



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

JEFFERSON HONÓRIO GOMES DA SILVA

**INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO
DIRETO DE PEQUENAS DIMENSÕES**

CAMPINA GRANDE – PB

JUNHO DE 2021

JEFFERSON HONÓRIO GOMES DA SILVA

**INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO
DIRETO DE PEQUENAS DIMENSÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Coorientador: Prof. Dr. William de Paiva

CAMPINA GRANDE – PB

JUNHO DE 2021

S586i Silva, Jefferson Honório Gomes da.
Influência das fibras na resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos em equipamento de cisalhamento direto de pequenas dimensões / Jefferson Honório Gomes da Silva_ Campina Grande, 2022.
78 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) –
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.
"Orientação: Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, Prof. Dr. William de Paiva ”
Referências.

1. Aterro Sanitário. 2. Resíduos Sólidos Urbanos. 3. Resistência ao Cisalhamento. 4. Geotecnia. 5. Fibras. I. Monteiro, Veruschka Escarião Dessoles. II. Paiva, William de. III. Título.

CDU 628.472.3(043)

JEFFERSON HONÓRIO GOMES DA SILVA

**INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO
DIRETO DE PEQUENAS DIMENSÕES**

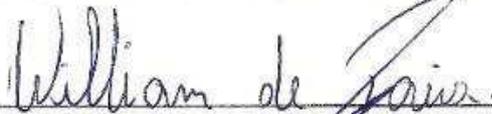
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovado em: 17/06/2021

BANCA EXAMINADORA



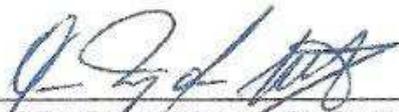
Prof.^a. Dr.^a. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro
(Orientadora – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)



Prof. Dr. William de Paiva
(Coorientador – Universidade Estadual da Paraíba - UEPB)



Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo
(Examinador Interno – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)



Prof. Dr. Gerson Marques dos Santos
(Examinador Externo – Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF)

CAMPINA GRANDE – PB

JUNHO DE 2021



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNO: JEFFERSON HONÓRIO GOMES DA SILVA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.ª VERUSCHKA ESCARIÃO DESSOLES MONTEIRO - PPGECA/UFMG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR. WILLIAM DE PAIVA - PPGECA/UFMG - COORIENTADOR, DR. MÁRCIO CAMARGO DE MELO – PPGECA/UFMG – EXAMINADOR INTERNO, DR. GERSON MARQUES DOS SANTOS - UNIVASF - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 25/2021). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “INFLUÊNCIA DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM EQUIPAMENTO DE CISLHAMENTO DIRETO DE PEQUENAS DIMENSÕES” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 14:30 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEO CONFERÊNCIA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEO CONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O CANDIDATO FOI ARGUIDO ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS DA COMISSÃO, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, ESTE CONCEITO PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O CONCEITO “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 17 DE JUNHO DE 2021**

5.

6.

7. **GERSON MARQUES DOS SANTOS**



Documento assinado eletronicamente por **JEFFERSON HONÓRIO GOMES DA SILVA, Usuário Externo**, em 27/07/2021, às 13:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 27/07/2021, às 13:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARCIO CAMARGO DE MELO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/07/2021, às 15:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **VERUSCHKA ESCARIO DESSOLES MONTEIRO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/07/2021, às 15:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **William de Paiva, Usuário Externo**, em 04/08/2021, às 15:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gerson Marques dos Santos, Usuário Externo**, em 14/04/2022, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1662087** e o código CRC **A95990AF**.

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu saudoso Pai, José
Abílio da Silva Irmão (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir superar todas as adversidades ao logo desses anos, e me proporcionando coragem e determinação para concluir mais uma etapa da minha carreira estudantil.

A família, em especial a minha mãe Irene Maria e minha irmã Juliana, que me educaram e incentivaram, além de, se esforçarem todos os dias para que eu chegasse até aqui. Aos demais familiares, que como, meu cunhado Niwtomar e meu sobrinho Nyelton foram peças fundamentais nessa jornada. Aos primos (as), tios (as) e demais membros da família, que estiveram comigo em todos os momentos da minha vida, e com quem divido essa conquista.

Aos amigos do Grupo de Geotecnia Ambiental, em especial, Cláudio, Anny e Ivan que não mediram esforços para me ajudar e orientara nos caminhos da vida acadêmica.

Aos professores orientadores, Veruschka Monteiro e William de Paiva, que me acolheram durante esse percurso e me tornaram a pessoa e o profissional que sou hoje.

Ao GGA, em especial aos integrantes do subgrupo de “Ensaaios Geotécnicos”, que não mediram esforços em me ajudar com a realização dos ensaios e serem parceiros em publicações científicas.

A banca examinadora, nas pessoas dos professores, Márcio Camargo e Gerson Marques, por contribuírem cientificamente com esta pesquisa e por me mostrarem novos horizontes da vida acadêmica.

A UFCG, por me proporcionar mais uma formação profissional e por ser a casa ao qual devo inúmeras realizações e conquistas profissionais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental e seus funcionários, pela prestatividade e prontidão durante todo o período do curso de mestrado.

Aos técnicos de laboratório, Netinho e Ronildo, que contribuíram com a realização de ensaios, interpretação dos dados pertinentes desse trabalho e fornecerem material para o bom desenvolvimento das minhas atividades do mestrado.

A ECOSOLO, na pessoa do Eng. Civil João Azevedo, por disponibilizar seu tempo para o fornecimento de informações do aterro sanitário e funcionários para realização de atividades e coleta de dados em campo.

A CNPQ, por conceder o auxílio financeiro, sem o qual não poderia ter concluído mais uma etapa da minha formação profissional, e me permitiu investir em cursos de especializações em áreas da engenharia civil.

A todos, que de forma de direta ou indireta, contribuíram e ajudaram, para que eu me tornasse um mestre em engenharia civil, o meu muito obrigado!!!

RESUMO

As fibras presentes na massa de resíduos em aterros sanitários são elementos que exercem um efeito de reforço na resistência ao cisalhamento e à tração na massa de resíduos, caracterizando o efeito-fibra e representando a matriz de reforço. Para compreender a resistência ao cisalhamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em aterros sanitários é indispensável considerar o efeito de reforço dos materiais fibrosos, constituintes dos resíduos. O objetivo desse trabalho é determinar a influência das fibras na resistência ao cisalhamento em equipamentos de cisalhamento direto de pequenas dimensões. Esta pesquisa foi desenvolvida em duas etapas, uma etapa de campo, sendo realizado estudo topográfico e coleta de RSU recém-aterrados. Na segunda etapa, foram realizados os experimentos em laboratório. Os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento dos resíduos indicaram que a presença das fibras acarreta um acréscimo da coesão e do ângulo de atrito dos resíduos. Porém, quando avaliados os resultados de 7,5% e 15,0% de fibras, ocorre um aumento na coesão de 1,2% e uma redução do ângulo de atrito de 0,4% com o acréscimo de fibras.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos, Aterro Sanitário, Resistência ao cisalhamento, Fibras.

ABSTRACT

The fibers located in waste mass at landfills are elements which exert an effect of reinforcement to shear resistence and to traction resistence at waste mass, this characteristic is known as fiber effect and represents the waste mass reinforcement matrix. In that regard, to understand the shear resistence of Urban Solid Waste (USW) at landfills, it is essential to consider the effect of fibrous materials reinforcement which composes the leavings. The purpose of this work is to determine the fibers influency at shear resistence in equipments of direct shearing in small dimensions. This research was developed in two steps, one step is field survey with the topographical study and the gathering of USW newly grounded. In second step, was performed the experiments in laboratory. The results of experiments to shear resistence of waste indicated that the presence of fibers leads to an increase in cohesion and in angle of wastes friction. However, when was rated the results of 7,5% and 15,0% of fibers, occurs a growth in cohesion of 1,2% and a decrease of friction angle of 0,4% with the fibers increase.

Key words: Resíduos sólidos urbanos, landfills, shear resistence, fibbers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008.....	22
Figura 2 – Variação da umidade dos RSU In Situ.....	24
Figura 3 – Fases dos elementos que constituem o maciço de resíduos sólidos.....	25
Figura 4 – Distribuição do tamanho das partículas.....	26
Figura 5 – Modelo esquemático da composição do RSU semelhante a solos reforçados.....	28
Figura 6 – Modelo de interação entre as forças de atrito e tração.....	29
Figura 7 - Esquema do ensaio de cisalhamento direto.....	31
Figura 8 - Etapas da pesquisa.....	32
Figura 9 - Localização do ASCG.....	33
Figura 10 - Municípios que depositam resíduos no Aterro Sanitário em Campina Grande	33
Figura 11 – Célula unificada do ASCG.....	34
Figura 12 – Local de coleta dos resíduos.....	35
Figura 13 – Pontos de coleta dos resíduos.....	36
Figura 14 – (a) Coleta da amostra dos resíduos; (b) Acondicionamento dos resíduos no caminhão caçamba.....	36
Figura 15 – (a) Pesagem dos resíduos; (b) Disposição dos resíduos no galpão.....	37
Figura 16 – (a) Resíduos dispostos no galpão; (b) Homogeneização dos resíduos.....	37
Figura 17 – Etapas do quarteamento dos RSU.....	38
Figura 18 - Materiais espalhados e realização da separação dos RSU.....	38
Figura 19 – Peneiras: (a) Malha de 38mm; (b) Malha de 19,1mm e (c) Malha de 7mm.....	39
Figura 20 - (a) Resíduos separados por categoria; (b) Material misto.....	39
Figura 21 – (a) Identificação dos recipientes; (b) Balança utilizada para pesagem dos resíduos; (c) Pesagem dos materiais.....	40
Figura 22 – (a) Quarteamento do material misto; (b) Coleta do material do topo, das laterais e do centro; (c) Pesagem do material; (d) Peneiramento.....	41
Figura 23 - (a) Resíduos sendo colocados nos baldes; (b) Medição da altura e diâmetro ocupados pelos resíduos.....	42
Figura 24 - (a) Calibração do erlenmeyer; (b) Amostra de resíduos; (c) Transferência da amostra para o erlenmeyers; (d) Aplicação do vácuo.....	44
Figura 25- (a) Peneiras para o ensaio; (b) Pesagem da amostra; (c) Peneiramento; (d) Frações da amostra.....	45
Figura 26 - (a) Peneiras para o ensaio; (b) Amostra dos resíduos; (c) Pesagem da amostra; (d) Peneiramento.....	46
Figura 27 - (a) Dispersão do material; (b) Adição de água até a marca de 1000ml; (c) Agitação da amostra; (d) Medição da densidade.....	47
Figura 28 - (a) Pesagem do material; (b) Amostra homogeneizada; (c) Agitação da amostra; (d) Medição da densidade.....	48
Figura 29 – Caixa de cisalhamento.....	49
Figura 30 – (a) Fibras; (b) Material misto com dimensões < 7mm; (c) Resíduos para realização dos ensaios.....	49

Figura 31 – (a) Material misto + 0% de fibras; (b) Material misto + 7,5% de fibras; (c) Material misto + 15% de fibras	51
Figura 32 – Adição de água e homogeneização dos materiais	51
Figura 33 – (a) Montagem da caixa de cisalhamento, (b) Gabarito.....	52
Figura 34 – (a) Moldagem do corpo de prova; (b) Compactação do corpo de prova.....	52
Figura 35 – (a) Equipamento de cisalhamento direto; (b) Pendural	53
Figura 36 – (a) Extensômetro para medição dos deslocamentos verticais; (b) Extensômetro para medição dos deslocamentos horizontais	53
Figura 37 – (a) Anel dinamométrico; (b) Extensômetro para medição da deformação do anel	54
Figura 38 – (a) Variação da velocidade de deslocamento; (b) Catracas limitadoras de velocidade.....	54
Figura 39 – (a) Caixa de cisalhamento; (b) Carga de adensamento	55
Figura 40 – Realização do ensaio de cisalhamento direto	55
Figura 41 – Leituras dos deslocamentos	56
Figura 42 - Caracterização gravimétrica do Aterro Sanitário em Campina Grande - PB.....	57
Figura 43 - Caracterização volumétrica do Aterro Sanitário em Campina Grande - PB.....	58
Figura 44 – Massa específica aparente úmida por grupo de resíduos.....	60
Figura 45 - Curva granulométrica dos RSU	61
Figura 46 - Curva de compactação dos RSU.....	62
Figura 47 – Comportamento da Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal de material misto com 0,0% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3	63
Figura 48 – Comportamento da Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal de material misto com 7,5% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3	65
Figura 49 – Comportamento da Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal de material misto com 15,0% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3	66
Figura 50 – Comportamento do deslocamento vertical versus deslocamento horizontal de material misto com 0,0% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3.....	68
Figura 51 – Comportamento do deslocamento vertical versus deslocamento horizontal de material misto com 7,5% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3.....	69
Figura 52 – Comportamento do deslocamento vertical versus deslocamento horizontal de material misto com 15,0% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3.....	70
Figura 53 – Comportamento da tensão normal versus tensão de cisalhamento de material misto com 0,0% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3	71
Figura 54 – Comportamento da tensão normal versus tensão de cisalhamento de material misto com 7,5% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3	71
Figura 55 – Comportamento da tensão normal versus tensão de cisalhamento de material misto com 15,0% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos da cidade de Campina Grande – PB	20
Tabela 2 – Umidade dos componentes dos RSU.....	24
Tabela 3 – Amostras preparadas para o ensaio de cisalhamento direto	50
Tabela 4 – Massa específica das partículas dos RSU	60
Tabela 5 – Tensão de cisalhamento média versus percentual de fibras.....	67
Tabela 6 – Coesão e ângulo de atrito médios versus percentual de fibras	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Grupos de resíduos de acordo com a Empfehlungen E1-7 (GDA, 1997).....	21
Quadro 2 - Métodos para determinação da resistência ao cisalhamento dos RSU.....	30
Quadro 3 – Normas para realização da coleta de amostras	35

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASCG - Aterro Sanitário em Campina Grande

ASTM - American Society for Testing and Materials (Associação Americana de Testagens e Materiais)

GDA - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik

GGA - Grupo de Geotecnia Ambiental

LGA - Laboratório de Geotecnia Ambiental

LTDA - Sociedade limitada, sociedade empresarial limitada ou sociedades de responsabilidade limitada

m - Metro

mm - Milímetro

NBR - Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas

PB - Paraíba

PB-138 - Rodovia paraibana 138

PEAD - Polietileno de alta densidade

PEBD - Polietileno de baixa densidade

PET ou PETE -Tereftalato de polietileno

PP - Polipropileno

PS - Poliestireno

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

UEPB - Universidade Estadual da Paraíba

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande

UNIVASF - Universidade Federal do Vale do São Francisco

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
2.	OBJETIVOS.....	18
2.1.	Objetivo Geral	18
2.2.	Objetivos Específicos	18
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1.	Propriedades dos Resíduos Sólidos Urbanos	19
3.1.1.	Composição dos RSU	20
3.1.1.1.	Composição gravimétrica dos RSU	22
3.1.1.2.	Composição volumétrica dos RSU.....	22
3.1.2.	Umidade dos RSU	23
3.1.3.	Massa específica e peso específico dos RSU.....	24
3.1.4.	Tamanho das partículas dos RSU.....	26
3.1.5.	Compactação dos RSU.....	27
3.2.	Resistência ao cisalhamento dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	27
3.2.1.	Ensaio de cisalhamento direto dos RSU	31
4.	METODOLOGIA	32
4.1.	Campo experimental	32
4.2.	Coleta e preparação da amostra de Resíduos Sólidos Urbanos.....	34
4.2.1.	Coleta da amostra dos RSU	34
4.2.2.	Homogeneização e quarteamento dos RSU.....	37
4.3.	Propriedades dos Resíduos Sólidos Urbanos	38
4.3.1.	Composição dos RSU	38
4.3.1.1.	Separação dos Componentes dos RSU	38
4.3.1.2.	Composição gravimétrica dos RSU	39
4.3.1.3.	Composição volumétrica dos RSU.....	41
4.3.3.	Massa específica e peso específico dos RSU	42
4.3.3.1.	Massa específica aparente dos RSU.....	42
4.3.3.2.	Massa específica das partículas dos RSU	43
4.3.4.	Tamanho das partículas dos RSU	44
4.3.4.1.	Peneiramento grosso dos RSU	44
4.3.4.2.	Peneiramento fino dos RSU	45
4.3.4.3.	Sedimentação dos RSU.....	46
4.3.5.	Compactação dos RSU.....	47
4.4.	Resistência ao cisalhamento dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	48

4.4.1.	Preparação da amostra dos RSU.....	48
4.4.1.1.	Dimensões das partículas dos RSU.....	49
4.4.1.2.	Fração dos RSU e cargas do ensaio.....	50
4.4.1.3.	Homogeneização dos RSU.....	51
4.4.1.4.	Moldagem do corpo de prova dos RSU.....	51
4.4.2.	Ensaio de cisalhamento direto dos RSU.....	52
4.4.2.1.	Especificações do equipamento.....	52
4.4.2.2.	Execução do ensaio de cisalhamento direto dos RSU.....	54
5.	RESULTADOS E DISCURSÕES.....	57
5.1.	Composição dos RSU.....	57
5.1.1.	Composição gravimétrica dos RSU.....	57
5.1.2.	Composição volumétrica dos RSU.....	58
5.2.	Massa específica dos RSU.....	59
5.2.1.	Massa específica aparente dos RSU.....	59
5.2.2.	Massa específica das partículas dos RSU.....	60
5.3.	Tamanho das partículas dos RSU.....	61
5.4.	Compactação dos RSU.....	62
5.5.	Ensaio de cisalhamento direto dos RSU.....	63
6.	CONCLUSÕES.....	73
7.	REFERÊNCIAS.....	74

1. INTRODUÇÃO

Nos aterros sanitários, os plásticos representam um percentual, em termos volumétricos, de 40% a 50% do total de resíduos dispostos, assim como encontrado por Araújo Neto (2016), Brito (2017) e Guedes (2018). Deve-se salientar que a comunidade científica, devido a regras mais restritivas ao uso de plásticos, bem como a sua disposição em aterros, tem analisado o efeito desse polímero em maciços aterrados, pois esses resíduos agem como uma matriz de reforço, contribuindo para a estabilidade de aterros sanitários, assim como estudado por Corrêa, Jucá e Motta (2015) e Brito (2017).

A diminuição ou extinção da disposição de resíduos plásticos em aterros sanitários pode alterar, portanto, o comportamento mecânico de aterros. Estudos desenvolvidos por Corrêa, Jucá e Motta (2015) relatam a importância da presença dos plásticos no comportamento mecânico dos aterros sanitários, devido à variação da quantidade de plásticos aterrados, que funciona como elementos fibrosos constituintes dos RSU, exercendo efeito de reforço na resistência ao cisalhamento, caracterizando o “efeito-fibra”.

Ainda nesse sentido, de acordo com Motta (2011), a ampliação dos aterros sanitários é necessária para aumentar sua vida útil devido à escassez de áreas e à dificuldade de licenciamento para sua implementação. Muitas dessas ampliações são feitas com alteamentos sucessivos das células de resíduos, necessitando de estudos rigorosos da resistência ao cisalhamento e da estabilidade dos taludes.

Contudo, como os RSU têm uma composição bastante heterogênea em tamanho, forma e tipo dos seus componentes, para análise do seu comportamento mecânico, essa composição é comumente dividida em duas matrizes: básica (componentes não fibrosos) e reforço (plástico, têxteis e fibras em geral). Enquanto a primeira é responsável, predominantemente, pela resistência ao cisalhamento por atrito, a segunda é, principalmente, responsável pela tração (JESSBERGER, SYLLWASSCH e KOCKEK, 1995). Sendo assim a variabilidade dos percentuais de fibras influencia na estabilidade de taludes de RSU, gerando mudanças no comportamento global de aterros.

Para a análise da estabilidade é necessário conhecer a resistência ao cisalhamento dos resíduos. Segundo Abreu (2017), a resistência pode ser obtida por meio da análise reversa de declives falhos e pela realização de testes de campo e de laboratório. No que diz respeito aos testes laboratoriais, o comportamento tensão-deformação dos RSU pode ser determinado a partir de ensaios triaxiais e de cisalhamento direto. Contudo, devido à heterogeneidade,

dificuldade em amostragem, preparação da amostra, procedimento de ensaio, variação no tamanho das partículas e propriedades dependentes do tempo, a obtenção dos parâmetros de resistência torna-se uma tarefa árdua, sendo necessários equipamentos de grandes dimensões e espaços físicos amplos.

