UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CHRISTIANE LYRA CORRÊA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Recife
2020

CHRISTIANE LYRA CORRÊA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutora em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Coorientador: Prof. Dr. John McDougall.

Recife

2020

Catalogação na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

C824e Corrêa, Christiane Lyra.
Estudo das propriedades mecânicas dos resíduos sólidos urbanos / Christiane Lyra Corrêa. - 2020.
230 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.
Coorientador: Prof. Dr. John McDougall.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.
Inclui Referências e Anexo.

1. Engenharia Civil. 2. Geotecnia ambiental. 3. Resistência ao cisalhamento dos RSU. 4. Ensaio de cisalhamento direto. 5. Parâmetros de tração dos RSU. 6. Estabilidade de taludes de aterros de RSU. I. Jucá, José Fernando Thomé (Orientador). II. McDougall, John (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2021-7

CHRISTIANE LYRA CORRÊA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutora em Engenharia Civil.

Aprovada em: 20/2/2020.

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho (Examinador externo)
Universidade de São Paulo

_____
Prof. Dr. Tacio Mauro Pereira de Campos (Examinador externo)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

_____
Prof. Dr. Eduardo Antônio Maia Lins (Examinador externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

_____
Dr.ª Eduarda de Queiroz Motta (Examinadora externa)
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

Aos meus pais, Vera e Jarbas, irmãos, Karine e Bruno, esposo, Manuel, e a minha afilhada, Gabriela.

AGRADECIMENTOS

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

Ao professor John McDougall, agradeço, por sua atenção, amizade, pelas valiosas sugestões e co-orientação.

Aos meus pais, Vera e Jarbas, e a minha irmã Karine pelo incentivo e grande ajuda na revisão deste trabalho. A minha afilhada, Gabriela, por doses diárias de ocitocina, me estimulando a finalizar este trabalho.

Ao meu esposo Manuel, por seu amor, compreensão, paciência e estímulo, indispensáveis para a realização desta pesquisa.

À FACEPE e CAPES, pelo suporte financeiro.

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

Aos meus alunos, Isaac e Mayra, pela convivência e incentivo durante essa trajetória, ajudando em toda fase experimental.

À Alison, pelas horas despendidas e valiosas discussões.

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

RESUMO

Esta tese apresenta resultados de uma análise laboratorial dos resíduos sólidos urbanos – RSU, no que concerne ao comportamento mecânico das duas matrizes que compõem a massa de resíduos, matriz básica e matriz de reforço, com a finalidade de observar a influência destes elementos de reforço na resistência ao cisalhamento e obter os parâmetros de tração. Ensaios de cisalhamento direto convencionais em amostras de resíduos sólidos estabilizados foram realizados para verificar a influência da incorporação de diferentes percentagens e tipos de fibras no comportamento mecânico e nos parâmetros de resistência. Além das amostras com a composição original e a matriz básica, foram realizados ensaios com teores de fibras de madeira, plástico e têxtil, variando de 1 a 10%. Através dos ensaios de cisalhamento direto conduzidos, obteve-se a parcela da resistência ao cisalhamento referente à tração das fibras. Finalmente, foi realizada uma análise de estabilidade de taludes de RSU, utilizando-se geometrias usuais de projetos de aterros sanitários de médio e grande porte, onde foram considerados a inclinação do talude, o efeito das fibras como componente de reforço e o nível piezométrico. Os resultados dessa pesquisa mostram a importância dos componentes fibrosos na resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos, conferindo valores maiores aos parâmetros de resistência devido à tensão de tração das fibras, assim como a possibilidade da obtenção dos parâmetros de tração, através dos ensaios de cisalhamento direto, para melhor análise de estabilidade de taludes de aterros sanitários.

Palavras-chave: Geotecnia ambiental. Resistência ao cisalhamento dos RSU. Ensaio de cisalhamento direto. Parâmetros de tração dos RSU. Estabilidade de taludes de aterros de RSU.

ABSTRACT

This thesis presents urban solid waste (MSW) laboratory analysis results, concerning the two matrices mechanical behaviour which compose waste mass, basic matrix and reinforcement matrix, in order to observe these reinforcement elements influence on shear strength and obtain tensile parameters. Conventional direct shear trials on stabilized solid waste samples were performed to verify the incorporation of different percentages and types of fibres influence on mechanical behaviour and on strength parameters. In addition to original composition and basic matrix samples, trials were carried out with wood, plastic and textile fibre contents, ranging from 1 to 10%. Through conducted direct shear trials, shear strength portion related to tensile strength was obtained. Finally, MSW slopes stability analysis were performed, using usual medium and large landfill geometries of projects, where gradient slope, fibres effect as reinforcement component and piezometric level were considered. The results of this research show the fibrous components importance in solid waste shear strength, giving higher values to strength parameters due to tensile stress of the fibres, as well as the possibility of obtaining the tensile parameters through direct shear trials for better landfill slopes stability analysis.

Keywords: Environmental geotechnical. MSW shear strength. Direct shear test. MSW tensile parameters. Slope stability of MSW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição gravimétrica dos resíduos da cidade do Recife em 2002, pela consultora Contécnica, contratada pela Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente – SECTMA, para o Projeto de Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica – PQA.....38
Figura 2 - Composição gravimétrica do RSU do Aterro da Muribeca (a) e do CTR Igarassu (b) 39
Figura 3 - Composição gravimétrica do RSU da cidade do Recife.....39
Figura 4 - Composição volumétrica do RSU da cidade do Recife.....41
Figura 5 - Teores de umidade medidos com a profundidade para resíduos em Lyndhurst.....46
Figura 6 - Localização do aterro controlado da Muribeca em relação à Região Metropolitana do Recife, ao estado de Pernambuco e ao Brasil.....52
Figura 7 - Vista aérea do Aterro Controlado da Muribeca 52
Figura 8 - Localização das células do Aterro controlado da Muribeca adaptado do levantamento topográfico planialtimétrico georreferenciado de placas de recalque para monitoramento no Aterro realizado pela AG Topografia e Arquitetura LTDA em dezembro de 2018. 53
Figura 9 - Procedimento de coleta e segregação preliminar das amostras dos RSU do Aterro da Muribeca – PE. 54
Figura 10 - Segregação dos RSU em um pátio no CTG da UFPE.....55
Figura 11 - Pesagem, peneiramento e redistribuição dos materiais para as categorias pré-determinadas.....56
Figura 12 - Peneiramento: (1), (2) e (3) – material misto graúdo e (4), (5) e (6) – material misto miúdo. 57
Figura 13 - Etapas do ensaio de sedimentação. 58
Figura 14 - (1) Instrumentos utilizados no ensaio; (2) e (3) Água destilada + amostra de material misto < 8 mm; (4) e (5) Bomba a vácuo utilizado e (6) Finalizando o ensaio: pesagem final. 60
Figura 15 - Amostras de (1) madeira; (2) plástico e (3) têxtil.....61
Figura 16 - (1) e (2) Balança analítica e (3) e (4) deflectômetro.....61
Figura 17 - (1) Amostra de RSU nº2; (2) Compactação através de aplicação dos golpes com um soquete de metal; (3) Cilindro após a compactação da

terceira camada; (4) Extração do corpo de prova de RSU nº1; (5) Extração do corpo de prova de RSU nº2 e (6) Extração do corpo de prova de RSU nº3.....63
Figura 18 - Composição gravimétrica dos RSU do aterro da Muribeca – PE.....65
Figura 19 - Composição volumétrica dos RSU do aterro da Muribeca – PE.....65
Figura 20 - Curva granulométrica do material misto < 8 mm dos RSU do aterro da Muribeca – PE.....69
Figura 21 - Classificação morfológica do RSU.....70
Figura 22 - Compactação (a) RSU: material misto < 8 mm; (b) RSU: material misto < 8 mm [61,69%] + material misto 8-25 mm [13,99%] + fibras [24,32%] ; (c) RSU: material misto < 8 mm [61,69%] + material misto 8-25 mm [13,99%] + têxtil [1,37%] + madeira [2,44%] + outros [0,71%]. 74
Figura 23 - Modelo esquemático da composição do RSU semelhante a solos reforçados 77
Figura 24 - Ângulo de atrito e coesão versus deformação axial para diferentes idades do RSU.....78
Figura 25 - Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta com 8% de reforço – Resíduos sólidos estabilizados 79
Figura 26 - Equipamento de cisalhamento direto convencional produzido pelo Ronald Top S/A em diversos ângulos – caixa cisalhante com dimensões de 101,8 x 101,8 x 45,0 mm.....82
Figura 27 - (1), (2) e (3) aplicação das camadas da amostra para moldagem do corpo de prova; (4) compressão/vibração manual com o auxílio da tampa e (5) e (6) compressão mecânica com o auxílio de uma prensa.....83
Figura 28 - (1) e (2) medição da tampa da caixa cisalhante em diferentes faces; (3) e (4) medição da caixa em diferente faces e (5) e (6) medição do conjunto caixa + tampa com o corpo de prova em diferentes faces. 84
Figura 29 - (1) e (2) 0% de fibras de madeira antes da moldagem e após o cisalhamento; (3) e (4) 1% de fibras de madeira antes da moldagem e após o cisalhamento; (5) e (6) 2,44% de fibras de madeira antes da moldagem e após o cisalhamento; (7) e (8) 3% de fibras de madeira antes da moldagem e após o cisalhamento; (9) e (10) 4% de fibras de

madeira antes da moldagem e após o cisalhamento e (11) e (12) 5% de fibras de madeira antes da moldagem e após o cisalhamento.....85
Figura 30 - Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica.....87
Figura 31 - (a) Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Específico % e (b) Razão de Tensões x Deslocamento Horizontal Específico % – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica. 88
Figura 32 - Envoltórias de Resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica. 89
Figura 33 - (a) Variação do ângulo de atrito e (b) Variação da coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica. 90
Figura 34 - Envoltória de Resistência – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica. 90
Figura 35 - Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.....92
Figura 36 - (a) Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Específico % e (b) Razão de Tensões x Deslocamento Horizontal Específico % – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.....93
Figura 37 - Envoltórias de Resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada. 94
Figura 38 - (a) Variação do ângulo de atrito e (b) Variação da coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.....95
Figura 39 - Envoltória de Resistência – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada. 96

Figura 40 - Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%. 98
Figura 41 - Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Específico % – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%. 101
Figura 42 - Razão de Tensões x Deslocamento Horizontal Específico % – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%. 103
Figura 43 - Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%. 104
Figura 44 - Variação do ângulo de atrito ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%..... 105
Figura 45 - Variação da coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%. 106
Figura 46 - Envoltória de Resistência – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%. 108
Figura 47 - Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%. 112
Figura 48 - Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Específico % – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%. 114
Figura 49 - Razão de Tensões x Deslocamento Horizontal Específico % – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%. 116
Figura 50 - Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%..... 118
Figura 51 - Variação do ângulo de atrito ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%..... 119
Figura 52 - Variação da coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%..... 120
Figura 53 - Envoltória de Resistência – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%..... 122

Figura 54 - Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal – têxtil – (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%. 127
Figura 55 - Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Específico % – têxtil – (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%. 129
Figura 56 - Razão de Tensões x Deslocamento Horizontal Específico % – têxtil – (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%. 130
Figura 57 - Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – têxtil– (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%..... 132
Figura 58 - Variação do ângulo de atrito ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – têxtil – (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%..... 134
Figura 59 - Variação da coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – têxtil – (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%..... 135
Figura 60 - Envoltória de Resistência – têxtil – (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%..... 136
Figura 61 - Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal específico das amostras de resíduos sólidos estabilizados. 140
Figura 62 - Comparação da variação do (a) ângulo de atrito e (b) coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico das amostras de resíduos sólidos estabilizados. 141
Figura 63 - Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento das amostras de resíduos sólidos estabilizados. 142
Figura 64 - Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal específico das amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de 3% de fibras..... 144
Figura 65 - Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal específico das amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de 5% de fibras..... 145
Figura 66 - Comparação da variação do (a) ângulo de atrito e (b) coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específica das amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de 3% de fibras. 146

Figura 67 - Comparação da variação do (a) ângulo de atrito e (b) coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específica das amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de 5% de fibras. 147
Figura 68 - Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento das amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de fibras – (a) 3% e (b) 5%.....148
Figura 69 - Modelo bi-linear de resistência ao cisalhamento dos RSU. Sobreposição das propriedades da resistência dos RSU, atrito e reforço 151
Figura 70 - Comportamento dos RSU – Modelo de interação entre as forças de atrito e tração 152
Figura 71 - Comportamento dos RSU – Aumento da resistência ao cisalhamento total devido às forças de tração.....153
Figura 72 - Diagramas de equilíbrio de forças em um elemento reforçado horizontalmente.....155
Figura 73 - Método utilizado para o cálculo do ângulo de tração através do trabalho desenvolvido por Kölsch (1996) e expandido por Fucale (2005).....159
Figura 74 - Envoltórias de resistência das amostras dos resíduos sólidos estabilizados, levando-se em consideração o efeito das fibras, segundo modelo de Kölsch (1996) para resíduos sólidos urbanos – (a) matriz composta reforçada com 1,37% têxtil, (b) matriz composta reforçada com 2,44% madeira, (c) matriz composta reforçada com 9,73% plástico e (d) matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico. 163
Figura 75 - Descrição das tensões de tração possíveis na matriz fibrosa.....168
Figura 76 - Perfis dos taludes de RSU utilizados nas análises de estabilidade – (a) Médio Porte 1; (b) Médio Porte 2; (c) Grande Porte 1 e 2 e (d) Grande Porte 3 e 4.....172
Figura 77 - Fator de segurança – FS versus Nível piezométrico, Caso 1 – aterro de médio porte (a) 30 m e (b) 40 m.....179
Figura 78 - Fator de segurança – FS versus Nível piezométrico, Caso2 – aterro de grande porte (a) 60 m e (b) 70 m. 184

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos Resíduos segundo a ADEME – Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.....33
Tabela 2 - Composição dos Resíduos segundo a Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA – EMPEFEHLUNGEN E 1-7, Identifizierung von Abfällen und Stoffgruppen.....34
Tabela 3 - Composição dos resíduos e as estimativas nacionais (Escócia) da composição doméstica analisando o conteúdo reciclável.....35
Tabela 4 - Composição gravimétrica percentual dos RSU de alguns países.....37
Tabela 5 - Composição gravimétrica percentual dos RSU da cidade do Recife no ano de 2014.....37
Tabela 6 - Composição volumétrica percentual dos RSU da cidade do Recife no ano de 2014.....40
Tabela 7 - Classificação morfológica dos RSU.....43
Tabela 8 - Densidades e pesos específicos.....44
Tabela 9 - Teor de umidade dos resíduos sólidos urbanos segundo vários autores.....47
Tabela 10 - Teor de umidade ótima e peso específico seco máximo dos resíduos sólidos urbanos segundo vários autores.....48
Tabela 11 - Teor de sólidos voláteis dos resíduos sólidos urbanos segundo vários autores.....48
Tabela 12 - Programa de investigação geotécnica.....50
Tabela 13 - Composição das amostras dos ensaios de compactação.....63
Tabela 14 - Resumo dos resultados das composições gravimétrica e volumétrica e diferença percentual entre as mesmas.....66
Tabela 15 - Resumo das composições gravimétrica e volumétrica de plástico e têxtil e a diferença percentual entre as mesmas de Motta (2011).....67
Tabela 16 - Comparação dos materiais inertes de diferentes aterros sanitários.....68
Tabela 17 - Classificação morfológica dos resíduos estabilizados provenientes do Aterro da Muribeca de acordo com as categorias.....70
Tabela 18 - Densidade do material misto < 8 mm.....71
Tabela 19 - Densidade média das fibras de madeira.....72
Tabela 20 - Densidade média das fibras de plástico.....72

Tabela 21 - Densidade média das fibras de têxtil.....72
Tabela 22 - Teor de umidade do RSU.....73
Tabela 23 - Resumo dos ensaios de compactação.....75
Tabela 24 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos através de ensaios de cisalhamento direto de laboratório 79
Tabela 25 - Resumo dos tipos e percentuais de fibras nas amostras ensaiadas.....81
Tabela 26 - Índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio – Matriz básica. 86
Tabela 27 - Valores das tensões cisalhantes ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica. 89
Tabela 28 - Valores dos parâmetros de resistência ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica. 90
Tabela 29 - Resumo dos dados do ensaio de resistência ao cisalhamento – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica. 91
Tabela 30 - Índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio – Matriz composta reforçada. 92
Tabela 31 - Valores das tensões cisalhantes ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.....94
Tabela 32 - Valores dos parâmetros de resistência ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.....95
Tabela 33 - Resumo dos dados do ensaio de resistência ao cisalhamento – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.....96
Tabela 34 - Índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio – amostras com acréscimo de fibras de madeira. 99
Tabela 35 - Valores das tensões cisalhantes ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – amostras com acréscimo de fibras de madeira.....109

Tabela 36 - Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico – amostras com acréscimo de fibras de madeira. 110
Tabela 37 - Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para amostras com acréscimo de fibras de madeira. 110
Tabela 38 - Índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio – amostras com acréscimo de fibras plásticas. 113
Tabela 39 - Valores das tensões cisalhantes ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – amostras com acréscimo de fibras de plástico. 123
Tabela 40 - Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico – amostras com acréscimo de fibras de plástico. 124
Tabela 41 - Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para amostras com acréscimo de fibras de plástico. 124
Tabela 42 - Percentagens de fibras têxteis presentes em diversos municípios brasileiros. 125
Tabela 43 - Índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio – amostras com acréscimo de fibras plásticas. 126
Tabela 44 - Valores das tensões cisalhantes ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – amostras com acréscimo de fibras de têxtil. 137
Tabela 45 - Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico – amostras com acréscimo de fibras de têxtil. 138
Tabela 46 - Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para amostras com acréscimo de fibras de têxtil. 138
Tabela 47 - Resumo dos dados do ensaio de resistência ao cisalhamento – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada. 142
Tabela 48 - Resumo dos dados do ensaio de resistência ao cisalhamento para amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de 3% de fibras – madeira, plástico e têxtil. 148

Tabela 49 - Resumo dos dados do ensaio de resistência ao cisalhamento para amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de 5% de fibras – madeira, plástico e têxtil. 149
Tabela 50 - Resumo dos parâmetros de tração da resistência ao cisalhamento para amostras de resíduos sólidos. 157
Tabela 51 - Resumo dos parâmetros de tração das amostras de resíduos sólidos ensaiadas 157
Tabela 52 - Resumo dos tipos e percentuais de fibras nas amostras ensaiadas para determinação dos parâmetros de tração. 160
Tabela 53 - Resumo dos parâmetros de tração para as diferentes amostras ensaiadas. 164
Tabela 54 - Lista de incidentes relatados de colapso de aterros de resíduos sólidos nos países em desenvolvimento desde 2000 166
Tabela 55 - Valores de cálculo geotécnico para resíduos sólidos urbanos 169
Tabela 56 - Valores adotados para a geometria dos perfis dos aterros de resíduos sólidos urbanos. 172
Tabela 57 - Cenários descritos para as análises de estabilidade de aterros de RSU. 173
Tabela 58 - Parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU considerando o efeito das fibras 174
Tabela 59 - Parâmetros geotécnicos da matriz básica utilizados nas análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU sem considerar o efeito das fibras. 174
Tabela 60 - Parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico utilizados nas análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU sem considerar o efeito das fibras 175
Tabela 61 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 0 e situação I – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz básica. 176
Tabela 62 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 0 e situação II – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da

matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico. 176
Tabela 63 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 0 e situação III – Considerando o efeito das fibras de acordo com o método de Kölsch (1996). 177
Tabela 64 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 1/3 e situação I – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz básica. 177
Tabela 65 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 1/3 e situação II – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico. 177
Tabela 66 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 1/3 e situação III – Considerando o efeito das fibras de acordo com o método de Kölsch (1996). 177
Tabela 67 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 2/3 e situação I – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz básica. 177
Tabela 68 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 2/3 e situação II – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico. 178
Tabela 69 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 2/3 e situação III –

Considerando o efeito das fibras de acordo com o método de Kölsch (1996). 178
Tabela 70 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 0 e situação I – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz básica. 180
Tabela 71 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 0 e situação II – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico. 180
Tabela 72 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 0 e situação III – considerando o efeito das fibras de acordo com o método de Kölsch (1996). 180
Tabela 73 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 1/3 e situação I – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz básica. 181
Tabela 74 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 1/3 e situação II – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico. 181
Tabela 75 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 1/3 e situação III – considerando o efeito das fibras de acordo com o método de Kölsch (1996). 181
Tabela 76 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 2/3 e situação I – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz básica. 182

Tabela 77 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 2/3 e situação II – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico. 182
Tabela 78 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 2/3 e situação III – considerando o efeito das fibras de acordo com o método de Kölsch (1996). 182

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 24
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 24
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA 26
1.3 OBJETIVOS 27
1.3.1 Objetivo Geral 27
1.3.2 Objetivos Específicos 27
1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA 28
1.5 ESTRUTURA DA TESE 28
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS 31
2.1 PROPRIEDADES DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 31
2.1.1 Composição 31
2.1.1.1 Gravimétrica 32
2.1.1.2 Volumétrica 40
2.1.2 Granulometria 41
2.1.3 Classificação Morfológica 42
2.1.4 Peso Específico 44
2.1.5 Teor de Umidade 45
2.1.6 Compactação 47
2.1.7 Sólidos Voláteis 48
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL E CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 50
3.1 PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO (EXPERIMENTAL) 50
3.2 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 51
3.2.1 Composição Gravimétrica e Volumétrica 53
3.2.2 Distribuição Granulométrica 57
3.2.3 Classificação Morfológica 58
3.2.4 Densidade 59
3.2.4.1 Material Inerte: Material Misto < 8 mm 59
3.2.4.2 Fibras: Madeira, Plástico e Têxtil 60
3.2.5 Teor de Umidade 62
3.2.6 Compactação 62
3.2.7 Sólidos Voláteis 63

3.2.8 Apresentação e Análise dos Resultados 64
3.2.8.1 Composição Gravimétrica e Volumétrica 64
3.2.8.2 Distribuição Granulométrica 69
3.2.8.3 Classificação Morfológica 70
3.2.8.4 Densidade 71
3.2.8.4.1 Material Misto < 8 mm 71
3.2.8.4.2 Madeira, Plástico e Têxtil 72
3.2.8.5 Teor de Umidade 72
3.2.8.6 Compactação 73
3.2.8.7 Sólidos Voláteis 75
4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS 76
4.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO DOS RSU 76
4.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL DOS RSU 80
4.2.1 Ensaios com Amostras de RSU 85
4.2.1.1 Amostras sem Acréscimo de Fibras (Material misto < 8 mm) 86
4.2.1.2 Amostras com a Composição determinada na Composição Gravimétrica 91
4.2.1.3 Amostras com Acréscimo de Fibras de Madeira 97
4.2.1.3.1 Resumo dos Parâmetros de Resistência com Inclusão das Fibras de Madeira 109
4.2.1.4 Amostras com Acréscimo de Fibras de Plástico 110
4.2.1.4.1 Resumo dos Parâmetros de Resistência com Inclusão das Fibras de Plástico 123
4.2.1.5 Amostras com Acréscimo de Fibras de Têxtil 124
4.2.1.5.1 Resumo dos Parâmetros de Resistência com Inclusão das Fibras de Têxtil 137
4.2.1.6 Comparação dos Ensaios da Matriz Básica e Matriz Composta 138
4.2.1.6.1 Reforçada com as 13,54% de Fibras - Madeira, Plástico e Têxtil 139
4.2.1.6.2 Comparação das Amostras de RSU 143
5 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRAÇÃO ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 150

5.1 MODELO GEOTÉCNICO BASEADO NO EFEITO DAS FIBRAS PARA ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DOS RSU PROPOSTO POR KÖLSCH...150
5.2 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRAÇÃO A PARTIR DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL DOS RSU.....154
6 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 165
6.1 MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANO (KÖLSCH, 1996) 166
6.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANO SIMULADO.....169
6.2.1 Metodologia 170
6.2.1.1 Software 170
6.2.1.2 Geometria.....171
6.2.1.3 Casos Considerados nas Análises de Estabilidade.....173
6.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....175
6.3.1 Caso 1 - Aterro de Médio Porte 176
6.3.2 Caso 2 – Aterro de Grande Porte 179
6.3.3 Considerações Finais 184
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....186
7.1 CONCLUSÕES 186
7.1.1 Ensaios de caracterização dos resíduos sólidos urbanos.....186
7.1.2 Ensaios de cisalhamento direto.....188
7.1.3 Obtenção dos parâmetros de tração através dos ensaios de cisalhamento direto.....189
7.1.4 Análise de estabilidade de talude 190
7.1.5 Considerações finais 191
7.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....192
REFERÊNCIAS.....193
ANEXO A – GGU STABILITY 203

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as considerações iniciais a respeito dos estudos dos resíduos sólidos urbanos, bem como a motivação que levou a realização dessa pesquisa e sua estrutura.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento demográfico e econômico das cidades aumentou consideravelmente o consumo de produtos descartáveis e de baixa durabilidade, fazendo crescer a produção de resíduos sólidos urbanos (RSU). Diante disso, a gestão desses resíduos torna-se cada vez mais complexa, especialmente, no que concerne a sua eliminação.

