



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ALISON DE SOUZA NORBERTO

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE FIBRAS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO  
NA MATRIZ FINA DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Caruaru

2019

ALISON DE SOUZA NORBERTO

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE FIBRAS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO  
NA MATRIZ FINA DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

**Área de concentração:** Tecnologia Ambiental.

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Odete Holanda Mariano.

**Coorientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Caruaru

2019

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

N823a Norberto, Alison de Souza.  
Avaliação da adição de fibras na resistência ao cisalhamento na matriz fina de resíduos sólidos. / Alison de Souza Norberto. – 2019.  
137 f.; il.: 30 cm.

Orientadora: Maria Odete Holanda Mariano.  
Coorientador: José Fernando Thomé Jucá.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2019.  
Inclui Referências.

1. Aterros – Jaboatão dos Guararapes (PE). 2. Fibras. 3. Cisalhamento dos solos – Resistência. 4. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. I. Mariano, Maria Odete Holanda (Orientadora). II. Jucá, José Fernando Thomé (Coorientador). III. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-244)

ALISON DE SOUZA NORBERTO

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE FIBRAS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO  
NA MATRIZ FINA DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 12/08/2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Odete Holanda Mariano (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Simone Machado Santos (Examinadora Interna)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira (Examinador Externo)

Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho ao meu saudoso Pai,  
José Claudio Norberto (in memoriam).

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças, não somente para a conclusão desta pesquisa, mas também para vencer todos os desafios superados ao longo dessa jornada.

À minha mãe, Maria José, por ser meu alicerce e minha fonte de inspiração para sempre seguir independente do obstáculo, amo a senhora. À minha madrinha, tia, e uma segunda mãe, Celeste, por ter sido sem sombra de dúvidas a maior apoiadora nessa minha jornada, amo demais a senhora. As minhas Tias, Ninha, Célia, Sônia, Gêuzza, Claudeci, Nina. Como eu tenho orgulho dessas mulhes.

A toda a minha família, minha irmã, meus tios, padrinhos, madrinhas, primos, e em especial aos primos que são como irmãos para mim, Duda e Laine.

À minha orientadora e grande mentora, Professora Odete, pelos ensinamentos, pela confiança depositada, pela paciência, e acima de tudo pela motivação e o incentivo de me fazer buscar sempre o crescimento.

Ao meu coorientador, Professor Dr. José Fernando Thomé Jucá, pela oportunidade trabalhar com ele, pelos diversos ensinamentos e importantes dicas na execução desta pesquisa.

Aos professores de geotecnia da UFPE pelos diversos ensinamentos, em especial as Professoras Isabela Bello e Leila Brunet.

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

A todos os professores, alunos e demais membros do PPGECAM UFPE/CAA, em especial a Marcelo e Euclécia, por toda atenção dada ao longo desses dois anos.

A Sávio Holanda e Chritiane Lyra, por todo apoio na disponibilização de material e ensinamentos transmitidos, muitíssimo obrigado.

A Jonny Patricio pela ajuda no desenvolvimento da análise PCA, muito obrigado.

Aos meus dois grandes amigos, Vitor Hugo e Rafaella Moura, que me ajudaram por diversas vezes durante esta pesquisa, serei sempre grato a vocês.

Aos meus grandes amigos de Lage Grande, por toda torcida, apoio e por sempre me transmitirem boas energias quando voltava para casa.

Aos muitos amigos que fiz durante a graduação e mestrado: Anderson, André Luís, Arianne, Athos Murilo, Augusto, Bruna, Brenda, Camyla, Carlos Henrique, Danylo, Gabriel Resende, Germano, Guilherme, Henrique, Jhonata, Layla, Liz, Karla, Marcelo, Mariana Mendes, Mário, Maylon, Morgana, Nayane, Pedro Aires, Tayrony, Thassia, Tiago, Renatha, Riadny, Vinicius, Wyllyan.

A todos membros da família Britto e Caraciolo, em especial a Dona Tereza, por todo apoio e amizade.

Ao grupo GGU-Softwares por disponibilizar o software GGU-Stability.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro na execução da pesquisa.

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

## RESUMO

Os aterros de resíduos sólidos urbanos (rsu) são fonte de diversas pesquisas na geotecnia ambiental. Essas estruturas em geral, apresentam elevados percentuais de fibras (plásticos, madeiras e tecidos) em sua composição, esses elementos fibrosos por sua vez influenciam diretamente no comportamento geotécnico do aterro. Com esta perspectiva, o presente trabalho realizou as avaliações do efeito de tração das fibras na resistência ao cisalhamento e na estabilidade de taludes hipotéticos de aterros de RSU, acoplando resultados de ensaios laboratório e modelagens computacionais. Na pesquisa foi realizada coleta de amostra em campo, uma amostra de resíduo envelhecido, com cerca de 10 anos de deposição. Foram efetuados ensaios de laboratórios, como os ensaios cisalhamento direto em 3 diferentes proporções amostrais de fibras (0%, 16,17% e 32,33%) e em duas condições ensaio: com e sem inundação. Dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto foram obtidos os parâmetros geotécnicos convencionais (coesão e ângulo de atrito) e de tração (ângulo de tensão de tração), os quais foram incorporados nas análises de estabilidade de taludes no *software* GGU-Stability, e assim foram efetuadas as análises de estabilidade em dois cenários: com e sem o efeito de tração das fibras. Também foram realizadas análises de estabilidade variando o Nível de Água (NA) e da geometria dos taludes hipotéticos utilizados. Dos resultados, foram obtidos ângulos de tração na condição sem indução de 10,2° e 5,0°, para os percentuais de 16,17% e 32,33%, respectivamente. Já para os ensaios na condição com inundação, os ângulos de tração das fibras foram de 16,7° e 18,5°, correspondente aos percentuais 16,17% e 32,33%, respectivamente. Quanto o efeito de tração das fibras na estabilidade de taludes hipotéticos, foi verificado um aumento de até 5,07% no Fator de Segurança (FS) no comparativo com os resultados sem o efeito de tração.

Palavras-chave: Aterros de RSU. Fibras. Tração. Resistência ao cisalhamento. Estabilidade de taludes.

## ABSTRACT

Municipal solid waste (msw) landfills are the source of several environmental geotechnical research. These structures generally present high percentages of fibers (plastics, woods and fabrics) in their composition, these fibrous elements in turn directly influence the geotechnical behavior of the landfill. With this perspective, the present work carried out the evaluations of the traction effect of fibers on the shear strength and stability of hypothetical slopes of MSW landfills, coupling laboratory test results and computational modeling. In the research, a field sample was collected, a sample of aged waste, with about 10 years of deposition. Laboratory tests were performed, such as direct shear tests on 3 different fiber sample proportions (0%, 16.17% and 32.33%) and under two test conditions: with and without flooding. From the results of the direct shear tests were obtained the conventional geotechnical (cohesion and friction angle) and traction (traction stress angle) geotechnical parameters, which were incorporated in the slope stability analysis in the GGU-Stability software, and thus were obtained. Stability analyzes were performed in two scenarios: with and without the traction effect of the fibers. Stability analyzes were also performed by varying the Water Level (WL) and the geometry of the hypothetical slopes used. From the results, traction angles were obtained in the condition without induction of 10.2 ° and 5.0 °, for the percentages of 16.17% and 32.33%, respectively. For the flood condition tests, the traction angles of the fibers were 16.7 ° and 18.5 °, corresponding to 16.17% and 32.33%, respectively. As for the traction effect of fibers on the stability of hypothetical slopes, there was an increase of up to 5.07% in Safety Factor (SF) compared to the results without the traction effect.

Keywords: MSW landfill. Fibers. Traction. Shear strength. Slope stability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 –	Evolução da geração per capita de resíduos e do PIB no Brasil (2010 –2017) .....	25
Gráfico 2 –	Evolução percentual da disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação.....	25
Figura 1 –	Transformação de substâncias trifásicas no RSU.....	28
Figura 2 –	Curva tensão-deformação de resíduos sólidos com interação das componentes de atrito e tração.....	30
Figura 3 –	Variações das parcelas da resistência ao cisalhamento com a tensão normal.....	31
Figura 4 –	Modelo de resistência mecânica dos RSU.....	32
Figura 5 –	Curva tensão x deformação para RSU.....	32
Figura 6 –	Envoltórias de resistência das amostras dos resíduos sólidos pré-tratados, levando-se em consideração o efeito das fibras, segundo modelo de KÖLSCH (1993, 1995, 1996) para RSU.....	33
Figura 7 –	Ângulo de atrito e coesão versus deformação para diferentes idades dos RSU.....	36
Figura 8 –	Curva tensão de tração versus tensão normal para RSU....	42
Figura 9 –	Sistema de equilíbrio de forças num elemento do reforço...	43
Figura 10 –	Gamas dos parâmetros de resistência ao cisalhamento em relação ao grau de decomposição.....	49
Fluxograma 1 –	Esquema do processo metodológico da pesquisa.....	52
Mapa 1 –	Mapa de localização do município de Jaboatão dos Guararapes – PE.....	53
Fotografia 1 –	Perfil da célula experimental da Muribeca após a cobertura dos resíduos.....	54
Gráfico 3 –	Série histórica do clima de Jaboatão dos Guararapes dos últimos 30 anos.....	55

Fotografia 2 –	Retroescavadeira utilizada para retirada de amostra de RSU da célula experimental.....	56
Fotografia 3 –	Profundidade onde foi coletada as amostras.....	57
Fotografia 4 –	Espalhamento da amostra coletada sobre a lona.....	57
Fotografia 5 –	Processo de quarteamento da amostra coletada.....	58
Fotografia 6 –	Separação do material fino na peneira de 25,4 mm (1”) .....	59
Fotografia 7 –	Preparação do material para realização dos ensaios.....	61
Fotografia 8 –	Amostra de fibras antes e depois da preparação.....	62
Fotografia 9 –	Percentuais de amostras utilizadas na compactação: (a) amostra de 2.500 g de material granular; (b) amostra com 2.095,75 g de material granular e 404,25 g de fibras; e (c) amostra com 1.691,75 g de material granular e 808,25 g de fibras.....	64
Fotografia 10 –	Umedecimento da amostra.....	66
Fotografia 11 –	Moldagem do corpo de prova – (a) colocação da amostra na caixa de cisalhamento para compactação; (b) escarificação entre as camadas.....	67
Fotografia 12 –	Prensa uniaxial sendo utilizada na moldagem dos corpos de prova com presença de fibras.....	67
Fotografia 13 –	Processo de moldagem dos corpos de prova de resíduos sólidos (a) 100% matriz fina; (b) 83,83% matriz fina + 16,17% Fibras e (c) 67,67% matriz fina + 32,33% Fibras....	68
Fotografia 14 –	Aferição da altura final do corpo de prova para controle da densidade final.....	69
Fotografia 15 –	Prensa de cisalhamento direto com sistema de carga confinante através de pesos em pendural.....	70
Gráfico 4 –	Caracterização Gravimétrica da amostra de resíduos extraídos da célula experimental da Muribeca.....	78
Gráfico 5 –	Evolução temporal do teor de SV da célula experimental da Muribeca.....	81

Figura 27 –	Envoltórias de resistência ao cisalhamento pelo critério da deformação de pico para as três amostras ensaiadas – ensaio sem inundação.....	97
Figura 28 –	Comparativo da variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica para três amostras: ensaio sem inundação.....	99
Figura 29 –	100% matriz fina: ensaio com inundação: (a) Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; (b) Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.....	101
Figura 30 –	Envoltórias de resistência ao cisalhamento – 100% matriz fina: ensaio com inundação.....	102
Figura 31 –	Envoltórias de resistência ao cisalhamento, em diferentes níveis de deformação horizontal – 100% matriz fina: ensaio com inundação.....	103
Figura 32 –	Variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica – 100% matriz fina: ensaio com inundação.....	103
Figura 33 –	3,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio com inundação: (a) Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; (b) Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.....	104
Figura 34 –	Envoltórias de resistência ao cisalhamento – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio com inundação.....	106
Figura 35 –	Envoltórias de resistência ao cisalhamento, em diferentes níveis de deformação horizontal – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio com inundação.....	107
Figura 36 –	Variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio com inundação	107
Figura 37 –	67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio com inundação: (a) Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; (b) Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.....	108
Figura 38 –	Envoltória de resistência ao cisalhamento – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio com inundação.....	110

Figura 39 –	Envoltórias de resistência ao cisalhamento, em diferentes níveis de deformação horizontal – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio com inundação.....	110
Figura 40 –	Variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio com inundação	111
Figura 41 –	Envoltórias de resistência ao cisalhamento pelo critério da deformação de pico para as três amostras ensaiadas – ensaio com inundação.....	112
Figura 42 –	Comparativo da variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica para três amostras: ensaio com inundação.....	113
Figura 43 –	Envoltórias de resistência das amostras dos resíduos sólidos, levando-se em consideração o efeito das fibras, segundo modelo de Kölsch (1993, 1995, 1996) para RSU – ensaio na condição sem inundação.....	116
Figura 44 –	Envoltórias de resistência das amostras dos resíduos sólidos, levando-se em consideração o efeito das fibras, segundo modelo de Kölsch (1993, 1995, 1996) para RSU – ensaio na condição inundada.....	117
Figura 45 –	Variação do FS x NA para as três geometrias – não considerando o efeito de tração das fibras no GGU-Stability: (a) 100% matriz fina; (b) 83,83% matriz fina + 16,17% fibras; e (c) 67,67% matriz fina + 32,33% fibras.....	121
Figura 46 –	Variação do FS versus NA para as três geometrias – considerando o efeito de tração das fibras: (a) parâmetros da amostra com 83,83% matriz fina + 16,17% fibras; e (b) parâmetros da amostra com 67,67% matriz fina + 32,33% fibras.....	124
Figura 47 –	Resultado da análise PCA da variação do FS com os demais parâmetros.....	127
Gráfico 6 –	Resultado da análise PCA da variação do FS com os demais parâmetros – PC1.....	128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Composição Gravimétrica Percentual dos RSU de alguns países.....	29
Tabela 2 –	Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos através de ensaios de cisalhamento direto de laboratório.....	38
Tabela 3 –	Principais métodos de cálculo da estabilidade de talude....	40
Tabela 4 –	Parâmetros de geotécnicos para RSU sugeridos por GDA E 2-35.....	45
Tabela 5 –	Parâmetros de resistência ao cisalhamento selecionados para análise de sensibilidade.....	48
Tabela 6 –	Características físicas da célula experimental da Muribeca	54
Tabela 7 –	Categorias de resíduos considerados no processo de triagem.....	60
Tabela 8 –	Configuração dos percentuais de amostras moldadas para o ensaio de cisalhamento direto.....	65
Tabela 9 –	Comparativo do percentual gravimétrico no intervalo de 10 anos de deposição dos resíduos.....	79
Tabela 10 –	Resumo dos resultados de caracterização física da matriz fina.....	83
Tabela 11 –	Resumo dos parâmetros: peso específico máximo seco e umidade ótima, obtidos das três amostras.....	84
Tabela 12 –	Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deformação horizontal – 100% matriz fina o: ensaio sem inundação.....	89
Tabela 13 –	Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deformação horizontal – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio sem inundação.....	93
Tabela 14 –	Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deformação horizontal – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio sem inundação.....	96

Tabela 15 –	Resumo do resultado das envoltórias de resistência ao cisalhamento das três amostras ensaiadas – ensaio sem inundação.....	98
Tabela 16 –	Valores da expansão média dos corpos de prova durante sua inundação.....	100
Tabela 17 –	Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deformação horizontal – 100% matriz fina: ensaio com inundação.....	103
Tabela 18 –	Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deformação horizontal – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio com inundação.....	107
Tabela 19 –	Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deformação horizontal – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio com inundação.....	111
Tabela 20 –	Resumo do resultado das envoltórias de resistência ao cisalhamento das três amostras ensaiadas na condição com inundação.....	112
Tabela 21 –	Comparativo dos parâmetros geotécnicos dos ensaios nas condições sem e com inundação.....	114
Tabela 22 –	Comparativo dos ângulos de tração para os resultados dos ensaios com e sem inundação.....	119
Tabela 23 –	Resumo dos parâmetros geotécnicos utilizados na análise de estabilidade de taludes na condição sem o efeito de tração das fibras.....	119
Tabela 24 –	Resultados das análises de estabilidade de taludes hipotéticos não considerando o efeito de tração das fibras.	120
Tabela 25 –	Resumo dos parâmetros geotécnicos utilizados na análise de estabilidade de taludes na condição com o efeito de tração das fibras.....	123
Tabela 26 –	Resultados das análises de estabilidade de taludes hipotéticos considerando o efeito de tração das fibras.....	123
Tabela 27 –	Resultados do comparativo das análises de estabilidade de taludes com e sem o efeito de tração das fibras.....	125
Tabela 28 –	Dados de entrada para análise PCA no software Statistica.	126

## LISTA DE SÍMBOLOS

As	clima savânico (classificação Köppen);
c	coesão;
c'	intercepto coesivo efetivo;
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono;
CH <sub>4</sub>	gás metano;
FS	fator de Segurança;
R <sup>2</sup>	coeficiente de ajustamento;
SV	Teor de sólidos voláteis;
W <sub>ot</sub>	umidade ótima;
Z <sub>máx</sub>	parcela das forças de tração relativa ao valor máximo;
$\alpha$	ângulo entre as fibras e a superfície de cisalhamento;
a $\zeta$	fator de transmissão das fibras mobilizadas;
$\gamma$	Peso específico;
$\gamma_d$ máx	Peso específico máximo;
$\phi$	ângulo de atrito;
$\phi'$	ângulo de atrito efetivo do solo;
$\tau'$	resistência ao cisalhamento;
$\tau_d$	Tensões cisalhantes desenvolvidas ao longo da superfície de ruptura;
$\tau(z)$	coesão das fibras;
$\tau_z$	resistência ao cisalhamento das fibras;
$\tau_R(z)$	resistência de atrito adicional (efeito de clamp);

$\sigma_n$	tensão total normal;
$\sigma_{cri}$	tensão crítica de ruptura;
$u_w$	pressão neutra nos poros do solo;
$\zeta$	ângulo de tensão de tração;

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AGV's	Ácidos graxos voláteis
ASTM	American Society for Testing and Materials
DGGT	Deutsche Gesellschaft Für Geotechnik
EPI	Equipamento de Proteção Individual
GDA	Geotechnik der Deponien und Altlasten
GRS	Grupo de Resíduos Sólidos
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
NA	Nível de Água
NBR	Norma Brasileira
PCA	Análise De Componentes Principais
PIB	Produto Interno Bruto
PLNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos
PNSB	Política Nacional de Saneamento Básico
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
RMR	Região Metropolitana do Recife
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	21
1.2	OBJETIVOS .....	23
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>23</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>24</b>
2.1	ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	24
2.2	PROPRIEDADES DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	26
<b>2.2.1</b>	<b>Propriedades físicas</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Gravimetria de RSU</b> .....	<b>28</b>
2.3	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	29
<b>2.3.1</b>	<b>Resistência ao Cisalhamento em RSU</b> .....	<b>29</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Ensaio de laboratório</b> .....	<b>34</b>
2.4	ESTABILIDADE DE TALUDES DE ATERROS DE RSU .....	39
<b>2.4.1</b>	<b>Métodos de avaliação de estabilidade de talude</b> .....	<b>39</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Estabilidade de taludes de aterros de RSU</b> .....	<b>41</b>
2.4.2.1	<i>Fatores de influência na estabilidade de aterros de RSU</i> .....	41
2.4.2.2	<i>Variação dos parâmetros com o tempo</i> .....	41
2.4.2.3	<i>Modelo cálculo de estabilidade considerando o efeito de tração</i> .....	42
<b>2.4.3</b>	<b>Alteamento de aterros</b> .....	<b>49</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>51</b>
3.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	53
<b>3.1.1</b>	<b>Características e localização da área de coleta dos resíduos</b> .....	<b>53</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Clima</b> .....	<b>55</b>
3.2	COLETA DE AMOSTRA .....	56
3.3	GRAVIMETRIA .....	59
3.4	ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	60
<b>3.4.1</b>	<b>Preparação da amostra de RSU</b> .....	<b>60</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Ensaio de caracterização do material granular</b> .....	<b>62</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Sólidos voláteis</b> .....	<b>62</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Compactação</b> .....	<b>63</b>

<b>3.4.5</b>	<b>Ensaio de Cisalhamento direto</b> .....	<b>64</b>
3.4.5.1	<i>Definição do peso do corpo de prova</i> .....	64
3.4.5.2	<i>Umidade da amostra</i> .....	65
3.4.5.3	<i>Moldagem do corpo de prova</i> .....	66
3.4.5.4	<i>Controle da densidade final do corpo de prova</i> .....	68
3.4.5.5	<i>Tipos de ensaios e características</i> .....	69
3.5	<b>ANÁLISE DE ESTABILIDADE</b> .....	71
<b>3.5.1</b>	<b>Seleção do Software</b> .....	<b>71</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Geometria utilizada</b> .....	<b>72</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Parâmetros utilizados</b> .....	<b>73</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Nível piezométrico</b> .....	<b>75</b>
<b>3.5.5</b>	<b>Tipos de análises</b> .....	<b>76</b>
3.6	<b>TRATAMENTO ESTATÍSTICO</b> .....	76
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>78</b>
4.1	<b>ANÁLISE GRAVIMÉTRICA</b> .....	78
4.2	<b>TEOR DE SÓLIDOS VOLÁTEIS E UMIDADE</b> .....	80
<b>4.2.1</b>	<b>Teor de sólidos voláteis</b> .....	<b>81</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Umidade</b> .....	<b>82</b>
4.3	<b>CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL FINO</b> .....	82
<b>4.3.1</b>	<b>Peso específico dos grãos</b> .....	<b>82</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Granulometria</b> .....	<b>82</b>
4.4	<b>COMPACTAÇÃO</b> .....	83
4.5	<b>AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO</b> .....	85
<b>4.5.1</b>	<b>Cisalhamento direto – sem inundação</b> .....	<b>85</b>
4.5.1.1	<i>100% matriz fina</i> .....	85
4.5.1.2	<i>83,83% matriz fina + 16,17% fibras</i> .....	90
4.5.1.3	<i>67,67% matriz fina + 32,33% fibras</i> .....	93
4.5.1.1	<i>Comparativo</i> .....	97
<b>4.5.2</b>	<b>Cisalhamento direto – com inundação</b> .....	<b>100</b>
4.5.2.1	<i>100% matriz fina</i> .....	100
4.5.2.2	<i>83,83% matriz fina + 16,17% fibras</i> .....	104
4.5.2.3	<i>67,67% matriz fina + 32,33% fibras</i> .....	108
4.5.2.4	<i>Comparativo</i> .....	111

<b>4.5.3</b>	<b>Cisalhamento direto – comparativo .....</b>	<b>114</b>
<b>4.5.4</b>	<b>Efeito de tração das fibras .....</b>	<b>115</b>
4.5.4.1	<i>Envoltória de bilinearidade – sem inundação.....</i>	115
4.5.4.1	<i>Envoltória de bilinearidade – com inundação.....</i>	117
<b>4.5.5</b>	<b>Efeito de tração das fibras - comparativo .....</b>	<b>118</b>
4.6	<b>AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES.....</b>	<b>119</b>
<b>4.6.1</b>	<b>Análise de estabilidade – sem o efeito de tração.....</b>	<b>119</b>
<b>4.6.2</b>	<b>Análise de estabilidade – com o efeito de tração.....</b>	<b>122</b>
<b>4.6.1</b>	<b>Comparativo .....</b>	<b>125</b>
4.7	<b>RESULTADO DO TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS .....</b>	<b>126</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISA FUTURAS.....</b>	<b>129</b>
5.1	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>129</b>
5.2	<b>SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....</b>	<b>130</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>131</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A gestão adequada de quantidades crescentes de resíduos sólidos urbanos tem sido uma grande preocupação para os profissionais que trabalham na área de resíduos. Apesar dos esforços com processos de reciclagem, reutilização e incineração, grandes quantidades de resíduos sólidos urbanos (RSU) ainda precisam ser descartadas em aterros sanitários. Devido à legislação e escassez de áreas adequadas à disposição final, a tendência natural é realizar o alteamento dos aterros, aumentando assim sua vida útil, para torná-los economicamente viáveis a longo prazo.

No entanto, os aterros de grande porte apresentam grandes desafios para engenharia, especificamente, na garantia da estabilidade do talude durante e após deposição do RSU (BABU *et al.*, 2014). Como exemplo, têm-se o caso do aterro sanitário Quitaúna, no bairro Cabuçu, vizinho ao Rodoanel e a uma grande área verde do Parque Estadual da Cantareira, localizado na cidade de Guarulhos, o qual passava por um processo de ampliação no ano de 2018, e no final do mesmo ano veio a romper. A ruptura do aterro sanitário levou o prefeito da cidade a decretar estado de emergência, devido ao forte mau cheiro que chegava dentro das casas nas proximidades. Além disso, a coleta de resíduos da cidade foi comprometida (G1, 2018). Tal fato, reforça a necessidade de conhecimento dos aspectos e mecanismos responsáveis pela manutenção e operação das condições de estabilidade dos aterros, para que eventos como ocorridos em Guarulhos possam ser evitados.

Para Khoshand *et al.* (2018) vários aspectos como: composição material, nível piezométrico e geometria influenciam na concepção dos aterros sanitários, e qualquer alteração destes podem afetar a estabilidade e, conseqüentemente, o fator segurança dos taludes. Tal fato decorre principalmente da variabilidade das características dos resíduos, as quais estão relacionados aos aspectos sociais, culturais e econômicos da região produtora do RSU.

Pesquisas relativas ao alteamento dos aterros sanitários, destacam o aspecto de resíduos envelhecidos apresentarem uma maior resistência ao cisalhamento, quando comparados os resíduos novos (FAN *et al.*, 2016). Tal comportamento está

relacionado ao processo de decomposição natural da matéria orgânica do aterro, a qual, aumenta os percentuais de materiais que necessitam de um maior tempo de degradação natural, como os materiais fibrosos (plásticos, madeiras e tecidos). Este aumento de materiais fibrosos no volume total da célula ao longo do tempo, provoca uma espécie de aumento no efeito de tração dos materiais presentes na célula, e por consequência acarreta a elevação da estabilidade do aterro ao longo do tempo.

Neste sentido, Kölsch (1993, 1995, 1996), verificou uma grande diferença entre as propriedades dos solos e dos resíduos, e evidenciou limitações nos cálculos de estabilidade de taludes para aterros de resíduos sólidos baseados nos métodos convencionais da Mecânica dos Solos. Para a estabilidade de aterros de resíduos sólidos, verificou-se a necessidade de considerar que os resíduos apresentam comportamento de resistência, para grandes deformações, semelhante ao de solos reforçados, ou seja, a resistência ao cisalhamento total é composta pelo atrito no plano cisalhante e pelas forças de tração nas fibras. Sendo assim, o resíduo sólido é considerado um material constituído de duas componentes: uma matriz básica, compreendida pelas partículas de granulação fina a média, que apresentam comportamento de atrito, e a outra, a matriz de reforço contendo os componentes fibrosos do resíduo.

Quanto aos estudos relativos aos materiais fibrosos de aterros de RSU e resistência ao cisalhamento/estabilidade de taludes, os quais já foram ferramenta de diversos estudos, sendo detectados nos mesmos os efeitos dos elementos fibrosos nos altos valores da resistência ao cisalhamento de RSU, destacam-se os desenvolvidos por: Kölsch (1993, 1995, 1996), Neto (2004), Fucale (2005), Martins (2006), Cale (2007), Borgatto (2010), Motta (2011), Corrêa (2013), Abreu (2014) e Fucale *et al.* (2015).

Sendo assim, fica evidente a necessidade de se avaliar o efeito do ganho na resistência ao cisalhamento, no efeito de tração e na estabilidade de taludes de aterros sanitários, provocado pelos materiais fibrosos. Tendo em vista o aumento crescente do volume de resíduos produzidos anualmente que são depositados em aterros de RSU.

Diante deste cenário, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito da variação de fibras na resistência ao cisalhamento, no efeito de tração e na estabilidade de taludes hipotéticos de aterros de RSU. Para isto, foram utilizadas amostras de RSU (com idade aproximada de 10 anos de deposição) para realização de ensaios de laboratórios, assim como a realização de modelagens computacionais de estabilidade de taludes hipotéticos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da variação de fibras na mistura com a matriz fina de resíduos sólidos, no comportamento da resistência ao cisalhamento, no efeito de tração e na estabilidade de taludes hipotéticos de aterros de RSU.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar os parâmetros de resistência ao cisalhamento de amostras de resíduos de diferentes percentuais (0%, 16,17% e 32,33%) de fibras;
- Analisar comparativa dos resultados de ensaios de cisalhamento direto nas condições com e sem inundação;
- Realizar análise comparativa do Fator de Segurança (FS) com e sem o efeito de tração das fibras;
- Realizar análise da variação do FS nos diferentes níveis piezométricos (0, 1/3 e 2/3 da altura do aterro) e diferentes geometrias hipotéticas (1V:2H, 1V:2.5H e 1V:3H).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Serão apresentados neste capítulo os principais aspectos considerados nos estudos da resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de aterros de RSU, sobretudo nas suas características geotécnicas. Como também uma revisão bibliográfica de abordagens de estudos de laboratório, modelagens computacionais e banco de dados de parâmetros geotécnicos de resíduos sólidos reportados na literatura técnica.

### 2.1 ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

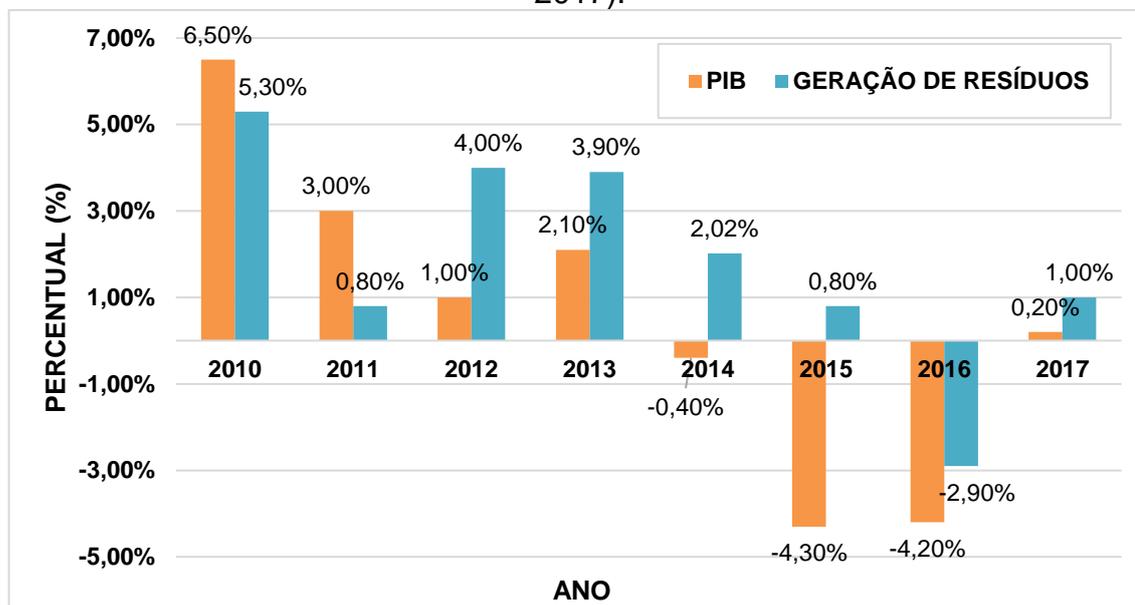
A ABNT NBR 8419 (1996, p.1) define aterros sanitários como sendo:

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

Segundo a ABRELPE (2018), a geração de RSU do ano de 2017 revelou um total anual de quase 78,4 milhões de toneladas no Brasil, o que demonstra uma retomada no aumento em cerca de 1% em relação a 2016. Da quantidade de RSU gerada apenas 71,6 milhões de toneladas foram coletadas e apenas 59,1% ou 42,3 milhões de toneladas enviadas para aterros sanitários.

Em países desenvolvidos e em desenvolvimento como o Brasil, a alta geração de resíduos sólidos têm sido um grande problema. Em geral, o volume de resíduos produzidos é diretamente influenciado nas variações do PIB per capita do país. É comum verificar que aumentos no PIB provocam por sua vez aumentos no volume de resíduos produzidos, isto ocorre devido ao aumento do consumo no país (Gráfico 1).

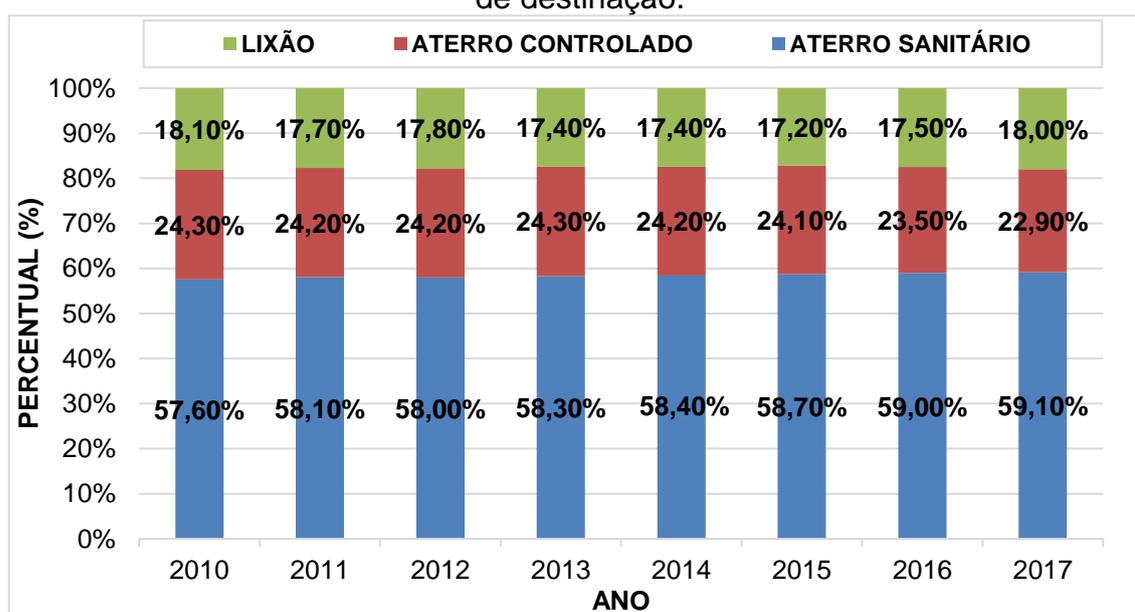
**Gráfico 1**– Evolução da geração per capita de resíduos e do PIB no Brasil (2010 – 2017).



Fonte: ABRELPE, 2018; Cleto, 2019.

No contexto geral o Brasil ainda se encontra em um processo lento de adequação da destinação correta de seus resíduos. Segundo dados da ABRELPE (2018) entre os anos de 2010 e 2017 ocorreu um pequeno aumento de 1,5% da taxa de resíduos depositados em aterros sanitários, uma redução na destinação a aterros controlados de 0,4% e uma também redução nos lixões de 0,1% (Gráfico 2).

**Gráfico 2** – Evolução percentual da disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação.



Fonte: ABRELPE, 2018.

As baixas variações nos percentuais das três formas de disposição final dos resíduos sólidos (aterros sanitários, aterros controlados, lixões), comprovam que nos últimos sete anos poucas mudanças ocorreram quanto a forma de destinação final dos resíduos.

Ainda neste sentido, vale ressaltar que o tratamento e a destinação correta de resíduos sólidos incidem diretamente em aspectos de qualidade de vida da população. Segundo dados da PNUD (2018), o Brasil possuía um IDH de 0,759 ponto, em um intervalo de 0 - 1, ficando na 79ª posição em um ranking de 189 países. Um dos parâmetros importantes no cálculo do IDH está relacionado as condições de saúde e dos serviços de saneamento, que neste contexto está diretamente vinculada as condições de como o país trata, coleta, destina seus resíduos e das políticas desenvolvidas no tratamento de seus resíduos e saneamento básico.

## 2.2 PROPRIEDADES DE RESÍDUOS SÓLIOS URBANOS

As propriedades mecânicas de um aterro de resíduos sólidos, tais como compressibilidade e resistência ao cisalhamento, dependem da composição individual do material e das propriedades mecânicas dos constituintes, além da dependência do estágio de decomposição da matéria orgânica e da idade do aterro. Esta variação com o tempo, juntamente com a dificuldade de se obter uma amostra indeformada e representativa, torna a determinação das propriedades de um aterro de resíduos sólidos uma atividade muito difícil (MARIANO & JUCÁ, 1998).

Algumas propriedades físicas são de fundamental importância para se caracterizar um aterro de resíduos sólidos, tais como: umidade, densidade, porosidade, permeabilidade, teor de matéria orgânica e composição gravimétrica (MARIANO & JUCÁ, 1998).

### 2.2.1 Propriedades físicas

Na investigação das propriedades mecânicas dos resíduos sólidos é necessário o conhecimento de diversas propriedades físicas dos mesmos, incluindo a distribuição do tamanho das partículas, peso específico, entre outros (MARQUES, 2001).

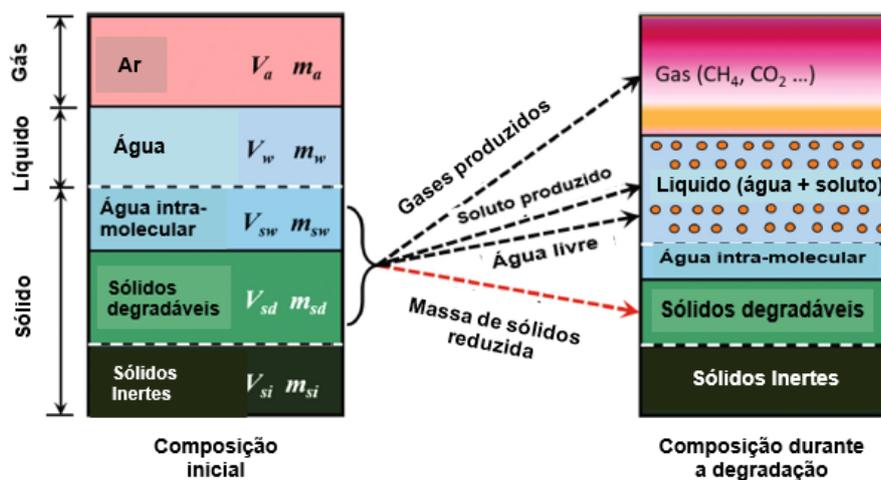
Um aspecto importante, advém de altos valores de umidade que resultam no desenvolvimento de poro-pressões, podendo diminuir a tensão efetiva, resultando em menores valores de resistência ao cisalhamento (MARTINS, 2006).

