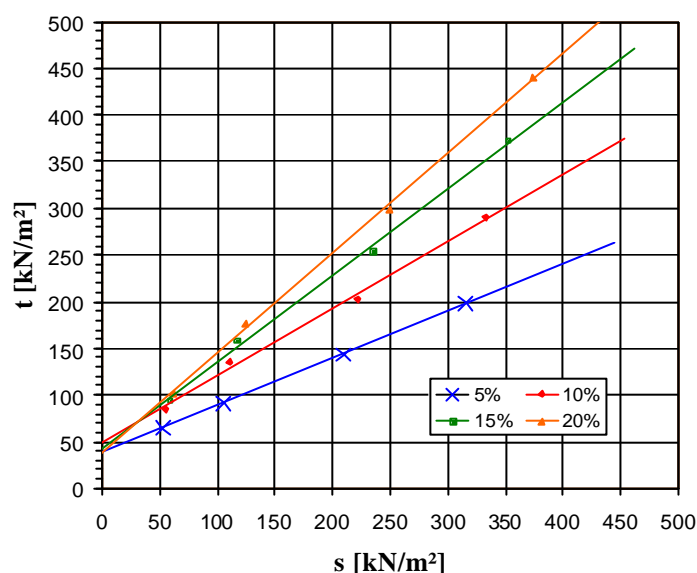


Figura V.46 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos.

Tabela V.17- Valores de tensão cisalhante ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas - Matriz composta reforçada – Resíduos sólidos velhos.

TENSÃO NORMAL DE CONSOLIDAÇÃO s_N (kN/m ²)	t (kN/m ²)			
	5%	10%	15%	20%
50	65,1	85,1	94,1	101
100	91,7	135,1	157,9	177,7
200	143,2	203,2	253,6	299,1
300	198,0	290,8	372,4	440,9

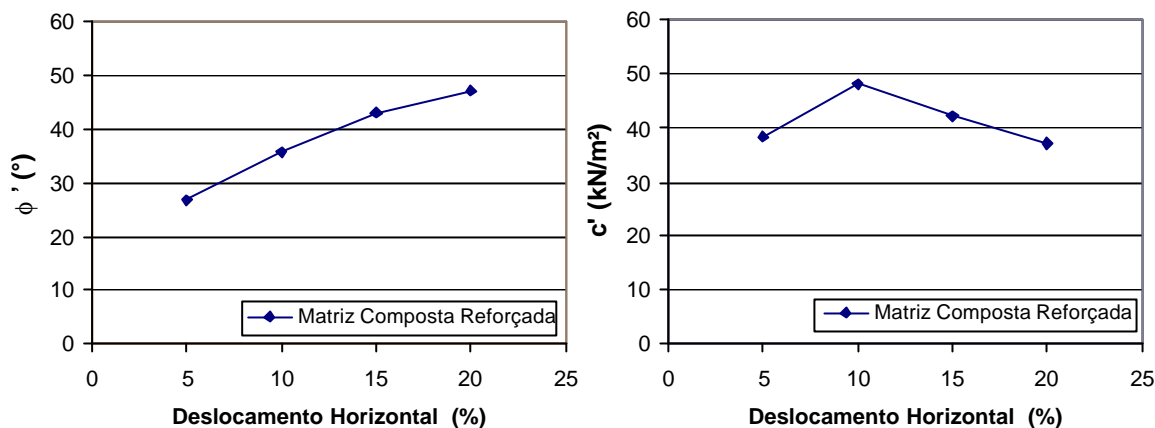


Figura V.47 – Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal - Matriz composta reforçada – Resíduos sólidos velhos.

Tabela V.18 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal - Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos.

PARAMETROS DE RESISTÊNCIA	DESLOCAMENTO HORIZONTAL (%)			
	5	10	15	20
ϕ' (°)	26,7	35,8	42,9	47,0
c' (kN/m ²)	38,4	48,1	42,1	37,1

Para o deslocamento horizontal máximo de ensaio, em torno de 20 % do comprimento da amostra, foi obtida a envoltória de resistência, definindo os parâmetros de resistência $c' = 37 \text{ kN/m}^2$ e $\phi' = 47^\circ$, conforme Figura V.48, para as amostras da matriz composta reforçada. Uma vez que o estado de ruptura não foi atingido para a maioria das tensões normais de ensaio, estes parâmetros foram determinados para deslocamentos de 20 %. A Tabela V.19 apresenta um resumo dos dados obtidos nos respectivos ensaios.

Comparando-se os resultados da matriz composta reforçada dos resíduos velhos aos obtidos na matriz básica e matriz composta destes resíduos em termos de parâmetros de resistência, a coesão da matriz composta reforçada, embora um pouco mais elevada, é da mesma ordem de valor das demais, enquanto que o ângulo de atrito é semelhante ao determinado na matriz composta. O efeito da adição e respectiva influência das fibras na matriz composta reforçada não geraram um aumento proporcional com respeito ao ângulo de atrito, pelo menos no que se refere aos resultados medidos até o deslocamento horizontal de 60 mm (20 %).

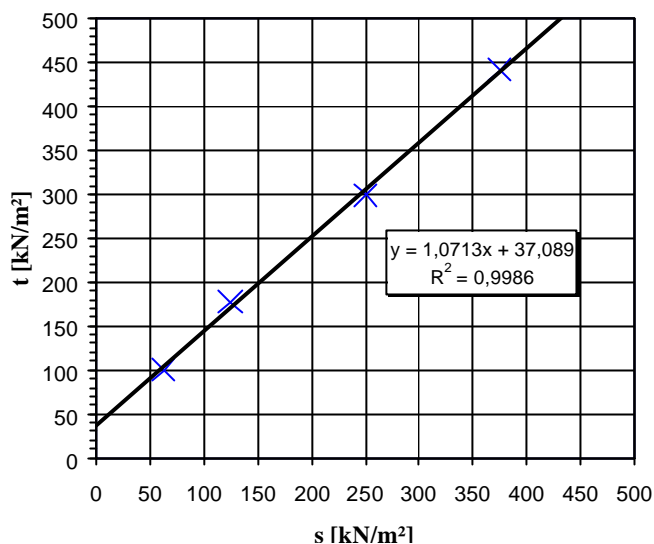


Figura V.48 – Envoltória de resistência – Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos.

Tabela V.19 – Resumo dos dados de ensaio de resistência – Matriz composta reforçada - Resíduos sólidos velhos.

MATERIAL	DADOS DE ENSAIO	s_N (kN/m ²)			
		50	100	200	300
Matriz Composta Reforçada Aterro de Ihlenberg	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	14,5	14,3	14,3	14,7
	γ_{seco} (kN/m ³)	11,1	10,8	10,9	11,0
	w_{antes} (%)	23,20	24,70	24,09	24,98
	w_{depois} (%)	22,70	24,04	23,20	22,57
	$h_{amostra}$ (cm)	13,35	13,00	13,50	13,10
	ϕ_h (%)	6,17	9,08	11,61	16,53
	ϕ' (°)	47,0			
	c' (kN/m ²)	37,0			

É bem provável que se as amostras da matriz composta reforçada, principalmente no que diz respeito aos ensaios nas tensões normais de 200 e 300 kN/m², tivessem sido submetidas a maiores deslocamentos horizontais (maior que 20 %), gerando assim maiores resistências, o ângulo de atrito teria sido maior, e a coesão um pouco mais baixa. Esta suposição pode ser demonstrada quando se admite, por exemplo, que as resistências máximas nas tensões de 200 e 300 kN/m² não são às correspondentes ao estado de ruptura do material, e assim seriam recalculadas por regressão linear. Recalculando-se as resistências nestas tensões, tomando-se por base os dados de ensaio nas tensões de 50 e 100 kN/m², seriam obtidos valores de resistências de 330,8 kN/m² ($s_N = 200$ kN/m²) e 484 kN/m² ($s_N = 300$ kN/m²). Para esta situação, ϕ' seria cerca de 50,8°, enquanto que c' de aproximadamente 24,3 kN/m². Em termos de coesão, este valor estaria mais compatível com os obtidos pela matriz básica e matriz composta, enquanto que o ângulo de atrito seria

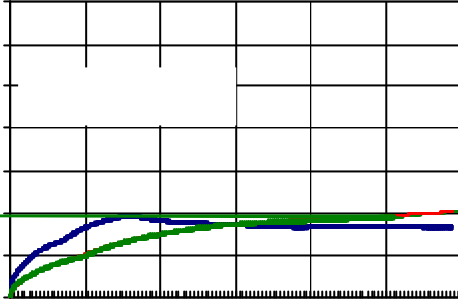
significativamente maior que ambas, indicando desta forma uma maior contribuição das fibras existentes na matriz composta reforçada.

5.3.2.2.1.4. COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para cada tensão normal aplicada, em termos da curva de tensão cisalhante ao longo do deslocamento horizontal, das diferentes amostras dos resíduos sólidos velhos do Aterro de Ihlenberg investigadas nesta pesquisa (matriz básica, matriz composta e composta reforçada) são mostrados na Figura V.49.

Com o aumento do deslocamento horizontal, porém em níveis ainda baixos, verifica-se que a resistência ao cisalhamento da matriz básica é mais significativa, quando comparada às resistências da matriz composta e composta reforçada dos resíduos velhos, indicando que a mobilização da resistência se dá inicialmente principalmente devido à matriz granular do resíduo sólido, conforme verifica-se na Figura V.49. Entretanto, quando os níveis de deslocamentos horizontais são mais elevados, a resistência sofre acréscimo devido às fibras. A resistência dos RSU é mobilizada primeiramente pelas propriedades de atrito do material, para baixos deslocamentos horizontais, e com o aumento dos deslocamentos do material, ela deve-se às forças de tração desenvolvidas nos componentes de reforço.

Na matriz básica, a tensão cisalhante cresce com o aumento do deslocamento horizontal, atingindo um valor máximo, e em seguida reduz até alcançar a resistência pós-pico, que mantém-se aproximadamente constante até o final do ensaio (Figura V.49). Este tipo de comportamento de pico não é constatado quando o material é composto não apenas pela matriz básica, mas também pela matriz fibrosa, como é o caso das amostras da matriz composta e composta reforçada. A resistência na matriz composta sofre um aumento com o deslocamento horizontal, sem atingir um pico, mas demonstrando uma leve tendência à estabilização nas tensões de 50 e 100 kN/m². No caso da matriz composta reforçada, a tensão cisalhante também cresce com os deslocamentos, porém, com exceção da tensão normal de 50 kN/m², não indica uma constância dos valores, mas sim uma tendência de aumento até mesmo para a condição final do ensaio, onde ocorreram 20 % de deslocamento horizontal do material.



à matriz de reforço foi superior à matriz granular apenas no final de ensaio, em 20 % do deslocamento horizontal. Pode-se ainda constatar na Figura V.49 que o aumento no teor de fibras, comparando-se a matriz composta e composta reforçada, forneceu curvas de resistências praticamente idênticas no caso dos ensaios na tensão de 50 kN/m². Isto significa que para este nível de tensão normal não houve uma influência dos diferentes teores de fibras destas duas matrizes. Entretanto, para tensões normais mais elevadas (100 e 200 kN/m²), as curvas de resistência possuem inclinação mais baixa na matriz composta reforçada, porém paralela às da matriz composta, ao longo dos deslocamentos horizontais. Mas a partir de maiores deslocamentos do material, cerca de 13 % (40 mm de deslocamento), as curvas de resistência da matriz composta reforçada superam as curvas correspondentes à matriz composta em termos de magnitude e continuam ascendentes. Tal comportamento indica que a maior quantidade de fibras na matriz composta reforçada exerceu um efeito mais significativo para o aumento da resistência. Analisando-se os dados obtidos na tensão normal de 300 kN/m², apenas no final do ensaio verificou-se que a resistência da matriz composta reforçada supera a correspondente da matriz composta. Por meio desta figura, fica mais clara a diferença do comportamento mecânico de cada tipo de material estudado, embora os parâmetros de resistência ao cisalhamento para o final de ensaio sejam de ordem relativamente semelhante.

A variação dos parâmetros de resistência das amostras dos resíduos sólidos velhos ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal está apresentada na Figura V.50. Os resultados indicam que a incorporação dos elementos de reforço não causou uma significativa alteração nos valores da coesão ao longo do deslocamento horizontal, com exceção do valor obtido em 10 % de deslocamento da matriz composta reforçada. Quanto ao ângulo de atrito, observa-se na Figura V.50 que há um crescimento do seu valor à medida que são acrescidos os deslocamentos horizontais nas amostras com elementos de reforço.

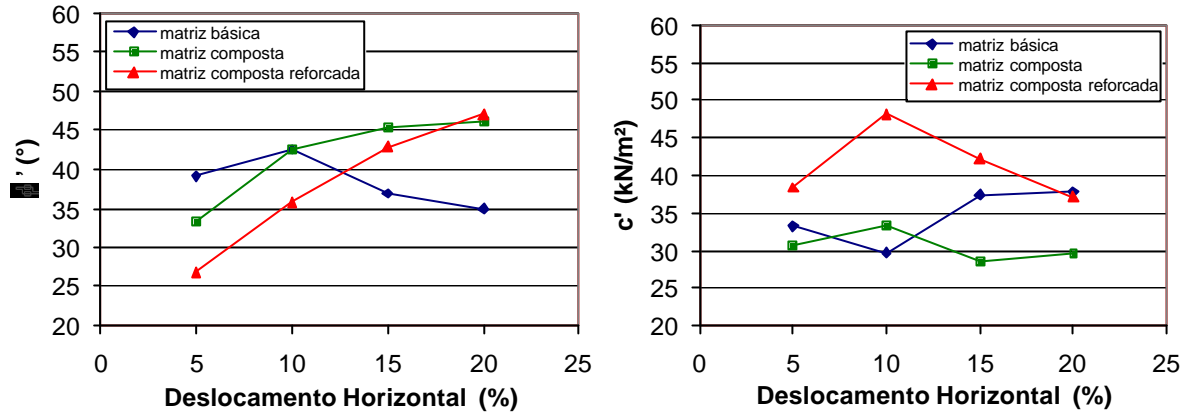


Figura V.50 – Comparação da variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Resíduos sólidos velhos.

A Figura V.51 apresenta as envoltórias de resistência das amostras da matriz básica, composta e composta reforçada dos resíduos sólidos velhos, tanto com respeito aos dados originais de ensaio, bem como aqueles resultantes das interpretações e previsões por regressão linear. Para esta situação, não foram considerados os dados com respeito à tensão normal de 50 kN/m^2 (no caso da matriz básica), enquanto que para a matriz composta reforçada, os valores da resistência para as tensões normais de 200 e 300 kN/m^2 foram obtidos por meio de regressão linear. Na Tabela II.20 são mostrados os parâmetros de resistência em termos de c' e ϕ' para as amostras dos resíduos velhos, em ambas as situações. O acréscimo do ângulo de atrito, embora que pequeno, quando se comparam os resultados para os três tipos de material, pode ser atribuído ao efeito da inclusão do material de reforço nas matrizes composta e composta reforçada.