Portanto, devido a importância das fibras na resistência ao cisalhamento dos resíduos e a dificuldade na realização de ensaios de laboratório devido as grandes dimensões dos equipamentos ora utilizados, esta pesquisa busca analisar a influências das fibras na resistência ao cisalhamento dos resíduos em equipamentos de cisalhamento direto de pequenas dimensões já utilizados nos laboratórios de engenharia geotécnica tradicionais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Verificar a influência das fibras na resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos em equipamentos de cisalhamento direto de pequenas dimensões.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar os resíduos sólidos urbanos do Aterro Sanitário em Campina Grande.
- Desenvolver metodologia para preparação de amostra de resíduos sólidos urbanos para realização do ensaio de cisalhamento direto.
- Verificar a influência de diferentes percentuais de fibras (0%, 7,5% e 15%) nos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Propriedades dos Resíduos Sólidos Urbanos

Os RSU são aqueles produzidos pela população, e incluem os resíduos de origem doméstica e resíduos provenientes de: varrição de ruas, comércio, escritórios, mercados, feiras, etc. De acordo com Boscov (2008), os RSU são geralmente compostos por: materiais putrescíveis (resíduos alimentares, resíduos de jardinagem e varrição, e demais materiais que apodrecem rapidamente), papéis e papelões, plásticos, madeiras, metais, vidros e outros (entulhos, espumas, solos, couro, borrachas, cinzas, tecidos, óleos, graxas, resíduos industriais não perigosos etc.).

Os RSU pela própria natureza de sua produção têm como principal característica a heterogeneidade, sua composição varia em tipo, forma e tamanho de seus componentes. A massa de resíduos depositada e compactada nos aterros se arranja formando uma estrutura com fase sólida e vazios. Porém, os vazios entre os componentes sólidos podem estar ocupados por lixiviado e/ou biogás, dessa forma, na sua composição estão as fases sólida, líquida e gasosa (MOTTA, 2011).

O comportamento mecânico dos resíduos é uma das questões mais importantes no aterro. Considerando as diferentes causas de impactos ambientais adversos e os riscos potenciais para a saúde humana originária do aterro, a estabilidade do aterro é crítica e capaz de causar mortes humanas maciças.

Uma comparação entre mecânica de resíduos e mecânica do solo leva à conclusão de que os RSU exibem um comportamento mecânico muito mais complexo devido a:

- A mistura de constituintes nos RSU, como minerais do solo e outros constituintes fisicamente diferentes e incluem elementos planos, como papel e plástico, além de elementos fibrosos como têxteis e madeira;
- O comportamento evolutivo significativo, isto é, dependente do tempo, associado ao decaimento biodegradável dos materiais.

O conhecimento do comportamento mecânico dos RSU é importante em muitos aspectos da engenharia de aterros, ou seja, o gerenciamento de uma célula de aterro, a expansão vertical de um antigo aterro sanitário e a estabilidade das encostas íngremes. Por isso, a necessidade de conhecer as propriedades dos resíduos sólidos.

3.1.1. Composição dos RSU

Uma das formas para determinação dos componentes presentes nos RSU é o ensaio de composição, essa composição pode ser realizada em peso e/ou volume, sendo denominada composição gravimétrica e volumétrica, respectivamente. Essa composição varia de um centro gerador para outro, dependendo da situação econômica, cultural e social, e também podem sofrer influência da sazonalidade e do clima da região de estudo (PANDEY e TIWARI, 2015).

Resultados apresentados por Araújo Neto (2016) para o município de Campina Grande – PB destacam que os plásticos representam cerca de 39,2% em peso e até 53,5% em volume. A Tabela 1 apresenta valores da composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos sólidos da cidade de Campina Grande - PB.

Tabela 1 - Composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos da cidade de Campina Grande – PB

	Composição (%)		
	Gravimétrica	Volumétrica	
		Soltos	Compactados
Plásticos	16,7	53,5	39,2
Papel e Papelão	11,1	10,3	10,2
Têxteis sanitários	7,9	5,2	6,3
Metais	0,6	0,8	1,6
Vidros	2,5	2,0	1,6
Compósitos	2,4	5,4	5,3
Material putrescível	46,5	14,6	24,5
Outros	12,4	8,3	11,4

Fonte: Araújo Neto (2016)

Segundo Farias (2014), a caracterização dos resíduos quanto a sua composição torna-se uma importante ferramenta de gestão, uma vez que essas composições podem fornecer informações básicas para o monitoramento e avaliação de projetos ambientais, muitas vezes dificultados pela falta de procedimentos de amostragem padrão ou mesmo a heterogeneidade dos RSU.

A norma alemã Empfehlungen E1-7 (GDA, 1997) descreve um método que permite a classificação dos resíduos por grupos, Quadro 1. Para classificação dos componentes os resíduos foram divididos em 12 grupos. Essa divisão foi realizada considerando os grupos individuais de materiais que apresentam um comportamento semelhante no que diz respeito às

suas propriedades mecânicas e estabilidade bioquímica, foram combinadas papeis e fraldas, em um único grupo, e separados os plásticos (plásticos duros e moles), materiais constituídos por diferentes propriedades mecânicas e estabilidade bioquímica.

Destaca-se que os plásticos destinados aos aterros brasileiros, vão desde: Tereftalato de polietileno (PET ou PETE), Polietileno de alta densidade (PEAD), Policloreto de Vinila ou cloreto de vinila (PVC), Polietileno de baixa densidade (PEBD), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS) e outros.

Quadro 1 – Grupos de resíduos de acordo com a Empfehlungen E1-7 (GDA, 1997)

GRUPO	CARACTERÍSTICA
Grandes partes	Materiais de resíduos volumosos, que consistem de vários componentes, por exemplo: móveis, colchões.
Papelão/Papel	Os materiais residuais, principalmente de papel ou fibras de papel, como, por exemplo: papelão, embalagens de papel, papel, produtos de impressão, papel de parede, fraldas.
Plástico mole	Os resíduos constituídos principalmente ou de materiais sintéticos moles, cujas propriedades são dominadas por essas substâncias, por exemplo: embalagem compósita (caixas de leite), filmes, selantes, de borracha, couro macio (vestuário, revestimentos de móveis), têxteis.
Plástico duro	Resíduos que consiste principalmente de matérias sintéticas duras, por exemplo: recipientes de iogurte, plásticos duros, couro duro (saltos de sapatos).
Metais	Metais
Minerais	Resíduos que consiste principalmente de materiais minerais ou de um comportamento mecanicamente e biologicamente semelhante, por exemplo: vidro, cerâmica, resíduos de combustão, solo.
Madeira	Madeira
Orgânico	Resíduos que são naturais, de origem orgânica, por exemplo: legumes, corte de gramados, arbustos, folhas.
Argila	Argila
Tamanho de partícula entre 40 e 120 mm	Material misto de difícil identificação e que não se enquadra em nenhuma categoria, sendo basicamente uma mistura de solo e material orgânico não identificados.
Tamanho de partícula entre 8 e 40 mm	
Tamanho de partícula menor que 8mm	

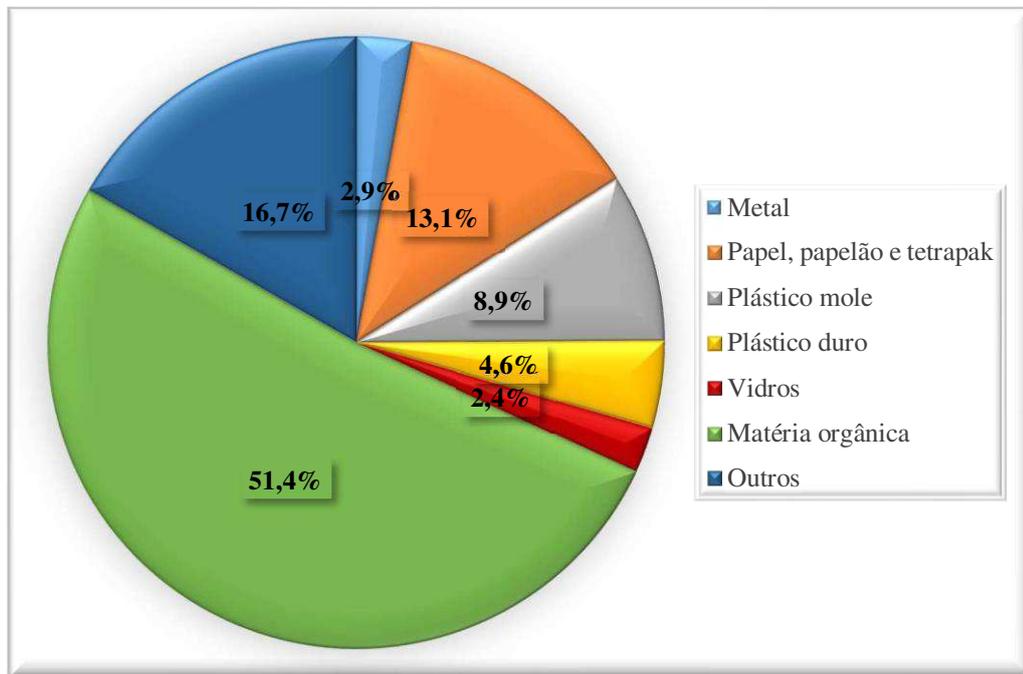
Fonte: DGGT (1994)

3.1.1.1. Composição gravimétrica dos RSU

A composição em massa ou composição gravimétrica é a razão entre a massa de cada constituinte em relação a massa total da amostra, expressa em porcentagem. Essa composição pode variar em função do nível educacional, hábitos, atividade econômica, clima e nível de desenvolvimento da região (BOSCOV, 2008).

No Brasil, segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2012), o percentual em peso de matéria orgânica representa 51,4% dos resíduos coletados. A Figura 1 apresenta valores obtidos na literatura técnica para a ocorrência dos principais componentes dos RSU do Brasil, informados através da sua porcentagem em peso.

Figura 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008



Fonte: Adaptado de Brasil (2012).

Segundo Araújo Neto (2016), a constituição dos RSU influencia a dinâmica dos aterros sanitários, de tal maneira que o material em maior proporção determina as características gerais dos resíduos. Para Zekkos *et al.* (2010), a quantidade de matéria orgânica, que apresenta maior percentual em massa dos resíduos, influencia principalmente na estabilidade, recalques e na geração líquidos e gases dos aterros sanitários.

3.1.1.2. Composição volumétrica dos RSU

A composição volumétrica, que define o percentual dos diversos componentes presentes nos resíduos em volume, pode ser obtida pela razão entre o volume de cada

constituente em relação volume total da amostra. Essa composição pode ser realizada com resíduos soltos ou compactados (ARÁUJO NETO, 2016).

Segundo Corrêa (2013), apesar do pouco uso, este tipo de composição é de grande importância para prever o espaço físico ocupado por cada fração dos resíduos em aterros e, portanto, definir a vida útil desses aterros e realizar a avaliação do comportamento geotécnico do maciço. A fração de plásticos pode representar 20% em peso, conforme composições gravimétricas de Araújo Neto (2016), Brito (2017) e Guedes (2018), e que pode atingir cerca de três vezes este percentual em volume. Dessa forma, a retirada destes materiais dos RSU pode representar ganhos de vida útil. Por outro lado, pode alterar o comportamento geotécnico do aterro.

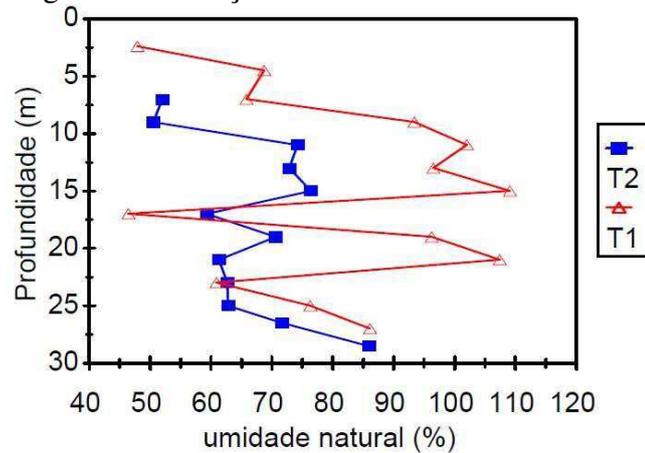
Assim como a composição gravimétrica, a composição volumétrica dos resíduos de um local varia em função de diferentes fatores, como o número de habitantes do município, o nível educacional da população, o poder aquisitivo e o nível de renda familiar, os hábitos e os costumes da população, as condições climáticas e sazonais e a industrialização de alimentos.

3.1.2. Umidade dos RSU

A água desempenha papel importante no comportamento dos RSU. Assim, a umidade dos resíduos é determinante na velocidade de degradação dos RSU, como também no acréscimo da poropressão e recalques (BOSCOV, 2008).

Esse índice pode ser determinado com a relação, expressa em percentagem, entre o peso da água existente em uma certa massa de resíduos e o peso das partículas sólidas (umidade na base seca) ou o peso das partículas sólidas mais o peso da água (umidade na base úmida), conforme determina a NBR 6457 (ABNT, 2016). É importante ressaltar que para solos com elevados percentuais de matéria orgânica, o caso dos RSU, a temperatura, pelo método da estufa, deve ficar entre 60 e 65°, com intervalos maiores de secagem.

Carvalho (1999) estudou a variação da umidade, calculada na base seca, com a profundidade em dois furos a trado, os valores de umidades variam de 50% a resultados superiores a 100%, Figura 2.

Figura 2 – Variação da umidade dos RSU *In Situ*

Fonte: Carvalho (1999).

Os constituintes da massa de resíduos também expressão papel importante na umidade, pois esses possuem diferentes capacidades de retenção de fluidos em seus vazios, tornando a umidade extremamente variável para cada constituinte. Na Tabela 2 é possível observar essa diferença, o papel tem umidade de 74,8%, na base seca, e o vidro tem umidade de 5,9%, também na base seca.

Tabela 2 – Umidade dos componentes dos RSU

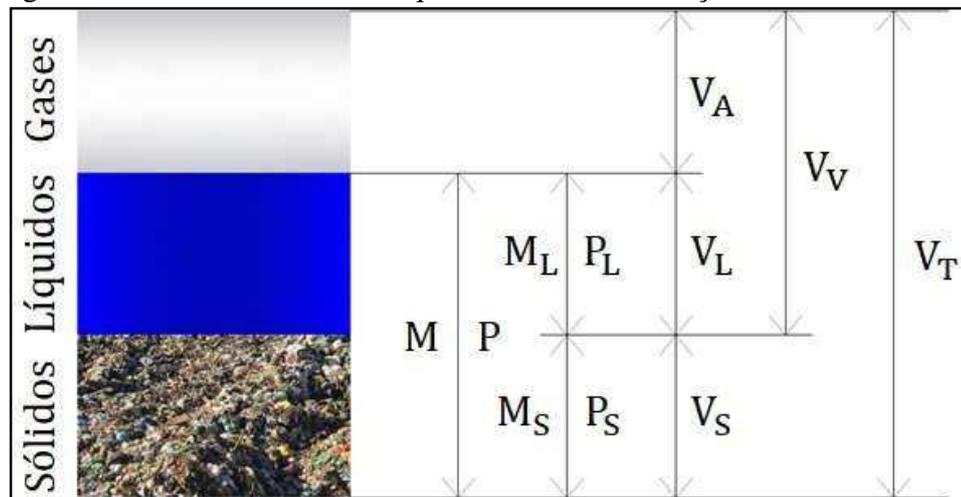
COMPONENTES	UMIDADE (%)	
	Base seca	Base úmida
Metais	19,6	16,4
Papel	74,8	42,8
Vidro	5,9	5,6
Plástico	41,5	29,3
Borracha	24,5	19,6
Têxteis	55,0	35,5
Pedra	12,6	11,2
Madeira	69,8	41,1
Pasta orgânica	47,0	32,0

Fonte: Carvalho (1999).

3.1.3. Massa específica e peso específico dos RSU

A massa específica corresponde à razão entre a massa e o volume do material. Já o peso específico é, por definição, o peso dos constituintes que o formam, por unidade do volume que ocupa no espaço. Para a determinação desses índices físicos é necessário conhecer as fases que constituem a massa dos resíduos sólidos, Figura 3.

Figura 3 – Fases dos elementos que constituem o maciço de resíduos sólidos



Sendo:

M = Massa total

M_L = Massa dos líquidos

M_S = Massa dos sólidos

P = Peso total

P_L = Peso dos líquidos

P_S = Peso dos sólidos

V_A = Volume dos gases

V_L = Volume dos líquidos

V_S = Volume dos sólidos

V_V = Volume dos vazios

V_T = Volume total

Segundo Corrêa (2013), a determinação da massa específica dos RSU, devido a heterogeneidade desse material, sofre variações por diversos fatores, como: composição, tamanho das partículas, umidade, compactação, idade e profundidade de aterramento. Essa propriedade física é utilizada para os projetos e gerenciamento de aterros sanitários, pois, influenciam diretamente na estabilidade e vida útil dessas obras (HANSON et al. 2010).

Para determinação da massa específica e do peso específico é utilizada uma adaptação do procedimento descrito na NBR 6458 (ABNT, 2016), e as Equações 1 e 2.

$$\delta_{\text{esp.}} = \frac{M_S}{V_S} \quad (1)$$

Sendo:

$\delta_{\text{esp.}}$ = Massa específica real

M_S = Massa dos sólidos

V_S = Volume dos sólidos

$$\gamma_{\text{esp.}} = \frac{P_S}{V_S} \quad (2)$$

Sendo:

$\gamma_{\text{esp.}}$ = Peso específico real

P_s = Peso dos sólidos

V_s = Volume dos sólidos

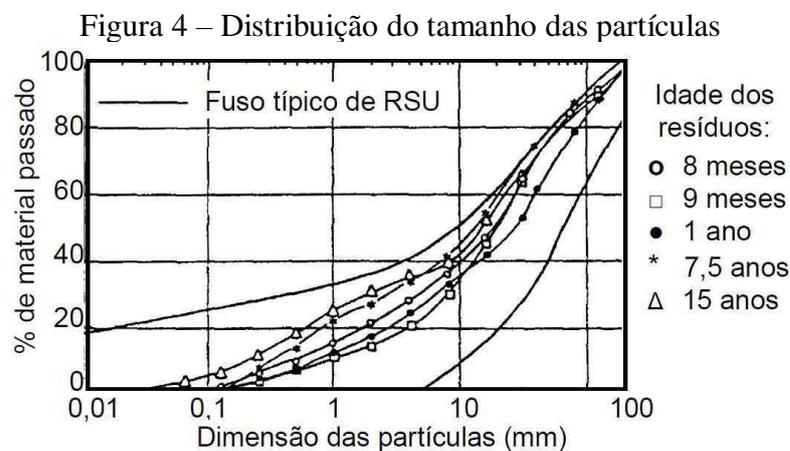
3.1.4. Tamanho das partículas dos RSU

A análise do tamanho das partículas dos RSU é importante para compreender o comportamento do maciço, já que interfere diretamente na velocidade de degradação e processo de assentamento (movimento das partículas), aspectos importantes para análise da resistência ao cisalhamento dos RSU, (SHIMAZAKI, 2017).

Sendo assim, para determinar o tamanho das partículas dos resíduos é realizada um processo de peneiramento e a construção da curva de distribuição granulométrica, como é comumente realizado na mecânica dos solos (ABREU, 2015). Para isso, são realizadas adaptações da NBR 7181 (ABNT, 2016), que descreve o ensaio de granulometria para solos.

Os RSU são compostos por materiais de tamanhos diversos. Há desde elementos de alguns centímetros, como garrafas plásticas, pedaços de mobília, etc., até itens milimétricos, como restos orgânicos e similares. Quanto menor o tamanho das partículas dos resíduos, maior a área superficial específica e maior o contato entre os microrganismos e o substrato, o que leva a uma intensificação do processo de degradação do resíduo (ALCÂNTARA, 2007).

De acordo Knochenmus et al. (1998) a porcentagem de materiais com granulação mais fina tende a aumentar com o tempo devido à degradação da matéria orgânica. A Figura 4 apresenta uma distribuição granulométrica de RSU, na qual verifica-se um acréscimo da parte fina com o aumento da idade dos resíduos, devido a biodegradação.



3.1.5. Compactação dos RSU

A compactação dos RSU é um processo manual ou mecânico que visa reduzir o índice de vazios ou aumento da massa específica do material. Esse processo depende de fatores como a classificação dos componentes, a espessura da camada de compactação, a massa e o tipo de compactação realizada (ARAÚJO NETO et al., 2015).

A compactação dos resíduos em campo, tanto melhora as características mecânicas do maciço, como também aumenta a capacidade de acondicionamento dos resíduos no aterro sanitário. Com a realização do ensaio de compactação é possível obter a massa específica seca máxima e a umidade ótima, que permite determinar o grau de compactação dos resíduos *in situ*. O ensaio de compactação dos RSU segue os critérios estabelecidos na NBR 7182 (ABNT, 2016), com as devidas adaptações.