Segundo Nascimento (2007) as principais propriedades mecânicas dos resíduos sólidos são a compressibilidade e a resistência ao cisalhamento. Em geral, estas propriedades são avaliadas utilizando os métodos convencionais desenvolvidos na mecânica dos solos (NASCIMENTO, 2007).

Machado *et al.* (2009) propõe um modelo de quatro fases para resíduos em aterros sanitários, incluindo as fases gasosa, líquida e sólida, sendo a fase sólida dividida em duas partes: as fibras, compostas principalmente por plásticos e tecido; e a pasta sólida de resíduo, composta por todos os outros materiais sólidos não fibrosos. Segundo o modelo, os componentes de fibra não perdem massa ao longo do tempo, assim, a variação do volume sólido corresponde à variação do volume de pasta sólida de resíduo.

Como apresentado na Figura 1, similar aos solos convencionais, as substâncias que compõem o RSU também podem ser categorizadas em fases sólida, líquida e gasosa (CHEN *et al.*, 2014). No entanto, o perfil de RSU não é formado apenas por sólidos inertes, mas também por sólidos degradáveis, e água intra-partícula que é assumida como imóvel, a menos que seja liberada durante a processo de degradação, que é diferente com os solos convencionais. O espaço dos poros RSU é ocupado pela água e pelo ar entre partículas. Sob o ambiente anaeróbico, inicia-se a transformação de substâncias trifásicas no RSU: a massa de matéria sólida degradável diminui devido a hidrólise e algumas águas intra-partículas torna-se água entre partículas; solutos como ácidos graxos voláteis (AGV's) são produzidos por hidrólise e acidogênese de orgânicos, que normalmente se acumulam no lixiviado e provavelmente causam inibição da degradação; e, em seguida, os AGV's são convertidos por metanogênese e geração de gases, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>).

**Figura 1** – Transformação de substâncias trifásicas no RSU.



Fonte: Adaptado de Chen *et al.*, 2014.

### 2.2.2 Gravimetria de RSU

Para Neto (2004), a importância do conhecimento da composição física, principalmente daquelas características que direta ou indiretamente podem influenciar o comportamento dos resíduos nos aspectos ligados à resistência ao cisalhamento, pode ser exemplificada pelos percentuais de matéria orgânica e de plásticos, panos/trapos. O percentual de matéria orgânica está diretamente vinculado a umidade, à permeabilidade e ao peso específico da massa de resíduos. Enquanto os plásticos e panos/trapos, que constituem os principais componentes fibrosos dos resíduos, influenciam o comportamento da massa de resíduos conferindo-lhe uma pseudo-coesão.

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

Segundo Motta (2011) a composição gravimétrica dos RSU geralmente reflete a situação econômica e hábitos da população, mas também depende da legislação ambiental vigente, dentre outros fatores. Motta (2011) realizou um levantamento das composições gravimétricas dos resíduos de diversos países, na Tabela 1 são apresentados os dados de gravimetrias coletados.

**Tabela 1** – Composição Gravimétrica Percentual dos RSU de alguns países.

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

Fonte: Motta, 2011.

Segundo Corrêa (2013) a composição gravimétrica consiste na determinação dos percentuais em peso ou volume dos seus principais componentes, tais como matéria orgânica, metais, papéis, papelão, plásticos, vidros, entre outros. O nível de detalhamento da caracterização depende do objetivo do trabalho, podendo ser mais relevante a caracterização de um ou mais componentes.

Lopes e Gomes (2013) afirmam que a gravimetria dos RSU possui uma alta heterogeneidade, e tal fato interfere diretamente na biodegradação da massa resíduo, a qual também sofre influência da região geradora de resíduo (desenvolvimento, industrialização, práticas de gestão, cultura, etc.).

## 2.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

### 2.3.1 Resistência ao Cisalhamento em RSU

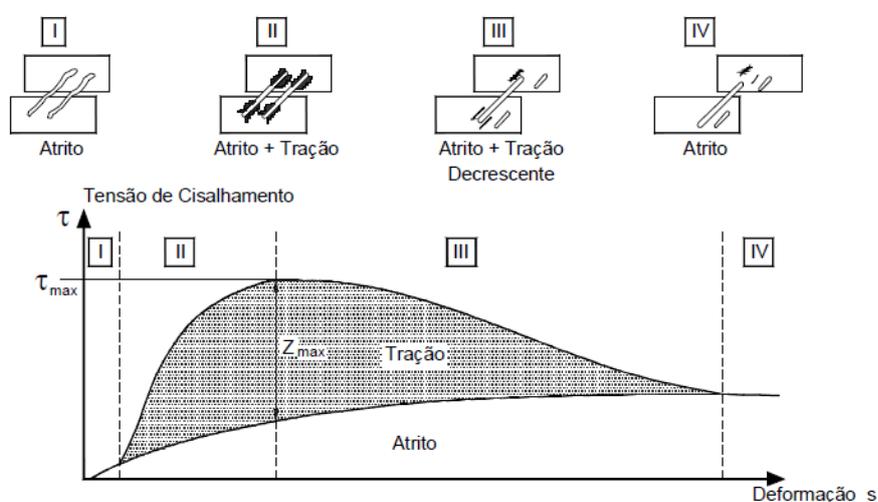
A resistência ao cisalhamento representa um aspecto fundamental na análise de estabilidade de aterros sanitários. Comumente, as análises de resistência ao

cisalhamento dos resíduos sólidos são realizadas a partir de modelos e métodos estabelecidos para solos (CALLE, 2007). Desta forma, a determinação da resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos é geralmente realizada por meio do critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Apesar de usuais, a interpretação dos resultados de tais análises fica sujeita a muitas incertezas, em virtude da dificuldade de definir o modelo de ruptura mais apropriado para o comportamento especial deste material. Além disso, existem diferenças significativas entre resíduos e solo, visto o alto índice de vazios, que implica numa compressibilidade volumétrica alta (CALLE, 2007).

Sabe-se que a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos é altamente influenciada pelo estado de alteração e composição dos resíduos, além do comportamento mecânico individual de cada componente (CARVALHO, 1999). Materiais que adquirem texturas fibrosas como plásticos e tecidos podem influenciar fortemente nos valores de resistência (NASCIMENTO, 2007).

Segundo Kölsch (1993 *apud* BORGATTO, 2010), o comportamento dos aterros sanitários se assemelha ao comportamento de aterros de solos com reforços geossintéticos. Desta forma, a resistência ao cisalhamento dos resíduos é função das forças de atrito atuantes no plano de cisalhamento e das forças de tração das fibras. Na Figura 2 é apresentada a interação entre estas parcelas de força, segundo o modelo proposto por Kölsch (1993).

**Figura 2** – Curva tensão-deformação de resíduos sólidos com interação das componentes de atrito e tração.

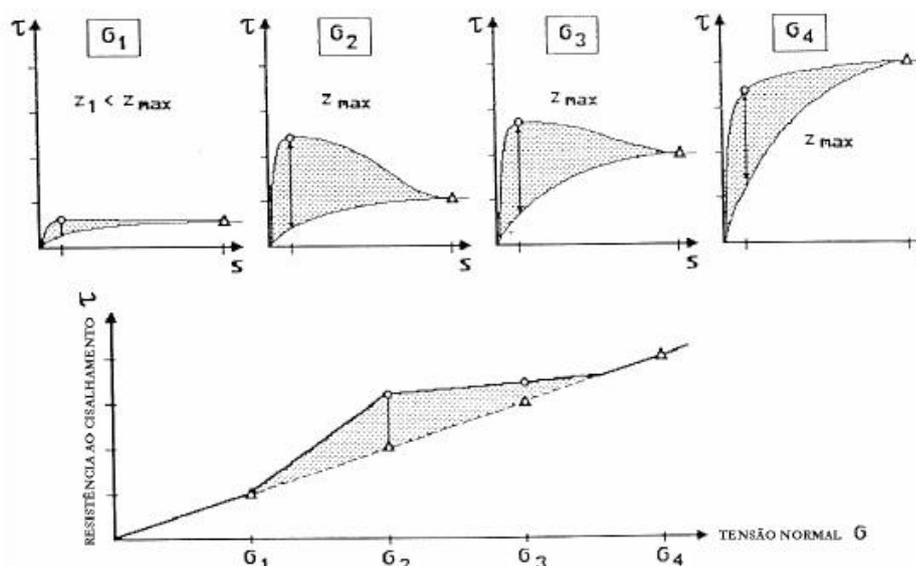


Fonte: Kölsch, 1993.

Segundo o modelo de Kölsch (1993), para pequenas deformações (FASE I) ocorre a mobilização das forças de atrito. Com o aumento das deformações, as fibras são tracionadas (FASE II) fazendo aumentar a parcela das forças de tração até um valor máximo ( $Z_{\max}$ ) que corresponde à resistência de tração das fibras e/ou a interação com o restante do resíduo. Em seguida, há a redução gradativa da contribuição das forças de tração (FASE III), até que se atinja o ponto a partir do qual a resistência ao cisalhamento do resíduo é resultado apenas das componentes de atrito (FASE IV). Assim, a contribuição de cada uma dessas parcelas na resistência ao cisalhamento dos resíduos varia de acordo com a tensão normal atuante e com a deformação.

Na Figura 3 é apresentada a envoltória de ruptura e as respectivas curvas tensão deformação para os diferentes níveis de tensão normal. Pode-se observar que para tensões normais mais baixas ( $\sigma_1$ ), têm-se forças de tração mais baixas devido à falta de ligação das fibras, enquanto que para tensão normal mais alta ( $\sigma_2$ ), as forças de tração das fibras aumentam até que atinjam um valor máximo. Para tensões normais maiores que  $\sigma_2$ , apenas o valor da componente de atrito aumenta. No intervalo de tensão normal ( $\sigma_1 \leq \sigma \leq \sigma_4$ ), onde a resistência ao cisalhamento total é determinada pelas forças de tração, a envoltória linear de cisalhamento mostra uma quebra, característica de materiais fibrosos.

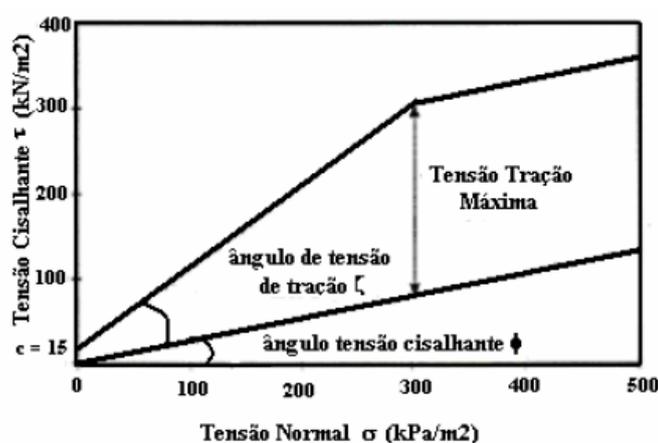
**Figura 3** – Variações das parcelas da resistência ao cisalhamento com a tensão normal.



Fonte: Kölsch, 1993.

Kölsch (1993), com base em sua pesquisa, postula uma envoltória de resistência bi-linear (Figura 4), em que devido ao reforço das fibras, a inclinação da envoltória de resistência é íngreme. Quando a resistência à tração do reforço é atingida cessando seu aporte na resistência, a inclinação varia abruptamente atingindo a inclinação equivalente ao ângulo de atrito.

**Figura 4** – Modelo de resistência mecânica dos RSU.



Fonte: Kölsch, 1996.

Na Figura 5 é apresentada a curva tensão x deformação (KÖLSCH, 1993), onde é possível observar o comportamento dos materiais fibrosos dos RSU submetidos a esforços de cisalhamento. As rupturas das fibras são vistas como pontos de descontinuidade. Para baixas tensões normais a influência dos materiais fibrosos na resistência ao cisalhamento dos RSU é praticamente insignificante, dada a pequena aderência (atrito) entre as fibras e a massa de resíduo.

**Figura 5** – Curva tensão x deformação para RSU.

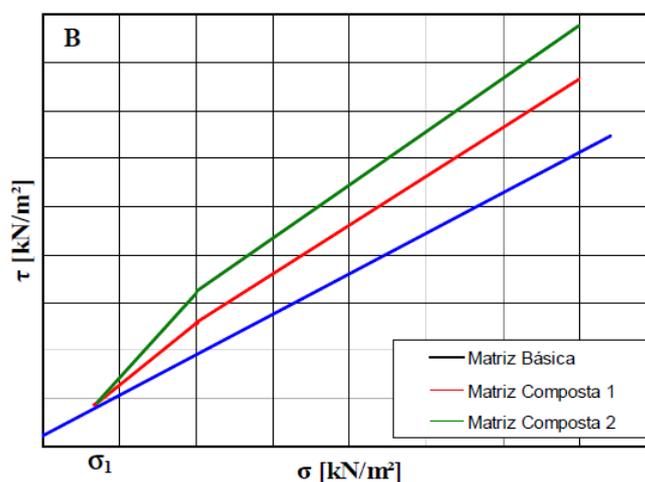


Fonte: Kölsch, 1993.

Kölsch (1996) afirma que as características de resistência mecânica dos RSU são dadas por sua resistência ao cisalhamento, expressa através dos parâmetros ângulo de atrito e a coesão, e por sua resistência à tração expressa pelo ângulo tensão tração ( $\zeta$ ). A resistência ao cisalhamento resulta do atrito entre partículas e a resistência à tração, da resistência à deformação das fibras.

Fucale (2005) realizou um estudo semelhante considerando a influência das fibras na resistência de resíduos sólidos. A autora executou ensaios de cisalhamento direto em amostras de solo, sem e com inclusão de fibras, no intuito de investigar o comportamento mecânico de solos reforçados com fibras plásticas distribuídas aleatoriamente e verificar uma possível analogia entre o comportamento destes materiais e dos resíduos sólidos. Fucale (2005) utilizou o modelo de Kölsch (1993, 1995, 1996), para determinação do ângulo de tração devido aos elementos de reforço, utilizando as matrizes compostas 1 (10% fibras) e 2 (20% de fibras), obtendo valores de  $\zeta = 13^\circ$  e  $19^\circ$ , respectivamente (Figura 6).

**Figura 6** – Envoltórias de resistência das amostras dos resíduos sólidos pré-tratados, levando-se em consideração o efeito das fibras, segundo modelo de KÖLSCH (1993, 1995, 1996) para RSU.



Fonte: Fucale, 2005.

O estudo permitiu confirmar que os elementos fibrosos que compõem os resíduos sólidos nos aterros possuem uma grande influência no comportamento mecânico do material, sendo estes responsáveis pelos altos valores de resistência medidos em ensaios com resíduos sólidos urbanos, como também pela estabilidade observada em diversos taludes de resíduos sólidos (FUCALE, 2005).

Schuler (2010), afirma que uma parcela significativa da resistência dos resíduos sólidos urbanos, pode ser explicada pelo efeito de reforço que alguns de seus constituintes fibrosos (plásticos, pedaços de madeira, papéis, entre outros) que seriam capazes de criar forças de tração. Desta forma a resistência ao cisalhamento seria composta de duas parcelas distintas: a primeira que se refere às forças de atrito no plano de cisalhamento e a segunda que se refere às forças de tração das fibras. Schuler (2010) ressalta ainda que os plásticos (fibras) podem favorecer a construção de taludes mais íngremes, porém não deve ser tomado como garantia de estabilidade em longo prazo, pois o efeito da fibra pode diminuir com o tempo devido ao efeito da degradação.

No entanto, os estudos do comportamento tensão-deformação-resistência de RSU ainda é um tema complexo, principalmente devido aos efeitos da heterogeneidade de seus constituintes, onde materiais inertes coexistem com matrizes altamente deformáveis e/ou biodegradáveis. Além do efeito da heterogeneidade nos resultados de campo, é possível que os resultados de investigações laboratoriais também tragam consigo efeitos da escala reduzida das amostras, associados às dificuldades de amostragem e reprodução das condições in situ e temporais (ABREU, 2015).

### **2.3.2 Ensaios de laboratório**

Os ensaios mais comuns na determinação da resistência ao cisalhamento de RSU são os de cisalhamento direto. Este ensaio é utilizado para obtenção de coordenadas de pontos da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb para obtenção dos parâmetros de resistência coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ). Informações quanto a deformação volumétrica do RSU durante cisalhamento também pode ser obtida.

O cisalhamento direto consiste num aparato que promove o deslizamento de uma metade do corpo de prova de solo em relação a outra, determinando assim, para cada tensão normal ( $\sigma_N$ ) à superfície do deslizamento, o valor da tensão cisalhante ( $\tau$ ) necessária para provocar a deformação do corpo de prova até a ruptura. O ensaio é executado mantendo-se constante a tensão vertical e medindo-se a tensão cisalhante correspondente a cada deformação horizontal imposta ao corpo de prova, gerando dessa maneira a curva tensão-deformação. As deformações verticais são também

monitoradas durante o processo de cisalhamento, possibilitando avaliações da variação volumétrica (ASTM D3080, 2011).

De acordo com ASTM D3080 (2011) Este ensaio pode ser executado em três modalidades: Ensaio rápido, Ensaio Adensado Rápido e Ensaio lento (Inundado). Entretanto, como não há controle e drenagem e nem medida de pressões neutras, a realização de cada um destes ensaios está condicionada às características do solo testado e a velocidade de deslocamento cisalhante imposta ao corpo de prova.

Os ensaios podem ser realizados em equipamentos com dimensões convencionais da caixa cisalhante (101,6x101,6x44,5 mm – CORRÊA (2013)), ou em grandes dimensões (300x300x150 mm – FUCALE (2005)) na tentativa de reproduzir amostras que sejam representativas do todo, devido à heterogeneidade do tipo e tamanho das partículas dos RSU. No entanto, de forma geral, os resultados dos ensaios obtidos em diversas pesquisas não apresentam comportamento de pico que defina a ruptura nas curvas tensão-deformação.

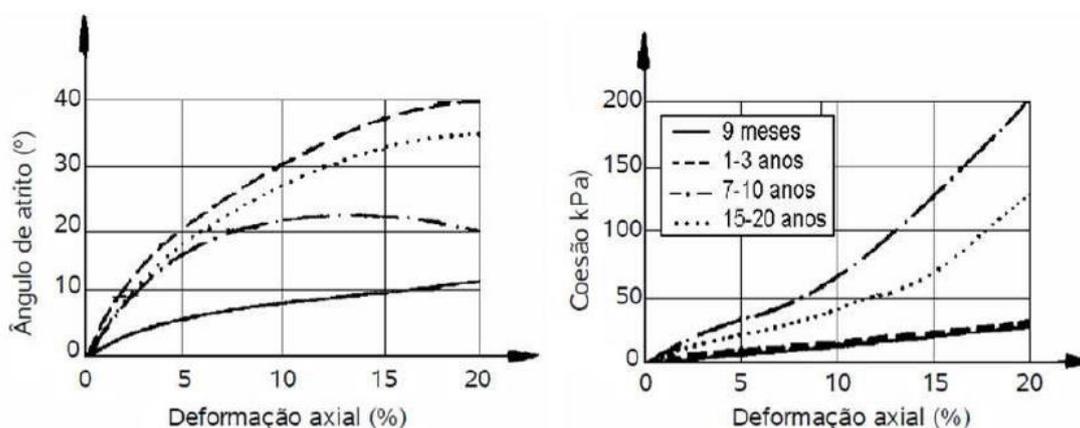
A variação dos parâmetros de resistência de resíduos de aterros sanitários em função das deformações foi analisada por meio de ensaios de laboratório por Jessberger (1990); Jessberger & Köckel (1993) e Kockel (1995). Os autores demonstram que, em geral, o valor limite do ângulo de atrito é mobilizado para deformações máximas de 20%. Para a coesão, a mobilização só começa a se acentuar para deformações superiores a 10%, com o seu valor tendendo a crescer indefinidamente com a deformação, não sendo possível caracterizar um máximo (NETO, 2004).

No modelo de análise proposto por Kockel (1995), os RSU são caracterizados como um material composto, dividido em dois componentes: uma matriz básica com granulação fina a média (diâmetro < 120 mm) que apresenta comportamento de atrito e uma matriz de reforço contendo os componentes fibrosos (diâmetro > 120 mm), que compreende plásticos, panos, galhos, dentre outros que contribuem para a resistência. Com base neste modelo, o autor realizou ensaios triaxiais com diferentes amostras de resíduos sólidos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

A Figura 7 apresenta a variação do ângulo de atrito e da coesão em função da deformação obtida por Kockel (1995), onde o autor indica que existem incrementos

de coesão e ângulo de atrito com a idade dos resíduos, exceto para os resíduos muito velhos.

**Figura 7** – Ângulo de atrito e coesão versus deformação para diferentes idades dos RSU.



Fonte: Kockel, 1995; Jessberger *et al.*, 1995 e König & Jessberger, 1997.

Kockel & Jessberger (1994) analisaram resíduos sólidos com diferentes teores de fibras. Os autores consideram que é a matriz básica que comanda a parcela de resistência por atrito interno dos RSU, com um ângulo de atrito interno máximo que varia de 42° a 45°, aparece a altas deformações e praticamente não sofre a influência do teor de fibras. A coesão, ao contrário, tem o seu valor fortemente dependente da matriz reforçada, tendendo a crescer com a deformação quanto maior o teor de fibras. Segundo Kockel & Jessberger (1994) essa coesão pode ser definida como uma “coesão devida à resistência à tração” dos componentes fibrosos. A ativação desta coesão requer grandes deformações axiais, cerca de 20%, quando a resistência por atrito interno já está praticamente mobilizada.

Lamare Neto (2004) avaliou a interação de material granular com as fibras em amostras de areia misturadas em percentuais variados a pequenas tiras de plástico e amostras do resíduo do pré-tratamento mecânico-biológico dos RSU. O autor considera as fibras como as únicas responsáveis pelos valores de um intercepto coesivo, contribuindo, também, para o acréscimo nos valores do ângulo de atrito dos materiais. Lamare Neto (2004) obteve para deslocamento 4% apresentaram coesão de 7 kPa e atrito de 35,33°, para o deslocamento de 7% um resultado de coesão de 10 kPa e atrito de 36,25° e para o deslocamento de 10% uma coesão 11 kPa e atrito de 37,16°.

Calle (2007) avaliou a influência do plástico no comportamento mecânico dos RSU. Os ensaios mostraram que o ângulo de atrito não sofre significativa variação com a compactação da amostra. A quantidade de fibras (plásticos, variação de tamanho de partícula entre 2 mm e 19 mm) também não altera substancialmente o valor do ângulo de atrito, sendo o valor médio de 38° para os RSU do Aterro de São Sebastião, São Paulo, e 34° para os de Novo Hamburgo, Rio Grande do Sul, referentes a uma deformação de 20%.

Fucale (2005) realizou ensaios de cisalhamento direto em equipamento convencional e de maiores dimensões com amostras de resíduos sólidos velhos e de resíduos sólidos resultante de pré-tratamento mecânico e biológico para verificar a influência da incorporação de diferentes porcentagens de fibras no comportamento mecânico e nos parâmetros de resistência. Nos ensaios com dimensões convencionais foram obtidos resultados para a coesão das amostras de argila sem reforço reduziu de aproximadamente 44 para 18,7 kPa, enquanto que o ângulo de atrito diminuiu de 19° para 10,2°. No caso das amostras de argila com reforço de fibras geotécnicas (2%), a coesão foi cerca de 51 kPa e ângulo de atrito 21,8° para a umidade ótima, e em torno de 15,7 kPa e 11,5° devido ao aumento de umidade.

Motta (2011) verificou através de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões (600x600x600 mm) a influência nos parâmetros de resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos com codisposição de lodo de tratamento de esgoto. Dos ensaios de cisalhamento direto, Motta (2011) obteve para o deslocamento 5% uma coesão de 13,3 kPa e atrito de 22°, para o deslocamento de 10% um resultado de coesão de 16,5 kPa e atrito de 28° e para o deslocamento de 15% uma coesão 22,6 kPa e atrito de 30°.

Na Tabela 2 são apresentados alguns parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU reportados na literatura, obtidos através de ensaios de cisalhamento direto de laboratório.

**Tabela 2** – Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos através de ensaios de cisalhamento direto de laboratório.

ENSAIOS DE CISALHAMENTO				
Fonte	Dimensões do corpo de Prova	Parâmetros		Local
		$\phi$ (°)	c (kN/m <sup>3</sup> )	
Landva & Clarck (1990)	434 x 287 mm (c x l)	24 - 41	0 - 23	Aterro do Canadá
Sigegel <i>et al.</i> (1990)	130 x 76 a 102 mm	39 e 53	0	Aterro de Monterey, Califórnia
Kölsch (1990)	100 x 100 x 300 mm (c x l x h)	26,4 (rsu novo); 17,2 (rsu velho)	-	-
Del Greco & Oggeri (1993)	fardos com 400 x 500 x 600 mm (c x l x h)	21 e 22	16 e 24	-
Gabr & Valero (1995)	63,5 x 23 mm (diâmetro x h)	20,5 a 39 (rsu velho)	0 a 27,5	Pioneer Crossing, Pensilvânia
Edinçliier <i>et al.</i> (1996)	300 mm (diâmetro)	42	24	Wisconsin, EUA
Collins & Kölsch (1996)	2 x 1 x 1,5 m (c x l x h) e 300 x 300 (c x l)	29,7 e 31 (rsu novo) 40 e 38 (rsu velho)	15	Aterro de Pinnow, Alemanha
Scheelhaase <i>et al.</i> (2001)	300 x 300 x 200 mm (c x l x h)	22,5 - 43,3	25,7 - 54,1	-
Caicedo <i>et al.</i> (2002)	300 x 300 x 200 mm (c x l x h)	24	27	Aterro de Dõna Juana, Colõmbia
Lamare Neto (2004)	400 x 250 x 200 mm (c x l x h) e 100 x 100 x 70 mm (c x l x h)	25 - 42 e 35 - 37	3 - 6 e 7 - 11	Usina de compostagem em Jacarepaguá - RJ
Fucale (2005)	300 x 300 x 150 mm (c x l x h)	37 - 46	23 - 29	Aterro de Buchen e Ihlenberg, Alemanha
Martins (2006)	700 x 700 x 500 mm (c x l x h)	3 - 38	5 - 84	Aterro de Belo Horizonte, MG
Cardim (2008)	1000 x 1000 x 1000 mm (c x l x h)	34,5 - 38,6	1 - 4,35	Usina de compostagem - DF
Motta (2011)	50,8 x 50,8 x 43,5 mm (c x l x h)	37 - 38,5	33 - 37	Central de Tratamento de Resíduos de Igarassu - PE
	600 x 600 x 600 mm (c x l x h)	23 - 36	24 - 34	
Corrêa (2013)	101,4 x 101,4 x 44,5 mm (c x l x h)	23,4 - 40,6	5,8 - 46	-
Babu <i>et al.</i> (2014)	NI	32,27	28,24	Aterro sanitário - China
Giri & Reddy (2014)	NI	35	15	RSU biodegradados, China
Fan <i>et al.</i> (2016)	NI	20 - 30	15 - 25	Aterro sanitário - China
GRS (2016)	101,4 x 101,4 x 45 mm (c x l x h)	29,1 - 36,8	1,3 - 25	Aterro Metropolitano de João Pessoa - PB

Fonte: Adaptado de Motta, 2011.

## 2.4 ESTABILIDADE DE TALUDES DE ATERROS DE RSU

### 2.4.1 Métodos de avaliação de estabilidade de talude

Existem diversos métodos de avaliação de estabilidade, o tipo de análise adotado é dependente da escala de trabalho, da disponibilidade de tempo e dados de trabalho e, sobretudo, da disponibilidade de recursos financeiros (AHRENDT, 2005), sendo abordados no presente caso os métodos de análise de estabilidade determinísticos.

As análises de estabilidade de taludes determinísticas são realizadas com base no fator de segurança (FS) definido pela relação entre as tensões cisalhantes mobilizadas e a resistência ao cisalhamento. O fator de segurança pode ser dado pela equação:

$$FS = \frac{\tau'}{\tau_d} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

FS = Fator de segurança;

$\tau'$ : resistência ao cisalhamento;

$\tau_d$  = Tensões cisalhantes desenvolvidas ao longo da superfície de ruptura;

Nesta relação, valores de FS maiores que 1 indicam condições de estabilidade, valores iguais a 1 representam o limite da estabilidade e valores menores que 1 não possuem significado físico (SCHULER, 2010).

A NBR 11682 (ABNT, 2009), trata da estabilidade de taludes incluindo as condições para estudo, projeto, execução, controle e observação de obras de estabilização. Nesta norma são definidos valores de fator de segurança mínimos a serem adotados em projetos de taludes e encostas, de acordo com o grau de segurança definido para o local de implementação da obra.

A NBR 11682 (ABNT, 2009) define o fator de segurança mínimo de 1,50 para projetos executados em locais com baixo grau de segurança, 1,30 para projetos

executados em locais com grau de segurança médio e 1,15 para projetos executados em locais com grau de segurança alto.

Os principais métodos de cálculo são divididos em lineares e não lineares, sendo estes últimos subdivididos em superfícies circulares e não circulares. As hipóteses gerais para os métodos são baseadas no equilíbrio-limite, descrita com as seguintes considerações:

- O equilíbrio de uma massa de material é delimitado por uma superfície potencial de ruptura;
- Os casos são considerados bidimensionais, considerando uma seção do talude/encosta/aterro avaliado;
- O estado de ruptura dos materiais é definido pelo critério de Mohr-Coulomb.

A Tabela 3 apresenta os principais métodos de análise de estabilidade de talude.

**Tabela 3** – Principais métodos de cálculo da estabilidade de talude.

<b>MÉTODOS</b>	
LINEARES (não consideram as fatias)	Método do momento $p/\phi = 0$
	Taludes Infinitos
	Método de Culman
	Método de Rendulic
Método do círculo de atrito	
NÃO LINEARES (consideram as fatias)	Superfície circular
	Método de Fellenius
	Método de Bishop
	Método de Bishop Modificado
	Método de Spencer
Método de Morgenstern-Price	
Superfície qualquer	
Método de Janbu	
Método de Sarma	
Método dos Blocos	

Fonte: Silva, 2007.

## 2.4.2 Estabilidade de taludes de aterros de RSU

Os estudos da mecânica dos resíduos, ainda não possuem teorias e modelos que expressem de forma realista o comportamento dos RSU. Assim, os estudos de estabilidade em aterros sanitários têm sido desenvolvidos utilizando-se as teorias e métodos clássicos da mecânica dos solos, apresentadas no item 2.4.1

### 2.4.2.1 Fatores de influência na estabilidade de aterros de RSU

Segundo Borgatto (2010) diversos são os fatores que podem influenciar a estabilidade de aterros sanitários, os quais envolvem variáveis além das já consideradas na análise geotécnica convencional. Têm-se como os principais fatores de influência na estabilidade de aterros sanitários são os seguintes:

- Interface das forças de cisalhamento entre vários materiais geossintéticos;
- Interface das forças de cisalhamento entre geossintéticos e solo;
- Parâmetros geotécnicos dos RSU;
- Altura e inclinação dos taludes laterais escavados;
- Geometria do aterro sanitário;
- Poro-pressão na base do aterro;
- Nível de lixiviado no corpo do aterro;
- Sistema hidrogeológico do local do aterro;
- Controle, operação e monitoramento do aterro, etc.

### 2.4.2.2 Variação dos parâmetros com o tempo

Sabe-se que devido às características dos diversos componentes constituintes dos RSU, os parâmetros de resistência sofrem variações com o tempo. Dentre estes fatores podemos citar:

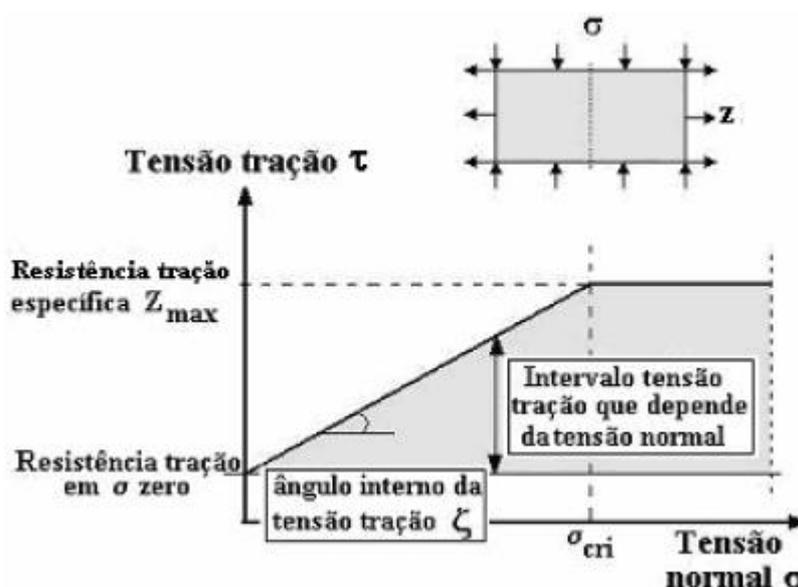
- Alteração da composição dos RSU devido à característica de degradabilidade de alguns componentes (matéria orgânica) e por processos de reciclagem (plásticos, metais, papel, etc.);
- Aumento do nível do lençol freático causado por falha do sistema de impermeabilização;

- Aumento do nível de chorume dentro da massa de resíduo causado por falha no sistema de drenagem;
- Aumento da pressão interna de gases causada pela ruptura do sistema de drenagem de gases, etc.

#### 2.4.2.3 Modelo cálculo de estabilidade considerando o efeito de tração

De acordo com Kölsch (1993), os RSU apresentam reforços de resistência (coesão das fibras ou pseudo-coesão) mobilizados através das tensões de tração que dependem da tensão normal vertical às fibras. Na Figura 8 é apresentada a relação entre a tensão de tração versus a tensão normal aplicada e os parâmetros de resistência do material que descrevem as propriedades de reforço no resíduo.

**Figura 8** – Curva tensão de tração versus tensão normal para RSU.

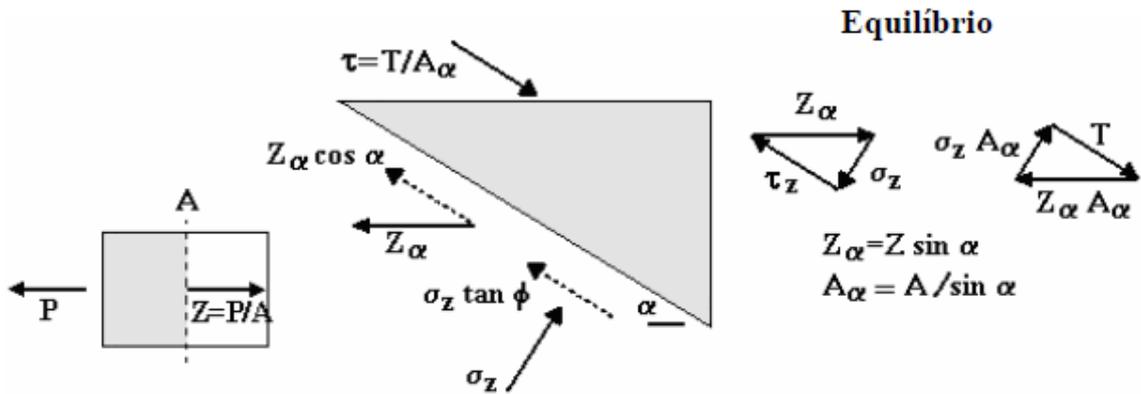


Fonte: Kölsch, 1996 *apud* Calle, 2007.

Para explicar o efeito reforço das fibras, o elemento acima, reforçado horizontalmente, encontra-se submetido a uma carga de cisalhamento  $T$ , carga esta que gera a tensão de tração ( $Z$ ) no reforço. Corrigindo a tensão de tração para a direção do reforço, temos ( $Z_{\alpha}$ ). Assim, a tensão de tração gera a resistência ao cisalhamento ( $\tau_z$ ). Para garantir o equilíbrio de forças no elemento é preciso uma tensão normal adicional  $\sigma_z$  (Efeito Clamp). Com a tensão  $\sigma_z$  surge uma força de atrito adicional gerando a componente de resistência ao cisalhamento  $\tau_R(Z)$  (CALLE, 2007).

A Figura 9 dispõe da representação do sistema de equilíbrio de forças num elemento de reforço, a fim de mostrar a parcela de coesão da fibra.

**Figura 9** – Sistema de equilíbrio de forças num elemento do reforço.



Fonte: Kölsch, 1996 *apud* Calle, 2007.

Com o desenvolvimento das equações a seguir temos a Equação 2 que representa a parcela de coesão das fibras  $\tau_{R(z)}$ .

$$\tau(z) = \tau_z + \tau_{R(z)}$$

$$\tau(z) = Z_\alpha * \text{sen} \alpha * \text{cos} \alpha + \sigma_z * \tan \phi$$

$$\tau(z) = Z * \text{sen} \alpha * \text{cos} \alpha + \sigma_z * \text{sen} \alpha * \text{cos} \alpha * \tan \phi$$

$$\tau(z) = Z * \text{sen} \alpha * (\text{cos} \alpha + \sigma_z * \text{sen} \alpha * \tan \phi)$$

$$\tau(z) = Z * a\zeta \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

$\tau(z)$  – coesão das fibras;

$\tau_z$  – resistência ao cisalhamento das fibras;

$\tau_{R(z)}$  – resistência de atrito adicional (efeito de clamp);

$\alpha$  – ângulo entre as fibras e a superfície de cisalhamento;

$a\zeta$  – fator de transmissão que descreve a quantidade máxima de fibras mobilizadas variando entre 0,65 a 0,95 para ângulos de atrito ( $\phi$ ) entre 15 e 35°.

Sendo ( $\sigma_v$ ) a tensão normal, perpendicular à direção principal das fibras e ( $\zeta$ ), o ângulo de tensão de tração, temos o seguinte desenvolvimento:

$$Z = \sigma_z * \tan\zeta \quad \text{para } [\sigma_v < \sigma_{cri}]$$

$$Z = Z_{max} \quad \text{para } [\sigma_v > \sigma_{cri}]$$

$$\tau_f = \tau(R) + \tau(z)$$

$$\tau_f = \sigma * \tan\phi + Z * a\zeta$$

Assim, as Equações 3 e 4 descrevem a resistência ao cisalhamento dos RSU com inclusão do efeito reforço das fibras.

$$\tau_f = \sigma * \tan\phi + \sigma_v * \tan\zeta * a\zeta \quad \text{para } [\sigma_v < \sigma_{cri}] \quad \text{(Equação 3)}$$

$$\tau_f = \sigma * \tan\phi + Z_{max} * a\zeta \quad \text{para } [\sigma_v > \sigma_{cri}] \quad \text{(Equação 4)}$$

Através da aplicação das Equações 3 e 4 num método de cálculo de estabilidade de taludes como o método de Bishop, temos um método de cálculo de estabilidade de taludes de aterros sanitários considerando o efeito esforço das fibras.