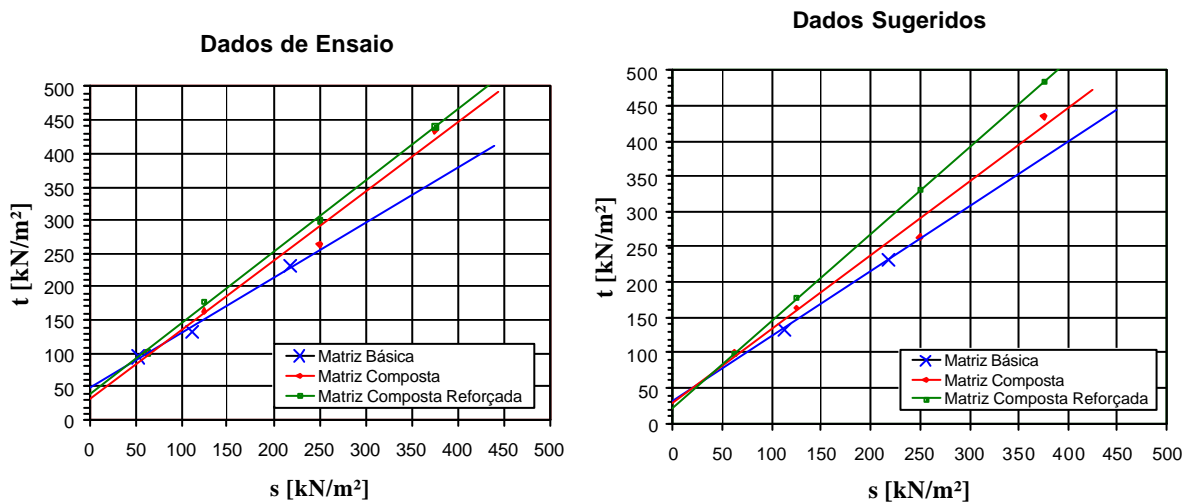


Figura V.51 – Comparação das envoltórias de resistência das amostras de resíduos sólidos velhos obtidas pelos dados de ensaio e por aqueles sugeridos pela interpretação.

Tabela V.20 – Resumo dos parâmetros de resistência para as amostras de resíduos sólidos velhos.

AMOSTRA	g_{seco} (kN/m ²)	DADOS DE ENSAIO		DADOS SUGERIDOS*	
		f' (°)	c' (kN/m ²)	f' (°)	c' (kN/m ²)
Matriz Básica	13,3 – 13,4	39,5	47,3	42,5	29,7
Matriz Composta	12,6 – 12,9	46,1	29,6	46,1	29,6
Matriz Composta Reforçada	10,8 – 11,1	47,0	37,1	50,8	24,3

* Valores sugeridos após análises, interpretações e regressões lineares dos dados originais de ensaio.

De acordo com as recomendações da Sociedade Alemã de Geotecnia, GDA E 2-23 (DGGT, 1994), conforme comentadas no Capítulo III, as envoltórias de resistência das amostras dos resíduos sólidos velhos do Aterro de Ihlenberg (Figura V.51) sugerem que se trata de resíduos sólidos que apresentam comportamento isotrópico. A coesão das fibras que surge em materiais reforçados, pode ser normalmente constatada através de envoltórias paralelas, quando se compara o material com e sem reforço em determinados níveis de tensão normal, porém tal comportamento não foi verificado para as amostras dos resíduos sólidos velhos, pelo menos para os níveis de tensões normais estudados. As envoltórias de ruptura poderiam assim ser analisadas em função dos parâmetros de resistências conforme Mohr-Coulomb, obtidos em ensaios com equipamento de cisalhamento direto e triaxial.

Os parâmetros em termos de coesão das amostras dos resíduos sólidos velhos, segundo Tabela V.20, estão dentro da faixa de valores sugeridos segundo GDA E 2-35 (DGGT, 1994) para resíduos sólidos de comportamento isotrópico (Tabela III.1), onde a coesão varia de 22 a 35 kN/m², enquanto que o ângulo de atrito de 22° a 35°, para 20 % de deslocamento horizontal do material. No caso do ângulo de atrito das amostras dos resíduos sólidos velhos investigados, os valores foram ainda superiores. A causa poderia ser atribuída em função dos altos valores de peso específico, comparados aos normalmente encontrados na literatura. COLLINS & KÖLSCH (1996) obtiveram também valores de ângulo de atrito elevados para resíduo sólido velho, degradado, de 38° a 40°, e a coesão situou-se em torno de 15 kN/m². GABR & VALERO (1995), em ensaios com amostras de resíduos com idade de 15 a 30 anos, determinaram ângulo de atrito máximo de 39° e coesão máxima de 27,5 kN/m². Os resultados de resistência das amostras de resíduos sólidos velhos do Aterro de Ihlenberg estão de uma forma geral coerentes com alguns dados da literatura.

Apesar de não terem sido realizados ensaios de tração nesta pesquisa, é possível a determinação do ângulo de tração θ , seguindo o modelo de KÖLSCH (1993, 1995, 1996), da matriz de reforço das amostras dos resíduos velhos, pois em ensaios de cisalhamento direto há um registro parcial da ativação das fibras. Como foram realizados nesta pesquisa ensaios tanto na matriz granular do resíduo sólido (matriz básica) como nas matrizes composta e composta reforçada, as quais são constituídas da matriz granular e matriz fibrosa (reforço), pode-se medir o ângulo de tração. É importante ressaltar que consiste apenas em uma estimativa do ângulo de tração, que é parcialmente registrado neste tipo de investigação. Conforme já discutido no capítulo III, o ângulo de tração θ descreve as propriedades de tração assim como o ângulo de atrito ϕ descreve a parcela de atrito da resistência do material. Ele é medido como a declividade da relação linear entre a resistência devido aos elementos de reforço e a tensão normal. A diferença entre as resistências ao cisalhamento da matriz básica e da matriz composta representa a resistência ocasionada pela força de tração dos materiais fibrosos da matriz composta, que foi registrada nestes ensaios de cisalhamento. Baseando-se nos dados das envoltórias de resistência da Figura V.51, o ângulo de tração ζ da matriz composta corresponderia a aproximadamente 7° , em ambos os casos de dados originais e sugeridos, e da matriz composta reforçada em torno de $11,5^\circ$ (dados originais) e 16° (dados sugeridos).

No caso da matriz composta reforçada (MR/MB= 8 %), o fato de haver uma maior quantidade de fibras comparada às amostras da matriz composta (MR/MB= 3 %), provocou um aumento no ângulo de tração. Estes valores são típicos para resíduos sólidos velhos, com estado avançado de degradação da matéria orgânica. Para efeito de comparação, o ângulo de tração para resíduos novos, com alto teor de fibras, situa-se em torno de 35° , conforme Figura III.13 (KÖLSCH, 1996), ou seja, valores mais elevados quando comparados aos resíduos do Aterro de Ihlenberg, que são classificados como resíduo sólido antigo, bastante degradado, e com baixo teor de fibras. KÖLSCH (2003) obteve valores semelhantes para resíduos sólidos deste mesmo aterro, por meio de ensaios de tração de grandes dimensões, com ângulo de tração na faixa de $5 - 14^\circ$.

De uma forma geral, os resultados dos ensaios de resistência nos resíduos sólidos velhos investigados nesta pesquisa indicam que, apesar de terem sido investigadas amostras com diferentes características, como por exemplo, tamanho das partículas, peso específico e porcentagem de reforço de fibras, trata-se de um material bem estabilizado, que possui valores de resistência de ordem similar.

5.3.2.2.2. RESÍDUOS SÓLIDOS PRÉ-TRATADOS MECÂNICA E BIOLÓGICAMENTE - ATERRO DE BUCHEN

5.3.2.2.2.1. MATRIZ BÁSICA

Os ensaios de resistência nas amostras da matriz básica dos resíduos sólidos pré-tratados mecânica e biologicamente do Aterro de Buchen, conforme já comentado no Capítulo de Metodologia dos Ensaios e Materiais, foram realizados em equipamento de cisalhamento direto convencional (pequena escala). Os resultados destes ensaios serão aqui apresentados e discutidos, embora o item corresponda aos ensaios realizados em equipamento de maiores dimensões, a fim de facilitar a visualização e comparação dos mesmos com os correspondentes às outras amostras investigadas dos resíduos pré-tratados (matriz composta 1 e 2), que foram executadas na caixa de cisalhamento de maiores dimensões.

As curvas tensão cisalhante ao longo do deslocamento horizontal das amostras dos resíduos sólidos pré-tratados, referentes à matriz básica, para as diferentes tensões normais aplicadas, estão mostradas na Figura V.52. A resistência ao cisalhamento cresce com o aumento do deslocamento horizontal do material, atingindo um valor máximo para deslocamentos entre 13 e 14 mm, nas tensões normais de 100 e 200 kN/m², enquanto que em 300 kN/m² há uma tendência de que o valor máximo de resistência ocorreu próximo de 20 mm (20 % do comprimento da amostra). A matriz básica dos resíduos sólidos pré-tratados, embora possua partículas de dimensões inferiores a 8 mm, possui pequenos materiais fibrosos, como plásticos, madeira, que poderiam provocar um aumento da resistência, sem um definido comportamento de pico. Pelo fato dos ensaios na matriz básica dos resíduos pré-tratados terem sido executados em equipamento de cisalhamento direto de pequenas dimensões (convencional), estes pequenos materiais de característica de reforço se tornam mais significativos, do que, por exemplo, se tivessem sido realizados no equipamento de maiores dimensões, utilizado também nesta pesquisa. Para efeito de comparação, no caso da matriz básica dos resíduos sólidos velhos, o máximo de resistência foi atingido já para os deslocamentos horizontais iniciais da amostra, pois a quantidade de fibras existente neste material era inferior a dos resíduos sólidos pré-tratados, além do que há uma quantidade significativa de solo em sua composição. Isto pode ser visualizado através das Fotos IV.17A e IV.19A, que mostram as amostras das matrizes básicas dos resíduos velhos e pré-tratados, respectivamente, no Capítulo IV. É possível que a existência destas pequenas fibras nas

amostras de resíduos sólidos pré-tratados retarde o alcance máximo da resistência para maiores deslocamentos horizontais. No caso da curva de resistência na tensão normal de 300 kN/m², Figura V.52, os dados demonstram que o valor máximo de resistência ocorreu para deslocamentos horizontais entre 17 e 19 mm. Não foi possível uma análise dos deslocamentos verticais durante a fase de cisalhamento das amostras por causa das limitações do tipo de equipamento de cisalhamento direto utilizado nestes ensaios, conforme já comentado no capítulo de Metodologia dos Ensaio e Materiais.

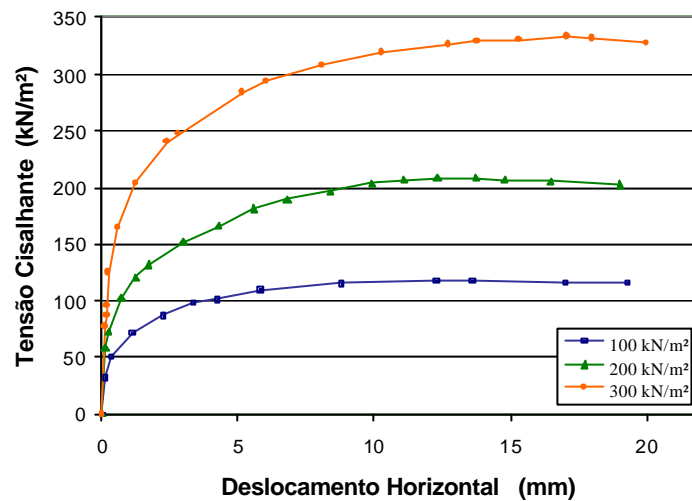


Figura V.52 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Matriz básica – Resíduos sólidos pré-tratados.

A envoltória de resistência resultante dos ensaios de cisalhamento direto das amostras da matriz básica dos resíduos sólidos pré-tratados está ilustrada na Figura V.53, e um resumo dos dados obtidos nos ensaios está indicado na Tabela V.21. Os parâmetros de resistência obtidos desta envoltória de resistência foram aproximadamente $c' = 16 \text{ kN/m}^2$ e $\phi' = 40^\circ$. Estes valores são semelhantes à faixa sugerida para resíduos sólidos pré-tratados mecânica e biologicamente, segundo a GDA E 2-35 (DGGT, 1994), obtida por estudos em diferentes aterros da Alemanha para a matriz básica, com valores de 10 a 15 kN/m² para a coesão, e entre 30 a 35° para ângulo de atrito.

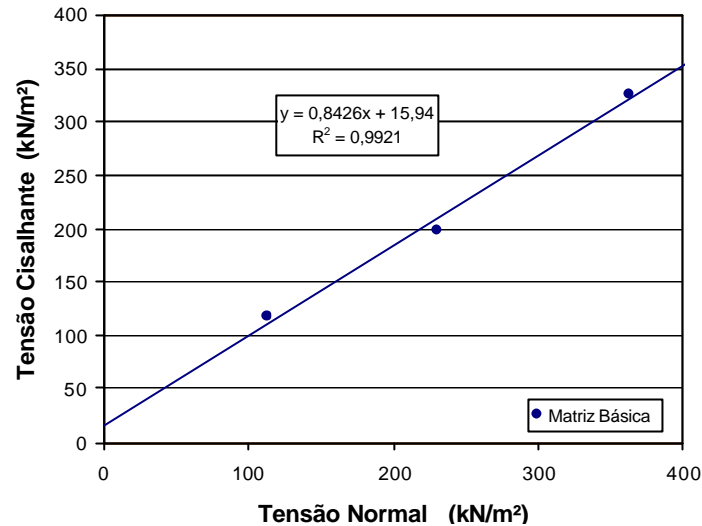


Figura V.53 – Envoltória de resistência – Matriz básica – Resíduos sólidos pré-tratados.

Tabela V.21 – Resumo dos dados de ensaio de resistência – Matriz básica - Resíduos sólidos pré-tratados.

MATERIAL	DADOS DE ENSAIO	s_N (kN/m ²)		
		100	200	300
Matriz Básica Aterro de Buchen	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	14,5	14,5	14,5
	γ_{seco} (kN/m ³)	9,2	9,2	9,2
	w_{antes} (%)	36,55	36,55	36,55
	w_{depois} (%)	36,20	34,08	33,17
	$h_{amostra}$ (cm)	2,7	3,2	3,0
	ϕ' (°)	40,1		
	c' (kN/m ²)	15,9		

As envoltórias de resistência para os diferentes níveis de deslocamento horizontal da matriz básica dos resíduos pré-tratados e os valores da tensão cisalhante determinados nestes ensaios estão apresentados na Figura V.54 e Tabela V.22, respectivamente. A variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (c' e ϕ'), ao longo destes diferentes níveis de deslocamento horizontal, e os correspondentes valores são mostrados, respectivamente, na Figura V.55 e Tabela V.23.

A resistência da matriz básica dos resíduos sólidos pré-tratados cresce à medida que o material é cisalhado, e também com o aumento da tensão normal aplicada (Tabela V.22). O ângulo de atrito mantém-se praticamente constante com aumento do deslocamento horizontal; quanto à coesão, ocorre uma redução ao longo dos deslocamentos, com valores que se situam num intervalo entre 6,0 e 14,6 kN/m² (Figura V.55 e Tabela V.23)

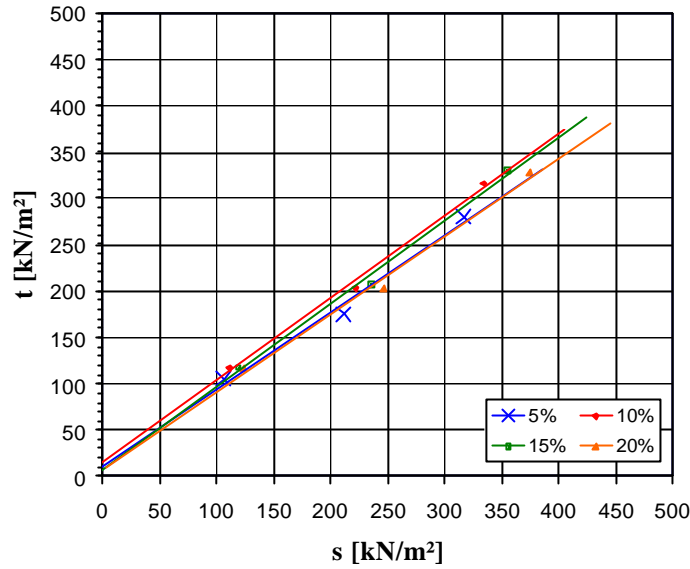


Figura V.54 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos pré-tratados.