De acordo com Denardin (2013), a compactação é um dos principais parâmetros que deve ser monitorado e controlado durante a operação dos aterros sanitários, com isso é possível melhorar as propriedades geomecânicas dos resíduos e otimizar o tempo de vida útil do aterro. Assim, como nos solos, espera-se que os resíduos compactados também apresentem melhores características mecânicas, especialmente, no que diz respeito a redução de recalques (ALCÂNTARA, 2007).

Segundo Catapreta (2008), o processo de compactação nos aterros sanitários é proporcionado pela aplicação de pressões sobre os resíduos por meio do emprego de equipamentos mecânicos, como tratores de esteira.

Boscov (2008) relata que a média da massa específica dos aterros brasileiros é 1,00 ton/m³. Farias (2014) e Araújo Neto (2016) encontraram valores de 1,22 ton/m³ e 1,04 ton/m³, respectivamente, em ensaios realizados em laboratório.

3.2. Resistência ao cisalhamento dos Resíduos Sólidos Urbanos

A busca por melhor aproveitamento das áreas para implantação de aterros sanitários, em função da escassez de espaço para implantação dessas obras, impõe a construção de aterros com taludes cada vez mais íngremes. Com isso, é necessário um estudo rigoroso da resistência ao cisalhamento dos resíduos, (CÔRREA, 2013).

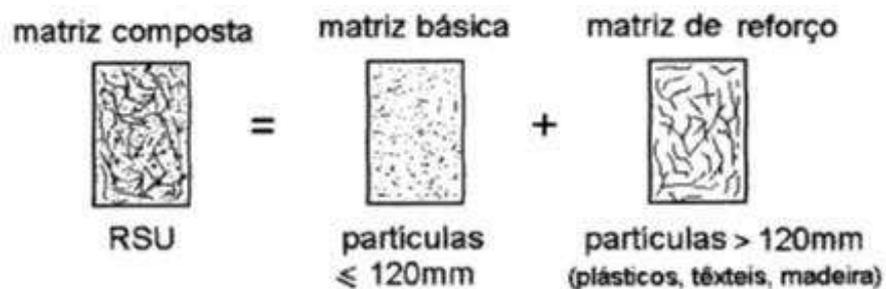
A ruptura dos taludes é quase sempre um fenômeno de cisalhamento. A resistência ao cisalhamento dos RSU é a máxima tensão de cisalhamento que o resíduo pode suportar sem

sofrer ruptura, ou a tensão de cisalhamento no plano em que a ruptura estiver ocorrendo (PINTO, 2006).

O fenômeno de cisalhamento tem a influência de duas parcelas, a resistência por atrito entre as partículas e a coesão. O atrito entre as partículas nos RSU se assemelha ao que ocorre nos solos, entretanto nos RSU a parcela correspondente a coesão – que nos solos é um fenômeno de atração química entre as partículas – é ocasionada pela presença de elementos fibrosos, como o plástico mole, da classe dos termoplásticos, que provoca uma pseudo coesão decorrente do reforço das fibras.

O modelo apresentado por Jessberger *et al.* (1994), König&Jessberger (1997) representa o comportamento de resistência dos RSU, para deformações elevadas, como o comportamento de solo reforçado. Um material composto por duas frações, constituídas de: uma matriz básica, compreendida pelas partículas granulares, e outra matriz de reforço contendo os materiais fibrosos dos resíduos sólidos (plásticos moles, têxteis), Figura 5.

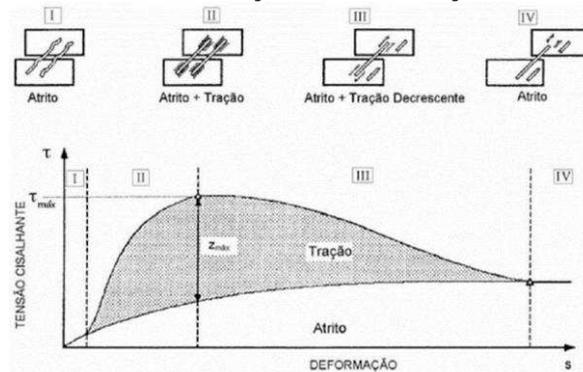
Figura 5 – Modelo esquemático da composição do RSU semelhante a solos reforçados



Fonte: JESSBERGER *et al.* (1995), KÖNIG & JESSBERGER (1997).

Kölsch (1993, 1995, 1996) elaborou um modelo que representa de forma realista o que ocorre no maciço dos aterros sanitários (FUCALE, 2005). Esse modelo admite que materiais fibrosos presentes na composição dos RSU criem forças resistentes de tração que dependem do entrosamento das fibras com a massa do resíduo, sendo função da tensão normal e do tipo de compactação (CÔRREA, 2013). Kölsch (1993, 1995, 1996), a partir dos ensaios de compressão triaxial e cisalhamento direto, obteve o modelo de carga apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Modelo de interação entre as forças de atrito e tração



Fonte: KÖLSCH (1993, 1995, 1996)

A Figura 6 mostra o processo de interação entre as partículas (atrito) e entre a massa dos resíduos e as fibras (pseudo coesão) durante o processo de cisalhamento. A deformação é dividida em quatro fases: (I) no início do ensaio somente as forças de atrito se mobilizam; (II) com o aumento da deformação as fibras passam a ser solicitadas e as forças de tração aumentam (efeito semelhante ao de reforço); (III) excedendo a resistência à tração, as fibras se rompem alcançando uma resistência ao cisalhamento máximo; (IV) com o avanço das deformações, as tensões cisalhantes caem, sendo determinadas apenas pelas forças de atrito.

Segundo Silva (2014), como todas as demais características inerentes aos RSU, os parâmetros de resistência ao cisalhamento também sofrem influência de diferentes fatores, o que torna a obtenção desses dados desafiadora. Diversos estudos vêm sendo realizados para avaliar a resistência ao cisalhamento dos RSU, dentre esses pode-se citar os estudos de Côrrea (2013), Shariatmadari, Sadeghpour e Razaghian (2014), Brito (2017), Ramaiah, Ramana e Datta (2017) e Vieira (2018). Semelhante às demais propriedades dos RSU, a resistência ao cisalhamento é específica para cada local e composição, além de ser influenciada pela idade, tamanho das partículas, peso específico, preparação da amostra e método de ensaio. O Quadro 2 apresenta um resumo dos métodos mais usuais para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, bem como suas vantagens e desvantagens.

Quadro 2 - Métodos para determinação da resistência ao cisalhamento dos RSU.

TIPO	MÉTODO DE MEDIDA	COMENTÁRIOS	REFERÊNCIAS
Campo	Retroanálise de rupturas de talude	Informação adequada raramente disponível (poro-pressão, forma e posição da superfície de ruptura)	Koerner e Soong (2000)
	Retroanálise de experimentos de talude cortado	Grandes deformações observadas, mas sem rupturas	Singh e Murphy(1990), Cowland et al. (1993)
	Retroanálise de taludes estáveis existentes	A variável composição do RSU significa que a experiência passada não é um caminho para desempenho futuro	Gotteland et al. (2002)
	Ensaio de cisalhamento direto de campo	Dificuldades de execução e os resultados são relacionados a baixos níveis de tensão	Jessberger e Kockel (1993)
Laboratório	Compressão triaxial	Amostras deformadas, resistências ao cisalhamento de pico não obtidas devido à compressão e densificação da amostra	Jessberger (1994), Grisolia et al.(1995b)
	Cisalhamento direto	Exigência de grandes equipamentos, amostras deformadas e grandes deslocamentos exigidos para mobilizar a resistência ao cisalhamento de pico	Kolsch (1995), Gotteland et al. (2001)
	Cisalhamento simples	Exigência de grandes equipamentos, amostras deformadas e informação útil na rigidez cisalhante (usado em análises sísmicas)	Kavazanjian et al. (1999)

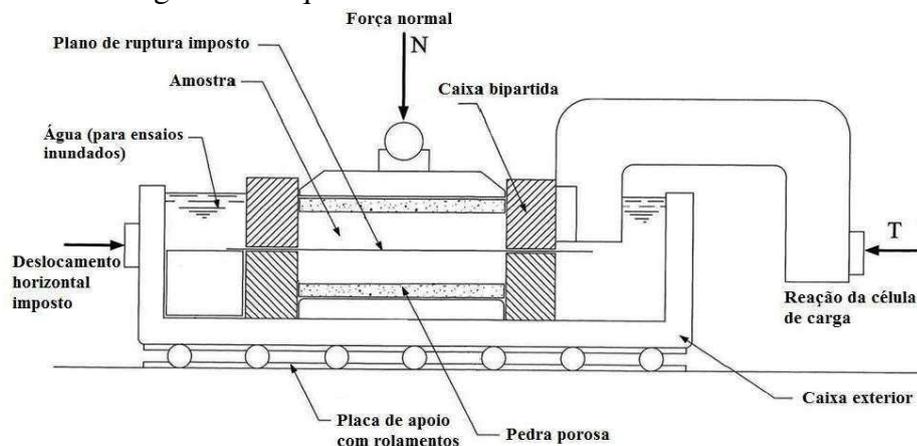
Fonte: Dixon& Jones (2005); Andrades (2018).

Alidoust, Keramati e Shariatmadari (2018) ainda mencionam, que a influência do plástico como material de reforço merece questionamento, de forma que, ao aumentar a rigidez da amostra com um maior percentual de plásticos ocorrem mudanças na composição, que são opostas a condição de reforço. Ainda nesse sentido, os ensaios não conseguem atingir a tensão crítica para atividade das fibras, devido a limitações na taxa de deformação, ou seja, os ensaios não conseguem solicitar as fibras com deformação suficiente para atingir o comportamento dessas fibras como materiais de reforço.

3.2.1. Ensaio de cisalhamento direto dos RSU

Uma das formas para determinação dos parâmetros de resistência dos RSU, é o ensaio de cisalhamento direto em amostras moldadas em laboratório ou coletadas em campo e cisalhadas nas condições de umidade natural ou inundado de acordo com as especificações da norma D3080 (ASTM, 2003). Segundo Pinto (2006), esse ensaio é o mais simples e mais antigo método para determinação da resistência ao cisalhamento, baseado diretamente no critério de Coulomb. Aplica-se uma tensão normal num plano e verifica-se a tensão cisalhante que provoca a ruptura. O esquema geral do ensaio pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Esquema do ensaio de cisalhamento direto

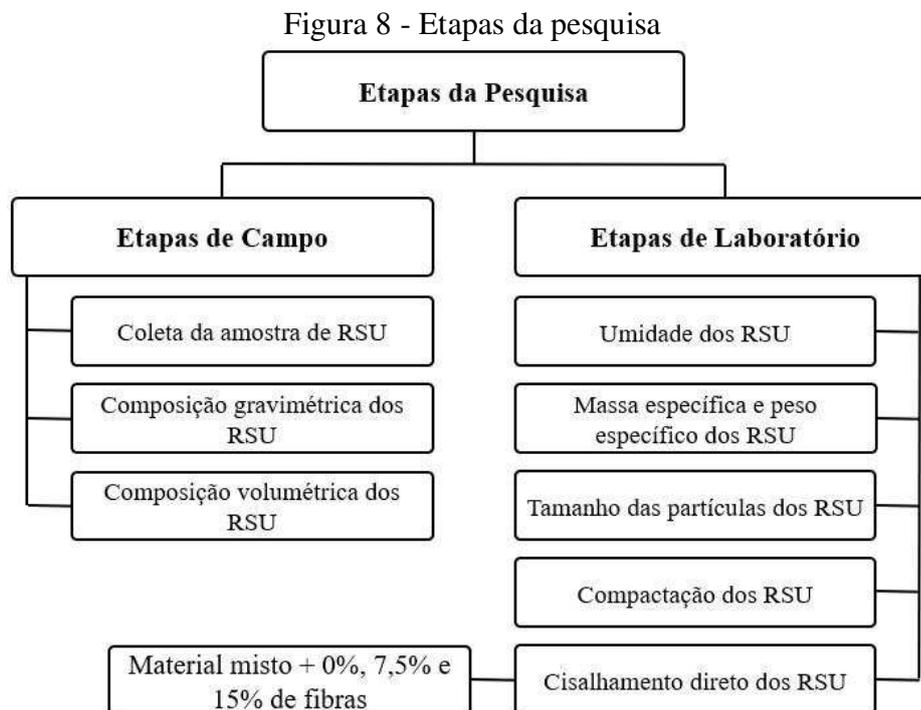


Fonte: Adaptado de D3080 (ASTM, 2003)

Esse método consiste na seguinte sequência (I) inserção da amostra no dispositivo de cisalhamento direto, (II) aplicação de uma carga de assentamento, (III) aplicação da força normal, (IV) destravamento das metades da caixa de cisalhamento que seguram a amostra, (V) ligação do aparelho permitindo deslocando de uma parte da caixa de cisalhamento lateralmente em relação a outra com uma taxa constante de deformação. Durante a realização do ensaio são medidas a força de cisalhamento e os deslocamentos horizontais e verticais. A taxa de corte deve ser lenta o suficiente para permitir a dissipação do excesso de poropressão.

4. METODOLOGIA

Esta pesquisa foi desenvolvida em duas etapas, uma etapa de campo, na qual foi realizado um estudo topográfico para reconhecimento da área, coleta de RSU recém-aterrados, na Célula do Aterro Sanitário, para determinação de propriedades físicas e mecânicas. Na segunda etapa foram realizados experimentos em laboratório, sendo realizados ensaios de resistência ao cisalhamento dos resíduos em equipamentos de cisalhamento direto de pequenas dimensões em amostras com diferentes percentuais de fibras (0%, 7,5% e 15%). O resumo das atividades está representado na Figura 8.



4.1. Campo experimental

A primeira etapa desta pesquisa foi desenvolvida no Aterro Sanitário em Campina Grande-PB (ASCG), localizado em uma região semiárida, no sítio Logradouro II, distrito de Campina Grande-PB as margens da PB-138, quilômetro 10, especificamente nas coordenadas geográficas: Latitude de 7°16'46''S e Longitude de 36°00'45''W, Figura 9. O ASCG teve sua operação iniciada no mês de agosto do ano de 2015 e foi projetado para ter uma vida útil de 25 anos.

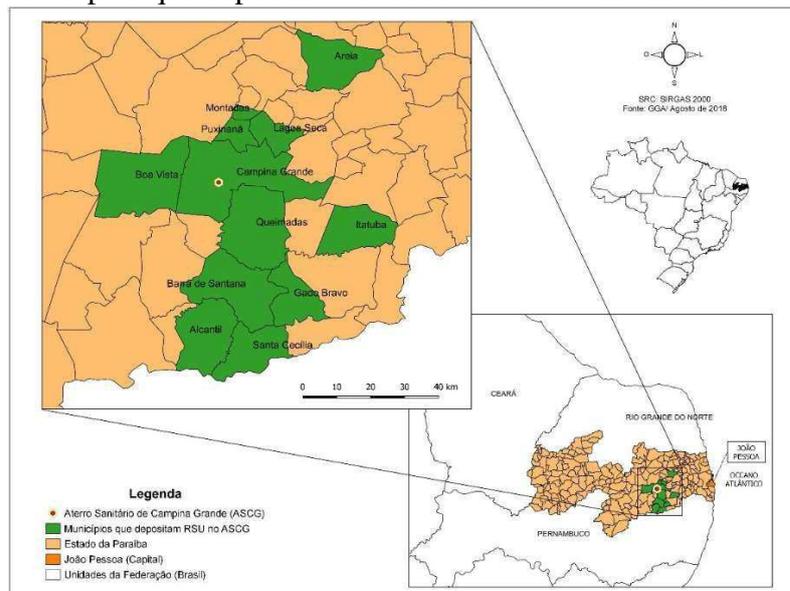
Figura 9 - Localização do ASCG



Fonte: Adaptado de Google Earth (2018).

O ASCG consiste em um empreendimento privado administrado pela ECOSOLO - Gestão Ambiental de Resíduos LTDA, ocupa uma área total de 64 ha (640.000,00 m²), sendo 40ha (400.000,00 m²) destinados à disposição de resíduos sólidos urbanos. Durante a pesquisa, foram depositados resíduos provenientes dos municípios de Campina Grande, Itatuba, Lagoa Seca, Boa Vista, Puxinanã, Barra de Santana, Gado Bravo, Montadas, Santa Cecília, Alcantil, Areia e Queimadas, Figura 10, sendo todos localizados no Estado da Paraíba.

Figura 10 - Municípios que depositam resíduos no Aterro Sanitário em Campina Grande



Fonte: GGA (2018).

Até o fim desta pesquisa foram implantadas 4 Células, denominadas de Células 1 (C1), 2 (C2), 3 (C3) e 4 (C4). Além disso, foram também dispostos RSU entre as Células 1 e

3 (C1+C3), foram também depositados resíduos entre as Células 2 e 4 (C2+C4), Células 3 e 4 (C3+C4) e Células 1 e 2 (C1+C2), com o intuito de unificar as quatro Células, formando uma única Célula com dimensões de 210x210x25m (comprimento, largura e altura total).

O ASCG foi projetado para receber 350 toneladas de RSU por dia ($tRSU_{dia}^{-1}$), porém, está recebendo cerca de 500 $tRSU_{dia}^{-1}$. Na Célula unificada (Figura 11) foi realizada a coleta de resíduos recém-aterrados para realização da composição gravimétrica e volumétrica, além dos ensaios de propriedades dos resíduos e resistência ao cisalhamento.

Figura 11 – Célula unificada do ASCG



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Já a segunda etapa, parte experimental, foi desenvolvida no laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA). Localizado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), aonde foram realizados todos os ensaios para caracterização e determinação da resistência ao cisalhamento dos RSU.

A ECOSOLO GESTÃO AMBIENTAL DE RESÍDUOS LTDA possui um convênio de cooperação técnica com o Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), o qual é responsável pelo monitoramento de sólidos, líquidos e gases do referido aterro, incluindo o monitoramento geotécnico e a caracterização dos RSU depositados no ASCG.

4.2. Coleta e preparação da amostra de Resíduos Sólidos Urbanos

4.2.1. Coleta da amostra dos RSU

A coleta das amostras foi realizada em trincheiras e seguiu os procedimentos descritos nas normas apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Normas para realização da coleta de amostras.

NORMA	ENTIDADE	TÍTULO	ANO
NBR 10007	ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS	Resíduos Sólidos – amostragem de Resíduos	2004
EMPFEHLUNGEN – E1-6	GDA - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK	Probenahmen für Abfallmechanische Untersuchungen	1997

Segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004), para resíduos heterogêneos de fácil amostragem, deve-se preparar uma amostra respeitando as proporcionalidades dos diferentes resíduos, de forma a se obter uma única amostra composta representativa. As amostras dos RSU foram coletadas no aterro sanitário de Campina Grande seguindo um planejamento estatístico para obter uma amostra que expresse as características dos resíduos depositados pelos 12 municípios.

Para esta pesquisa foram coletadas seis amostras de resíduos no local de disposição mais recente, entre as Células 1 e 2 (C1+C2) e as Células 3 e 4 (C3+C4), Figura 12.

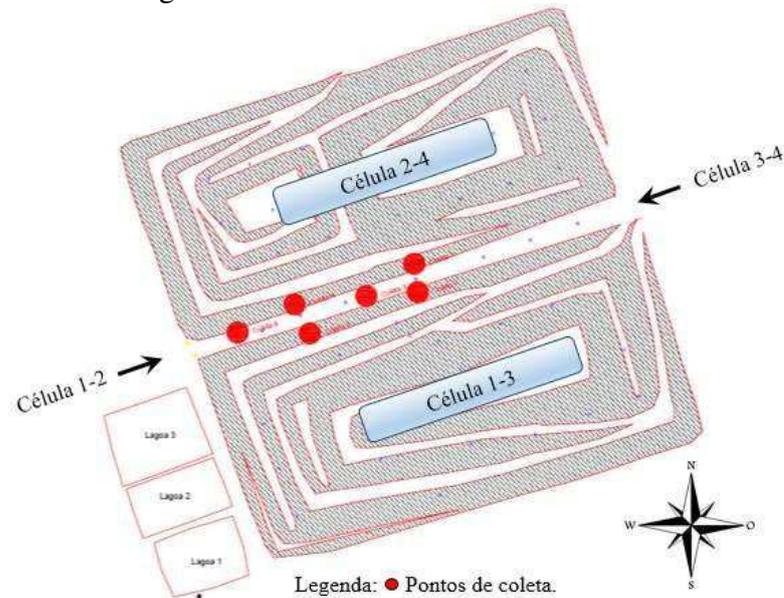
Figura 12 – Local de coleta dos resíduos



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Para obter uma amostra representativa da massa de resíduos a área foi dividida em quatro partes iguais, em cada quadrante foi coletada uma amostra, e as outras duas foram coletadas na linha central da divisão, com o cuidado de não deixar o ponto de coleta central alinhado com os dos quadrantes, a identificação dos pontos de coleta foi realizada por meio de levantamento topográfico, cuja planta é exposta na Figura 13.