Segundo Zuehmann (1999), o modelo de resistência ao cisalhamento dos RSU com envoltória bilinear apresentado por Kolsch (1996) é o modelo mais exato para descrição da resistência dos RSU. Através deste modelo é possível determinar e descrever as duas componentes de resistência dos RSU separadamente. O mesmo autor propõe a Equação 5 para o cálculo da estabilidade de taludes, utilizando-se o método de Bishop (DIN 4086), na qual as forças resistentes (T) foram acrescidas de um termo que representa a resistência à tração devido às fibras.

$$T = \sum \frac{(G * \tan\phi' + c' * b + G * \tan\zeta * a\zeta * \sin(1,5 * \alpha))}{\left(\frac{1}{FS}\right) * \sin\alpha * \tan\phi' + \cos\alpha}$$

(Equação 5)

Sendo:

G – Peso do elemento (kN);

$\zeta$  – ângulo de tensão de tração (°);

- $c'$  – coesão (kN/m<sup>2</sup>);  
 $\phi'$  – ângulo de atrito (°);  
 $\alpha$  – ângulo entre as fibras e a superfície de cisalhamento (°);  
 $b$  – espessura do elemento (m);  
 FS – fator de segurança;  
 $a\zeta$  – fator de transmissão.

Os parâmetros geotécnicos para os resíduos sólidos foram sugeridos por na Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA – EMPFEHLUNGEN E 2-35 (DGGT, 1994), após uma ampla campanha de ensaios, tanto para resíduos sem tratamento, como também para resíduos resultantes de pré-tratamento mecânico e biológico. Um resumo dos parâmetros sugeridos está apresentado na Tabela 4, conforme apresentado por Fucale (2005), onde foram considerados procedimentos para deposição dos resíduos sólidos, de forma isotrópica (GDA E 2-23) e anisotrópica (GDS E 2-29).

**Tabela 4** – Parâmetros de geotécnicos para RSU sugeridos por GDA E 2-35.

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

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

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

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

Fonte: DGGT, 1994.

Para os resíduos depositados isotropicamente, segundo GDA E 2-23, pode-se utilizar os métodos conhecidos da Mecânica dos Solos. Os parâmetros de resistência dos resíduos sólidos depositados de forma isotrópica são desta forma dados em

termos de coesão e ângulo de atrito. Em relação aos resíduos depositados anisotropicamente, GDA E 2-29 recomenda que as variáveis da força relativa à tensão de tração dos constituintes sejam consideradas, não devendo se empregar simplesmente os métodos da Mecânica dos Solos. Neste caso, deve-se incorporar a coesão das fibras nos cálculos, podendo-se utilizar o modelo bi-linear desenvolvido por Kölsch (1996) nas análises.

Inúmeras avaliações, utilizando-se o método modificado de cálculo de tração de Kölsch (1993), foram realizadas pelo grupo alemão de pesquisa. Kölsch (1996) conduziu análises de estabilidade bem como retro-análises de diferentes ensaios de campo documentados na literatura. Os resultados levaram a afirmar que taludes de aterros de resíduos não degradados, cujos parâmetros teriam os valores:  $f_{MB} = 15^\circ$ ,  $c_{MB} = 15 \text{ kN/m}^2$ ,  $\zeta = 35^\circ$ ,  $z_{max} = 225 \text{ kN/m}^2$ ,  $\gamma = 9,5 \text{ kN/m}^3$ , com uma altura de até 100 m e inclinação de até  $90^\circ$ , sob condições normais (nenhuma infiltração de água, nenhuma pressão devido a esta água) não sofreriam colapso, ruptura. Este resultado coincide com frequentes observações em aterros, onde taludes de resíduos sólidos verticais mostram estabilidade para um longo período de tempo. Este fato não é por acaso, mas sim um resultado das propriedades de reforço dos resíduos sólidos. Este novo método, que registra a resistência ao cisalhamento real do resíduo sólido, oferece a possibilidade de fazer melhor uso da capacidade de carga para projetos geotécnicos.

São reportados na literatura técnica diversos casos de análises de estabilidade de taludes em aterros sanitários, destacando em ordem cronológica os desenvolvidos por: Borgatto (2006), Ribeiro (2007), Remédio (2014), Giri & Reddy (2014), Petrovic *et al.* (2016) e Huang & Fan (2016).

Borgatto (2006) realizou retro-análises de estabilidade no Aterro Sanitário Bandeirantes, localizado na cidade de São Paulo – SP, sendo realizadas análises considerando o efeito das fibras e análises convencionais, sem a consideração do efeito das fibras. Nas retro-análises foi utilizado o *software* GGU-*Stability* da GGU-*Software*, que possibilita tais análises com ou sem a consideração dos efeitos das fibras.

Para Ribeiro (2007), o método de Bishop é possivelmente o mais utilizado entre os diversos métodos para análise de estabilidade de taludes, visto que é razoavelmente simples e fornece fatores de segurança próximos dos obtidos por métodos mais precisos. O Autor adotou o método de Bishop na determinação dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) de resíduos sólidos através de retro-análises em ensaios de laboratório sendo utilizado o *software* SLOPE/W, da GeoSlope Internacional, na aplicação do método.

Remédio (2014) realizou análises no Aterro de Caetetuba, localizado no município de Atibaia – SP. O autor utilizou parâmetros geotécnicos dos resíduos determinados com base na bibliográfica e com base em resultados de testes de penetração de sondagens identificadas na pesquisa documental. Na realização das análises de estabilidade foram elaboradas seções litoconstrutivas do aterro, com base em plantas topográficas e perfis de sondagens identificados na pesquisa documental, a análise de estabilidade foi feita com uso do *software* SLOPE/W da GeoSlope Internacional.

Giri & Reddy (2014) avaliaram os efeitos na estabilidade de taludes de um aterro sanitário gerados pela recirculação de lixiviado. Foi utilizado um modelo numérico de fluxo bifásico (lixiviado de aterro e gás como fases imiscíveis) para investigar os efeitos de natureza heterogênea e anisotrópica dos RSU. Percebeu-se que os RSU heterogêneos e anisotrópicos, com peso específico variado e saturado, influenciam significativamente na condutividade hidráulica, na distribuição de umidade, geração e distribuição de fluido nos poros e nas pressões no aterro, consequentemente efeitos na estabilidade do aterro.

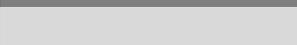
Huang & Fan (2016) apresentaram uma revisão das análises geotécnicas da estabilidade do aterro de resíduos sólidos municipais. Os históricos de casos selecionados envolvendo instabilidade foram discutidos com base em pesquisas publicadas, as rupturas e suas prováveis causas foram examinadas. Verificou-se que os fatores que afetam a estabilidade dos aterros sanitários estão diretamente relacionados as propriedades geotécnicas dos resíduos, e as características estruturais do corpo do aterro.

Com a revisão literária Huang & Fan (2016) chegaram a algumas conclusões a respeito da estabilidade em aterros sanitários, tais quais:

- A principal forma de ruptura em aterros sanitários, é relativa a falhas corrediças de fluxo no corpo do aterro de RSU, deslizamento ao longo das camadas, e rachaduras nas camadas de cobertura.
- Devido à natureza heterogênea e dependência do tempo do RSU, os problemas de estabilidade do aterro sanitários são mais complexos do que em solos ou maciços rochosos.
- Em uma macro-escala, os planos estruturais em corpos de aterro atuam como um potencial deslizante, falhas podem ocorrer como resultado do deslizamento ao longo de várias interfaces dentro do sistema do aterro. A geração e migração de lixiviados e gás do aterro são ambos fatores adversos que prejudicam a estabilidade, devido ao desenvolvimento de pressões em excesso nos poros.
- As atividades dinâmicas e os processos geológicos que afetam a estabilidade do aterro são: terremotos, chuvas e atividades da engenharia (por exemplo: recirculação de lixiviados, sobrecarga e escavação). O efeito da chuva é o mais significativo e a maioria das falhas em aterros estão relacionadas à precipitação atmosférica.

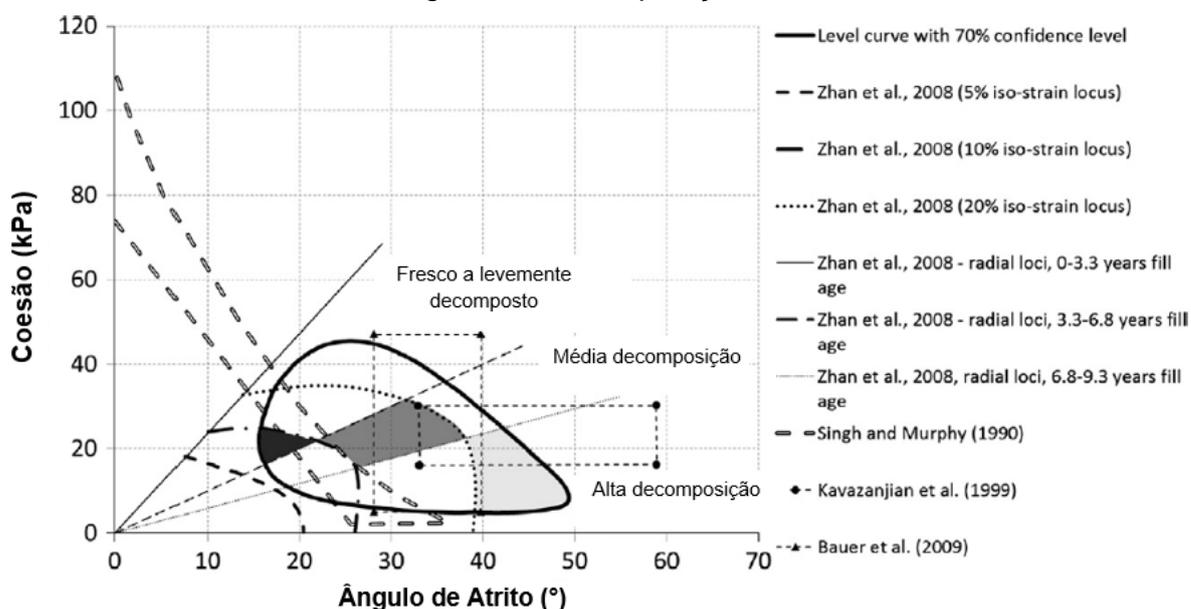
Petrovic *et al.* (2016) realizou análises estatísticas de coesão e ângulo de atrito de diversas literaturas, relativas aos resíduos sólidos. O estudo correlacionou coesão e ângulo de atrito com uso de funções densidade de probabilidade e nível de confiança da escolha de ambos parâmetros em valores de FS (Tabela 5 e Figura 10).

**Tabela 5** – Parâmetros de resistência ao cisalhamento selecionados para análise de sensibilidade.

Idade do Resíduo	Cor correspondente		
	a Figura 10	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
Fresco a levemente decomposto		16-25	15-22
Média decomposição		16-31	22-37
Alta decomposição		5-25	38-49

Fonte: Adaptado de Petrovic *et al.*, 2016.

**Figura 10** – Gamas dos parâmetros de resistência ao cisalhamento em relação ao grau de decomposição.



Fonte: Adaptado de Petrovic *et al.*, 2016.

O estudo equalizou a relação entre grau de decomposição de resíduos a uma faixa de variação de parâmetros de resistência ( $\phi$  e  $C$ ), com zonas de parâmetros de confiança já reportados por outras literaturas.

### 2.4.3 Alçamento de aterros

A prática de alçamento é utilizada visando o aumento da vida útil dos aterros, a qual consiste em elevar a altura do volume de RSU compactados nas células dos aterros. Além disso, a técnica de altear reduz a área de influência de captação da água que percola na célula durante as chuvas, no comparativo com células que são ampliadas de forma horizontal, e esse aspecto incide na produção de lixiviado, a qual menor em aterros que são ampliados verticalmente (Bosco *et al.*, 2011). A redução da produção de lixiviado por consequência reduz os custos com o tratamento deste líquido.

Diversas pesquisas buscaram avaliar o efeito da verticalização no comportamento da estabilidade de taludes dos aterros, destacam-se as apresentadas por: Suzuki (2012), Hong-Jun *et al.* (2015) e Rocha *et al.* (2019).

Suzuki (2012) efetuou avaliação do alçamento de aterros sanitários utilizando como base o método de montante de barragens de rejeito de mineração, o objetivo

era aumentar a capacidade de armazenamento de resíduos nas células. Dos resultados obtidos por Suzuki (2012) foi verificado que as pressões neutras se apresentaram como maior fator influenciador no comportamento do FS para o alteamento das células. Além disso, os resultados apontaram que o alteamento de aterros sanitários utilizados diques sucessivos reforçados é bastante eficiente.

Hong-Jun *et al.* (2015) realizou análises testando a influência da variação dos parâmetros geotécnicos e geométricos de aterros de RSU, na estabilidade de taludes. Hong-Jun *et al.* (2015) verificou nas análises do efeito da variação da altura do aterro com FS, uma estabilização do FS para valores acima de 100 m de altura da célula, indicando assim, uma pouca influência no FS para alturas de aterros mais elevadas.

Rocha *et al.* (2019) realizou análises de estabilidade de taludes em simulações de verticalização de uma célula do aterro sanitário de João Pessoa-PB. Foram realizadas análises em quatro situações: célula do aterro na condição atual, célula com 20 m de resíduos, com 30 m e 40 m de resíduos, para uma de geometria 1V:2H. Os resultados apontaram quem em todas as condições com eficiência do sistema de drenagem o FS se manteve acima de 1,5, indicando que a verticalização da célula avaliada mantinha as condições de estabilidade mínimas exigidas por norma.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados na pesquisa, quanto execução de ensaios de campo e laboratório, assim como as modelagens computacionais de estabilidade de talude.

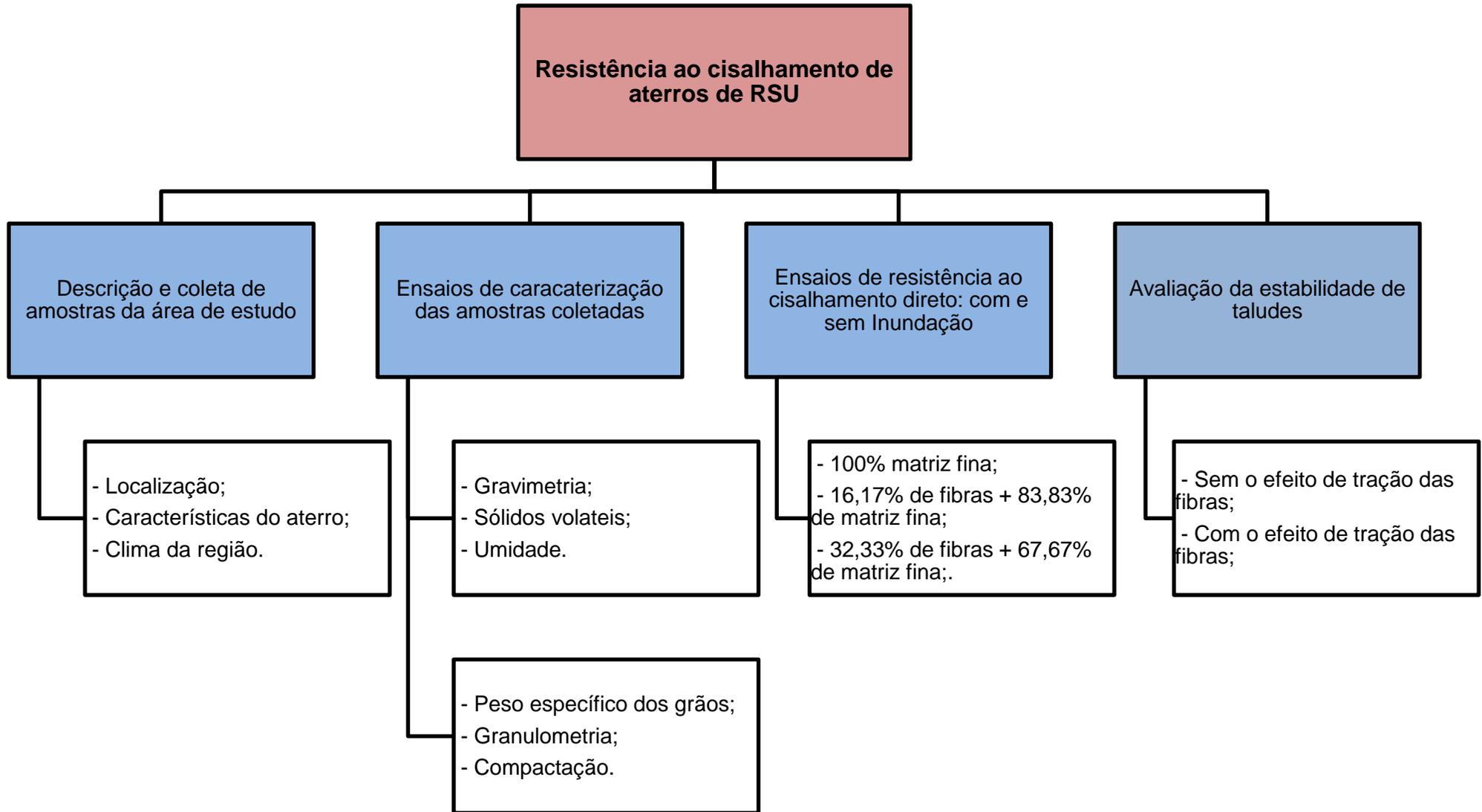
Como etapa inicial do procedimento metodológico têm-se o processo de descrição das áreas de estudo, seguida da coleta de amostras de resíduos no aterro. Salienta-se que o resíduo coletado tem aproximadamente 10 anos. Após o processo de coleta foi realizada a caracterização gravimétrica dos resíduos, sequenciada de análises granulométricas, peso específico dos grãos, compactação e sólidos voláteis das amostras.

A etapa seguinte consistiu em avaliar por meio de ensaios de cisalhamento direto a resistência ao cisalhamento em três percentuais das composições de misturas: com 100% de amostra da matriz fina, com 16,17% de fibras + 83,83% de matriz fina e com 32,33% de fibras + 67,67% de matriz fina. Os ensaios foram executados nas condições: com e sem inundação.

A última etapa do procedimento metodológico descreve o processo de análise de estabilidade de taludes hipotéticos, por meio dos *softwares* GGU-Stability e GeoSlope. Nos *softwares* foram efetuadas as modelagens de estabilidade em dois cenários de análises: com e sem o efeito de tração dos materiais fibrosos.

No Fluxograma 1 apresentado e esquematizado o resumo do procedimento metodológico que foi desenvolvido na presente pesquisa.

**Fluxograma 1 – Esquema do processo metodológico da pesquisa.**



Fonte: Autor, 2019.

### 3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

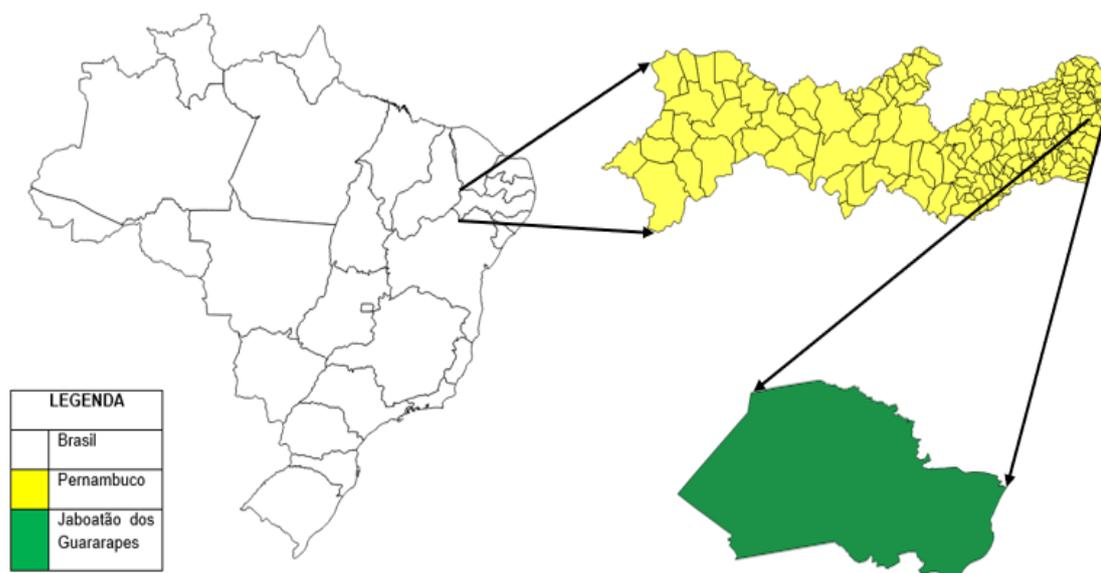
Foi utilizada como área de estudos para a coleta de amostras e realização de ensaios, uma célula experimental de aterro já encerrado da Muribeca, célula a qual foi finalizada no ano de 2008, tratando-se assim de resíduos com 10 anos de disposição.

A célula experimental foi executada em um projeto de pesquisa que teve por objetivo geral os estudos de geração de energia elétrica através do biogás produzido pela biodegradação dos resíduos sólidos urbanos. O projeto foi realizado em parceria entre a prefeitura municipal do Recife e o Grupo de Resíduos Sólidos (GRS)-UFPE,

#### 3.1.1 Características e localização da área de coleta dos resíduos

O Aterro Controlado da Muribeca localiza-se em Pernambuco, na Região Metropolitana do Recife (RMR), no município de Jaboatão dos Guararapes, a cerca de 15,0 km do Centro do Recife (Mapa 1). O acesso principal para o Aterro é a PE-25 que se interliga com a BR-101 a 4 km do Aterro. As coordenadas do Aterro: Latitude: 8° 9' 50" S, Longitude: 34° 59' 00" W.

**Mapa 1**– Mapa de localização do município de Jaboatão dos Guararapes – PE.



Fonte: Autor, 2019.

A célula experimental está localizada no do Aterro da Muribeca. Segundo Maciel (2009) a célula experimental possui uma área total de cerca de 0,86 hectare (Fotografia 1).

**Fotografia 1** – Perfil da célula experimental da Muribeca após a cobertura dos resíduos.



Fonte: Maciel, 2009.

A célula experimental foi executada entre os anos de 2007 e 2008, e recebeu resíduos de bairros de 10 bairros do grande Recife: Campo Grande, Jiquiá, CDU/Várzea, Várzea, Engenho do Meio/Cordeiro, Curado/tejiipió, Casa Amarela, Encruzilhada, Torrões e Várzea. Segundo Maciel (2009) esses bairros apresentavam resíduos com altos percentuais de matéria orgânica (46%) e plástico (19,6%). A Tabela 6 dispõe de algumas das principais características físicas da célula experimental da Muribeca.

**Tabela 6** – Características físicas da célula experimental da Muribeca.

<b>Resíduos Domiciliares</b>	<b>Quantidades</b>
Produção Acumulada	36.659,82 ton
Recalques (20%)	7.331,964 ton
Produção a ser tratada	29.327,856 ton
Peso específico in situ	1,04 ton/m <sup>3</sup>
Volume Acumulado	35.208,90 m <sup>3</sup>
Volume Final (com 10% cobertura)	38.729,79 m <sup>3</sup>

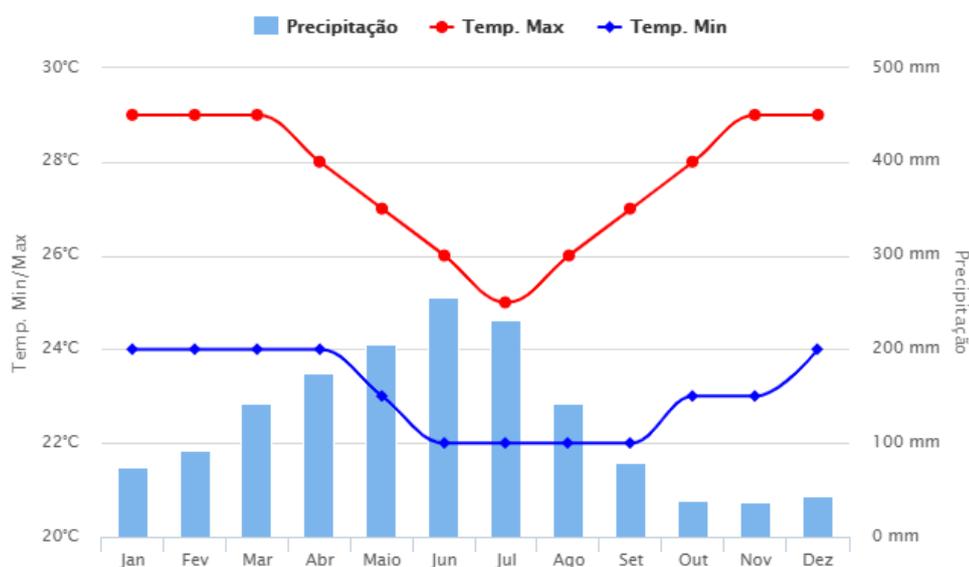
Fonte: Maciel, 2009.

### 3.1.2 Clima

A condição climática da região onde está localizada a célula experimental incide diretamente em diversos dos seus aspectos comportamentais, tais como: estabilidade de taludes, nível piezométricos das células, processo de decomposição da matéria orgânica, produção e transporte de gases.

A área da célula experimental da Muribeca está inserida numa região de clima tropical litorâneo, quente e úmido, tipo As' (segundo a classificação de Köppen), comandado por ventos alísios de sudeste, que sopram durante cerca de nove meses com velocidades médias mensais entre 3,1 a 4,2 m/s. A precipitação da região é abundante, com média anual de aproximadamente 2.458 mm, apresentando um padrão de distribuição irregular ao longo do tempo, conforme ilustrado no Gráfico 3.

**Gráfico 3** – Série histórica do clima de Jaboatão dos Guararapes dos últimos 30 anos.



Fonte: CLIMATEMPO, 2019.

A temperatura média anual é de 25,5°C (mín. 23,9°C e máx. 26,6°C). A umidade relativa média do ar é de 79,8% (mín. 73% e máx. 85%) e a insolação média anual é em torno de 2.463,6 horas. A evaporação potencial média anual é inferior à precipitação, ou seja, 1.390 mm evaporados (3,8 mm/dia de intensidade de evaporação) contra 2.458 mm de chuva, indicando excedente hídrico de 1.068 mm.

### 3.2 COLETA DE AMOSTRA

A célula onde foi realizada a coleta possui cerca de 10 anos, sendo assim trata-se de uma célula com resíduo envelhecido. A coleta foi realizada em novembro de 2018, e ao chegar na célula para efetuar o processo de amostragem foi possível verificar que a vegetação no entorno estava bastante seca, aspecto condizente com o período de estiagem da região na época, como já visto anteriormente na sua série histórica (Figura 3.4).

Para realização da retirada de amostras foi necessário o uso de uma retroescavadeira para que fosse possível atingir profundidades mais elevadas (Fotografia 2).

**Fotografia 2** – Retroescavadeira utilizada para retirada de amostra de RSU da célula experimental.



Fonte: Autor, 2019.

Os resíduos coletados para a realização da gravimetria e dos ensaios de laboratório foram retirados a aproximadamente 2 metros de profundidade da cota máxima do aterro, como apresentada na Fotografia 3 Vale destacar que a altura total da célula no ano de finalização 2008, era de 9 m.

**Fotografia 3** – Profundidade onde foi coletada as amostras.



Fonte: Autor, 2019.

Como apresentado na Figura 3.6, é possível verificar que os resíduos abaixo da camada de cobertura do aterro possuíam aspectos bastante escurecido. Foi possível verificar em alguns momentos da coleta, saídas pontuais de gases, vale ressaltar que foram utilizados EPI's durante todo o processo de coleta, como estabelecido pelas legislações pertinentes.

Ao atingir a profundidade de aproximadamente 2 m, e com o auxílio da retroescavadeira os resíduos foram espalhados sobre uma lona, para que os resíduos não se misturem com solo de cobertura (Fotografia 4).

**Fotografia 4** – Espalhamento da amostra coletada sobre a lona.



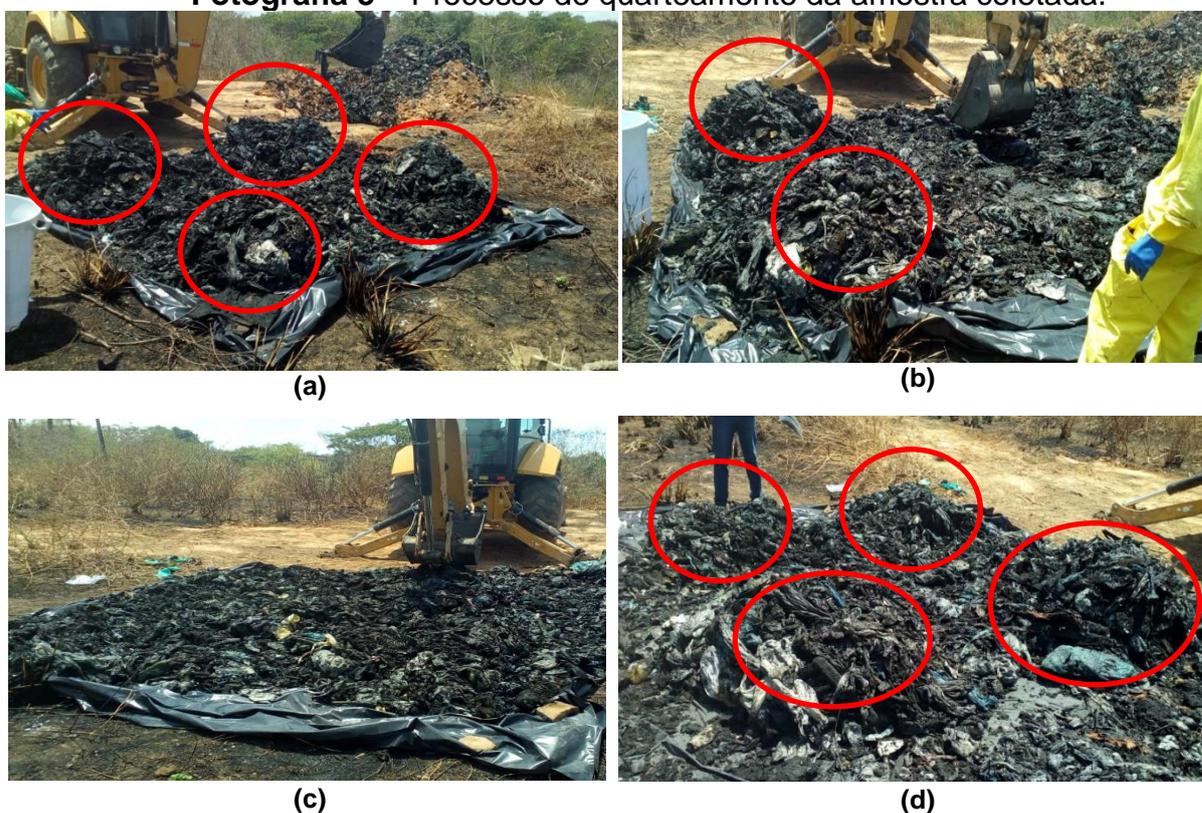
Fonte: Autor, 2018.

O procedimento de análise gravimétrica dos resíduos foi realizado por meio da técnica de quarteamento, conforme metodologia sugerida pela NBR 10.007 (ABNT,

2004), a qual também foi adotada por Maciel (2009), conforme metodologia apresentada por Mariano *et al* (2007).

Após o espalhamento da amostra coletada iniciou-se o processo de quarteamento da amostra, tal procedimento consiste em misturar a amostra sobre a lona e logo após dividi-la em quatro partes (Fotografia 5.a), logo após foram selecionadas duas partes opostas das quatro partes para serem misturadas novamente (Fotografia 5.b). As duas partes selecionadas foram inicialmente misturadas novamente (Fotografia 5.c) e na sequência foram quarteadas mais uma vez (Fotografia 5.d).

**Fotografia 5** – Processo de quarteamento da amostra coletada.



Fonte: Autor, 2018.

Em seguida foi selecionada uma das amostras quarteadas e dividida em duas partes, onde uma das partes selecionadas foi separada para a realização da gravimetria dos resíduos, e a outra parte foi armazenada em recipientes e levada para análises no Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco, no Recife.

### 3.3 GRAVIMETRIA

A gravimetria dos resíduos coletados foi realizada em duas etapas: inicialmente, foi realizado o peneiramento das frações, sendo finalizado através da classificação manual dos resíduos de maior granulometria. Na primeira etapa, seguindo a metodologia utilizada por Kaartinen *et. al.* (2013) e Holanda *et al.* (2016), os resíduos foram segregados por meio de uma peneira de madeira (Fotografia 6), retangular, com dimensões de 0,80 m x 1,00 m, revestida, em sua base, por uma malha de aço carbono, com espaçamento de 25,4 mm (1”), a fim de separar os resíduos de diferentes granulometrias. Os materiais que atravessaram a malha da peneira, por apresentarem granulometria menor do que 25,4 mm, foram classificados como finos, enquanto que o volume retido foi disposto sobre uma lona plástica colocada sobre o solo e submetido a uma segregação manual (Fotografia 6).

**Fotografia 6**– Separação do material fino na peneira de 25,4 mm (1”).



Fonte: Autor, 2018.

Na segunda etapa, os resíduos retidos na peneira foram dispostos sobre uma lona plástica colocada no solo, em seguida, triados manualmente e classificados em 10 subcategorias, a saber: plástico, papel/papelão, vidro, metais, orgânico, madeira/coco, sanitários, têxteis, finos e outros resíduos, conforme a metodologia descrita por Firmo (2013) e Holanda *et al.* (2016) . A classificação “Outros Resíduos” foi dada aos materiais não identificáveis tacto/visualmente. A classificação dos materiais triados são apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7** – Categorias de resíduos considerados no processo de triagem.

<b>Tipologia</b>
Plástico
Papel/papelão
Vidro
Metal
Orgânico
Madeira/Coco
Têxtil
Sanitários
Borracha/Couro
Finos
Outros Resíduos

Fonte: Adaptado de Firmo, 2013.

Com a medição dos pesos correspondentes a cada um dos materiais apresentados na Tabela 7 e o peso total da amostra foi possível determinar assim o percentual gravimétrico de cada elemento analisado.

Após a gravimetria, os materiais granulares passantes na peneira de 25,4 mm foram armazenados e levados para laboratório, assim como os materiais fibrosos (plásticos, madeira e tecidos), para uso nos ensaios de caracterização e resistência ao cisalhamento.

### 3.4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Após todo o processo de coleta, transporte e estocagem das amostras, as mesmas foram levadas a laboratório para inicialmente serem caracterizadas e na sequência avaliadas quanto a resistência ao cisalhamento.

#### 3.4.1 Preparação da amostra de RSU

A preparação e separação das amostras coletadas em laboratório, a qual seguiu a metodologia utilizada na literatura e na Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA – EMPFEHLUNGEN E 1-7 (DGGT, 1994).

O material coletado da célula experimental da Muribeca foi trazido ao laboratório, e inicialmente colocado para secar, após a secagem o material passou por um processo de triagem, nesta triagem foi realizada a separação do material fino e das fibras (plástico, madeira e tecidos) os quais foram utilizados nos ensaios seguintes.

A amostra após secagem foi colocada em uma bandeja, e com o auxílio de outras duas bandejas e uma peneira de malha #10 (2,0 mm) executou-se a triagem dos materiais. Inicialmente o material bruto da bandeja de número 11, como mostrada na Fotografia 7, foi gradualmente sendo peneirado, o material granular passante foi separado e armazenado. Quanto ao material retido, o mesmo foi inicialmente limpo para retirar os grãos que ficaram aderidos, isto foi feito para garantir que amostra em fibras na pesagem seja de apenas material fibroso. Na sequência foram selecionados os materiais fibrosos (plástico, tecidos e madeira) e os demais foram descartados, pois estes não eram materiais de estudo desta pesquisa.

**Fotografia 7** – Preparação do material para realização dos ensaios.



Fonte: Autor, 2019.

Após selecionados, os materiais fibrosos foram recortados para ajustar as suas dimensões tendo em vista as dimensões da célula do ensaio de cisalhamento direto convencional: 101,6 x 101,6 x 45 mm.

Com relação a adequação do comprimento das fibras com a caixa foi adotada procedimento similar ao realizado por Motta (2011) e Corrêa (2013). Segundo Corrêa (2013) este procedimento foi necessário para que o comprimento da amostra fosse suficiente para que o material granular o segurasse com seu peso próprio, pois o plástico é extremamente volumoso, dificultando sua colocação na caixa. A princípio, a relação do comprimento do plástico com a caixa era de 1/10, porém devido a dificuldade de colocação do mesmo na caixa com o material granular, adotou-se para

amostra de plástico um comprimento de 5 cm e largura de 2 cm, com uma relação de 1/2.

Na Fotografia 8 é apresentada a amostra de fibras antes e após a preparação para utilização nos ensaios de cisalhamento direto e compactação.

**Fotografia 8** – Amostra de fibras antes e depois da preparação.



Fonte: Autor, 2019.

### **3.4.2 Ensaios de caracterização do material granular**

Quanto ao processo de caracterização do material granular coletado, o mesmo foi realizado seguindo os procedimentos normativos da literatura técnica. Na sequência estão listados os ensaios e suas correspondentes normas utilizados nesta pesquisa para caracterização do material granular:

- Preparação de amostras (ABNT NBR-6457:2016a);
- Análise granulométrica (ABNT NBR-7181:2018);
- Peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ ) - método do picnômetro (ABNT NBR-6458:2017);

### **3.4.3 Sólidos voláteis**

Parte da amostra bruta coletada da célula experimental após o processo gravimétrico foi selecionada para realização dos ensaios de sólidos voláteis em

laboratório, e neste item é descrito o procedimento utilizado para realização deste ensaio.

Para determinação do teor de sólidos voláteis, tomou-se como base a metodologia desenvolvida por WHO (1978), a qual consistiu em pesar uma fração de, aproximadamente, 2,5 g de amostra seca e triturada de resíduos, obtendo-se assim, o M1, dentro de uma cápsula de porcelana, e levou-se, em seguida, a um forno Mufla, EDG 3000, submetendo-a a uma temperatura de 550°C, durante um período de 2 h e 30 min. Após este período de tempo, a cápsula com a amostra de resíduos foi retirado da mufla e pesado, obtendo-se assim, o M2, que é a massa final, após a calcinação. A Equação 6 expressa o cálculo do teor de sólidos voláteis a partir do procedimento descrito neste item da pesquisa.

$$SV = \left( \frac{M1-M2}{M1} \right) * 100 \quad (\text{Equação 6})$$

Sendo:

SV – Teor de sólidos voláteis em %;

M1 – massa da amostra seca em gramas;

M2 – massa da amostra calcinada em gramas.