Tabela V.22- Valores de tensão cisalhante ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas – Matriz Básica - Resíduos sólidos pré-tratados.

TENSÃO NORMAL DE CONSOLIDAÇÃO s_N (kN/m²)	t (kN/m²)			
	5%	10%	15%	20%
100	105	117,7	118	116
200	175	203,4	207	203
300	280	316	330	327,5

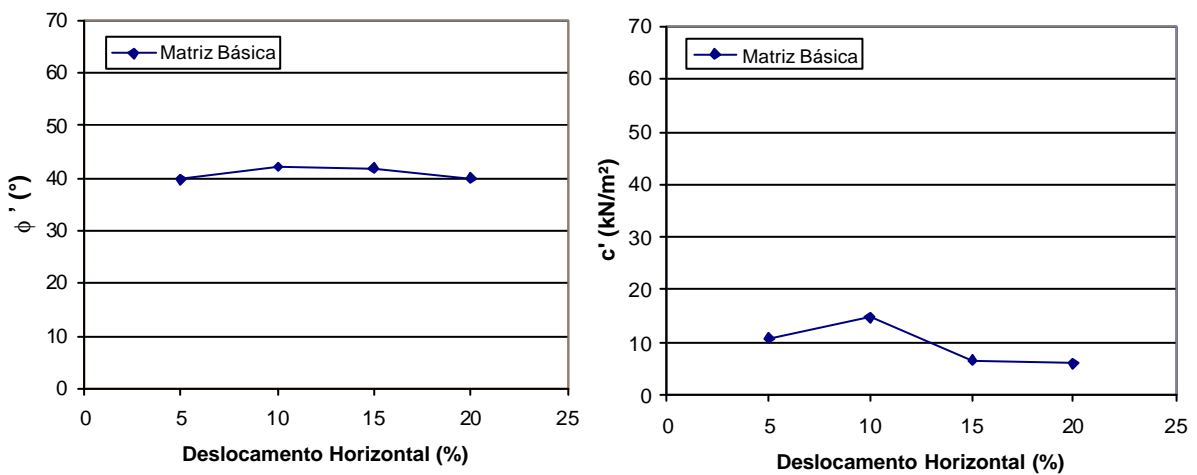


Figura V.55 – Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica – Resíduos sólidos pré-tratados.

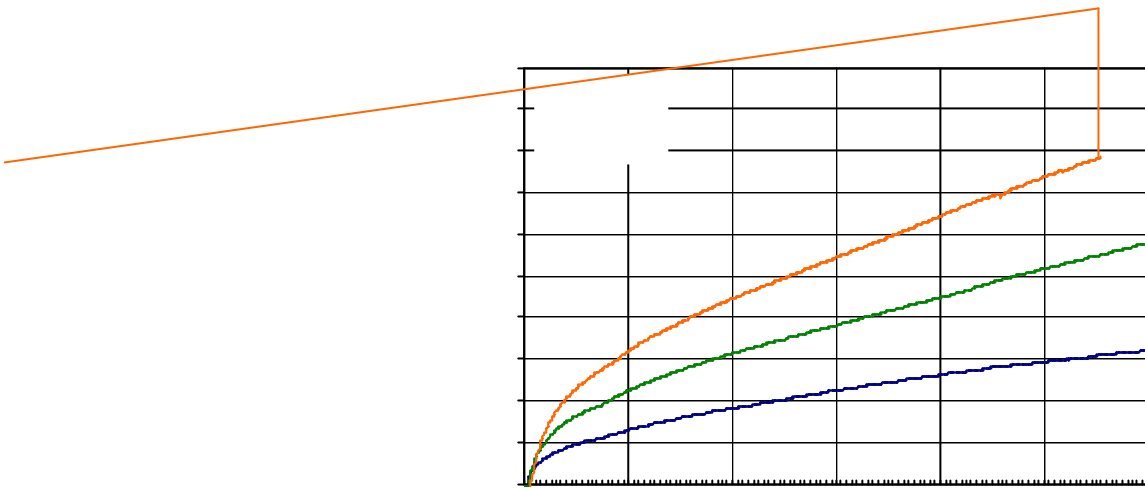
Tabela V.23 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz básica - Resíduos sólidos pré-tratados.

PARAMETROS DE RESISTÊNCIA	DESLOCAMENTO HORIZONTAL (%)			
	5	10	15	20
ϕ' (°)	39,8	42,1	41,9	40,1
c' (kN/m ²)	10,8	14,6	6,7	6,0

5.3.2.2.2.2. MATRIZ COMPOSTA 1

As Figuras V.56 e V.57 apresentam respectivamente as curvas de tensão cisalhante e deslocamento vertical ao longo do deslocamento horizontal das amostras dos resíduos sólidos pré-tratados do Aterro de Buchen, nas tensões normais de ensaio 100, 200 e 300 kN/m², correspondentes à matriz composta 1 ($F < 40\text{mm}$), cuja matriz de reforço representa 20 % do material (em termos de peso seco). A resistência aumenta com o deslocamento horizontal, sem atingir a ruptura, até mesmo para deslocamentos da ordem de 20 % do comprimento da amostra, ou seja, 60 mm (Figura V.56). Este é um comportamento típico para materiais como resíduos sólidos. Ensaio de resistência da literatura mostram que materiais como resíduos sólidos podem sustentar grandes deslocamentos cisalhantes, excedendo a 20 %, sem mobilizar a tensão cisalhante de pico, conforme MANASSERO et al. (1996).

As fibras existentes nos resíduos sólidos pré-tratados, da mesma forma como ocorreu em amostras da matriz composta reforçada dos resíduos sólidos velhos, necessitam de grandes níveis de deslocamento horizontal do material para serem ativadas, e assim proporcionar ao material um aumento significativo da resistência quando comparada à matriz básica. Uma comparação entre as curvas de resistência dos três tipos de amostras estudadas nos resíduos pré-tratados do Aterro de Buchen será realizada posteriormente, e permitirá uma melhor visualização deste comportamento. Nas curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, o comportamento é de compressão em todas as tensões normais de ensaio, como pode ser observado na Figura V.57.



ensaio, ou seja, cerca de 20 %, um valor de pico tenha sido alcançado. Tal característica também foi constatada nas amostras da matriz composta reforçada dos resíduos sólidos velhos. A Figura V.59 e Tabela V.25 apresentam, respectivamente, a variação dos parâmetros de resistência ao longo dos diferentes níveis de deslocamento horizontal e seus respectivos valores absolutos.

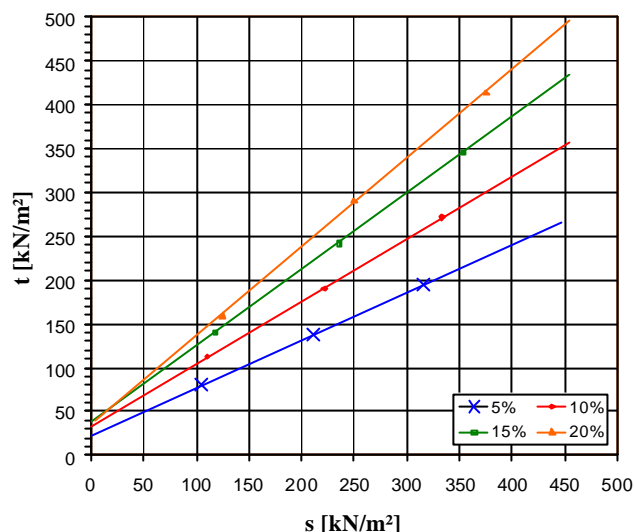


Figura V.58 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 1 - Resíduos sólidos pré-tratados.

Tabela V.24 - Valores de tensão cisalhante ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas – Matriz composta 1 – Resíduos pré-tratados.

TENSÃO NORMAL DE CONSOLIDAÇÃO s_N (kN/m ²)	t (kN/m ²)			
	5%	10%	15%	20%
100	79,7	112,8	139,9	160,3
200	137,4	190,9	242,3	290,7
300	194,9	272,0	346,2	413,8

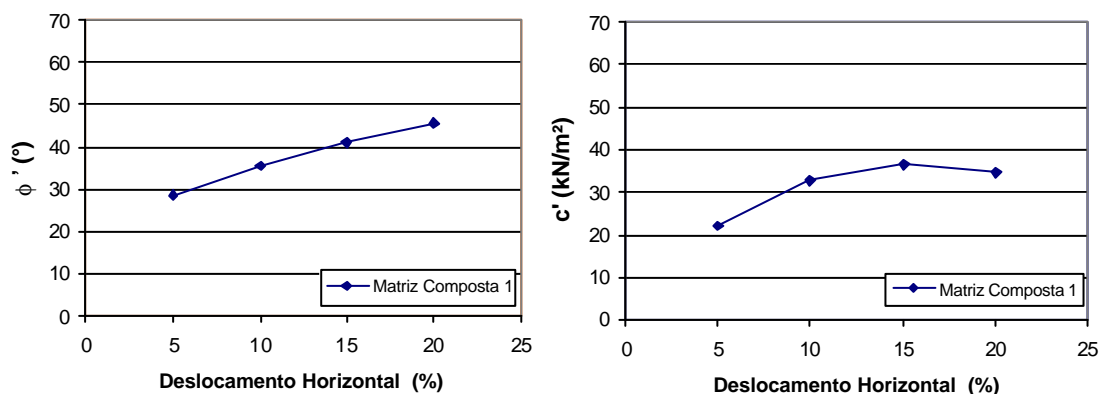


Figura V.59 – Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 1 - Resíduos sólidos pré-tratados.

Tabela V.25 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 1 - Resíduos sólidos pré-tratados.

PARAMETROS DE RESISTÊNCIA	DESLOCAMENTO HORIZONTAL (%)			
	5	10	15	20
ϕ' (°)	28,7	35,6	41,2	45,4
c' (kN/m ²)	22,1	32,7	36,4	34,7

A Figura V.60 apresenta a envoltória de resistência resultante dos ensaios nas amostras da matriz composta 1 dos resíduos sólidos pré-tratados para o máximo de deslocamento do equipamento, cerca de 20 % do comprimento da amostra. O diagrama fornece parâmetros de resistência em termos de c' e ϕ' , com valores de 34,7 kN/m² e 45,4°, respectivamente. Um resumo dos parâmetros de ensaios medidos em cada tensão normal aplicada é visualizado na Tabela V.26.

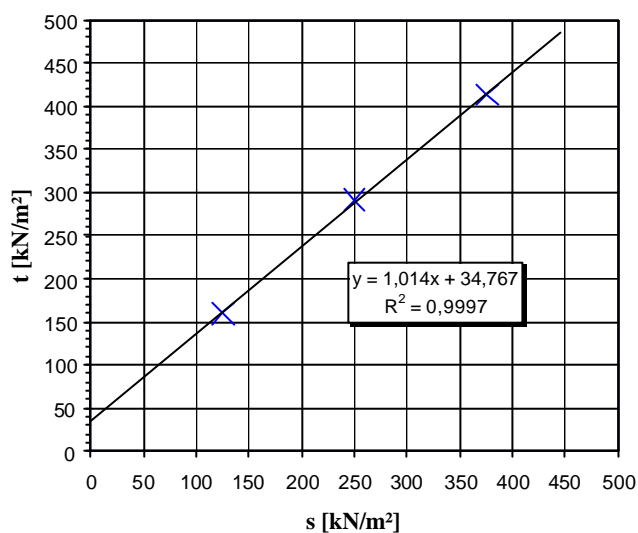
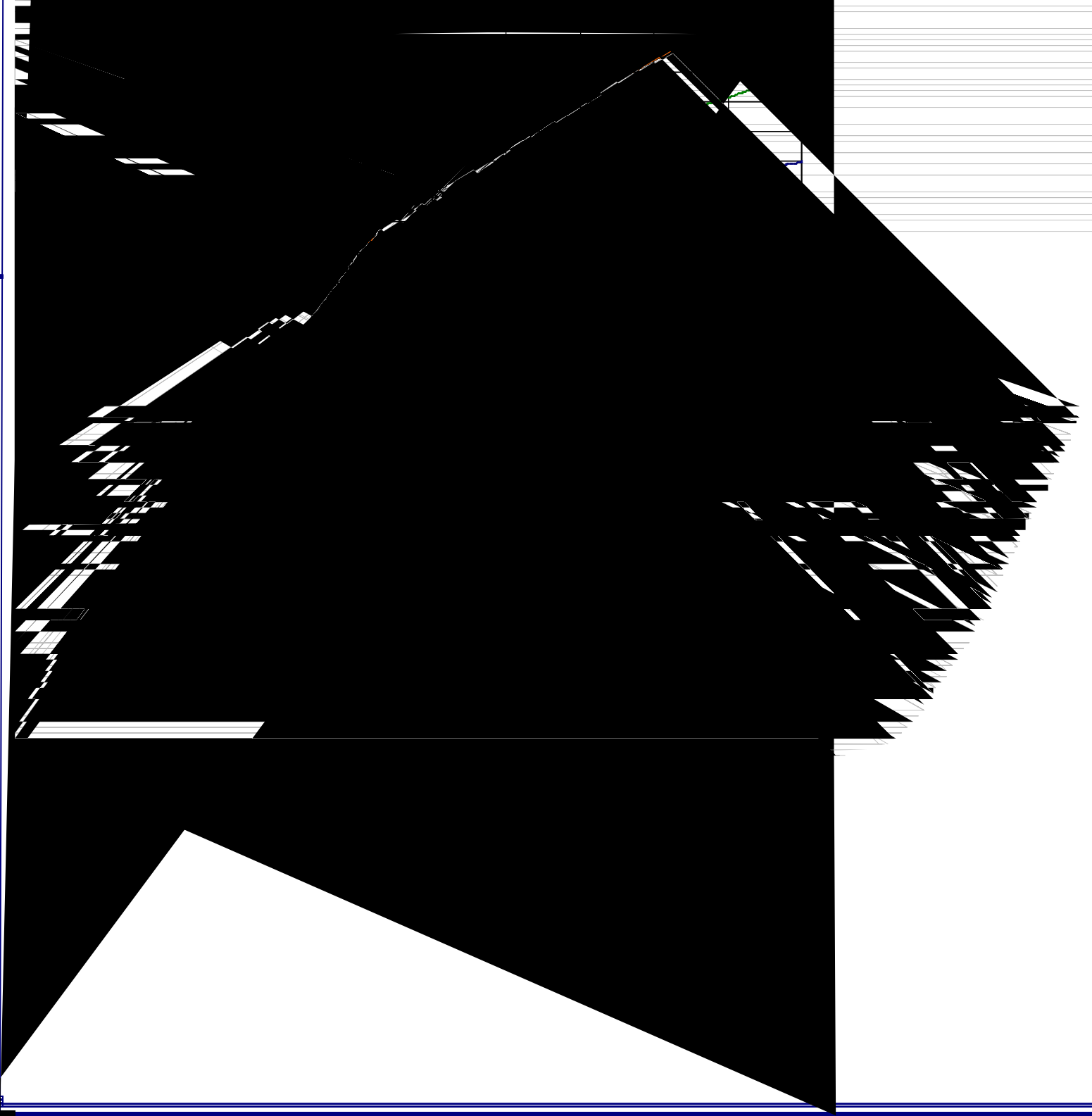


Figura V.60 – Envoltória de resistência – Matriz composta 1 - Resíduos sólidos pré-tratados.

Tabela V.26 – Resumo dos dados de ensaio de resistência – Matriz composta 1 - Resíduos sólidos pré-tratados.