O tratamento e a disposição final ou eliminação dos resíduos sólidos urbanos tornaram-se bastante expressivos nos últimos anos devido a grande preocupação com a conservação e a preservação do meio ambiente, preocupação diretamente relacionadas à saúde pública e a melhoria da qualidade de vida.

A prática correta mais comum de disposição final dos RSU no Brasil nos últimos anos é a disposição em aterros sanitários por representar uma solução técnica, ambiental e economicamente mais viável. Fucale (2005) enumera as consequências mais importantes decorrentes de uma inadequada disposição dos resíduos sólidos, sendo elas a poluição da água subterrânea e superficial, poluição do ar e do solo, escorregamentos de massas e degradação de áreas adjacentes.

O Brasil, a exemplo de nações desenvolvidas como os Estados Unidos, o Canadá, os países europeus e o Japão, procurou estabelecer normas em âmbito nacional para o gerenciamento dos resíduos sólidos, elaborando em 2010 a Lei Federal nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), cuja implementação deveria ser realizada em 2014. Todavia, muitos municípios tiveram dificuldades no cumprimento dos prazos estipulados.

Entre as muitas exigências da nova Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), uma de bastante destaque é a erradicação e recuperação de *lixões*.

O projeto de Lei nº 2.289/2015, aprovado no Senado estava em tramitação na Câmara dos Deputados, buscando prolongar os prazos pré-estabelecidos no PNRS. Ao que se refere a eliminação dos vazadouros. Os novos prazos seriam variados,

dependendo da localidade e do número de habitantes do município, sendo de 31 de julho de 2018 a 31 de julho de 2021. Porém, um novo projeto de Lei nº 3.261/2019, 2019 visa alterar novamente os prazos estabelecidos pelo Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Atualmente, para se cumprir a PNRS, antes de encaminhar os resíduos sólidos ao aterro sanitário, deve-se, primeiramente, reciclá-los, tratá-los e/ou reutilizá-los, visando prolongar sua vida útil. Assim, devem ser enviados para o aterro sanitário apenas rejeitos, que são os resíduos que não podem ser mais recuperados sob nenhuma forma ou, ainda, aqueles para os quais não existe mercado (Jucá et al., 2014).

O comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos ainda hoje é tratado segundo os métodos clássicos da mecânica dos solos, porém uma das suas principais propriedades, a resistência ao cisalhamento, mostra que tais métodos não são adequados quando tratamos de resíduos sólidos urbanos. É que a resistência é originada não só pelo atrito entre os grãos, mas também pela tração entre as fibras presentes na massa de resíduos, assemelhando-se ao comportamento de um solo reforçado, onde o material composto é constituído de dois componentes: a matriz básica compreendida pelas partículas granulares finas à média e outra matriz de reforço contendo os materiais fibrosos dos resíduos sólidos (plásticos, têxteis, entre outros).

As principais propriedades mecânicas dos RSU são diretamente influenciadas pela sua composição, bem como pelo comportamento de cada componente presente. Por se tratar de um material heterogêneo, torna-se difícil quantificar e qualificar suas propriedades, uma vez que cada componente trabalha de uma forma diferente devido às alterações sofridas por eles no decorrer do tempo, como características de biodegradação, formas e dimensões, fatos que dificultam a elaboração de amostras e realização de ensaios.

A resistência ao cisalhamento dos RSU é importante para a análise de estabilidade de taludes dos aterros sanitários, representada não só pelos parâmetros coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), mas também pelos ângulo de tensão de tração (ζ), fator de correção para a ativação das fibras (a_ζ) e tensão de tração das fibras (z_{max}), pois de acordo com o modelo de resistência proposto para os RSU por Kölsch (1996), baseado nos modelos originalmente aplicados para as estruturas de terra armada, é considerado o conceito que mais se aproxima da realidade. Devido a isto, o

conhecimento desses parâmetros é de extrema importância para os projetos de aterros sanitários (Corrêa, 2013).

Segundo Fucale (2005), o modelo proposto por Kölsch (1993,1995,1996) consiste no estado atual da arte em uma análise mais realística da capacidade de carga de aterros sanitários. Esse modelo admite que materiais fibrosos presentes na composição dos RSU criem forças resistentes de tração que dependem do entrosamento destas fibras com a massa do resíduo, sendo função da tensão normal e do tipo de compactação.

Os modelos geomecânicos convencionais são bastante desenvolvidos no que diz respeito aos efeitos das cargas e deslizamentos. Porém, tanto a presença quanto o impacto das partes sólidas degradáveis não são levados em consideração. Apenas simplificações são utilizadas nestes casos. Por este motivo, novos estudos geotécnicos dos resíduos sólidos urbanos visam uma melhor compreensão e esclarecimento do comportamento mecânico de aterros sanitários.

McDougall (2007) apresenta uma estrutura conceitual para a análise de assentamentos e outros processos em resíduos aterrados em relação a associação das partes hidráulica, biodegradação e comportamento mecânico.

A motivação desta pesquisa foi a necessidade de melhorias em projetos de aterros sanitários visando à parte mecânica, sobretudo a resistência ao cisalhamento, pois serão erradicados todos os lixões do Brasil em breve e novos aterros sanitários serão projetados para se adequar ao PNRS.

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A prefeitura do Recife destina praticamente todos os seus resíduos sólidos urbanos aos aterros sanitários. Apenas cerca de 2% dos resíduos são reciclados ou compostados na cidade do Recife, ao contrário do que ocorre em países desenvolvidos onde encontramos percentuais de reciclagem e compostagem bem mais elevados. De acordo com a United States Environmental Protection Agency (EPA, 2019) a reciclagem dos Estados Unidos no ano de 2017 de 67,2 milhões de toneladas, cerca de 25% dos resíduos gerados, comprovando a necessidade do melhoramento da destinação final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Esta pesquisa dá continuidade aos trabalhos desenvolvidos pelo Grupo de Resíduos Sólidos - GRS da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE,

compreendendo a necessidade de obtenção de critérios e parâmetros de resistência dos RSU, busca-se avaliar o efeito individual e conjunto das principais diferentes fibras encontradas nos aterros sanitários brasileiros com objetivo de estabelecer relações entre teoria e prática para melhoramento das concepções e controles de projetos futuros.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos dessa pesquisa estão divididos em geral e específicos, como indicado.

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar a resistência ao cisalhamento dos RSU, considerando o efeito de reforço dos materiais fibrosos constituintes dos resíduos. Procura-se analisar os parâmetros obtidos para compreender a parcela de contribuição dos componentes fibrosos da massa de RSU. Além disso, vai-se buscar realizar diferentes análises de estabilidade para aterros com geometrias comumente praticadas no Brasil, de diferentes portes, e avaliar o efeito das fibras na estabilidade.

Por fim, a partir dessas análises, buscar-se-á obter um prognóstico dos aterros visando à erradicação de certos componentes nos aterros a fim de aumentar a reciclagem dos resíduos, aumentar a vida útil dos aterros e, consequentemente, contribuir para uma melhor relação entre o ser humano e o meio ambiente.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

a) Realizar a caracterização física, química e biológica importantes para a compreensão dos resíduos sólidos estudados com ênfase na composição gravimétrica e volumétrica;
b) Obter os parâmetros de resistência a partir dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto convencional, realizando estes ensaios para a matriz

básica e para a massa de RSU com a percentagem de fibras encontradas em campo;

c) Determinar a parcela resistência ao cisalhamento referente ao efeito das fibras na massa de resíduos sólidos urbanos, os parâmetros de tração, através dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto;
d) Realizar análises de estabilidade de um talude, empregando geometrias usuais de projetos de aterros sanitários no Brasil, utilizando os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, obtidos por meio de ensaios de laboratório e cálculos, considerando o efeito das fibras;

1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA

Para que os objetivos supramencionados fossem cumpridos foi adotada a seguinte metodologia:

a) Revisão bibliográfica sobre o atual estado de conhecimento dos temas envolvidos;
b) Coleta e preparação de amostras dos RSU;
c) Caracterização das amostras de RSU para classificar e quantificar os materiais constituintes;
d) Realização de ensaios de laboratório, com destaque ao cisalhamento direto convencional em amostras de resíduos sólidos estabilizados;
e) Análise e interpretação dos resultados dos ensaios com trabalhos de outros pesquisadores;
f) Obtenção, análise e interpretação dos parâmetros de tração através dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto;
g) Análises de estabilidade de taludes de aterros sanitários teóricos através do uso do programa GGU-Stability, o qual permite incorporar o efeito dos materiais fibrosos nos cálculos.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

A tese é dividida em sete capítulos. Além deste, apresentam-se:

2 – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Os conceitos fundamentais referem-se às propriedades dos RSU, abordando-se composição, granulometria, classificação morfológica, peso específico e densidade, teor de umidade, compactação e biodegradação – sólidos voláteis.

3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL E CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

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

4 – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Apresenta-se uma breve referência sobre o tema, fazendo uma análise da resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos aterrados, com destaque para a influência das fibras na massa de resíduos, dando ênfase para o modelo geotécnico para resíduos sólidos desenvolvido pela comunidade científica alemã através do ensaio de resistência ao cisalhamento e tração; a preparação das amostras; moldagem dos corpos de prova; metodologia e resultados e discussões dos ensaios de cisalhamento direto convencional realizados para diferentes composições de RSU. Nas análises dos resultados dos parâmetros de resistência obtidos nos ensaios são avaliadas a influência das fibras na resistência ao cisalhamento e seus parâmetros.

5 – OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRAÇÃO POR MEIO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Apresenta a referência bibliográfica sobre o modelo geotécnico baseado no efeito das fibras para análise da resistência dos RSU proposto por Kölsch (1996), metodologia, formulação e resultados e discussões dos valores encontrados e calculados.

6 – ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Apresentam-se análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU simulado com geometrias típicas projetadas no Brasil considerando os dados obtidos nesta pesquisa para avaliação do efeito das fibras como componente de reforço.

7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Apresenta-se o resumo das principais conclusões desta tese e sugestões de investigações para desenvolvimento de pesquisas futuras.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O capítulo irá abordar as principais propriedades físicas dos resíduos sólidos para realização deste trabalho, como também a propriedades biológica.

2.1 PROPRIEDADES DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os conceitos das propriedades físicas dos resíduos sólidos estudados para melhorar os ensaios e análises são: composição, granulometria, classificação morfológica, peso específico, teor de umidade e compactação. Já os sólidos voláteis teve o intuito de analisar o grau de degradabilidade.

2.1.1 Composição

Os resíduos sólidos urbanos são constituídos por uma mistura bastante heterogênea, evolutiva e multifásica (sólida, líquida e gasosa). Segundo Grisolia *et al*. (1995), a fase sólida divide-se em três grupos: materiais inertes, altamente deformáveis (ex.: fibras) e facilmente degradáveis (ex.: matéria orgânica). Tanto a fase líquida como a gasosa dependem dos processos de biodegradação. Sabendo disso, a fase líquida é constituída pela infiltração de água, em sua maioria proveniente das chuvas, e pelos líquidos gerados na biodegradação (lixiviado), e a fase gasosa pelos gases resultantes da biodegradação e ar.

Os RSU dependem de diversos fatores como o clima, hábitos, tempo, estações do ano e o desenvolvimento socioeconômico da região em estudo, razão pela qual é necessária cautela ao analisar dados disponíveis na literatura.

Os métodos de gestão de resíduos sólidos municipais estão se tornando gradativamente mais complexos em vários países, passando de soluções baseadas em aterros sanitários para recuperação baseada em recursos, objetivando a redução dos resíduos encaminhados ao aterro sanitário e aumentando as taxas de reciclagem e recuperação. Ademais, já está sendo utilizada em alguns países a prática de extração dos aterros sanitários, a qual consiste em extrair todos os materiais recicláveis aterrados, recuperação de material granular (solo) para uso como camada de cobertura e/ou intermediária em aterros ativos e a recuperação da área para reconstrução em razão da expansão urbana.

O conhecimento detalhado da composição dos resíduos é de suma importância para o estabelecimento de metas de gestão dos RSU, bem como para o estudo das propriedades geomecânicas dos resíduos e, consequentemente, no controle de movimentação de massa dos aterros sanitários. Além disso, permite a determinação da matéria degradável, indispensável para os projetos de drenagens de gases, percolados e prognóstico dos recalques nos aterros sanitários.

A composição física dos resíduos é dividida em duas, gravimétrica e volumétrica, sendo a gravimétrica utilizada de forma mais ampla nos estudos de gestão dos RSU.

2.1.1.1 Gravimétrica

A composição gravimétrica consiste na determinação dos percentuais em peso dos seus principais componentes encontrados na massa de resíduos. O nível de detalhamento da caracterização depende do objetivo do trabalho, podendo ser mais relevante a caracterização de um ou mais componentes.

Há várias recomendações de classificações de resíduos tendo um maior ou menor número de variáveis, porém nenhum nacional de caráter oficial.

De acordo com Gomes (2008), o *Bureau of Solid Waste Management* sugere nove classes para caracterização dos RSU: resíduos de poda; de alimentos; papel; plástico, borracha e couro; têxteis; madeira; materiais metálicos; vidros e cerâmicas; cinzas, rochas e solos. Já a ADEME – *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie* (ADEME, 2014), considera 13 categorias de detalhamento na composição (Tabela 1). Também tem a Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA – EMPEFEHLUNGEN E 1-7, *Identifizierung von Abfällen und Stoffgruppen* (DGGT, 1997), a qual divide os resíduos em 12 diferentes grupos (Tabela 2).

Tabela 1 - Composição dos Resíduos segundo a ADEME – Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.

CATEGORIAS	COMPONENTES
Resíduos Putrescíveis	Resíduos alimentares (restos de cozinha não consumíveis)
	Produtos alimentares não consumidos
	Outros putrescíveis
	Resíduos de jardim
Papel	Embalagens de papel
	Jornais e revistas
	Material publicitário
	Papéis de escritório
	Outros papéis
Papelão	Embalagens de papelão plano
	Embalagens de papelão ondulado
	Outros papelões
Compósitos	Embalagens de líquidos alimentares
	Outras embalagens compostas
	Pequenos eletrodomésticos
	Cabos elétricos
Têxtil	Têxteis
Têxtil Sanitário	Têxteis sanitários da fração higiênica
	Têxteis sanitários da fração de papéis contaminados
Plástico	Plástico filme em poliolefina (PE e PP)
	Garrafas, frascos e recipientes em PET
	Garrafas, frascos e recipientes em poliolefina
	Outras embalagens plásticas
	Outros plásticos
Combustíveis não Especificados	Embalagens de madeira
	Outros combustíveis
Vidro	Embalagens de vidro incolor
	Embalagens de vidro colorido
	Outros vidros
Metal	Embalagens de metal ferroso
	Embalagens de alumínio
	Outros metais ferrosos
	Outros metais
Incombustíveis não Especificados	Embalagens de incombustíveis
	Outros incombustíveis
Resíduos Domésticos Perigosos	Resíduos específicos misturados
	Tubos fluorescentes e lâmpadas de baixo consumo
	Pilhas e baterias
	Resíduos de atividades perfurante (ex.: agulhas)
	Óleos minerais
	Cartuchos de impressora
	Garrafa de gás
	Medicamentos não utilizados
	Outros resíduos domésticos perigosos
Elementos Finos	Elementos finos entre 8 e 20 mm
	Elementos finos < 8 mm

Fonte: ADEME (2014).

Tabela 2 - Composição dos Resíduos segundo a Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA – EMPEFEHLUNGEN E 1-7, Identifizierung von Abfällen und Stoffgruppen.

CATEGORIAS		COMPONENTES
Grandes partes		Resíduos volumosos constituídos por vários componentes. Ex.: Mobiliário; colchão; etc.
Papelão/papel		Resíduos constituídos predominantemente de fibras de papel. Ex.: papel; papelão; material impresso; papel de parede; etc.
Plásticos moles/ macios		Resíduos constituídos principalmente por substâncias sintéticas macias ou cujas propriedades são dominadas por tais substâncias. Ex.: embalagens (sacolas); filmes; selantes; borracha com couro macio (vestuário, coberta de móveis) ou têxtil; etc.
Plásticos duros/ rígidos		Resíduos constituídos predominantemente por materiais sintéticos duros. Ex.: embalagens (copos de iogurte); plástico rígido; etc.
Metais		.....
Minerais		Resíduos constituídos principalmente por substâncias minerais ou com comportamento mecânico e biológico semelhante (inerte). Ex.: vidro; cerâmica; etc.
Madeira		.....
Orgânico		Resíduos de origem orgânica natural. Ex.: legumes; gramados; arbustos; folhagem; etc.
Lama		.....
Materiais misto	**Grãos 40-120 mm**	Partículas de tamanhos entre 40 e 120 mm determinadas por peneiramento.
	Grãos 8 - 40 mm	Partículas de tamanhos entre 8 e 40 mm determinadas por peneiramento.
	Grãos < 8 mm	Partículas de tamanhos menores ou iguais que 8 mm determinadas por peneiramento.

Fonte: DGGT (1997).

Uma outra metodologia diferenciada para caracterização dos RSU é apresentada pela Zero Waste Scotland (2017). Esta é direcionada apenas para os RSU residenciais e consiste em dividir a composição dos resíduos em dois níveis de categorização. O primeiro nível considera 17 variedades para a caracterização dos resíduos: vidros; papéis e papelões; metais ferrosos e não ferrosos; garrafas de plástico; plásticos densos; plásticos filme; resíduos de jardim; resíduos de alimentos; madeiras de resíduos de jardim e não móveis; equipamentos elétricos e eletrônicos; pneus; combustíveis variados; têxteis e calçados; não combustíveis variados; resíduos perigosos; resíduos de saúde; finos (< 10 mm). Enquanto o segundo nível subdivide as categorias do nível um para separar os materiais recicláveis dos não recicláveis (Tabela 3).

Tabela 3 - Composição dos resíduos e as estimativas nacionais (Escócia) da composição doméstica analisando o conteúdo reciclável.

Categoria Nível 1	Categoria Nível 2	Tipicamente Reciclável Categoria Domiciliar	Conteúdo Biodegradável (%)
Vidro	Embalagem de vidro verde	Vidro	0
	Embalagem de vidro marrom	Vidro	0
	Embalagem de vidro incolor	Vidro	0
	Outros vidros	Não reciclável	0
Papel e Papelão	Jornais e revistas	Papel	100
	Outros papéis recicláveis	Papel	100
	papéis não recicláveis	Não reciclável	100
	Embalagem cartão	Cartão	100
	Embalagem cartão fino	Cartão	100
	Outros cartões	Cartão	100
	Livros	Papel	100
	Listas telefónicas e classificados impressos	Papel	100
	Embalagem de papelão para bebidas/ caixas	Papelão	50
Metais Ferrosos e não Ferrosos	Latas - aço	Metal	0
	Latas - alumínio	Metal	0
	Embalagem de alumínio	Metal	0
	Outros resíduos metálicos	Não reciclável	0
	Aerosol - alumínio	Metal	0
	Aerosol - aço	Metal	0
Garrafas de Plástico	Garrafa de bebida em PEAD	Plástico	0
	Garrafa de bebida em PET	Plástico	0
	Outras garrafas plásticas	Plástico	0
Plástico Denso	Embalagem de plástico denso (ex.: EPS)	Plástico	0
	Outras embalagens de plástico denso	Não reciclável	0
	Fitas de vídeo, DVDs e CDs	Não reciclável	0
	Outros plásticos densos - não embalagem	Não reciclável	0
Plástico Filme	Sacolas plásticas	Não reciclável	0
	Sacos de lixo	Não reciclável	0
	Outros plásticos filmes	Não reciclável	0
Resíduos de Jardim	Resíduos de jardim verde	Resíduos de jardim	100
	Resíduos de jardim arborizado e volumoso	Resíduos de jardim	100
	Terra	Resíduos de jardim	0
Resíduos de Alimentos	Resíduos alimentares evitáveis	Resíduos de alimentos	100
	Resíduos alimentares inevitáveis	Resíduos de alimentos	100
	Óleo/gordura de cozinha	Resíduos de alimentos	100
Madeira de Resíduos de Jardim e não móveis	Madeira - tratada	Não reciclável	100
	Madeira - não tratada	Não reciclável	100
	Painel de madeira e MDF	Não reciclável	100
	Materiais de madeira compostos	Não reciclável	50
Equipamento Elétrico e Eletrônico - EEE	EEE - aparelhos domésticos grandes	Não reciclável	0
	EEE - aparelhos domésticos pequenos	Não reciclável	0
	EEE - tubos de raios catódicos	Não reciclável	0
	EEE - geladeiras e congeladores	Não reciclável	0
Pneu	Pneus	Não reciclável	0
Materiais Combustíveis Variados	Mobiliária maleável	Não reciclável	50
	Móveis de madeira	Não reciclável	50
	Velharias - pequenos objetos	Não reciclável	50
	Colchões	Não reciclável	50
	Outros materiais combustíveis	Não reciclável	0
Têxtil e Calçado	Vestuário têxtil	Não reciclável	50
	Sapatos, cintos e bolsas	Não reciclável	50
	Tapetes e bases	Não reciclável	50
	Não vestuário têxtil	Não reciclável	50
	Entulho	Não reciclável	0

Materiais não combustíveis Variados	Placas de gesso	Não reciclável	0
	Outros resíduos da construção e demolição	Não reciclável	0
	Outros materiais não combustíveis	Não reciclável	0
Resíduos Perigosos	Extintores de incêndio	Não reciclável	0
	Garrafas de gás	Não reciclável	0
	Cartuchos de tinta e toner	Não reciclável	0
	Tinta	Não reciclável	0
	Pesticidas, vernizes, tintas e outros produtos químicos	Não reciclável	0
	EEE - tubos fluorescentes e outras lâmpadas	Não reciclável	0
	Óleo mineral	Não reciclável	0
	Baterias automotivas	Não reciclável	0
	Baterias não automotivas	Não reciclável	0
Resíduos de Saúde	Fraldas descartáveis	Não reciclável	50
	Outros produtos absorventes de higiene	Não reciclável	50
	Resíduos de saúde potencialmente perigosos	Não reciclável	0
	Animais mortos	Não reciclável	100
	Excremento de animais e roupas de cama	Não reciclável	100
Finos < 10 mm	Finos < 10 mm	Não reciclável	0

Fonte: ZERO WASTE SCOTLAND (2017).

Uma visão geral da composição gravimétrica dos resíduos sólidos em alguns países é ilustrada na Tabela 4.

Além disso, na Tabela II.5, tem-se a composição detalhada dos RSU da cidade do Recife, no ano de 2014, realizada pelo Grupo de Resíduos Sólidos (GRS) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), através da Associação Tecnológica de Pernambuco (Atepe). Neste estudo, foram analisados 31 setores, abrangendo toda rota de coleta. Os setores foram selecionados principalmente através de populações com classes socioeconômicas distintas e de zonas geográficas específicas (ATEPE/GRS - UFPE, 2014).