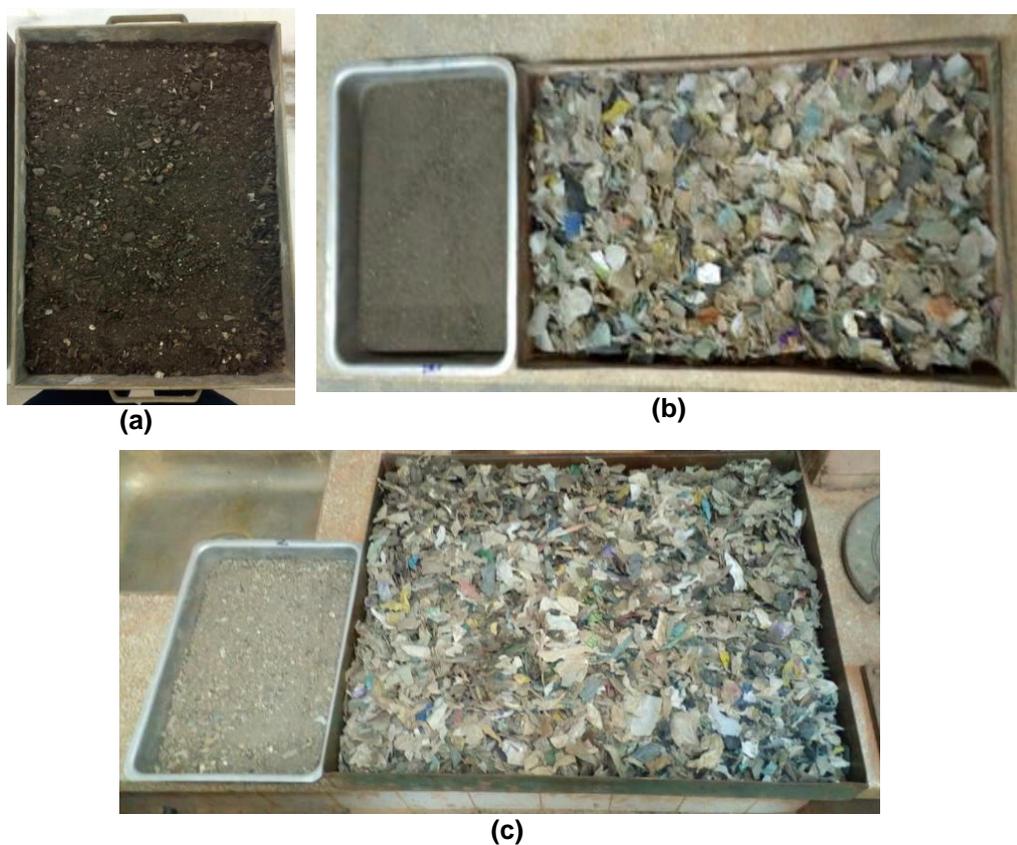
#### **3.4.4 Compactação**

A realização dos ensaios de compactação seguiu o procedimento estabelecido pela NBR 7182 (ABNT, 2016b). Foram determinados 5 pontos para cada curva de compactação fazendo-se reuso da amostra de resíduos. Foi utilizado o cilindro padrão (dimensões: 10,16 cm de diâmetro e 12,73 mm de altura) do ensaio de compactação, com energia normal, ensaio proctor normal com 26 golpes para cada uma das três camadas compactadas, como estabelecido por norma.

Foram utilizadas as amostras de resíduos com pré-tratamento mecânico de redução dos componentes dos resíduos descrito na preparação da amostra (Item 3.4.1). Para o procedimento de secagem, o material foi depositado em bandejas para secar ao ar durante aproximadamente 10 dias.

Foram realizados ensaios de compactação para os três percentuais amostrais: o primeiro foi apenas com o material granular; o segundo foi considerando 50% do percentual gravimétrico das fibras, o que seria cerca de 16,17% do peso total da amostra; e o último para 100% do percentual gravimétrico de fibras, cerca de 32,33% do peso (Fotografia 9). O peso total de cada amostra foi de 2.500 gramas.

**Fotografia 9** – Percentuais de amostras utilizadas na compactação: (a) amostra de 2.500 g de material granular; (b) amostra com 2.095,75 g de material granular e 404,25 g de fibras; e (c) amostra com 1.691,75 g de material granular e 808,25 g de fibras.



Fonte: Autor, 2019.

### 3.4.5 Ensaios de Cisalhamento direto

Os últimos ensaios realizados foram os de cisalhamento direto em célula convencional, nos subitens seguintes são descritos os procedimentos de realização do ensaio.

#### 3.4.5.1 Definição do peso do corpo de prova

Para definição do peso dos corpos de prova, foi necessário inicialmente adotar um valor para o peso específico, como o resíduo coletado possui cerca de 10 anos de

decomposição, o mesmo é considerado como resíduo velho. Segundo Borgatto (2006) e Motta (2011) densidades na faixa de 11,00 kN/m<sup>3</sup> são convencionais para aterros de RSU antigos, sendo este o valor adotado na pesquisa. Com o peso específico e as dimensões da caixa cisalhante, a qual possui seção quadrada, com 101,6 mm e 45 mm de altura, foi então possível calcular o peso do corpo de prova, o qual foi de 512,98 g.

Com o peso do corpo de prova definido, a etapa seguinte consistiu em determinar os pesos das misturas entre material granular (passante na #10) e das fibras, para os três percentuais amostrais utilizados, os pesos baseiam-se no percentual gravimétrico obtido da célula experimental da Muribeca. Os percentuais de fibras utilizados nos ensaios cisalhamento direto foram baseados nos resultados da análise gravimétrica, os três percentuais das misturas adotados foram: 100% de matriz fina passante na peneira #10; 16,17% de fibras + 83,83% de matriz fina passante na peneira #10 e 32,33% de fibras + 67,67% de matriz fina passante na peneira #10. A justificativa para o uso dos três percentuais foi de avaliar a influência da variação do percentual de fibras o comportamento da resistência ao cisalhamento.

Na Tabela 8 dispõe da configuração em peso e em percentual das amostras utilizadas no cisalhamento direto.

**Tabela 8** – Configuração dos percentuais de amostras moldadas para o ensaio de cisalhamento direto.

Descrição	Material passante na #10		Fibras	
	Percentual (%)	Peso (g)	Percentual (%)	Peso (g)
Matriz Básica	100	512,98	0	0
Matriz Composta 1	83,83	430,05	16,17	82,93
Matriz Composta 2	67,67	347,12	32,33	165,86

Fonte: Autor, 2019.

#### 3.4.5.2 Umidade da amostra

Com os pesos das misturas dos corpos de prova determinados e separados, a etapa seguinte consistiu em determinar a umidade a qual as amostras seriam moldadas. Como os resíduos sólidos em geral possuem altos valores de umidade, como descrito em diversas pesquisas, tais quais: Jahanfar *et al.* (2017) e Yamawaki *et al.* (2017), valores na ordem de 30%.

Neste trabalho o valor de umidade adotado para as amostras foi de 23%, valor correspondente a umidade obtida na amostra coletada em campo na célula experimental da Muribeca. Embora diversas pesquisas optem por adotar o valor da umidade ótima, neste caso optou-se por utilizar a umidade de campo, com o intuito de simular as condições mais próximas com a realidade da célula experimental.

#### 3.4.5.3 *Moldagem do corpo de prova*

Com a determinação dos percentuais das amostras dos corpos de prova e sua correspondente umidade (23%), o procedimento seguinte foi de dar início nas moldagens dos corpos de prova. Inicialmente foi umedecida a amostra (Fotografia 10), vale destacar que para os 3 percentuais de misturas utilizados, foi padronizado o umedecimento apenas no material granular (passante na #10), para que não ocorresse perda de umidade.

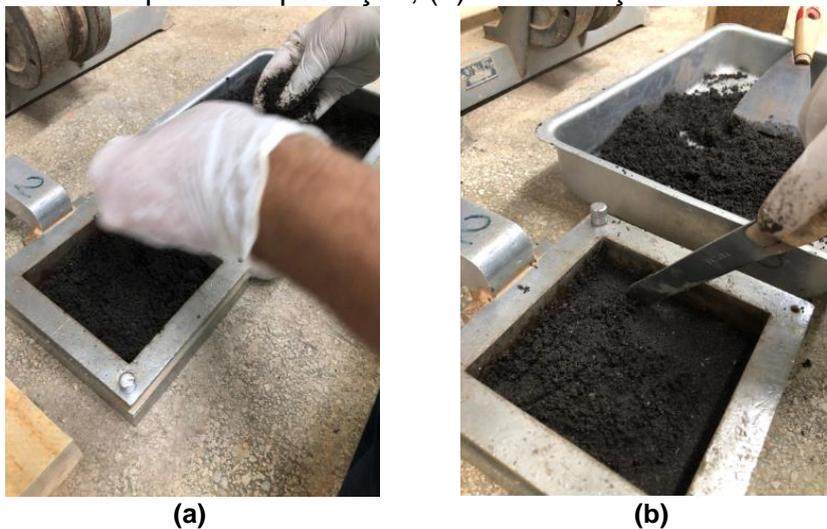
**Fotografia 10** – Umedecimento da amostra.



Fonte: Autor, 2019.

Logo em seguida, a amostra de material granular umedecida foi misturada com as fibras, com exceção dos corpos de prova da Matriz Básica, os quais não possuíam fibras. Após a mistura dos materiais a amostra já misturada foi sendo colocada gradualmente na caixa de cisalhamento, e para cada camada inserida foi realizada a compactação manual com auxílio de um bloco de madeira de dimensões compatíveis com a caixa de cisalhamento (Fotografia 11.a). Na transição entre camadas compactadas foi realizado um processo de escarificação, para que as camadas aderissem melhor uma na outra e não houvesse formação de superfícies preferenciais de ruptura (Fotografia 11.b).

**Fotografia 11** – Moldagem do corpo de prova – (a) colocação da amostra na caixa de cisalhamento para compactação; (b) escarificação entre as camadas.



Fonte: Autor, 2019.

O processo foi sendo repetido até que a amostra fosse totalmente compactada na caixa, foi padronizada o processo de compactação em 6 (seis) camadas para todos os corpos de prova.

Nos casos em que havia a presença de fibras as moldagens tiveram que ter auxílio de uma prensa uniaxial, para que todo material fosse completamente compactado na caixa. A prensa foi utilizada nestes casos devido à dificuldade de se conseguir moldar os corpos de prova com teores de fibra de 16,17% e 32,33% (Fotografia 12).

**Fotografia 12** – Prensa uniaxial sendo utilizada na moldagem dos corpos de prova com presença de fibras.



Fonte: Autor, 2019.

O processo de moldagem com auxílio da prensa uniaxial foi maior à medida que amostra possuía maior teor de fibras. O tempo médio de moldagem para as amostras com 16,17% de fibras foi de cerca de 2 horas por corpo de prova, para as amostras com percentual 32,33% de fibras, o tempo foi de cerca de 3 horas. Os tempos de moldagem foram altos pois as amostras demandaram muito tempo sob a aplicação de carga na prensa uniaxial.

Nas Fotografia 13 são apresentadas vistas gerais das amostras dos três percentuais utilizados, antes dos procedimentos de mistura e moldagem.

**Fotografia 13** – Processo de moldagem dos corpos de prova de resíduos sólidos (a) 100% matriz fina; (b) 83,83% matriz fina + 16,17% Fibras e (c) 67,67% matriz fina + 32,33% Fibras.



Fonte: Autor, 2019.

#### 3.4.5.4 *Controle da densidade final do corpo de prova*

Após o fim da moldagem de cada o corpo de prova, foi realizada a aferição da altura final do equipamento já com sua tampa. Esta medição foi efetuada com o auxílio de um paquímetro, foram feitas aferições nos quatro lados da caixa de cisalhamento, adotando como valor da altura final o valor médio dos quatro pontos (Fotografia 14).

**Fotografia 14** – Aferição da altura final do corpo de prova para controle da densidade final.



Fonte: Autor, 2019.

Este procedimento de aferição da altura foi adotado como forma de controle da densidade das amostras. Tendo em vista que não foi possível garantir que ao final de cada moldagem as amostras apresentassem mesmo valor de densidade.

O controle foi feito calculando-se a densidade em cada amostra, de forma que a área da seção da caixa quadrada tem valor fixo (101,6x101,6 mm) e o peso da amostra também (512,98 g), sendo a única variável a altura final do corpo de prova. A densidade de cada amostra calculada deveria estar dentro de uma faixa de variação fixada, que foi estabelecida por  $11,00 \pm 1,00 \text{ kN/m}^3$ , sendo este o peso específico estabelecido para as amostras do presente trabalho. Vale destacar que só foram ensaiadas amostras que atenderam este critério.

#### 3.4.5.5 *Tipos de ensaios e características*

Ao final o corpo de prova moldado foi levado para a prensa de cisalhamento. Os ensaios foram executados em uma prensa de cisalhamento direto produzida pela Ronald Top S/A, com sistema de carga confinante através de pesos em pendural. Nas leituras dos deslocamentos verticais e horizontais foram utilizados extensômetros com sensibilidade de 0,01 mm. A força horizontal foi determinada através de um anel dinamométrico com capacidade de 500 kgf. (Fotografia 15).

**Fotografia 15** – Prensa de cisalhamento direto com sistema de carga confinante através de pesos em pendural.



Fonte: Autor, 2019.

Os ensaios foram realizados nas condições com e sem inundação. Nos ensaios inundados, os corpos de prova eram inundados previamente através do preenchimento com água da “piscina” que circunda a caixa de cisalhamento no ensaio (Fotografia 15), o tempo de foi padronizado em duas horas para cada corpo e prova. Nos ensaios na umidade natural, não era realizada esta etapa. Quanto aos procedimentos gerais, seguiram-se basicamente as recomendações de Head (1980, *apud* Motta, 2011).

Os ensaios foram realizados para seis tensões normais: 25, 50, 100, 150, 200 e 250 kPa as quais foram aplicadas e mantidas até a estabilização dos deslocamentos. O cisalhamento dos corpos de prova para cada tensão normal aplicada foi realizado com velocidade constante de 0,483 mm/min. Adotou-se como critério de ruptura os valores de pico da tensão cisalhante ou os valores máximos, quando a curva tensão-deslocamento horizontal não indicava valores de pico bem definidos.

A estabilização dos corpos de prova no adensamento se deu para o tempo de 45 minutos para as amostras com maiores proporções de fibras, por isto, esse foi o tempo de adensamento padronizado para todos os corpos de prova, mesmo tempo utilizado por Corrêa (2013) nos ensaios de sua pesquisa. Após o adensamento se

executou o cisalhamento direto, o ensaio foi realizado por deformação controlada, e os corpos de prova foram rompidos até a deformação de 18%.

Vale destacar que os ensaios na condição de inundada é bastante comum em análises de solos não-saturados (solos expansivos e colapsíveis). No caso de amostras de resíduos com fibras esses ensaios não são comuns, a justificativa para realizá-los nesta pesquisa foi de compreender o efeito da inundação nos parâmetros geotécnicos de amostras de RSU com elementos fibrosos.

Foram efetuados um total de 36 (trinta e seis) ensaios cisalhamento direto nas condições com e sem inundação.

### 3.5 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Este item descreve o procedimento executado para a realização da avaliação da estabilidade de taludes de aterros de RSU. Vale destacar que não foi abordada a relação do efeito do biogás na estabilidade de taludes de aterros de RSU, devido às limitações dos *softwares* utilizados, assim como a dificuldade de se avaliar a pressão gerada pelos gases.

#### 3.5.1 Seleção do Software

Nas análises de estabilidade de taludes identificadas na literatura durante a etapa de pesquisa bibliográfica, verificou-se o uso frequente de *softwares* especializados nas modelagens de estabilidade (Slide, Slope/W, GGU-Stability e Geo5). Entre os principais *softwares* relacionados à modelagem ambiental identificados, o conjunto de programas desenvolvidos pela: GeoSlope e GGU-Stability, o segundo destacou-se por incorporar em suas análises o efeito de tração nas fibras descrito por Kölsch (1993) e Calle (2007).

Entre as ferramentas no pacote da GeoSlope International, o SLOPE/W é o produto utilizado para calcular o fator de segurança através de diversas metodologias que utilizam análises de equilíbrio limite, podendo modelar tipos heterogêneos de materiais com complexa geometria, considerando diferentes superfícies de deslizamento e poro-pressão. O *software* utiliza o critério de avaliação o proposto por Mohr-Coulomb para o comportamento da resistência ao cisalhamento. O programa é dotado de cinco métodos de análises na sua versão para estudante, dois deles

efetua avaliações para superfícies de ruptura circular: Fellenius e Bishop, e três para superfícies quaisquer: Janbu, Spencer e Morgenstern-Price.

O GGU-Stability é um *software* computacional da GGU-Software para a solução de problemas de estabilidade de taludes de uma análise bidimensional, utilizando-se o método de equilíbrio limite. O *software* também utiliza o critério de avaliação o proposto por Mohr-Coulomb para o comportamento da resistência ao cisalhamento, o cálculo do fator de segurança de um determinado deslizamento é feito através do método das fatias. O programa admite condições de heterogeneidade do solo, anisotropia dos parâmetros de resistência, acréscimo de poro-pressão devido ao carregamento, águas superficiais e subterrâneas, terremotos, sobrecargas e tirantes, além de considerar o efeito das fibras nos resíduos, descritos por Kölsch (1993). Os métodos de análise disponíveis são: método de Bishop Modificado, aplicado a superfícies de ruptura de forma circular; e método de Janbu Simplificado, aplicado a superfícies de ruptura de forma geral.

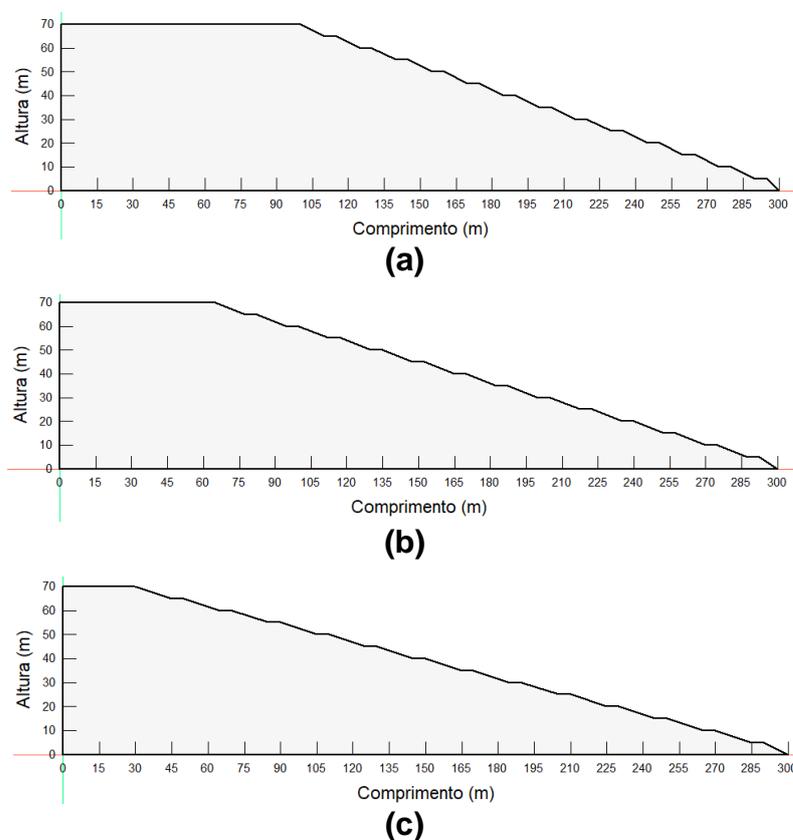
O método utilizado para a análise de estabilidade neste estudo foi o de Bishop Simplificado para ambos os *softwares*.

### **3.5.2 Geometria utilizada**

Quanto a geometria do talude, como a célula experimental da Muribeca possui dimensões gerais pequenas quando comparada a aterros convencionais, foi decidido por trabalhar com geometrias mais convencionais encontradas na prática. Sendo assim, não foram efetuadas análises de estabilidade de taludes para a célula experimental.

Adotou-se para as análises de estabilidade dimensões de aterros de médio porte, tendo a célula cerca de 70 m de altura, e para essa altura convencionou-se a disposição de resíduos em três geometria convencionais de aterros de RSU: 1V:2H, 1V:2.5H e 1V:3H (Figura 11). O intuito da utilização de diferentes geometrias hipotéticas foi de obter um comparativo do FS à medida que a inclinação do talude era variada.

**Figura 11** – Geometria utilizadas na análise de estabilidade de taludes: (a) 1V:2H; (b) 1V:2.5H e (c) 1V:3H.



Fonte: Autor, 2019.

### 3.5.3 Parâmetros utilizados

Os parâmetros geotécnicos que foram necessários para as análises de estabilidade do taludes, utilizando o GeoSlope e GGU-Stability, foram: ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), coesão ( $c$ ) e peso específico ( $\gamma$ ), os dois primeiros ( $\phi$  e  $c$ ) foram determinados por meio do ensaio de cisalhamento direto, e o último ( $\gamma$ ) foi adotado para padronizar o ensaio de cisalhamento direto no item 3.4.5.1.

Para adicionar o efeito dos materiais fibrosos (plásticos, madeira, tecidos) realizada apenas no GGU-Stability, os parâmetros necessários para estas análises foram: fator de transmissão das fibras ( $\alpha$ ), ângulo de tração ( $\zeta$ ) e coesão devido a tração ( $Z$ ).

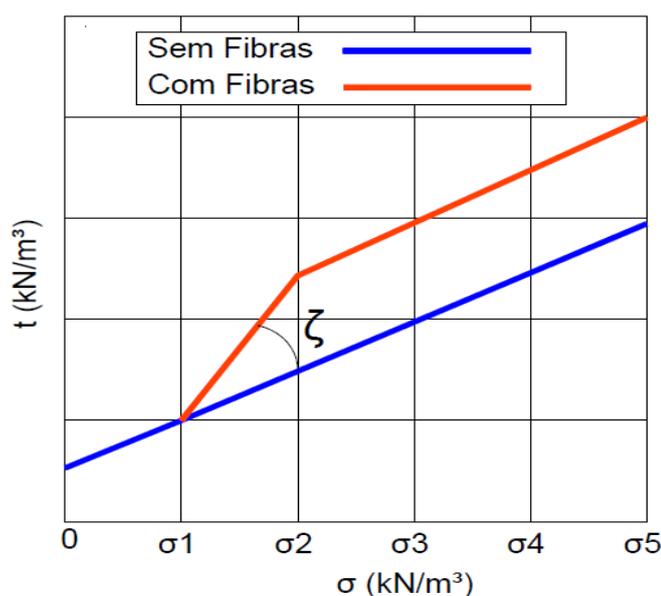
O fator de transmissão ( $\alpha$ ) em geral varia de 0,6 a 0,95 para ângulos de atrito ( $\phi$ ) entre 15 e 35°, sendo esta variação dependente do ângulo de atrito do material, como apresentado no item 2.4.2.3 desta pesquisa. Sendo assim, a determinação deste

parâmetro se deu por interpolação, a interpolação foi realizada utilizando o ângulo de atrito encontrado no ensaio de cisalhamento direto.

Para o ângulo de tração ( $\zeta$ ), sua determinação se deu a partir do encontro das envoltórias de Mohr-Coulomb dos resultados do ensaio de cisalhamento direto. No item 2.3.1 foi abordada a forma que Kölsch (1993, 1995) utilizou para obter este ângulo, esta pesquisa utilizou tal metodologia para determinação deste ângulo.

Inicialmente foram selecionadas as 3 equações das envoltórias de cisalhamento encontradas por meio do *software* Excel para os 3 percentuais amostrais utilizados. A equação com amostra sem fibras (Matriz Básica) é a referência para o cálculo do ângulo de tração ( $\zeta$ ), com esta equação é desenvolvida a envoltória a partir das cinco tensões desenvolvidas no ensaio de cisalhamento ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$  e  $\sigma_5$ ). As envoltórias para com fibras foram desenvolvidas de forma similar, a diferença é que estas envoltórias possuem ponto inicial no  $\sigma_1$ , pois é justamente nesse ponto que surge o efeito bilinearidade descrito por Kölsch (1993, 1995). O ângulo de tração é descrito como a inclinação formada entre a envoltória sem fibras e a amostra com fibras, na Figura 12 é apresentada a visualização gráfica desta interpretação.

**Figura 12** – Modelo de cálculo do ângulo de tração segundo o comportamento bilinear de Kölsch (1993, 1995, 1996).



Fonte: Autor, 2019.

Vale destacar que a tensão inicial  $\sigma_1$ , é a menor tensão normal utilizada nos ensaios de cisalhamento direto ou de tração, que foi assim descrita por Kölsch (1993, 1995).

O terceiro e último parâmetro que foi utilizado para descrever o efeito da tração, foi a coesão devido a tração ( $Z$ ). Esse parâmetro foi abordado no item 2.4.2.3 deste trabalho, a forma de calcular a tração foi descrita por Calle (2007), como apresentada nas Equações 7 e 8.

$$Z = \sigma_z * \tan\zeta \quad \text{para } [\sigma_v < \sigma_{cri}] \quad \text{(Equação 7)}$$

$$Z = Z_{max} \quad \text{para } [\sigma_v > \sigma_{cri}] \quad \text{(Equação 8)}$$

Onde:

$Z$  – coesão de tração;

$\sigma_v$  – tensão normal de adensamento do ensaio de cisalhamento direto;

$\sigma_{cri}$  – tensão normal de ruptura do ensaio de cisalhamento direto;

$\sigma_z$  – tensão vertical do aterro, a qual é expressa por:  $\sigma_z = \text{Hat} * \gamma_{at}$ , sendo  $\text{Hat}$ =altura do aterro e  $\gamma_{at}$  o peso específico do aterro

$\zeta$  – ângulo de tração das fibras;

$Z_{max}$  – máxima diferença entre os pontos de tensão de ruptura das curvas de tensão x deformação do ensaio de cisalhamento, das amostras com fibras e sem fibras (Ver Figura 2.5);

### 3.5.4 Nível piezométrico

Quanto a avaliação do nível piezométrico, sabe-se que ele está diretamente relacionado a água que percolada da camada de cobertura do aterro e do lixiviado produzido durante o processo de biodegradação da matéria orgânica. Tal elemento influencia fortemente no comportamento mecânico do aterro, e principalmente na sua estabilidade de talude.

Afim de avaliar os efeitos deste parâmetro foram considerados três níveis piezométricos, sendo eles: nível 0, sem a presença de lixiviado uma condição de

drenagem perfeita; com um nível 1/3 da altura total do aterro, considerando essa um condição de drenagem eficiente; e o último nível que foi avaliado foi a 2/3 da altura do aterro, sendo considerada uma condição de obstrução da drenagem.

### 3.5.5 Tipos de análises

As análises de estabilidade de taludes realizadas nesta pesquisa foram executadas para duas situações: sem o efeito devido a tração das fibras e incorporando o efeito de tração das fibras. O intuito aqui foi além de avaliar a estabilidade na condição convencional (sem efeito de tração), verificar também na condição que os parâmetros de tração são utilizados, para assim avaliar quanto estes parâmetros podem influenciar no valor do FS.

## 3.6 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

As análises estatísticas desenvolvidas foram realizadas utilizando o método de análise de componentes principais (PCA), método de projeção que ajuda a visualização de toda a informação contida em uma tabela de dados. Com a PCA também é possível detectar padrões entre as amostras (agrupamentos) e finalmente quantificar a quantidade de informação.

Segundo Pereira (2004, *apud* MARIANO, 2008), os principais objetivos da PCA podem ser resumidos em: redução de dimensionalidade; determinação de combinações lineares de variáveis; seleção de fatores, isto é, escolha das variáveis mais úteis; visualização de dados multivariados. Identificação de variáveis ocultas.

A PCA neste trabalho foi implementada utilizando o *software Statistica*, que possui um conjunto de *software* de análises estatístico que provê de um conjunto de ferramentas para análise, gestão e visualização de bases de dados e data mining. A implementação da análise via PCA tem como objetivo verificar a correlação influência entre o FS da estabilidade de taludes hipotéticos e os parâmetros: geometria, NA, coesão, ângulo de atrito e ângulo de tração, para os três percentuais amostrais estudados.

A determinação das PCs (eixos do plano cartesiano da análise PCA) desenvolvida por Hotteling (1933, *apud* REIS, 1997) envolve duas etapas: translação dos dados para a origem e rotação em torno da origem.

Seja a matriz  $X$  do tipo  $N \times M$ , onde  $N$  corresponde aos objetos (amostras) e  $M$  representa as variáveis (propriedades) aleatórias dos objetos. No pré-processamento dos dados antes da extração das PCs, onde centrar os dados na média (translação) e o autoescalamento são os mais comuns.

Centrar os dados na média assegura que variável tem média zero (centroide, centro de massa) (subtrai-se a média de coluna de cada valor dessa coluna). O autoescalamento dos dados altera suas variâncias e, então o seu peso estatístico. O autoescalamento assegura que cada variável tem variância unitária. Esse escalonamento é quase obrigatório para variáveis com unidades diferentes. O autoescalamento corresponde a dividir cada variável pelo seu desvio padrão. Se as variáveis são autoescaladas, então os eixos das PCs são os autovetores da matriz de correlação.

A matriz de correlação é dada por  $CORR = (1/(n-1)) * (X^T X)$  em seguida a matriz é diagonalizada, onde o primeiro autovetor correspondendo ao maior autovalor é por definição, a direção no espaço definido pela coluna de  $X$  que descreve a máxima quantidade de informação. O segundo autovetor é ortogonal ao primeiro e descreve a quantidade máxima de variância residual.

Os eixos das PC são conhecidos como variáveis latentes. As direções dessas variáveis são especificadas por  $p$  vetores (loadings) e a localização dos dados (scores) por vetores  $t$ . Pesos (loadings) descrevem a estrutura de dados em termos de correlação entre variáveis. Cada variável tem um loading em cada PC, refletindo quanto a variável contribui para a PC. Em termos geométricos, o loading é o cosseno do ângulo entre a variável e a PC corrente; um pequeno ângulo (isto é, uma alta ligação entre a variável a PC) indica um alto loading (variam entre -1 e +1).

Loadings mostram como os valores dos dados variam quando se move ao longo das componentes, se uma variável possui um loading muito pequeno, independentemente de seu sinal, não deve ser utilizada para interpretação, porque a variável está mal explicada pela PC. Se a variável apresenta um loading positivo, todos as amostras com scores positivos tem valores maiores que a média para os valores daquela variável.

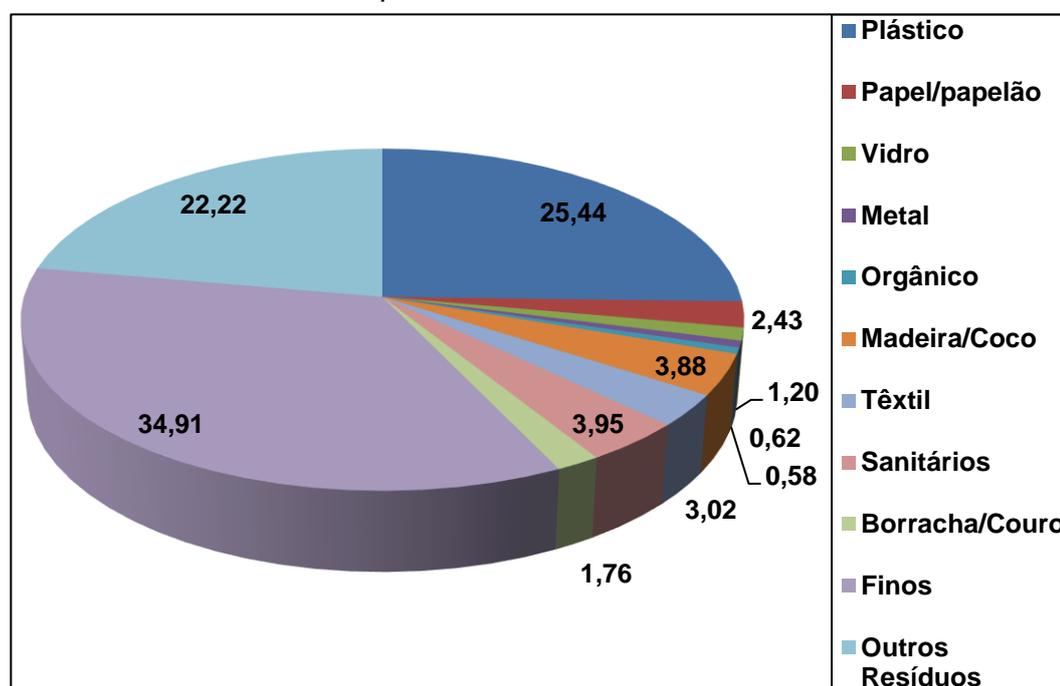
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo são apresentados os resultados e as análises da pesquisa. Serão apresentados os resultados da caracterização gravimétrica; do teor de sólidos voláteis, da umidade; e da caracterização física do material fino. Também serão apresentados os resultados dos ensaios de compactação e cisalhamento direto convencional, nas condições com e sem inundação. Ao fim, estão dispostos os resultados das análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU.

### 4.1 ANÁLISE GRAVIMÉTRICA

No Gráfico 4 são apresentados os resultados da caracterização gravimétrica realizada em novembro de 2018, 10 anos após a finalização da célula experimental do Aterro da Muribeca, Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco.

**Gráfico 4** – Caracterização Gravimétrica da amostra de resíduos extraídos da célula experimental da Muribeca.



Fonte: Autor, 2019.

Observa-se que a composição gravimétrica da célula experimental é predominante de material fino (material passante na peneira de 25,4 mm), com cerca de 34,91%, seguido por plástico com 25,44%, outros resíduos com 22,22%, sanitários com 3,95%, madeira/coco com 3,88%, têxtil com 3,02%, papel/papelão com 2,43%,

Borracha/couro com 1,76%, vidro com 1,20%, metal com 0,62% e por último material orgânico com 0,58%.

Duas importantes informações podem ser retiradas destes resultados, a primeira é relativa à matéria orgânica, a qual apresentou um percentual inferior a 1%, o que pode levar para a compreensão de que o aterro está encerrando sua atividade de biodegradação. A segunda informação importante é relativa ao percentual de plástico, que apresentou valor de 25,44%, resultado bastante elevando quando comparado aos apresentados na Tabela 1, que se referem aos percentuais gravimétricos de plástico em resíduos no mundo.

Se somados os percentuais de plástico e demais fibras (madeira/coco + têxtil), o material presente na célula experimental possui cerca de 32,33% de matérias fibrosos, que são elementos de importante efeito no aumento da resistência ao cisalhamento, como descrito por Kölsch (1993, 1996) e comprovado por: Neto (2004), Fucale (2005), Motta (2011), Abreu (2014) e Borgatto *et al.* (2014).

De forma comparativa, foram coletados os dados de gravimetria da célula experimental da Muribeca no ano de seu fechamento (2008) citado por Maciel (2009), tais dados são apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9** – Comparativo do percentual gravimétrico no intervalo de 10 anos de deposição dos resíduos.

Tipologia	Composição Gravimétrica (%)	
	Gravimetria Pré-Aterro Maciel (2009)	Gravimetria após 10 anos Autor (2019)
Plástico	21,50	25,44
Papel/papelão	14,20	2,43
Vidro	0,70	1,20
Metal	1,80	0,62
Matéria orgânica	42,00	0,58
Madeira/Coco	6,00	3,88
Têxtil	4,20	3,02
Sanitários	4,30	3,95
Borracha/Couro	1,20	1,76
Finos	-	34,91
Outros Resíduos	4,10	22,22

Fonte: Autor, 2019.

Analisando comparativamente os resultados da Tabela 9, é possível constatar que o percentual de materiais fibrosos (plástico + madeira/coco + têxtil) não sofreu muita variação após os 10 anos, com a gravimetria atual apresentando valor de 32,33% e a anterior obtida anteriormente por Maciel (2009) com valor de 31,70%. Outros materiais que também não apresentaram grande oscilação de seu percentual foram: vidro, metal, sanitários e borracha, materiais que em geral demoram centenas de anos para se decompor.

Os demais materiais analisados apresentaram grandes variações de seu percentual, a matéria orgânica por exemplo, teve uma variação do percentual de iniciais 42,00% para 0,58%, essa alta redução está relacionada ao processo de biodegradação natural deste material. Esse resultado foi similar ao obtido por Gomes *et al.* (2013), os quais verificaram uma redução acentuada do percentual de matéria orgânica, nos primeiros quatro anos de um aterro de RSU, de, aproximadamente, 47%, cujo teor inicial deste componente atingiu 80% do montante de resíduos.

Os finos também apresentaram alta oscilação, partindo de um percentual inicial de 0% no fechamento da célula, para um taxa de 34,91%, esse fato decorre desde o processo de compactação do aterro, a qual recoberto por material granular (camada de cobertura) que faz com que parte desse material acabe se misturando com os resíduos da célula. Outro aspecto segundo Holanda *et al.* (2016), é que em uma célula de aterro, durante anos, resultam na desagregação dos diversos componentes sólidos existentes, levando, gradualmente, a uma redução granulométrica, e elevando, proporcionalmente, o percentual de materiais finos existentes na massa de lixo.

Os percentuais de papel/papelão e outros resíduos também apresentaram grande variação, isso pode ser explicado pela dificuldade de identificar esses resíduos quando degradados.

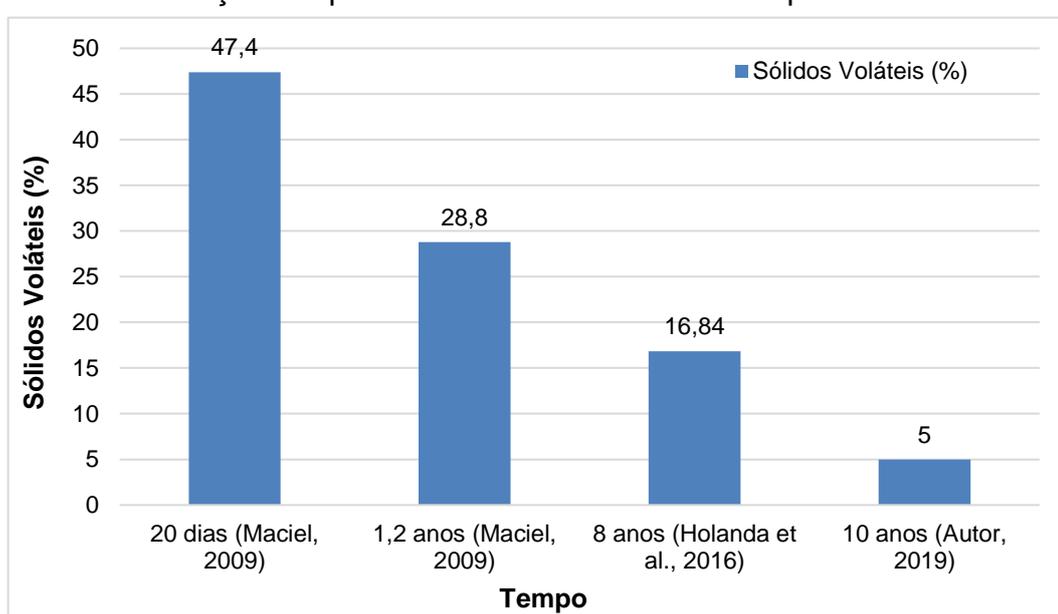
#### 4.2 TEOR DE SÓLIDOS VOLÁTEIS E UMIDADE

O teor de sólidos voláteis e a umidade de uma amostra de RSU são importantes parâmetros para a compreensão da atividade biológica e mecânica de aterro de RSU.