MATERIAL	DADOS DE ENSAIO	s_N (kN/m ²)

m) dos resíduos
forço equivale a
reto, podem ser
al ao longo do



Os valores de resistência da matriz composta 2 são crescentes com o deslocamento horizontal na fase de cisalhamento, sem apresentar máximo de ruptura, nem mesmo para deslocamentos da ordem de 20 %, ou seja, 60 mm, Figura V.61. Em todas as três tensões normais de ensaio fica evidenciado este comportamento, que teve a influência da ativação das fibras para incremento da resistência do material. O mesmo tipo de evolução das curvas de resistência também foi constatado para a matriz composta 1 dos resíduos pré-tratados. O reforço neste material também necessita de deslocamentos cisalhantes mais elevados para ser ativado, como também verificado nas demais amostras de resíduos sólidos (no que se refere às matrizes compostas) investigadas nesta pesquisa. As amostras da matriz composta 2 do resíduos pré-tratados mostraram compressão e dilatância durante a fase de cisalhamento para a tensão normal de 100 kN/m^2 , já nas tensões mais elevadas o comportamento foi principalmente de compressão.

Analisando-se as envoltórias de resistência em diferentes níveis de deslocamento horizontal da matriz composta 2, Figura V.63, observa-se que a coesão cresce com o aumento do deslocamento do material, variando de 32 a 63 kN/m^2 , e que o acréscimo destes deslocamentos cisalhantes gera também um aumento do ângulo de atrito. Esta evolução ascendente de ambos os parâmetros de resistência é uma consequência da inclusão dos componentes de reforço na matriz básica dos resíduos sólidos pré-tratados. Os valores da tensão cisalhante para cada tensão normal, em diferentes níveis de deslocamento horizontal, estão na Tabela V.27.

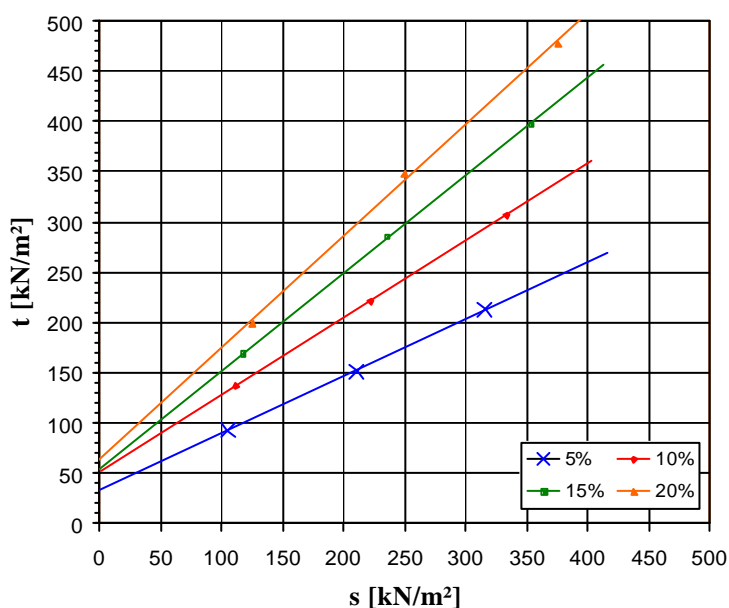


Figura V.63 – Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 2 - Resíduos sólidos pré-tratados.

Tabela V.27- Valores de tensão cisalhante ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal para as tensões normais aplicadas – Matriz composta 2 - Resíduos sólidos pré-tratados.

TENSÃO NORMAL DE CONSOLIDAÇÃO s_N (kN/m ²)	t (kN/m ²)			
	5%	10%	15%	20%
100	92,9	136,2	168,4	199,4
200	151,1	220,5	286,2	347,4
300	212,8	307,1	397,6	477,9

A Figura V.64 e a Tabela 28 apresentam, respectivamente, a variação dos parâmetros de resistência da matriz composta 2 em diferentes níveis de deslocamento horizontal e seus valores absolutos. Ambos parâmetros de resistência apresentam um crescimento com o aumento do deslocamento horizontal do material. O aumento da coesão é decorrente da coesão das fibras que surge devido à tensão de tração desenvolvida nos materiais de reforço, os quais constituem a matriz fibrosa da matriz composta 2 dos resíduos pré-tratados.

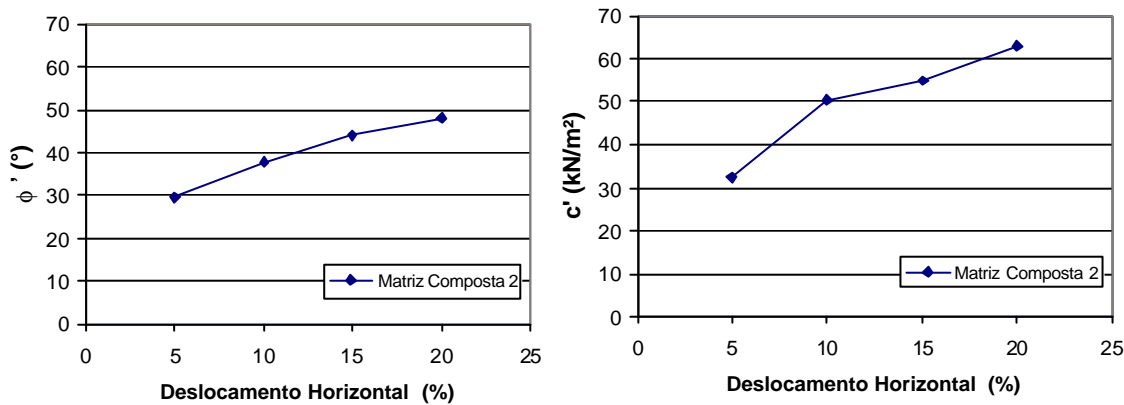


Figura V.64 – Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 2 - Resíduos sólidos pré-tratados.

Tabela V.28 – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta 2 - Resíduos sólidos pré-tratados.

PARAMETROS DE RESISTÊNCIA	DESLOCAMENTO HORIZONTAL (%)			
	5	10	15	20
ϕ' (°)	29,7	37,6	44,2	48,1
c' (kN/m ²)	32,3	50,3	54,9	63

Os parâmetros de resistência da matriz composta 2 dos resíduos sólidos pré-tratados, para a condição máxima de deslocamento em 20 %, foram definidos no diagrama de tensões cisalhante e normal (Figura V.65) e correspondem a aproximadamente $c' = 63$ kN/m² e

$\phi' = 48^\circ$. Os dados obtidos nos ensaios da matriz composta 2 dos resíduos sólidos pré-tratados estão sumarizados na Tabela V.29.

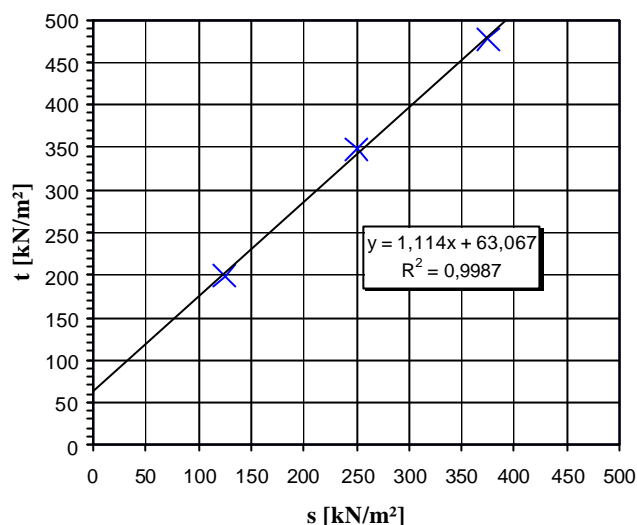


Figura V.65 – Envoltória de resistência – Matriz composta 2 - Resíduos sólidos pré-tratados.

Tabela V.29 – Resumo dos dados de ensaio de resistência – Matriz composta 2 - Resíduos sólidos pré-tratados.

MATERIAL	DADOS DE ENSAIO	s_N (kN/m ²)		
		100	200	300
Matriz Composta 2 Aterro de Buchen	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	13,6	13,3	14,3
	γ_{seco} (kN/m ³)	8,8	8,5	8,9
	w_{antes} (%)	34,92	36,10	37,80
	w_{depois} (%)	32,82	31,20	30,14
	$h_{amostra}$ (cm)	13,50	13,20	13,00
	θ (%)	7,75	14,35	19,61
	ϕ' (°)	48,1		
	c' (kN/m ²)	63,1		

5.3.2.2.2.4. COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS

Uma comparação das curvas tensão cisalhante ao longo do deslocamento horizontal dos três tipos de amostras investigadas nos resíduos sólidos pré-tratados do Aterro de Buchen (matriz básica, matriz composta 1 e matriz composta 2) está apresentada na Figura V.66. Os gráficos foram plotados em diferentes escalas para a resistência, nas diferentes tensões normais aplicadas, para efeito de uma melhor visualização dos resultados.

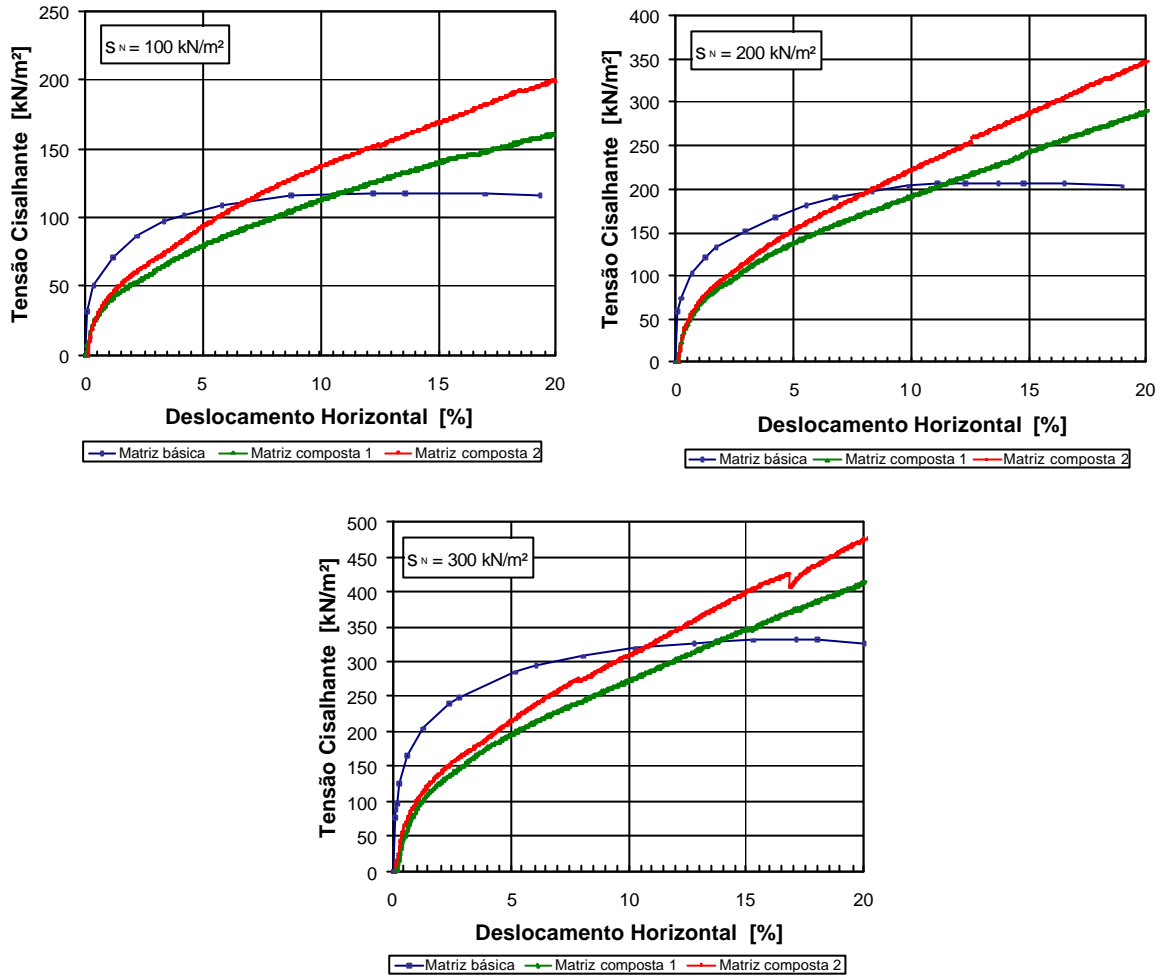


Figura V.66 – Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal das amostras dos resíduos sólidos pré-tratados.

Verifica-se na Figura V.66 que o comportamento mecânico da matriz básica dos resíduos sólidos pré-tratados é bem diferente do que ocorre para as matrizes composta 1 e 2, cujas composições têm ainda a contribuição de elementos de reforço (plásticos, galhos de madeira, tecidos, dentre outros). Na matriz básica, a tensão cisalhante aumenta até um valor máximo, permanecendo praticamente constante com o aumento do deslocamento. As curvas das matrizes compostas mostram que a resistência cresce com o deslocamento horizontal, sem atingir o estado de ruptura do material. Além disto, as curvas das matrizes compostas 1 e 2 foram paralelas entre si em todas as tensões normais, o que sugere que o material se comporta de forma semelhante (qualitativamente) independentemente da quantidade de fibras. Porém, dependendo do teor de fibras, pode-se atingir valores maiores ou menores de resistência. A matriz composta 2, que possui cerca de 10 % de teor de fibras, apresentou maior valor da resistência em todos os ensaios, quando comparado aos dados da matriz composta 1, cujo teor de fibras é o dobro, 20 %. O valor da resistência da matriz composta 2 foi superior em média

20 %. A matriz composta 1 demonstra visualmente que a quantidade de plásticos, têxteis, dentre outros materiais tipo reforço, é bastante significativa em volume, uma vez que as mesmas são relativamente leves, Foto IV.19 do Capítulo Metodologia dos Ensaio e Materiais. É bem provável que devido a este alto teor de fibras, comparado às outras amostras da matriz composta 2, grande parte dos elementos de reforço tenha deslizado entre si durante o cisalhamento, ao invés de terem sido tracionados para gerar aumento da resistência. Isto acarretou em valores de resistência mais baixa do que o esperado.

Ainda sobre a Figura V.66, pode-se afirmar que para mais baixos níveis de deslocamento horizontal do material é a matriz básica (granular), ou seja, as propriedades de atrito interno, que mobiliza a resistência dos resíduos sólidos estudados, enquanto que para deslocamentos maiores, é principalmente a matriz de reforço que influencia a resistência. A matriz composta 1 necessita de deslocamento horizontal entre 11 a 14 % para que a sua matriz de reforço mobilize a resistência do material, enquanto que para a matriz composta 2 são necessários entre 7 a 11 % de deslocamento do material.

Uma comparação da variação dos parâmetros de resistência ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal das amostras de resíduos sólidos pré-tratados está apresentada na Figura V.67. Verifica-se que nas amostras constituídas de material granular e fibras (Matriz composta 1 e 2) houve um acréscimo nos valores dos parâmetros de resistência com o aumento dos níveis de deslocamento horizontal. O aumento da coesão é possivelmente decorrente da coesão das fibras, a qual origina-se da resistência à tração dos materiais de reforço existentes nas amostras. Este mesmo comportamento não foi observado para a amostra de resíduo sólido constituída apenas por material granular (Matriz básica).