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam a composição gravimétrica dos RSU da cidade de Recife - PE realizadas por (SECRETARIA DAS CIDADES - PE, 2008), (MOTTA, 2011) e (ATEPE/GRS - UFPE, 2014), respectivamente.

Quando compara-se os percentuais de plásticos apresentados pela Secretaria das Cidades - PE (2008) com os de Motta (2011) e Atepe/GRS - UFPE (2014), pode-se observar uma diferença significativa. No primeiro, a cidade do Recife apresenta 7%, enquanto nos outros trabalhos variam de 20 a 23%. Esta diferença pode ser atribuída a uma triagem prévia desse tipo de material ou até mesmo um aumento do consumo, visto que se trata de aproximadamente uma década. Um componente que teve um comportamento contrário ao apresentado pelo plástico foi a matéria orgânica. A matéria orgânica teve uma redução com o passar dos anos. Logo, é possível relacionar a mudança da composição gravimétrica dessas classes através das

mudanças socioculturais e econômicas da população local, pois sabe-se que quanto mais desenvolvida uma região, menor será o teor de matéria orgânica e maior o de plástico.

Tabela 4 - Composição gravimétrica percentual dos RSU de alguns países.

País	Ano	Papel/ Cartão	Matéria Orgânica	Plástico	Vidro	Metal	Têxtil	Outros
Albania[1]	2010	13.4	47.0	13.2	5.8	1.1	5.3	10.4
Algeria[1]	2010	9.2	61.7	11.9	1.3	2.5	11.3	2.1
Andorra[1]	2012	35.1	31.2	11.3	8.2	2.6	7.8	3.8
Angola[1]	2008	11.9	51.8	13.5	6.7	4.4	6.1	5.4
Armênia[1]	2007	11.5	51.3	9.8	8.7	5.0	2.0	11.7
Belarus[1]	2012	28.0	29.0	10.0	13.0	7.0	7.0	6.0
Belize[1]	2010	16.0	38.0	19.0	8.0	5.0	...	14.0
Bermudas[1]	2010	29.0	17.0	13.0	9.0	6.0	17.0	9.0
Brazil[2]	2012	13.1	51.4	13.5	2.4	2.9	...	16.7
Butão[1]	2012	25.3	49.0	13.7	3.6	0.5	3.0	4.9
Burkina Faso[1]	2012	6.8	41.7	10.1	1.9	1.6	2.4	35.5
Camarões[1]	2008	2.1	83.4	3.3	0.1	0.7	2.8	7.6
Camboja[1]	2005	5.2	69.9	17.8	0.8	0.7	2.6	2.8
Chile[1]	2009	10.3	48.6	11.1	6.6	3.3	3.5	16.6
Cingapura[1]	2012	18.9	29.5	24.6	1.9	2.7	4.8	17.6
Costa Rica[1]	2005	20.6	49.8	17.7	2.3	2.1	4.1	3.4
Cuba[1]	2005	12.3	68.9	9.6	4.6	1.6	3.0	...
Estado Palestino[1]	2012	15.0	59.0	12.0	4.0	4.0	0.0	6.0
Egito[1]	2012	12.0	55.0	12.5	2.5	2.0	2.0	14.0
El Salvador[1]	2011	12.0	65.0	10.0	4.0	2.0	2.0	5.0
Escócia*[3]	2015	20.2	39.9	12.4	8.0	3.5	...	16.0
EUA[4]	2005	34.0	25.0	12.0	5.0	8.0	...	16.0
Filipinas[1]	2010	12.0	50.0	25.0	3.0	5.0	0.0	5.0
França[5]	2007	21.3	25.1	11.0	11.0	2.9	1.9	28.7
Georgia[1]	2007	34.0	39.0	3.0	3.0	5.0	5.0	11.0
Guatemala[1]	2006	18.5	0.2	12.9	5.2	0.0	4.6	11.4
Guiné[1]	2007	9.0	58.0	4.0	1.0	1.0	4.0	23.0
Guiana[1]	2009	10.0	53.0	18.0	5.0	4.5	5.0	4.5
Hong Kong, China[1]	2009	23.0	41.4	19.0	3.6	1.9	2.8	8.3
Indonésia[1]	2012	14.9	53.8	14.0	2.5	1.8	1.1	11.9
Israel[1]	2005	25.0	39.7	13.5	2.9	2.6	3.9	12.4
Jamaica[1]	2013	14.8	62.2	12.2	2.8	2.4	5.1	0.5
Kuwait[1]	2013	20.0	47.0	20.0	3.5	1.5	3.0	5.0
Macao, China[1]	2009	19.9	54.2	9.4	6.3	2.4	0.3	7.4
Martinica[1]	2011	20.2	24.9	12.2	8.8	5.2	1.8	26.9
Sérvia[1]	2012	16.7	43.5	15.0	5.3	1.8	5.0	12.7
Suriname[1]	2006	8.8	...	10.5	5.4	2.7	...	...
Tailândia[1]	2006	29.1	6.3	11.2	23.4	27.2	...	2.8
Togo[1]	2012	4.0	38.0	10.0	2.0	4.0	3.0	39.0
Uganda[1]	2006	6.0	74.5	7.6	0.8	0.6	1.2	9.4
Zimbabwe[1]	2012	17.0	25.0	16.0	5.8	4.6	2.5	29.1

*Resíduos sólidos domésticos

Fonte: [1](UNSD, 2016); [2](ABRELPE, 2012) 3 [4](OECD, 2008) apud (UNSD, 2016); [5](ADEME, 2010).

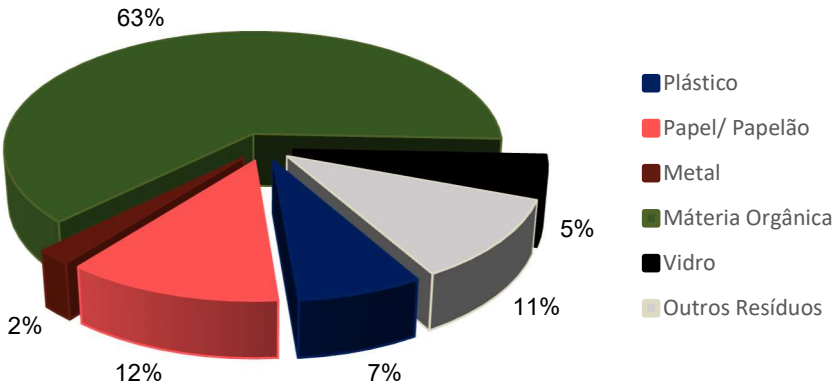
Tabela 5 - Composição gravimétrica percentual dos RSU da cidade do Recife no ano de 2014.

Categorias		Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Médio
Plástico	Plástico Filme	20.51	7.92	14.41
	PET	7.55	0.30	1.99
	PEAD	3.51	0.46	1.40
	PP	1.57	0.29	0.74

	PEBD	0.71	0.00	0.38
	PVC	0.82	0.00	0.33
	Outros Plásticos	4.08	0.65	1.47
Papel/ Papelão		20.18	6.62	12.02
Metal		4.97	0.42	2.01
Têxtil		10.86	1.06	4.06
Matéria Orgânica	**Resíduos de Jardim**	11.06	0.59	3.90
	Resíduos de Alimentos	41.70	13.98	26.79
Madeira/ Coco		26.72	0.38	5.33
Sanitários		12.55	4.21	7.99
Vidro		5.55	0.29	1.86
Jornal/ Revista		15.21	0.27	3.36
Compósitos		6.58	0.15	3.11
Isopor		2.67	0.00	1.20
Borracha/ Couro		3.75	0.03	0.98
Resíduos Perigosos		5.95	0.00	0.66
Outros Resíduos		10.48	1.58	6.01

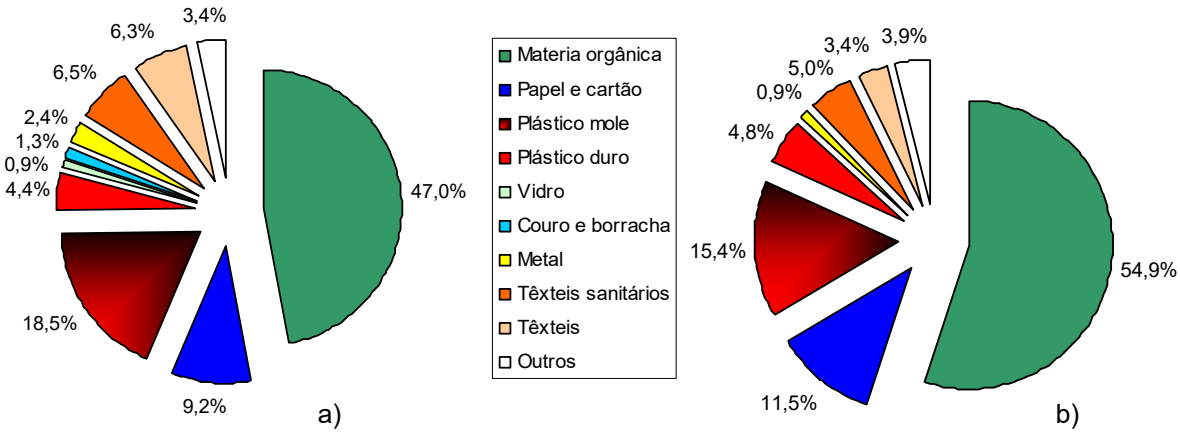
Fonte: ATEPE/GRS - UFPE (2014).

Figura 1 - Composição gravimétrica dos resíduos da cidade do Recife em 2002, pela consultora Contécnica, contratada pela Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente – SECTMA, para o Projeto de Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica – PQA.



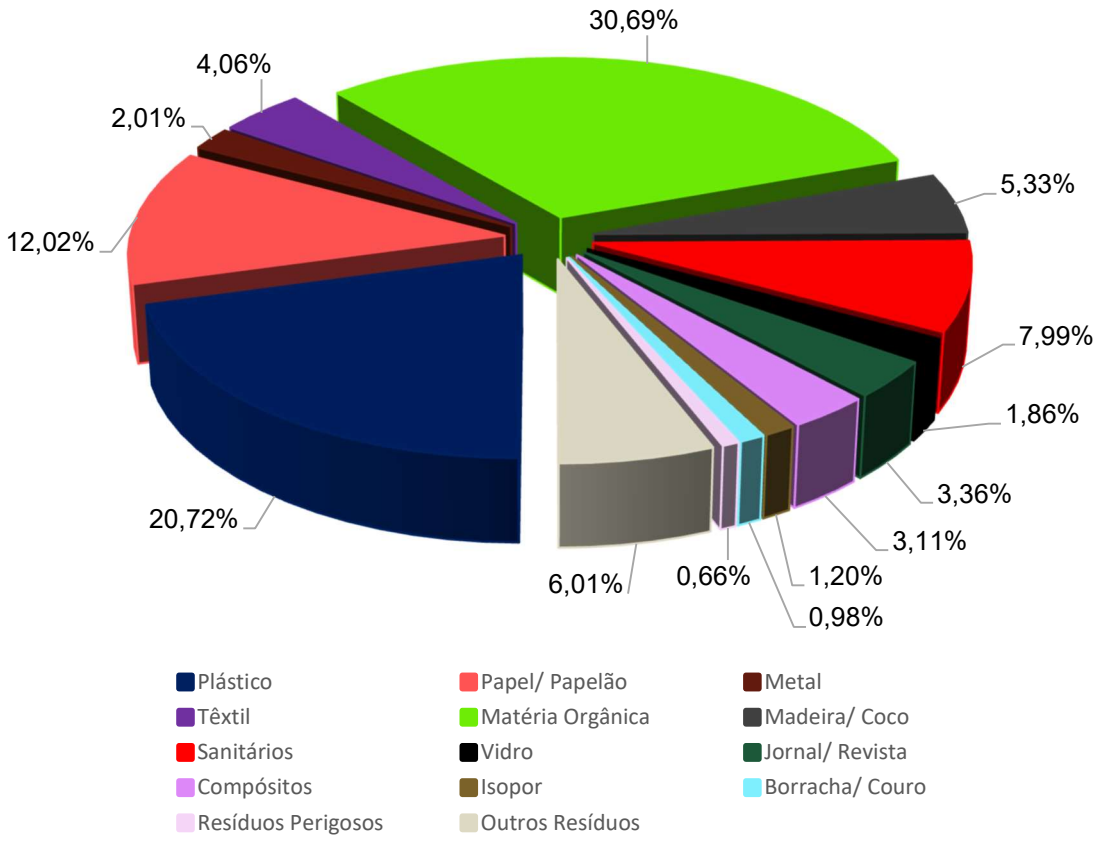
Fonte: SECRETARIA DAS CIDADES (2008).

Figura 2 - Composição gravimétrica do RSU do Aterro da Muribeca (a) e do CTR Igarassu (b).



Fonte : MOTTA (2011).

Figura 3 - Composição gravimétrica do RSU da cidade do Recife.



Fonte: ATEPE/GRS - UFPE (2014).

2.1.1.2 Volumétrica

A composição volumétrica consiste na obtenção percentual dos volumes dos componentes dos RSU. O nível de detalhamento da caracterização será determinado de acordo com a sua finalidade, assim como a gravimétrica, podendo enfatizar determinadas classes. Todavia, a composição volumétrica é pouco explorada na literatura devido às poucas opções de metodologias nos procedimentos deste ensaio.

Apesar de pouco explorado, o conhecimento da composição volumétrica é essencial para todas as etapas do gerenciamento dos resíduos sólidos, principalmente na destinação final, pois através deste estudo é possível ter uma previsão real do espaço físico ocupado por cada fração dos resíduos e, portanto, estipular corretamente a vida útil do aterro sanitário e a avaliação do comportamento geotécnico do maciço.

Vale lembrar que a fração de plásticos pode representar 20% em peso, nos grandes centros urbanos, como visto anteriormente, e pode atingir cerca de três vezes este percentual em volume. Desta forma, a retirada destes materiais dos RSU pode representar ganhos de vida útil. Por outro lado, pode afetar o comportamento geotécnico do aterro (CORRÊA, 2013).

A Tabela 6 traz os valores máximo, mínimo e médio da composição volumétrica da cidade do Recife no ano de 2014 (ATEPE/GRS - UFPE, 2014). Enquanto a Figura 4 apresenta de forma simplificada a média desta composição.

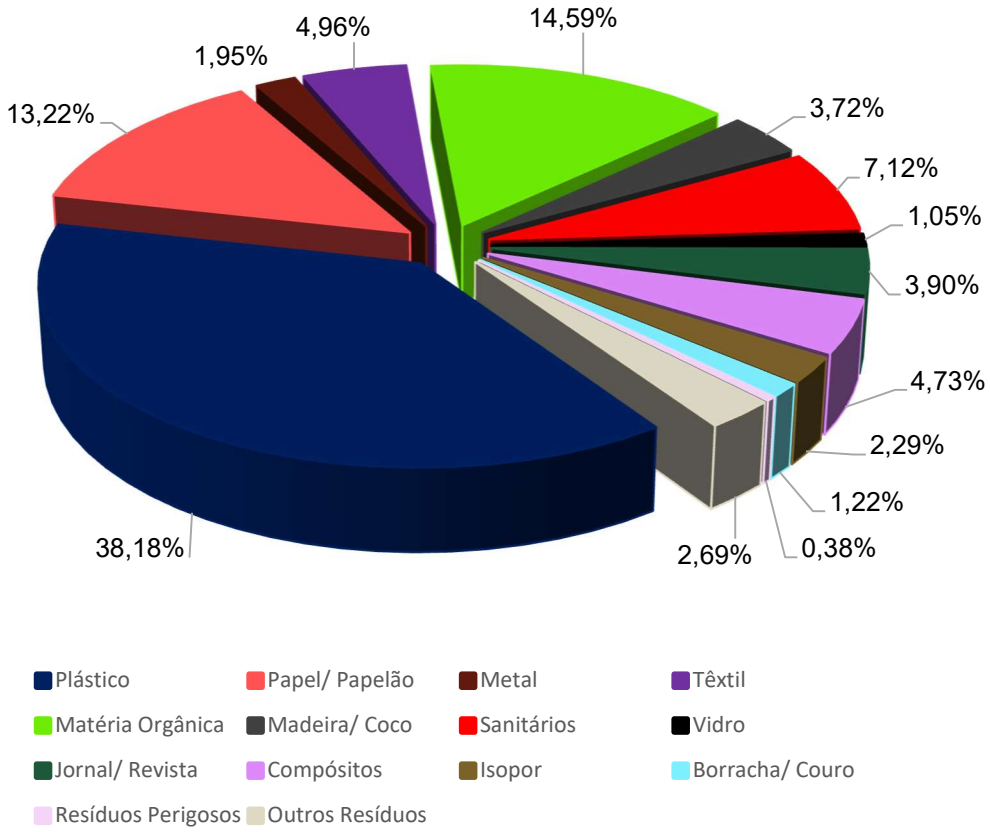
Tabela 6 - Composição volumétrica percentual dos RSU da cidade do Recife no ano de 2014.

CATEGORIAS		VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO	VALOR MÉDIO
Plástico	Plástico Filme	35.46	19.73	28.38
	PET	7.88	0.20	3.47
	PEAD	5.65	0.40	2.34
	PP	3.80	0.11	1.29
	PEBD	2.26	0.00	0.32
	PVC	1.90	0.00	0.27
	Outros Plásticos	8.25	0.34	2.11
Papel/ Papelão		21.98	7.57	13.22
Metal		3.99	0.77	1.95
Têxtil		12.58	1.56	4.96
Matéria Orgânica	Resíduos de Jardim	13.66	0.68	5.04
	Resíduos de Alimentos	14.81	5.42	9.55
Madeira/ Coco		12.91	0.30	3.72

Sanitários	11.30	4.41	7.12
Vidro	3.26	0.33	1.05
Jornal/ Revista	12.85	0.91	3.90
Compósitos	9.12	0.23	4.73
Isopor	5.18	0.00	2.29
Borracha/ Couro	4.29	0.20	1.22
Resíduos Perigosos	3.01	0.00	0.38
Outros Resíduos	5.15	0.26	2.69

Fonte: ATEPE/GRS - UFPE (2014).

Figura 4 - Composição volumétrica do RSU da cidade do Recife.



Fonte: ATEPE/GRS - UFPE (2014).

2.1.2 Granulometria

Diversos estudos foram realizados para compreender o comportamento dos resíduos sólidos. A granulometria dos resíduos sólidos urbanos é discutido por Jessberger (1994); Gabr & Valero (1995); Carvalho (1999); Lamare Neto (2004); Alcântara (2007); Gomes (2008); Tapahuasco (2009); Borgatto (2010) e Corrêa (2013), pois o conhecimento do tamanho das partículas constituintes do RSU é

importante para um melhor gerenciamento de aterros (coleta, transporte, recuperação de materiais e disposição final), classificação dos resíduos, propriedades mecânicas e influência no processo de degradação da matéria orgânica devido à superfície específica (área de superfície/volume).

Em razão à grande heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos, a granulometria dos mesmos é muito variada e não existe um método padronizado para análise. No entanto, Kölsch (1995), obedecendo a recomendação técnica alemã GDA E 1-7 (DGGT, 1994), determinou a distribuição granulométrica dos RSU através do peneiramento com peneiras com abertura de 8, 40 e 120 mm. A partir de 120 mm, os materiais foram distinguidos visualmente nas frações de 500 e 1000 mm.

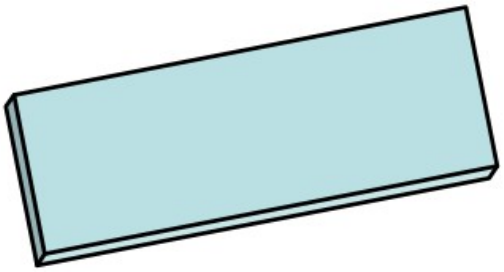
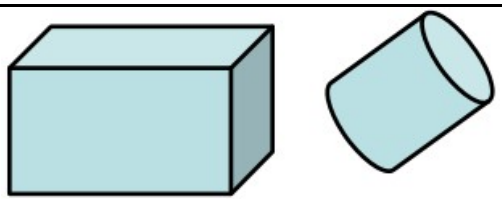
A análise granulométrica é comumente realizada utilizando tradicionalmente a mecânica dos solos. Assim, a composição granulométrica dos RSU os caracteriza como um material que apresenta elevado percentual de frações grosseiras (tamanho correspondente a pedregulhos) e com fração fina (partículas < 0,075 mm).

A biodegradação da matéria orgânica presente nos RSU aumenta o percentual da fração mais fina dos resíduos com o tempo. Assim, os resíduos estabilizados têm uma tendência a ter uma granulometria mais fina do que os resíduos frescos.

2.1.3 Classificação Morfológica

A classificação morfológica (forma das partículas) está diretamente relacionada com a granulometria (dimensão/tamanho das partículas). Segundo a Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA – EMPEFEHLUNGEN E 1-7, *Identifizierung von Abfällen und Stoffgruppen* (DGGT, 1997), a classificação morfológica subdivide os grupos apresentados na composição física quanto as suas formas, pois tais subdivisões apresentam comportamentos mecânicos distintos. A Tabela 7 apresenta de forma simplificada esta classificação.

Tabela 7 - Classificação morfológica dos RSU.

DIMENSÃO	CARACTERÍSTICAS	FORMA
0	Grãos (diâmetro < 8 mm)	
1	Fibras	
2	Folhas, objetos planos	
3	Volumes	

Fonte: (DGGT, 1997) apud (TAPAHUASCO, 2009).

Dixon & Langer (2006), assim como a recomendação alemã, baseia a classificação morfológica em observações dos componentes dos resíduos e em suas propriedades mecânicas dos componentes. Portanto, eles propuseram que a forma dos componentes dos resíduos possa ser caracterizada por um dos dois grupos baseados em suas propriedades mecânicas relacionadas à forma, em conjunto com suas subdivisões associadas:

a) Componentes de reforço – constituído por elementos unidimensionais e bidimensionais (exemplo: sacolas plásticas, folhas de papel);

b) Componentes tridimensionais –
    a. Componentes compressíveis
        → Alta compressibilidade (exemplo: materiais putrescíveis, embalagens plásticas);
        → Baixa compressibilidade (exemplo: latas de bebida);
    b. Componentes incompressíveis (exemplo: tijolos, pedaços de metal).

2.1.4 Peso Específico

O peso específico dos resíduos sólidos relaciona o peso do material com o seu volume. Este parâmetro desempenha um papel importante em vários procedimentos de um projeto de um aterro sanitário, pois serve de variável para cálculo da vida útil do aterro, aspectos gerais de coleta, disposição, aspectos mecânicos e biológicos.

Vários estudos avaliaram a densidade dos resíduos sólidos sob diferentes condições e abordagens, o que vem apresentado na Tabela 8.

O peso específico aparente seco é a forma usual de apresentar os pesos específicos, já que o peso específico aparente úmido pode ser posteriormente estimado para diferentes teores de umidade. Logo, tem-se que o peso específico se dá pela Equação 1. No entanto, a maioria dos dados encontrados na literatura dos RSU refere-se ao peso específico aparente úmido, sendo a forma mais usual de apresentar o peso específico para estes materiais devido a heterogeneidade da massa dos resíduos.

$$\gamma_{seco} = \frac{Peso\ Seco}{Volume\ Total} \qquad \gamma_{seco} = \frac{\gamma_{úmido}}{1+\omega\%} \qquad \rightarrow \qquad \gamma_{úmido} = \frac{Peso\ Total}{Volume\ Total} \quad (1)$$

O peso específico dos RSU é influenciado por uma variedade de fatores, dentre os quais se destacam a sua composição (heterogeneidade), a distribuição granulométrica, o grau de saturação, o grau de compactação, a idade do resíduo e a profundidade em que estiver aterrado.

Tabela 8 - Densidades e pesos específicos.