Figura 13 – Pontos de coleta dos resíduos



Fonte: GGA (2018).

Em cada ponto foi realizada uma escavação com o auxílio de uma escavadeira hidráulica 320DL da marca Caterpillar, essa escavação, com cerca de 2 m de profundidade, é para retirar a camada de cobertura intermediária e chegar aos resíduos. Após retirar a camada de solo coletou-se as amostras, Figura 14a, que foram transferidas para um caminhão caçamba, Figura 14b, e transportadas para o galpão aonde foram realizadas as etapas de homogeneização e quarteamento dos RSU.

Figura 14 – (a) Coleta da amostra dos resíduos; (b) Acondicionamento dos resíduos no caminhão caçamba



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Com os resíduos sobre o caminhão caçamba, foi realizado o transporte até a balança para aferir o peso do material coletado nos seis furos, conforme Figura 15a, resultando em um peso total de 6720 kg de resíduos. Em seguida, os resíduos foram dispostos no galpão para homogeneização e quarteamento, Figura 15b.

Figura 15 – (a) Pesagem dos resíduos; (b) Disposição dos resíduos no galpão



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.2.2. Homogeneização e quarteamento dos RSU

Com os resíduos dispostos no galpão iniciou-se a homogeneização com o auxílio de uma pá carregadeira Caterpillar modelo 966H. Durante o processo de homogeneização houve a abertura dos sacos plásticos e retirar o seu conteúdo, esse procedimento é ilustrado na Figura 16.

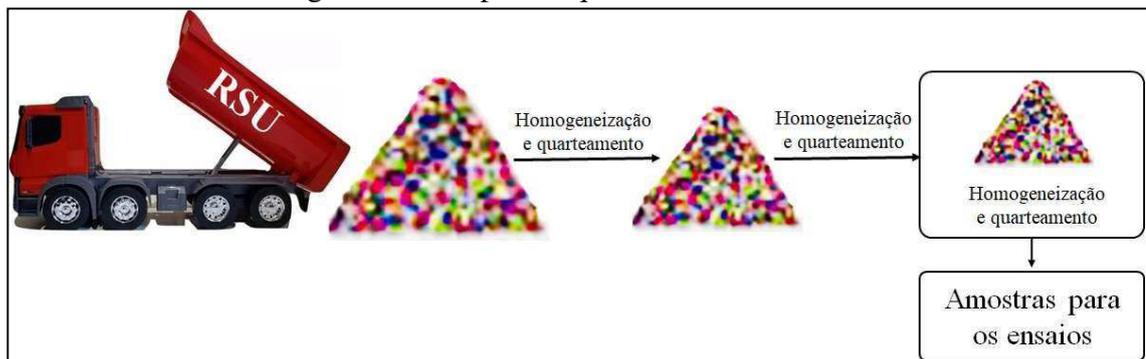
Figura 16 – (a) Resíduos dispostos no galpão; (b) Homogeneização dos resíduos



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Após a homogeneização dos resíduos realizou-se o quarteamento, com a pá carregadeira Caterpillar modelo 966H, a pilha de resíduos foi dividida em quatro partes iguais, das quatro pilhas formadas, duas diametralmente opostas foram descartadas e duas homogeneizadas, formando uma única pilha resultante das pilhas de lados opostos. Esse procedimento foi replicado três vezes para obter a quantidade de resíduos necessária para os ensaios (750 Kg), esse procedimento é mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Etapas do quarteamento dos RSU



Fonte: Acervo da pesquisa (2020).

Após os procedimentos de homogeneização e quarteamento foram utilizados aproximadamente 750 Kg de resíduos para realização dos ensaios de composição, caracterização e de resistência ao cisalhamento. Logo após, os RSU foram dispostos em um pátio com o piso coberto por lona plástica para a realização da triagem do material. Após a triagem foram realizados os ensaios de composição gravimétrica e volumétrica.

4.3. Propriedades dos Resíduos Sólidos Urbanos

4.3.1. Composição dos RSU

4.3.1.1. Separação dos Componentes dos RSU

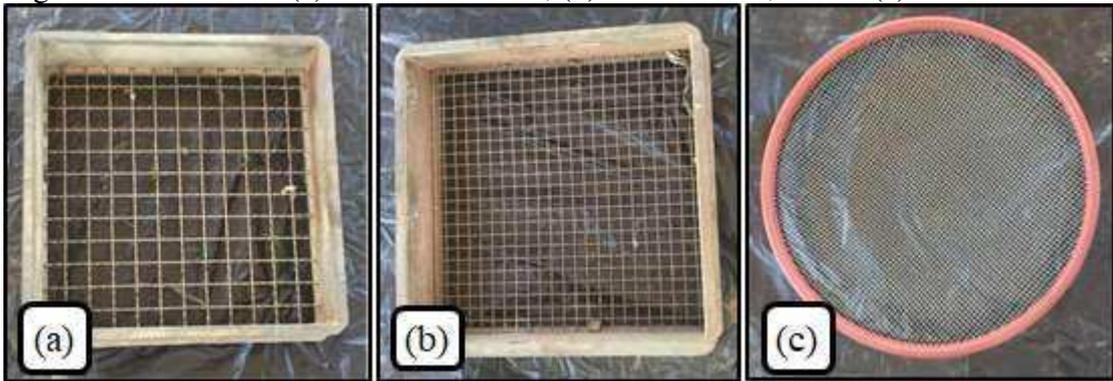
Os resíduos foram classificados, conforme adaptação da norma alemã Empfehlungen E1-7 (GDA, 1997), em: Plástico, Matéria orgânica, Vidro, Metal, Papel, Papelão, Têxteis Sanitários, Têxteis e Couro, Madeira, Compósitos e Material Misto (Figura 18). O material misto apresenta quatro divisões: partículas com dimensões >40mm, entre 20-40mm, entre 8-20mm e <8mm. Foram utilizadas peneiras com malhas de 38mm, 19,1 mm e 7 mm para segregação do material misto, conforme Figura 19.

Figura 18 - Materiais espalhados e realização da separação dos RSU



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Figura 19 – Peneiras: (a) Malha de 38mm; (b) Malha de 19,1mm e (c) Malha de 7mm



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Após a separação de todos os materiais, esses foram dispostos sobre uma lona plástica, separados por categoria, as quais já foram mencionadas anteriormente (Figura 20a). O material restante foi classificado como material misto (Figura 20b). O termo material misto foi utilizado para definir a parcela da amostra remanescente da segregação dos materiais, que são de difícil identificação, envolvendo matéria orgânica e outros materiais.

Figura 20 - (a) Resíduos separados por categoria; (b) Material misto



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Posteriormente a segregação dos RSU, esses foram pesados para realização da composição gravimétrica e medido seu volume para a realização da composição volumétrica.

4.3.1.2. Composição gravimétrica dos RSU

Para determinação da composição gravimétrica todos os materiais subdivididos em categorias foram pesados em uma balança da marca Welmy, modelo R-100, com capacidade de carga de 150kg, e precisão de 100g (Figura 21a), logo após, para facilitar a pesagem os

resíduos foram acondicionados em recipientes com capacidade de até 62 litros identificados com o nome de cada grupo (Figura 21b) e em seguida pesados (Figura 21c).

Figura 21 – (a) Identificação dos recipientes; (b) Balança utilizada para pesagem dos resíduos; (c) Pesagem dos materiais



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Para determinar o percentual de cada componente dos RSU em relação à massa total, utilizou-se a Equação 3.

$$CG = \frac{P_c}{P_t} \times 100\% \quad (3)$$

Sendo:

CG = Composição gravimétrica dos RSU (%);

P_c = Peso de cada fração segregada dos RSU (kg);

P_t = Peso total dos resíduos destinados a composição gravimétrica (kg).

Já o material misto, foi pesado por completo. Após a pesagem, foi realizado um novo quarteamento, com o intuito de minimizar a quantidade de material a ser trabalhado. Após o quarteamento, das quatro pilhas formadas, duas foram descartadas e duas diametralmente opostas foram homogeneizadas, formando uma nova pilha. O material misto selecionado para ser trabalhado, foi retirado nas laterais da base, do centro e do topo da pilha. O material foi então pesado, resultado em 42,8kg e em seguida peneirado nas peneiras de 38mm, 19,1mm e 8mm, respectivamente. Essas etapas são ilustradas na Figura 22.

Figura 22 – (a) Quarteamento do material misto; (b) Coleta do material do topo, das laterais e do centro; (c) Pesagem do material; (d) Peneiramento



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.3.1.3. Composição volumétrica dos RSU

Posteriormente ao procedimento da composição gravimétrica, foi realizada a composição volumétrica, utilizando o mesmo material separado e classificado na gravimetria, onde foram realizadas leituras dos volumes dos resíduos soltos, de acordo com a Equação 2.

$$V = \frac{h(R^2 + Rr + r^2)}{3} \quad (4)$$

Sendo:

V = Volume dos resíduos;

h = altura encontrada;

R = Raio maior;

r = Raio menor.

Para a determinação volumétrica foram utilizados dois recipientes com volume de 62l cada. O material foi colocado nos recipientes e então mediu-se a altura do topo do recipiente até o nível de resíduos, conforme Figuras 23a e b. Os valores das alturas foram anotados, assim como os raios (maior e menor), para o cálculo do volume dos RSU de acordo com a Equação 4. Após a realização da composição gravimétrica e volumétrica, os resíduos foram espalhados para secagem na umidade natural durante 15 dias. Em seguida, os RSU foram dispostos nos recipientes e encaminhados para Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) para serem preparados para os demais ensaios de propriedades físicas e de resistência ao cisalhamento.

Figura 23 - (a) Resíduos sendo colocados nos baldes; (b) Medição da altura e diâmetro ocupados pelos resíduos



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.3.2. Umidade

Para determinação do teor de umidade foram coletadas três amostras da pilha de resíduos destinada a realização dos ensaios de propriedades físicas, essas amostras foram encaminhadas ao LGA e colocadas para secar em estufa a uma temperatura de 65° C até a constância de massa.

4.3.3. Massa específica e peso específico dos RSU

4.3.3.1. Massa específica aparente dos RSU

A massa específica aparente solta com teor de água natural foi determinada a partir da pesagem dos resíduos destinados a composição gravimétrica e volumétrica e do volume conhecido dos baldes plásticos também utilizados na composição. Cada componente dos RSU foi segregado em baldes de 62l, etiquetados e tarados. Os recipientes foram preenchidos manualmente com os componentes dos RSU, sem compactação, até cessar a quantidade do componente específico. O ensaio seguiu recomendações de Araújo Neto (2016).

A massa específica aparente solta da amostra foi calculada pela relação entre a massa e o seu volume de acordo com a Equação 5.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (5)$$

Sendo:

ρ = Massa específica dos RSU (Kg/m³);

M = Massa de resíduos (Kg);

V = Volume dos resíduos (m³).

4.3.3.2. Massa específica das partículas dos RSU

Para a realização do ensaio de massa específica das partículas dos RSU, a amostra foi preparada de acordo com a composição gravimétrica dos RSU, onde os resíduos foram picotados em 1 e 3 cm e homogeneizados.

Para a determinação da massa específica são utilizadas adaptações dos procedimentos descritos na norma NBR 6458 (2016). Araújo Neto (2014) propõe que o piquinômetro seja substituído por frascos erlenmeyer de 250 ml, devido às dimensões do gargalo do picnômetro tornar seu uso inviável para RSU, uma vez que o processo de enchimento e retirada dos RSU, que tem partículas maiores comparadas as de solo, do aparelho seria bastante difícil. Abaixo são descritos os passos do método utilizado para a realização do ensaio:

- Calibração dos frascos de erlenmeyer a fim de obter os valores de massa e temperatura para o conjunto erlenmeyer + água destilada;
- Pesagem da amostra – pesou-se 25 g de RSU para a realização dos ensaios (os testes foram realizados em triplicata); com o RSU restante, foi determinado o teor de água da amostra de acordo com WHO (1979) e NBR 6457 (ABNT, 2016);
- Imersão da amostra em água – colocou-se a amostra a ser ensaiada em um becker com água destilada de tal forma que houvesse completa imersão do material por no mínimo 12 hrs;
- Transferência da amostra para o erlenmeyer e completar 2/3 do volume do frasco com água destilada;
- Aplicação de vácuo de, no mínimo, 88 KPa ao conjunto erlenmeyer + água destilada + RSU por no mínimo 15 min, agitando a amostra regularmente;
- Adição de água destilada até 1 cm abaixo da marca de calibração e aplicar vácuo por mais 15 min;
- Adição de água destilada (evitando a formação de bolhas) até a marca de calibração do frasco;
- Aferição da massa e a temperatura do conjunto erlenmeyer + água destilada + RSU;
- Determinação do valor da massa específica da amostra de RSU por meio da Equação 6 proposta pela NBR 6458 (ABNT, 2016).

$$\delta = \frac{\frac{M_1 \times 100}{100+h}}{\left[\frac{M_1 \times 100}{100+h}\right] + M_3 - M_2} \times \delta_t \quad (6)$$

Sendo:

δ = Massa específica das partículas dos RSU, em g/cm³;

M_1 = Massa do RSU úmido;

M_2 = Massa do conjunto erlenmeyer + água destilada + RSU, na temperatura T de ensaio;

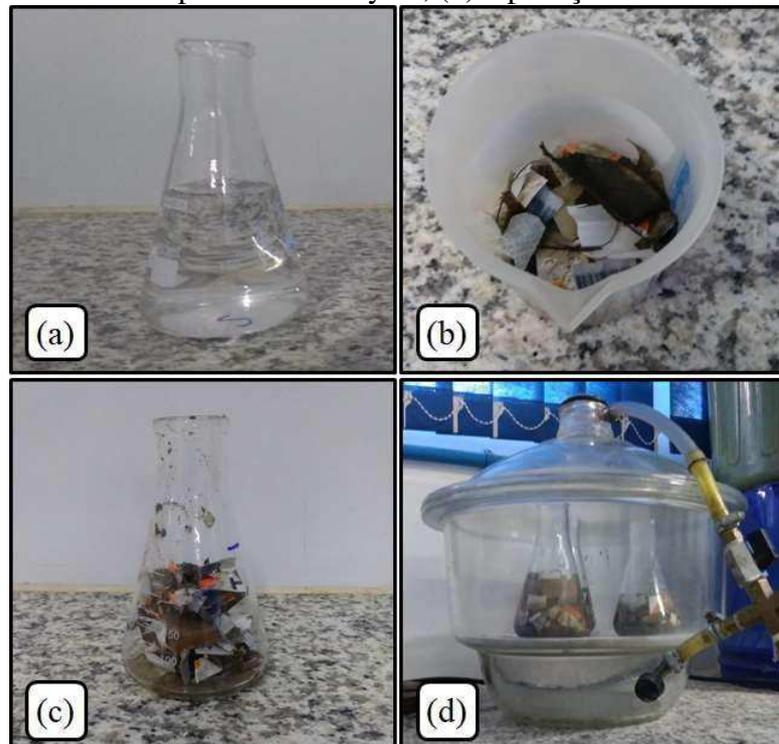
M_3 = Massa do conjunto erlenmeyer + água destilada, na temperatura T de ensaio;

h = Umidade da amostra;

δ_t = Massa específica da água, na temperatura T do ensaio.

Algumas das etapas do ensaio são ilustradas na Figura 24.

Figura 24 - (a) Calibração do erlenmeyer; (b) Amostra de resíduos; (c) Transferência da amostra para o erlenmeyers; (d) Aplicação do vácuo



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.3.4. Tamanho das partículas dos RSU

A NBR 7181 (ABNT, 2016), foi utilizada - com as devidas adaptações - para realização do ensaio de granulometria. Para esse ensaio foi coletada uma amostra de 10 Kg do montante de RSU coletado. O ensaio divide-se em três partes: peneiramento da fração grossa, peneiramento da fração fina e sedimentação.

4.3.4.1. Peneiramento grosso dos RSU

Para o peneiramento da fração grossa foi utilizada a série de peneiras: 76,20; 50,80; 38,10; 25,40 e 19,00mm, Figura 25a. Toma-se os 10Kg da amostra seca ao ar, Figura 25b; passa na peneira 76,20mm de forma manual, Figura 25c, para facilitar a execução. Em

seguida, com o auxílio de um agitador mecânico a fração passante na peneira 76,20mm é peneirada nas demais peneiras e cada fração é pesada, Figura 25d, posteriormente, leva-se o material para a estufa por 48h a uma temperatura entre 105 e 110° C. Após a secagem em estufa o material retido em cada peneira é pesado novamente e os cálculos são realizados com o auxílio das Equações 7 e 8.

$$PR = \frac{MR}{MTS} \times 100 \quad (7)$$

$$PP = 100 - PR \quad (8)$$

Sendo:

PR = Percentagem retida no peneiramento grosso;

MR = Massa retida;

MTS = Massa total seca;

PP = Porcentagem que passa no peneiramento grosso.

Figura 25- (a) Peneiras para o ensaio; (b) Pesagem da amostra; (c) Peneiramento; (d) Frações da amostra



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.3.4.2. Peneiramento fino dos RSU

Para o peneiramento da fração fina as peneiras utilizadas foram: 9,5; 4,8; 2,0; 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075mm, Figura 26a. Tomou-se 1Kg da amostra seca ao ar, que passa na peneira 19,00mm, Figura 26b e 26c; realizou-se o peneiramento manual na série de peneiras,

Figura 26d; lava-se o material retido na peneira 0,075mm, como estabelecido na A NBR 7181 (ABNT, 2016), em seguida, coloca-se o material na estufa por 48h a uma temperatura entre 105 e 110° C. Após a secagem em estufa o material retido em cada peneira é pesado e os cálculos são realizados com o auxílio das Equações 7 e 8.

$$PR = \frac{MR}{MTSPF} \times 100 \quad (9)$$

$$PP = (100 - PR) - N \quad (10)$$

Sendo:

PR = Percentagem retida no peneiramento fino;

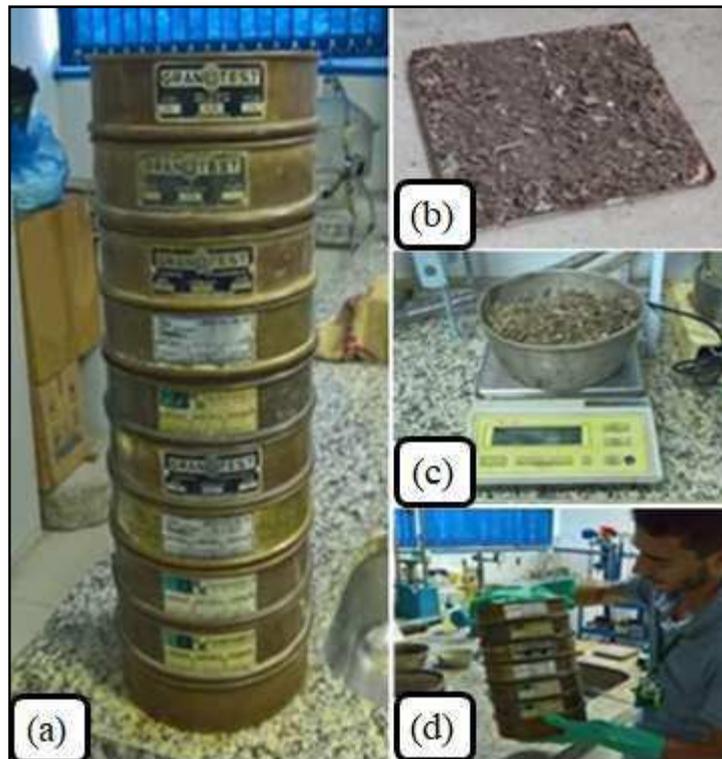
MR = Massa retida;

MTSPF = Massa total seca da parte fina;

PP = Porcentagem que passa no peneiramento grosso;

N = Fração que a massa fina representa do total da amostra.