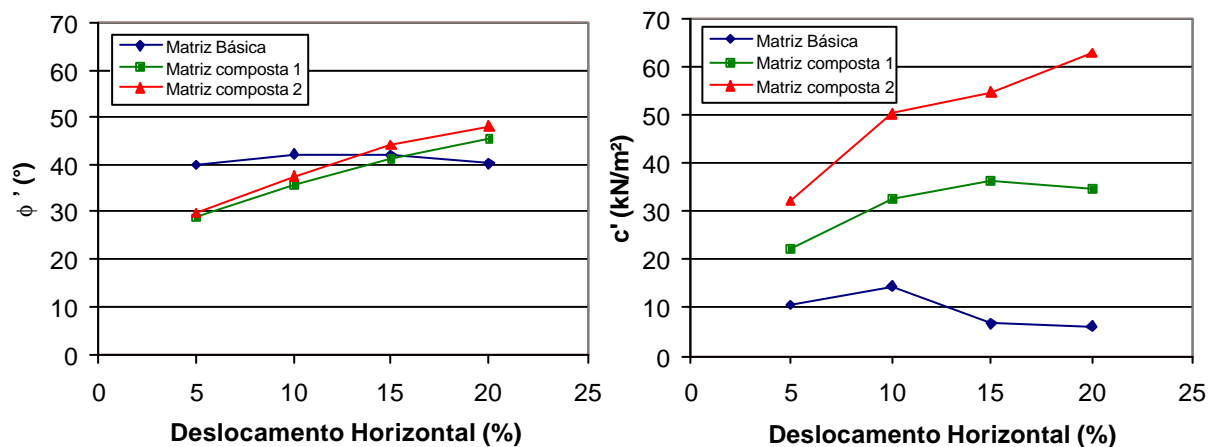


Figura V.67 – Comparação da variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Amostras de resíduos sólidos pré-tratados.

As envoltórias de resistência das amostras da matriz básica, composta 1 e composta 2 dos resíduos sólidos pré-tratados são comparadas na Figura V.68, e um resumo dos parâmetros de resistência estão indicados na Tabela II.30.

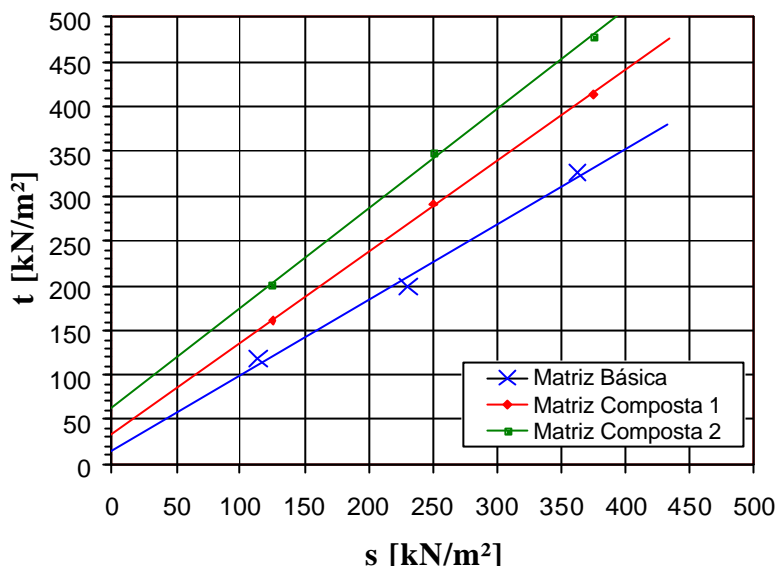


Figura V.68 – Comparação das envoltórias de resistência das diferentes amostras de resíduos sólidos pré-tratados investigadas.

Tabela V.30 – Resumo dos parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de cisalhamento das amostras de resíduos sólidos pré-tratados.

AMOSTRA	g_{seco} (kN/m ²)	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)
Matriz Básica	9,2	40,1	16,0
Matriz Composta 1	7,5 – 7,8	45,4	34,7
Matriz Composta 2	8,5 – 8,9	48,1	63,1

O valor de $c' = 16 \text{ kN/m}^2$ e $\phi' = 40,1^\circ$ devido ao material granular, ou seja, à matriz básica dos resíduos (Tabela V.30) é compatível para resíduos pré-tratados mecânica e biologicamente da literatura, segundo GDA E 2-35, DGGT 1994 ($c' = 10 - 15 \text{ kN/m}^2$; $\phi' = 30 - 35^\circ$), embora ϕ' tenha sido um pouco mais elevado no caso das amostras desta pesquisa. O intercepto coesivo c' medido nas matrizes compostas 1 e 2 foi de 34,7 e 63,1 kN/m^2 , enquanto ϕ' atingiu $45,4^\circ$ e $48,1^\circ$, respectivamente, conforme Tabela V.30. Valores semelhantes da coesão e ângulo de atrito, compilados da literatura, para as matrizes compostas dos resíduos pré-tratados, mecânica e biologicamente, foram medidos por SCHEELHAASE et al. (2001), citado em DE LAMARETO NETO (2004), em amostras de

$\varnothing_{\text{máx}} \leq 60 \text{ mm}$ ($c' = 39,34 - 54,18 \text{ kN/m}^2$; $\phi' = 39,04 - 43,35$) e de $\varnothing_{\text{máx}} \leq 100 \text{ mm}$ ($c' = 32,86 - 45,04 \text{ kN/m}^2$; $\phi' = 38,55 - 40,33$), e por KLUMPFER (1998) em amostras de $\varnothing_{\text{máx}} \leq 60 \text{ mm}$ ($c' = 32,7 \text{ kN/m}^2$; $\phi' = 41,0$) e de $\varnothing_{\text{máx}} \leq 100 \text{ mm}$ ($c' = 36,4 \text{ kN/m}^2$; $\phi' = 39,3$).

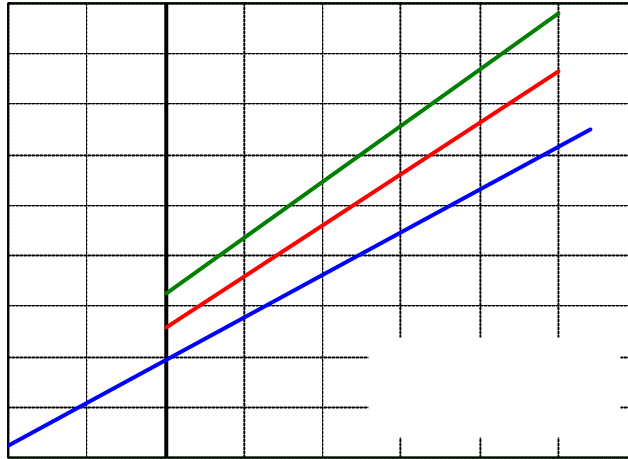
Os parâmetros de resistência da matriz composta 1 e 2 (Figura II.68 e Tabela V.30) foram superiores em relação à matriz básica dos resíduos pré-tratados, principalmente no que diz respeito à coesão. Este valor mais elevado não corresponde à coesão do material granular, ou seja, em termos das propriedades de atrito, mas sim à coesão das fibras existentes nas matrizes composta 1 e 2, que foi medida parcialmente nos ensaios de cisalhamento direto. A coesão das fibras é incorporada devido à resistência à tração dos elementos de reforço, gerando um aumento da resistência ao cisalhamento. O estudo detalhado em termos da coesão das fibras do resíduo sólido é possível por meio de ensaios com equipamento de tração e de acordo com o modelo para resíduos sólidos, desenvolvido por KÖLSCH (1993, 1995, 1996), pois pode-se estudar separadamente a resistência, devido ao atrito por meio de ensaios de cisalhamento direto e à tração dos elementos de reforço do resíduo sólido através de ensaios de tração.

Analisando-se ainda a Figura V.68, as envoltórias de resistência das amostras com reforço foram quase que paralelas, gerando assim um aumento da resistência devido à incorporação de uma coesão, que pode ser denominada de coesão das fibras. Estas amostras (matriz composta 1 e 2), segundo os próprios resultados e as considerações discutidas em GDA E 2-29 (DGGT, 1994), correspondem a resíduos que são definidos como resíduos sólidos de comportamento anisotrópico. As análises das amostras dos resíduos sólidos pré-tratados do Aterro de Buchen poderiam ser então realizadas segundo os critérios de Mohr-Coulomb para os componentes de forma granular, aqui representados pela matriz básica, e segundo o modelo de KÖLSCH (1993, 1995, 1996) para os componentes do resíduo sólido que possuem um efeito semelhante de reforço, representados neste trabalho pelas matrizes compostas 1 e 2, as quais são constituídas tanto do material granular como de fibras. Comparando-se os resultados de resistência ao cisalhamento da matriz composta 1 e matriz composta 2 com a matriz básica dos resíduos sólidos pré-tratados, pode-se estimar uma parcela da resistência devido às forças de tração existente em ambas as matrizes compostas, representada aqui pelo ângulo de tração ζ .

Os valores dos ângulos de tração medidos parcialmente nestes ensaios foram aproximadamente $\zeta = 13^\circ$ para a matriz composta 1 e $\zeta = 19^\circ$ para a matriz composta 2. A redução pela metade do teor de fibras (de 20 % para 10 % em peso seco do material) nas amostras dos resíduos sólidos pré-tratados ($\phi < 40\text{mm}$), aqui denominada de matriz composta 2, forneceu um ângulo de tração devido à matriz de reforço superior quando comparado ao correspondente da matriz composta 1. O teor de fibras em 20 % da matriz composta 1 ao invés de proporcionar um melhor reforço ao material, ocasionou provavelmente o deslizamento de parte das fibras existentes entre si quando do cisalhamento, gerando assim uma resistência mais baixa do que a esperada. Já a quantidade de 10 % de fibras da matriz composta 2 ofereceu ao material uma melhor ligação entre a matriz básica e de reforço, ocasionando em valores mais elevados de resistência. Com relação à resistência máxima de tração das fibras, este parâmetro não pode ser estimado através destes ensaios.

Segundo a Figura III.13, KÖLSCH (1996) determinou um ângulo de tração de 14° , por meio de equipamento de tração de grandes dimensões (1,0 x 3,0 x 1,5 m; largura, comprimento, altura), para resíduos sólidos degradados, resultantes de pré-tratamento biológico aeróbio no Aterro de Freiburg (representado no gráfico por Degradado 2). A matriz composta 2 dos resíduos sólidos pré-tratados apresentou um valor mais elevado quando comparado a estes resíduos estudados por KÖLSCH (1996). Esta diferença é decorrente da heterogeneidade das amostras estudadas, que são procedentes de locais diferentes, além de que foram ensaiadas em diferentes equipamentos. Valores entre 10° e 14° também foram sugeridos por GDA E 2-35, conforme DGGT (1994), para resíduos resultantes de pré-tratamento mecânico e biológico.

Baseando-se em estudos sobre o efeito da adição de fibras no comportamento de ruptura de solos, desenvolvidos por GRAY & OHASHI (1983) e MAHER & GRAY (1990), e de resíduos sólidos urbanos, por KÖLSCH (1993, 1995, 1996), as envoltórias de resistência dos resíduos sólidos pré-tratados investigados nesta pesquisa poderiam ser analisadas segundo as Figuras V.69 e V.70, respectivamente.



$\sigma_{crítica}$ (Figura V.69). Desta forma, para tensões normais iguais ou inferiores a $\sigma_{crítica}$, em que a ruptura ocorre por deslizamento das inclusões, a ação do reforço é traduzida por um aumento do ângulo de atrito, com uma coesão igual ao material sem reforço (matriz básica). Para tensões normais superiores a $\sigma_{crítica}$, em que a ruptura é condicionada pela resistência à tração dos elementos de reforço, o material reforçado (matriz composta 1 e 2) apresenta ângulo de atrito da ordem do material sem reforço (matriz básica), e incorpora a coesão das fibras, que é proporcional à resistência à tração do reforço.

Com relação ao modelo proposto por KÖLSCH (1993, 1995, 1996), Figura V.70, no que diz respeito à influência das fibras na resistência ao cisalhamento do resíduo sólido, primeiramente haveria um crescimento da resistência para os materiais, com e sem reforço, apenas devido ao atrito, até uma determinada tensão normal σ_1 . As envoltórias seriam coincidentes, pois segundo o modelo, a mobilização das fibras constituintes do material não ocorre ao mesmo tempo que o atrito, e assim até σ_1 as fibras não haviam sido mobilizadas. A partir desta tensão normal, as fibras começariam a ser mobilizadas e resultaria no crescimento da resistência do material com reforço (matriz composta 1 e 2), traduzido por uma maior inclinação da envoltória. Nesta fase, pode-se determinar o ângulo de tração, de forma parcial nos ensaios de cisalhamento, que consiste na declividade da relação linear entre a resistência causada pelas fibras (diferença entre a resistência da matriz com e sem reforço) e a tensão normal nesta fase. Com o aumento das tensões normais, observou-se que o ganho de resistência tende a diminuir, e as envoltórias se tornam praticamente paralelas. Comportamento semelhante também foi observado por FEHRER (2002) e HEISS-ZIEGLER & FEHRER (2003) em estudos de resistência em amostras de resíduos sólidos resultante de pré-tratamento mecânico e biológico, Figura II.18.

Considerando as discussões acima, os parâmetros de resistência das amostras dos resíduos sólidos pré-tratados estudados poderiam ser sugeridos conforme a seguir:

i) Matriz básica (material granular): coesão de 16 kN/m^2 e ângulo de atrito 40° , que correspondem às propriedades de resistência devido ao atrito, considerando-se ambos modelos;

ii) Matriz composta 1 e 2 (material granular + material fibroso): coesão de 16 kN/m^2 , decorrente da matriz básica existente em suas composições. O ângulo de atrito por sua vez possui valores para diferentes situações da tensão normal. Dependendo da tensão normal,

quando as fibras começam a ser mobilizadas, o ângulo de atrito cresce e se torna mais elevado do que na matriz básica. Em seguida, observa-se uma tendência de paralelismo das envoltórias, com ângulos de atrito para o material sem reforço ($\phi'_{\text{matriz básica}} = 40^\circ$) e com reforço ($\phi'_{\text{matriz composta 1}} = 45,4^\circ$ e $\phi'_{\text{matriz composta 2}} = 48^\circ$). Este leve acréscimo do ângulo de atrito nas matrizes compostas deve-se também aos elementos de reforço. Levando-se ainda em consideração, no caso do modelo de KÖLSCH (1993, 1995, 1996), a determinação do ângulo de tração devido aos elementos de reforço, tem-se para as matrizes compostas 1 e 2 os valores de $\theta = 13^\circ$ e 19° , respectivamente.

5.3.2.2.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS DOS ENSAIOS EM AMOSTRAS DE RESÍDUOS SÓLIDOS VELHOS E RESÍDUOS SÓLIDOS PRÉ-TRATADOS MECÂNICA E BIOLÓGICAMENTE

Neste item é apresentada de forma resumida uma análise comparativa dos ensaios de resistência executados nas amostras de resíduos sólidos velhos (Aterro de Ihlenberg) e de resíduos sólidos pré-tratados mecânica e biologicamente (Aterro de Buchen), embora os resíduos estudados sejam provenientes de diferentes locais, e possuam características diferentes.

Uma comparação das curvas de resistência das amostras ensaiadas, em termos de matriz básica e matriz composta com porcentagem de reforço semelhante, é apresentada para as tensões normais de 100 e 200 kN/m^2 , conforme indicada na Figura V.71. A Tabela V.31 mostra um resumo dos parâmetros de ensaios de resistência sugeridos para as demais amostras investigadas nestes aterros, correspondentes às análises e interpretações dos resultados apresentados nos itens 5.3.2.2.1. e 5.3.2.2.2.