#### 4.2.1 Teor de sólidos voláteis

O resultado do teor de sólidos voláteis obtidos na presente pesquisa foi de 5%. Segundo Maciel (2009) resíduos com valores de sólidos voláteis muito baixos, entre 10-20%, dão sinais de bioestabilização e, conseqüentemente, crescente mineralização dos resíduos, pois é provável existir apenas plásticos e lignina, em sua composição. No Gráfico 5 é apresentada a evolução temporal dos resultados de SV obtidos na célula experimental.

**Gráfico 5** – Evolução temporal do teor de SV da célula experimental da Muribeca.



Fonte: Autor, 2019.

Maciel (2009) realizou ensaios para a determinação do percentual de SV em duas épocas, a 20 dias e 1,2 anos de deposição do resíduo, constatando valores de 47,4% e 28,8% respectivamente, valores considerados altos.

Holanda *et al.* (2016) que realizou análise do teor de sólidos voláteis desta mesma célula experimental 8 anos após do seu fechamento, obteve um percentual de SV de 16,84%. No comparativo do intervalo de 2 anos, entre o resultado desta pesquisa e o obtido por Holanda *et al.* (2016), é possível verificar que o teor de sólidos voláteis sofreu uma redução de cerca de 70,31%, comprovando assim, o acelerado processo de estabilização da atividade de biodegradação na célula experimental. O resultado do teor de sólidos voláteis evidencia que a célula se encontra em estado de estabilização de suas atividades biológicas

#### **4.2.2 Umidade**

Na análise da umidade, foi obtido um valor de 23,00% de umidade para amostra coletada na célula experimental da Muribeca no mês de novembro, mês de estiagem na região. Holanda *et al.* (2016) que também avaliou a umidade na célula experimental da Muribeca, obteve uma umidade de 70,42%, tal avaliação foi realizada no mês de junho.

Diferente de Holanda *et al.* (2016), que realizou a coleta em um período de altos índices pluviométricas, na época de coleta da amostra da presente pesquisa o período era de estiagem. Os resultados são condizentes com a série histórica de precipitação da cidade de Jabotão dos Guararapes (ver Gráfico 3).

#### **4.3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL FINO**

O material fino obtido na análise gravimétrica, aquele passante na peneira de 25,4 mm, foi caracterizado tendo em vista a sua importância geotécnica no comportamento das demais análises da pesquisa.

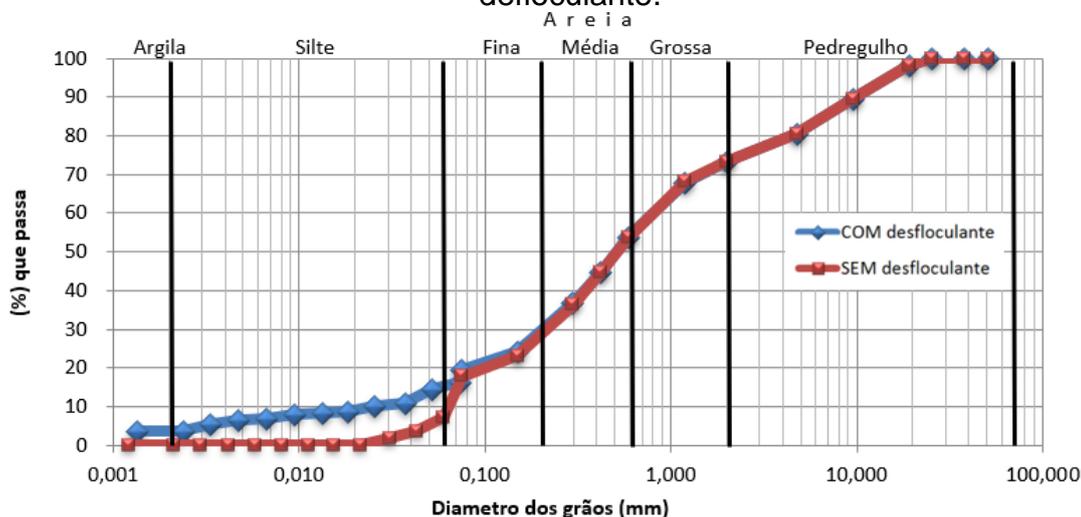
##### **4.3.1 Peso específico dos grãos**

Do ensaio de peso específico dos grãos foi obtida a densidade real dos grãos, a qual apresentou um valor de 23,87 kN/m<sup>3</sup> para o material fino coletado na célula experimental.

##### **4.3.2 Granulometria**

Quanto aos resultados da análise granulométrica, na Figura 13 é apresentada as curvas granulométricas do ensaio com e sem o uso de defloculante, para amostra do material fino passante na peneira de 25,4 mm coletado da célula experimental da Muribeca. Além disso, na Tabela 10 é também apresentado de um breve resumo dos percentuais granulométricos da amostra.

**Figura 13** – Resultado da curva granulométrica da matriz fina, com e sem o uso do defloculante.



**Tabela 10** – Resumo dos resultados de caracterização física da matriz fina.

Y (kN/m <sup>3</sup> )	Defloculante	Composição Granulométrica (%)					
		Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
23,87	Sem	26,75%	19,62%	23,64%	22,67%	7,33%	0,00%
	Com	26,75%	19,62%	23,64%	13,65%	12,35%	4,00%

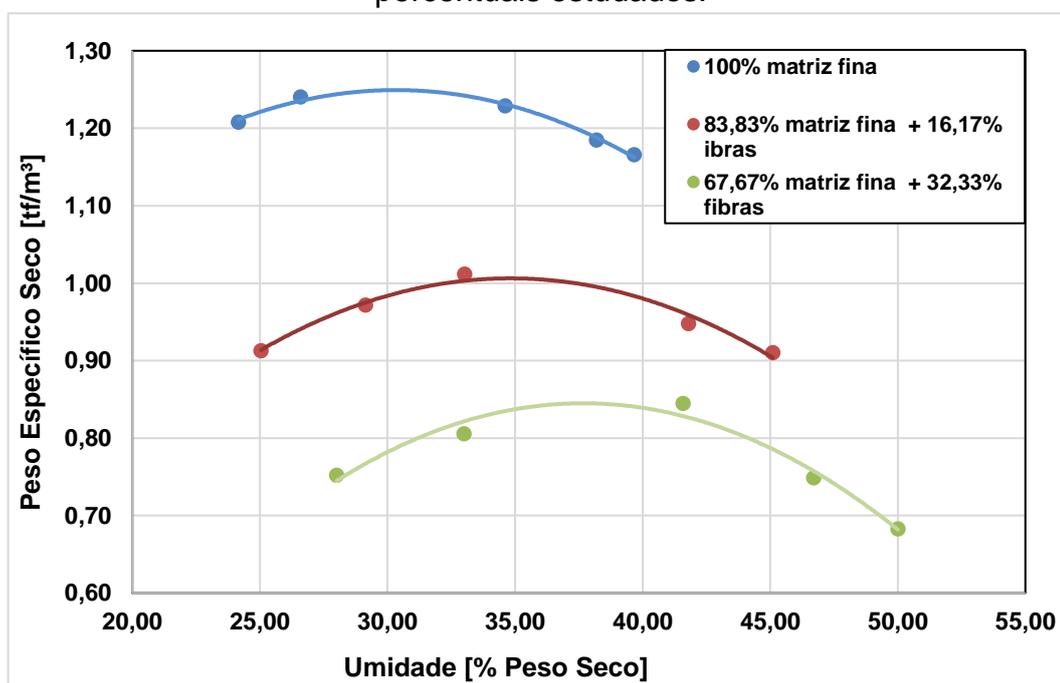
Fonte: Autor, 2019.

A matriz fina pode ser classificada como arenosa, por possuir um percentual de cerca de 65,97% de areia no ensaio sem defloculante e 56,91% no ensaio com defloculante. No comparativo dos ensaios com e sem defloculante, é possível verificar que sem o uso do defloculante não foi detectado teor de argila, e o teor de silte foi menor. Devido ao baixo teor de argila e silte não foi possível a realização de ensaios de limites e consistência na amostra.

#### 4.4 COMPACTAÇÃO

Foram realizados ensaios de compactação para os três percentuais de mistura entre material fino e fibras, os resultados destes ensaios são apresentados na sequência para os três diferentes percentuais de amostras ensaiadas (Figura 14). Na Tabela 11 um resumo dos resultados obtidos destas curvas.

**Figura 14** – Resultado das curvas de compactação das amostras com os três percentuais estudados.



Fonte: Autor, 2019.

**Tabela 11** – Resumo dos parâmetros: peso específico máximo seco e umidade ótima, obtidos das três amostras.

	Tipo	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	W (%)
Matriz Básica	100% matriz fina	12,40	30,30
Matriz Composta 1	83,83% matriz fina + 16,17% Fibras	9,70	33,80
Matriz Composta 2	67,67% matriz fina + 32,33% Fibras	8,00	37,01

Fonte: Autor, 2019.

O peso específico aparente seco dos RSU foi determinado para uma umidade em base seca. O valor para o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d \text{ máx}}$ ) obtido para a Matriz Básica de RSU foi de 12,4 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima ( $W_{ot}$ ) 30,3%. Já o peso específico aparente seco máximo obtido para a Matriz Composta 1 de RSU foi de 9,70 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima de 33,80%. E por último, a Matriz Composta 2 que obteve um valor de 8,00 kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima de 37,01%.

Foi possível observar pela análise dos resultados que as amostras de RSU com menor teor de fibras apresentaram peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{d \text{ máx}}$ ) maiores e umidade ótima ( $W_{ot}$ ) menores. À medida que se aumentou o percentual de fibras o peso específico reduziu e a umidade aumentou. Segundo Motta (2011) tal aspecto pode ser atribuído ao maior percentual de partículas finas nas amostras de RSU (0% e 16,17% de fibras), que aumenta o volume das partículas sólidas e reduz

o volume de vazios na massa de resíduos, além de contribuir para maior absorção de água.

Os resultados deste trabalho ficaram próximos aos valores de peso específico apresentados por Fucale (2005), os quais variaram na ordem de 8,6 a 12,6 kN/m<sup>3</sup> para o  $\gamma_{d,m\acute{a}x}$  da matriz composta de resíduos sólidos de aterros da Alemanha. Os resultados entre a presente pesquisa e a de Fucale (2005) se mostraram similares por ambas pesquisas utilizarem amostras de resíduos envelhecidos.

Quando comparados aos resultados de Motta (2011) já é possível verificar uma diferença entre os resultados de peso específico, pois Motta (2011) obteve valores na ordem 4,1 e 5,1 kN/m<sup>3</sup> para resíduos do Aterro de RSU da Muribeca e da CTR Igarassu. A diferença entre os resultados ocorre pelo fato de que neste trabalho foram utilizadas amostras de resíduos envelhecidos, já Motta (2011) utilizou amostras de resíduos frescos.

#### 4.5 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

O ensaio de cisalhamento direto é um dos mais convencionais da geotecnia para determinação de parâmetros de resistência em solos e RSU. Neste item serão apresentados os resultados e discussões dos ensaios de cisalhamento direto para as duas condições de ensaio (com e sem inundação), nos três diferentes percentuais amostrais já descritos.

##### 4.5.1 Cisalhamento direto – sem inundação

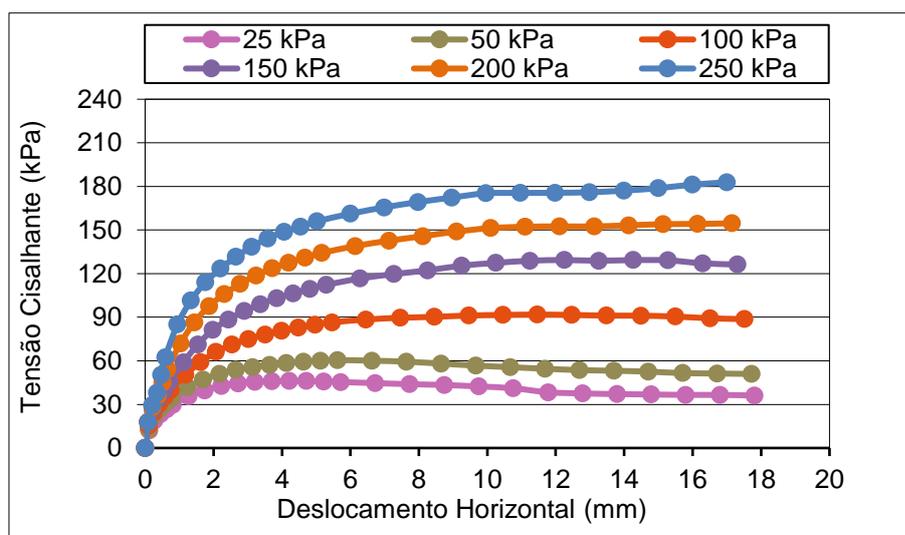
Foram realizados um total de de 3 ensaios de cisalhamento direto na condição de umidade natural, foram efetuadas rupturas de 6 (seis) corpos de prova para cada percentual. Os subitens seguintes apresentam os resultados e discussões dos ensaios para cada um dos três percentuais amostrais estudados na condição de umidade natural da amostra.

###### 4.5.1.1 100% matriz fina

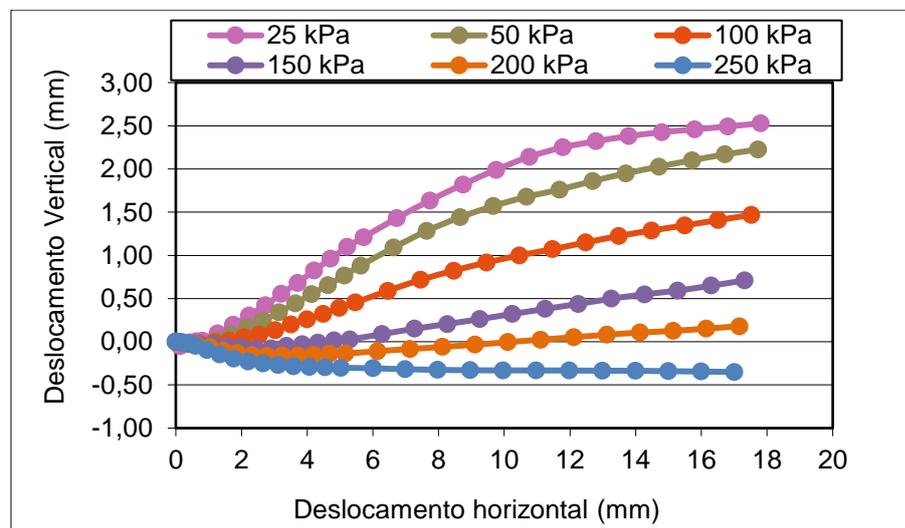
A primeira amostra avaliada, a qual é composta apenas de material granular passante na peneira #10, ou seja, sem a presença dos elementos fibrosos, foi ensaiada para a condição sem inundação, os resultados foram agrupados e

compilados no *software* Excel. Na Figura 15 são apresentados os resultados das curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, e das curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, respectivamente para a amostra sem fibras.

**Figura 15** – 100% matriz fina: ensaio sem inundação: (a) Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal. (b) Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.



(a)



(b)

Fonte: Autor, 2019.

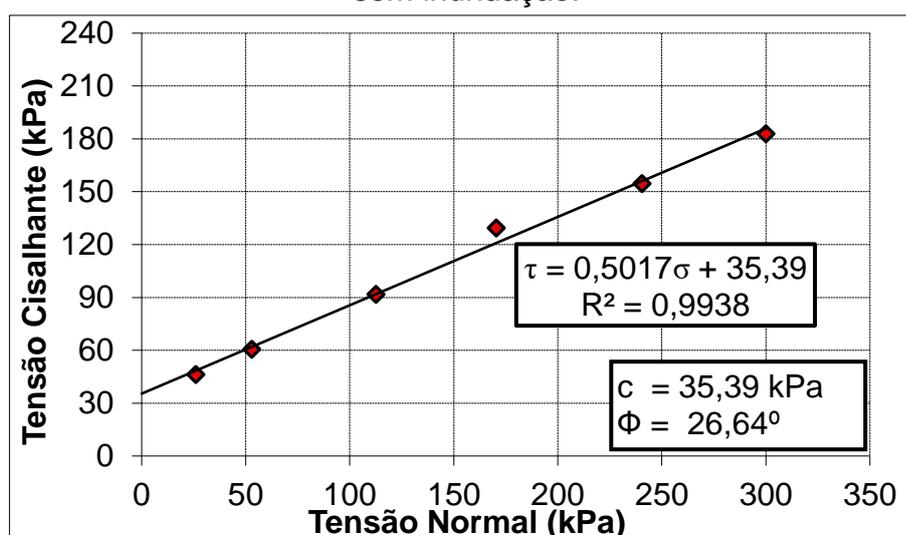
Com relação ao comportamento tensão-deslocamento (Figura 15.a) relativo aos ensaios da amostra com 0% de fibras, nota-se um comportamento de um material plástico, onde a tensão cisalhante é crescente até um determinado valor, logo em seguida atingi um patamar de escoamento e se mantém constante.

Quanto a variação de volume das amostras, foi verificado que os corpos de prova apresentaram inicialmente uma redução de volume, mas antes de atingir a resistência máxima, o volume dos corpos de prova voltaram a crescer, apresentando no momento da ruptura um volume maior que no início do carregamento, comportamento similar ao de areias compactas e argilas sobreadensadas (PINTO, 2000). Já para o nível de tensão normal de 250 kPa, a amostra apresentou um comportamento similar de areias fofas ou argilas normalmente adensadas, as quais reduzem de volume durante a ruptura.

Outro aspecto importante relativo as curvas deslocamento vertical x deslocamento horizontal, as quais apresentaram comportamento de dilatância (aumento de volume da amostra), essa dilatância foi se reduzindo com o aumento das tensões normais, tendo valor quase nulo para tensão de 200 kPa. Já para amostra ensaiada na carga de 250 kPa, ocorreu a redução de seu volume.

Com os valores das tensões cisalhantes de pico e suas correspondentes tensões normais para os seis níveis de tensão ensaiados (Figura 15.a), foi possível construir a envoltória de resistência para a amostra com 0% de fibras de RSU, o resultado é apresentado na Figura 16.

**Figura 16** – Envoltórias de resistência ao cisalhamento – 100% matriz fina: ensaio sem inundação.



Fonte: Autor, 2019.

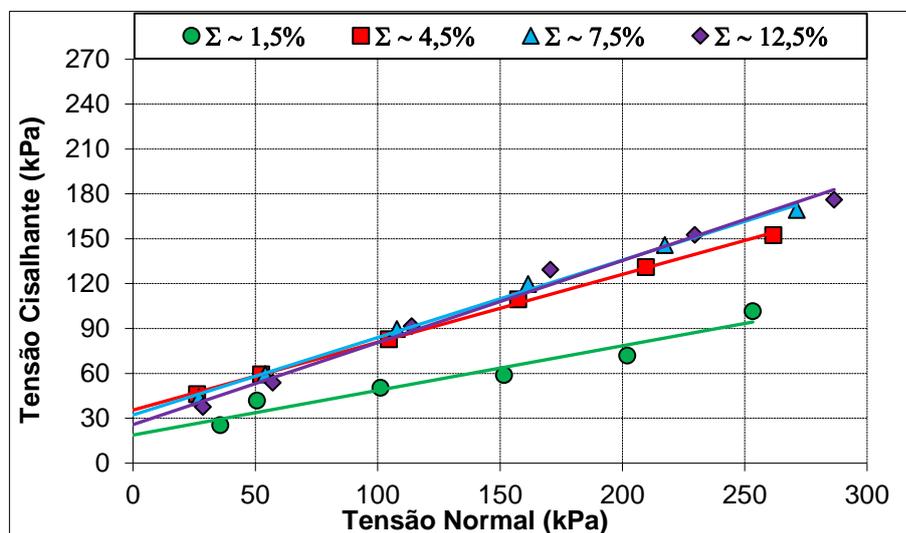
A envoltória de resistência de Mohr-Coulomb (Figura 16), apresentou valor de ajustamento  $R^2 = 0,9938$ , pode-se assim considerar que o ajustamento da reta possui

boa qualidade em relação ao comportamento dos pontos, segundo Pinheiro *et al.* (2013) valores de  $R^2$  dessa ordem são considerados ótimo ajustamento. Da envoltória foram obtidos os valores do intercepto coesivo ( $c$ ) de 35,39 kPa e do ângulo de atrito ( $\phi$ ) de  $26,64^\circ$ .

Na sequência, as envoltórias de resistência das amostras com 0% de fibras resíduos sólidos velhos para diferentes níveis (em porcentagem) de deslocamento horizontal, estão apresentadas na Figura 17. Também são apresentados os resultados das análises das variações dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) para a amostra ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal (Figura 18), e os respectivos valores são apresentados na Tabela 12.

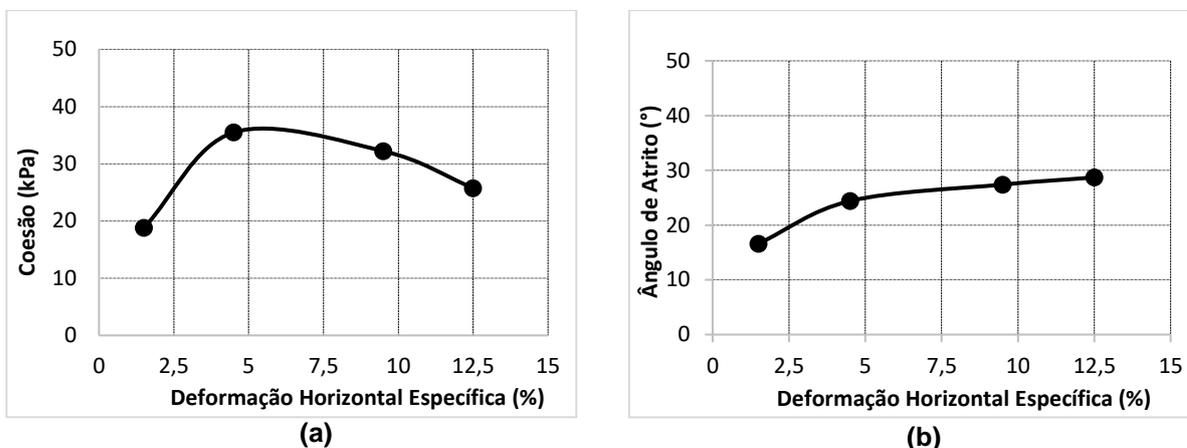
Vale destacar que se padronizou em todos os resultados de todas as amostras quatro níveis de deformações horizontais (1,5%; 4,5%; 7,5% e 12,5%), estes níveis foram escolhidos por terem sido os que apresentaram pontos em zonas de variação nas curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal.

**Figura 17** – Envoltórias de resistência ao cisalhamento, em diferentes níveis de deformação horizontal – 100% matriz fina: ensaio sem inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Figura 18** – Variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica – 100% matriz fina: ensaio sem inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Tabela 12** – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deformação horizontal – 100% matriz fina o: ensaio sem inundação.

Parâmetros	$\Sigma \sim 1,5\%$	$\Sigma \sim 4,5\%$	$\Sigma \sim 7,5\%$	$\Sigma \sim 12,5\%$
Coesão (kPa)	18,8	35,5	32,2	25,8
Ângulo de Atrito (°)	16,6	24,4	27,4	28,7

Fonte: Autor, 2019.

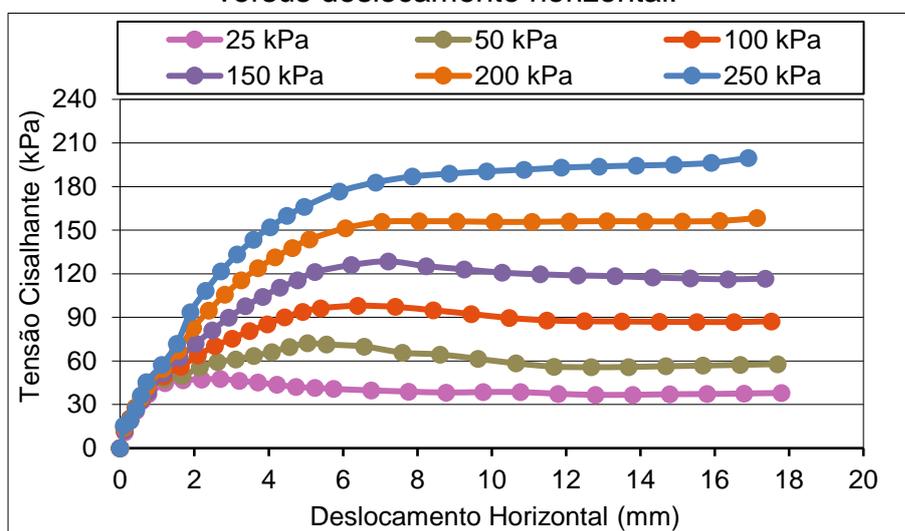
Dos resultados, foi verificado que os valores de coesão variaram de 18,8 a 35,5 kPa, sendo o valor mais elevado (35,5 kPa) correspondente a deformação horizontal de 4,5% (Figura 18.a), para os valores de deformação avaliados. Foi possível verificar também que o valor da coesão foi crescente até a deformação de 4,5% e decaiu para deformações superiores.

Já o ângulo de atrito apresentou variação entre de 16,6 a 28,7°, com valor de pico (28,7°) para a deformação de 12,5%, no caso do ângulo de atrito a variação do seu valor se deu de forma crescente à medida que o corpo de prova se deformava (Figura 18.b). Esse resultado da amostra de resíduos sem a presença de fibras no comportamento deslocamento com a coesão e ângulo de atrito foi similar ao obtido por Fucale (2005), que também realizou ensaios de cisalhamento direto com resíduos envelhecidos.

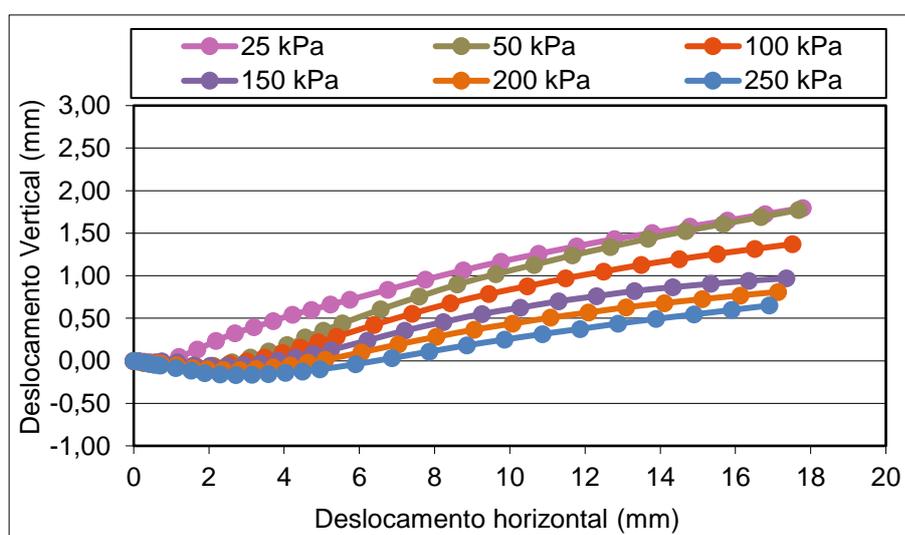
#### 4.5.1.2 83,83% matriz fina + 16,17% fibras

São apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto das amostras composta de 83,83% de matriz fina passante na peneira #10 e 16,17% de fibras, as quais foram ensaiadas para a condição sem inundação, procedimento similar ao executado para a amostra analisada anteriormente. São apresentados na Figura 19 os resultados das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e das curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, da correspondente amostra.

**Figura 19** – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio sem inundação: (a) Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; (b) Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.



(a)



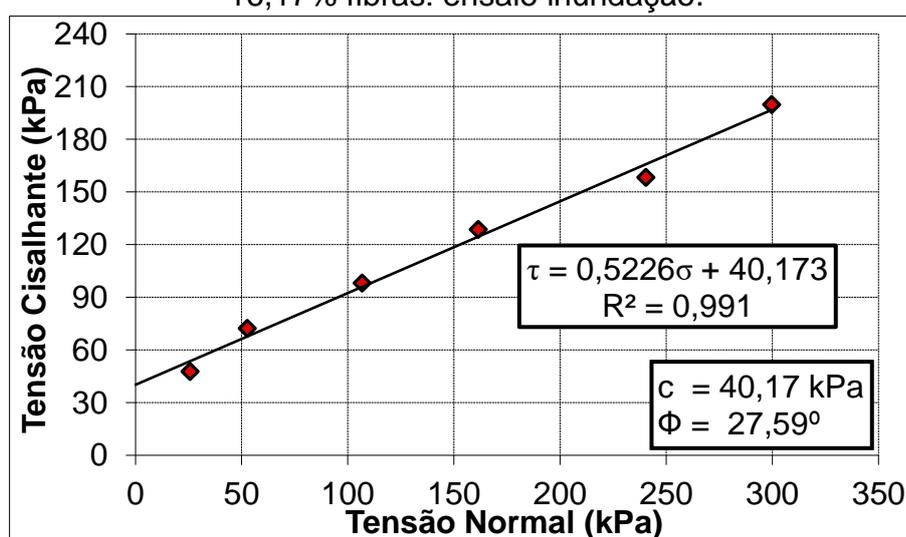
(b)

Da análise do comportamento tensão-deslocamento correspondentes aos ensaios das amostras com 16,17% de fibras, pode-se observar que para todos os níveis de tensão normal até 150 kPa, as curvas apresentaram comportamento de amostras que atingem tensão de pico rompem e se deformam a tensão cisalhante constante, similar ao comportamento de similar ao de areias compactas ou argilas sobreadensadas. Já para os níveis de tensão 200 e 250 kPa as amostras apresentam curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal semelhante ao comportamento de materiais com ruptura plástica.

Quanto a relação dos deslocamentos horizontal-vertical das amostras, todas inicialmente reduziram de volume e gradualmente com o deslocamento as amostras foram sofrendo processo de dilatância. O comportamento de dilatância das amostras foi menor para tensões normais mais elevadas (200 e 250 kPa).

Assim como realizado para amostra com sem fibras, foi construída para amostra com 83,83% matriz fina + 16,17% de fibras de RSU a envoltória de resistência ao cisalhamento. O resultado da envoltória para a correspondente amostra é apresentado na Figura 20.

**Figura 20** – Envoltórias de resistência ao cisalhamento – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio inundação.



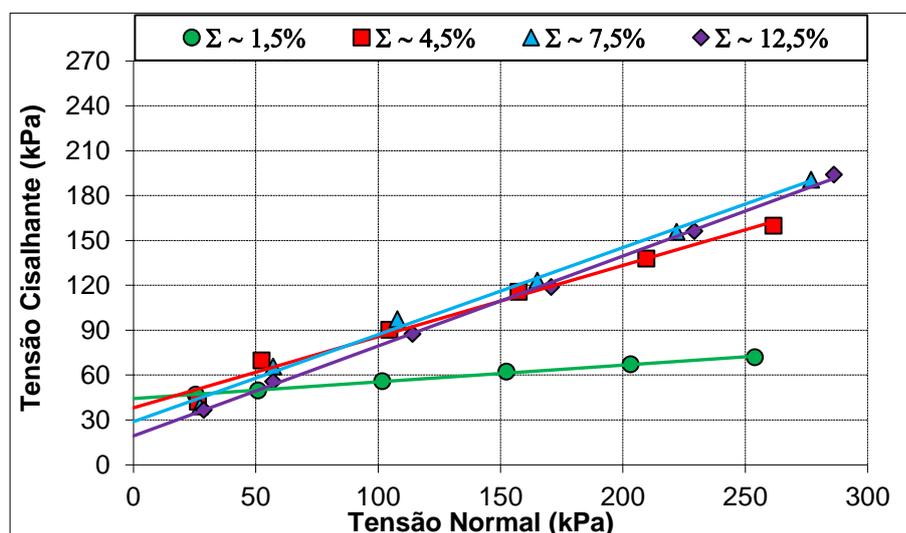
Fonte: Autor, 2019.

Da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb correspondente a amostra com 16,17% de fibras, foi obtido um valor do fator de ajustamento ( $R^2$ ) de 0,991, sendo este valor considerado como boa qualidade, portanto é seguro dizer que a reta se ajusta ao comportamento dos pontos. Quanto aos valores dos parâmetros

geotécnicos obtidos a partir da envoltória, a coesão apresentou um valor de 40,17 kPa e ângulo de atrito teve valor de 27,59°. Tais parâmetros se assemelham aos valores de argilas arenosas e siltes arenosos, solos com elevada coesão e ângulo de atrito.

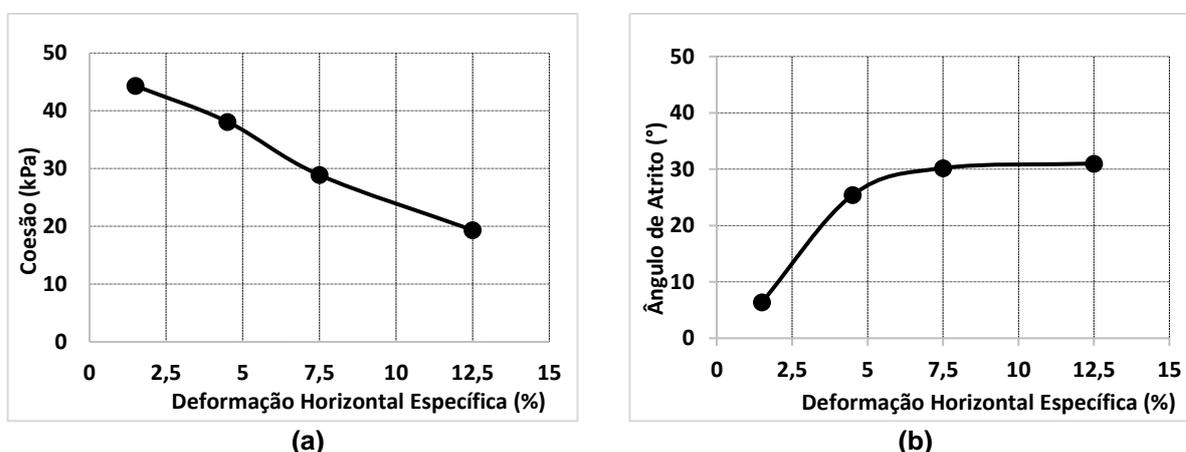
Na Figura 21 são apresentadas as envoltórias de resistência das amostras com 16,17% de fibras resíduos sólidos, para diferentes níveis de deformação horizontal específica. Na sequência são apresentados os resultados das análises da variação dos parâmetros de resistência ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica (Figura 22 e Tabela 13).

**Figura 21** – Envoltórias de resistência ao cisalhamento, em diferentes níveis de deformação horizontal – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio sem inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Figura 22** – Variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio sem inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Tabela 13** – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deformação horizontal – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio sem inundação.

Parâmetros	$\Sigma \sim 1,5\%$	$\Sigma \sim 4,5\%$	$\Sigma \sim 7,5\%$	$\Sigma \sim 12,5\%$
<b>Coesão (kPa)</b>	44,3	38,1	28,9	19,4
<b>Ângulo de Atrito (°)</b>	6,4	25,4	30,2	31,0

Fonte: Autor, 2019.

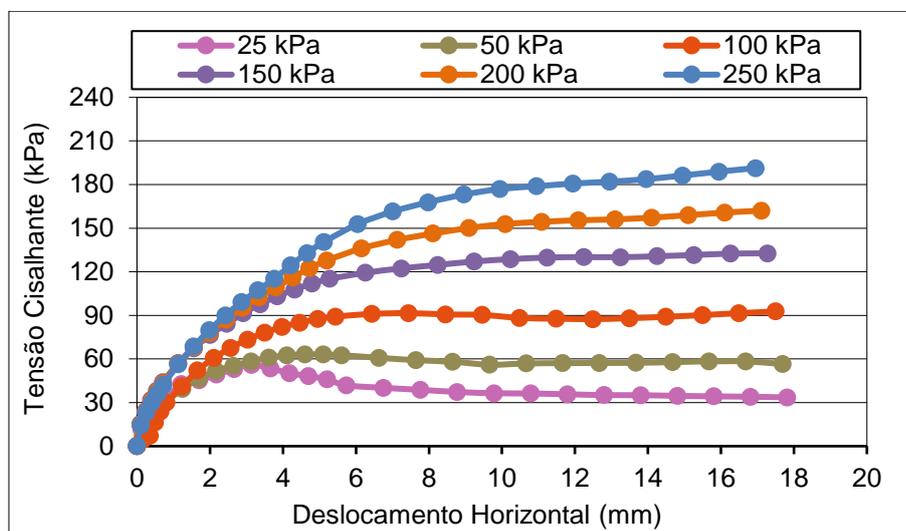
De forma geral os valores da coesão variaram entre 19,4 – 44,1 kPa, foi possível verificar que a coesão foi decaindo à medida que houve aumento da deformação horizontal, essa redução foi praticamente linear (Figura 22.a), para os valores de deformação avaliados. O valor da deformação horizontal correspondente ao máximo valor no intercepto de coesão (44,1 kPa) foi o deslocamento do nível 1,5 %.

Quanto ao ângulo de atrito, a variação dos seus valores se deu de forma crescente ao longo da deformação dos corpos de prova, com variação entre 6,4 – 31,0°. O ângulo de atrito apresentou valor de pico para a deformação horizontal de 12,5 %, com valor correspondente 31,0°. O comportamento de aumento do valor do ângulo de atrito ao longo do deslocamento foi similar ao obtido nas amostras com 0% de percentual de fibras, podendo assim notar uma espécie de tendência das amostras para o comportamento deste parâmetro.