Figura 26 - (a) Peneiras para o ensaio; (b) Amostra dos resíduos; (c) Pesagem da amostra; (d) Peneiramento



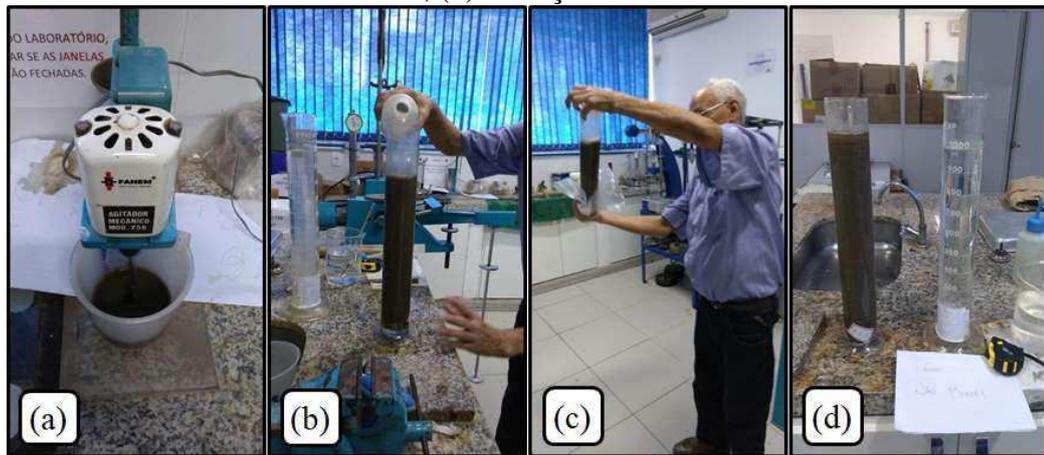
Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.3.4.3. Sedimentação dos RSU

A amostra foi preparada com o material passante na peneira de número 10, logo após pesou-se 70g e foi adicionado a amostra 125 ml de água destilada, mantendo em repouso por 24 horas.

Em seguida, o material foi posto no dispersor por 15 minutos. Após essa etapa, a mistura foi colocada em uma proveta e adicionada água destilada até atingir a marca de 1000 ml. Agitou-se o material na proveta durante 1 minuto e em seguida iniciou-se as leituras com o densímetro nos tempos: 30s, 1 min e 2 min. O densímetro foi retirado da proveta e colocado novamente entre 10 e 20 segundos antes das próximas leituras em 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 24 h. A Figura 27 ilustra a sequência dos procedimentos desse ensaio.

Figura 27 - (a) Dispersão do material; (b) Adição de água até a marca de 1000ml; (c) Agitação da amostra; (d) Medição da densidade



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.3.5. Compactação dos RSU

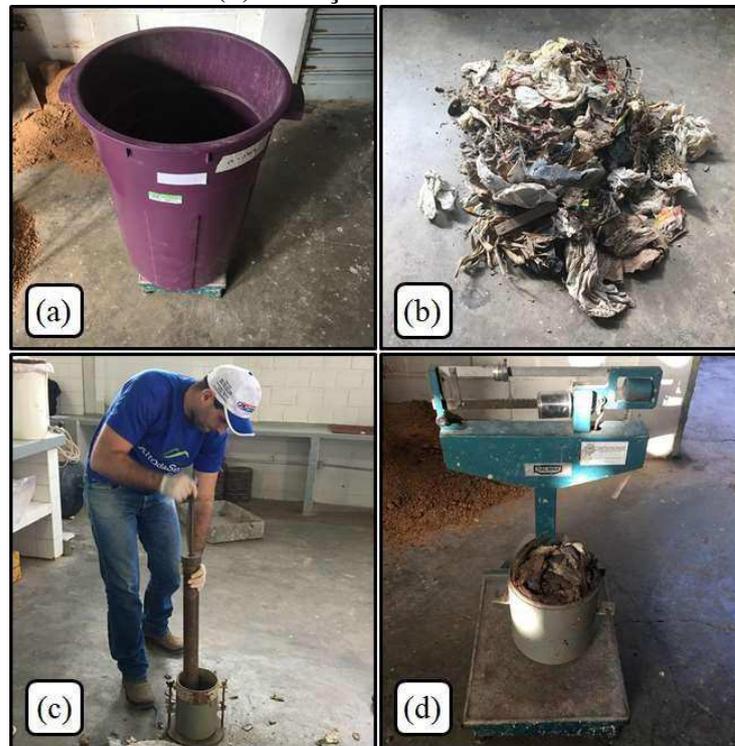
O ensaio de compactação foi realizado por meio de uma adaptação da metodologia da NBR 7182 (ABNT, 2016). A amostra de resíduos utilizada neste ensaio foi retirada da pilha de resíduos destinada aos ensaios de caracterização, após secagem até a umidade higroscópica, foram coletados 7 Kg de RSU para execução do ensaio, Figura 28a.

Como parte da adaptação da norma NBR 7182 (ABNT, 2016), será utilizado um molde do cilindro grande, padrão CBR com volume de 4098,9 cm³, soquete grande com peso de 4640,0 g caindo de uma altura de 0,465 m. Ainda que utilizando a energia Proctor Normal foi necessário utilizar o cilindro maior para melhor acomodação dos resíduos, que apresentam composição e tamanho dos grãos diferentes das partículas que compõem o solo.

Inicialmente adicionou-se uma quantidade inexata de água à amostra de RSU até verificar-se uma consistência adequada e em seguida procede com a homogeneização da mistura (água + amostra de RSU) conforme Figura 28b. Já na Figura 28c é demonstrado o processo de compactação que foi realizada com adição de 6% de água para o primeiro ponto e 4% para os 4 pontos subsequentes. Em cada ponto os resíduos foram distribuídos em 5 camadas iguais e, em cada camada, aplicou-se 24 golpes distribuídos uniformemente com

energia Proctor Normal. Após cada etapa de compactação foi realizada a pesagem do conjunto (cilindro + material) conforme ilustrado na Figura 28d.

Figura 28 - (a) Pesagem do material; (b) Amostra homogeneizada; (c) Agitação da amostra; (d) Medição da densidade



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.4. Resistência ao cisalhamento dos Resíduos Sólidos Urbanos

4.4.1. Preparação da amostra dos RSU

Após o período de secagem dos resíduos no ASCG, esses foram acondicionados em sacos plásticos e encaminhados para o Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) da UFCG para preparação das amostras para o ensaio de cisalhamento de direto dos RSU.

A preparação das amostras dos RSU para realização do ensaio de cisalhamento direto seguiu as recomendações da norma D3080 (ASTM, 2003) que determina a utilização de uma quantidade de material suficiente para preparar no mínimo três amostras e que o tamanho máximo das partículas devem ser proporcionais ao tamanho da caixa de cisalhamento, Figura 29.

Figura 29 – Caixa de cisalhamento



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.4.1.1. Dimensões das partículas dos RSU

Para determinação das dimensões dos RSU foi realizado uma análise do tamanho da caixa de cisalhamento, que tem as seguintes medidas 6 x 6 x 3,8 cm com um volume de 136,8 cm³. A parcela de resíduos, que se comporta como fibra (plásticos moles), foi cortada na dimensão de 4 cm x 1 cm, Figura 30a, já a parcela dos resíduos que se comportam como partícula, será composta pelo material misto com dimensões < 7mm, Figura 30b. As amostras de resíduos foram preparadas e dispostas em recipientes plásticos para a realização dos ensaios conforme pode-se observar na Figura 30c.

As fibras utilizadas neste trabalho são da classe dos termoplásticos (plásticos moles: polietileno de alta densidade - PEAD e polietileno de baixa densidade - PEBD), segundo Corrêa, Jucá e Motta (2015), esses são os dois principais polímeros encontrados nos aterros sanitários brasileiros.

Figura 30 – (a) Fibras; (b) Material misto com dimensões < 7mm; (c) Resíduos para realização dos ensaios



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.4.1.2. Fração dos RSU e cargas do ensaio

A determinação da quantidade de resíduos utilizada na realização dos ensaios de cisalhamento direto foi determinada com a Equação 11. Inicialmente foi levado em consideração a massa específica média dos resíduos depositados nos aterros brasileiros, que segundo Boscov (2008), corresponde a 1 g/cm³. Porém, devido a problemas operacionais de incompatibilidade de volume apenas para a amostra com 0 % de fibras foi utilizado o peso específico de 1,3 g/cm³.

$$M_R = V_{cx} \times \rho \times \% \text{ do material} \quad (11)$$

Sendo:

M_R = Massa de RSU (Kg);

V_{cx} = Volume da caixa de cisalhamento direto (m³);

δ = Massa específica dos RSU, em Kg/m³;

% de RSU = Percentagem de cada RSU.

Já as frações que compõem as amostras dos RSU foram determinadas pela variação dos percentuais de fibras (em massa) presentes nos RSU do Brasil, utilizou-se os percentuais de 0% (mínimo), 7,5% (intermediário) e 15% (máximo) de fibras nas amostras. Também foram determinadas as cargas do ensaio levando em consideração uma altura máxima de 30m para a célula, na Tabela 3 são mostradas as amostras preparadas para os ensaios, todas preparadas em triplicata.

Tabela 3 – Amostras preparadas para o ensaio de cisalhamento direto

AMOSTRA	CARGA (KPa)	FIBRAS (%)		
1a	50	0	7,5	15
2a	150	0	7,5	15
3a	300	0	7,5	15
1b	50	0	7,5	15
2b	150	0	7,5	15
3b	300	0	7,5	15
1c	50	0	7,5	15
2c	150	0	7,5	15
3c	300	0	7,5	15

Na Figura 31a observa-se a amostra de RSU com 0% de fibras, apenas material misto, já nas Figuras 31b e c são representadas as amostras de RSU com 7,5% de fibras e 15% de fibras, respectivamente.

Figura 31 – (a) Material misto + 0% de fibras; (b) Material misto + 7,5% de fibras; (c) Material misto + 15% de fibras



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.4.1.3. Homogeneização dos RSU

Definidas as proporções, os materiais foram colocados em recipientes plásticos e misturados com água suficiente para produzir a umidade dos RSU encontrada em campo (32,40%), Figura 32, durante esse procedimento os lotes dos materiais foram homogeneizados.

Figura 32 – Adição de água e homogeneização dos materiais

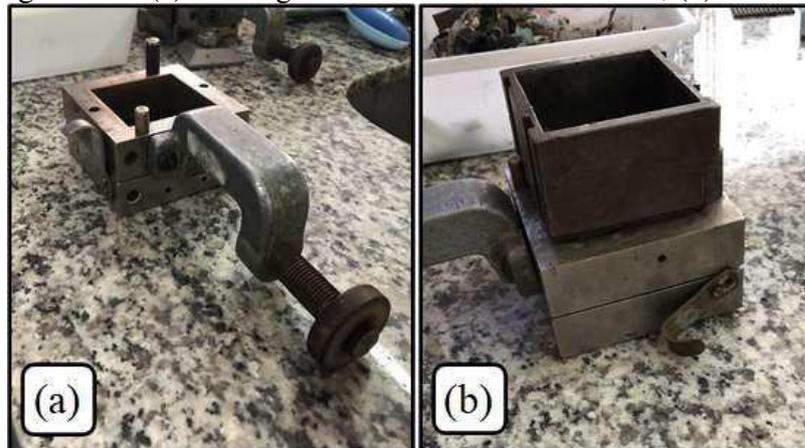


Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.4.1.4. Moldagem do corpo de prova dos RSU

Para moldagem dos corpos de prova é necessário a montagem da caixa de cisalhamento, inicialmente as duas partes da caixa bipartida são montadas e os parafusos de fixação são colocados, Figura 33a, em seguida é colocado um gabarito com as mesmas dimensões da caixa de cisalhamento para facilitar a disposição do material dentro da caixa, Figura 33b.

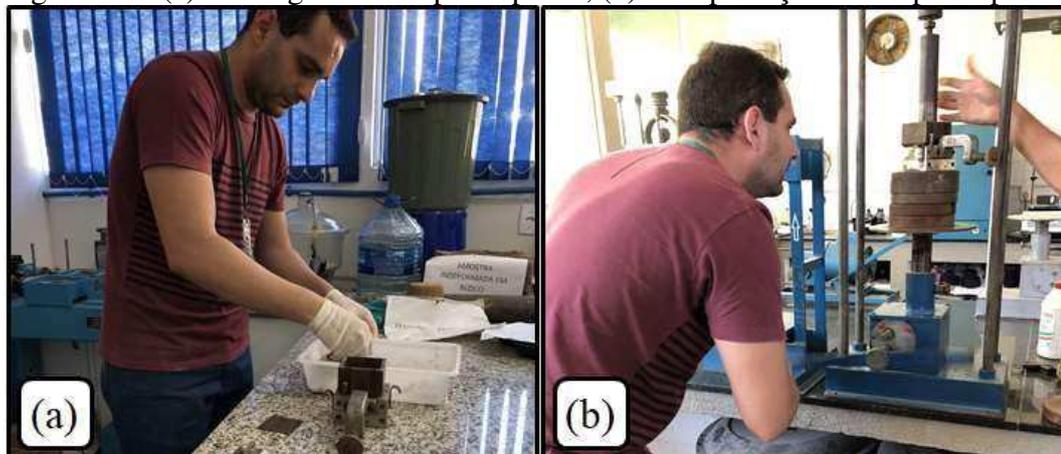
Figura 33 – (a) Montagem da caixa de cisalhamento, (b) Gabarito



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Os corpos de prova foram moldados por compactação estática em uma prensa hidráulica conforme massa específica definida para o ensaio, no início o material foi colocado na caixa de cisalhamento, Figura 34a, logo após a amostra foi levada para compactação deixando-a rente à superfície da caixa com o auxílio da prensa hidráulica manual de acordo com a Figura 34b. Com isso a amostra está preparada para o ensaio de cisalhamento direto.

Figura 34 – (a) Moldagem do corpo de prova; (b) Compactação do corpo de prova



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

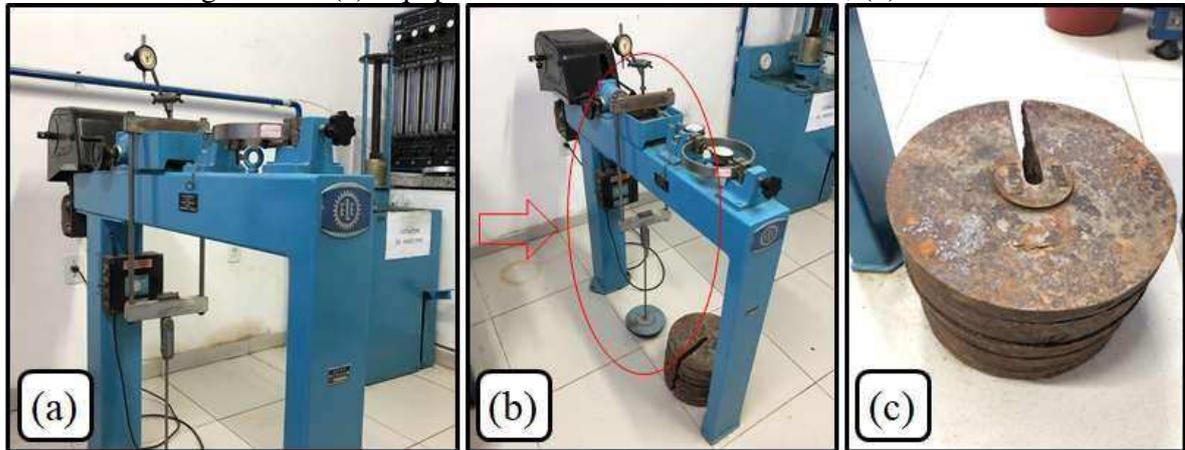
4.4.2. Ensaio de cisalhamento direto dos RSU

4.4.2.1. Especificações do equipamento

O equipamento utilizado para o ensaio de cisalhamento direto foi a prensa de cisalhamento da marca ELE, desenvolvida para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos (ângulo de atrito e coesão), Figura 35a, com sistema de carga confinante por meio de pesos em pendural, Figura 35b. As cargas do ensaio são adicionadas

de forma manual com o auxílio anilhas metálicas de 9 Kg cada (Figura 35c), cada anilhas implica em uma carga de 25 Kgf ao sistema.

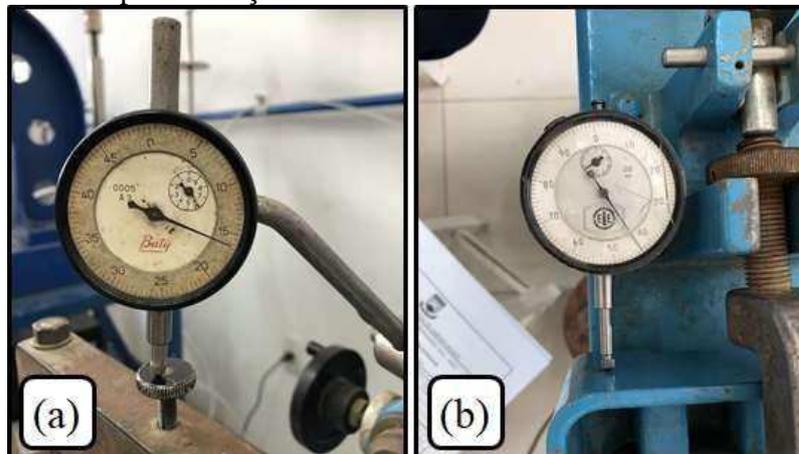
Figura 35 – (a) Equipamento de cisalhamento direto; (b) Pendural



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Para realização das leituras dos deslocamentos verticais foi utilizado um extensômetro da marca Baty, com precisão de 0,0005 polegadas, Figura 36a. Já para os deslocamentos horizontais foi utilizado o extensômetro da marca Ele, com sensibilidade de 0,001 polegadas, Figura 36b.

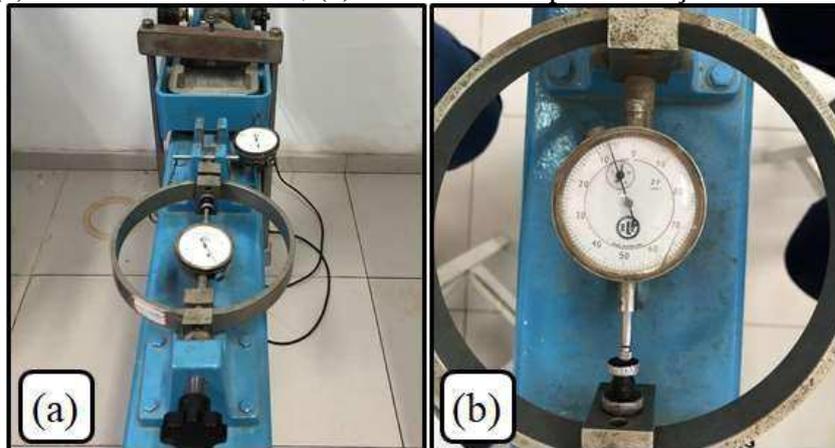
Figura 36 – (a) Extensômetro para medição dos deslocamentos verticais; (b) Extensômetro para medição dos deslocamentos horizontais



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Já a força horizontal foi determinada a partir de um anel dinamométrico com constante de 0,154 kgf/div. e número máximo de divisões de 1200 div, resultando em uma capacidade de 184,8 kgf, Figuras 37a e 37b.

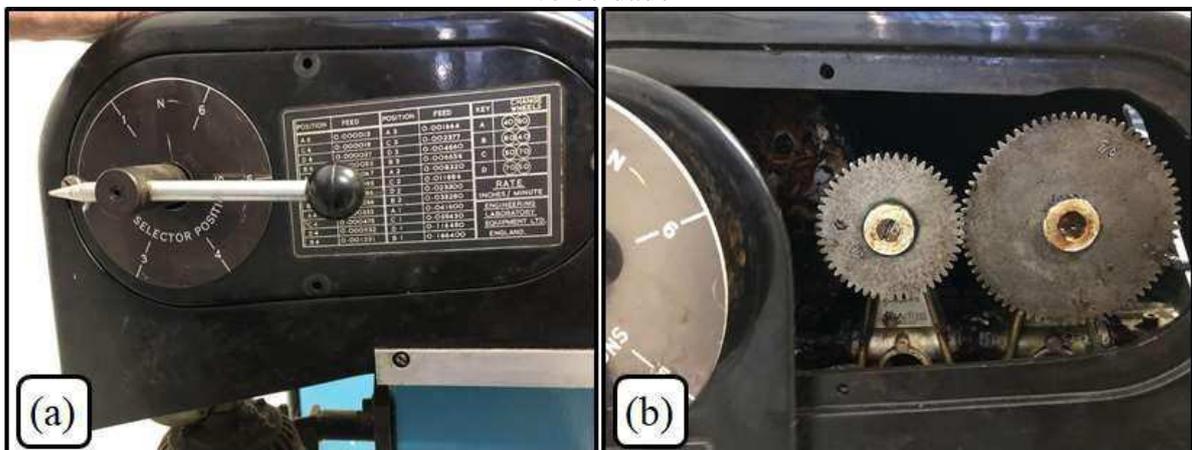
Figura 37 – (a) Anel dinamométrico; (b) Extensômetro para medição da deformação do anel



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

A prensa de cisalhamento é dotada de um sistema de motor controlado que permite o comando e controle da velocidade de avanço, esse sistema é controlado manualmente por meio de catracas que delimita a velocidade do mecanismo. A velocidade de deslocamento da caixa de cisalhamento varia de 0,001664 a 0,1664 pol. x min⁻¹, Figura 38a. Após a instalação das catracas, Figura 38b, foi realizada uma verificação da velocidade medindo o tempo necessário para o deslocamento estabelecido para o ensaio (15,2 mm).