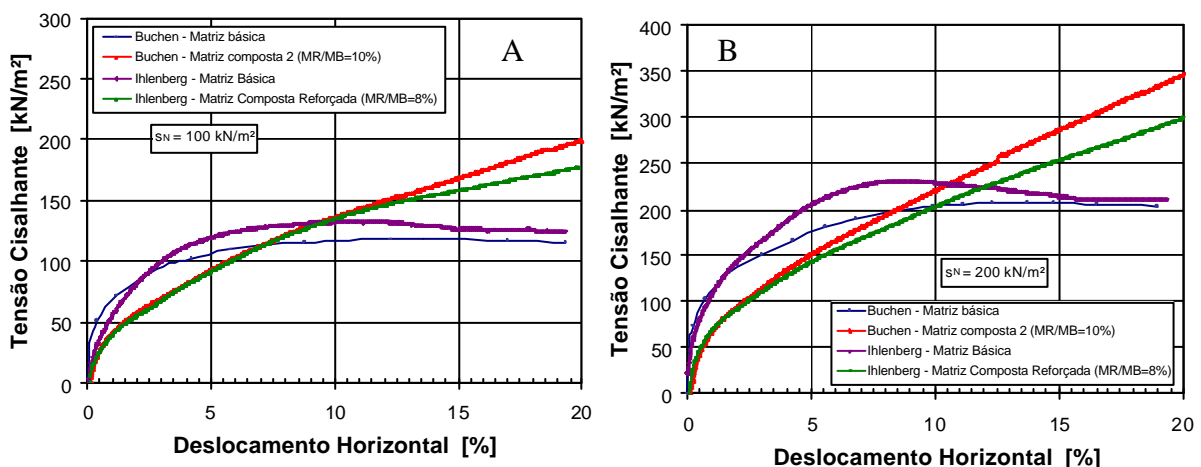


Figura V.71 – Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal – Resíduos sólidos velhos (Aterro de Ihlenberg) e pré-tratados (Aterro de Buchen).

Tabela V.31 – Resumo dos resultados dos ensaios após análises e interpretações – Resíduos sólidos velhos (Aterro de Ihlenberg) e pré-tratados (Aterro de Buchen).

RESÍDUO	SÉRIE	MATERIAL	PARÂMETROS	
Resíduos Sólidos Velhos (Aterro de Ihlenberg)	1	Matriz Básica*	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	17,3
			γ_{seco} (kN/m ³)	13,3 – 13,4
			w _{antes} (%)	22,33 – 23,31
			w _{depois} (%)	21,97 - 22,64
			ϕ' (°)	42,5
			c' (kN/m ²)	29,7
	2	Matriz Composta (MR/MB = 3 %)	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	16,4 – 16,7
			γ_{seco} (kN/m ³)	12,6 – 12,9
			w _{antes} (%)	23,17 – 23,42
			w _{depois} (%)	20,98 - 22,94
			ϕ' (°)	46,1
			c' (kN/m ²)	29,6
	3	Matriz Composta Reforçada** (MR/MB =8 %)	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	14,3 – 14,7
			γ_{seco} (kN/m ³)	10,8 – 11,1
			w _{antes} (%)	23,20 – 24,98
			w _{depois} (%)	22,57 – 24,04
			ϕ' (°)	50;8
			c' (kN/m ²)	24,3
Resíduos Sólidos Pré-tratados (Aterro de Buchen)	4	Matriz Básica	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	14,5
			γ_{seco} (kN/m ³)	9,2
			w _{antes} (%)	36,55
			w _{depois} (%)	33,17 - 36,20
			ϕ' (°)	40,1
			c' (kN/m ²)	16,0
	5	Matriz Composta 1 (MR/MB = 20%)	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	11,3 – 12,5
			γ_{seco} (kN/m ³)	7,5 – 7,8
			w _{antes} (%)	33,42 – 37,27
			w _{depois} (%)	32,56 - 36,32
			ϕ' (°)	45,4
			c' (kN/m ²)	16,0
	6	Matriz Composta 2 (MR/MB = 10%)	$\gamma_{úmido}$ (kN/m ³)	13,3 – 13,6
			γ_{seco} (kN/m ³)	8,5 – 8,9
			w _{antes} (%)	34,92 - 37,80
			w _{depois} (%)	30,14 - 32,82
			ϕ' (°)	48,1
			c' (kN/m ²)	16,0
		ζ (°)	19,0	

* Sem considerar os dados de $\sigma_N=50$ kN/m²; ** Regressão linear para determinação da resistência em $\sigma_N=200$ e 300 kN/m²

A matriz básica dos resíduos sólidos de ambos os aterros apresentam evolução semelhante das curvas de resistência ao longo dos deslocamentos horizontais, no que se refere a atingir um valor máximo da resistência, ou pelo menos uma tendência de estabilização do seu valor, conforme Figura V.71. A resistência da matriz básica dos resíduos sólidos velhos

foi superior à resistência da matriz básica dos resíduos sólidos pré-tratados. Este fato pode estar associado ao maior peso específico seco, à composição e ao tamanho das partículas das amostras dos resíduos velhos, que contribuíram para um melhor entrosamento dos constituintes do resíduo sólido. Estes valores do peso específico seco podem ser verificados na Tabela V.31, nas séries 1 e 4.

A matriz composta dos resíduos velhos (MR/MB=8%) e dos resíduos pré-tratados (MR/MB=10%), onde há tanto os componentes granulares como as fibras, mostram, ao contrário da matriz básica de ambos resíduos, um crescimento da resistência sem atingir um pico, nem mesmo para os deslocamentos da ordem de 20 %, de acordo com a Figura V.71. As curvas da matriz composta do resíduo sólido velho (Ihlenberg) e pré-tratado (Buchen) foram bastante semelhantes nos primeiros níveis de deslocamento horizontal, até cerca de 12 % para a tensão normal de 100 kN/m² e de 4 % para a tensão normal de 200 kN/m². Isto mostrou que embora se trate de resíduos sólidos provenientes de locais diferentes, sem ou com tratamento, o comportamento mecânico para estes níveis de deslocamento foi idêntico. Entretanto, o aumento do deslocamento horizontal nos ensaios indica que há um crescimento mais significativo da resistência no caso dos resíduos pré-tratados (Buchen), sendo originado pelos seus componentes de reforço, que superam em 2 % com relação aos resíduos velhos (Ihlenberg). O aumento da resistência da matriz composta dos resíduos pré-tratados em relação aos resíduos velhos fica mais expressivo quando se tem maiores tensões normais, onde há uma melhor ancoragem das fibras, e assim ao serem solicitadas expressam de forma mais significativa suas propriedades de tração.

De uma forma geral, o ângulo de atrito da matriz básica de ambos os resíduos sólidos (Séries 1 e 4) encontra-se na mesma faixa de valores, no entanto a coesão da matriz básica dos resíduos velhos apresentou um valor superior, com 29,7 kN/m² em comparação a 16,0 kN/m² da matriz básica dos resíduos pré-tratados. Tal fato deve estar associado ao valor mais elevado do peso específico seco das amostras dos resíduos velhos, Tabela V.31. Em relação à matriz composta de ambos resíduos sólidos, comparando-se as amostras com porcentagem de matriz de reforço semelhante, neste caso as Séries 3 e 6, observa-se que em termos de coesão, esta foi superior para as amostras de resíduos velhos, tendo sido a causa a mesma que ocorreu para a matriz básica, um maior valor do peso específico seco. Quanto ao ângulo de atrito, os valores foram praticamente idênticos. A diferença entre estes dois tipos de materiais, no que diz respeito às propriedades de reforço, fica mais evidente quando se analisa o ângulo de

tensão de tração ζ , o qual foi maior em magnitude para a matriz composta 2 (MR/MB=10 %) dos resíduos pré-tratados, 19° em comparação a 16° da matriz composta reforçada (MR/MB=8 %) dos resíduos velhos. Deve-se, porém, ressaltar, que esta diferença na magnitude de ζ poderia ainda ser superior, pois no caso das amostras da matriz composta 2 dos resíduos sólidos pré-tratados o material não atingiu o estado de ruptura em nenhuma das tensões normais aplicadas nos ensaios, e assim os valores da resistência poderiam ter sido ainda mais elevados gerando maiores ângulos de tração. Embora a matriz composta reforçada dos resíduos sólidos velhos também não tenha em algumas tensões normais de ensaio atingido o estado de ruptura, foi admitida nas análises a regressão linear para os pontos nas tensões de 200 e 300 kN/m², o que permitiu um aumento no valor do ângulo de tração, de 11° para 16°. Se for comparar o ângulo de tração da matriz composta 2 dos resíduos pré-tratados em relação aos dados originais de ensaio da matriz composta reforçada dos resíduos velhos, verifica-se que ζ seria portanto menor, quase a metade.

Os ensaios de resistência em equipamento de cisalhamento direto nas amostras de resíduos sólidos investigadas nesta pesquisa permitiram análises em termos de parâmetros de resistência (c' e ϕ'), provenientes dos componentes do resíduo sólido responsáveis pelas propriedades de atrito, e a estimativa parcial de uma parcela da resistência devido aos componentes de reforço, neste caso ζ (ângulo de tração). Embora seja mais preciso um estudo da resistência do resíduo sólido em ensaios separados, cisalhamento direto ou triaxial (propriedades de atrito) e tração (propriedades de reforço), os experimentos aqui conduzidos possibilitaram uma avaliação mais realística do comportamento mecânico deste tipo de material, até então não muito esclarecido pelos métodos usuais de investigação.

CAPÍTULO VI

PRINCIPAIS CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões retiradas da tese e sugestões para futuras pesquisas.

6.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

6.1.1. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA EM SOLO E MISTURA SOLO-FIBRA

Os ensaios de cisalhamento direto realizados com argila e tiras de plásticos (planares), tanto geotécnicos (polietileno de baixa densidade) como provenientes de resíduos sólidos, de uma maneira geral, forneceram resultados que indicam uma semelhança de comportamento mecânico quando comparados aos relatados na literatura para os resíduos sólidos urbanos. Isto vem a sugerir uma possível aplicação prática para a engenharia, ou seja, o uso de fibras de resíduos sólidos na área de solos reforçados.

A inclusão das fibras no solo (argila) foi responsável pelo aparecimento de um intercepto coesivo, ou mais apropriadamente denominado, “coesão devida às fibras”, contribuindo para um aumento da resistência, refletindo também para um discreto acréscimo nos valores do ângulo de atrito dos materiais. A resistência ao cisalhamento pode ser decomposta em 02 (duas) parcelas distintas: i) devido às forças de atrito; e ii) referente às forças de tração das fibras ou “coesão devida às fibras”. Para pequenos deslocamentos horizontais predomina a mobilização das forças de atrito e à medida que estes deslocamentos vão aumentando começam, também, a ser mobilizadas as forças de tração das fibras, contribuindo para um aumento da resistência do material como um todo.

O aumento do teor de umidade gerou um decréscimo da resistência das amostras de argila, com e sem reforço. A presença maior de água contribuiu para um quebra das ligações das partículas constituintes da argila, além do que no caso das amostras com reforço, o aumento de umidade prejudica as propriedades de tração das fibras.

De uma forma geral, no que se refere aos mecanismos de mobilização da resistência ao cisalhamento, há semelhanças de comportamento entre solos reforçados, neste caso mistura de argila e fibras plásticas planares, e resíduos sólidos urbanos. O RSU pode ser, portanto, caracterizado como um material com comportamento granular e que, devido aos elementos de reforço (plásticos, têxteis, fibras vegetais, dentre outros) presentes na sua composição, incorporam uma coesão “coesão das fibras”, na maioria das vezes elevada. Mas é importante analisar o comportamento mecânico dos resíduos sólidos em relação ao de solos reforçados apenas em caráter qualitativo, pois existem muitas diferenças entre estes dois tipos de materiais.

6.1.2. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA EM RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

6.1.2.1. EQUIPAMENTO CONVENCIONAL (RESÍDUOS SÓLIDOS VELHOS – ATERRO DE IHLENBERG)

As curvas de resistência da matriz básica, ou seja, do material do resíduo sólido velho com propriedades de atrito são crescentes com o aumento do deslocamento horizontal, atingindo valores máximos. Com o aumento dos deslocamentos horizontais há uma leve redução da resistência, até a estabilização de seu valor. O mesmo tipo de evolução das curvas ao longo dos deslocamentos horizontais não acontece para a matriz básica reforçada com 3,5 % de fibras de resíduos sólidos (plásticos, fibras vegetais, têxteis, dentre outros). O que se observa é um acréscimo da resistência ao longo do deslocamento horizontal das amostras, sem atingir um pico, nem mesmo para níveis de 20 %.

As fibras de resíduos sólidos adicionadas na matriz básica são mobilizadas a grandes deslocamentos horizontais. Apenas a partir de deslocamentos da ordem de 14 mm, sua resistência supera a resistência devido a matriz básica. No caso dos ensaios com argila, sem e com reforço, a resistência das amostras de argila reforçada, seja com fibras geotécnicas ou provenientes de resíduos sólidos, foi superior já nos primeiros níveis de deslocamento horizontal (2 mm) em relação às amostras de argila sem reforço. Deve-se ressaltar que por se tratarem de materiais diferentes (solo e resíduo sólido), a interação entre o tipo de material e os elementos de reforço pode gerar diferentes comportamentos tensão-deslocamento.

Para diferentes níveis de deslocamento horizontal das amostras de resíduos sólidos velhos reforçadas, ou seja, da matriz básica reforçada, houve um aumento do ângulo de atrito,

sem atingir um valor máximo, enquanto que a coesão permaneceu constante para uma determinada faixa de valores. A definição dos parâmetros de resistência para a matriz básica reforçada deve ser feita com base em critérios de deformação, já que o estado de ruptura não foi atingido em nenhuma das tensões normais ensaiadas.

O aumento do teor de umidade reduziu levemente a resistência das amostras da matriz básica e básica reforçada. Esta redução poderia ter sido mais significativa se o teor de umidade de moldagem das amostras fosse mantido constante durante todo o ensaio. Como nestes ensaios de cisalhamento direto foi permitida a drenagem de líquidos, a umidade pós-ensaio atingiu valores próximos do teor na condição ótima, não gerando diferenças tão significativas.

6.1.2.2. EQUIPAMENTO DE MAIORES DIMENSÕES (RESÍDUOS SÓLIDOS VELHOS - ATERRO DE IHLENBERG E RESÍDUOS SÓLIDOS PRÉ-TRATADOS MECÂNICA E BIOLÓGICAMENTE – ATERRO DE BUCHEN)

A resistência dos resíduos sólidos é composta pela componente devido ao atrito da matriz básica (granular) e às forças de tração, ou coesão das fibras, desenvolvidas pelos elementos existentes no resíduo sólido que atuam como reforço (plásticos, têxteis, fibras vegetais). Desta forma, foram realizados ensaios de cisalhamento em ambos os materiais, a fim de verificar as propriedades de atrito através da componente granular, e a diferença entre os dois materiais corresponde ao efeito da matriz de reforço do resíduo sólido.

As curvas de resistência ao longo do deslocamento horizontal da matriz básica das amostras dos resíduos sólidos estudados são crescentes, apresentando uma tendência de comportamento de pico. Em seguida, a tensão cisalhante reduz com os deslocamentos horizontais permanecendo praticamente constante até o final dos ensaios. Os parâmetros de resistência para a matriz básica dos resíduos sólidos são definidos para o estado de ruptura, de acordo com Mohr-Coulomb, em termos de coesão e ângulo de atrito.

As amostras da matriz básica dos resíduos sólidos velhos, tanto no equipamento convencional como no de maior escala, apresentaram comportamento mecânico e parâmetros de resistência semelhantes. De acordo com estes resultados, a matriz básica, que é constituída

nesta pesquisa pelos componentes de resíduos sólidos com tamanho inferior a 8 mm, poderia ser investigada em equipamentos convencionais.