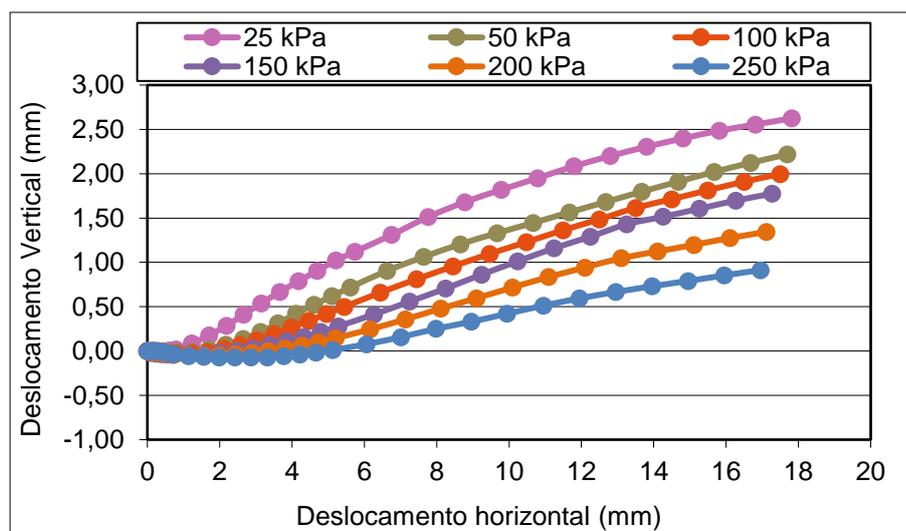
#### 4.5.1.3 67,67% matriz fina + 32,33% fibras

A terceira amostra é composta de 67,67% de matriz fina passante na peneira #10 e 32,33% de fibras, foi ensaiada para a condição sem inundação, de forma similar ao executado para as amostras anteriores. Na Figura 23 são apresentados os resultados das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, e das curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para a correspondente amostra.

**Figura 23** – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio sem inundação: (a) Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; (b) Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.



(a)



(b)

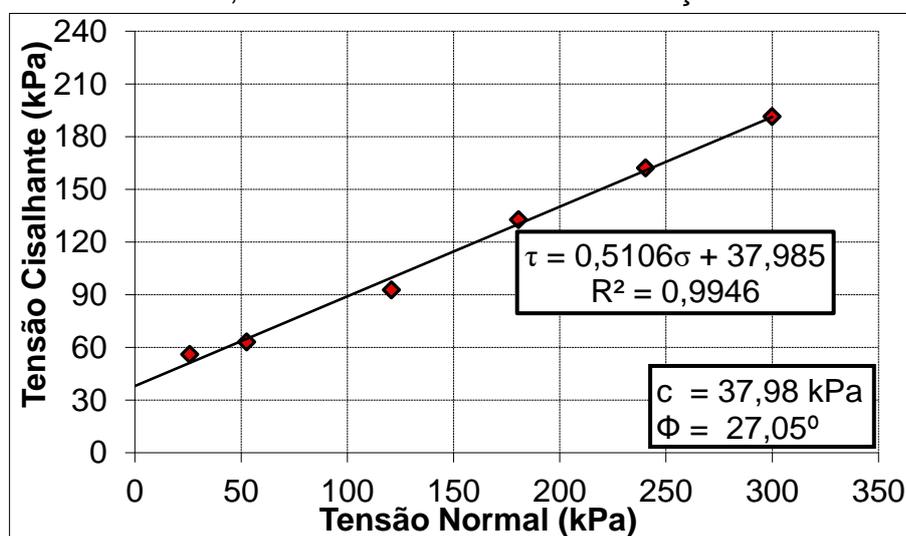
Fonte: Autor, 2019.

Dos resultados do comportamento tensão-deslocamento correspondentes aos ensaios da amostra com 32,33% de fibras, foi observado que para os níveis de tensão normal 25 e 50 kPa, as curvas apresentaram comportamento de pico rompem e se deformam a tensão cisalhante constante, comportamento de similar ao de areias compactas ou argilas sobreadensadas. Para a demais tensões normais a amostra apresentou comportamento similar ao de materiais com areias fofas e argilas não adensadas.

Para os resultados das curvas de deslocamento vertical-horizontal, verificou-se que o comportamento de dilatância em todas as amostras, essa dilatância foi menor para tensões normais mais elevadas (200 e 250 kPa).

Assim como realizado para as anteriores, foi construída para amostra de RSU com a presença de 32,33% de fibras a envoltória de resistência ao cisalhamento. Na Figura 24 é apresentado o resultado da envoltória de resistência ao cisalhamento para a correspondente amostra.

**Figura 24** – Envoltórias de resistência ao cisalhamento – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio sem inundação.

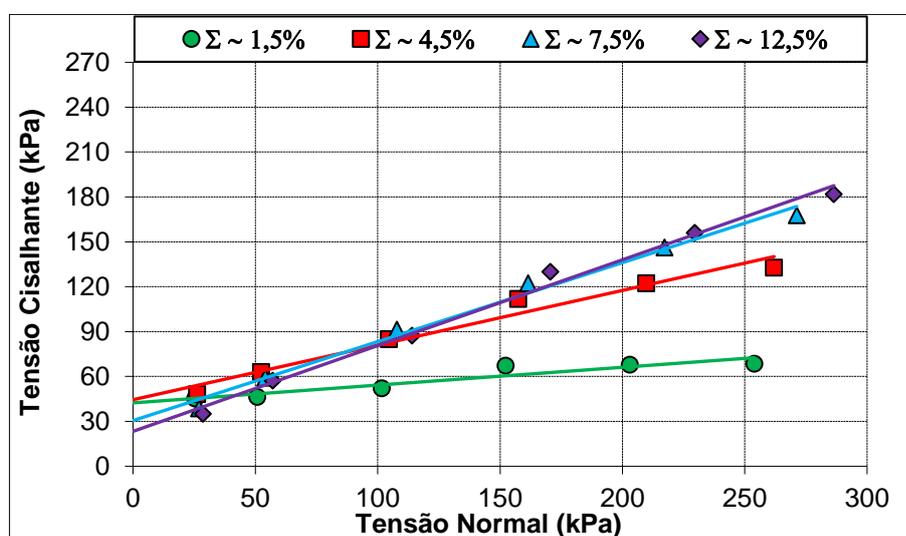


Fonte: Autor, 2019.

Das análises dos resultados da envoltória de resistência, quanto do fator de ajustamento ( $R^2$ ) para a envoltória de resistência da amostra com 32,33% de fibras, ela apresentou valor de 0,9946, sendo assim é possível afirmar que a reta se ajusta ao comportamento dos pontos. Os valores dos parâmetros geotécnicos obtidos a partir da envoltória foram: intercepto coesivo com valor de 37,98 kPa e ângulo de atrito com valor de 27,05°. Os valores dos parâmetros geotécnicos obtidos se assemelham aos valores de argilas arenosas e siltes arenosos.

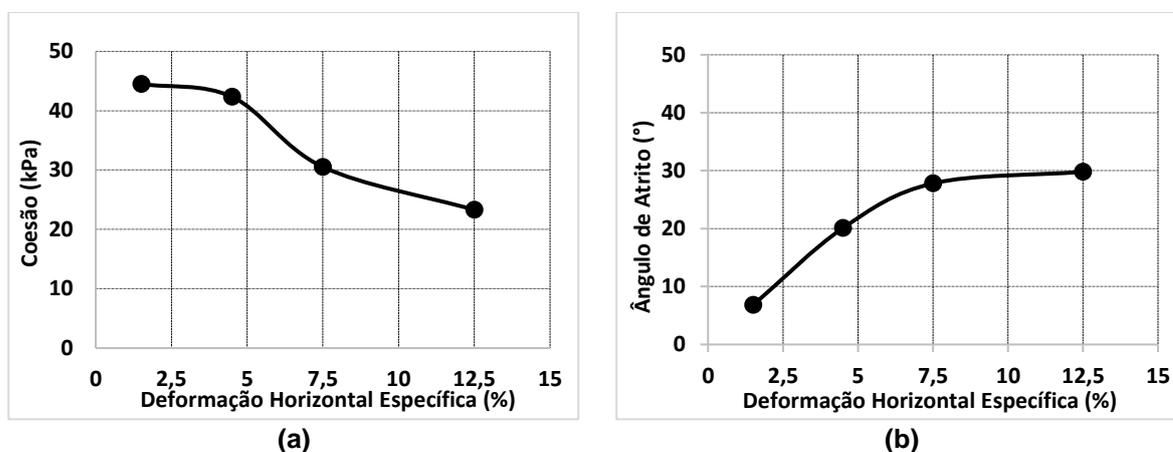
Quanto as envoltórias de resistência das amostras com 32,33% de fibras RSU para diferentes níveis de deslocamento horizontal, essas envoltórias estão apresentadas na Figura 25. Logo na sequência são apresentados os resultados das análises da variação dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal (Figura 26 e Tabela 14).

**Figura 25** – Envoltórias de resistência ao cisalhamento, em diferentes níveis de deformação horizontal – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio sem inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Figura 26** – Variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio sem inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Tabela 14** – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deformação horizontal – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio sem inundação.

Parâmetros	$\Sigma \sim 1,5\%$	$\Sigma \sim 4,5\%$	$\Sigma \sim 7,5\%$	$\Sigma \sim 12,5\%$
Coesão (kPa)	44,5	42,3	30,5	23,3
Ângulo de Atrito (°)	6,8	20,1	27,8	29,8

Fonte: Autor, 2019.

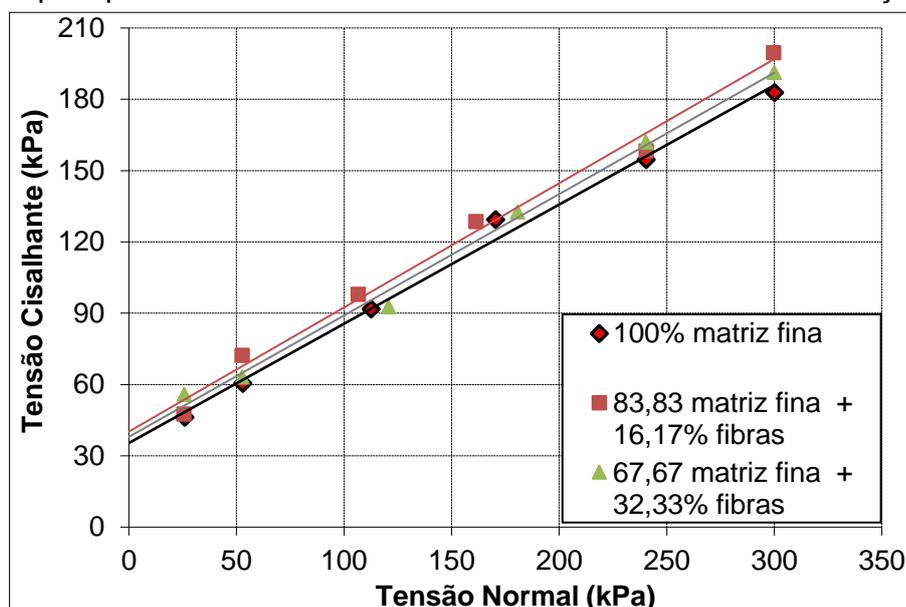
Analisando os resultados da relação deformação horizontal com a coesão, foi observado de forma geral os valores variaram entre 23,3 – 44,5 kPa, verificou-se que a coesão foi decaindo à medida que houve aumento da deformação, similar ao comportamento da amostra com 16,17% de Fibras. Foi possível verificar que o valor da deformação horizontal correspondente ao maior valor no intercepto de coesão foi o deslocamento do nível 1,5 %, com coesão correspondente de 44,5 kPa.

Quanto a análise da deformação horizontal e o ângulo de atrito, o ângulo apresentou variação entre 6,8 – 29,8°, com valor de pico para o deslocamento de 12,5 %, com ângulo de atrito na ordem de 29,8°. No caso do ângulo de atrito variação dos seus valores se deu de forma crescente ao longo da deformação. O comportamento de aumento do valor do ângulo de atrito ao longo do deslocamento foi similar ao obtido nas demais amostras, podendo assim notar uma espécie de tendência em todas as amostras ensaiadas na condição de umidade natural para o ângulo de atrito.

#### 4.5.1.1 Comparativo

A primeira análise comparativa apresentada é relativa as envoltórias de resistência ao cisalhamento formuladas pelo critério de deformação de pico para os três percentuais amostrais. São apresentados na Figura 27 e na Tabela 15 um resumo dos resultados das envoltórias das três amostras estudadas.

**Figura 27** – Envoltórias de resistência ao cisalhamento pelo critério da deformação de pico para as três amostras ensaiadas – ensaio sem inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Tabela 15** – Resumo do resultado das envoltórias de resistência ao cisalhamento das três amostras ensaiadas – ensaio sem inundação.

Amostra	R <sup>2</sup>	c (kPa)	φ (°)
100% matriz fina	0,9938	35,39	26,60
83,83% matriz fina + 16,17% fibras	0,9910	40,17	27,59
67,67% matriz fina + 32,33% fibras	0,9946	37,99	27,05

Fonte: Autor, 2019.

Dos resultados das envoltórias de resistência foi possível verificar que as três envoltórias se apresentaram de forma paralela entre si. Quanto aos parâmetros de resistência ao cisalhamento, a coesão foi maior para o percentual de fibras com valor intermediário (16,17% de fibras) com valor de coesão de 40,17 kPa, seguida da amostra com 32,33% de fibras, com 37,99 kPa e a 0% de fibras com 35,39 kPa. Para o ângulo de atrito o resultado foi similar ao obtido para coesão, a amostra com 16,17% de fibras teve valor de 27,59°, seguida pela amostra com 32,33% de fibras com ângulo de atrito de 27,05° e a amostra com 0% de fibras com 26,6°.

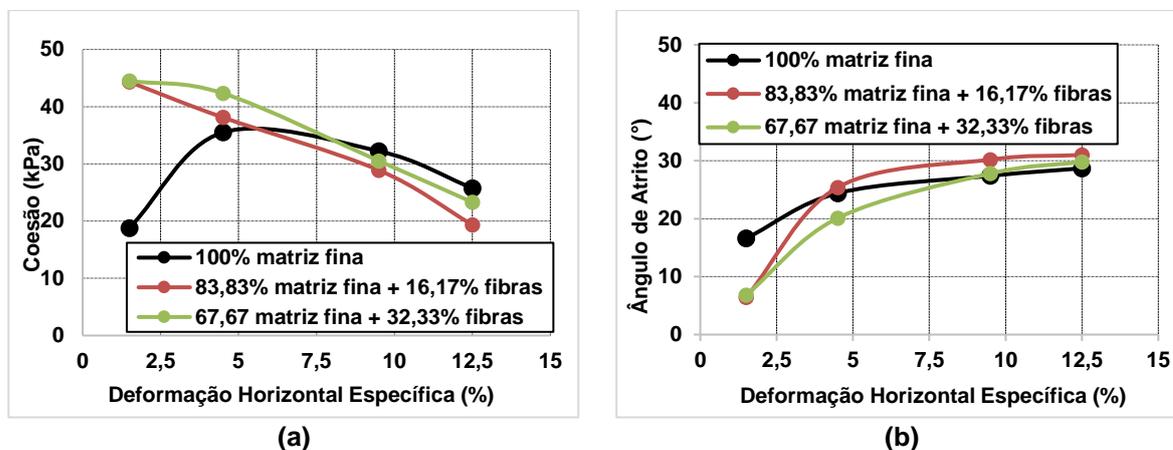
A mostra com percentual de 16,17% de fibras apresentou os maiores valores dos parâmetros de resistência, até mesmo que a amostra com maior percentual de fibras (32,33%). Uma das possíveis justificativa para esse comportamento é que devido ao pequeno tamanho da caixa convencional (101,6x101,6x45 mm), volumes fibras mais elevados como o da amostra com 32,33% podem acarretar na formação de superfícies preferenciais de deslizamento durante a ruptura.

Quando comparados os resultados dos parâmetros obtidos nesta pesquisa com a faixa de valores apresentada por Petrovic *et al.* (2016) (Tabela 5), para os valores do ângulo de atrito as amostras ficaram na faixa de classificação de resíduos com média decomposição. Já para no comparativo com a coesão os valores ficaram fora da faixa de variação apresentada por Petrovic *et al.* (2016).

Quanto ao fator de ajustamento (R<sup>2</sup>), este apresentou valores bem próximos de 1 para todas as envoltórias, podendo assim afirmar que todas as retas apresentaram ótimos ajustamentos em relação aos pontos.

Para análise do comparativo da variação do ângulo de atrito e coesão ao longo da variação da deformação horizontal, é apresentado na Figura 28 um resumo dos resultados das três amostras para o ensaio em umidade natural.

**Figura 28** – Comparativo da variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica para três amostras: ensaio sem inundação.



Fonte: Autor, 2019.

Na análise da variação da coesão ao longo da deformação horizontal das três amostras, foi verificado um comportamento similar entre as amostras com 16,17% e 32,33% de fibras. A coesão para essas amostras foi decrescente ao longo da trajetória de deformação, e ambas apresentaram o valor máximo na deformação de 1,5%. Já a amostra com 0% de fibras teve diferente comportamento, apresentou valor mínimo na deformação 1,5%, e teve seu valor de coesão crescente até a deformação de 4,5%, após essa deformação a mesma decaiu para os demais níveis de deformação.

Quanto ao comportamento do ângulo de atrito, para todas as amostras o comportamento foi similar, todas amostras apresentaram valor mínimo na deformação 1,5% e valor máximo na deformação de 12,5%. Quanto aos valores, a amostra com 16,17% apresentou os maiores valores, seguida das amostras com 32,33% e 0% de fibras. Outro aspecto importante é relativo ao patamar de estabilização do ângulo de atrito, o qual se manteve constante ao atingir a deformação de 7,5% para todas as amostras. Na deformação de 4,5% é possível verificar que as amostras começam a mobilizar em relação ao ângulo de atrito.

No comparativo dos resultados do presente trabalho com apresentado por Kockel (1995) (Figura 7), foi possível verificar um comportamento similar nos resultados para o ângulo de atrito das amostras, já para coesão os resultados divergiram.

## 4.5.2 Cisalhamento direto – com inundação

Similar ao item 4.5.1 relativo aos ensaios de cisalhamento na condição natural de umidade, neste item também foram realizados um total de 3 ensaios de cisalhamento direto, só que agora para a condição de inundação da amostra. Foi verificado durante os ensaios na condição inundada uma expansão livre em todos os corpos de prova, Tabela 16 apresenta os valores médios das expansões para os três percentuais estudados.

**Tabela 16** – Valores da expansão média dos corpos de prova durante sua inundação.

Amostra	Expansão (mm)
100% matriz fina	0,13
83,83% matriz fina + 16,17% fibras	2,97
67,67% matriz fina + 32,33% fibras	5,04

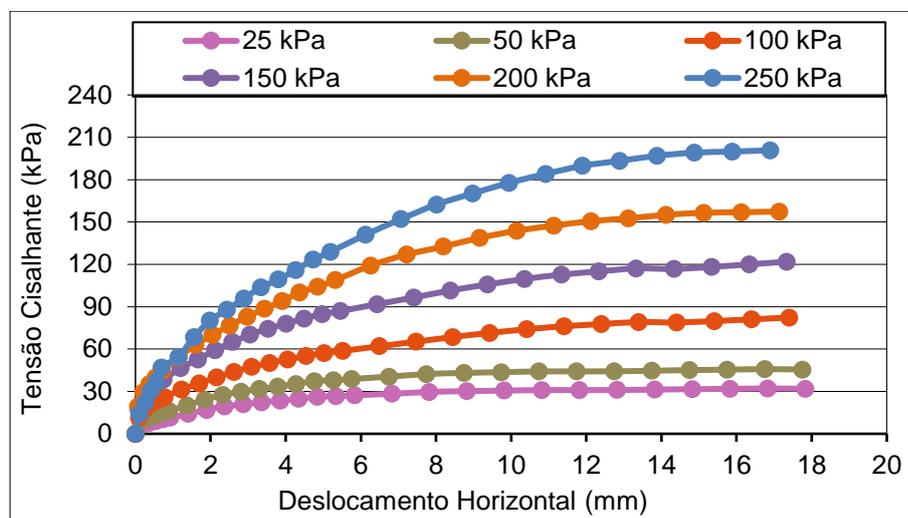
Fonte: Autor, 2019.

A expansão aferida durante o tempo de inundação foi maior nas amostras com o maior percentual de fibras 32,33% (5,04 mm), seguidas das amostras com 16,17% (2,97 mm), e a amostra com menor parcela de expansão foi a amostra com 0% de fibras (0,13 mm). Esse comportamento foi induzido pela inundação da água nos vazios dos corpos de prova.

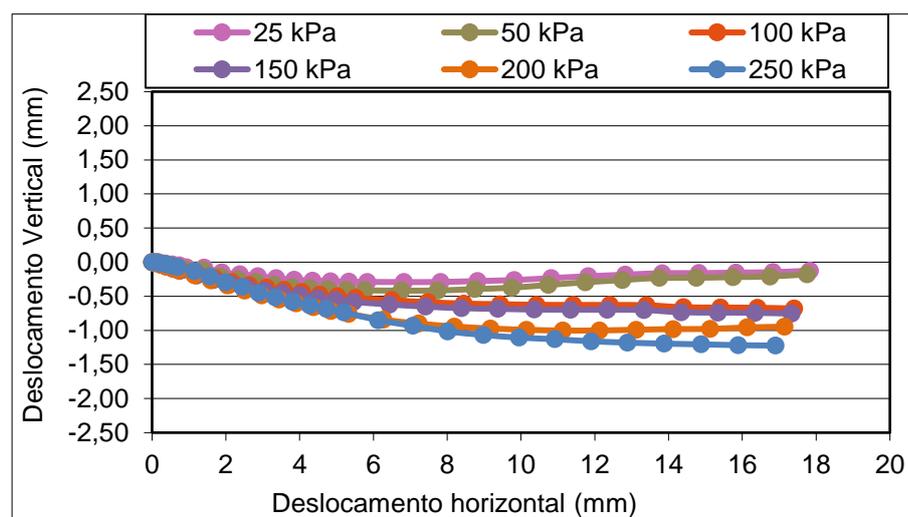
### 4.5.2.1 100% matriz fina

Neste item serão apresentados os resultados das amostras compostas apenas de material fino passante na peneira #10, ensaiadas na condição de inundação do corpo de prova. Na Figura 29 são apresentados os resultados das curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e da curva de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para a correspondente amostra.

**Figura 29** – 100% matriz fina: ensaio com inundação: (a) Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; (b) Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.



(a)



(b)

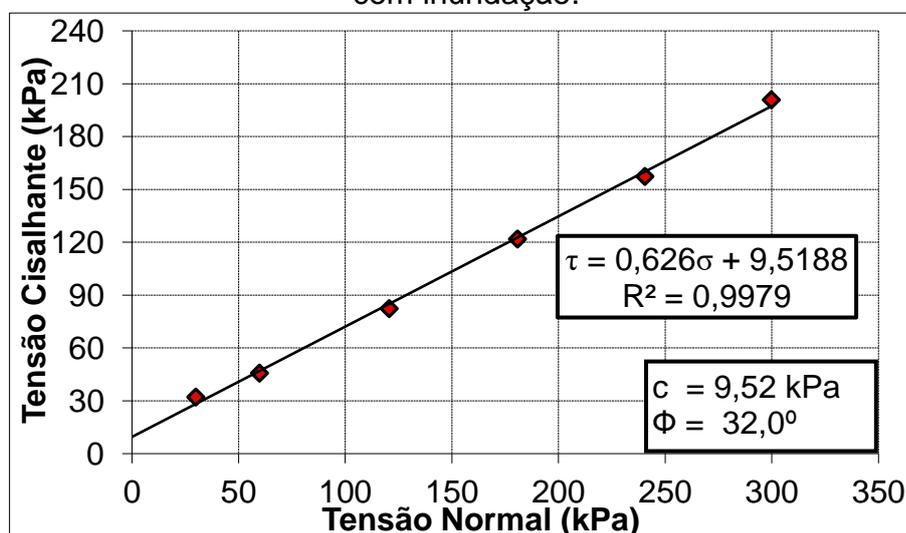
Fonte: Autor, 2019.

Analisando inicialmente o comportamento tensão-deslocamento (Figura 29.a) pode-se observar que para os ensaios com tensões de normais entre 25 e 50 kPa a existência de um patamar e escoamento da tensão cisalhante, similar ao comportamento de areias fofas e argilas normalmente adensadas. Já para os demais níveis de tensão normal, a tensão cisalhante não apresenta um patamar claro de escoamento, pois se mantém crescente à medida que aumenta a deformação horizontal, tal comportamento é similar ao de matérias com a presença de elementos cimentantes, os quais apresentam um comportamento de ganho de resistência à medida que aumentasse a deformação na amostra.

Para as curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, verificou-se que o que todas as amostras sofreram redução de seu volume ao longo do ensaio. Essa redução foi mais acentuada à medida que se aumentou a tensão normal nos ensaios.

Com as tensões cisalhantes máximas e suas correspondentes tensões normais foi construída a envoltória de resistência ao cisalhamento para a amostra de RSU com a presença de apenas material fino passante na peneira #10. O resultado da envoltória correspondente a tal amostra é apresentado na Figura 30.

**Figura 30** – Envoltórias de resistência ao cisalhamento – 100% matriz fina: ensaio com inundação.

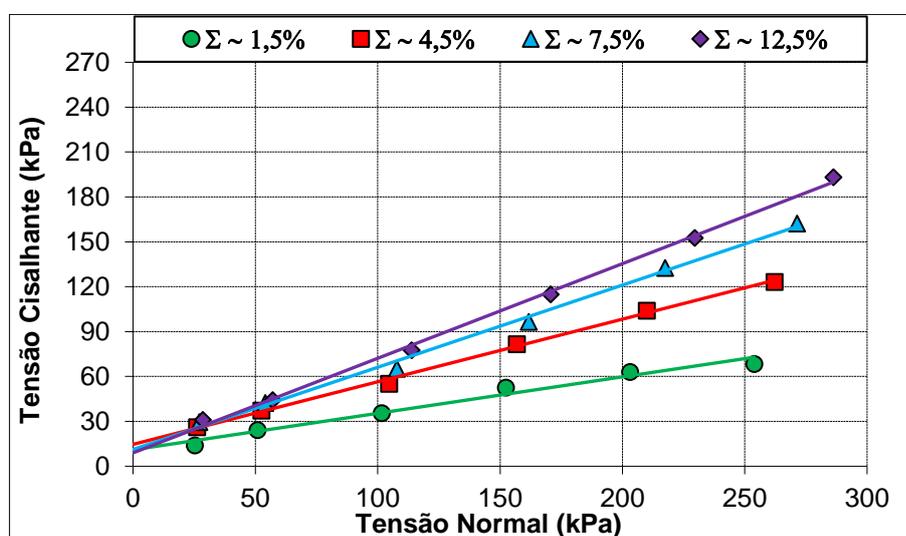


Fonte: Autor, 2019.

A envoltória de resistência de Mohr-Coulomb da correspondente amostra apresentou valor do fator de ajustamento ( $R^2$ ) de 0,9979, sendo este valor considerado como boa qualidade, portanto pode-se afirmar que a reta se ajusta ao comportamento dos pontos. Os valores dos parâmetros geotécnicos obtidos a partir da envoltória foram: intercepto coesivo com valor de 9,52 kPa e ângulo de atrito com valor de 32,0°.

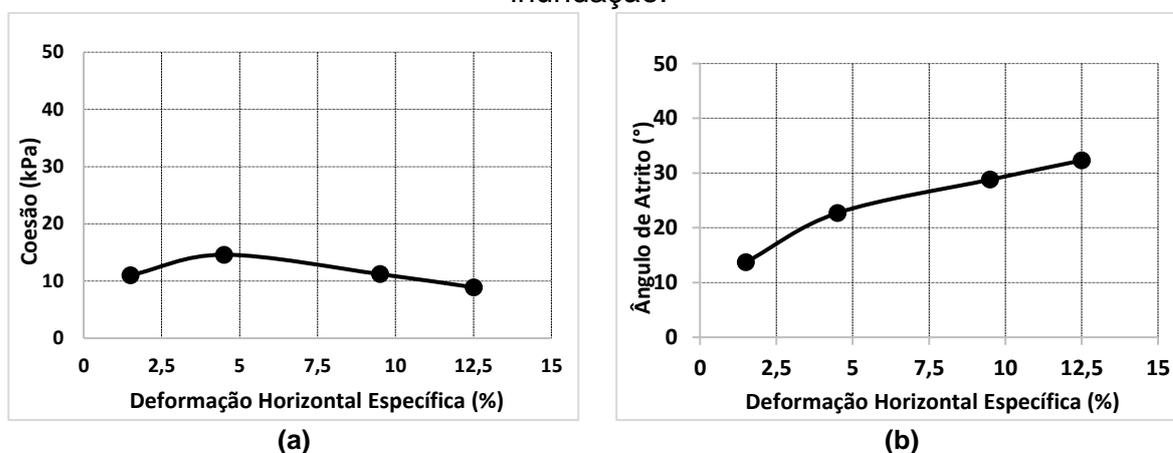
Na sequência da análise dos resultados são apresentadas as envoltórias de resistência das amostras com 0% de fibras RSU para diferentes níveis de deformação horizontal (Figura 31). Logo em seguida são apresentados os resultados das análises da variação dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal (Figura 32 e Tabela 17).

**Figura 31** – Envolvórias de resistência ao cisalhamento, em diferentes níveis de deformação horizontal – 100% matriz fina: ensaio com inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Figura 32** – Variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica – 100% matriz fina: ensaio com inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Tabela 17** – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deformação horizontal – 100% matriz fina: ensaio com inundação.

Parâmetros	Σ ~ 1,5%	Σ ~ 4,5%	Σ ~ 7,5%	Σ ~ 12,5%
Coesão (kPa)	11,0	14,6	11,2	8,9
Ângulo de Atrito (°)	13,7	22,7	28,8	32,3

Fonte: Autor, 2019.

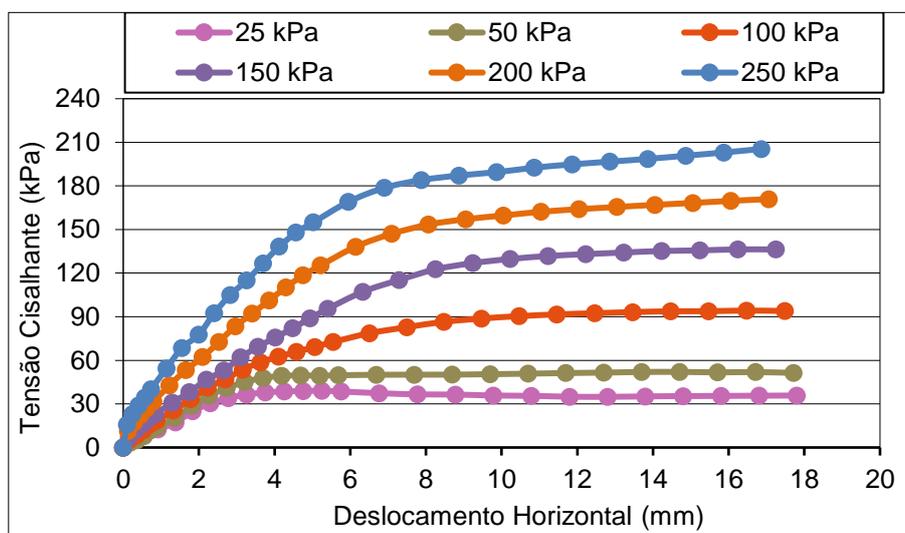
Dos resultados para coesão, verificou-se geral os valores da coesão variaram entre 8,9 – 14,6 kPa, e que o valor de deslocamento horizontal correspondente ao maior valor no intercepto de coesão foi o deslocamento do nível 4,5 %, com resultado de 14,6 kPa. Também foi verificado que a coesão foi aumentando até o deslocamento de 4,5% e decaindo na sequência, atingindo valor mínimo na deformação de 12,5%, com correspondente valor de 8,9 kPa.

Quanto as análises do ângulo de atrito, este parâmetro apresentou variação entre os valores 13,7 – 32,3°, e seu valor de pico se deu para o deslocamento horizontal de 12,5 %, com valor de 32,3°. No caso do ângulo de atrito variação dos seus valores se deu de forma crescente ao longo do deslocamento.

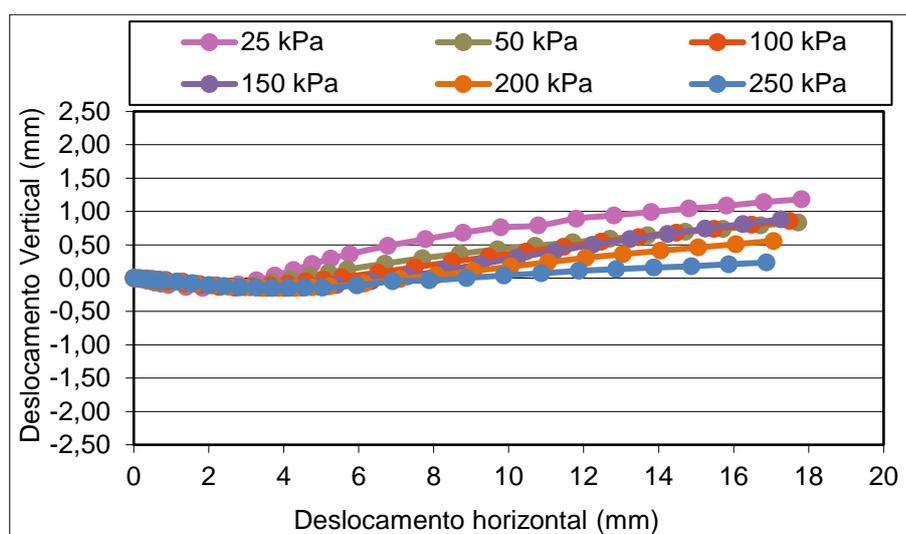
#### 4.5.2.2 83,83% matriz fina + 16,17% fibras

Seguindo as análises dos resultados, a amostra seguinte que é composta de 83,83% de material fino passante na peneira #10 e 16,17% de fibras, foi ensaiada para a condição de inundação, de forma similar ao executado para a amostra analisada anteriormente. São apresentados na Figura 33 os resultados da curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e da curva de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para esta amostra.

**Figura 33** – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio com inundação: (a) Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; (b) Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.



(a)



(b)

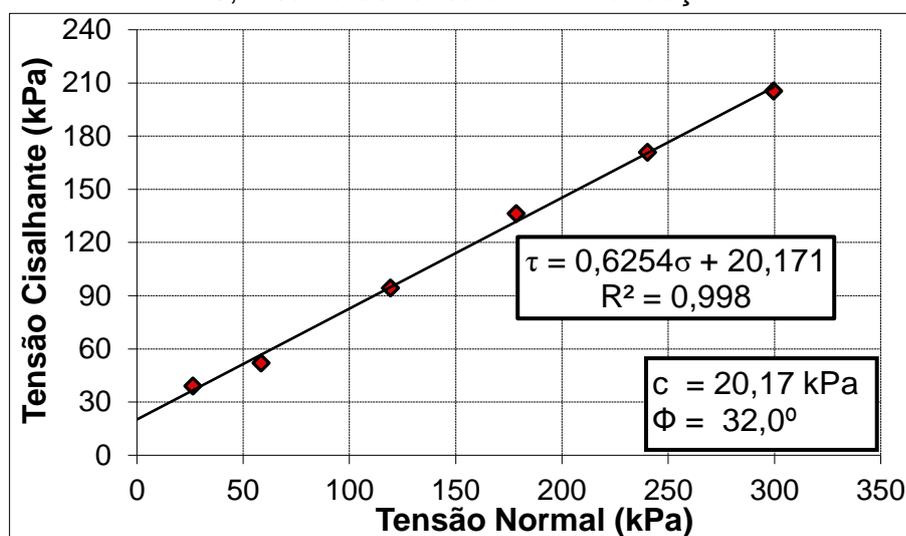
Fonte: Autor, 2019.

Na análise tensão-deslocamento da amostra com 16,17% de fibras na condição de inundação do ensaio, observou-se que para todos os níveis de tensão normal as amostras apresentam um comportamento de tensão cisalhante crescente, com crescimento quase que de forma linear, até atingir a tensão de ruptura e escoar com patamar bem definido.

Para as curvas de deslocamento vertical-horizontal da amostra, foi verificado um comportamento de dilatância das amostras. Esse comportamento de dilatância das amostras foi menor para tensões normais mais elevadas.

Procedimento seguinte foi construção da envoltória de resistência ao cisalhamento, na condição de ensaio inundado para amostra com 16,17% de fibras de RSU. O resultado da envoltória para a correspondente amostra é apresentado na Figura 34.

**Figura 34** – Envoltórias de resistência ao cisalhamento – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio com inundação.

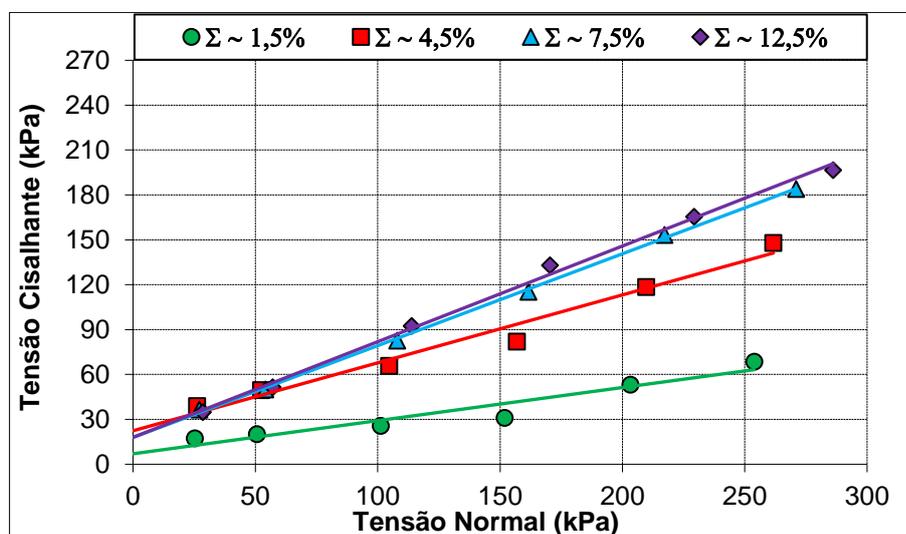


Fonte: Autor, 2019.

Para envoltória de resistência ao cisalhamento para a amostra com 16,17% de fibras, apresentou o valor do fator de ajustamento ( $R^2$ ) de 0,998, tal valor considerado como boa qualidade, validando o ajustamento. Quanto aos valores dos parâmetros geotécnicos obtidos a partir da envoltória foram: 20,171 kPa para coesão e  $32,0^\circ$  para o ângulo de atrito.