Figura 38 – (a) Variação da velocidade de deslocamento; (b) Catracas limitadoras de velocidade



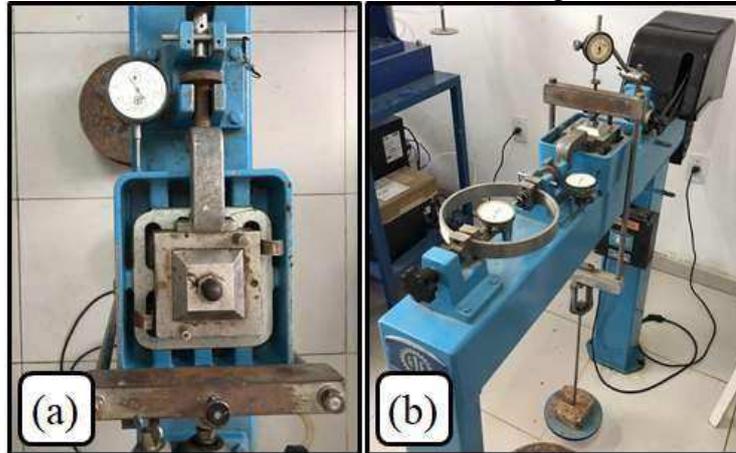
Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

4.4.2.2. Execução do ensaio de cisalhamento direto dos RSU

A realização do ensaio de cisalhamento direto seguiu as especificações da norma D3080 (ASTM, 2003), na condição drenada. Com a amostra preparada e o aparelho de cisalhamento montado dar-se-á início ao ensaio. Inicialmente a caixa bi partida é colocada na caixa de cisalhamento, conforme Figura 39a, e o pendural é adicionado com uma carga de

adensamento de 5 KPa (Figura 39b), para isso foi adotado o tempo de adensamento para a estabilização das tensões normais de 5 minutos.

Figura 39 – (a) Caixa de cisalhamento; (b) Carga de adensamento



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Após o adensamento a carga de 5 KPa foi retirada e adicionada a carga do ensaio, Figura 40. as cargas para realização do ensaio foram definidas de acordo com uma célula de 30 m de altura (300 KPa, carga máxima), e outras duas cargas intermediárias, 50 Kpa e 150 Kpa. Com a carga adicionada foram retirados os parafusos da caixa bi partida, posicionados os extensômetros e acionado o motor do equipamento.

Figura 40 – Realização do ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

Iniciado o ensaio as leituras são realizadas em função da deformação, sendo registrados os deslocamentos horizontais e verticais, Figura 41. São realizadas leituras até o deslocamento de 13,7mm (22,8% de deformação), devido às limitações do equipamento.

Figura 41 – Leituras dos deslocamentos



Fonte: Acervo da pesquisa (2018).

De posse dos dados de deslocamentos são elaborados os gráficos de tensão cisalhante x deslocamento horizontal para todas as tensões normais (50, 150 e 300 kPa), como também são traçados gráficos de deslocamento vertical x deslocamento horizontal para estudo da variação volumétrica da amostra. Os ensaios foram realizados em triplicata com corpos de prova moldados para cada tensão. Os ensaios foram realizados com percentuais de plásticos moles de 0%, 7,5%, 15%.

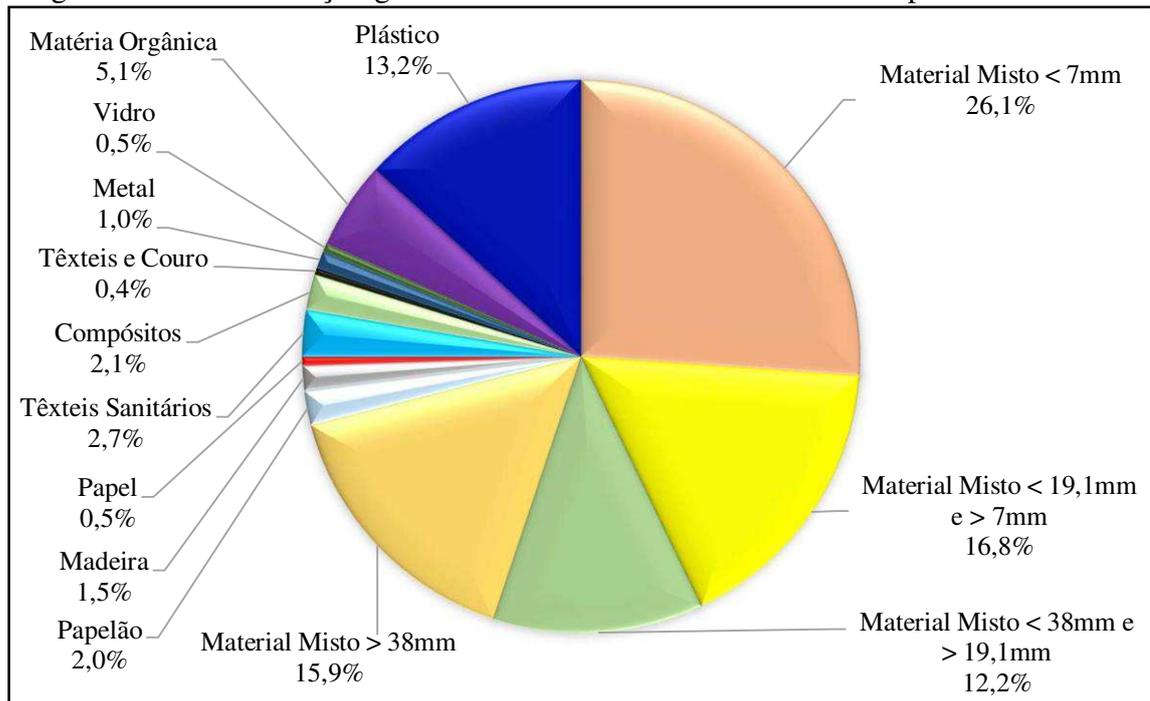
5. RESULTADOS E DISCURSÕES

5.1. Composição dos RSU

5.1.1. Composição gravimétrica dos RSU

As composições gravimétrica e volumétrica foram obtidas de acordo com adaptações da norma alemã Empfehlungen E1-7 (GDA, 1997) em onze categorias. A Figura 42 ilustra os resultados da caracterização gravimétrica dos RSU do ASCG.

Figura 42 - Caracterização gravimétrica do Aterro Sanitário em Campina Grande - PB



Fonte: GGA (2018).

Conforme Figura 42, o material misto representou a maior porcentagem, totalizando 71% do peso total dos RSU depositados no ASCG – PB. A alta porcentagem de material misto está relacionada ao fato de que, os resíduos caracterizados, já estavam aterrados com a camada intermediária de solo e compactados, alterando suas propriedades e características deixando-os com difícil identificação durante a realização da composição gravimétrica, de modo que uma fração da matéria orgânica, provavelmente, esteja incluída na composição. Brito (2017) também observou elevado percentual de material misto, uma porcentagem de aproximadamente 75,68%.

A matéria orgânica apresentou uma porcentagem de 5,1%. Esse baixo percentual está relacionado à coleta dos resíduos, uma vez que, os materiais coletados haviam passado pelo processo de homogeneização, e parte da matéria orgânica provavelmente esteja misturada ao material misto, bem como já passaram pelo processo de biodegradação. Araújo Neto (2016)

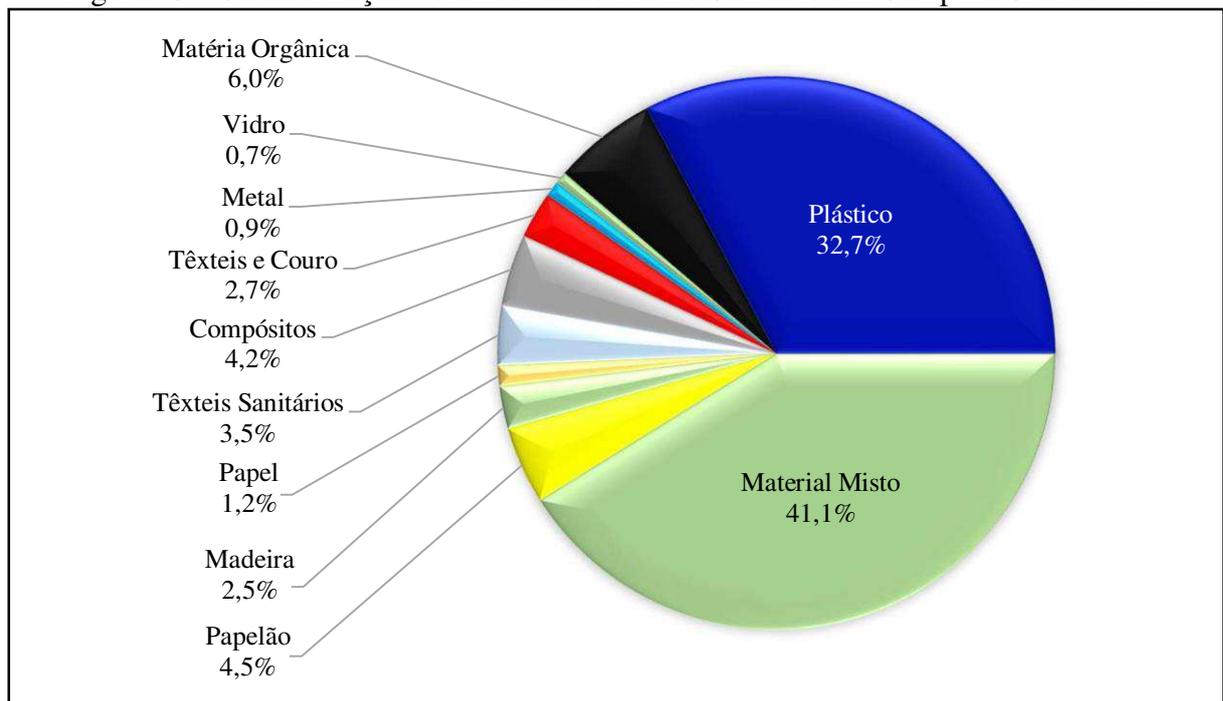
encontrou um percentual de 46,5% de matéria orgânica presente nos resíduos do ASCG, porcentagem superior a determinada neste estudo. Porém, esses resíduos foram coletados direto da fonte geradora.

O percentual de materiais considerados recicláveis (17,2%), como plástico (13,2%), papel (0,5%), papelão (2,0%), vidro (0,5%), metal (1,0%), somados com as porcentagens de compostos (2,1%), madeira (1,5%), têxteis e couro (0,4%) podem influenciar no retardamento do processo de decomposição dos RSU. A presença desses materiais no interior do maciço sanitário pode dificultar o fluxo de líquidos e gases, reduzindo assim, a eficiência dos sistemas de drenagem (GUEDES, 2018).

5.1.2. Composição volumétrica dos RSU

Após a realização da composição gravimétrica foi realizada a composição volumétrica dos RSU do ASCG, vale salientar que essa composição foi realizada com os resíduos soltos, na Figura 43 pode-se observar o resultado desse ensaio.

Figura 43 - Caracterização volumétrica do Aterro Sanitário em Campina Grande - PB



Fonte: GGA (2018).

Na composição gravimétrica os plásticos apresentaram uma porcentagem de apenas 13,2%, enquanto que em termos de volume (Figura 43), a porcentagem praticamente foi triplicada, apresentando 32,7% da quantidade total dos resíduos. Cabe ressaltar que a composição volumétrica foi realizada com os resíduos soltos, dessa forma, os plásticos apresentaram alto percentual em volume, porém, se destaca como um material altamente

compressível. Em relação ao material misto, este também apresentou a maior porcentagem em volume, 41,1%, porém, inferior à sua porcentagem em peso de 71,0%.

Além disso, de acordo com Araújo Neto (2016), Abreu (2015) e Cardim (2008) os plásticos e os têxteis apresentam um papel de matriz de reforço, contribuindo para a maior resistência ao cisalhamento. Esse fato auxilia na elevação da altura das células e na estabilidade do maciço. Porém, como ponto negativo, os plásticos podem dificultar os processos de degradação dos RSU e também a compactação, ocasionando a formação de bolsões de líquidos e gases.

Ainda, observa-se na Figura 43 que a matéria orgânica variou pouco em relação ao volume, apresentando uma porcentagem em volume de 6,0%, próxima à sua porcentagem em peso de 5,1%. Isso é justificado devido ao fato de a matéria orgânica não apresentar grande variação de volume imediato, apenas haverá redução de volume com o processo biodegradativo (ARAÚJO NETO, 2016).

Os demais componentes como papel, papelão, têxteis sanitários, compósitos, metal, vidro, têxteis e couro e madeira apresentaram um aumento na porcentagem volumétrica em relação à porcentagem gravimétrica. Isso ocorre devido ao fato desses materiais possuírem formas geométricas variadas e que ocupam espaços consideráveis, porém, possuem pequena densidade (VIEIRA, 2018).

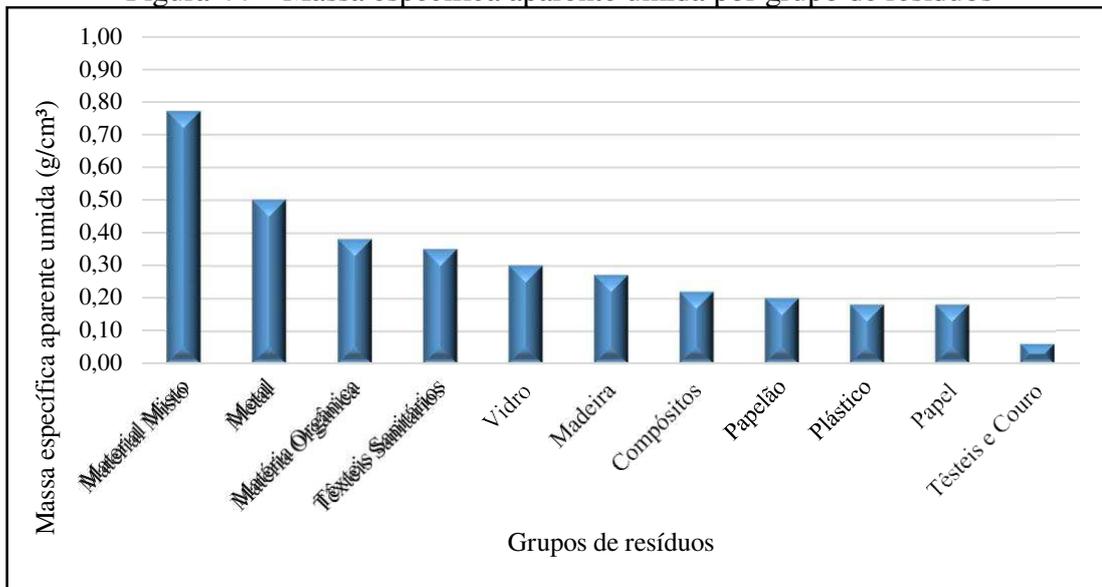
Os resíduos metálicos apresentaram baixo percentual gravimétrico (1,0%) e volumétrico (0,9%) no aterro. Isso pode estar associado ao fato desse material apresentar alto valor no mercado de recicláveis e serem conduzidos ao aterro em pequenos percentuais.

5.2. Massa específica dos RSU

5.2.1. Massa específica aparente dos RSU

A partir dos dados obtidos na composição gravimétrica e volumétrica dos RSU foi possível obter a massa específica aparente de cada componente dos resíduos e dos resíduos como um todo, conforme a Figura 44.

Figura 44 – Massa específica aparente úmida por grupo de resíduos



A massa específica aparente úmida dos resíduos foi de $0,44 \text{ g/cm}^3$. Analisando os valores para cada componente, observa-se com menores valores de massa específica dentre os componentes dos RSU, os têxteis e couros, papéis e plásticos, apresentando massa específica aparente de $0,06 \text{ g/cm}^3$, $0,18 \text{ g/cm}^3$ e $0,18 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, logo necessitam de um maior volume para serem tratados em aterros.

5.2.2. Massa específica das partículas dos RSU

Os resultados dos testes de massa específica das partículas dos resíduos sólidos urbanos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Massa específica das partículas dos RSU

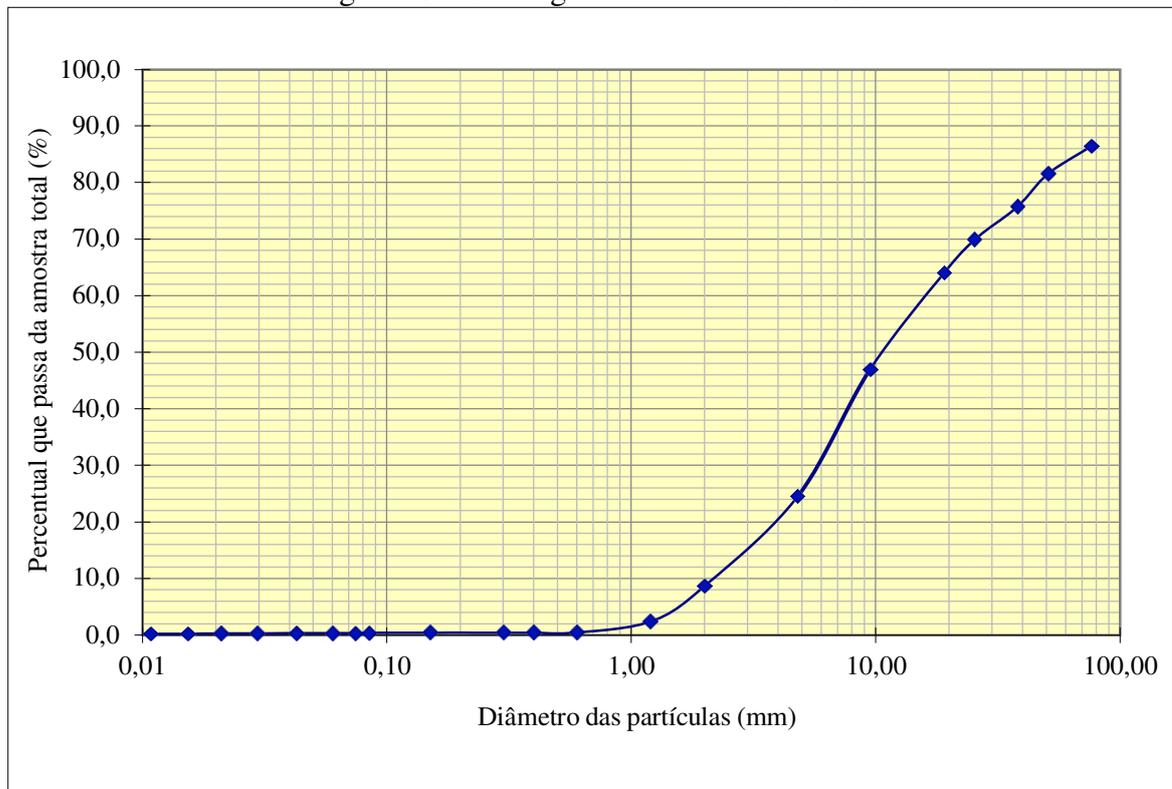
Massa específica (g/cm^3)	
Teste 1	1,19
Teste 2	1,54
Teste 3	1,49
Média	1,41

Os resultados encontrados neste estudo foram próximos, apresentando um desvio padrão de $0,19 \text{ g/cm}^3$, e próximos aos valores obtidos por Araújo Neto (2016), que encontrou valores de massa específica real de resíduos novos entre $1,03$ a $1,59 \text{ g/cm}^3$ e próximo ao obtido por Yesiller et al. (2014), que encontraram um valor médio de $1,38 \text{ g/cm}^3$ para resíduos não compactados, o que indica que a análise é eficaz para a determinação da massa específica real.

5.3. Tamanho das partículas dos RSU

A Figura 45 apresenta a curva granulométrica obtida por meio dos ensaios realizados. Analisando os resultados, observou-se que o teor de finos foi de aproximadamente de 67,0% o que representa condições favoráveis em termo de biodegradação dos resíduos. Segundo Alcântara (2007), quanto menor o tamanho das partículas dos resíduos sólidos, maior a área superficial específica e maior o contato entre os microrganismos, podendo acelerar o processo de biodegradação.

Figura 45 - Curva granulométrica dos RSU



Segundo Farias (2014), a presença desses finos favorece a resistência do maciço sanitário, pois tendem a ocupar os vazios existentes devido aos resíduos com grandes dimensões, quando submetidos a compactação.