No caso das amostras dos RSU investigados nesta pesquisa (resíduos sólidos velhos e pré-tratados), que foram definidas como constituídas tanto pela material granular como pelas fibras, as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal não apresentam pontos de pico definidos, mas sim uma tendência de crescimento mesmo atingindo o limite de deslocamento horizontal (60 mm) dos ensaios, o qual corresponde a 20 % do comprimento das amostras. Neste caso, o estado de ruptura não foi alcançado pelo material e assim os parâmetros de resistência devem ser definidos com base em critérios de deformação. É difícil avaliar a resistência ao cisalhamento deste material simplesmente em termos de parâmetros convencionais (Mohr-Coulomb), por isto deve ser levada em consideração a existência de forças de tração no comportamento mecânico dos resíduos sólidos.

As curvas de resistência versus deslocamento horizontal para as amostras dos resíduos sólidos velhos e pré-tratados (matriz básica + matriz fibrosa) são rasas, o que indica que os elementos de reforço destas amostras precisam de elevados níveis de deslocamento horizontal nos ensaios para serem tracionados. A ativação das fibras não depende somente da carga aplicada, mas também da deformação do material.

A resistência das amostras de resíduos sólidos foi mobilizada inicialmente apenas pelo atrito, tanto para a matriz básica como para as matrizes compostas. Com o aumento do deslocamento horizontal nos ensaios, verifica-se que as fibras começam a ser solicitadas, havendo a sua mobilização para níveis mais altos de deslocamento do material.

A inclusão de mais elementos de reforço na composição de uma amostra de resíduos sólidos pode gerar um aumento da resistência, principalmente para níveis mais elevados de deslocamento cisalhante, quando as fibras são mais bem solicitadas. Entretanto, determinadas quantidades de fibras em um material podem não ocasionar um acréscimo da resistência em relação ao mesmo material com inferior porcentagem de fibras. Isto foi verificado no caso dos resíduos sólidos pré-tratados, na matriz composta 1 (MR/MB=20%), que possui o dobro da quantidade de fibras em relação à matriz composta 2 (MR/MB=10%), pois sua resistência foi inferior em todas as tensões normais de ensaio. É provável, que grande parte dos elementos de reforço na matriz composta 1 tenha deslizado entre si, ao invés de ser tracionado.

Os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos velhos, com relação à matriz composta e composta reforçada, em diferentes níveis de deslocamento horizontal, mostraram que a coesão situa-se praticamente constante, enquanto que o ângulo de atrito aumenta com o deslocamento. O comportamento de crescimento do ângulo de atrito com o deslocamento horizontal, sem atingir o pico, é provavelmente decorrente das forças de tração desenvolvidas pelos elementos de reforço constituintes dos resíduos sólidos. Nestas amostras, porém, não surgiu o aparecimento da coesão das fibras, pelo menos para os níveis de tensão normal ensaiados. De uma forma geral, os resultados dos ensaios nos resíduos sólidos velhos indicam que, apesar de terem sido investigadas amostras com diferentes características, por exemplo, tamanho das partículas, peso específico e porcentagem de reforço, trata-se de um material bem estabilizado, que possui valores de resistência de ordem similar.

Os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos pré-tratados, no que se refere à matriz composta 1 e 2, em termos de ângulo de atrito, foram crescentes mesmo atingindo o limite de deslocamento horizontal dos ensaios. Verifica-se também uma tendência de acréscimo da coesão, principalmente para o caso da matriz composta 2. O aumento em ambos parâmetros é originado pelas forças de tração das fibras existentes nas amostras de resíduos sólidos, e ao acréscimo da coesão denomina-se de coesão das fibras.

As envoltórias de resistência das amostras dos resíduos sólidos pré-tratados foram quase que paralelas, com o aparecimento da coesão devido às fibras nas matrizes composta 1 e 2, em relação à matriz básica. Isto vem a confirmar que os elementos de reforço existentes no resíduo sólido incorporam forças de tração, e o comportamento do mesmo é semelhante, pelo menos qualitativamente, ao preconizado por KÖLSCH (1993, 1995, 1996) para resíduos sólidos urbanos, e por GRAY & OHASHI (1983) e MAHER & GRAY (1990) para solos reforçados com fibras.

A comparação da resistência da matriz básica (granular) com a matriz composta (granular + fibras) das amostras dos resíduos sólidos investigados permitiu determinar parcialmente o ângulo de tração devido aos elementos de reforço.

Os ângulos de atrito para as amostras dos resíduos sólidos estudados foram semelhantes aos encontrados na literatura, tanto no que diz respeito a resíduo sólido velho como no caso de resíduo sólido pré-tratado mecânica e biologicamente. No caso dos resíduos

sólidos pré-tratados, que havia maior teor de fibras em relação aos resíduos sólidos velhos, o ângulo de tração medido foi superior. Os valores determinados foram mais baixos do que os encontrados para resíduos sólidos frescos (novos), onde a quantidade de fibras é geralmente superior, além do que suas propriedades de tração estão mais conservadas.

Os valores do ângulo de atrito dos resíduos sólidos investigados nesta pesquisa, resíduo sólido velho e resíduo sólido resultante de pré-tratamento mecânico e biológico encontram-se em uma faixa semelhante. É provável, que por ambos consistirem em resíduos com degradação de matéria orgânica já avançada, reflitam algumas semelhanças no que diz respeito ao comportamento mecânico.

Os parâmetros de resistência obtidos para os RSU's estudados são relativamente altos, principalmente no que tange ao ângulo de atrito. Isto está de acordo com algumas observações de campo, como por exemplo, cortes em taludes de resíduos sólidos sem nenhuma evidência de ruptura.

Os procedimentos de cálculos conhecidos das teorias clássicas da Mecânica dos Solos poderiam ser aplicados para a matriz granular dos resíduos sólidos, que representa a componente do resíduo que descreve as propriedades de atrito.

A validade do critério de Mohr-Coulomb para a descrição da resistência ao cisalhamento das amostras dos resíduos sólidos (matriz composta) não foi comprovada nos ensaios, pois o estado de ruptura não foi alcançado para níveis de deslocamento da ordem de 20 % (limite do equipamento de cisalhamento).

O estudo permitiu confirmar que os elementos de reforço (plásticos, têxteis, fibras, dentre outros) que compõem a massa de resíduos sólidos nos aterros possuem uma grande influência no comportamento mecânico do material como um todo. Eles são responsáveis pelos altos valores de resistência medidos em ensaios com resíduos sólidos urbanos, como também pela estabilidade observada em diversos taludes de resíduos sólidos. Na literatura, a causa da grande maioria dos problemas de ruptura em aterros de RSU não se deve propriamente às propriedades geotécnicas e composição deste tipo de material, mas sim às falhas na execução e operação de aterros, como por exemplo, má compactação, falta de drenagem de líquidos e gases, alguns incêndios na massa de resíduos sólidos (que provocam a

destruição da estrutura de reforço formada pelos plásticos, fibras), além dos casos de áreas que são submetidas a altas taxas de precipitação.

6.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS POSTERIORES

Realizar mais estudos em ensaios de cisalhamento direto e triaxiais da matriz básica e matriz composta dos resíduos sólidos urbanos, a fim de identificar como a componente granular e a componente fibrosa atuam nos mecanismos responsáveis pelo comportamento mecânico do resíduo sólido. E ainda se os modelos desenvolvidos na literatura, tanto para solos reforçados como para RSU, continuam a ser aplicados.

Execução de ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais, por exemplo, com a utilização tanto de baixas tensões normais como também em maiores tensões, para verificar até que ponto o modelo desenvolvido por KÖLSCH (1993, 1995, 1996) continua válido para resíduos sólidos.

Estudar o efeito das fibras em diferentes porcentagens nas amostras de resíduos sólidos, a fim de verificar em quais condições obtém-se o máximo de resistência para um determinado resíduo sólido investigado, e quando este aumento do teor de fibras já não fornece um acréscimo da resistência.

Verificar a influência do teor de umidade na resistência de amostras de resíduos sólidos urbanos.

Analisar se há semelhança da resistência de resíduo sólido velho e resíduo sólido resultante de pré-tratamento (mecânico-biológico), no que diz respeito às propriedades de atrito, tendo em vista que ambos referem-se a resíduos com níveis de degradação já bem elevados. Levar em consideração os estudos de estabilidade bioquímica e composição química dos resíduos.

Comparar resultados de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais em mesmas amostras, a fim de verificar a influência do tipo de equipamento e ensaio na resistência dos resíduos. Seria a anisotropia do resíduo sólido melhor registrada em células triaxiais ?

Construção de equipamento de cisalhamento direto e células triaxiais, e equipamento de tração, em dimensões mais adequadas para o estudo de resíduos sólidos, com o objetivo de estudar a resistência dos resíduos sólidos separadamente, em termos das propriedades de atrito da componente granular e devido às forças de tração desenvolvidas pelos elementos de reforço existentes.

Verificar se os valores máximos de tensão cisalhante devido ao atrito e às forças de tração ocorrem para diferentes deformações do material, ou se, ao mesmo tempo; e também em que teor de fibras há uma condição ótima para o alcance da resistência máxima.

Estudar como a anisotropia do resíduo sólido atua na coesão das fibras.

Realizar ensaios que permitam maiores deformações da amostra, como por exemplo, “ring-shear”.

Conduzir retro-análises dos casos de ruptura ocorridos em aterros sanitários.

Utilizar a compactação estática por camadas na montagem de amostras de resíduos sólidos, ao invés da compactação dinâmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - NBR 6457 (08/1986). Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização.
- ABNT - NBR 6459 (10/1984). Solo – Determinação do Limite de Liquidez.
- ABNT - NBR 7180 (10/1984). Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.
- ABNT -NBR 7182 (08/1986). Solo – Ensaio de Compactação.
- AL-REFEAL, T. O. (1991). “Behavior of Granular Soils Reinforced with Discrete Randomly Oriented Inclusions”. In: Geotextiles and Geomenbranes, Vol. 10.
- ASTM D 3080 (1998). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
- BENVENUTO, C.; CRUZ, P. T. & MIRANDA, I. C. S. B. (1994). “A Metodologia Geotécnica Aplicada à Disposição dos Resíduos Sólidos” . In: Seminário sobre Geotecnia de Aterros para Disposição de Resíduos – GEOAMBIENTAL’94, Rio de Janeiro, Abril, pp. 1.33-1.48.
- BISHOP, A. W. (1955). “The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes”. Geotechnique, 5, pp. 7-17.
- BOUAZZA, A. & AMOKRANE, K. (1995). “Granular Soil Reinforced with Randomly Distributed Fibres”. Proc., 11th African Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cairo, Egypt.
- BOUAZZA, A.; VAN IMPE, W. F. & HAEGEMAN, W. (1996). “Quality Control of Dynamic Compaction in Municipal Solid Waste Fills”. In: Proc. of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, ISBN 90 5410 848 7, Osaka, Japan, Rotterdam, A. A. Balkema, Vol. 2, pp. 635-640.

- BRANDL, H. (1995). "Stability of Waste Deposits". Proc. 10th Danube-European Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Romania, pp. 1043-1056.
- CAICEDO, B.; YALMIN, L.; GIRALDO, E.; CORONADO, O. & SOLER, N. (2002). "Geomechanical Properties of Municipal Solid Waste in Doña Juana Sanitary Landfill". Proceedings of the 4th Environmental Geotechnics – 4th ICEG, Rio de Janeiro, de Melo & Almeida (eds), Rio de Janeiro, Vol. 1, pp. 177-182.
- CANTUÁRIA COSTA, L. (2001). "Estudo do Pré-Tratamento Mecânico-Biológico de Resíduos Sólidos com ênfase em Compressibilidade". Tese de Mestrado. COPPE / UFRJ, 137p.
- CARVALHO, M. F. (1999). "Comportamento Geotécnico de Resíduos Sólidos Urbanos". Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 300p.
- CARTIER, G. & BALDIT, R. (1983). "Comportement Géotechnique des Décharges de Résidus Urbains". Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris-França, N° 128, pp. 55-64.
- COLLINS, H. J. & KÖLSCH, F. (1996). "Veränderung des Tragverhaltens und der mechanischen Eigenschaften von Abfällen durch Alterung und Abbau". Abschlußbericht, Leichtweiss Institut, Abfallwirtschaft, TU Braunschweig, 58p.
- COOPER ENGINEERS (1986). "Unconsolidated-Undrained Triaxial Shear Test Results". Job N° 2659-A3, Zanker Road Resource Recovery, May.
- 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, pp. 885-895.

- COWLAND, J. W.; TANG, K. & GABAY, J. (1993). "Density and Strength Properties of Hong Kong Refuse". Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1993, pp. 1433-1446.
- DE LAMARE NETO, A. (2004). "Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de materiais Granulares com Fibras". Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 190p.
- DEL-GRECO, O. & OGERRI, C. (1993). "Geotechnical Parameters of Sanitary Wastes". In: IV International Landfill Symposium – Sardinia 93, S. Margherita di Pula, Italy, October, 1993, 12p.
- DEL GRECO, O. & OGGERI, C. (1994). "Shear Resistance Tests on Solid Municipal Wastes". In: International Congress on Environmental Geotechnics, 1, Edmonton, Canadá, pp. 643-650.
- DGGT, DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK e.V. (1994). "Empfehlungen des Arbeitskreises Geotechnik der Deponie und Altlasten". Sonderdruck aus: Bautechnik, Jg. 71, Heft 9, Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn.
- DIN 18121-1 (1998). Untersuchung von Bodenproben – Wassergehalt – Teil1: Bestimmung durch Ofentrocknung, Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 18122-1 (1997). Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze, Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 18123 (1996). Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung, Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 18127 (1997). Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch, Deutsches Institut für Normung e. V.

- DIN 18137-3 (2002). Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit, Teil 3: Direkter Scherversuch, Deutsches Institut für Normung e.V.
- EARTH TECHNOLOGY CORPORATION (1988). "Instability of Landfill Slope, Puente Hills Landfill, Los Angeles County, California". Submitted to Los Angeles County Sanitation District.
- ESPINACE, R. A & PALMA, J. (1991). "Comportamiento Mecánico del Relleno Sanitario de Limache". Proc. IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Viña del Mar – Chile, pp. 1091-1104.
- FANG, H. Y.; SLUTTER, R. J. & KOERNER, R. M. (1977). "Load Bearing Capacity of Compacted Waste Material". Speciality Session on Geotechnical Engineering and Environmental Control, Proceedings, Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, IV/2, pp. 265-278.
- FEHRER, K. (2002). "Geotechnisches Verhalten von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen". Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur Wien.
- FRICKE, K.; ZIEHMANN, G. & MÜNNICH, K. (2000). "Auswirkungen der Abfallablagerungsverordnung". KA Wasserwirtschaft Abwasser Abfall 12, pp. 1813-1819.
- FUCALE, S. P. & JUCÁ, J. F. T. (2003). "Geotechnical Investigation in a Brazilian MSW Landfill", Sardinia 2003, Ninth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 6 – 10 October (digital).
- GABR, M. A. & VALERO, S. N. (1995). "Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste". Geotechnical Testing Journal, Vol. 18, Nº. 2, June 1995, pp. 241-251.
- GAY, G.; CH., W. & KAISER, R. (1981). "Bestimmung der Scherfestigkeit an hausmüll in verschiedenen Variationen". IV.1/44022, Forschungs- und Material prüfungsanstalt.