MATERIAL	**ρ_T (kg/m^3)**	**γ_T (kN/m^3)**
Água	998	9.77
Solo	1.680 – 1.920	16,4 – 18,8
Resíduos compactados recentemente - s/ solo (KAVAZANJIAN, 2001)	610 – 710	06 – 07
Resíduos escavados de uma camada superficial do aterro (Zornberg et al.,1999)	1.017–1.220	10 – 12
Resíduos escavados de uma camada profunda do aterro (Cowland et al., 1993)	1.330 – 1.530	13 – 15
Resíduos domésticos brutos recuperados da inclinação do aterro (Powrie et al., 1998)	500 – 1.180	4,90 – 11,6
Resíduos aterrados e camada de cobertura (Hull et al., 2005)	1.150	11,3
Aterro de RSU com amostras de 2 anos a uma profundidade entre 1.5m e 6m (Chiemchaisri et al., 2007)	240 – 1.260	2,35 – 12,4

Amostras de resíduos aterrados extraidos por furos a cada 1m de profundidade de um aterro encerrado em 1985 (Yaqout et al., 2007)	1.088 – 2.350	10,67 – 23,05
RSU coletados de uma estação de transferência (Hossain et al., 2009)	906,5 – 1.071	8,89 – 10,5
Aterro de RSU (Alasca), solo e solo aterrado (Hanson et al., 2008)	530	5,2
Aterro de RSU (Michigan), solo e solo aterrado (Hanson et al., 2008)	999	9,8
Aterro de RSU extraídos via perfuração (Machado *et al*., 2010) (Machado et al., 2010)	1.326 – 1.785	13 – 17,5
Biorreator de larga escala de RSU (Bareither et al., 2011)	510 – 714	5,0 – 7,0
Aterro de RSU na Espanha (Yu et al., 2011)	1.530 – 2.141	15 – 21
Aterro de RSU com compactação dinâmica através de rolamento (JIE et al., 2013)	1.590 – 2.130	15,6 – 20,9

Fonte: TOWNSEND et al. (2015).

2.1.5 Teor de Umidade

O teor de umidade dos resíduos se trata de um parâmetro que apresenta a variação de líquido presente nos RSU. A umidade dos resíduos, quando dispostos em aterros, depende da composição inicial dos resíduos, taxa de decomposição, conteúdo orgânico, condições climáticas (ex.: classificação Köppen e Geiger) e práticas de funcionamento do aterro (ex.: drenagem interna e superficial do maciço). O teor de umidade tende a aumentar com o aumento do percentual de matéria orgânica (LANDVA; CLARK, 1990). As condições climáticas variam este parâmetro de uma maneira muito fácil de identificar, pois em regiões de clima tropical, como o Recife, além da umidade da região, a temperatura favorece a biodegradação da matéria orgânica presente na massa de RSU, gerando mais lixiviado e consequentemente aumentando o teor de umidade. O contrário ocorre em regiões secas e de baixas temperaturas como na Nova Zelândia, por exemplo. Já em relação a profundidade, alguns estudos apresentam resultados contrários. Enquanto alguns observaram um aumento no teor de umidade com o aumento da profundidade (GABR; VALERO, 1995), (CARVALHO, 1999), (McDougall *et al*., 2004), (Gomes *et al*., 2005) e (ALCÂNTARA, 2007), outros diagnosticaram uma redução (COUMOULOS *et al*., 1995) e (ZORNBERG *et al*., 1999). McDougall *et al*. (2004), a partir de dados dos teores de umidade obtidos por Yuen (1999) em uma célula experimental no aterro sanitário de Lyndhurst em Vitoria, Austrália, realizou uma interpretação simplificada do histórico de umidade baseado em duas hipóteses. A primeira assumiu que o teor de umidade dos resíduos é uniforme, ou seja, não se altera do início ao fim do aterramento. A segunda hipótese é a de que o teor de umidade depende linearmente

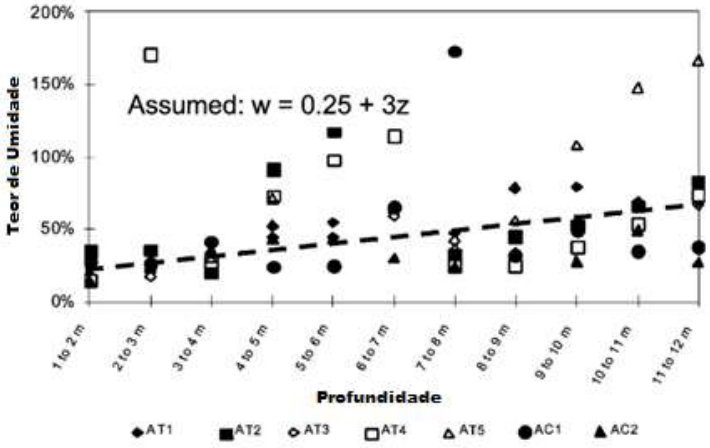
da profundidade. Desta forma, o autor afirma que o teor de umidade aumenta com a profundidade através da Equação 2 e Figura 5.

$$w = 25\% + 0{,}03z \quad (2)$$

Onde:

w – Teor de umidade;
25% – Teor de umidade da superfície;
z – Profundidade abaixo da superfície em metros.

Figura 5 - Teores de umidade medidos com a profundidade para resíduos em Lyndhurst.



Fonte: YUEN (1999), MCDOUGALL et al. (2004).

Este parâmetro, segundo autores como Chugh *et al*. (1998); Vavilin *et al*. (2003) ; Alcântara (2007); Tapahuasco (2009); entre outros, influencia a atividade microbiana de biodegradação, sendo um dos fatores críticos que afetam a biodegradação dos RSU. Consequentemente, influenciam o comportamento mecânico da massa de resíduos.

McDougall *et al*. (2004) afirmam que a redistribuição da umidade nos resíduos não tem um impacto direto no incremento dos deslocamentos do maciço. A implicação é que deformações devidas às mudanças nos teores de umidade são insignificantes em comparação com àquelas devidas ao carregamento.

A Tabela 9 apresenta um resumo da literatura dos teores de umidade dos resíduos sólidos urbanos.

Tabela 9 - Teor de umidade dos resíduos sólidos urbanos segundo vários autores.

REFERÊNCIA	LOCAL	UMIDADE GRAVIMÉTRICA (%)
(Tchobanoglous et al., 1993)	Aterros e em caminhão compactador - EUA	15 a 40
(GABR; VALERO, 1995)	Pionneer Crossing Landfill/ Pensilvânia – EUA	30 a 130*
(COUMOULOS et al., 1995)	Aterro Ano Liossa/ Atenas - Grécia	40 a 60
(Jucá et al., 1997)	Aterro Muribeca/ Recife - Brasil	20 a 50
(CARVALHO, 1999)	Aterro Sanitário Bandeirantes/ SP - Brasil	50 a 100
(Gomes et al., 2005)	Aterro de Santo Tirso - Portugal	61 a 117* (respectivamente para lixo novo na superfície e lixo com 3 anos na profundidade de 11 m)

Fonte: A Autora (2019).

No Brasil, a prática para a determinação do teor de umidade dos RSU, obedece a NBR 6457 (ABNT, 2016a) utilizada na mecânica dos solos. De acordo com Tapahuasco (2009), existe um certo cuidado em relação à temperatura de secagem quando se trata de resíduos sólidos, pois existe a possibilidade de volatilização de alguns elementos que compõem a massa de RSU. Assim, a NBR 6457 convencionou a temperatura na faixa de 60 a 65°C para solos com elevado conteúdo de matéria orgânica. No entanto, é possível encontrar outras metodologias em que a temperatura estabelecida é de 105°C (TCHOBANOGLOUS *et al*., 1993).

2.1.6 Compactação

Compactação é um processo de densificação da massa de solo/solo-mistura, reduzindo os vazios de ar. O grau da compactação é mensurado em termos da densidade seca e depende, principalmente, do seu teor de umidade, a energia de compactação e o tipo de solo. Assim como na mecânica dos solos, os ensaios de compactação para RSU são realizados utilizando as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 2016b).

A Tabela 10 apresenta um resumo da literatura dos ensaios de compactação dos resíduos sólidos urbanos.

Tabela 10 - Teor de umidade ótima e peso específico seco máximo dos resíduos sólidos urbanos segundo vários autores.

Referência	Características	Teor de Umidade (%)	Peso Específico Seco Máximo (kN/m³)
(GABR; VALERO, 1995)	resíduos estabilizados Matriz Composta	31.0%	9,30
(Kölsch, 1993)	resíduos estabilizados Matriz Básica	26.8%	12,0
(FUCALE, 2005)	resíduos estabilizados Matriz Composta	23.0%	12,6
Fucale, 2005)	resíduos estabilizados Matriz Básica	21.2%	13,8
(ALCÂNTARA, 2007)	resíduos frescos Matriz Composta	52.4%	14
(BORGATTO, 2010)	resíduos estabilizados Matriz Composta	34.5%	9,2
(MOTTA, 2011)	resíduos frescos Matriz Composta	52.4%	3,6
(Pandey & Tiwari, 2015)	resíduos frescos Matriz Composta	45.0%	10,8

Fonte: A Autora (2019).

A compactação dos RSU tem uma influência positiva nas propriedades mecânicas dos resíduos, pois quanto maior a compactação, maior a redução do índice de vazios, resultando em aceleração dos recalques naturais do aterro, aumento da resistência, redução da permeabilidade e aumento da vida útil do aterro sanitário.

Solos com composição que inclui o componente de reforço dos materiais fibrosos, apresentam um peso específico seco menor quando comparados com solos sem inclusão de fibras. Esta redução se deve à resistência de compactação de materiais fibrosos e ao fato de que estes possuem peso específico mais baixo do que os materiais granulares dos resíduos.

2.1.7 Sólidos Voláteis

A Tabela 11 apresenta um resumo da literatura dos teores de sólidos voláteis dos resíduos sólidos urbanos.

Tabela 11 - Teor de sólidos voláteis dos resíduos sólidos urbanos segundo vários autores.

Referência	Local	Características	Teor de Sólidos Voláteis (%)

(FUCALE, 2005)	Ihlenberg - Alemanha	resíduos estabilizados	10,5%
(FUCALE, 2005)	Buchen - Alemanha	resíduos pré-tratados	16,0%
(HULL; KROGMANN; STROM, 2005)	New Jersey - EUA	Idade entre 1 e 11 anos	24,4 – 35,0%
(RUSSO, 2005)	Matosinhos - Portugal	fração fina/ 10 anos	1,7 – 2,6%
(ALVES, 2008)	Muribeca - PE	1 ano	40,9%
(ALVES, 2008)	Muribeca - PE	7 anos	9,2%
(BORGATTO, 2010)	Northeim - Alemanha	resíduos frescos pós tratamento mecânico	18,98%
(BORGATTO, 2010)	Hannover - Alemanha	resíduos estabilizados tratamento mecânico e biológico	40,62%
(FIRMO, 2013)	Recife	resíduos frescos	82,97%
(FIRMO, 2013)	Recife	5 anos	14,57%

Fonte: A Autora (2019).

O teor de sólidos voláteis (SV) muitas vezes é utilizado para quantificar a biodegrabilidade dos resíduos sólidos, pois quando uma amostra é submetida a uma temperatura de calcinação de 550ºC, a fração orgânica é oxidada, reduzindo a massa inicial. O material final após a calcinação é a fração inorgânica ou inerte. Todavia, WHO (1978) ressalta que alguns materiais inorgânicos submetidos a temperaturas acima de 550ºC também tornam-se voláteis, e é por isso que os SV não correspondem exatamente ao total de matéria orgânica presente naquela amostra. O erro normalmente é menor que 1%.

Kelly (2002) e Decottignies *et al*. (2005;) apud Firmo (2013) afirmam que os resíduos sólidos com teores de sólidos voláteis inferiores a 10% correspondem a um material já bioestabilizado.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL E CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Para desenvolver a pesquisa, inicialmente, se fez necessário a elaboração de um programa de investigação. Em seguida, realizou a caracterização inicial dos resíduos sólidos urbanos, apresentando a metodologia e a análise dos resultados dos ensaios.

3.1 PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO (EXPERIMENTAL)

Para análise do comportamento geotécnico de aterros de resíduos sólidos urbanos, foi elaborado um programa de investigação, o qual consistiu na caracterização inicial dos resíduos, em ensaios mecânicos e na análise de estabilidade de talude simulado, aplicando uma geometria frequentemente utilizada em projetos de aterros sanitários no Brasil, como indicado na Tabela 12.

Tabela 12 - Programa de investigação geotécnica.

CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS		
INVESTIGAÇÃO/ENSAIOS	**DESCRIÇÃO**	**QUANTIDADE**
Caracterização inicial dos RSU	Composição gravimétrica e volumétrica	1
	Distribuição granulométrica	1
	Classificação morfológica	1
	Densidade do material inerte e das fibras	1
	Teor de umidade	1
	Compactação	3
	Sólidos voláteis	1
ENSAIOS MECÂNICOS		
INVESTIGAÇÃO/ENSAIOS	**DESCRIÇÃO**	**QUANTIDADE**
Cisalhamento direto convencional	Ensaios realizados com 17 diferentes composições de RSU: com e sem as fibras (madeira, plástico e têxtil) presentes no RSU	102
PARÂMETROS DE TRAÇÃO		
INVESTIGAÇÃO	**DESCRIÇÃO**	
Obtenção dos parâmetros de tração	Através dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto convencional, obteve-se os parâmetros de tração para a matriz composta reforçada (13,54% de fibras) e para as matrizes com inclusão de madeira, plástico e têxtil nas taxas determinadas na gravimetria.	
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE		
PROGRAMA UTILIZADO	**OBJETIVOS**	
GGU-Stability	Análise da estabilidade de taludes, considerando o efeito de tração das fibras e diferentes níveis piezométricos como agente de instabilização.	

Fonte: A Autora (2019).

Este programa tem por objetivo a obtenção dos parâmetros de tração a partir dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto e aos demais parâmetros de resistência para comparar os efeitos individuais das fibras presentes na massa de RSU e para a análise da estabilidade dos RSU, admitindo um aterro de pequeno e médio/grande porte para diversas etapas do aterro, com efeito das fibras como componente de reforço.

3.2 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A caracterização inicial dos resíduos sólidos urbanos foi elaborada com amostras provenientes da região metropolitana do Recife - PE, coletadas para moldagem dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto e para a resistência à tração encontrada na composição dos RSU. A caracterização física dos RSU compreende a composição gravimétrica e volumétrica, distribuição granulométrica, classificação morfológica, peso específico da parte granular dos resíduos (inerte) e densidade das fibras, teor de umidade, compactação e sólidos voláteis.

Para a realização dos ensaios, foram utilizadas amostras de RSU provenientes da célula número 1 do Aterro controlado da Muribeca. As Figuras 6, 7 e 8 apresentam a localização do aterro e células do Aterro de RSU da Muribeca, em Jaboatão dos Guararapes - PE.

A Figura 8, além de mostrar a localização das células do Aterro da Muribeca, apresenta a idade (ano) do lixo das camadas superficiais (5 m) das mesmas.

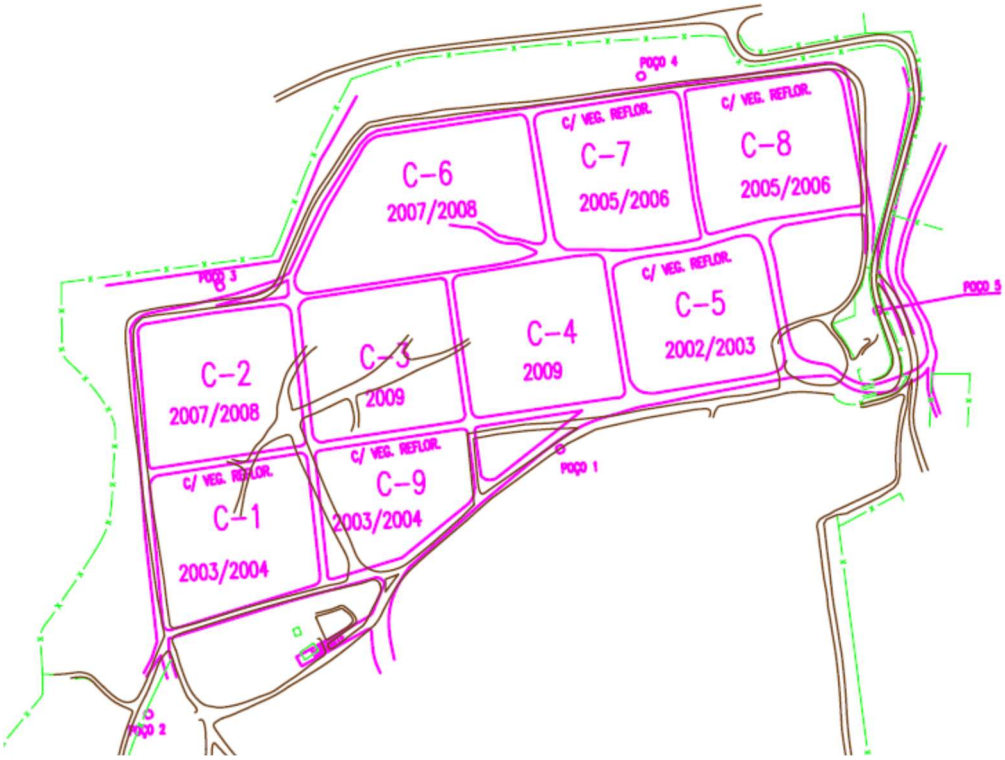
Figura 6 - Localização do aterro controlado da Muribeca em relação à Região Metropolitana do Recife, ao estado de Pernambuco e ao Brasil.

Fonte: Adaptada de MOTTA (2011).

Figura 7 - Vista aérea do Aterro Controlado da Muribeca

Fonte: GOOGLE MAPS (2012) adaptada de OLIVEIRA (2013) e FILHO (2013).

Figura 8 - Localização das células do Aterro controlado da Muribeca adaptado do levantamento topográfico planialtimétrico georreferenciado de placas de recalque para monitoramento no Aterro realizado pela AG Topografia e Arquitetura LTDA em dezembro de 2018.



Fonte: A Autora (2019).

3.2.1 Composição Gravimétrica e Volumétrica

A composição física dos resíduos sólidos foi realizada na UFPE com o material proveniente do aterro controlado da Muribeca, o qual se encontra encerrado.

A classificação dos materiais seguiu a Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA-EMPFEHLUNGEN E1-7 (DGGT, 1997). Para a determinação das composições gravimétrica e volumétrica, os resíduos foram selecionados em 8 grupos: (1) plástico; (2) têxtil; (3) madeira/coco; (4) entulho; (5) metal; (6) vidro; (7) material misto e (8) outros.

Devido à dificuldade de obtenção da malha de 20 mm para execução do peneiramento do material misto recomendado pela GDA-EMPFEHLUNGEN E1-7 (DGGT, 1997), adotou uma abertura de 25 mm. Portanto, o material misto foi subdividido em partículas com dimensão entre 8 e 25 mm e menor que 8 mm.

A Figura 9 apresenta os procedimentos adotados para a preparação das amostras para caracterização dos resíduos no Aterro da Muribeca. Uma

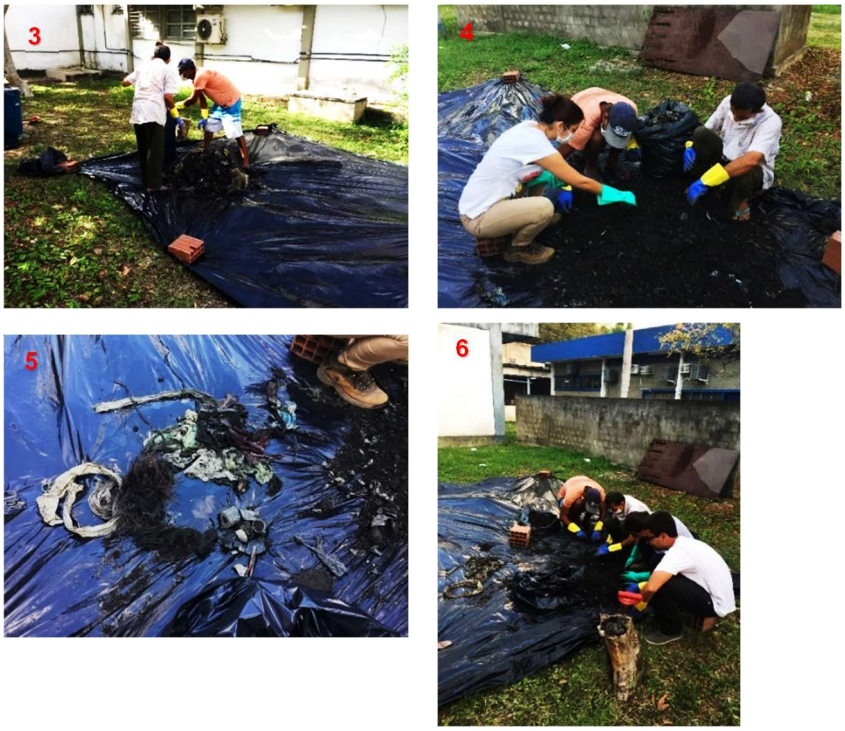
retroescavadeira abriu a célula número 1, perfurando a uma profundidade de aproximadamente 4 m com o intuito de eliminar toda a camada de cobertura e obter uma massa de resíduos mais representativa. O material foi descarregado em uma lona posicionada próxima ao local para uma segregação preliminar para o descarte de materiais de grandes dimensões e/ou de difícil processamento, como algumas pedras, pedaços de madeira e metais. Em seguida, o material foi disposto em baldes e levado para um pátio no Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da UFPE onde se realizou uma nova segregação (Figura 10). Como o Aterro se encontra encerrado, não foi possível mensurar o peso do material in loco.

É importante citar que o material escavado trata-se de resíduos estabilizados e foi estimado uma idade de 15/16 anos através do mapa da Figura 8, que apresenta os anos dos resíduos aterrados nas células do Aterro – ano 2003/2004 (Célula 1). A composição volumétrica dos RSU foi obtida através do percentual em volume dos seus componentes, fazendo uso de baldes com volumes conhecidos, onde os resíduos foram depositados sem sofrer compactação. Para a caracterização gravimétrica foram utilizadas duas balanças digitais, uma da marca ELGIN, modelo D-3000, com capacidade de 30 kg, divisão de 5 g e precisão de 0,001g, e a outra da marca MARTE, modelo AS5500C, com capacidade de 5 kg e precisão de 0,01 g (Figura 11).

Figura 9 - Procedimento de coleta e segregação preliminar das amostras dos RSU do Aterro da Muribeca – PE.

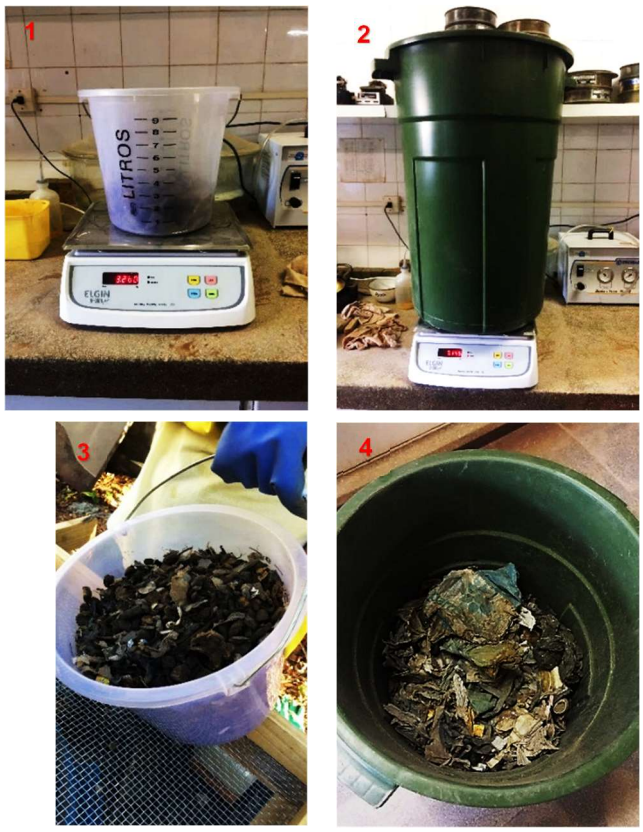
Fonte: A Autora (2019).