Nesta pesquisa, a granulometria foi realizada com a totalidade dos resíduos amostrados, por isso, observa-se na Figura 45, que 13,6% dos resíduos ficaram retidos na peneira de 76,2 mm, apesar de apresentarem menor peso, ocupam grande volume no interior do maciço, e são capazes de gerar muitos vazios. Esse comportamento acontece porque os resíduos geralmente têm formas complexas.

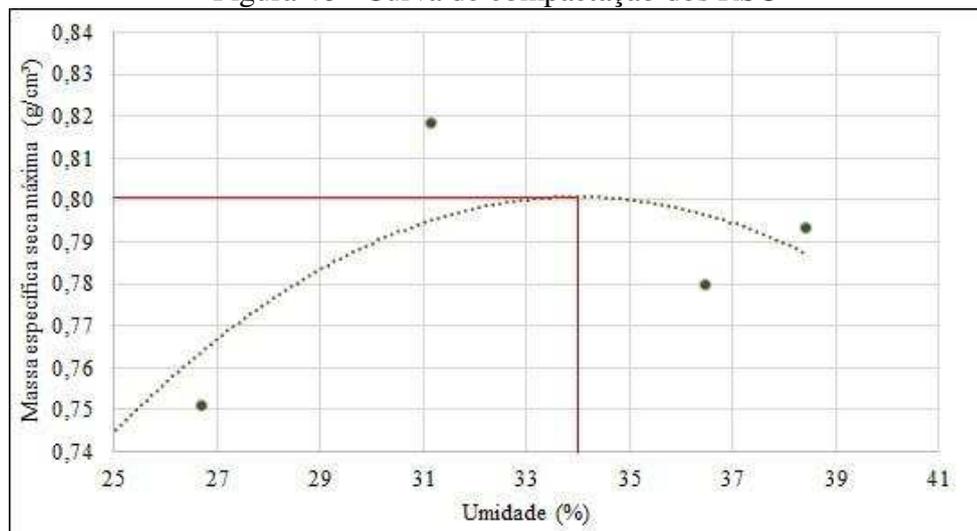
Devido a heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos, observa-se a presença da fração grossa e fina, sendo encontrados resíduos de diversos tipos e de materiais com

formatos variados, percebe-se que à medida que os diâmetros das malhas diminuíram, as massas específicas dos materiais aumentaram gradativamente, resultando em uma curva bem graduada.

5.4. Compactação dos RSU

O ensaio de compactação realizado em laboratório possibilitou a determinação da massa específica seca máxima dos RSU e do teor de umidade ótimo, conforme Figura 46.

Figura 46 - Curva de compactação dos RSU



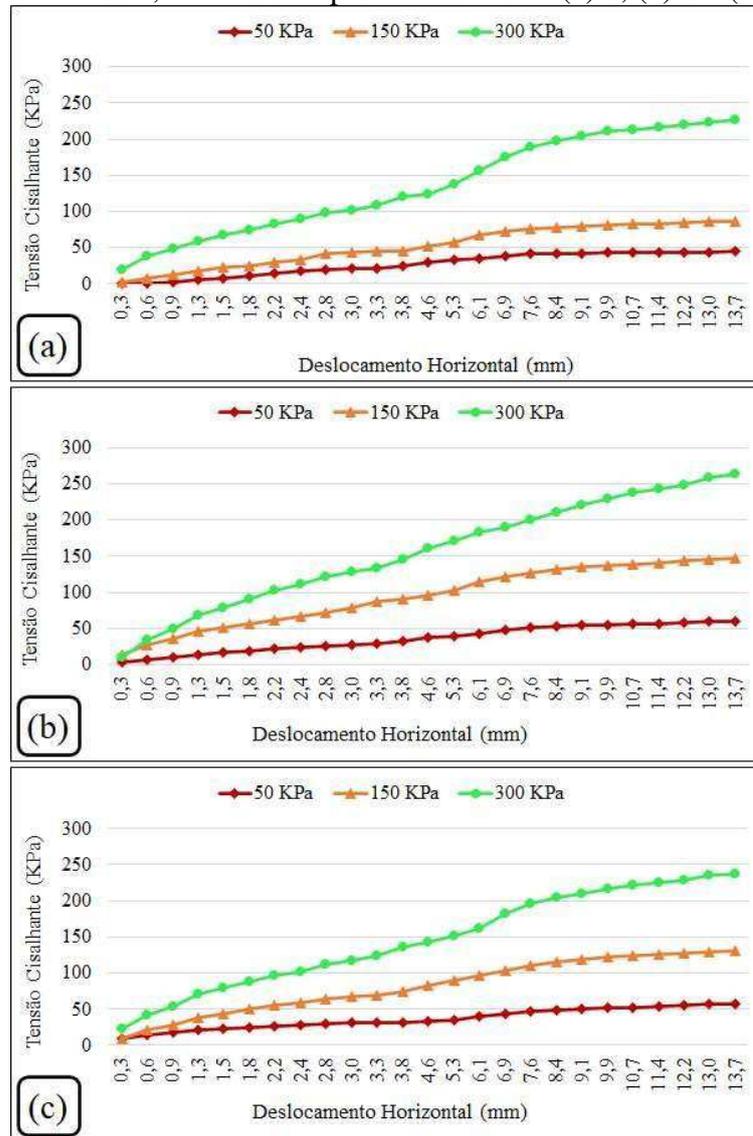
Observa-se na curva de compactação dos RSU que a massa específica seca máxima é de $0,80 \text{ g/cm}^3$ e o teor de umidade ótimo é de 34% . O valor da massa específica obtido, pode ser considerado dentro da faixa de variação típica de aterros de RSU que, geralmente vai de $0,30 \text{ g/cm}^3$ até $1,40 \text{ g/cm}^3$ (ALCÂTARA, 2007). De acordo com Fassett et al. (1994) os valores de massa específica encontram-se no intervalo de $0,31$ até $0,92 \text{ g/cm}^3$, em camadas que tenham recebido pequena compactação.

Ainda nesse sentido, Boscov (2008) relata que a média da massa específica dos aterros brasileiros é $1,00 \text{ g/cm}^3$. Já Farias (2014) e Araújo Neto (2016) encontraram valores de $1,22 \text{ g/cm}^3$ e $1,04 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, em ensaios realizados em laboratório.

5.5. Ensaio de cisalhamento direto dos RSU

As curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para o percentual de 0,0% de fibras são mostradas na Figura 47, na Figura 47a tem-se a curva da amostra 1, já as Figuras 47b e c apresentam as curvas das amostras 2 e 3, respectivamente. De modo geral, à medida que há o aumento da tensão normal, as tensões cisalhantes também aumentam, devido a maior interação entre as partículas.

Figura 47 – Comportamento da Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal de material misto com 0,0% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3



Observa-se nos gráficos da Figura 47 que o acréscimo de tensões cisalhantes no decorrer do ensaio ocorre de forma discreta para as tensões normais aplicadas de 50KPa e 150KPa, variando de 0KPa até o máximo de 60 KPa para as três amostras estudadas na tensão normal de 50KPa. Já para a tensão normal de 300KPa o aumento é consideravelmente maior, aumentando de 0KPa para 263KPa. Verifica-se também que em todos os ensaios, a tensão de

cisalhamento apresentou um comportamento crescente até atingir um deslocamento horizontal de 13,7 mm (22,8%), que é o deslocamento máximo da caixa de cisalhamento do equipamento e, portanto, o ensaio precisa ser interrompido.

Nas Figuras 47 e 48 são apresentados os resultados dos ensaios para os percentuais de fibras de 7,5% e 15,0%, que também apresentam curvas ascendentes durante todo o ensaio. Comportamentos como esses também foram observados por Corrêa, Jucá & Motta (2015) e Brito (2017) com amostras ensaiadas com percentuais de plásticos variando entre 1% a 6% e 1% a 10%, respectivamente. Resultados similares também foram encontrados por Vieira (2018), para amostras de resíduos do ASCG recompostas com teor de plásticos em 13,2%. Os percentuais utilizados por esses autores encontram-se na faixa analisada na pesquisa.

De forma geral, os ensaios de todas as amostras com o mesmo percentual de fibras apresentaram comportamento semelhantes, com variações que são aceitáveis devido as imprecisões do próprio ensaio, como também ao arranjo das fibras, e a interação das fibras com a massa de resíduos, que influenciam diretamente na resistência ao cisalhamento.

A variação nos picos de tensões de cisalhamento para as amostras com 0% de fibras foi de 15KPa (25%), para a tensão normal de 50KPa e de 37KPa (14%), para a tensão normal de 300Kpa. Já nas amostras com 7,5% de fibras essa variação foi de 22KPa (34%), para a tensão normal de 50KPa, e 54KPa (18%), para a tensão normal de 300KPa. Para as amostras com o maior percentual de fibras (15%) apresentaram variação relativa de 17KPa (25%), para a tensão normal de 50KPa, e 52Kpa (18%) para a tensão normal de 300Kpa.

Figura 48 – Comportamento da Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal de material misto com 7,5% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3

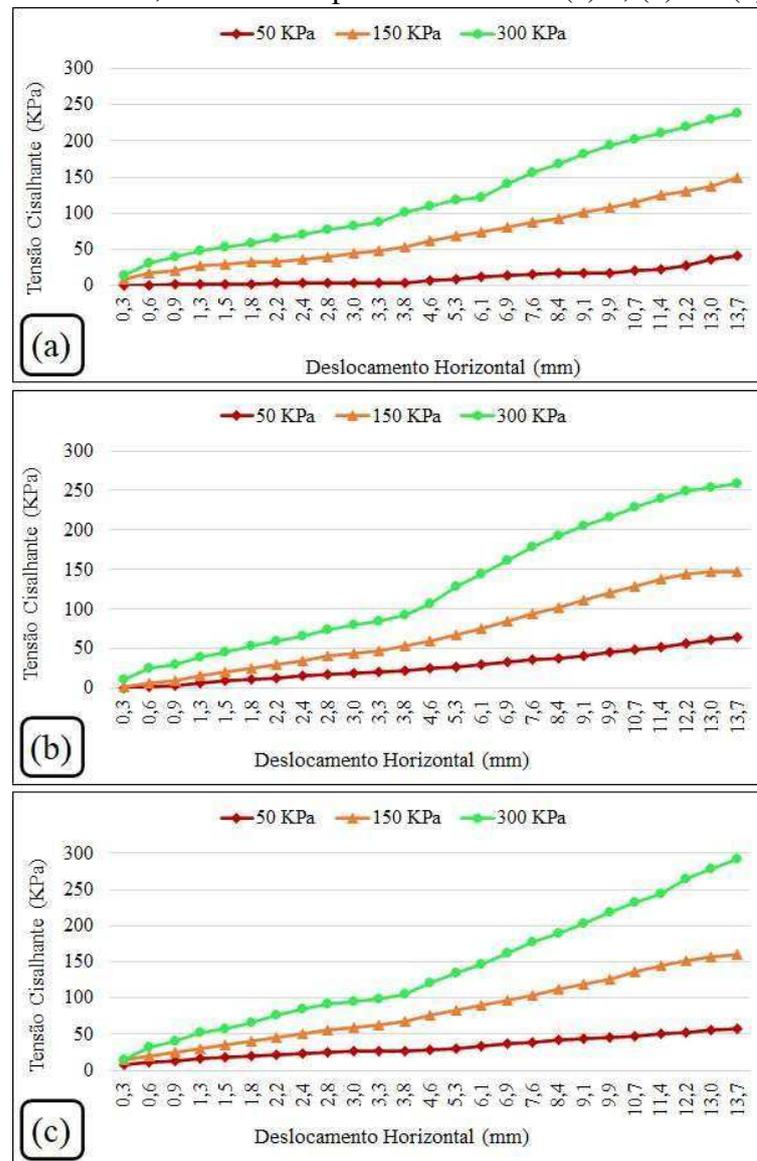
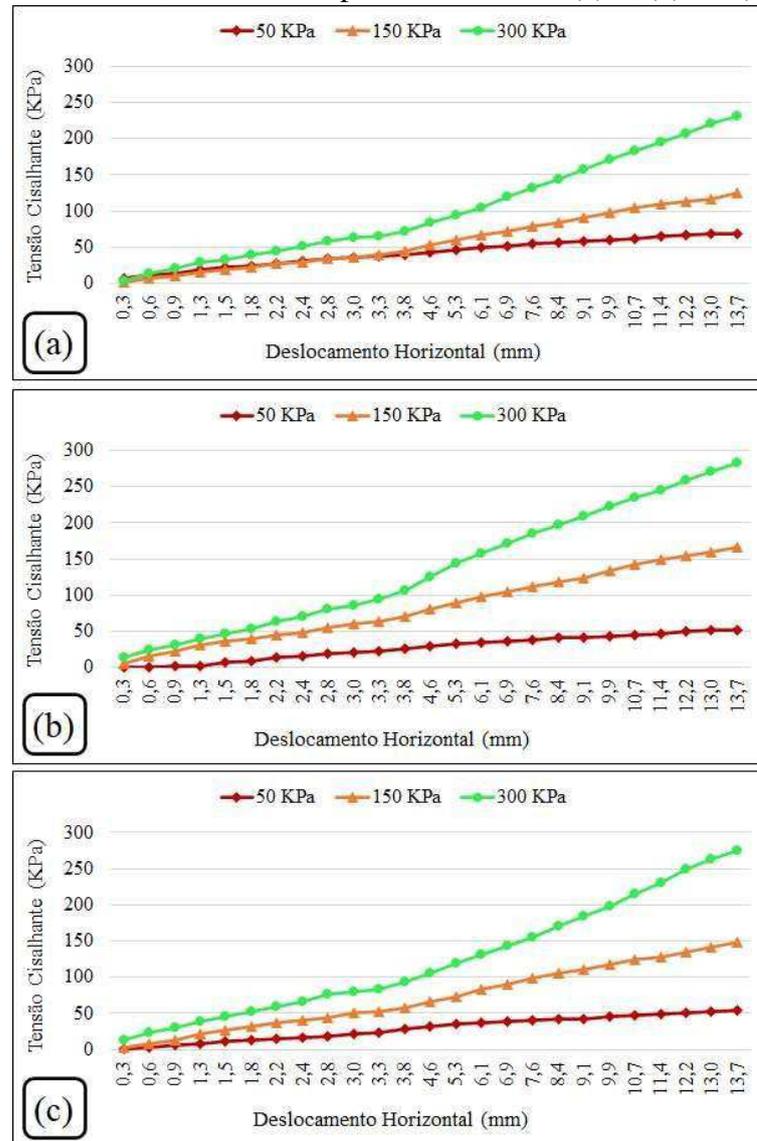


Figura 49 – Comportamento da Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal de material misto com 15,0% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3



O comportamento da tensão de cisalhamento média dos RSU *versus* o percentual de fibras é apresentado na Tabela 5, aonde pode-se observar que a tensão de cisalhamento é crescente com o aumento da tensão normal para todos os percentuais de fibras, porém isso não ocorre quando é analisado o aumento do percentual de fibras para uma mesma tensão normal, ocorrendo um decréscimo no caso dos percentuais de fibra de 7,5% e 15,0% para a tensão normal de 150 KPa.

Esse acréscimo nas tensões de cisalhamento com o aumento do percentual de fibras é enfatizado nos estudos desenvolvidos por Corrêa, Jucá e Motta (2015) que relatam a importância da presença dos plásticos no comportamento mecânico dos aterros sanitários.

Tabela 5 – Tensão de cisalhamento média versus percentual de fibras

Percentual de fibras	Tensão de cisalhamento média		
	50 KPa	150 KPa	300 KPa
0,0%	54	122	242
7,5%	55	152	263
15,0%	58	147	263

Também foram analisados os resultados de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para saber se houve diminuição ou aumento de volume. Das Figuras 50 a 52 são apresentados os resultados desses ensaios.

Para os menores percentuais de fibras 0,0% e 7,5%, o comportamento das curvas são semelhantes ao de areias fofas. As medidas da variação do volume durante o carregamento axial indicam uma redução gradual do volume, com pequenos acréscimos para a tensão normal de 50 KPa.

Já para o percentual de 15,0% todas as amostras sofrem uma pequena compressão, reduzindo seu volume, e gradualmente com o deslocamento horizontal sofre uma expansão que é mais expressiva para as tensões de 50 KPa e 150 KPa, entretanto para a tensão de 300 KPa esse comportamento é observado em apenas uma amostra, essas curvas são características de areias compactas. Resultados semelhantes a esses também foram encontrados por Norberto (2019).

Figura 50 – Comportamento do deslocamento vertical versus deslocamento horizontal de material misto com 0,0% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3

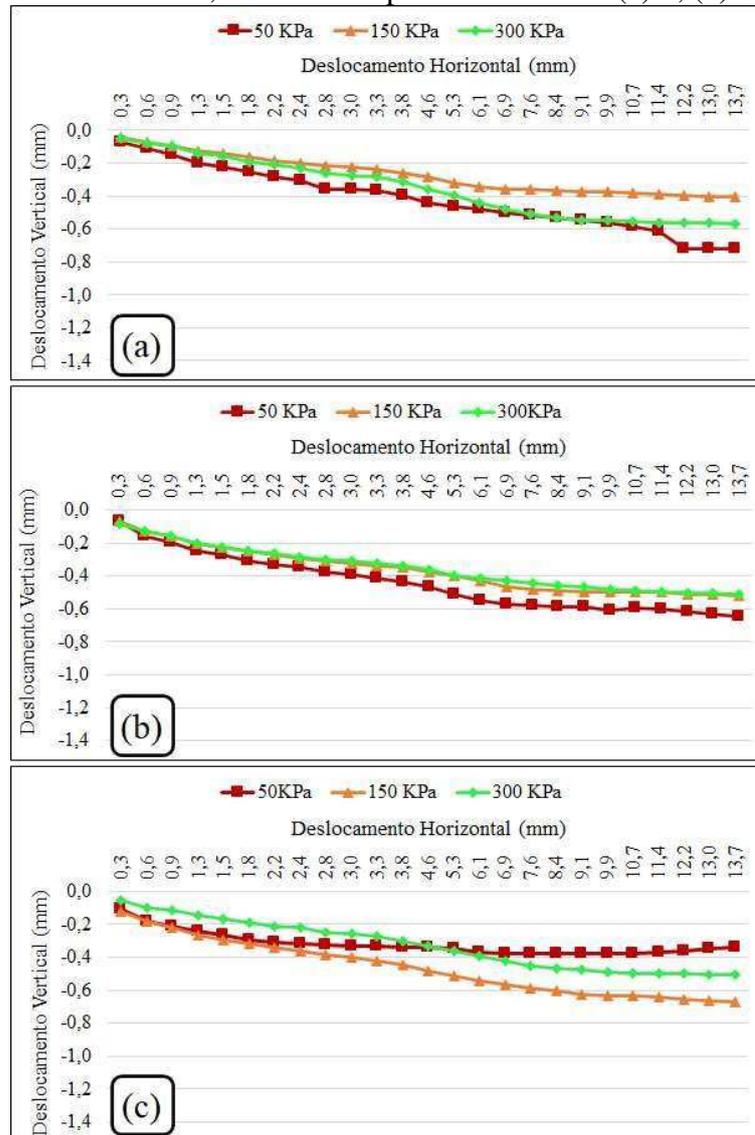


Figura 51 – Comportamento do deslocamento vertical versus deslocamento horizontal de material misto com 7,5% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3