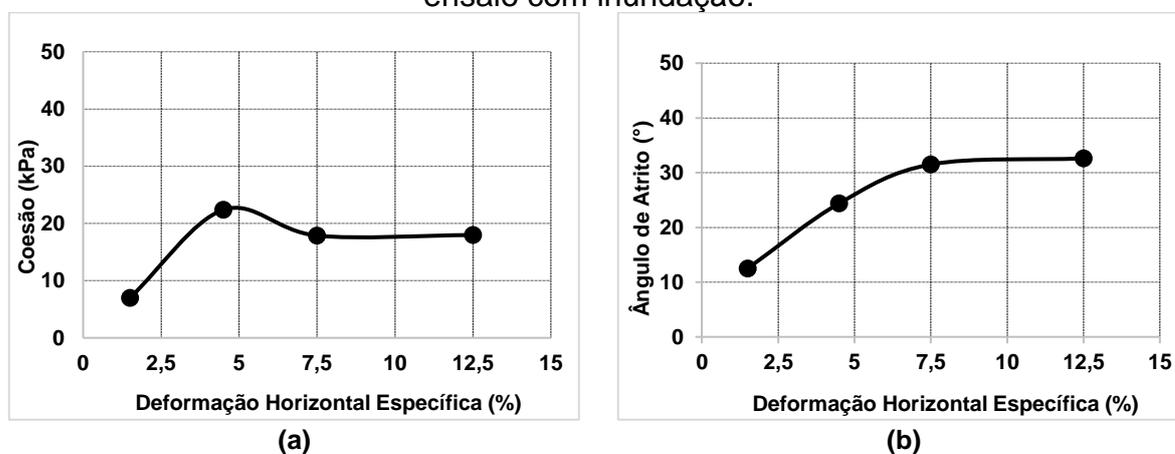
Em seguida nas análises relativas ao percentual de 16,17% de fibras no ensaio em condição de inundação, são apresentadas as envoltórias de resistência das amostras de RSU para diferentes níveis de deformação horizontal (Figura 35). E logo na sequência são apresentados os resultados das análises da variação dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal (Figura 36 e Tabela 18).

**Figura 35** – Envoltórias de resistência ao cisalhamento, em diferentes níveis de deformação horizontal – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio com inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Figura 36** – Variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio com inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Tabela 18** – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deformação horizontal – 83,83% matriz fina + 16,17% fibras: ensaio com inundação.

Parâmetros	$\Sigma \sim 1,5\%$	$\Sigma \sim 4,5\%$	$\Sigma \sim 7,5\%$	$\Sigma \sim 12,5\%$
Coesão (kPa)	7,0	22,4	17,9	18,0
Ângulo de Atrito (°)	12,5	24,4	31,5	32,6

Fonte: Autor, 2019.

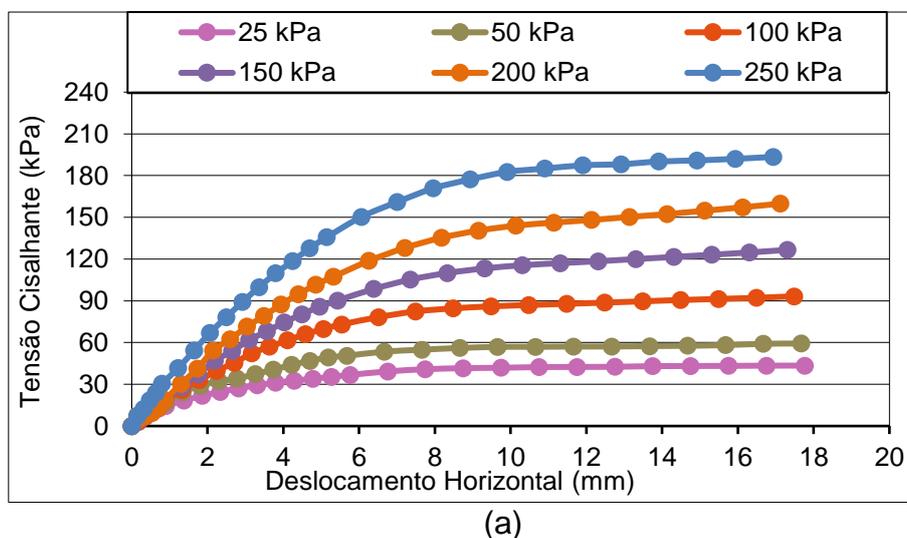
Das análises, verificou-se que variação da coesão ao longo da deformação ficou na faixa de 7,0 – 22,4 kPa, e o valor da deformação horizontal correspondente ao máximo valor de coesão foi a deformação de 4,5 %, com valor de 7,0 kPa. Além disso a coesão inicialmente apresentou valor de deformação mínima de 1,5%, atingiu o pico na deformação de 4,5%, e escoou nas deformações superiores à de pico.

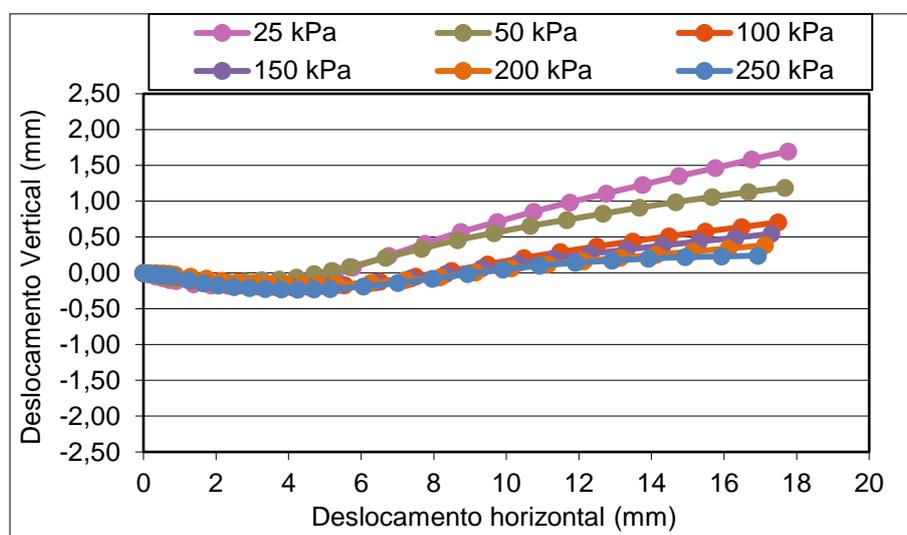
Já o ângulo de atrito apresentou variação entre 12,5 – 32,06°, seu valor de pico ocorreu para a deformação de 12,5 %, com valor de 32,6°. No caso do ângulo de atrito variação dos seus valores se deu de forma crescente ao longo da deformação. O comportamento de aumento do valor do ângulo de atrito ao longo da deformação foi similar ao obtido na amostra com 0% de fibras, podendo assim notar uma espécie de tendência das amostras para condição de inundação em relação ao ângulo de atrito.

#### 4.5.2.3 67,67% matriz fina + 32,33% fibras

Na sequência temos então o último percentual amostral analisado, o qual é composto de 67,67% de material granular passante na peneira #10 e 32,33% de fibras, ensaiado na condição de inundação, de forma similar ao executado para as amostras anteriores. São apresentados na Figura 37 os resultados das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e das curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para a correspondente amostra.

**Figura 37** – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio com inundação: (a) Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; (b) Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.





(b)

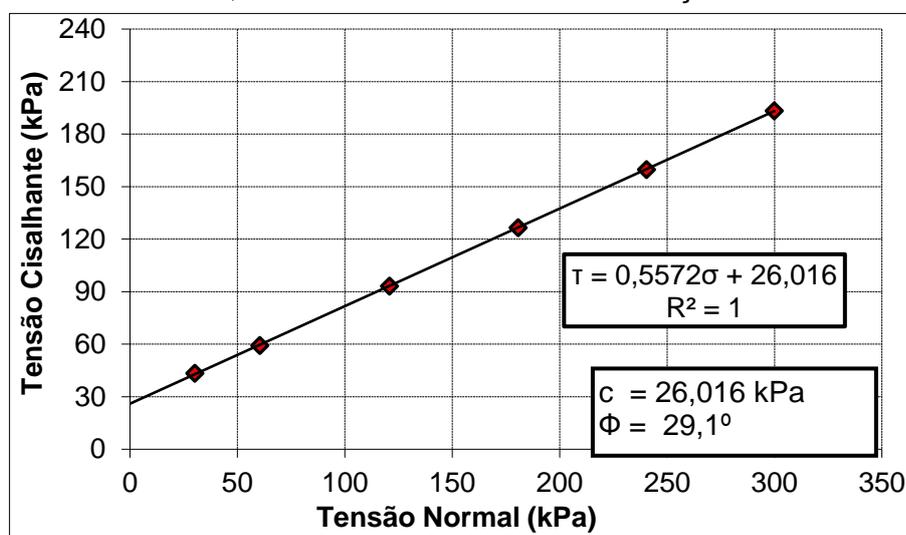
Fonte: Autor, 2019.

Analisando inicialmente o comportamento tensão-deslocamento (Figura 37.a) para a amostra com 32,33% de fibras, pode-se observar que para todos os níveis de tensão normal as amostras apresentam um comportamento de tensão cisalhante com crescimento suave e de forma linear à medida que foi aumentando o deslocamento horizontal, e ao atingir uma tensão de ruptura as amostras escoam com patamar bem definido. Esse comportamento de assemelha com de areias fofas e argilas normalmente adensadas.

Quanto a análise das curvas de deslocamento vertical-horizontal das amostras, foi verificado um comportamento de dilatação para todas as amostras, esse comportamento foi mais forte para tensões normais menores.

Na sequência é apresentado o resultado da envoltória de resistência ao cisalhamento para a amostra com 32,33% de fibras (Figura 38).

**Figura 38** – Envoltória de resistência ao cisalhamento – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio com inundação.

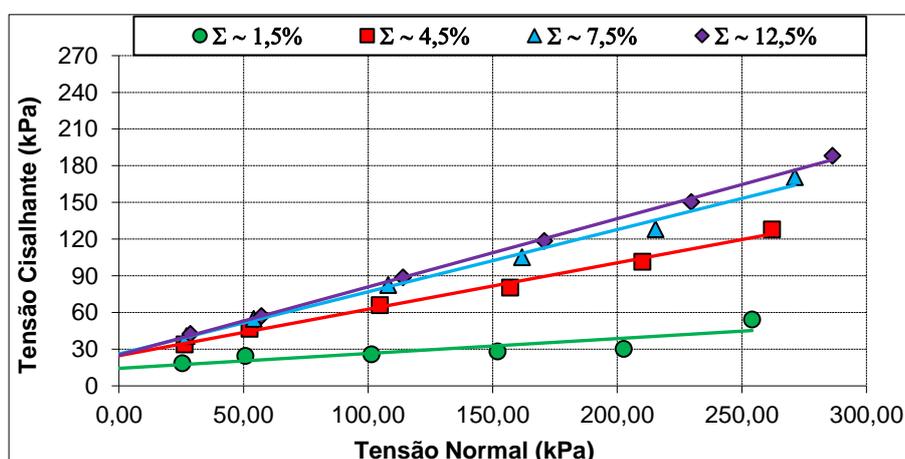


Fonte: Autor, 2019.

A envoltória apresentou valor do fator de ajustamento ( $R^2$ ) de 1, sendo este ajustamento considerado perfeito. Os valores dos parâmetros geotécnicos obtidos a partir da envoltória foram: intercepto coesivo ( $c$ ) com valor de 26,016 kPa e ângulo de atrito ( $\phi$ ) com valor de 29,1.

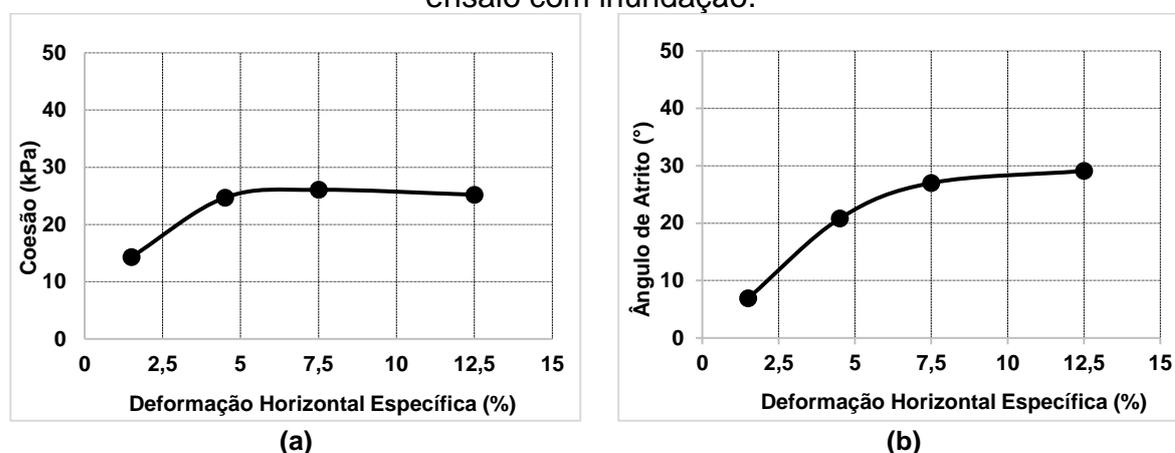
Ao final das análises do ensaio inundado para com percentual de 32,33% de fibras no ensaio em condição de inundação, são apresentadas as envoltórias de resistência das amostras de RSU para diferentes níveis de deformação horizontal (Figura 39), assim como a variação dos parâmetros de resistência ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal (Figura 40 e Tabela 19).

**Figura 39** – Envoltórias de resistência ao cisalhamento, em diferentes níveis de deformação horizontal – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio com inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Figura 40** – Variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio com inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Tabela 19** – Valores do ângulo de atrito e coesão para diferentes níveis de deformação horizontal – 67,67% matriz fina + 32,33% fibras: ensaio com inundação.

Parâmetros	$\Sigma \sim 1,5\%$	$\Sigma \sim 4,5\%$	$\Sigma \sim 7,5\%$	$\Sigma \sim 12,5\%$
Coesão (kPa)	14,3	24,7	26,1	25,2
Ângulo de Atrito (°)	6,9	20,8	27,0	29,1

Fonte: Autor, 2019.

Para a amostra com 32,33% de fibras, valores da coesão variaram entre 14,3 – 26,1 kPa, e a deformação horizontal correspondente ao máximo valor no intercepto de coesão (26,1 kPa) foi o deslocamento do nível 7,5%. No geral, foi verificado que a coesão foi crescente até a deforma de 7,5%, e foi reduzindo-se para deformações superiores.

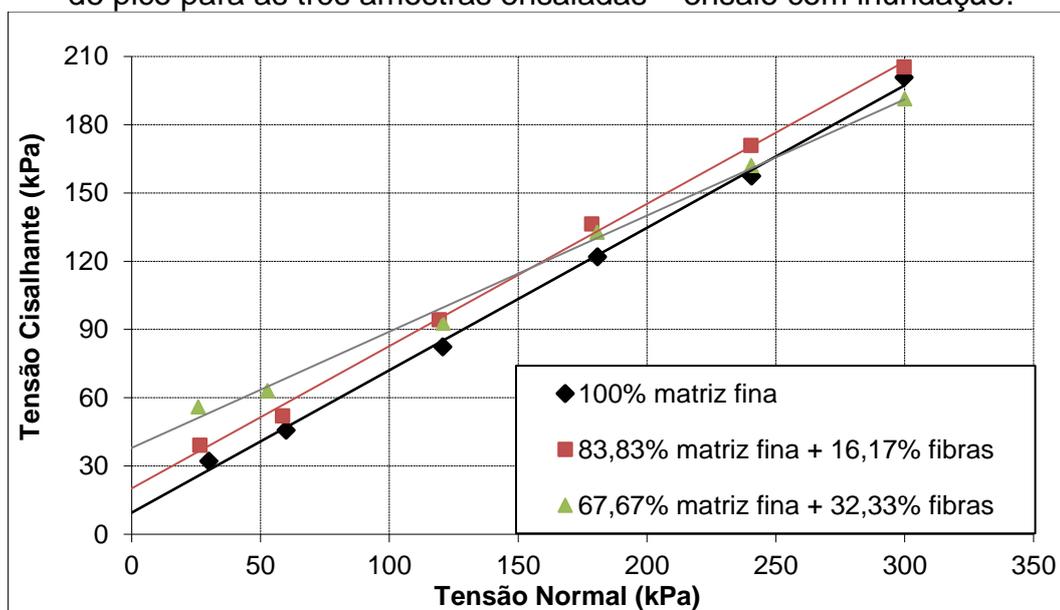
Quanto ao ângulo de atrito, este apresentou variação de valores entre 6,9 – 29,1°, e valor de pico (29,1°) para a deformação de 12,5%. No caso do ângulo de atrito variação dos seus valores se deu de forma crescente ao longo da deformação. O comportamento de aumento do valor do ângulo de atrito ao longo da deformação foi similar ao obtido nas demais amostras ensaiadas na condição de inundação.

#### 4.5.2.4 Comparativo

Neste item é apresentado um resumo comparativo dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto na condição de inundada para as três amostras estudadas, de forma similar ao realizado para os ensaios em condição sem inundação.

Inicialmente é apresentado um comparativo das envoltórias de resistência e seus parâmetros geotécnicos correspondentes aos ensaios na condição inundada (Figura 41 e Tabela 20).

**Figura 41** – Envoltórias de resistência ao cisalhamento pelo critério da deformação de pico para as três amostras ensaiadas – ensaio com inundação.



Fonte: Autor, 2019.

**Tabela 20** – Resumo do resultado das envoltórias de resistência ao cisalhamento das três amostras ensaiadas na condição com inundação.

Amostra	R <sup>2</sup>	c (kPa)	φ (°)
100% matriz fina	0,9519	9,52	32,05
83,83% matriz fina + 16,17% fibras	0,976	20,17	32,02
67,67% matriz fina + 32,33% fibras	1	26,02	29,10

Fonte: Autor, 2019.

No comparativo dos resultados das envoltórias de resistência foi possível verificar que as envoltórias correspondentes as amostras com 0% e 16,17% de fibras se comportam de forma paralela, já a envoltória da amostra com 32,33% difere quanto a angulação das demais. Quanto aos parâmetros de resistência ao cisalhamento, a coesão foi mais elevada para o percentual de fibras com maior teor de fibras (32,33%) com valor de 26,02 kPa, seguida da amostra com 16,17% de fibras com coesão de 20,17 kPa e por último com 0% de fibras, com valor de coesão de 9,52 kPa. Para o ângulo de atrito, as amostras com 0% e 16,17% de fibras tiveram ângulos de atrito praticamente iguais, com valores na de 32,05° e 32,03° respectivamente. Já a amostra

com 32,33% teve valor de ângulo de atrito menor que as demais amostras, com valor de 29,10°.

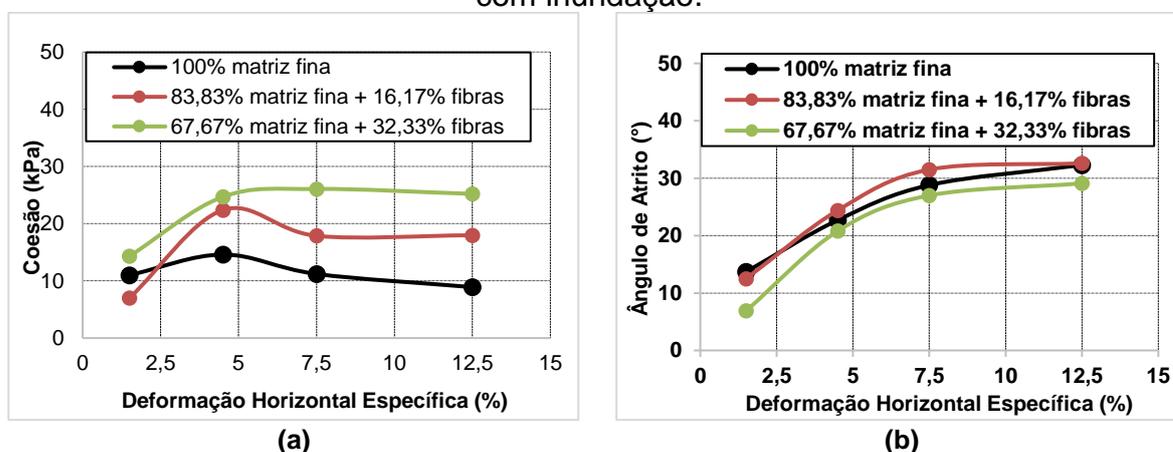
De forma geral foi possível verificar que no ensaio de inundação a coesão das amostras foi maior à medida que se aumentava o percentual de fibras. Já para o ângulo de atrito, este diferiu de comportamento, pois apresentou valores mais acentuados em amostras com menores teores de fibras.

No comparativo dos resultados dos parâmetros obtidos nesta pesquisa com a faixa de valores apresentada por Petrovic *et al.* (2016) (Tabela 5), as amostras ficaram fora das faixas de classificação apresentadas. Tal comportamento pode decorrer do fato que os resultados apresentados por Petrovic *et al.* (2016) são relativos a ensaios na condição não inundada.

Quanto ao fator de ajustamento ( $R^2$ ) o mesmo apresentou valores bem próximos de 1 para as envoltórias das amostras com 0% e 16,17% de fibras, com valores de 0,9519 e 0,976 respectivamente. Já para amostra com percentual de 32,33% de fibras esse valor de ajustamento foi igual a 1, ajustamento considerado como de perfeito.

Em seguida, são apresentadas as análises do comparativo da variação do ângulo de atrito e coesão ao longo da variação da deformação horizontal, para os três percentuais amostrais estudados nesta pesquisa, na condição de inundação dos ensaios (Figura 42).

**Figura 42** – Comparativo da variação da coesão (a) e ângulo de atrito (b) ao longo de diferentes níveis de deformação horizontal específica para três amostras: ensaio com inundação.



Fonte: Autor, 2019.

Para a análise da variação da coesão ao longo da deformação e ruptura das três amostras, foi verificado um comportamento similar entre as amostras com 0% e 16,17% de fibras, e quanto a coesão de pico, a qual para ambas amostras ocorreu a deformação de 4,5%. Já a amostra com 32,33% de fibras evidenciou um comportamento diferente das demais, a qual foi crescente ao longo do deslocamento e atingiu um patamar de escoamento bem definido.

Quanto ao comportamento do ângulo de atrito, para todas as amostras o comportamento foi igual, todas detiveram valor mínimo na deformação 1,5% e valor máximo na deformação de 12,5%. Quanto aos valores, a amostra com 16,17% apresentou os maiores valores, seguida das amostras com 0% e 32,33%. Outro aspecto importante é relativo ao patamar de estabilização do ângulo de atrito, o qual se manteve praticamente constante ao atingir a deformação de 7,5% para todas as amostras.

No comparativo com os resultados apresentado por Kockel (1995) (Figura 7), foi possível verificar um comportamento similar nos resultados para o ângulo de atrito das amostras, já para coesão os resultados divergiram. Da mesma forma que ocorreu nos resultados na condição de umidade natural do ensaio.

#### 4.5.3 Cisalhamento direto – comparativo

No presente item é apresentado um resumo comparativo dos resultados dos parâmetros geotécnicos (coesão e ângulo de atrito) obtidos nos ensaios em condição com e sem inundação. Na Tabela 21 são apresentados os presentes resultados.

**Tabela 21** – Comparativo dos parâmetros geotécnicos dos ensaios nas condições sem e com inundação.

Amostra	c (kPa)		$\phi$ (°)	
	Sem inundação	Com inundação	Sem inundação	Com inundação
100% matriz fina	35,39	9,52	26,60	32,05
83,83% matriz fina + 16,17% fibras	40,17	20,17	27,59	32,02
67,67% matriz fina + 32,33% fibras	37,99	26,02	27,05	29,10

Fonte: Autor, 2019.

Inicialmente analisando comparativamente os resultados da coesão, é possível verificar de antemão que este parâmetro sofreu redução na condição de inundação para os três percentuais avaliados. O percentual que sofreu maior redução foi 0% de fibras, o qual teve redução na coesão de 73,1%, logo em seguida veio o percentual de 16,17% de fibras com redução de 49,8%, e por último o percentual de fibras de 32,33% com redução de 31,5%.

De forma diferente do ocorrido nos resultados da coesão, para o ângulo de atrito os valores apresentaram aumento em seu valor para ensaios na condição inundada. O acréscimo no ângulo de atrito foi maior para as amostras com os menores teores de fibras, sendo maior para o percentual com 0% de fibras, com aumento de 17,0% na coesão, seguido do percentual de fibras de 16,17% com aumento de 13,8% no ângulo, e por fim o percentual de 32,33% de fibras com um aumento de 7,0%

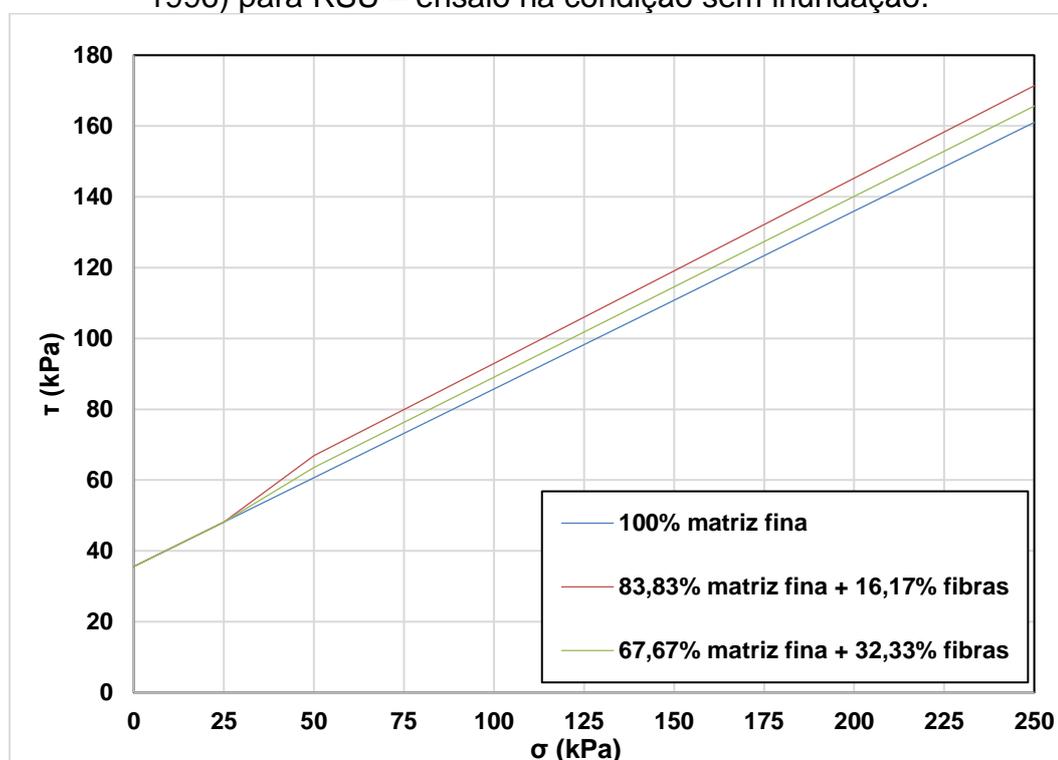
#### **4.5.4 Efeito de tração das fibras**

Seguindo com as análises dos resultados, o presente item dispõe dos resultados do efeito de tração nas fibras na resistência ao cisalhamento descrito por Kölsch (1993, 1995, 1996) através da relação do efeito bilinearidade entre amostras de resíduos sem fibras e com fibras. Foram construídas envoltórias do comportamento de bilinearidade de Kölsch (1993, 1995, 1996), para os resultados das envoltórias de Mohr-Coulomb dos ensaios de cisalhamento direto nas condições com e sem inundação, os itens seguintes apresentam estes resultados.

##### *4.5.4.1 Envoltória de bilinearidade – sem inundação*

A estimativa da envoltória de bilinearidade para os ensaios de cisalhamento direto em condição sem inundação, obtida a partir dos três percentuais amostrais utilizados na presente pesquisa é apresentada na Figura 43.

**Figura 43** – Envoltórias de resistência das amostras dos resíduos sólidos, levando-se em consideração o efeito das fibras, segundo modelo de Kolsch (1993, 1995, 1996) para RSU – ensaio na condição sem inundação.



Fonte: Autor, 2019.

Da envoltória de resistência é possível calcular o ângulo de tração devido as fibras ( $\zeta$ ), também chamado de ângulo de Kolsch, a forma de calcular tal ângulo foi descrita na metodologia do presente trabalho. Os valores dos ângulos para as amostras com 16,17% e 32,33% fibras, foram de 10,2° e 5,0° respectivamente. A outra amostra avaliada não possui fibras, e por tanto não possui ângulo de tração, ela é a base do cálculo do ângulo de tração das demais.

Quanto a amostra com maior percentual de fibras, 32,33%, esta apresentou valor de ângulo de tração inferior a amostra com 16,17% de fibras, a qual possui metade da quantidade de fibras da anterior. Segundo Fucale (2005) esse comportamento pode ter ocorrido devido ao aumento de superfícies deslizantes na amostra, a qual é maior nas amostras com maior volume de fibras, e isso por consequência reduz gradativamente o ângulo de tração.

Quando comparados os valores obtidos para os ângulos de tração das amostras com 16,17 e 32,33% de fibras, com os valores da GDA E 2-35 (DGGT, 1994) (Tabela 4). Analisando inicialmente a amostra com 16,17% de fibras, a qual apresentou o valor

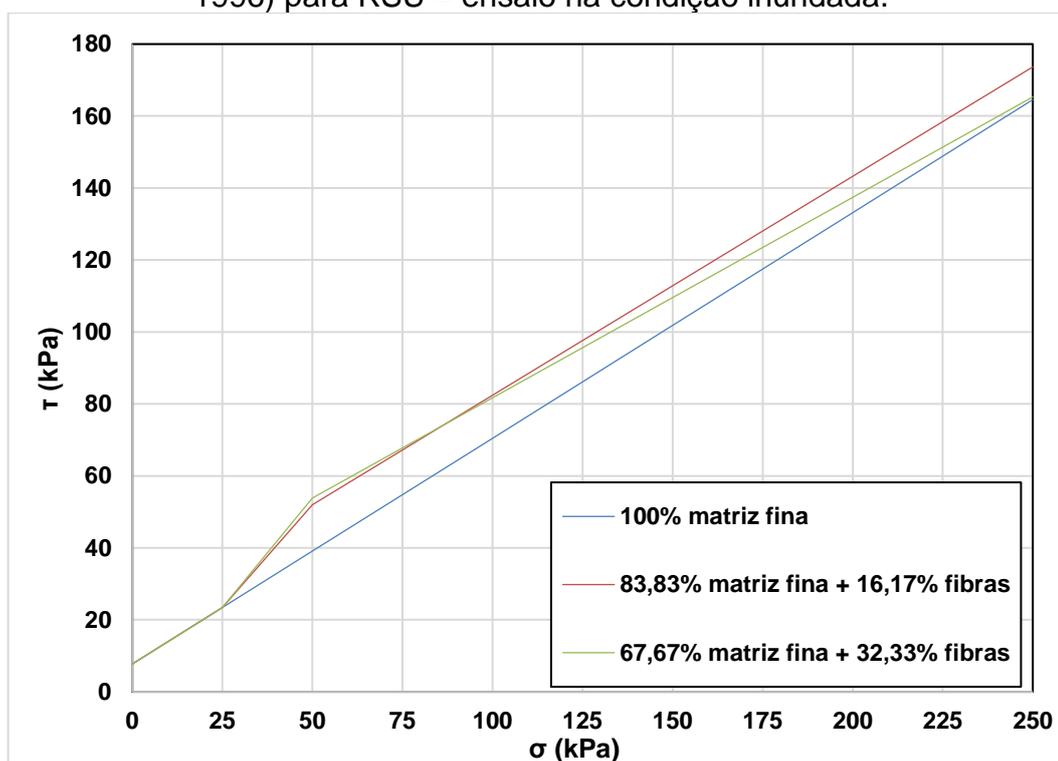
ângulo de tração de  $10,2^\circ$ , este valor ficou dentro da faixa de variação que é de  $10 - 14^\circ$ , essa faixa de valores é correspondente as amostras de resíduos tratados mecânico-biológico e com valor percentual das fibras inferior a 20% do peso da amostra. Já para a amostra 32,33% de fibras, a tabela não dispõe de valores de ângulo de tração para amostras de resíduos tratados mecânico-biológico acima de 20% do percentual de fibras.

Fucale (2005) obteve para resíduos sólidos degradados, resultantes de pré-tratamento biológico aeróbio no Aterro de Freiburg, valores de ângulos de tração de  $10^\circ$  e  $14^\circ$ , correspondente a percentuais de fibras de 20% e 10%, respectivamente. O resultado de Fucale (2005) para o percentual de 20% ( $\zeta = 10,0^\circ$ ) foi bem próximo do valor obtido na presente pesquisa para o percentual de 16,17% ( $\zeta = 10,2^\circ$ ).

#### 4.5.4.1 *Envoltória de bilinearidade – com inundação*

Similar ao realizado para o ensaio de cisalhamento direto em condição de sem inundação, foi também realizada a construção da envoltória para o ensaio na condição inundada, o resultado é apresentado na Figura 44.

**Figura 44** – Envoltórias de resistência das amostras dos resíduos sólidos, levando-se em consideração o efeito das fibras, segundo modelo de Kölsch (1993, 1995, 1996) para RSU – ensaio na condição inundada.



Fonte: Autor, 2019.

Diferente das envoltórias de resistência na condição do ensaio em umidade natural que amostra apresentou envoltórias quase que paralelas, nesta situação as envoltórias não se mostram paralelas, com destaque para a amostra com 32,33% de fibras, que em alguns pontos cruza as outras duas retas.

Os valores dos ângulos de tração obtidos para o caso do ensaio inundado, foram de  $\zeta_2 = 16,7^\circ$  para a amostra com 16,17% de fibras e  $\zeta_3 = 18,5^\circ$  para a amostra com 32,33% de fibras. Oposto ao que aconteceu nas envoltórias apresentadas no item 4.5.4.1, a qual apresentou valor de ângulo de tração maior para a amostra com 16,17% de fibras, neste caso a situação foi inversa. Tal fato pode ter decorrido devido ao maior percentual de material granular na amostra com 16,17% de fibras, pois se analisar o comportamento das envoltórias no ensaio inundado, é possível verificar o intercepto de coesão inicial se reduz a medida que o percentual de grãos aumenta (Coesão sem fibras) > (Coesão 16,17% de fibras) > (Coesão 32,33% de fibras).

No comparativo com os valores GDA E 2-35 (DGGT, 1994) (Tabela 4). A amostra com 16,17% de fibras que apresentou um valor de  $16,7^\circ$  para o ângulo de tração, o qual ficou fora da faixa de variação  $10 - 14^\circ$ , que são para amostras de resíduos tratados mecânico-biológico e com valor percentual das fibras inferior a 20% do peso da amostra. Essa diferença pode se justificar por este caso de tratar de um ensaio com inundação, e a norma Alemã não apresentar faixa de valores para essa situação. De forma análoga a envoltória de bilinearidade do ensaio em condição natural, a amostra de percentual 32,33% não dispõe de faixa de comparação na Tabela 4.

#### **4.5.5 Efeito de tração das fibras - comparativo**

O comparativo seguinte é relativo aos resultados do ângulo de tração obtido por meio dos ensaios na condição de umidade natural e com inundação. Na Tabela 22 são apresentados os presentes resultados.

**Tabela 22** – Comparativo dos ângulos de tração para os resultados dos ensaios com e sem inundação.

Fibras	$\zeta$ (°)	
	Sem inundação	Com inundação
16,17%	10,20	16,70
32,33%	5,00	18,15

Fonte: Autor, 2019.

Foi possível verificar que o ângulo de tração foi maior para os resultados dos ensaios com inundação. Este comportamento ocorreu devido à variação do ângulo de atrito e da coesão nos ensaios inundados e em condição de umidade natural, como visto no item 4.5.3.

#### 4.6 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES

Nesta etapa dos resultados são apresentadas análises relativas à estabilidade de taludes de aterros de RSU. Como já definidos na metodologia as configurações de geometrias e com os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, foram efetuadas as modelagens de estabilidade de taludes em duas condições: sem efeito das fibras (*softwares* GGU-Stability e GeoSlope) e considerando o efeito das fibras (*software* GGU-Stability). Os itens seguintes apresentam os resultados e discussões das modelagens de estabilidade de taludes.

##### 4.6.1 Análise de estabilidade – sem o efeito de tração

Na Tabela 23 são apresentados os parâmetros geotécnicos utilizados nas modelagens de estabilidade, os quais foram obtidos dos ensaios de cisalhamento direto na condição sem inundação, para os três percentuais amostrais ensaiados.

**Tabela 23** – Resumo dos parâmetros geotécnicos utilizados na análise de estabilidade de taludes na condição sem o efeito de tração das fibras.

Amostra	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)
100% matriz fina		35,39	26,60
83,83% matriz fina + 16,17% fibras	11,00	40,17	27,59
67,67% matriz fina + 32,33% fibras		37,99	27,05

Fonte: Autor, 2019.

Com os parâmetros geotécnicos (Tabela 23), as geometrias hipotéticas adotadas (1V: 2H; 1V: 2.5H e 1V: 3H) para um aterro de 70 m, e os 3 níveis piezométricos (NA = 0, 1/3 e 2/3) foram efetuadas as modelagens de estabilidade nos *softwares* GGU-Stability e GeoSlope. Os resultados das modelagens de estabilidade de taludes na condição sem o efeito de tração das fibras são apresentados na sequência na Tabela 24.