Figura 10 - Segregação dos RSU em um pátio no CTG da UFPE.



Fonte: A Autora (2019).

Figura 11 - Pesagem, peneiramento e redistribuição dos materiais para as categorias pré-determinadas.



Fonte: A Autora (2019).

3.2.2 Distribuição Granulométrica

A distribuição granulométrica foi determinada de acordo com as Recomendações da NBR 7181/2016 – Análise Granulométrica (ABNT, 2016c) e realizada apenas para a matriz básica dos RSU (material misto < 8 mm) devido às dimensões da caixa cisalhante do equipamento para o ensaio de resistência ao cisalhamento.

Os equipamentos utilizados para a realização do ensaio foram uma balança da marca Marte, modelo AS5500C com capacidade de 5 kg e precisão de 0,01 g e peneiras graduadas.

O ensaio foi realizado em duas etapas: o peneiramento e a sedimentação. Inicialmente, separou-se 1,2 kg do material misto < 8 mm, o qual foi peneirado na peneira número 10 (2 mm) para dividir o material que iria realizar o peneiramento e a sedimentação. O material retido foi lavado com o intuito de eliminar partículas finas para a realização do peneiramento graúdo (Figura 12). Já o passante foi utilizado para o ensaio de sedimentação (Figura 13) e peneiramento dos resíduos miúdos.

Figura 12 - Peneiramento: (1), (2) e (3) – material misto graúdo e (4), (5) e (6) – material misto miúdo.

Fonte: A Autora (2019).

Figura 13 - Etapas do ensaio de sedimentação.

Fonte: A Autora (2019).

3.2.3 Classificação Morfológica

Baseada na Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA-EMPFEHLUNGEN E1-7 (DGGT, 1997) e em Borgatto (2010), a classificação morfológica determinou as dimensões conforme a seguinte descrição:

DIM 0: grãos (sem comprimento lateral com partículas ≤ 25 mm);

DIM 1: fibras (um comprimento lateral em relação aos outros dois lados);
DIM 2: folhas ou objetos planos (dois comprimentos laterais em relação a um terceiro);
DIM 3: volumes ou caixas (3 comprimentos laterais).

Para determinação do DIM0 a norma alemã recomenda que seja todo material < 8 mm e Borgatto (2010) partículas ≤ 20 mm, todavia, nesta classificação, o DIM0 foi determinado para todo material < 25 mm devido à dificuldade de obtenção de malha de 20 mm no mercado, ou seja, todo o material misto encontrado na composição gravimétrica.

A classificação morfológica foi realizada por meio de uma avaliação visual e separação manual das frações constituintes das amostras de resíduos (DIM0, DIM1, DIM2 e DIM3). Para cada categoria determinada na caracterização gravimétrica (entulho; madeira; material misto; metal; plástico; têxtil; vidro e outros), foi realizado o processo de separação das frações constituintes de uma determinada dimensão, considerando a relação entre o peso da fração em relação ao peso total da amostra, em termos de sustância seca. Ao término dos cálculos de todas as categorias, realizou-se o somatório para a determinação percentual final de todas as dimensões.

3.2.4 Densidade

Os ensaios de densidade foram realizados com o material misto com partículas inferiores a 8 mm e para as fibras estudas, madeira, plástico e têxtil.

3.2.4.1 Material Inerte: Material Misto < 8 mm

O ensaio foi realizado conforme metodologia da Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 6458/2016: Grãos de Pedregulho Retidos na Peneira de Abertura 4,8 mm - Determinação da Massa Específica, da Massa Específica Aparente e da Absorção de Água(ABNT, 2016d).

Para este ensaio, utilizou-se o material misto menor que 8 mm, o qual foi passado na peneira número 10 (2mm), de acordo com a norma, uma pequena quantidade de amostra.

É possível observar o processo de execução deste ensaio na Figura 14.

Figura 14 - (1) Instrumentos utilizados no ensaio; (2) e (3) Água destilada + amostra de material misto < 8 mm; (4) e (5) Bomba a vácuo utilizado e (6) Finalizando o ensaio: pesagem final.

Fonte: A Autora (2019).

3.2.4.2 Fibras: Madeira, Plástico e Têxtil

O ensaio realizado para obtenção da densidade das fibras encontradas na composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos pesquisados foi conduzido através da pesagem das amostras e medição do seu respectivo volume (Figura 15).

A primeira etapa foi a pesagem. Com amostras aleatórias de diferentes tipos de fibras de cada categoria determinada anteriormente (madeira; plástico e têxtil), foi utilizada uma balança analítica da marca MARTE com precisão de 1/10000g (Figura 14(1 e 2)). Foram pesadas 10 amostras de cada material analisado.

A segunda etapa deste ensaio foi a obtenção das medidas para calcular as dimensões das mesmas amostras (comprimento, largura e espessura). Para isto foi utilizado um deflectômetro da marca MITUTOYO com precisão de 1/1000 mm (Figura 16).

Figura 15 - Amostras de (1) madeira; (2) plástico e (3) têxtil.

Fonte: A Autora (2019).

Figura 16 - (1) e (2) Balança analítica e (3) e (4) deflectômetro.

Fonte: A Autora (2019).

Os cálculos das densidades dos materiais são obtidos através da média dos valores calculados (Equação 3) e comparados com os valores médios de fibras conhecidas.

$$\sum_{i=1}^{n} = \frac{\left(\frac{Peso_i}{Comprimento_i \times Largura_i \times Espessura_i}\right)}{n} \quad (3)$$

Onde n é o número de amostras por fibras.

3.2.5 Teor de Umidade

O teor de umidade dos resíduos sólidos foi determinado em base seca (Equação 4) e base úmida (Equação 5). Seguindo as recomendações da NBR 6457/2016: Amostras de Solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaios de Caracterização (ABNT, 2016a), foi utilizado o material misto < 8 mm referente as categorias da determinação gravimétrica.

$$\omega_{\%\text{seco}} = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100 \quad (4)$$

$$\omega_{\%\text{úmido}} = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3} \times 100 \quad (5)$$

No qual,

$\omega_{\%}$ = teor de umidade, em %;
M_1 = massa do solo úmido mais massa da cápsula, em g;
M_2= massa do solo seco mais massa da cápsula, em g;
M_3 = massa da cápsula, em g.

O material ensaiado foi peneirado e utilizada a parte passante na peneira número 10, equivalente a um diâmetro de 2 mm, e dividido em três partes, utilizando uma balança digital de marca Marte, modelo AS5500C com capacidade de 5 kg e precisão de 0,01g, foram pesadas e identificadas, colocando-as numa estufa mantida à 65ºC por 24 horas. A determinação do peso seco foi verificada após o resfriamento do material em um dessecador.

3.2.6 Compactação

Os ensaios de compactação foram conduzidos conforme a NBR 7182/2016: Solo - Ensaio de Compactação (ABNT, 2016b). Foi utilizado um cilindro com dimensões de 153 mm de diâmetro e 114 mm de altura. Fazendo reuso dos resíduos para as amostras, o ensaio de compactação foi realizado com energia normal, aplicando 26 golpes para cada uma das 3 camadas da amostra final.

Os ensaios de compactação foram realizados com diferentes composições de resíduos, apresentadas na Tabela 13. Para cada ensaio foram utilizados cerca de 3 kg de amostra em peso úmido. A Figura 17 apresenta as etapas dos ensaios de compactação dos RSU. A curva de compactação foi ilustrada utilizando o teor de umidade em base úmida.

Tabela 13 - Composição das amostras dos ensaios de compactação.

RSU	1. Material Misto < 8 mm (100%)
	2. Material Misto < 8 mm (61,69%); Material Misto 8-25 mm (13,99%); Fibras (24,32%)
	3. Material Misto < 8 mm (61,69%); Material Misto 8-25 mm (33,79%); Têxtil (1,37%); Madeira (2,44%); Outros (0,71%)

Fonte: A Autora (2019).

Figura 17 - (1) Amostra de RSU nº2; (2) Compactação através de aplicação dos golpes com um soquete de metal; (3) Cilindro após a compactação da terceira camada; (4) Extração do corpo de prova de RSU nº1; (5) Extração do corpo de prova de RSU nº2 e (6) Extração do corpo de prova de RSU nº3.

Fonte: A Autora (2019).

3.2.7 Sólidos Voláteis

O ensaio do teor de sólidos voláteis foi realizado conforme a metodologia de WHO (1978), que consiste em submeter uma amostra seca a uma temperatura de

calcinação de 550ºC por um período mínimo de 2 horas em uma mufla. Após resfriamento da amostra calcinada, utilizando um dessecador, realiza-se a nova pesagem. Desta forma, pode-se obter o teor de sólidos voláteis através da Equação 6.

$$\boldsymbol{SV}(\%) = \frac{\boldsymbol{M_o - M_f}}{\boldsymbol{M_o}} \quad (6)$$

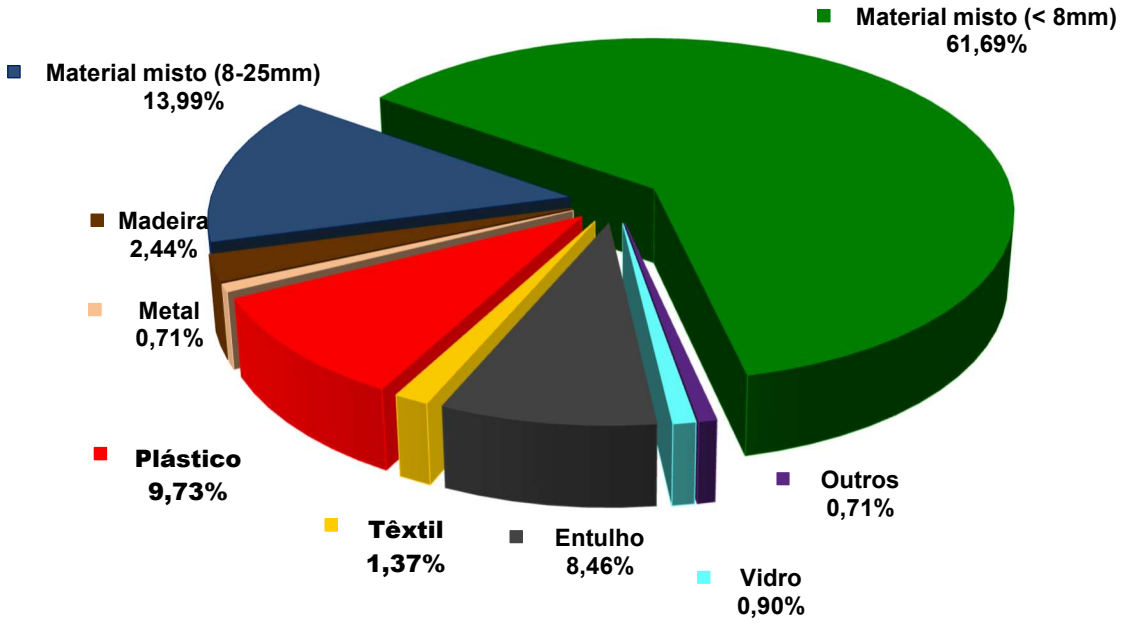
3.2.8 Apresentação e Análise dos Resultados

A apresentação e análise dos resultados da caracterização inicial dos resíduos sólidos urbanos estão descritas abaixo.

3.2.8.1 Composição Gravimétrica e Volumétrica

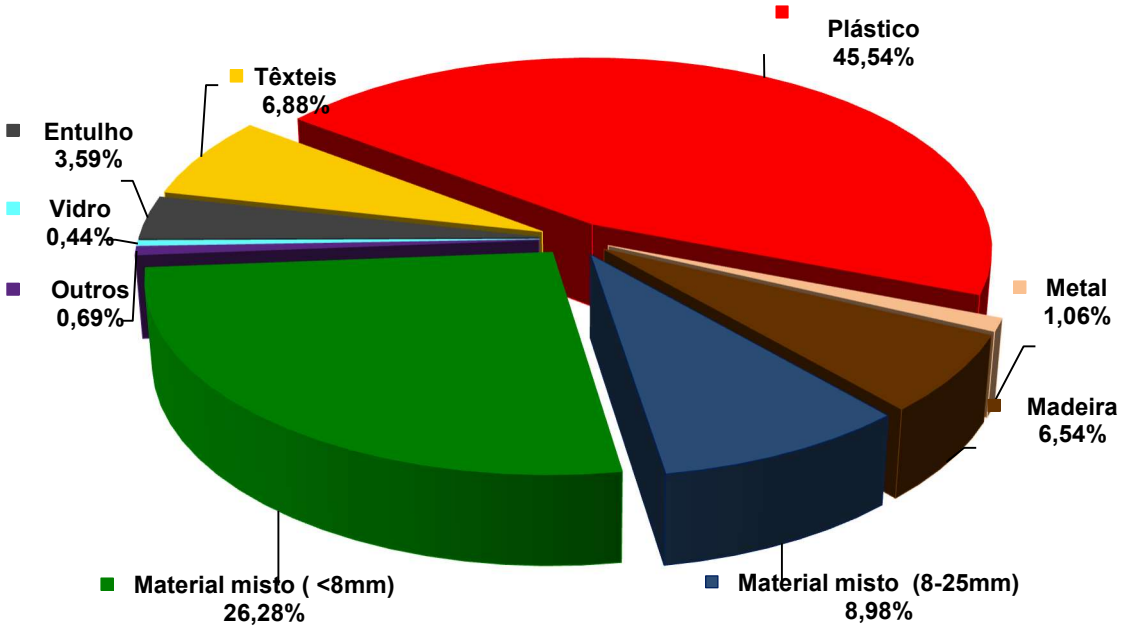
As composições gravimétrica e volumétrica foram obtidas em conformidade com as 8 categorias, sendo uma delas subdivida em duas (material misto com partículas entre 25 mm e 8 mm e partículas menores que 8 mm). O gráfico de percentual em peso úmido por categoria está apresentado na Figura 18 e o gráfico de percentual em volume por categoria está apresentado na Figura 19.

Figura 18 - Composição gravimétrica dos RSU do aterro da Muribeca – PE.



Fonte: A Autora (2019).

Figura 19 - Composição volumétrica dos RSU do aterro da Muribeca – PE.



Fonte: A Autora (2019).

Ao analisar as composições, constata-se a ausência de matéria orgânica, visto que se trata de uma massa de resíduos estabilizado. Contudo, uma pequena fração de material orgânico é encontrado nas categorias de madeira, têxtil e outros com a presença de componentes como algodão, fibras naturais/orgânicas e a própria madeira.

Ao se comparar as composições, observa-se que todos os materiais fibrosos possuem um volume muito maior em relação à percentagem em peso. O contrário ocorre com os materiais inertes, com exceção do metal. Este, por sua vez, pode ser explicado pelos tamanhos das peças na amostragem. Segundo Motta (2011), a composição volumétrica dos RSU tem fundamental importância para resistência ao cisalhamento dos aterros, pois representa o quantitativo real de componentes de reforço que está presente na massa de resíduos. A Tabela 14 apresenta os resultados das composições gravimétricas e volumétricas e o aumento/redução entre as mesmas para melhor elucidar esta importante classificação.

Tabela 14 - Resumo dos resultados das composições gravimétrica e volumétrica e diferença percentual entre as mesmas.

CATEGORIAS	C. GRAVIMÉTRICA	C. VOLUMÉTRICA	AUMENTO	REDUÇÃO
Vidro	0,90%	0,44%	-	**2,05**
Entulho	8,46%	3,59%	-	**2,36**
Têxtil	1,37%	6,88%	**5,02**	-
Plástico	9,73%	45,54%	**4,68**	-
Metal	0,71%	1,06%	**1,49**	-
Madeira	2,44%	6,54%	**2,68**	-
Material misto (8-25mm)	13,99%	8,98%	-	**1,56**
Material misto (< 8mm)	61,69%	26,28%	-	**2,35**
Outros	0,71%	0,69%	-	**1,03**

Fonte: A Autora (2019).

Motta (2011), na caracterização gravimétrica e volumétrica da massa de RSU provenientes de resíduos frescos do Aterro de RSU da Muribeca, analisou, entre outros componentes, o plástico e o têxtil (Tabela 15). Verifica-se que o aumento volumétrico nesta pesquisa foi muito superior ao realizado por Motta (2011). Como as fibras pouco se alteram na caracterização com a idade, as diferenças dar-se-ão pela densidade dos materiais. Na amostra deste trabalho extraída da célula número 1 do Aterro Controlado da Muribeca, a maioria dos plásticos encontrados foram de baixa densidade e moles.

Tabela 15 - Resumo das composições gravimétrica e volumétrica de plástico e têxtil e a diferença percentual entre as mesmas de Motta (2011).

CATEGORIAS	C. GRAVIMÉTRICA	C. VOLUMÉTRICA	AUMENTO	REDUÇÃO
Têxtil	6,3%	7,0%	**1,11**	-
Plástico Mole	4,4%	17,9%	**4,07**	-
Plástico Duro	18,5%	25,7%	**1,39**	-
Plástico Total	22,9%	43,6%	**1,90**	-

Fonte: A Autora (2019).

Por se tratar de resíduos estabilizados, a comparação com as caracterizações apresentadas na literatura é um pouco limitada, pois a matéria orgânica está presente nos resíduos frescos. Nos estabilizados, as categorias da caracterização praticamente não apresentam materiais biodegradáveis. Porém, é possível analisar os materiais não degradáveis, assim como as fibras naturais.

O teor de plástico, segundo a caracterização gravimétrica, é de aproximadamente 10%, valor bem abaixo da média do trabalho realizado pela Atepe/GRS - UFPE em 2014 na cidade do Recife – PE, onde o total de plástico é de 21%. Mesmo analisando o trabalho de Motta (2011), os teores de plástico foram de 23% e 20% para o Aterro da Muribeca e da CTR Igarassu, respectivamente. Porém, ao comparar com o valor médio de países desenvolvidos encontrados na Tabela II.4, o valor obtido nesta pesquisa é aproximadamente o mesmo. No entanto, a diferença é que o valor reduzido do plástico na composição gravimétrica dos países desenvolvidos é devido à forte política de reciclagem. A grande diferença no teor de plástico da massa de resíduos estabilizado e a composição realizada em 2014 na cidade do Recife é explicada pela mudança sócio-cultural e econômica na região, gerando o aumento do consumo desenfreado de produtos industrializados (embalagens), descartáveis e falta de política ambiental.

Ao analisar as demais fibras, encontra-se diferença significativa dos resíduos frescos com os resíduos estabilizados, pois nestas categorias existem fibras naturais, ou seja, degradáveis. A categoria Madeira, por exemplo, em Borgatto (2010) foi encontrado um teor de 3% a 6% para RSU estabilizados e frescos, respectivamente. Já Fucale (2005), encontrou um valor de 2% para resíduos estabilizados. A Atepe/GRS - UFPE (2014), por outro lado, apresentou um teor de 5,33% de resíduos frescos na cidade do Recife, valor 2 vezes maior que o encontrado na amostra da Muribeca realizado neste trabalho, 2,44%. Em relação à categoria Têxtil, a Atepe/GRS

- UFPE (2014) obteve um valor de 4,06%, valor 3 vezes maior que o estudado, 1,37%. Fucale (2005) apresentou um teor de têxtil de 6% para o material recolhido no Aterro de Ihlenberg, Alemanha, antes do tratamento mecânico-biológico.

A maior parte integrante dos resíduos sólidos da célula número 1 do Aterro Controlado da Muribeca é o material misto com partículas inferiores a 8 mm com um percentual de 61,69% seguido do material misto com partículas entre 8 e 25 mm de diâmetro com 13,99%. Ao somar as duas percentagens, tem-se um valor de aproximadamente 76%. Ao comparar esses percentuais com os trabalhos de Borgatto (2010) e Fucale (2005), que também trabalharam com resíduos estabilizados, verificam-se valores aproximados. Fucale (2005), no Aterro de Ihlenberg, Alemanha, encontrou um percentual de 59% para material misto < 8 mm e 30% para material misto 8 mm – 40 mm, enquanto Borgatto (2010), no CTR Hannover e CTR Northeim, ambos na Alemanha, encontrou valores para material misto < 8 mm entre 31% (Northeim, resíduos frescos com tratamento mecânico) a 63% (Hannover, resíduos estabilizados com tratamento mecânico-biológico) e o material misto 8 mm – 20 mm, 21% (Hannover, resíduos estabilizados com tratamento mecânico-biológico) a 41% (Northeim, resíduos frescos com tratamento mecânico). A Tabela 16 apresenta sucintamente a comparação dos materiais inertes.

Tabela 16 - Comparação dos materiais inertes de diferentes aterros sanitários.

Aterros Sanitários	Material Misto < 8 mm	Material Misto 8 - 25 mm	Somatório	Observações
Ihlenberg[1]	59%	30%*	89%	resíduo estabilizado
CTR Hannover[2]	63%	21%**	84%	resíduo estabilizado com tratamento mecânico-biológico
CTR Northeim[2]	31%	41%**	72%	resíduo fresco com tratamento mecânico
Muribeca	62%	14%	76%	resíduo estabilizado

Fonte: A Autora (2019).

[1] Fucale (2005); [2] Borgatto (2010).

* 8 - 40 mm; ** 8 - 20 mm

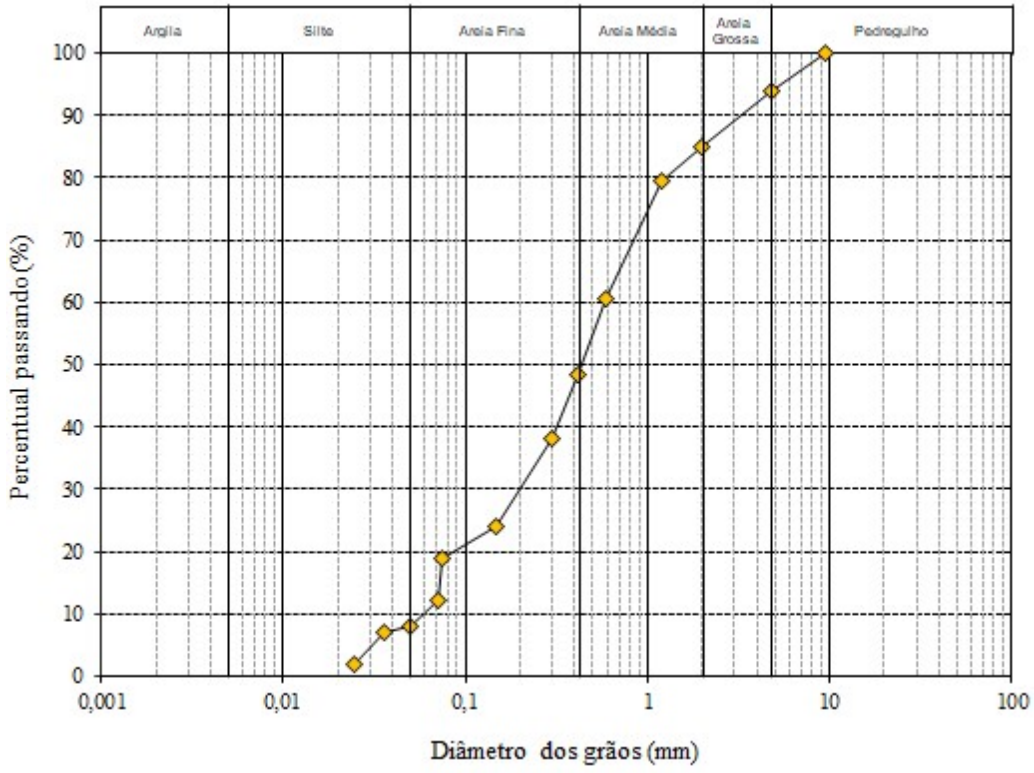
3.2.8.2 Distribuição Granulométrica

A Figura 20 apresenta a curva granulométrica da amostra do material misto menor que 8 mm.