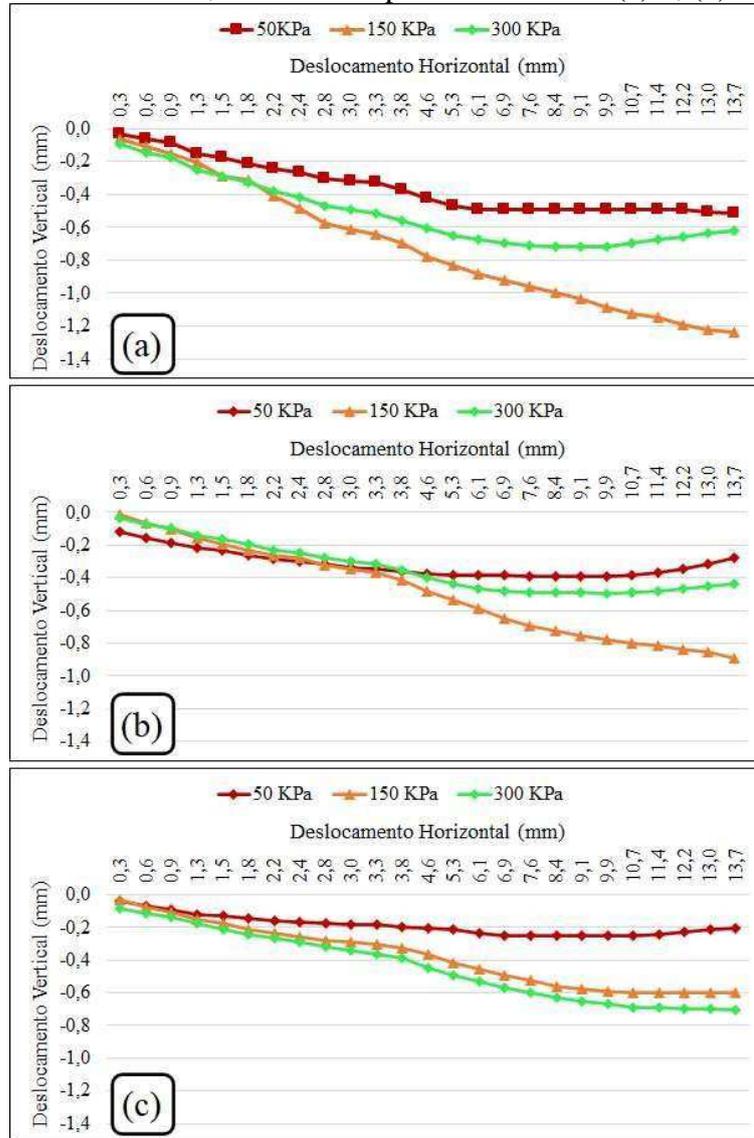
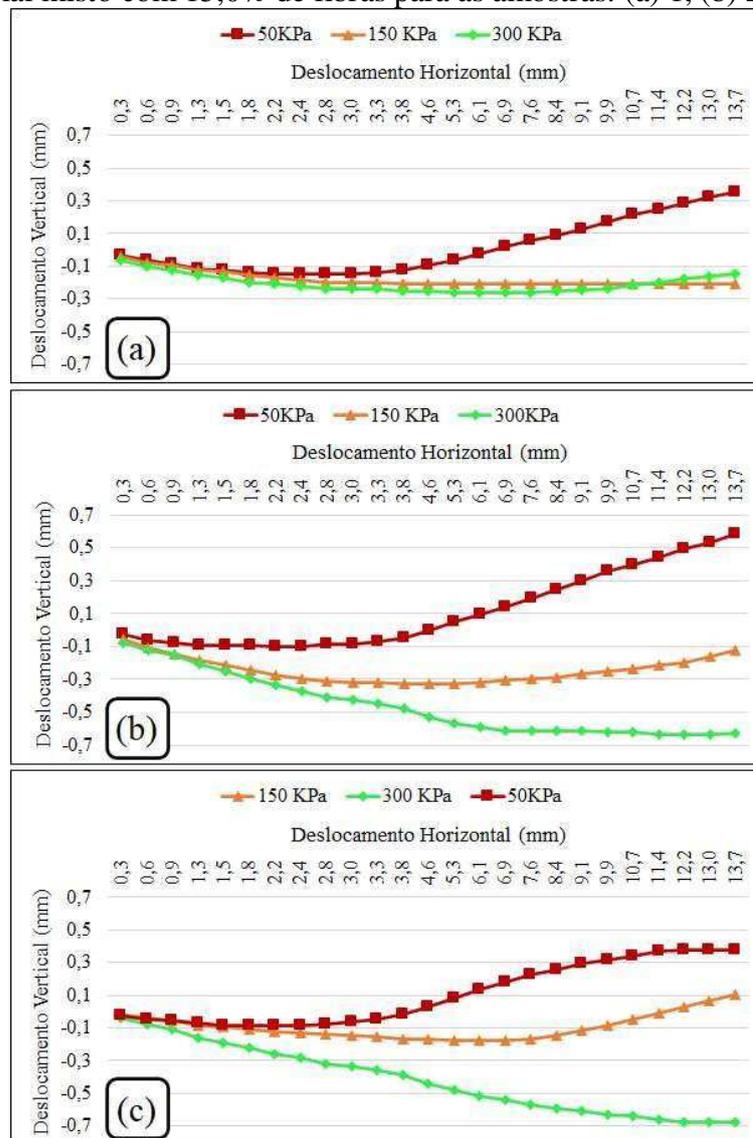


Figura 52 – Comportamento do deslocamento vertical versus deslocamento horizontal de material misto com 15,0% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3



Dos gráficos de tensão normal *versus* deslocamento horizontal foram extraídos os valores das tensões cisalhantes de pico e com suas correspondentes tensões normais, para os três níveis de tensão dos ensaios, foi possível construir a envoltória de resistência para as amostras com 0,0%, 7,5% e 15,0% de fibras, o resultado é apresentado nas Figuras 53 a 55.

Para avaliar a qualidade dos resultados obtidos nas envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb foram analisados os coeficientes de determinação, também chamado de R^2 , que apresentaram valores entre 0,974 e 0,999. Sendo assim, como esses valores estão próximos a unidade, pode-se considerar que o ajustamento da reta possui boa qualidade em relação ao comportamento dos pontos. Segundo Pinheiro et al. (2013) A qualidade do ajuste obtido por regressão linear pode ser avaliada por meio do coeficiente de determinação. Sendo que, quanto mais próximo esse valor estiver da unidade, melhor é a qualidade do ajuste.

Figura 53 – Comportamento da tensão normal versus tensão de cisalhamento de material misto com 0,0% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3

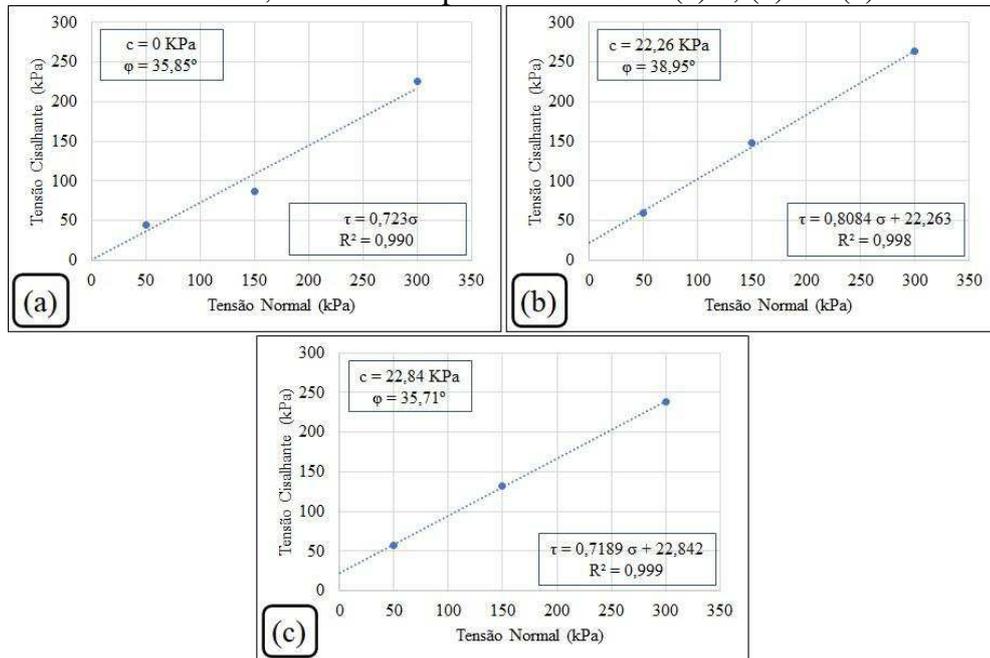


Figura 54 – Comportamento da tensão normal versus tensão de cisalhamento de material misto com 7,5% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3

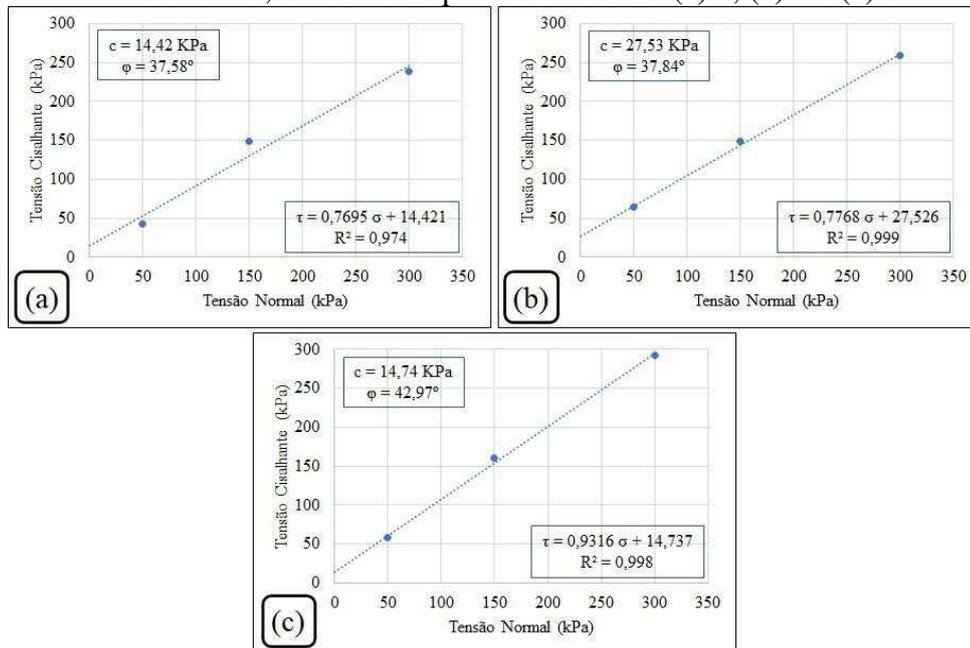
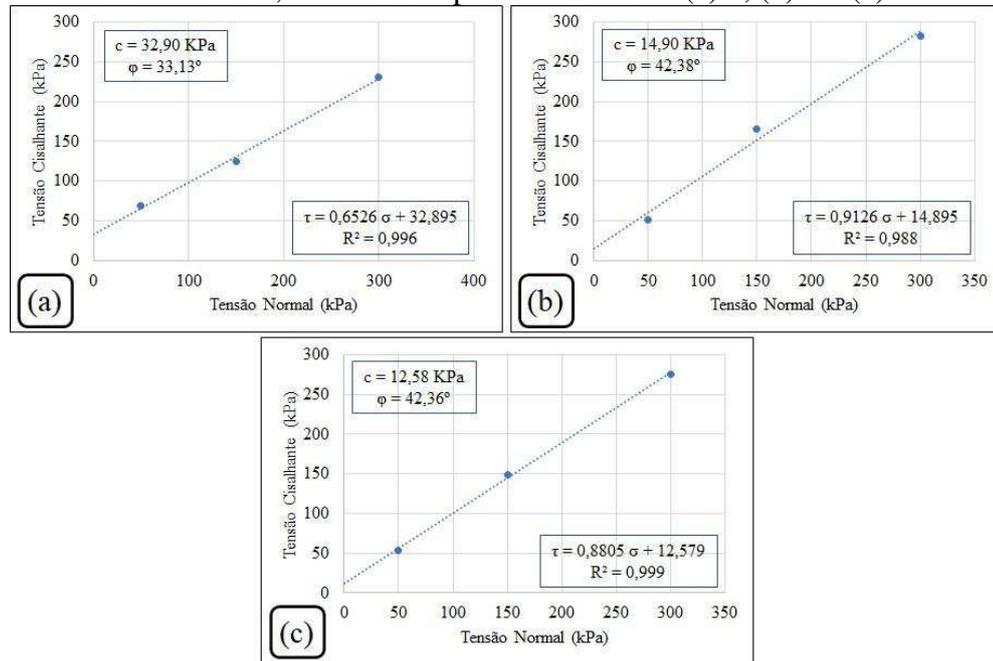


Figura 55 – Comportamento da tensão normal versus tensão de cisalhamento de material misto com 15,0% de fibras para as amostras: (a) 1, (b) 2 e (c) 3



Os valores médios de coesão e ângulo de atrito são apresentados na Tabela 6, observa-se um acréscimo progressivo da coesão com o aumento do percentual de fibras. Já o ângulo de atrito tem acréscimo no valor quando comparado ao percentual de 0,0% de fibras, porém tem um pequeno decréscimo (0,4%) quando avaliados os percentuais de 7,5% e 15,0%.

Tabela 6 – Coesão e ângulo de atrito médios versus percentual de fibras

Percentual de fibras	Coesão média (KPa)	Ângulo de atrito médio ($^\circ$)
0,0%	15,03	36,84
7,5%	19,90	39,46
15,0%	20,13	39,30

6. CONCLUSÕES

A investigação laboratorial das fibras na mistura com material misto, simulando a massa de resíduos sólidos urbanos de um aterro sanitário, permitiu obter as seguintes conclusões:

Na análise gravimétrica foi obtido um percentual de fibras de 13,6% que está dentro da faixa estudada de 0,0% a 15,0%.

A metodologia para preparação de amostras dos resíduos mostra-se eficiente, porém é necessário realizar adaptações no equipamento de cisalhamento direto, de modo a permitir deslocamentos horizontais maiores, e assim mobilizar totalmente as fibras atingindo a resistência ao cisalhamento máxima.

A um acréscimo da coesão e ângulo de atrito dos resíduos com o aumento do percentual de fibras, entretanto esse acréscimo é mais acentuado quando o aumento é de 0,0% para 7,5% de fibras.

7. REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

_____. NBR 6457: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016, 9p.

_____. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016, 10p.

_____. NBR 7181-: Solo - análise granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016d. 12p.

_____. NBR 7182: Solo - ensaio de compactação – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016b. 9p.

_____. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1992. 7p.

_____. NBR 10004: Resíduos Sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004^a 74p.

_____. NBR 10007: Resíduos Sólidos – amostragem de Resíduos. Rio de Janeiro, 2004c. 21p.

_____. NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009, 33p.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**: 2016. Rio de Janeiro, 2016.

ABREU, A. E. S. de. **Investigação geofísica e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades**. 2015. 233f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados**. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ALIDOUST, P.; KERAMATI, M.; SHARIATMADARI, N. **Laboratory studies on effect of fiber content on dynamic characteristics of municipal solid waste**. Waste Management, v. 76, p. 126-137, 2018.

ANDRADES, S. A. **Estudo do fator de segurança de um aterro sanitário tipo convencional comparando com um aterro sanitário tipo encosta**. 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

ARAÚJO NETO, C. L. **Análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para previsão das deformações de aterros**

sanitários. 2016. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2016.

ARAÚJO NETO, C. L.; NÓBREGA, B. M. A.; FREITAS, R. R.; MONTEIRO, V. E. D.; DE PAIVA, W. **Estudo da compactação de resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia - CONTECC 2015. Fortaleza, 2015.

ASTM - American Society for Testing and Materials, D. 3-9. **Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions**. D3080/D3080M, 2011.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. Oficina de Textos, 2008.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Lex: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS: Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Versão pós Audiências e Consultas Públicas para Conselhos Nacionais. Brasília – DF, MMA/SRHU, 2012.

BRITO, I. S. A. **Análise dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento Devido as Fibras Têxteis Presentes nos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2017. 78f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – UNINASSAU, Recife, 2017.

CARDIM, R.D. **Estudo da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões**. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

CANEVAROLO Jr, S. V. (2007) **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo, Artliber.

CALLE, J. A. C. **Comportamento Geomecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2007, 160f, Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação**. 2008, 316f. Tese de Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2008.

CARVALHO, M. F. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. 1999, 330f. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo – USP, São Carlos, 1999.

CORRÊA, C. L. **Análise da influência do plástico mole na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

CORRÊA, C.; JUCÁ, J. F.; MOTTA, E. **Análise da influência do plástico mole na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, V. 20, n. 3, p 427-436, 2015.

DENARDIN, G. P. **Estudo dos recalques do aterro sanitário da central de resíduos do recreio – Minas do Leão/RS**. 2013, 93f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

DIXON, N., Jones. D. R. V. (2005). **Engineering Properties of Municipal Solid Waste**. Geotextiles and Geomembranes 23 (2005) 205-233.

GDA - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik. EMPFEHLUNGEN – E1-7: **Probenahmen für Abfallmechanische Untersuchungen**. 1997, p45.

GDA - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik. EMPFEHLUNGEN – E1-6: **Probenahmen für Abfallmechanische Untersuchungen**. 1997, p41.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro, 2009.

GOMES, C. M. B. C. **Estudo do Comportamento de Aterros de Resíduos. Caracterização Física, Bioquímica e Mecânica dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2008, 536f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2008.

GUEDES, M. J. F. **Estudo das emissões de biogás em aterro de resíduos sólidos urbanos no semiárido brasileiro**. 2018. 181f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

FARIAS, R. M. de S. **Estudo dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos: uma abordagem experimental e estatística**. 2014, 129f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB, 2014.

FUCALE, S. P. **Influência Dos Componentes De Reforço Na Resistência De Resíduos Sólidos Urbanos**. 2005, 216f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, CTG, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2005.

HANSON, J. L.; YESILLER, N.; STOCKHAUSEN, S. A. V.; WONG, W. W. **Compaction Characteristics of Municipal Solid Waste**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. v. 136, n. 8, p. 1095-1102, 2010.

JESSBERGER, H.L. SYLLWASSCHY, O.; KOCKEK, R. (1995) Investigation of waste body-behavior and waste structure interaction In: Proceeding of the 5 Sardinia International Landfill Symposium S. Margherita Di Pula, Cagliari, v. 2, p. 731-743.

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).

- KÖNIG, D. & JESSBERGER, H. L. (1997). "Waste Mechanics" In: ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, pp. 35-76.
- KHOSHAND, A., FATHI, A., ZOGHI, M., & KAMALAN, H. **Seismic stability analyses of reinforced tapered landfill cover systems considering seepage forces**. Waste Management & Research, v. 36, n. 4, p. 361-372, 2018.
- KNOCHENMUS, G; WOJNAROWICZ, M. Van Impe Stability of Municipal Solid Waste. **In proc. Of the International Congress on Environmental Geotechnics**, 3. 1998. Lisboa, Portugal, Sêco e Pinto (ed), Balkema, Rptterdam, ISBN 905809 006x:977-1000.
- LIPOR. Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto. **Caderno Técnico**. 2000.
- LEITE, H. E. A. S.; VIEIRA NETO, J. M; MONTEIRO, V. E. D.; SILVA, S. A. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Campina Grande – PB**, Melém do Pára, 2008, In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 13, 2008, Belém-PA.
- NORBERTO, A de S. **Avaliação da adição de fibras na resistência ao cisalhamento na matriz fina de resíduos sólidos**. 2019, 137f, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru-PE, 2019.
- PANDEY, R. K.; TIWARI, R. P. **Physical Characterization and Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste**. IOSR-JMCE, v. 12, Issue 1, ver. II (jan- feb), p. 15-21, 2015.
- PEREIRA, F. T. G.; LEITE, H. E. A. S.; GARCEZ, L. R.; ARAUJO, E. P.; MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande-PB**. In: SIMPÓSIO NORDESTINO DE RESÍDUOS SÓLIDOS SINRES, 2, 2010, Campina Grande. **Resumo**.
- PINHEIRO, J., CUNHA, S., GOMES, G., & CARVAJAL, S. **Probabilidade e estatística: quantificando a incerteza**. Elsevier Brasil, 2013.
- RAMAIAH, B, RAMANA, G, DATTA, M (2017) **Mechanical characterization of municipal solid waste from two waste dumps at Delhi, India**. Waste Management, v. 68, p. 275-291, 2017.
- SILVA, B. V. da. **Estabilidade de taludes de aterros não controlados de resíduos**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Nova Lisboa (FCT/UNL), Portugal, 2014.
- SHARIATMADARI, N.; SADEGHPOUR, A. H.; RAZAGHIAN, F. **Effects of aging on shear strength behavior of municipal solid waste**. Int J Civ Eng, v. 12, n. 3, p. 226-237, 2014.
- SHIMAZAKI, L. R. **Análise de estabilidade de aterros de resíduos sólidos antigos**. 2017. 112 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

VIEIRA, E.M.S. **Avaliação da composição e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterro sanitário.** 2018. 35fls. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – UFCG, Campina Grande, PB, 2018.

WHO (1979). **Internacional Reference Center for Wastes Disposal.** Methods of Analysis of Sewage Sludge solid waste and compost. Switzerland,1979.

YESILLER, N.; HANSON, J. L.; COX, J. T.; NOCE, D. E.; (2014) **Determination of specific gravity of municipal solid waste.** WasteManagement, v. 34, p. 848-858, 2014.

ZEKKOS, D.; ATHANASOPOULOS, G. A.; BRAY, J. D.; GRIZI, A.; THEODORATOS, A. **Large-scale direct shear testing of municipal solid waste.** Waste Management, United Kingdom, v. 30, n. 8, p. 1544-1555, 2010.