- GDA-EMPFEHLUNG (1997). "Geotechnik der Deponien und Altlasten". Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (Hrsg.), 3. Auflage, und Fortschreibung in ZS Bautechnik, Ernst und Sohn Verlag, Berlin.
- GIFFORD, G. P.; LANDVA, A. O. & HOFFMAN, V. C. (1992). "Improvement of a Demolition Debris Landfill by Compaction". Proc. Int. Symposium on Environmental Geotechnology, Turkey, pp. 391-399.
- GONZALES, J. H. P. (1995). "Comportamiento Geotecnico de Vertederos Controlados de Residuos Solidos Urbanos". Tesis Doctoral, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Maio, 587p.
- GOTTELAND, P.; LEMARÉCHAL, D. & RICHARD, P. (1995). "Analysis and Monitoring of the Stability of a Domestic Waste Landfill". Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995, pp. 777-787.
- GRAY, D. & OHASHI, H. (1983). "Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand", Journal of Geotechnical Engineering., ASCE, 109(3), pp. 335-353.
- GRAY, D. H. & MAHER, M. H. (1989). "Admixture Stabilization of Sands with Random Fibers". Proceedings of the Twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Balkema, Rio de Janeiro, Brazil, August, Vol.2, pp. 1363-1366.
- GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; SIRINI, P. & TANCREDI, G. (1991). "Geotechnical Behaviour of Sanitary Landfill Based on Laboratory and In-Situ Tests". Proc., 15th Conferences of Geotechnics of Torino, Società Ingegneri e Architetti in Torino.
- GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q. & TANCREDI, G. (1995). "The Use of Triaxial Tests for the Characterization of MSW". Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 2 – 6 October 1995, pp. 761-768.

- GRISOLIA, M. & NAPOLEONI, Q. (1996). "Geotechnical Characterization of Municipal Solid Waste: Choice of Design Parameters". In: Proc. of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, 2, Japan, Rotterdam, A. A. Balkema, Vol. 2, pp. 641-646.
- HEAD, K. H. (1984). "Manual of Soil Laboratory Testing". London. Pentech Press, Vol.2, 442p.
- HEERENKLAGE, J. & STEGMANN, R. (1995). "Overview on Mechanical-Biological Pretreatment of Residual MSW". Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S.Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995.
- HEISS-ZIEGLER, C. & FEHRER, K. (2003). "Geotechnical Behaviour of Mechanically-Biologically Pre-Treated Municipal Solid Waste (MSW)". Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 2003.
- HEUN & SCHMIDT (1990). "TEXSOL – ein neuer Baustoff für den Erd- und Grundbau".
- HOWLAND, J. D. & LANDVA, A. O. (1992). "Stability Analysis of a Municipal Solid Waste Landfill". Geotechnical Special Publication, N° 31, Proceedings Stability and Performance of Slopes and Embankments – II, ASCE, New York, N.Y., Vol. 2, pp.1216-1231.
- JESSBERGER, H. L. (1990a). "Einige geotechnische Aspekte bei Entwurf und Bauausführung von Deponiebauwerken". In: Gartung, E. : Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien, 6. Nürnberger Deponieseminar, Ruhr-Universität Bochum.
- JESSBERGER, H. L. (1990b). "Neuzeitliche Deponietechnik". Berichte vom 2. Deponie-Seminar, Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum.
- JESSBERGER, H. L. & KOCKEL, R. (1991). "Mechanical Properties of Waste Materials". XV Ciclo di Conferenze di Geotecnica di Torino, Italien.

- JESSBERGER, COLLINS, WITTKE, GÜTTLER & AMANN (1992). "Forschungspaket zum Thema Geotechnik der Abfallstoffe". 1. Zwischenbericht, DFG, Bonn (não publicado).
- JESSBERGER, H. L. & KOCKEL, R. (1993). "Determination and Assessment of Mechanical Properties of Waste Materials". Proceedings of the 4th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy), Vol. 2, pp. 1383-1392.
- JESSBERGER, H. L.; SYLLWASSCHY, O. & KOCKEL, R. (1995). "Investigation of Waste Body-Behavior and Waste-Structure-Interaction". Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995, pp. 731-743.
- JEWELL, R. A & WROTH, C. P. (1987). "Direct Shear Tests on Reinforced Sand". *Geotechnique* 37 (1), pp. 53-68.
- JUCÁ, J. F. T.; CABRAL, J. J. P. S.; MONTEIRO, V. E. D.; SANTOS, S. M. & PERRIER Jr, G. S. (1997). "Geotechnics of a Municipal Solid Waste Landfill in Recife, Brazil". *Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*, Almeida (ed), Balkema, Rotterdam, ISBN9054108851, pp. 429-436.
- JUCÁ, J. F. T. (2003). "Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil". *Anais do V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO' 2003*, Porto Alegre, RS, pp. 443-470.
- JUCÁ, J. F. T.; MACIEL, F. J.; BELTRÃO, K. G.; MARIANO, M. O. H.; FUCALE, S. P. & MONTEIRO, V. E. D. (2005). "Geotecnia Ambiental Aplicada a Aterros de Resíduos Sólidos". *Livro Geotecnia no Nordeste*, Editora Universitária-UFPE, pp. 452-506.
- KAIMOTO, L. S. A. & CEPOLLINA, M. (1996). "Considerações Sobre Alguns Condicionantes e Critérios Geotécnicos de Projeto e Executivos de Aterros Sanitários". *Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental*, setembro, pp. 51-54.

- KAVANZANJIAN, E.; MATASOVIC, N.; BONAPARTE, R. & SCHMERTMANN, G. R. (1995). "Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis". Proc. GEOENVIRONMENT 2000 – Characterization, Containment, Remediation, and Performance In Environmental Geotechnics. New Orleans, Louisiana: ASCE, Geotechnical Special Publication N° 46, Ed. Yalcin B. Acar and David E. Daniel, pp. 1126-1141.
- KLÜMPER, A. (1998). "Untersuchung und Bewertung des geotechnischen Verhaltens von mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen auf Grundlage der Bestimmung ausgewählter bodenmechanischer (abfallmechanischer) Parameter". Diplomarbeit, Universität Gesamthochschule Essen.
- KNOCHENMUS, G.; WOJNAROWICZ, M. & VAN IMPE, W. F. (1998). "Stability of Municipal Solid Wastes". In: Proc. of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa Portugal, Sêco e Pinto (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 006x, Vol. 3, pp. 977-1000.
- KOCKEL, R. & JESSBERGER, H. L. (1994). "Stability of Landfill Slopes". Meccanica dei Rifiuti e Analisi Strutturale dei Componenti di una Discarica Controllata. Seminar, CISA, Cagliari, Sardinia, Italy.
- KOCKEL, R. (1995). "Scherfestigkeit von Mischabfall im Hinblick auf die Standsicherheit von Deponien". Schriftenreihe des Instituts für Grundbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 24, 142p. (Dissertation)
- KODA, E. (1998). "Stability Conditions Improvement of the Old Sanitary Landfills". Environmental Geotechnics, Sêco e Pinto (ed.), Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 223-228.
- KÖLSCH, F. (1990). "Materialkennwerte von Abfall im Hinblick auf die Standsicherheit von Mülldeponien". Diplomarbeit am FB Bauingenieurwesen, TU Braunschweig, Deutschland. (não publicado).

- KÖLSCH, F. (1993). "The Bearing Behaviour of Domestic Waste and Related Consequences for Stability". CISA (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy), Vol.2, pp. 1393-1410.
- KÖLSCH, F. (1995). "Material Values for Some Mechanical Properties of Domestic Waste". CISA (Hrsg.): Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy), Vol.2, pp. 711-729.
- KÖLSCH, F. (1996). "Der Einfluß der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall". Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig, Heft 133/96, ISSN 0343-1223, 158p. (Dissertation)
- KÖLSCH, F. (1997). "Standicherheitsberechnung für Siedlungsabfalldeponien unter Berücksichtigung anisotroper Stoffeigenschaften". Geotechnik 20, Heft 3, Essen: Glückauf.
- KÖLSCH, F. (2003). "Festigkeitsuntersuchungen – Projekt: Deponie Ihlenberg Ostböschung". Bericht N° 1, Dr. Kölsch Geo- und Umwelttechnik.
- KÖNIG, D. & JESSBERGER, H. L. (1997). "Waste Mechanics" In: ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, pp. 35-76.
- LANDVA, A. O.; CLARK, J. I.; WEISNER, W. R. & BURWASH, W. J. (1984). "Geotechnical Engineering and Refuse Landfills". Sixth National Conference on Waste Management in Canada, Vancouver, British Columbia.
- LANDVA, A. O. & CLARK, J. I. (1987). "Geotechnical Testing of Wastefill, Report submitted to the London Institute of Civil Engineers.
- LANDVA, A. O. & CLARK, J. I. (1990). "Geotechnics of Waste Fill". Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, Eds., Philadelphia: ASTM, pp. 86-103.

- LOS ANGELES COUNTY SANITATION DISTRICT (1984). "Puente Hills Landfill Draft EIR", Appendix IV-A.
- MAHER, M. H. & GRAY, D. H. (1990). "Static Response of Sands Reinforced with Randomly Distributed Fibres". In: Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, New York, Vol. 116, N° 11, pp. 1661-1677.
- MAHLER, C. F (2002). Proposed Scientific follow-up of the Project of Mechanical Biological Treatment of Urban Solid Waste, Final report. Fundação COPPETEC, for Faber Recycling and the German Ministry of Education and Research.
- MANASSERO, M.; VAN IMPE, W. F. & BOUAZZA, A. (1996). "Waste Disposal". In: Proc. of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, Rotterdam, A. A. Balkema, Vol. 2, pp. 193-242.
- MANASSERO, M. (1997). "Controlled Landfill Design". ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, TC5 Report, pp. 77-111.
- MATSUMOTO, Y. et al. (1987). "Geotechnical Study in the Tokyo Port (2) – Soil Engineering Properties of Refuse Landfill". 22th Japan Conference Soil Mech. Found. Engg., pp. 35-38.
- MAZZUCATO, A.; SIMONINI, P. & COLOMBO, S. (1999). "Analysis of Block Slide in a MSW Landfill". Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy: 4-8 October, Vol. 3, pp. 537-544.
- MEYER, B. (1990). "Berechnungs- und Bauverfahren für "Bewehrte Erde"-Bauwerke". Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig.
- MITCHELL, R. A. & MITCHELL, J. K. (1992). "Stability Evaluation of Waste Landfills", Geotechnical Special Publication, N° 31, Stability and Performance of Slopes and Embankments – II, ASCE, Vol. 2, pp. 1152-1187.

- MITCHELL, J. K.; BRAY, J. D. & MITCHELL, R. A. (1995). "Material Interactions in Solid Waste Landfills". In: GEOENVIRONMENT 2000 – Characterization, Containment, Remediation, and Performance In Environmental Geotechnics. New Orleans, Louisiana: ASCE, Geotechnical Special Publication, N° 46, Vol. 1, Ed. Yalcin B. Acar and David E. Daniel, pp. 568-590.
- MÜNNICH, K. (2001). "Bericht über Versuche zur mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Restabfälle – Deponie Pinnow". Leichtweiß-Institut, TU Braunschweig, DE, 13p. (não publicado)
- NATARAJ, M. S. & MCMANIS, K. L. (1997). "Strength and Deformation Properties of Soils Reinforced with Fibrillated Fibres". Geosynthetics International, Vol. 4, No. 1, pp.65-79.
- OWEIS, I. S. (1993). "Stability of Landfills". Geotechnical Practice for Waste Disposal, D. Daniel (ed.), pp. 224-254.
- RICHARDSON, G. & REYNOLDS, D. (1991). "Geosynthetics Consideration in a Landfill on Compressible Clays". In: Proc. Geosynthetics 91, Industrial Fabrics Association International, pp. 507-598.
- SAARELA, J. (1987). "Some Facts about the Sanitary Landfill Investigations in Helsinki City". An attachment to a communication to Prof. S. Singh from Jouko saarela of National Board of Waters and Environment, Helsinki, Finland.
- SANTEN, H. (2003). "ISKA®-Konzept mit Perkolation – Neue Chancen für die Vergärung?". In: Schriftenreihe des ANS, Bd. 43: Biomasse und Abfallwirtschaft – Chancen, Risiken, Perspektiven, herausgegeben von K. Fricke, M. Burth, R. Wallmann, ORBIT e.V.
- SCHLOSSER & GUILLOUX (1981). "Prinzipien und Theorie der Bewehrten Erde. Sonderbauwerke aus Lockergesteinen I, Bewehrte Erde und Gabionen, Schweizer Ingenieur und Architektenverein, Zürich.

- SCHULTZE, E. & MUHS, H. (1967). "Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten". 2. Auflage, Springer Verlag Berlin.
- SERÉ & THAMM (1992). "Untersuchung des Verhaltens einer mit Vlies bewehrten Stützwand in der Zentrifuge". In: Jessberger, H. L. (Hrsg.): Praxisbezogene Anwendung der Zentrifugen-Modelltechnik im Grundbau, Tunnel- und Schachtbau und Umwelttechnik. Bochum.
- SHÁNCHEZ-ALCITURRI, J. M.; PALMA, J.; SAGASETA, C. & CAÑIZAL, J. (1993). "Mechanical Properties of Wastes in a Sanitary Landfill". In: Proc. of International Conference Green' 93 – Waste Disposal by Landfill. Sarsby (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 356 6, pp. 357-363.
- SHIMIZU, K. (1997). "Geotechnics of Waste Landfill". Environmental Geotechnics, 2, Kamon (Ed.), Balkema, Rotterdam, Vol. 3, pp. 1475 – 1491.
- SIEGEL, R. A.; ROBERTSON, R. J. & ANDERSON, D. G. (1990). "Slope Stability Investigations at a Landfill in Southern California". Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva and G. David Knowles, Eds., Philadelphia, pp. 259-284.
- SINGH, S. & MURPHY, B. J. (1990). "Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills". Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva and G. David Knowles, Eds., Philadelphia, pp. 240-258.
- SOWERS, G. F. (1968). "Foundation Problems in Sanitary Landfills". Proc. Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 94, pp. 103-116.
- STOLL, U. W. (1971). "Mechanical Properties of Milled Domestic Trash". National Water Resources Engineering Meeting, Phoenix, Arizona, USA.
- STRAUSS, M. (1998). "Análise de Estabilidade de Talude do Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre". Tese de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre – RS, 123p.

- TEODORO, J. M. & BUENO, B. S. (1998). Solos Reforçados com Fibras: Uma Abordagem Sistemática Sobre a Resistência de Compostos Argilosos e Arenosos. XV COBRAMSEG, Novembro, Brasília, DF.
- TURCZYNSKI, U. (1988). “Geotechnische Aspekte beim Aufbau von Mehrkomponentendeponien”. Dissertation an der Bergakademie Freiberg.
- VAN IMPE, W. F.; BOUAZZA, A.; HAEGEMAN, W. (1996) Quality Control of Dynamic Compaction in Waste Fills”. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 2, Osaka, Japão, Proceedings. Rotterdam: A. A. Balkema, Vol. 2, pp. 635-640.
- VAN IMPE, W. F. (1998). “Environmental Geotechnics – ITC 5 Activities – State of the Art”. 3rd Int. Conf. on Environmental Geotechnics, Sêco e Pinto (ed.), Lisboa, Portugal, Vol. 4, pp. 1163-1187.
- VIDAL, H. (1966). “La Terre Armee”. In: Annales de L’Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, N° 223- 229.
- WHO (1979). “Methods of analysis of sewage sludge solid waste and compost”. International Reference Center for Wastes Disposal, Switzerland.
- WITHIAM, J. L.; TARVIN, P. A.; BUSHHELL, T. D.; SNOW, R. E. & GERMANN, H. W. (1995). “Prediction and Performance of Municipal Landfill Slope”. In: GEOENVIRONMENT 2000 – Characterization, Containment, Remediation, and Performance In Environmental Geotechnics. New Orleans, Louisiana: ASCE, Geotechnical Special Publication N° 46, pp. 1005-1019.
- WOJNAROWICZ, M.; KNOCHENMUS, G & VAN IMPE, W. (1998). “Géotechnique de L’environnement – Activités de L’ICSMFE (TC5)”. In: Revue Française de Géotechnique, N° 83, 2° Semestre 1998, pp. 1-16.
- ZIEHMMANN, G. (2002). “Setzung von Abfalldéponien: Theorie und Laborversuche zur Kennzeichnung von Einflussgrößen”. Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der TU Braunschweig, ISBN 3-89873-348-3, 134p. (Dissertation).

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)