A análise granulométrica da amostra do material misto < 8 mm mostra que na sua composição há uma predominância de material fino, apresentando aproximadamente 48%.

Os materiais inertes apresentam comportamento mecânico semelhante a um solo granular heterogêneo e, ao verificar os resultados da análise granulométrica realizada nesta pesquisa, verificou-se, para o material misto < 8 mm (fração de materiais inertes da massa de resíduo estabilizado), que a amostra se comporta como um material de granulometria grosseira.

Figura 20 - Curva granulométrica do material misto < 8 mm dos RSU do aterro da Muribeca – PE.

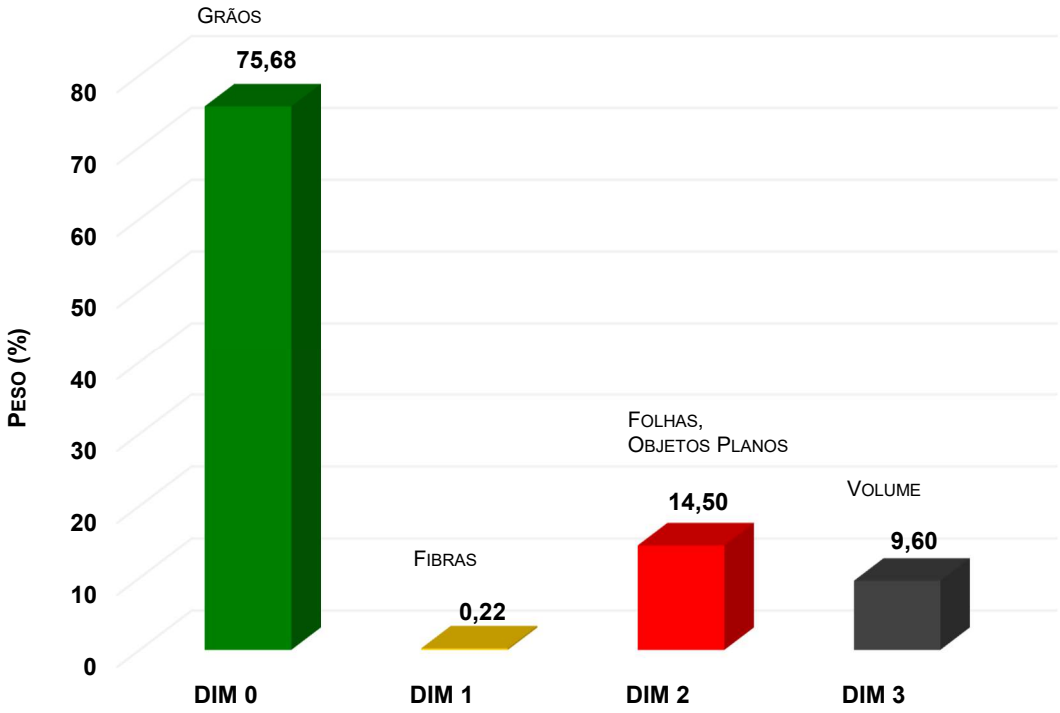


Fonte: A Autora (2019).

3.2.8.3 Classificação Morfológica

A classificação morfológica da amostra de resíduos do Aterro da Muribeca utilizada nesta pesquisa está apresentada na Figura 21 e na Tabela 17.

Figura 21 - Classificação morfológica do RSU.



Fonte: A Autora (2019).

Tabela 17 - Classificação morfológica dos resíduos estabilizados provenientes do Aterro da Muribeca de acordo com as categorias.

RESÍDUOS ESTABILIZADOS	DIMENSÕES (%)				TOTAL
CATEGORIAS	DIM 0	DIM 1	DIM 2	DIM 3	
Entulho	0	0	1,51	6,95	**8,46**
Madeira	0	0,06	0,76	1,62	**2,44**
Material Misto < 8 mm	61,69	0	0	0	**61,69**
Material Misto 8 - 25 mm	13,99	0	0	0	**13,99**
Metal	0	0	0,29	0,42	**0,71**
Plástico	0	0	9,73	0	**9,73**
Têxtil	0	0,16	1,12	0,09	**1,37**
Vidro	0	0	0,81	0,09	**0,9**
Outros	0	0	0,28	0,43	**0,71**
TOTAL	**75,68**	**0,22**	**14,5**	**9,6**	**100**

Fonte: A Autora (2019).

A Figura 21 ilustra uma predominância de partículas com dimensões do grupo DIM 0, onde as partículas possuem um diâmetro inferior a 25 mm. Borgatto (2010) afirma que uma alta percentagem de DIM 0 é típico de amostras de resíduos pré-tratados, ou seja, estabilizados. Uma percentagem de 76% condiz com a classificação.

Borgatto (2010), baseado na Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA-EMPFEHLUNGEN E2-35 (DGGT, 2000), indica que a soma das dimensões DIM 1 (fibras) e DIM 2 (área) é um indicador utilizado para avaliar a influência do reforço dos materiais fibrosos nas propriedades de resistência ao cisalhamento dos RSU. A Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA-EMPFEHLUNGEN E2-35 (DGGT, 2000) apresenta um quadro resumo com os valores de cálculo geotécnico para resíduos urbanos, onde determina a soma das dimensões DIM 1 + DIM 2 para resíduos não tratados e pré-tratados. Os resultados de DIM 1 + DIM 2 > 30% para resíduos não tratados e DIM 1 + DIM 2 < 20% para resíduos com tratamento mecânico-biológico. O resultado encontrado de DIM 1 + DIM 2 na amostra dos resíduos estudados foi de aproximadamente 15%, dentro do esperado para resíduos estabilizados.

3.2.8.4 Densidade

Os resultados dos ensaios de densidade foram apresentados para o material misto com partículas inferiores a 8 mm e para as fibras estudas, madeira, plástico e têxtil.

3.2.8.4.1 Material Misto < 8 mm

No ensaio de densidade foi obtido um valor médio de 2,561 g/cm^3 para o material misto com partículas menores que 8 mm presente nos resíduos sólidos coletados no Aterro da Muribeca. A Tabela 18 apresenta o resultado do ensaio.

Tabela 18 - Densidade do material misto < 8 mm.

Densidade Específica (g/cm^3)	2,564	2,558
Densidade Específica Médio (g/cm^3)	**2,561**	

Fonte: A Autora (2019).

3.2.8.4.2 Madeira, Plástico e Têxtil

Neste ensaio foram obtidas as densidades das fibras, madeira, plástico e têxtil. As Tabelas 19, 20 e 21 apresentam um resumo dos resultados dos ensaios para as diferentes fibras presentes nos resíduos sólidos pesquisados.

Tabela 19 - Densidade média das fibras de madeira.

MADEIRA	
DENSIDADE MÉDIA (g/cm^3)	**0,435**

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 20 - Densidade média das fibras de plástico.

PLÁSTICO	
DENSIDADE MÉDIA (g/cm^3)	**0,990**

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 21 - Densidade média das fibras de têxtil.

TÊXTIL	
DENSIDADE MÉDIA (g/cm^3)	**0,156**

Fonte: A Autora (2019).

As densidades obtidas foram 0,435, 0,990 e 0,156 g/cm^3 para as fibras de madeira, plástico e têxtil, respectivamente, encontradas na massa de resíduos proveniente do Aterro da Muribeca.

3.2.8.5 Teor de Umidade

Os teores de umidade das amostras de RSU provenientes do Aterro Controlado da Muribeca foram determinados a partir dos procedimentos especificados no item 3.2.5 – TEOR DE UMIDADE e os cálculos, segundo a Equação 5 apresentada anteriormente.

A Tabela 22 apresenta os resultados encontrados na determinação do teor de umidade inicial das amostras de RSU manipuladas nesta pesquisa. O percentual médio obtido foi de 10,47% na base seca e 9,48% na base úmida, sendo a última mais utilizada no estudo dos resíduos sólidos urbanos.

Landva & Clark (1990) apud Motta (2011) assegura que a massa orgânica tem uma ampla capacidade de retenção de água, logo, o teor de umidade cresce com o aumento da matéria orgânica. O teor de umidade também está relacionado com a profundidade da massa de resíduos no aterro, tendo um aumento com a profundidade. Outro fator importantíssimo é o fator climático, devido à infiltração das águas pluviométricas nas camadas de cobertura. Desta forma, como a massa de resíduos analisada nesta pesquisa se trata de um material com uma matéria orgânica nula, uma profundidade de coleta de aproximadamente uns 4 metros e a coleta da amostra foi realizada no período de seca da região (mês de novembro), o percentual médio encontrado condiz com a literatura.

Tabela 22 - Teor de umidade do RSU.

Umidade Média - Base Seca (%)	10,47
Umidade Média- Base Úmida (%)	9,48

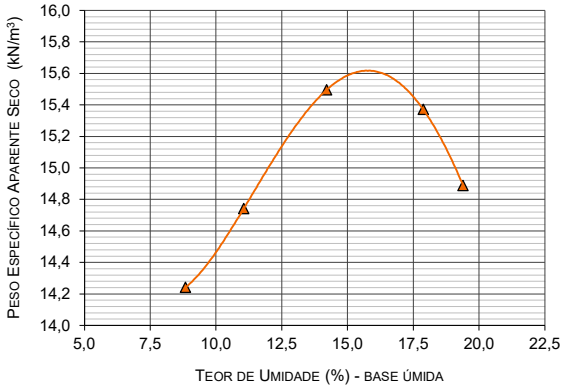
Fonte: A Autora (2019).

3.2.8.6 Compactação

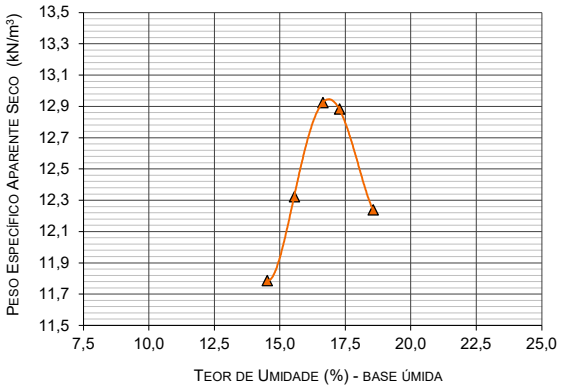
As curvas de compactação das amostras de resíduos estabilizados provindo da célula número 1 do Aterro da Muribeca estão apresentadas na Figura 22 e na Tabela 23.

A Tabela 23 lista os diferentes tipos de amostras ensaiadas. Comparando os ensaios de RSU com e sem inclusão das fibras, tem-se que as fibras, como visto no Capítulo 2, possuem uma certa resistência à compactação e uma baixa densidade. Este efeito fica evidente quando se analisa as amostras de resíduos com inclusão de fibras. A amostra com 24,32% de fibras (madeira, plástico e têxtil) possui o menor peso específico aparente seco, 12,95 kN/m^3. Já a amostra número 4, a qual não possui plástico, exibe um peso específico aparente seco de 13,64 kN/m^3.

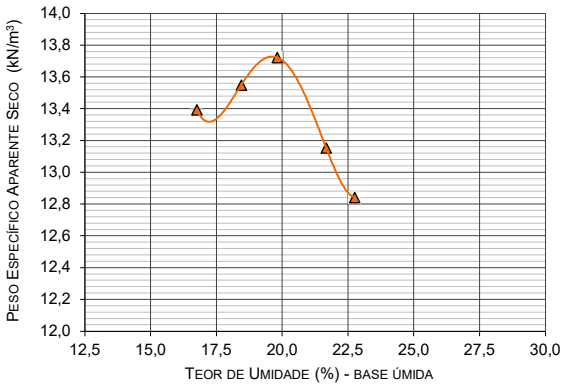
Figura 22 - Compactação (a) RSU: material misto < 8 mm; (b) RSU: material misto < 8 mm [61,69%] + material misto 8-25 mm [13,99%] + fibras [24,32%] ; (c) RSU: material misto < 8 mm [61,69%] + material misto 8-25 mm [13,99%] + têxtil [1,37%] + madeira [2,44%] + outros [0,71%].



(a)



(b)



(c)

Fonte: A Autora (2019).

Fucale (2005) apresentou resultados de teor de umidade e peso específico seco para resíduos estabilizados com partículas menores que 8 mm, representando a matriz básica, proveniente do Aterro de Ihlenberg, de 21,2% e 13,8 kN/m^3, respectivamente. A diferença do peso específico seco encontrada nesta pesquisa pode ser explicada pelo teor de partículas de fibras e outros materiais de baixa densidade que acabaram passando no peneiramento deste material. Outros fatores relevantes, tanto para o peso específico quanto para a umidade, são a condição climática e os tipos de resíduos depositados nos aterros. O clima da região metropolitana do Recife (aterro controlado da Muribeca) é tropical savânico – ***As*** (classificação Köppen e Geiger), onde existe uma estação “seca” no verão, enquanto

na proximidade do aterro de Ihlenberg o clima é oceânico temperado – Cfb, estando ausente uma estação seca e com temperaturas amenas. As temperaturas e umidades dos ambientes interferem diretamente no comportamento dos componentes dos RSU devido aos processos físicos, químicos e biológicos, influenciando, neste caso, no teor de umidade e peso específico.

Tabela 23 - Resumo dos ensaios de compactação.

AMOSTRA DE RESÍDUOS	TEOR DE UMIDADE (%)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (kN/m^3)
M.M. < 8 mm (100%)	15,78	15,62
M.M. < 8 mm (61,69%) M.M. 8-25 mm (13,99%) Fibras (24,32%)	16,88	12,95
M.M. < 8 mm (61,69%) M.M. 8-25 mm (33,79%) Têxtil (1,37%) Madeira (2,44%) Outros (0,71%)	19,63	13,64

Fonte: A Autora (2019).

3.2.8.7 Sólidos Voláteis

O teor de sólidos voláteis das amostras de resíduos foi a forma utilizada para caracterizar o grau de degradabilidade das amostras utilizadas nesta pesquisa. Foram ensaiadas amostras de resíduos sólidos urbanos provenientes do Aterro da Muribeca. Por se tratar de resíduos estabilizados, as amostras foram compostas dos materiais finos presentes nos RSU (material misto < 8 mm).

O teor de sólidos voláteis correspondente aos resíduos estabilizados foi 2,2%. O baixo teor encontrado para a amostra analisada é decorrente do avanço da degradação do material orgânico, apresentando nenhuma ou praticamente nenhuma atividade de biodegradação dos resíduos.

Comparando a taxa de sólidos voláteis desta pesquisa com outros resíduos estabilizados da literatura internacional, nota-se uma diferença notável. Fucale (2005), Hull et al. (2005) e Borgatto (2010) apresentaram taxas de 10,5% e 16%, 24,4% e 18,98%, respectivamente, indicando valores até 9 vezes maior que o determinado na amostra analisada. Esta diferença se deve à velocidade da biodegradação da massa de resíduos sólidos. O clima da região metropolitana do Recife é ideal para o processo de biodegradação, acelerando-o. Portanto, o teor encontrado de 2.2% para um RSU de aproximadamente 15 anos de idade é coerente.

4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Para a análise do comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos, foram realizados os ensaios de resistência ao cisalhamento direto. Para os ensaios de resistência ao cisalhamento é necessário, quando possível, um cuidado especial em relação às dimensões dos corpos de prova, pois, por se tratar de uma massa heterogênea, as partículas constituintes dos RSU possuem tipos e dimensões variadas. Nesta pesquisa foram utilizados os ensaios de cisalhamento direto convencionais com dimensões da caixa cisalhante de 10,18 x 10,18 x 4,50 cm com um volume de 466,35 cm^3, devido à ausência de uma caixa cisalhante de maior dimensão.

O comportamento mecânico da massa de RSU, matriz básica (MB) mais matriz reforço, foi analisado através do ensaio de resistência ao cisalhamento direto. Os ensaios foram realizados com corpos de prova moldados com diferentes percentuais de fibras presentes nos RSU coletados no Aterro Controlado da Muribeca - PE.

4.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO DOS RSU

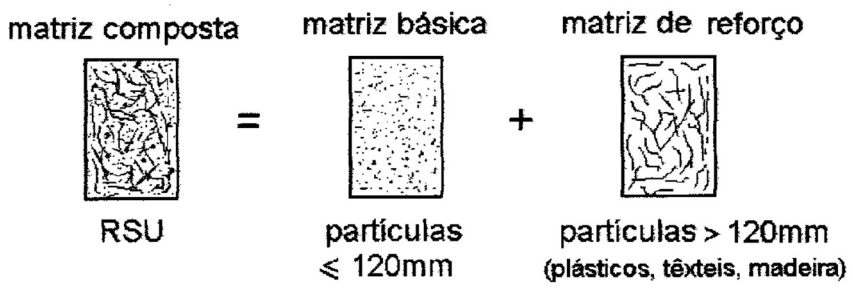
O RSU é um material heterogêneo e seu comportamento tensão-deformação depende de vários fatores, como a composição, a densidade, o teor de umidade, a distribuição espacial dos componentes constituintes e a idade. O comportamento tensão-deformação do RSU é a consideração principal para projetos de revestimento de aterros sanitários, de análise de estabilidade de taludes e fundações, de circulação de lixiviados e de sistema de camada de cobertura (DIXON & JONES, 2005). Recentemente, a estabilidade de taludes dos aterros recebeu uma atenção especial devido a várias falhas em grandes aterros municipais, o que será abordado em maior detalhe no capítulo 6 desta pesquisa. Esses acidentes não apenas destruíram o meio ambiente local, mas também causaram enormes perdas e baixas econômicas.

No momento presente, muitos dados sobre o comportamento tensão-deformação de RSU foram relatados na literatura nacional e internacional, principalmente com base em testes de compressão triaxial convencionais em grande escala (GRISOLIA *et al*., 1995; ZEKKOS *et al*., 2012) e cisalhamento direto convencional em grande escala (GABR & VALERO, 1995; FUCALE, 2005; KÖLSCH,

2009; BORGATTO, 2010; MOTTA, 2011; CORRÊA, 2013; PANDEY & TIWARI, 2015). No entanto, existe uma variação grande dos valores obtidos devido ao equipamento utilizado e a massa de RSU ensaiada. Por isso, a análise comparatória entre os valores tem que ser realizada com cautela.

Jesseberger et al. (1995), Corrêa (2013), entre outros, apresentaram um modelo que se acredita melhor representar os resíduos sólidos urbanos, um material composto, constituído por duas componentes: uma matriz básica compreendida pelas partículas granulares fina à média (diâmetro < 120 mm) e outra matriz de reforço contendo os materiais fibrosos do resíduo sólido (diâmetro > 120 mm) como os plásticos, têxteis, dentre outros que contribuem para a resistência, como esquematizado na Figura 23.

Figura 23 - Modelo esquemático da composição do RSU semelhante a solos reforçados.



Fonte: JESSEBERGER et al. (1995) apud CORRÊA (2013).

O modelo proposto por Kölsch (1993, 1995, 1996) consiste no estado atual da arte em uma análise mais realística da capacidade de carga de aterros sanitários. Este modelo admite que materiais fibrosos presentes na composição dos RSU criem forças resistentes de tração que dependem do entrosamento destas fibras com a massa do resíduo, sendo função da tensão normal e do grau de compactação (CORRÊA, 2013).

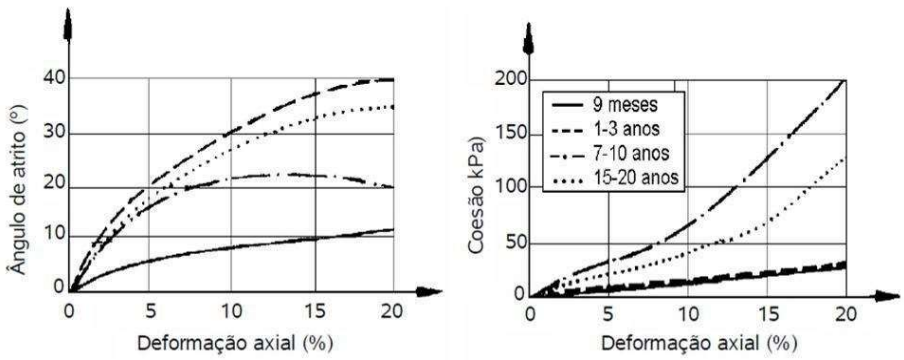
Kölsch (1996) apresentou um modelo de resistência dos RSU onde a envoltória de resistência é bi-linear, no qual a inclinação íngreme da envoltória de resistência se deve ao reforço das fibras, enquanto a variação da inclinação acontece quando a resistência à tração alcança seu valor máximo e deixa de contribuir para a resistência ao cisalhamento, passando a representar apenas a parcela referente ao atrito.

Atualmente, este modelo bi-linear é bastante difundido na literatura como Ziehmann (1999); Fucale (2005); Borgatto (2006); Gomes (2008); Borgatto (2010); Motta (2011) e Corrêa (2013). Ele será melhor detalhado no capítulo 5.

A variação dos parâmetros de resistência em função das deformações foi analisada por meio de ensaios de laboratório por diferentes autores como Jessberger (1990); Jessberger & Kockel (1995) 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 (LAMARE NETO, 2004). A Figura 24 ilustra graficamente o exposto acima.

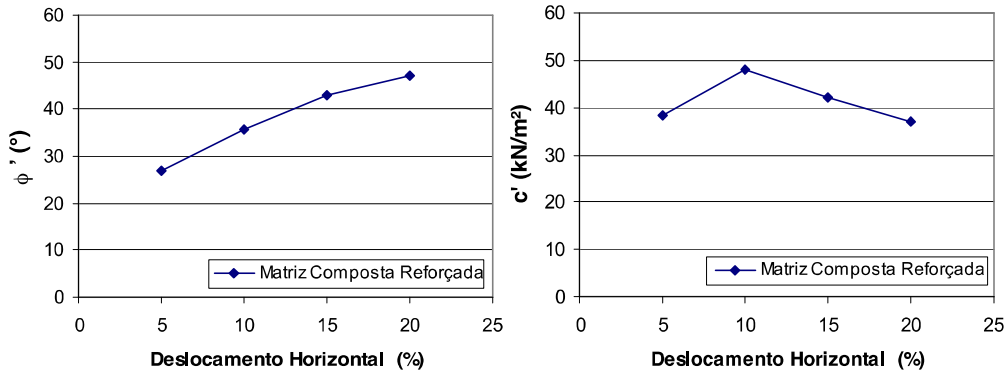
Fucale (2005) apresentou resultados que diferem do apresentado na Figura 24. Essa diferença pode ser justificada devido ao tipo e idade dos resíduos utilizados. Neste caso, a autora utilizou resíduos sólidos antigos (estabilizados) com adição de fibras, totalizando um total de 8% para a matriz reforço. Na Figura 25 nota-se a diferença dos resultados apresentados anteriormente, onde a coesão, a partir de 10% do deslocamento horizontal, começa a reduzir seu valor.

Figura 24 - Ângulo de atrito e coesão versus deformação axial para diferentes idades do RSU.



Fonte: KOCKEL, (1995) JESSEBERGER et al. (1995) apud CORRÊA (2013).

Figura 25 - Variação do ângulo de atrito e coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal – Matriz composta com 8% de reforço – Resíduos sólidos estabilizados.



Fonte: FUCALE (2005).

Vários autores consideram que é a matriz básica que comanda a parcela de resistência por atrito interno dos RSU, enquanto o intercepto de coesão é dependente da matriz de reforço, que é ativada com deformações maiores que 20%, quando o atrito está quase totalmente mobilizado.

Carvalho (1999) realizou ensaios triaxiais do tipo CD com a amostra de resíduo do aterro sanitário Bandeirantes, São Paulo. Nos ensaios foram encontrados valores de ângulo de atrito de 27º e coesão variando de 42 a 55 kPa para corpos de prova de 15 x 30 cm e ângulo de atrito de cerca de 21º e coesão entre 45 e 60 kPa para corpos de prova de 20 x 40 cm. Assim sendo, as dimensões dos corpos de prova é um outro fator que influencia nos resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento. Verificou-se que os corpos de prova com menores dimensões tendem a apresentar maiores valores de resistência.