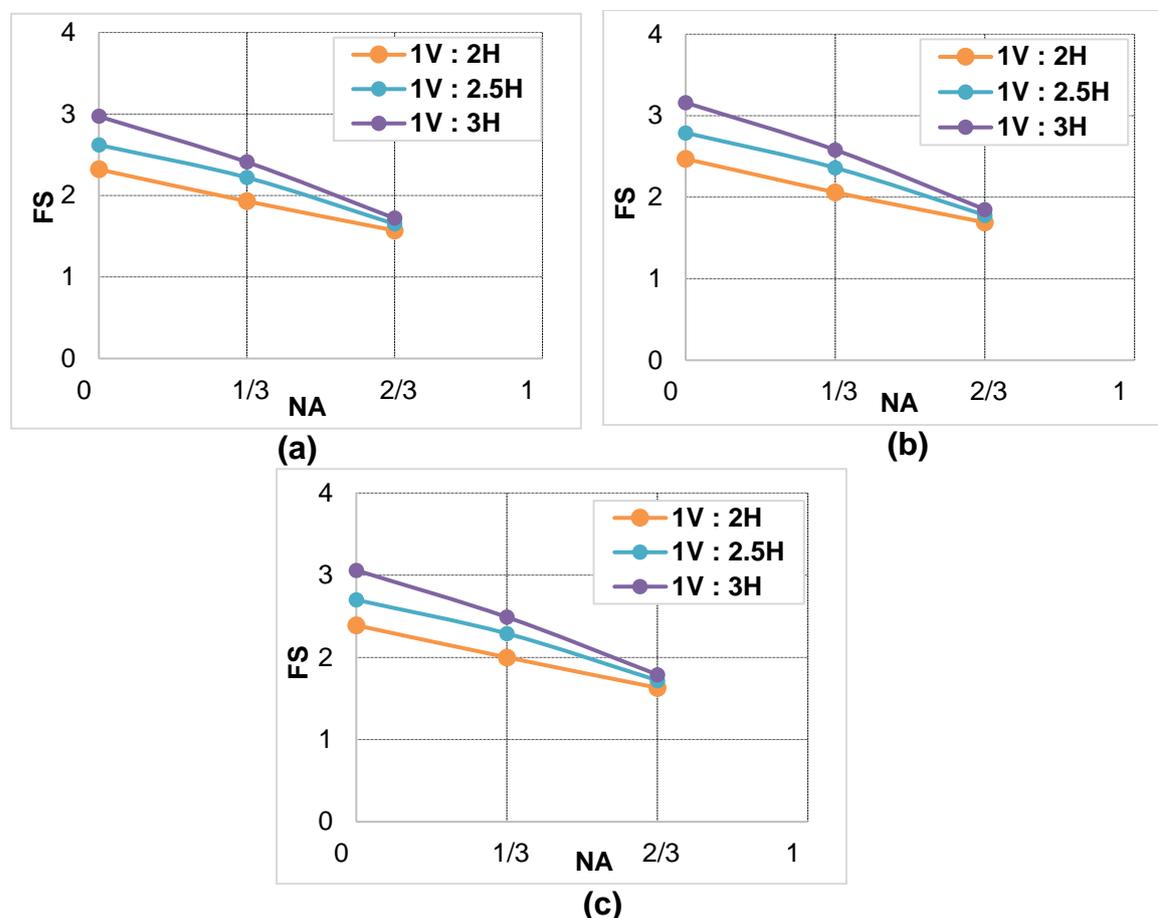
**Tabela 24** – Resultados das análises de estabilidade de taludes hipotéticos não considerando o efeito de tração das fibras.

Amostra	Geometria	NA	FS	
			GGU-Stability	GeoSlope
100% matriz fina	1V: 2H	0	2,320	2,410
		1/3	1,930	1,900
		2/3	1,570	1,539
	1V: 2.5H	0	2,620	2,595
		1/3	2,220	2,106
		2/3	1,650	1,600
	1V: 3H	0	2,970	2,906
		1/3	2,410	2,358
		2/3	1,720	1,717
83,83% matriz fina + 16,17% fibras	1V: 2H	0	2,470	2,564
		1/3	2,060	2,033
		2/3	1,690	1,651
	1V: 2.5H	0	2,790	2,763
		1/3	2,360	2,251
		2/3	1,780	1,724
	1V: 3H	0	3,160	3,097
		1/3	2,580	2,520
		2/3	1,850	1,848
67,67% matriz fina + 32,33% fibras	1V: 2H	0	2,390	2,485
		1/3	2,000	1,966
		2/3	1,630	1,595
	1V: 2.5H	0	2,700	2,679
		1/3	2,290	2,179
		2/3	1,720	1,663
	1V: 3H	0	3,060	3,001
		1/3	2,490	2,439
		2/3	1,790	1,784

Fonte: Autor, 2019.

Para uma visualização mais efetiva da variação do FS nos casos apresentados foram construídas representações gráficas dessas variações com os resultados do GGU-Stability (Tabela 24), os resultados são apresentados na Figura 45.

**Figura 45** – Variação do FS x NA para as três geometrias – não considerando o efeito de tração das fibras no GGU-Stability: (a) 100% matriz fina; (b) 83,83% matriz fina + 16,17% fibras; e (c) 67,67% matriz fina + 32,33% fibras.



Fonte: Autor, 2019.

É possível verificar que o FS em todas as situações se manteve acima do mínimo ( $FS_{\min} = 1,5$ ) estabelecido por norma. Dos resultados têm-se dois aspectos importantes, o primeiro é relativo o NA, o qual, quando aumentado provoca redução no FS, tal comportamento foi também verificado por Giri e Reddy (2014) e Byun *et al.* (2019) quando analisaram a injeção do lixiviado no comportamento da estabilidade de taludes de aterros de RSU.

O segundo aspecto verificado dos resultados da Tabela 24, é referente às geometrias avaliadas, as quais apresentaram valores de FS maiores para geometrias mais suaves como 1V: 3H, e valores menores para as geometrias mais íngremes como a 1V: 2H. Segundo Zabuski *et al.* (2017) a suavização da geometria de taludes/encostas provocam uma maior estabilização dos mesmos, e conseqüentemente promovem maiores valores de FS.

Quanto ao comparativo dos resultados entre os dois softwares, foi possível verificar que não ocorreu em nenhuma das situações avaliadas valores com grandes diferenças nos resultados do FS, não havendo assim uma discrepância das análises. Já no comparativo das modelagens das três amostras, verificou-se que os valores de FS foram maiores para os parâmetros de 16,17% de fibras, seguidos dos resultados da amostras com 32,33% e 0% de fibras, esses resultados já eram esperados, tendo em vista que os valores dos parâmetros de resistência para estas respectivas amostras eram maiores.

Em geral para todos gráficos apresentados, as inclinações das retas se comportaram de forma similar (Figura 45). O decréscimo percentual do FS com aumento do NA foi mais sensível para a geometria 1V: 3H, com redução média de 23,7% do FS, na sequência veio a geometria 1V: 2.5H com redução média de 20,5% e por último a geometria 1V: 2H que apresentou o menor percentual de redução do FS, com valor de 17,5%.

Outro aspecto que é possível verificar, vem da análise do FS nas modelagens a 2/3 da altura total do aterro, a qual apresentou valores FS bem similares para todas as geometrias (Figura 45). Esse comportamento pode ser explicado pelo fato descrito por Byun *et al.* (2019), que descrevem em sua pesquisa, que a certos níveis mais elevados de lixiviado o FS de aterros de RSU começa a se estabilizar, no entanto, os autores não analisaram esse comportamento para diferentes geometrias.

#### **4.6.2 Análise de estabilidade – com o efeito de tração**

Para análise de estabilidade de taludes considerando o efeito das fibras são necessários além dos parâmetros convencionais de resistência ao cisalhamento ( $c$  e  $\phi$ ), também os parâmetros que representam o efeito da tração ( $\zeta$ ,  $a_\zeta$  e  $Z$ ). Na Tabela 25 são apresentados os parâmetros geotécnicos utilizados nas modelagens de estabilidade, os quais foram obtidos dos ensaios de cisalhamento direto na condição natural, para os três percentuais amostrais ensaiados.

**Tabela 25** – Resumo dos parâmetros geotécnicos utilizados na análise de estabilidade de taludes na condição com o efeito de tração das fibras.

Amostra	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$\zeta$ (°)	$a_z$	$Z$ (kPa)
83,83% matriz fina + 16,17% fibras	11,00	40,17	27,59	10,20	0,84	138,46
67,67% matriz fina + 32,33% fibras		37,99	27,05	5,00	0,83	66,84

Fonte: Autor, 2019.

Vale destacar que a amostra com 0% de fibras não é considerada nesta etapa das análises.

O procedimento de análise nesta etapa foi similar ao desenvolvido item 4.6.1, com os parâmetros geotécnicos (Tabela 25), as geometrias hipotéticas adotadas (1V: 2H; 1V: 2.5H e 1V: 3H) para um aterro de 70 m, e os 3 níveis piezométricos (NA = 0, 1/3 e 2/3) foram efetuadas as modelagens de estabilidade apenas no *software* GGU-Stability, pois não é possível realizar análise incorporando o efeito de tração no GeoSlope. Sendo assim, os resultados para as modelagens considerando o efeito de tração das fibras é apresentado na Tabela 26.

**Tabela 26** – Resultados das análises de estabilidade de taludes hipotéticos considerando o efeito de tração das fibras.

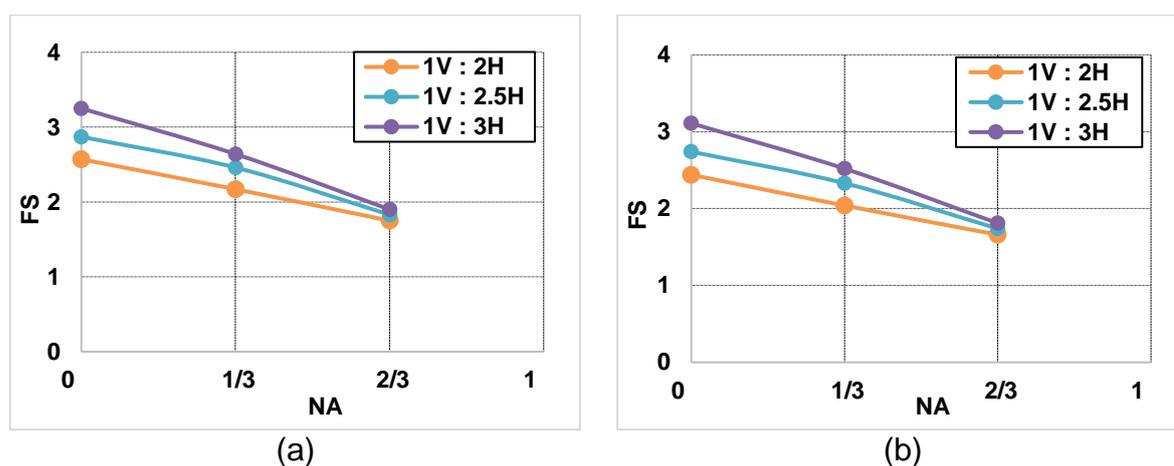
Amostra	Geometria	NA	FS
			GGU-Stability
83,83% matriz fina + 16,17% fibras	1V: 2H	0	2,570
		1/3	2,170
		2/3	1,750
	1V: 2.5H	0	2,870
		1/3	2,460
		2/3	1,830
	1V: 3H	0	3,250
		1/3	2,640
		2/3	1,900
67,67% matriz fina + 32,33% fibras	1V: 2H	0	2,440
		1/3	2,040
		2/3	1,660
	1V: 2.5H	0	2,740
		1/3	2,330
		2/3	1,740
	1V: 3H	0	3,100
		1/3	2,520
		2/3	1,810

Fonte: Autor, 2019.

Assim como foi feito para as modelagens sem o efeito das fibras, também foram plotados graficamente a relação da variação do FS versus NA para as três geometrias,

considerando o efeito dos elementos fibrosos por meio do *software* GGU-Stability, os resultados são apresentados na Figura 46.

**Figura 46** – Variação do FS versus NA para as três geometrias – considerando o efeito de tração das fibras: (a) parâmetros da amostra com 83,83% matriz fina + 16,17% fibras; e (b) parâmetros da amostra com 67,67% matriz fina + 32,33% fibras.



Fonte: Autor, 2019.

Quanto a análise dos resultados, assim como no item anterior (4.6.1) os valores de FS apresentaram valores maiores que os mínimos definidos por norma. Nas análises das variações de NA e também da geometria no comportamento do FS, os resultados obtidos foram similares aos discutidos no item 4.6.1. O FS foi maior para NA mínimo (NA = 0) e menor para o NA máximo (NA = 2/3). A geometria mais suave (1V: 3H) apresentou maiores FS e a mais íngreme (1V: 2H) menos valores de FS.

No comparativo dos resultados das modelagens das amostras, verificou-se que os valores de FS foram maiores para os parâmetros da amostra com 16,17% de fibras e menores para a amostra com 32,33% de fibras. Tal resultados já era esperados, tendo em vista que os valores dos parâmetros de resistência convencionais e os de efeito de tração foram maiores para com 16,17% de fibras.

Além disso, da mesma forma que nas modelagens sem o efeito de tração de fibras, os dois gráficos (Figuras 46.a e 46.b) apresentaram mesmas inclinações das retas que representam a relação FS x NA, quando comparadas as geometrias. Quanto ao decréscimo percentual do FS, para a geometria 1V:3H o percentual de redução média foi de 23,35%, já para a geometria 1V: 2.5H a redução foi de 20,0%, e por último a geometria 1V: 2H que apresentou o menor percentual de redução do FS, com valor de 17,35%.

O FS nas modelagens com NA a 2/3 da altura do aterro, mais uma vez apresentou valores bem próximos nos comparativos das três geometrias utilizadas na presente pesquisa.

#### 4.6.1 Comparativo

Para compreender de forma mais efetiva do efeito da tração nas fibras no resultado do FS nas análises nas condições drenadas no GGU-Stability, este item apresenta uma abordagem comparativa dos resultados das análises de estabilidade de taludes, as quais foram avaliadas considerando o efeito tração das fibras e sem a consideração.

Na tabela 27 é apresentado um comparativo dos valores do FS com efeito tração e sem o efeito de tração das fibras, para cada geometria e também para os valores de NA.

**Tabela 27** – Resultados do comparativo das análises de estabilidade de taludes com e sem o efeito de tração das fibras.

Amostra	Geometria	NA	FS (GGU-Stability)	
			Sem Tração	Com Tração
83,83% matriz fina + 16,17% fibras	1V: 2H	0	2,470	2,570
		1/3	2,060	2,170
		2/3	1,690	1,750
	1V: 2.5H	0	2,790	2,870
		1/3	2,360	2,460
		2/3	1,780	1,830
	1V: 3H	0	3,160	3,250
		1/3	2,580	2,640
		2/3	1,850	1,900
67,67% matriz fina + 32,33% fibras	1V: 2H	0	2,390	2,440
		1/3	2,000	2,040
		2/3	1,630	1,660
	1V: 2.5H	0	2,700	2,740
		1/3	2,290	2,330
		2/3	1,720	1,740
	1V: 3H	0	3,060	3,100
		1/3	2,490	2,520
		2/3	1,790	1,810

Fonte: Autor, 2019.

Quando comparado o efeito do ganho no FS devido as fibras nas geometrias, fica evidenciado que nas geometrias mais íngremes (1V: 2V) o efeito de aumento no FS foi maior do que na geometrias mais suaves (1V: 3H). Tal fato difere do que acontece em geral no comportamento FS x Geometria, pois estes são parâmetros que

se correlacionam de forma negativa, que significa dizer que quando um aumenta o outro diminui.

Quanto a análise do comparativo do FS sem e com o efeito de tração, para os resultados correspondentes a amostra com 16,17% de fibras, foi verificado um aumento de até 5,07% do FS devido a adição do efeito de tração das fibras. Já para as modelagens de estabilidade com o percentual de 32,33% de fibras, foi verificado um aumento de até 2,05% do FS.

De forma geral, os valores de ganho no FS devido à consideração do efeito de tração das fibras, analisados por meio da metodologia de Kölsch (1993, 1995, 1996) para as modelagens no *software* GGU-Stability, apresentaram resultados similares aos obtidos por outras pesquisas. As quais também utilizaram o mesmo *software* para efetuar avaliações de estabilidade de taludes, tais quais: Borgatto (2006) e Motta (2011).

#### 4.7 RESULTADO DO TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Para a avaliação da correlação entre as variáveis e o FS da estabilidade de taludes hipotéticos de aterros de RSU foram utilizados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto e as análises de estabilidade de taludes apresentadas anteriormente. Na Tabela 28 são apresentados os dados de entrada que foram inseridos no *software* Statistica para obtenção da análise PCA.

**Tabela 28** – Dados de entrada para análise PCA no *software* Statistica.

Amostra	FS	Geometria	NA	C (kPa)	$\Phi$ (°)	$\zeta$ (°)
100% matriz fina	2,32	1V: 2H	0	35,39	26,60	0,00
	2,22	1V: 2.5H	1/3			
	1,72	1V: 3H	2/3			
83,83% matriz fina + 16,17% fibras	2,57	1V: 2H	0	40,17	27,59	10,20
	2,46	1V: 2.5H	1/3			
	1,90	1V: 3H	2/3			
67,67% matriz fina + 32,33% fibras	2,44	1V: 2H	0	37,99	27,05	5,00
	2,33	1V: 2.5H	1/3			
	1,81	1V: 3H	2/3			

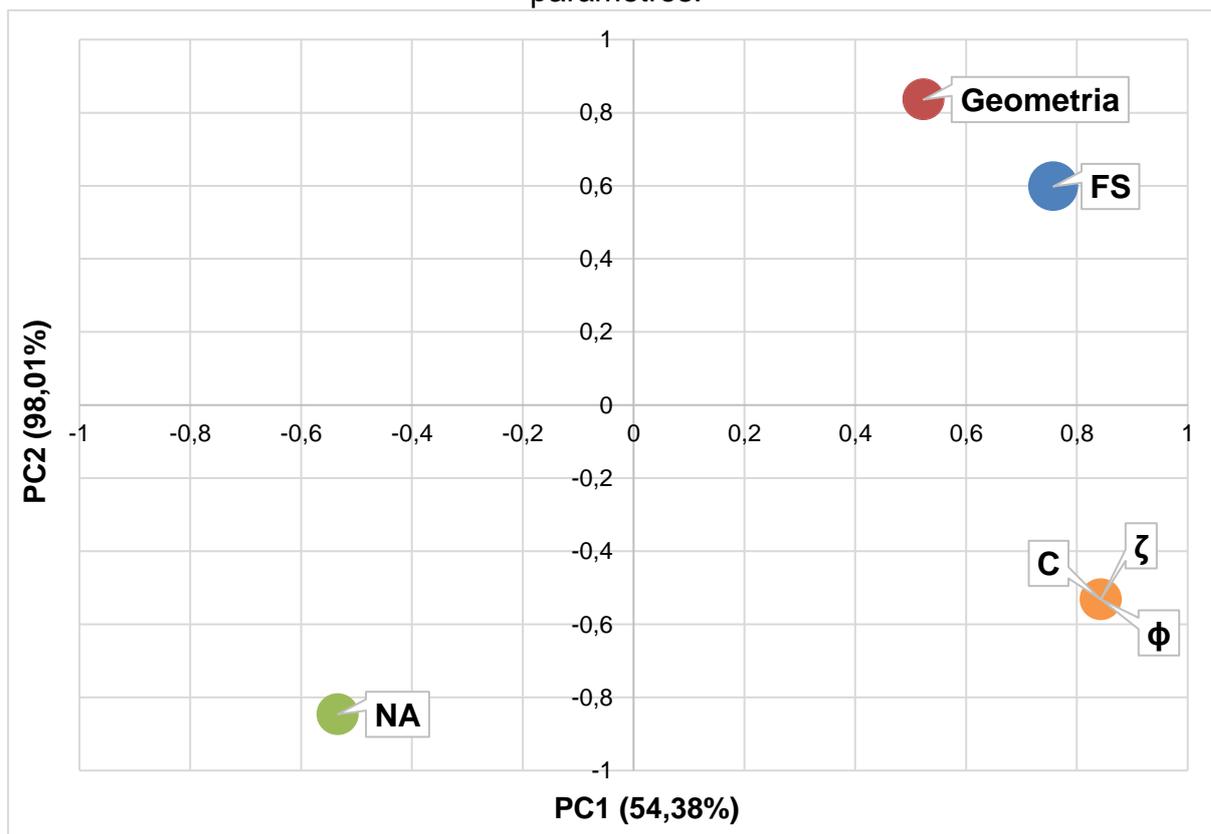
Fonte: Autor, 2017.

O tratamento estatístico dos dados pelo método PCA teve como finalidade investigar os fatores de influência no FS da estabilidade de taludes com as variáveis:

Geometria do aterro (HV:H), Nível de Água (m), Coesão (kPa), Ângulo de Atrito ( $^{\circ}$ ) e Ângulo de Tração ( $^{\circ}$ ).

Na Figura 47 é apresentada a representação gráfica dos resultados da PCA do presente trabalho, tendo PC1 e PC2 nos eixos horizontal e vertical, respectivamente.

**Figura 47** – Resultado da análise PCA da variação do FS com os demais parâmetros.

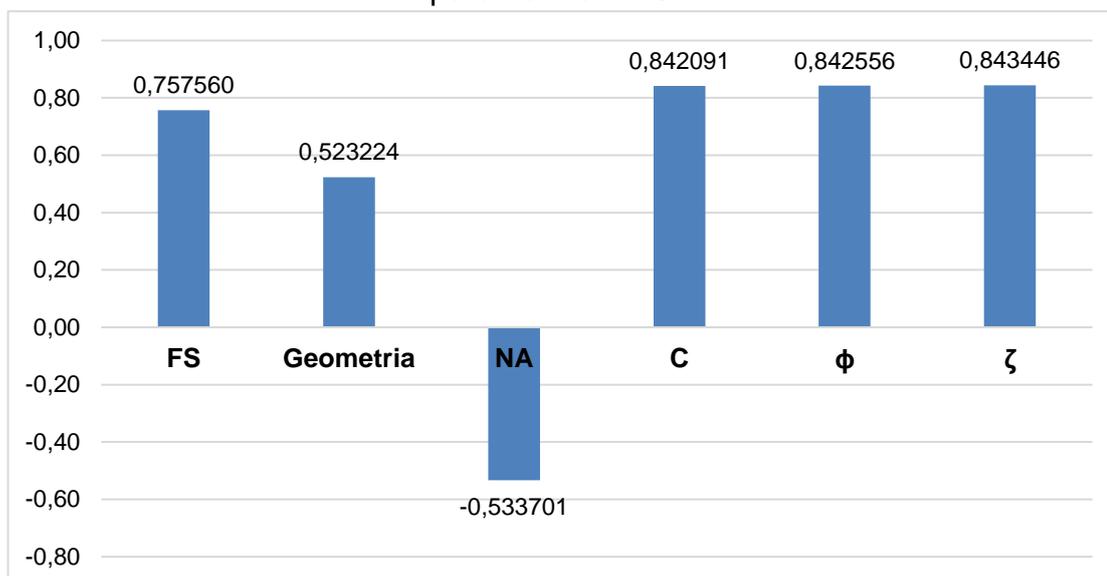


Fonte: Autor, 2019.

A PC1 corresponde a 54,38% da informação (variância aplicada) e indica uma tendência de formação de grupos com comportamento similares, onde FS, geometria, coesão, ângulo de atrito e de tração são inversamente proporcionais ao NA. A PC2 corresponde a 98,01% da informação (variância aplicada) da análise deste eixo pode-se observar que FS e NA são inversamente proporcionais.

No Gráfico 6 é apresentado o gráfico de barras da PC1 para uma melhor visualização do comportamento das variáveis.

**Gráfico 6** – Resultado da análise PCA da variação do FS com os demais parâmetros – PC1.



Fonte: Autor, 2019.

Com relação PC1, pode se observar quanto ao FS da estabilidade de taludes de aterros de RSU, que o mesmo é maior quanto maior forem seus parâmetros geotécnicos ( $\zeta$ ,  $\phi$  e  $c$ ), sendo estas variáveis que mais contribuem para maiores valores de FS. Assim como os parâmetros geotécnicos, a geometria possui comportamento diretamente proporcional ao FS, sendo assim quanto maior for a relação da geometria do aterro (exemplo: 1V: 3H > 1V: 2H), sendo está a variável que mais contribui para maiores valores de FS. Já o NA possui comportamento inverso ao FS, pois o aumento do NA gera redução do FS, sendo está variável a que mais influência na redução do FS.

De forma geral, pode-se verificar que o NA é o parâmetro que quando elevado é o que mais influência na redução do FS, já a coesão e os ângulos de atrito e de tração são os parâmetros que quando acrescidos, influenciaram em um maior aumento no FS.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISA FUTURAS

### 5.1 CONCLUSÕES

Quanto à análise gravimétrica e de SV da amostra coletada, foi verificado que os resíduos se encontram em avançado estágio de decomposição, evidenciado pelos baixos percentuais de sólidos voláteis (5%) e de matéria orgânica (0,58%), além do alto percentual de material fino na amostra, 34,91%.

À medida que o percentual de fibras foi aumentado, o peso específico máximo correspondente foi sendo reduzindo e a umidade ótima foi aumentando. Isto ocorreu devido ao comportamento plástico das fibras durante o processo de compactação, as quais absorvem menos energia mecânica e sofrem menores reduções de volumes do que amostras compostas puramente com os demais resíduos granulares.

Nas análises dos resultados de resistência ao cisalhamento na condição de sem inundação, verificou-se que para a amostra com 16,17% de fibras, o ganho de resistência foi maior que as demais amostras. Quanto ao ensaio na condição inundada, foi obtido comportamentos diferentes, a amostra com 32,33% de fibras apresentou mais elevado valor de intercepto de coesão que as demais, mas apresentou um valor de ângulo de atrito inferior, as amostras com 0% e 16,17% de fibras. Esses aspectos indicam o percentual com 16,17% apresentou os melhores resultados quanto aos parâmetros geotécnicos.

Quanto ao efeito de tração das fibras, foi possível verificar que percentuais mais elevados de fibras (32,33%) apresentam maiores valores de tração nas situações de umidades mais elevadas (ensaio com inundação), e percentuais de fibras intermediários (16,17%) se comportam melhores a tração em condições de umidade mais naturais (ensaio sem inundação). Isto ocorre pois em ensaios inundados com maiores percentuais de fibras sofrem menores reduções no intercepto coesivo, como verificado, e uma menor redução na coesão favorece a obtenção de maiores valores de ângulos de tração. Já na condição sem inundação, prevalece o efeito da mobilização entre as fibras, amostras com maiores percentuais de fibras potencializam a formação de superfícies de deslizamento, o aumento destas superfícies favorece a redução dos parâmetros geotécnicos.

Na análise de estabilidade de taludes hipotéticos, constatou-se mais uma vez que as geometrias menos íngremes, tais quais 1V:3H, dispõem de maiores valores de FS em todas as combinações, assim como níveis piezométricos mais elevados reduzem o valor do FS. Quanto as análises comparativas do FS com e sem o efeito de tração das fibras, verificou-se a condição de aumento no FS nos casos onde o efeito de tração proposto por Kölsch (1993) foi utilizado, detectando aumentos de até 5,07% no FS.

Diante destes estudos é possível verificar que o alteamento de aterros de sanitários é recomendável, visto que a presença de percentuais elevados de fibras aumenta os valores dos parâmetros geotécnicos ( $\zeta$ ,  $\phi$  e  $c$ ) e conseqüentemente o FS. É também importante salientar que o fator que mais afeta o FS é o NA, sendo assim, a manutenção da eficiência do sistema de drenagem é de grande importância para estabelecer o alteamento de aterros sanitários.

## 5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Avaliar o efeito do envelhecimento do resíduo na resistência ao cisalhamento de aterros de RSU;
- Realizar ensaios com as mesmas proporções de fibras em células cisalhamento direto de grandes dimensões.
- Avaliar o efeito de tração em amostras de resíduos novos.
- Identificar a variação do efeito de tração das fibras com a variação da umidade da amostra.
- Incorporar os efeitos do biogás nas avaliações de estabilidade de taludes.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/>>. Acesso em: 31 outubro de 2018.

ABREU, A. E. S. **Investigação geofísica e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR. 8419: Apresentação de projetos de aterros**. Rio de Janeiro, 1992. Versão Corrigida: 1996.

\_\_\_\_\_ **NBR 10.007: Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_ **NBR 11682: Estabilidade de Taludes**. Rio de Janeiro, RJ, 2009.

\_\_\_\_\_ **NBR 6457: Amostra de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização**. Rio de Janeiro, RJ, 2016a.

\_\_\_\_\_ **NBR 7.182: Ensaio de Compactação utilizando energia de compactação normal**. Rio de Janeiro, RJ, 2016b.

\_\_\_\_\_ **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, RJ, 2017.

\_\_\_\_\_ **NBR 7.181: Análise granulométrica para solos, com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material**. Rio de Janeiro, RJ, 2018.

AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais – proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 334 p. + Anexos, 2005.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, Recife. 2007.

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.

BABU, G. L. S.; REDDY, K. R.; SRIVASTAVA, A. **Influence os Spatially Variable Geotechnical Properties of MSW on Stability of Landfill Slopes**. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, Vol. 18(1), p. 27-37. 2014.

BORGATTO, A. V. A. **Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de Mestrado–UFRJ, 174p. 2006.

BORGATTO, A. V. A. **Estudo das Propriedades Geomecânicas de Resíduos Sólidos Urbanos Pré-Tratados**. Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2010.

BOSCOV, M. E. G., CAMPI, T. M. O., AFONSO, B. C., TAVARES, J. D. A. M., TERCINI, J. R. B., BERGAMO, L. D., ... & JULIANO, R. A. P. **Effects Of Pore Pressure On Slope Stability Of Sanitary Landfills**. In Proceedings of International Conference on Engineering and Computer Education. Vol. 7, pp. 64-68, 2013.

BYUN, B., KIM, I., KIM, G., EUN, J., & LEE, J. **Stability of bioreactor landfills with leachate injection configuration and landfill material condition**. Computers and Geotechnics, 108, 234-243, 2019.

CALLE, J.A.C. **Comportamento geomecânico de resíduos sólidos urbanos**. Tese (doutorado em Engenharia Civil) – universidade federal o rio de janeiro. Rio de Janeiro-RJ, 174 p., 2007.

CARVALHO, M. F. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 278 p., 1999.

CHEN Y.M., ZHAN L.T. & LI Y.C. **Biochemical, hydraulic and mechanical behaviours of landfills with high-kitchen-waste-content MSW**. In: The 7th international congress on environmental geotechnics, Melbourne, pp 232–259. 2014.

CLETO, C. I. **Panorama Econômico**. Revista Vitrine da Conjuntura, v. 12, n. 1, 2019.

CLIMATEMPO. **Série histórica do Clima na cidade de Jaboatão dos Guararapes - PE**. 2018. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/climatologia/1606/jaboataodosguararapes-pe>>. Acessado em: 21 de março de 2019.

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

DGGT - Deutsche Gesellschaft Für Geotechnik. **Empfehlungen des Arbeitskreises Geotechnik der Deponie und Altlasten**". Sonderdruck aus: Bautechnik, Jg. 71, Heft 9, Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, 1994.

FAN, X., HUANG, M., LIU, Y., & WANG, H. **Stability analysis of MSW slope layered by aging**. Japanese Geotechnical Society Special Publication, v. 2, n. 50, p. 1753-1756, 2016.

FIRMO, A. L. B. **Estudo Numérico e Experimental da Geração de Biogás a Partir da Biodegradação de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2013, 286f. Tese de doutorado. Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2013.

FUCALE, S. P. **Influência dos Componentes de Reforço na Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2005.

FUCALE, S. JUCÁ, J. F. T. MUENNICH, K.. **The mechanical behavior of MBT-waste**. Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE), v. 20, n. 13, p. 5927-5937, 2015.

G1 – Portal de Notícias da Globo. **Deslocamento em aterro sanitário de Guarulhos deixa cidade em estado de emergência** (2018). Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/12/31/deslocamento-de-aterro-sanitario-em-guarulhos-deixa-cidade-em-estado-de-emergencia.ghtml>. Acesso em: 01/02/2019.

GIRI, R. K.; REDDY, K. R. **Slope stability of bioreactor landfills during leachate injection: effects of heterogeneous and anisotropic municipal solid waste conditions**. Waste Management & Research, v. 32, n. 3, p. 186-197, 2014.

GOMES, C.; LOPES, M. L.; OLIVEIRA, P. J. V. **Municipal solid waste shear strength parameters defined through laboratorial and in situ tests**. Journal of the Air & Waste Management Association, v. 63, n. 11, p. 1352-1368, 2013.

GRS – Grupo de Resíduos Sólidos (UFPE). **Relatório: Ensaios de caracterização e resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos do aterro sanitário metropolitano de João Pessoa - PB**. Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

HEAD, K.H. **Manual of Soil Laboratory Testing**. London, Pentech Press, v.2, 442p. 1980.

HOLANDA, S. H. B; VALENÇA, R. B.; SILVA, R. C. P.; SILVA, L. A. O.; JUCÁ, J. F. T. **Estudos para Aproveitamento de Resíduos Aterrados em uma Célula Experimental no Aterro da Muribeca – PE**. XVII Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – Silubesa, Florianópolis – SC, 2016.

HONG-JUN, Sun; YAN-CHAO, Fan; LI-HONG, Zhao. **Sensitivity Analysis on Stability Parameters in Landfill**. The Open Construction and Building Technology Journal, v. 9, n. 1, 2015.

HUANG, Y., & FAN, G. **Engineering geological analysis of municipal solid waste landfill stability**. Natural Hazards, 84(1), 93-107, 2016.

JAHANFAR, A. GHARABAGHI, B., MCBEAN, E. A., & DUBEY, B. K. **Municipal solid waste slope stability modeling: a probabilistic approach**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 143, n. 8, p. 04017035, 2017.

JESSBERGER, H. L. **“Einige geotechnische Aspekt bei Entwurf und Bauausführung von Deponiebauwerken”**. In: Gartung, E.: Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien, 6. Nürnberger Deponieseminar, Ruhr-Universität Bochum, 1990.

JESSBERGER, H. L. & KOCKEL, R. “**Determination and Assessment of Mechanical Properties of Waste Materials**”. Proceedings of the 4th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy), Vol. 2, pp. 1383-1392, 1993.

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

KAARTINEN, T.; SORMUNEN, K.; RINTALA, J. **Case study on sampling, processing and characterization of landfilled municipal solid waste in the view of landfill mining**. Journal of Cleaner Production, n. 55, p. 56-66, 2013.

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.

KOCKEL, R. & JESSBERGER, H. L. “**Stability of Landfill Slopes**”. Meccanica dei Rifiuti e Analisi Strutturale dei Componenti di una Discarica Controllata. Seminar, CISA, Cagliari, Sardinia, Italy, 1994.

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

KÖLSCH, F. **The bearing behaviour of domestic waste and related consequences for stability**. In: Proceedings Sardinia. p. 1393-1410. 1993.

KÖLSCH, F. “**Material Values for Some Mechanical Properties of Domestic Waste**”. CISA (Hrsg.): Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy), Vol.2, pp. 711-729.1995.

KÖLSCH, F. **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. 1996.

KÖNIG, D. & JESSBERGER, H. L. “**Waste Mechanics**” In: ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, pp. 35-76, 1997.

LAMARE NETO, A. **Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de Materiais Granulares**. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE – Rio de Janeiro, 2004.

LOPES, M. L. & GOMES, C. C. **Geotechnical landfill monitoring; adaptations needed**. Institution of Civil Engineers – ICE, Publishing: All rights reserved, 2013.

MACHADO, S. L., CARVALHO, M. F. e VILAR, O. M. **Modeling the influence of biodegradation on sanitary landfill settlements**, in: Soil and Rocks, n° 3, Vol. 32. P 123 – 134. 2009.

MACIEL, F. J. **Geração de Biogás e Energia em Aterro Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese (doutor em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

MARIANO, M. O. H.; JUCÁ, J. F. T. **Monitoramento de recalques no aterro de resíduos sólidos da Muribeca**. In: Congresso Brasileiro de mecânica dos Solos e Engenharia geotecnica, Brasília. Congresso Brasileiro de mecânica dos Solos e Engenharia geotecnica, 1998. v. 3. p. 1671-1678. 1998.

MARIANO, M.O.H.; MACIEL, F.J.; JUCÁ, J.F.T.; BRITO, A.R. **Estudo da composição dos rsu do projeto piloto para recuperação do biogás no aterro da Muribeca/PE**. Anais do VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental / V Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Recife/PE. 2007.

MARIANO, M. O. H. **Avaliação da Retenção de Gases em Camadas de Cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos**. Tese (doutor em Engenharia Civil) -Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

MARQUES, A. C. M. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 350 p. + anexos, 2001.

MARTINS, H. L. **Avaliação da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto em equipamento de grandes dimensões**. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, setembro, 116p. 2006.

MOTTA, E. Q.. **Avaliação da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos com codisposição de lodo de tratamento de esgoto através de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 211p., 2011.

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

NETO, A. L. **Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de materiais Granulares com Fibras**. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2004.

PEREIRA, T. A. C. **Análise de componentes principais com escalonamento ótimo: Descrição da metodologia e uma aplicação na gestão de qualidade total**. Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2004.

PETROVIC, I., HIP, I., & FREDLUND, M. D. **Application of continuous normal-lognormal bivariate density functions in a sensitivity analysis of municipal solid waste landfill**. Waste management, 55, 141-153, 2016.

PINHEIRO, J., CUNHA, S., GOMES, G., & CARVAJAL, S. **Probabilidade e estatística: quantificando a incerteza**. Elsevier Brasil, 2013.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos. 3ª Edição. 2000.

PNUD - Política das Nações Unidas Para o Desenvolvimento. **Ranking IDH Global 2018**. Disponível em: < <http://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home.html> >. Acessado em: 17 de setembro de 2018.

REMÉDIO, F. H. **Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com N<sub>spt</sub>**. Dissertação - (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, 2014.

REIS, E. **Estatística Multivariada Aplicada**. Lisboa: Edições Sílado. 1997.

RIBEIRO, A. G. C. **Determinação de Parâmetros de Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por Meio de Retro-análises de Testes em Laboratório**. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. 2007.

ROCHA, G.N.; JUNIOR, F.H.C.; JUCÁ, J.F.T. **Estudo da estabilidade de célula para viabilizar aumento de vidaútil em aterro sanitário**. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental / IX Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, São Carlos/SP. 2019.

SCHULER, A. R. **Análise do Comportamento de um Aterro Municipal de Resíduos Sólidos Urbanos Instrumentado**. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, M.M. **“Estudo Geológico-Geotécnico de uma Encosta com Problemas de Instabilidade no Município de Camaragibe – PE”**, Tese de Doutorado, UFPE, Recife – PE, 2007.

SUZUKI, D. K. **Verticalização de aterros sanitários por meio de reforço com geogrelhas e diques periféricos alteados pelo método de montante**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo - USP, 2012

WHO – International Reference Center for Waste Disposal. **Methods of analysis of sewage sludge solid wastes and compost**. Switzerland, 1978.

YAMAWAKI, A.; DOI, Y.; OMINE, K. **Slope stability and bearing capacity of landfills and simple on-site test methods**. Waste Management & Research, v. 35, n. 7, p. 730-738, 2017.

ZABUSKI, L., BOSSI, G., & MARCATO, G. **Influence of the Geometry Alteration of the Landslide Slope on its Stability: A Case Study in the Carnian Alps (Italy)**. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 64(2), 101-114, 2017.

ZIEHMANN, G. **Bilinear Model for Stability of Domestic Waste Landfills**. Slope Stability Engineering, Yagi, Yamagami & Jiang © 1999 Balkema. Rotterdam, IBSN90 5809 079 5, pp.853-858, 1999.