A Tabela 24 apresenta alguns parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU reportados na literatura, obtidos através de ensaios de cisalhamento direto de laboratório.

Tabela 24 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos através de ensaios de cisalhamento direto de laboratório.

LOCAL	DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA	PARÂMETROS		FONTE
		c' (kN/m²)	ϕ' (º)	
Aterros do Canadá	434 x 287 mm (c x l)	0 – 23	24 - 41	(LANDVA; CLARK, 1990)
Aterro Monterey, Califórnia	130 x 76 a 102 mm (diâmetro x h)	0	39 e 53	(Siegel et al., 1990)
-	100 x 100 x 300 mm (c x l x h)	-	26,4 (rsu novo)	(KOLSCH, 1990)

			17,7 (rsu velho)	
-	fardos com 400 x 500 x 600 mm (c x l x h)	16 e 24	21 e 22	(DEL-GRECO; OGERRI, 1993)
Pionner Crossing, Pensilvânia	63,5 mm x 23 mm (diâmetro x h)	0 a 27,5	20,5 a 39 (rsu velho)	(GABR; VALERO, 1995)
Wisconsin, EUA	300 mm (diâmetro)	24	42	(Edincliler et al., 1996)
-	2 x 1 x 1,5 m (c x l x h) e 300 x 300 mm (c x l)	15	29,7 e 31 (rsu novo) 40 e 38 (rsu velho)	(COLLINS et al., 1997)
Aterro de Pinnow, Alemanha	555 x 365 x 190 mm (c x l x h)	59,7 e 17	22,9 e 26,4	(MUNNICH, 2001)
-	300 x 300 x 200 mm (c x l x h)	25,7 - 54,1	22,5 - 43,3	(Scheelhaase et al., 2001)
Aterro de Doña Juana, Colômbia	300 x 300 x 200 mm (c x l x h)	27	24	(Caicedo et al., 2002)
Usina de Compostagem em Jacarepaguá - RJ	400 x 250 x 200 mm (c x l x h) e 100 x 100 x 70 mm (c x l x h)	3 - 6 07 – 11	25 - 42 35 – 37	(LAMARE NETO, 2004)
Aterro de Buchen e Ihlenberg, Alemanha	300 x 300 x 150 mm (c x l x h)	23 – 29	37 - 46	(FUCALE, 2005)
Aterro de Belo Horizonte	700 x 700 x 500 mm (c x l x h)	5 – 84	3 - 38	(MARTINS, 2006)
Usina de Compostagem - DF	1000 x 1000 x 1000 mm (c x l x h)	1 - 4,35	34,5 - 38,6	(CARDIM, 2008)
Aterro de Ihlenberg, Alemanha	1 x 1,8 m (c x l)	15 – 17	29,7 - 45,1	(Kölsch, 2009)
CTR Northeim, Alemanha	300 x 300 x 150 mm (c x l x h)	34,6 TM[2] 39,9 ((TMB)[3]	36,3 TM[2] 44 ((TMB)[3]	(BORGATTO, 2010)
CTR Igarassu -PE	600 x 600 x 600 mm (c x l x h)	34,3 (rsu) 22,7 (rsu-rf)[1]	28 (rsu) 23 (rsu- rf)[1]	(MOTTA, 2011)
Aterro em Khermai Road, Satna, Índia	60 x 60 x 30 mm (c x l x h)	12	38	(Pandey & Tiwari, 2015)
Aterro de João Pessoa - PB	60 x 60 x 45 mm	24,9 e 27,7	22,9 e 28,9	(GRS - UFPE, 2017)

Fonte: adaptado de MOTTA (2011).
[1] rsu com fibras reduzidas; [2] tratamento mecânico; [3] tratamento mecânico biológico

4.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL DOS RSU

A principal finalidade desta pesquisa, juntamente com a análise de estabilidade, é o estudo dos parâmetros de resistência ao cisalhamento: devido ao atrito, o ângulo de atrito e a coesão; e à tração, o ângulo de tensão de tração (ζ), a resistência à tração específica das fibras (Z) e o fator de correção (α_ζ) todos obtidos através dos ensaios de cisalhamento direto.

Por meio dos ensaios para as diferentes amostras de resíduos, apresentadas na Tabela 25, foram obtidas curvas que forneceram os parâmetros de resistência ao cisalhamento entre outros dados relevantes para realizar uma análise comparativa a partir de pontos de vista teóricos e experimentais e utilizar estes parâmetros para obter

os parâmetros necessários para realização das análises de estabilidade dos resíduos sólidos urbanos realizadas no capítulo 6.

O material misto (M.M.) citado na Tabela 25, definido na composição gravimétrica e volumétrica como sendo os resíduos passantes na peneira de 25 mm e 8 mm, é classificado como os materiais que compõe a matriz básica/material inerte conforme Grisolia et al. (1995) e Fucale (2005).

Tabela 25 - Resumo dos tipos e percentuais de fibras nas amostras ensaiadas.

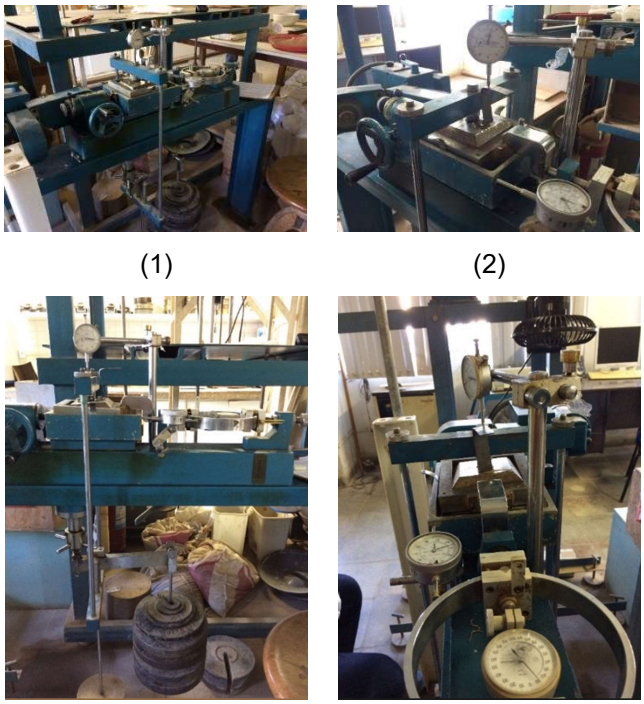
AMOSTRAS	COMPOSIÇÕES
1. Material Misto < 8 mm	→ 100% M.M. < 8 mm
2. Material Misto < 8 mm + Madeira	→ 99% M.M. < 8 mm + 1% Madeira → 97,56% M.M. < 8 mm + 2,44% Madeira → 97% M.M. < 8 mm + 3% Madeira → 96% M.M. < 8 mm + 4% Madeira → 95% M.M. < 8 mm + 5% Madeira
3. Material Misto < 8 mm + Plástico	→ 99% M.M. < 8 mm + 1% Plástico → 97% M.M. < 8 mm + 3% Plástico → 95% M.M. < 8 mm + 5% Plástico → 93% M.M. < 8 mm + 7% Plástico → 90,27% M.M. < 8 mm + 9,73% Plástico
4. Material Misto < 8 mm + Têxtil	→ 98,63% M.M. < 8 mm + 1,37% Têxtil → 97% M.M. < 8 mm + 3% Têxtil → 95% M.M. < 8 mm + 5% Têxtil → 93% M.M. < 8 mm + 7% Têxtil → 90% M.M. < 8 mm + 10%Têxtil
5. Material Misto < 8 mm + Madeira + Plástico + Têxtil	→ 86,46% M.M. < 8 mm + 2,44% Madeira + 9,73% Plástico + 1,37% Têxtil

Fonte: A Autora (2019).

O ensaio de resistência ao cisalhamento direto convencional para RSU foi baseado no critério de ruptura Mohr – Coulomb conforme o proposto na mecânica dos solos tradicional.

Para a realização dos ensaios de cisalhamento direto se utilizou um equipamento convencional produzido pelo Ronald Top S/A, com sistema de aplicação de tensão normal a partir de peso pendural. A força cisalhante exercida na seção é medida por meio de um anel dinamométrico de constante de 0,16 kgf/div e capacidade de 500 kgf. Os deslocamentos horizontais e verticais são medidos por meio de extensômetros manuais da marca Mitutoyo com sensibilidade de 0,01 mm. A Figura 26 apresenta o equipamento de cisalhamento direto utilizado nesta tese.

Figura 26 - Equipamento de cisalhamento direto convencional produzido pelo Ronald Top S/A em diversos ângulos – caixa cisalhante com dimensões de 101,8 x 101,8 x 45,0 mm.



(1) (2)

(3) (4)

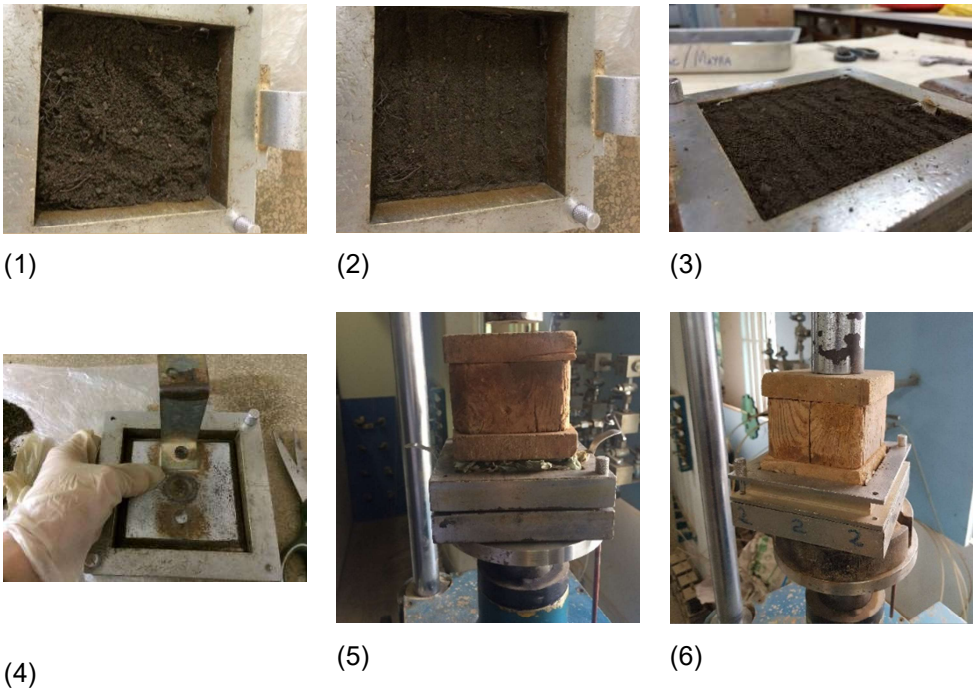
Fonte: A Autora (2019).

Para todos os ensaios, primeiro foi adotado um peso específico, que procurou se adequar aos valores de dimensionamento de projetos de aterros sanitários e aos valores encontrados em campo para camadas superficiais de resíduos estabilizados, para determinação do peso necessário para cada corpo de prova. Utilizando como base um valor de 1,15 g/cm^3 (aproximadamente 11,3 kN/m^3), foram necessários 536,3 g de RSU para cada amostra ensaiada. Também se tentou manter a umidade das amostras próxima ao encontrado no ensaio de teor de umidade para o material misto menor que 8 mm, definido por aproximadamente 10% na base úmida.

A moldagem do corpo de prova na caixa cisalhante foi realizada de duas maneiras distintas, de acordo com a taxa de fibras presentes nas amostras. Para as amostras com apenas material misto menor que 8 mm ou baixa quantidade de fibras, os corpos de prova foram moldados colocando o material diretamente na caixa e aplicando uma pequena vibração com auxílio da tampa para que as partículas granulares ocupassem melhor os espaços vazios. Já para as amostras com alto teor de fibras, devido à dificuldade em moldar os corpos de prova de forma manual por causa do grande volume das fibras, utilizou-se uma prensa mecânica manual para

comprimir o material na caixa, por camadas. (Em torno de cinco camadas por corpo de prova.) A Figura 27 mostra a moldagem do corpo de prova para as duas situações.

Figura 27 - (1), (2) e (3) aplicação das camadas da amostra para moldagem do corpo de prova; (4) compressão/vibração manual com o auxílio da tampa e (5) e (6) compressão mecânica com o auxílio de uma prensa.



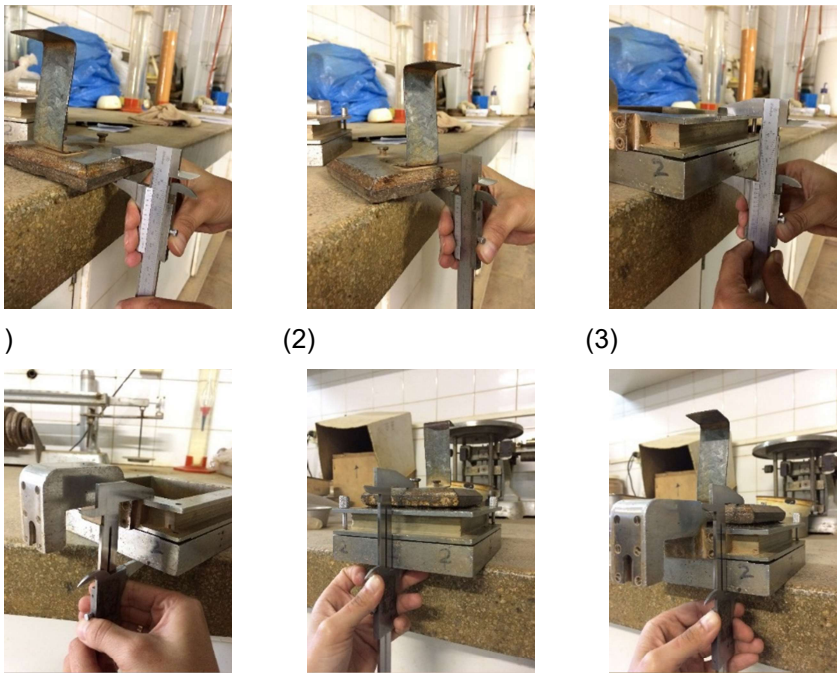
(1) (2) (3)

(4) (5) (6)

Fonte: A Autora (2019).

Após a moldagem do corpo de prova, realizou-se a verificação das alturas dos corpos de prova para controle do ensaio e obtenção do parâmetro e índice de vazios. Para a verificação foi necessário primeiro medir a altura da caixa cisalhante (Figura 28(3 e 4)), em seguida a medição da altura da tampa da caixa cisalhante (Figura 28(1 e 2)) e, por fim, tirar a medida da caixa preenchida com o corpo de prova e a tampa fechando a caixa nas quatro faces para obter uma altura média do conjunto (Figura 28(5 e 6)).

Figura 28 - (1) e (2) medição da tampa da caixa cisalhante em diferentes faces; (3) e (4) medição da caixa em diferente faces e (5) e (6) medição do conjunto caixa + tampa com o corpo de prova em diferentes faces.



(1) (2) (3)

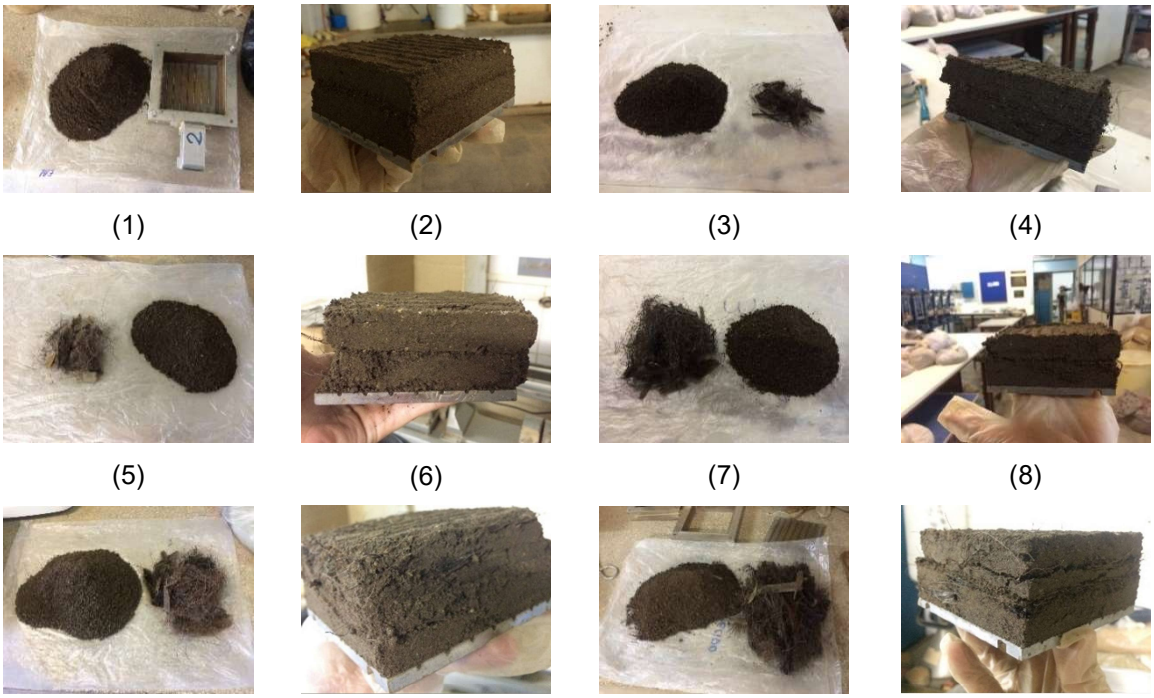
(4) (5) (6)

Fonte: A Autora (2019).

Antes de ensaiar as amostras, fez-se necessário adensar os corpos de prova até sua estabilização. Em virtude das fibras, foi necessário cerca de 30 a 45 minutos para estabilização do material. Consequentemente, adotou-se o tempo máximo de 45 minutos para todas as amostras de forma a padronizar os ensaios. Passada esta fase, executou-se o ensaio de cisalhamento utilizando uma velocidade de 0,483 mm/min, simulando um ensaio não drenado. Para cada amostra foi executada uma série com seis tensões normais, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa e 250 kPa, para analisar a bi-linearidade dos ensaios e obtenção dos parâmetros de tração a partir dos ensaios de resistência ao cisalhamento convencional. Os ensaios foram realizados até os deslocamentos horizontais máximos permitido pelo equipamento de 18 mm. Todas as amostras, a nível de controle, foram submetidas as medições da altura da caixa cisalhante ao final da moldagem do corpo de prova com o intuito de controlar a densidade e índice de vazios do mesmo. Também foram realizados ensaios de determinação do teor de umidade antes e após o término do ensaio de cisalhamento direto. A Figura 29 mostra, para um tipo de amostra, uma comparação dos volumes

de fibras e material misto para todas as percentagens ensaiadas naquelas amostras e os corpos de prova após o cisalhamento.

Figura 29 - (1) e (2) 0% de fibras de madeira antes da moldagem e após o cisalhamento; (3) e (4) 1% de fibras de madeira antes da moldagem e após o cisalhamento; (5) e (6) 2,44% de fibras de madeira antes da moldagem e após o cisalhamento; (7) e (8) 3% de fibras de madeira antes da moldagem e após o cisalhamento; (9) e (10) 4% de fibras de madeira antes da moldagem e após o cisalhamento e (11) e (12) 5% de fibras de madeira antes da moldagem e após o cisalhamento.



(1) (2) (3) (4)

(5) (6) (7) (8)

(9) (10) (11) (12)

Fonte: A Autora (2019).

4.2.1 Ensaios com Amostras de RSU

Todos os ensaios realizados com resíduos sólidos urbanos tiveram como matriz básica o material misto com partículas inferiores a 8 mm, devido às pequenas dimensões da caixa cisalhante com o intuito de minimizar os possíveis erros. Já às fibras, devido ao grau de dificuldade, tentou-se reduzir ao máximo seu tamanho para 5 mm x 30 mm, porém foi possível encontrar partículas bem menores e algumas maiores depois de ensaiadas, principalmente os plásticos. As fibras brutas se encontravam extremamente amarrotadas, dificultando o seu corte e redimensionamento.

Os níveis de deslocamentos horizontais específicos foram selecionados analisando todos os gráficos de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal específico e verificando os pontos de mudança no comportamento das curvas, alteração do módulo cisalhante. Desta forma, foram escolhidos deslocamentos de 1,2%, 4,5%, 9,6%, 14,4% e 17%, sendo a última o deslocamento horizontal máximo.

4.2.1.1 Amostras sem Acréscimo de Fibras (Material misto < 8 mm)

Os resultados do ensaio de cisalhamento direto são apresentados nas Figuras 27 e 28 através das curvas de variação de altura versus deslocamento relativo horizontal (Figura 30), dos índices de vazios na fase inicial do ensaio, após a fase de adensamento/início do ensaio e ao término do ensaio. Também são apresentados os gráficos de tensão cisalhante ao longo do deslocamento horizontal específico e razão de tensões versus deslocamento horizontal específico (Figuras 31).

Nas curvas deslocamento vertical versus deslocamento relativo horizontal, o comportamento é de compressão em todas as tensões normais de ensaio, como pode ser observado na Figura 30, apesar das baixas tensões de 25 e 50 kPa apresentarem uma leve dilatância ao término do ensaio.

No cisalhamento alguns solos sofrem, além das deformações cisalhantes, compressão ou expansão. Também é interessante analisar os índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio. O índice de vazios inicial (e_0) é de 1,3 para todas as tensões normais estudas. O índice de vazios reduz com o aumento da tensão normal aplicada no corpo de prova. Porém, a fase após o adensamento, com exceção das tensões de 25 e 50 kPa, a variação do índice de vazios do início (e_i) ao término (e_f) do ensaio de cisalhamento é entre 0,089 a 0,1. Para a tensão 25 kPa, a variação foi de apenas 0,016, enquanto para a tensão de 50 kPa, 0,047 (Tabela 26).

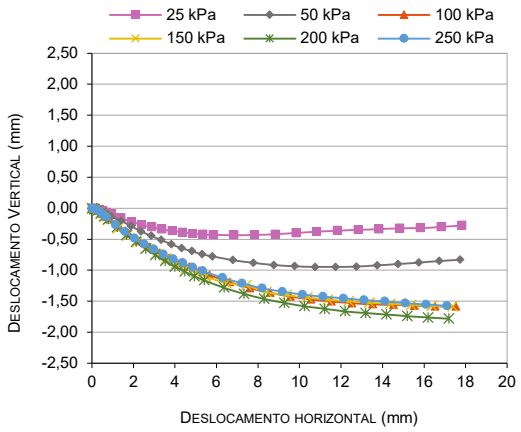
Tabela 26 - Índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio – Matriz básica.

Índices de Vazios	σ_N(kPa)					
	25	50	100	150	200	250
e_0	1,311	1,310	1,303	1,339	1,313	1,304
e_i	1,199	1,172	1,089	1,005	1,004	0,890
e_f	1,184	1,125	1,000	0,916	0,904	0,802

Fonte: A Autora (2019).

Li & Shi (2016) realizaram ensaios triaxiais com amostras de RSU e verificaram que, para todas as amostras ensaiadas, houve redução dos índices de vazios para 20, 30% de deformação horizontal e também ao término do ensaio em comparação com o índice de vazios após consolidação, como ocorre na matriz básica.

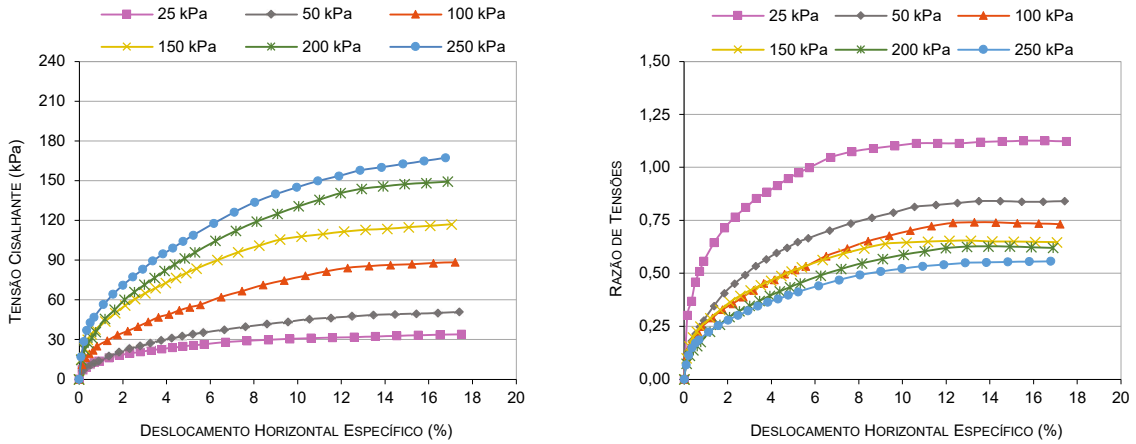
Figura 30 - Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica.



Fonte: A Autora (2019).

Na Figura 31(a) a resistência ao cisalhamento cresce com o aumento do deslocamento horizontal específico do material, não atingindo um valor máximo. A matriz básica dos resíduos sólidos desta pesquisa, embora possua partículas de dimensões inferiores a 8 mm, possui pequenos materiais fibrosos, como plástico, madeira e tecido, que apesar da segregação realizada anteriormente, foi impossível retirar essas minúsculas partículas. Estas partículas fibrosas provocaram um aumento da resistência, não apresentando um valor máximo na tensão cisalhante. Para tensões normais baixas, o aumento da tensão cisalhante é igualmente baixo, pois as pequenas partículas fibrosas presentes no corpo de prova ativam com o aumento da tensão normal aplicada.

Figura 31 - (a) Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Específico % e (b) Razão de Tensões x Deslocamento Horizontal Específico % – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica.



(a) **(b)**

Fonte: A Autora (2019).

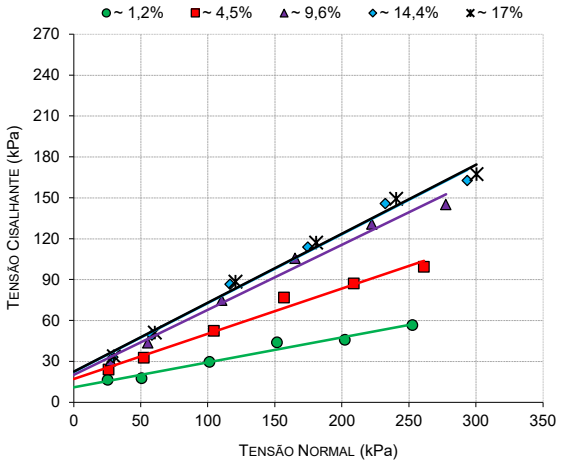
Grisolia et al. (1995) afirmam que os materiais inertes dos RSU apresentam comportamento mecânico semelhante a um solo granular muito heterogêneo de granulometria grosseira, desenvolvendo forças de atrito entre partículas. Jessberger (1994) e outros autores concordam que os resíduos sólidos são separados em duas matrizes: básica e reforço, sendo a matriz básica composta dos materiais inertes de fina e média granulometria. Portanto, quando se estuda os resíduos sólidos estabilizados, ausente de material biodegradável, o comportamento é similar a um solo granular reforçado, tipo terra armada.

A Figura 31(b) apresenta a normalização dos resultados da curva tensão – deslocamento da Figura 31(a). A razão de tensões é a razão da tensão cisalhante pela tensão normal efetiva aplicada. Para tensão de 25 kPa, a razão de tensões será maior que 1 para deslocamentos acima de 6%.

As envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico estão ilustradas na Figura 32 e os valores das tensões cisalhantes correspondentes estão indicados na Tabela 27. Nota-se que a resistência ao cisalhamento aumenta com o deslocamento horizontal representada pelo aumento do ângulo de atrito, já que a coesão, excluindo a envoltória para 1,2% de deslocamento, manteve-se dentro de uma pequena faixa de valores, tendo um leve aumento. Este comportamento também é expresso nas curvas de variação dos parâmetros de

resistência, coesão e ângulo de atrito, ao longo do deslocamento horizontal mostrada na Figura 33 e resumida na Tabela 28.

Figura 32 - Envoltórias de Resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica.



Fonte: A Autora (2019).

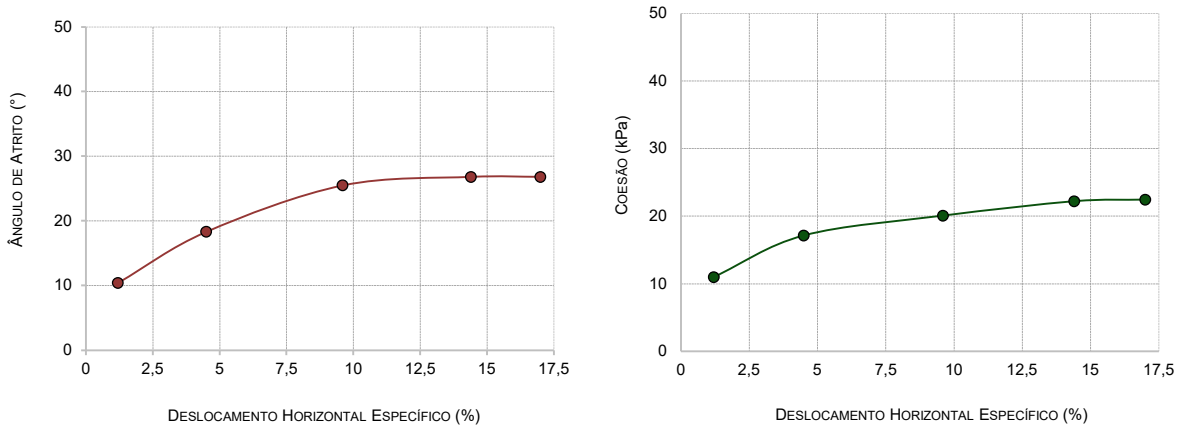
A envoltória de resistência está representada na Figura 34. Os parâmetros de resistência do material misto < 8 mm representando a matriz básica dos resíduos pesquisado, para os níveis de tensões normais ensaiados, foram ϕ' = 26,8° e c' = 22,5 kPa, como observado na Figura 34 e Tabela 29, a qual apresenta um resumo dos dados deste ensaio.

Tabela 27 - Valores das tensões cisalhantes ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica.

TENSÃO NORMAL APLICADA σ_N (kPa)	**τ (kPa)**				
	~ 1,2%	**~ 4,5%**	**~ 9,6%**	**~ 14,4%**	**~ 17,0%**
25	16,35	23,9	30,5	32,9	33,73
50	17,58	32,6	43,5	49,2	50,96
100	29,37	52,2	74,9	86,4	88,51
150	43,82	76,8	105,6	113,7	117,09
200	45,66	86,9	130,8	145,8	149,36
250	56,50	99,3	145,0	162,6	167,38

Fonte: A Autora (2019).

Figura 33 - (a) Variação do ângulo de atrito e (b) Variação da coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica.



(a) **(b)**

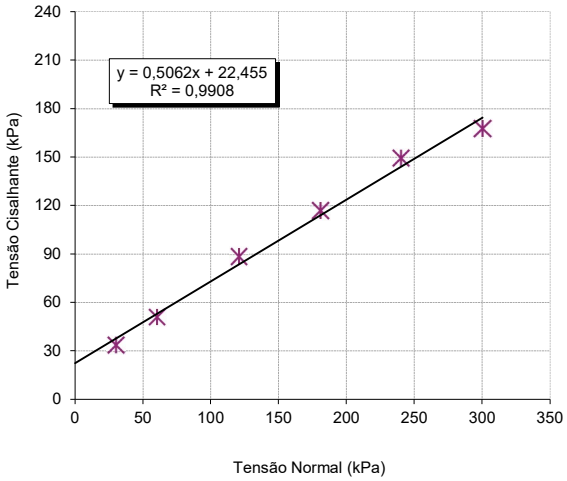
Fonte: A Autora (2019).

Tabela 28 - Valores dos parâmetros de resistência ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica

Parâmetros de Resistência	**Deslocamento Horizontal Específico %**				
	~ 1,2%	**~ 4,5%**	**~ 9,6%**	**~ 14,4%**	**~ 17,0%**
ϕ' (º)	13,4	23,9	31,3	29,6	26,8
c' (kN/m^2)	7,1	8,9	10,1	17,7	22,5

Fonte: A Autora (2019).

Figura 34 Envoltória de Resistência – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica.



Fonte: A Autora (2019).

Tabela 29 - Resumo dos dados do ensaio de resistência ao cisalhamento – 100% de material misto < 8 mm natural – Matriz básica.

DADOS DO ENSAIO	σ_N(kPa)					
	25	50	100	150	200	250
$\rho_{úmido}$ (g/cm^3)	1,26	1,26	1,27	1,25	1,26	1,27
ρ_{seco} (g/cm^3)	1,11	1,11	1,11	1,09	1,11	1,11
w%	11,99%	12,03%	11,87%	12,05%	11,80%	12,09%
e_0	1,311	1,310	1,303	1,339	1,313	1,304
e_i	1,199	1,172	1,089	1,005	1,004	0,890
e_f	1,184	1,125	1,000	0,916	0,904	0,802
ϕ' (º)	26,8					
c' (kPa)	22,5					

Fonte: A Autora (2019).

4.2.1.2 Amostras com a Composição determinada na Composição Gravimétrica

As amostras destes ensaios foram realizadas com a matriz básica, representada pelo material misto com partículas inferiores a 8 mm, e a matriz reforço, composta pelas fibras encontradas no fracionamento dos RSU, sendo 2,44% de madeira, 1,37% de têxtil e 9,73% de plástico.

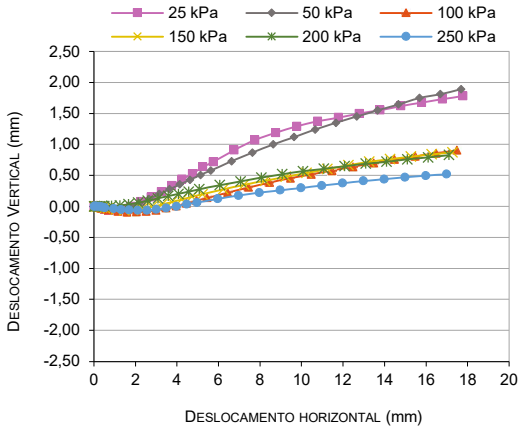
A Figura 35 ilustra as curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal das amostras dos resíduos sólidos estabilizados do aterro controlado da Muribeca, em diferentes tensões normais aplicadas.

As curvas deslocamento vertical ao longo do deslocamento horizontal do ensaio de cisalhamento direto da matriz composta reforçada exibem um comportamento diferente da matriz básica. Neste caso, os corpos de prova sofrem uma leve compressão no início do cisalhamento seguida de uma dilatância. Todavia, para as tensões de 25 e 50 kN/m^2 a dilatação é bem maior do que para as tensões maiores, 100, 150, 200 e 250 kN/m^2. O aumento do volume para as tensões baixas é de aproximadamente $\Delta h = 2$ mm, enquanto para as tensões de 100 kPa em diante o aumento de volume é $\Delta h < 1$ mm.

O índice de vazios inicial é de aproximadamente 1,1 para todas as tensões normais aplicadas. Como o índice de vazios varia com o volume do corpo de prova (deslocamento vertical), ao comparar a variação dos índices de vazios do início ao término do ensaio ($e_f - e_i$) da matriz composta reforçada com a matriz básica, verifica-se que na matriz composta o índice de vazios tem um pequeno aumento durante o

cisalhamento do corpo de prova. O ∆e decresce com o aumento da tensão normal aplicada variando entre 0,03 e 0,085 (Tabela 30).

Figura 35 - Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.



Fonte: A Autora (2019).

Tabela 30 - Índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio – Matriz composta reforçada.

Dados do Ensaio	σ_N(kPa)					
	25	50	100	150	200	250
e_0	1,113	1,068	1,124	1,161	1,036	1,095
e_i	0,925	0,875	0,871	0,803	0,815	0,728
e_f	1,006	0,959	0,912	0,843	0,853	0,752

Fonte: A Autora (2019).

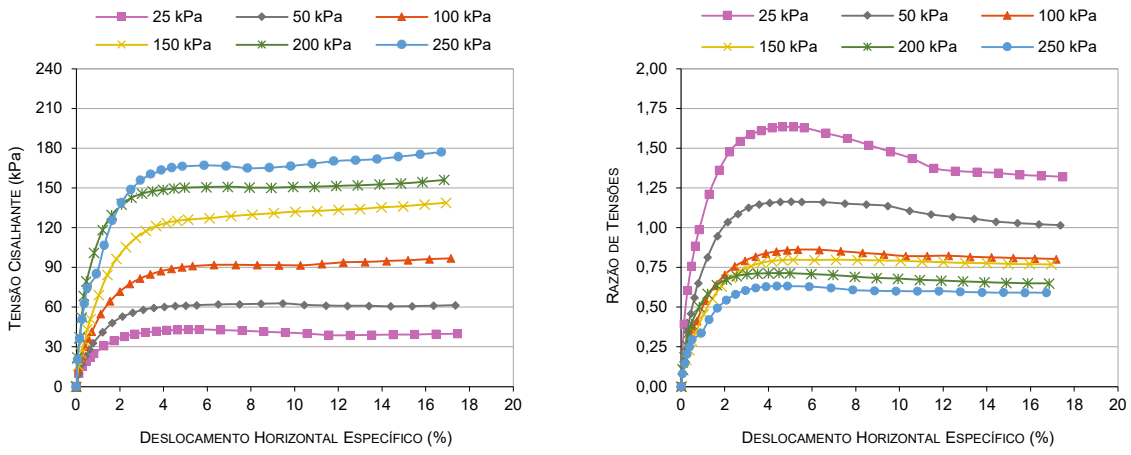
A Figura 36 ilustra as curvas tensão cisalhante e razão de tensões ao longo do deslocamento horizontal específico das amostras da matriz composta reforçada com as fibras de madeira, plástico e têxtil dos RSU, em diferentes tensões normais aplicadas.

A amostra apresentou curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal semelhante ao comportamento de materiais com ruptura plástica. Apesar da inclusão das fibras, o comportamento das curvas não é propriamente típico dos materiais que possuem em sua composição a inclusão desse tipo de reforço, pois não apresenta uma tendência de verticalização da curva. No entanto, após um deslocamento horizontal de aproximadamente 4%, a resistência continua aumentando suavemente para as altas tensões normais ensaiadas. Este comportamento pode ser explicado

devido ao alto teor dos materiais fibrosos, igual a 13,54%. Como explicado em Corrêa (2013), as fibras do RSU contribuem com a resistência até uma certa quantidade. Após atingir este teor, as fibras começam a deslizar entre elas, reduzindo os altos valores das tensões cisalhantes e alterando suavemente seu comportamento.

As curvas tensão – deslocamento apresentadas por Borgatto (2010) para resíduos estabilizados por tratamento mecânico biológico com a composição original (CO) do aterro Northeim, Alemanha, demostram que o aumento da tensão cisalhante em torno de 10% do deslocamento horizontal é praticamente constante. Já a matriz básica com adição de fibras (3,5 %) de resíduos sólidos estabilizados, em ramo úmido, proveniente do aterro de Ihlenberg, Alemanha, analisada por Fucale (2005), apresenta uma tensão cisalhante tendendo a valores constantes a partir de um deslocamento horizontal em torno de 8%. O resultado dessa pesquisa tende a valores constantes a partir de um deslocamento horizontal em torno de 4%. Um pouco abaixo em relação as duas pesquisas citadas, mas apresentando uma mesma tendência.

Figura 36 - (a) Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Específico % e (b) Razão de Tensões x Deslocamento Horizontal Específico % – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.



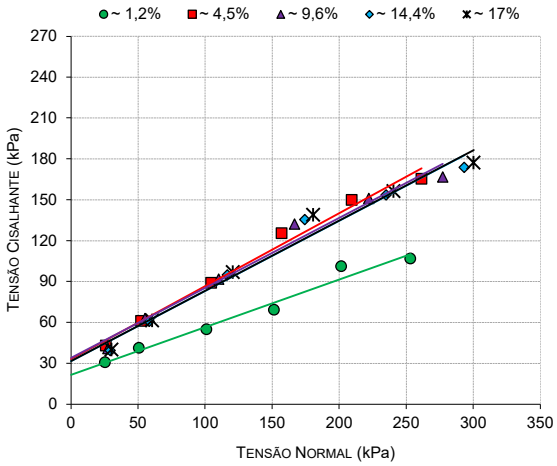
(a) (b)

Fonte: A Autora (2019).

A Figura 36(b) apresenta a normalização dos resultados da curva tensão – deslocamento da Figura 36(a). Para tensão de 25 kPa, a razão de tensões é maior que 1,5 para deformações acima de 2,5%, enquanto para a tensão de 50 kN/m^2, é maior que 1 para deformações superiores a 2%.

As envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico estão ilustradas na Figura 37 e os valores das tensões cisalhantes correspondentes estão indicados na Tabela 31. Observa-se que as curvas com o deslocamento horizontal específico acima de 1,2% se encontram praticamente sobrepostas. A coesão pouco variou, mantendo-se dentro do intervalo entre 31,7 a 34,3 kPa, enquanto o ângulo de atrito variou entre 27,2 e 28,2º para deslocamentos iguais ou superiores a ~ 4,5%. A curva ~ 1,2% apresenta coesão e ângulo de atrito inferiores as demais, como é possível observar na Figura 38 e resumida na Tabela 32. Esta diferença é explicada através da ativação das fibras no ensaio de resistência ao cisalhamento. A ativação das fibras ocorre para deslocamentos horizontais mais elevados.

Figura 37 - Envoltórias de Resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.



Fonte: A Autora (2019).

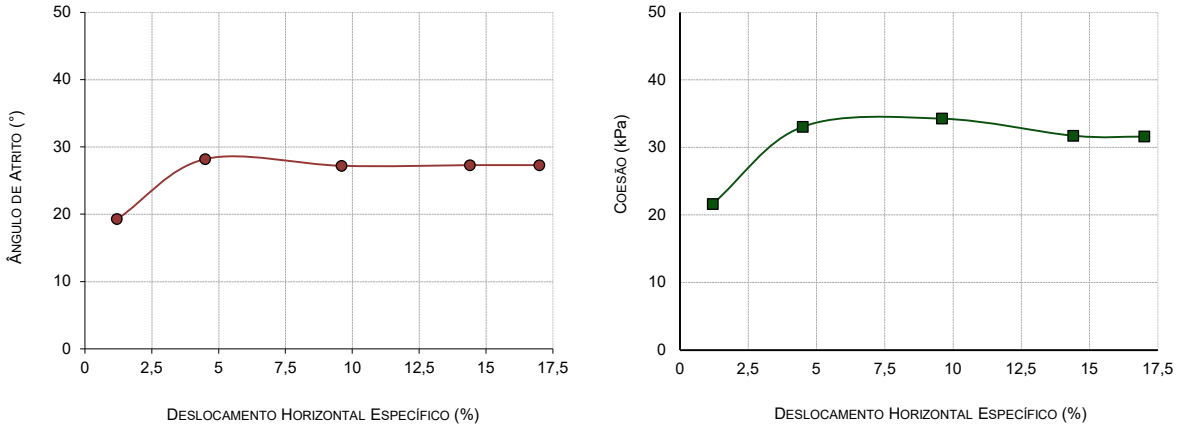
Tabela 31 - Valores das tensões cisalhantes ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.

TENSÃO NORMAL APLICADA σ_N(kPa)	τ(kPa)				
	~ 1,2%	~ 4,5%	~ 9,6%	~ 14,4%	~ 17,0%
25	30,67	42,87	40,86	39,32	39,99
50	41,23	60,90	62,79	60,67	61,46
100	54,82	88,97	91,79	94,86	96,96
150	69,15	125,26	132,11	135,53	138,89
200	101,21	149,62	150,86	153,49	156,21

250	106,75	165,30	166,65	173,71	177,27

Fonte: A Autora (2019).

Figura 38 - (a) Variação do ângulo de atrito e (b) Variação da coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.



(a) (b)

Fonte: A Autora (2019).

Os valores apresentados na Tabela 32 mostram uma variação pequena tanto do ângulo de atrito como da coesão entre o deslocamento horizontal de 4,5 e 17%, onde a coesão ficou em torno de 32kPa e o ângulo de atrito em torno de 27º. Em Borgatto (2010) o ângulo de atrito também se manteve dentro de uma faixa de valores, porém a média foi de 42º. Já a coesão se manteve crescente, variando de 7 a 40 kPa para amostras de resíduos estabilizados por meio do tratamento mecânico biológico com composição original compactada na caixa de cisalhamento nas condições ótimas de Proctor.

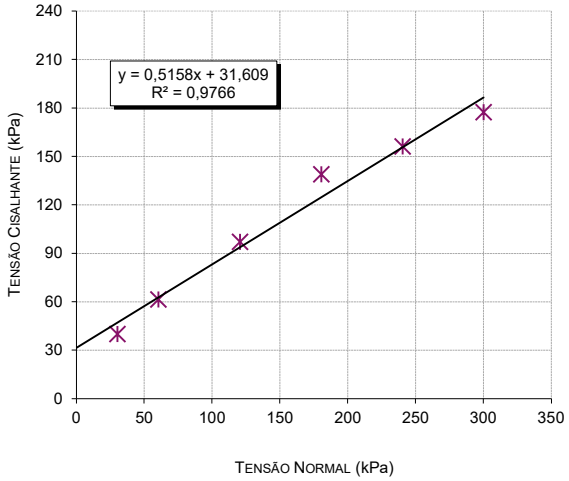
Tabela 32 - Valores dos parâmetros de resistência ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.

Parâmetros de Resistência	**Deslocamento Horizontal Específico %**				
	~ 1,2%	**~ 4,5%**	**~ 9,6%**	**~ 14,4%**	**~ 17,0%**
ϕ' (º)	19,3	28,2	27,2	27,3	27,3
c' (kN/m^2)	21,6	33,1	34,3	31,7	31,6

Fonte: A Autora (2019).

A envoltória de resistência para deslocamento horizontal específico máximo de aproximadamente 17% do comprimento da amostra está representada na Figura 39. Os parâmetros de resistência da matriz composta reforçada por fibras encontradas nos RSU, para os níveis de tensões normais ensaiados, têm como resultados encontrados ϕ' = 27,3° e c' = 31,6 kPa. A Tabela 33 apresenta um resumo dos dados obtidos nos respectivos ensaios.

Figura 39 - Envoltória de Resistência – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.



Fonte: A Autora (2019).

Tabela 33 - Resumo dos dados do ensaio de resistência ao cisalhamento – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.

DADOS DO ENSAIO	**σ_N (kPa)**					
	25	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**
$\rho_{úmido}$ (g/cm^3)	1,25	1,26	1,23	1,20	1,28	1,23
ρ_{seco} (g/cm^3)	1,10	1,12	1,09	1,08	1,14	1,11
w%	11,80%	10,64%	11,06%	10,62%	11,15%	9,84%
e_0	1,113	1,068	1,124	1,161	1,036	1,095
e_i	0,925	0,875	0,871	0,803	0,815	0,728
e_f	1,006	0,959	0,912	0,843	0,853	0,752
ϕ' (º)	27,3					
c' (kPa)	31,6					

Fonte: A Autora (2019).

4.2.1.3 Amostras com Acréscimo de Fibras de Madeira

Nesta etapa da pesquisa, as amostras foram preparadas com a matriz básica, representada pelo material misto com partículas inferiores a 8 mm, e a matriz reforço composta pelas fibras de madeira encontradas na composição física dos RSU, sendo em sua maioria fibras oriundas do coco.

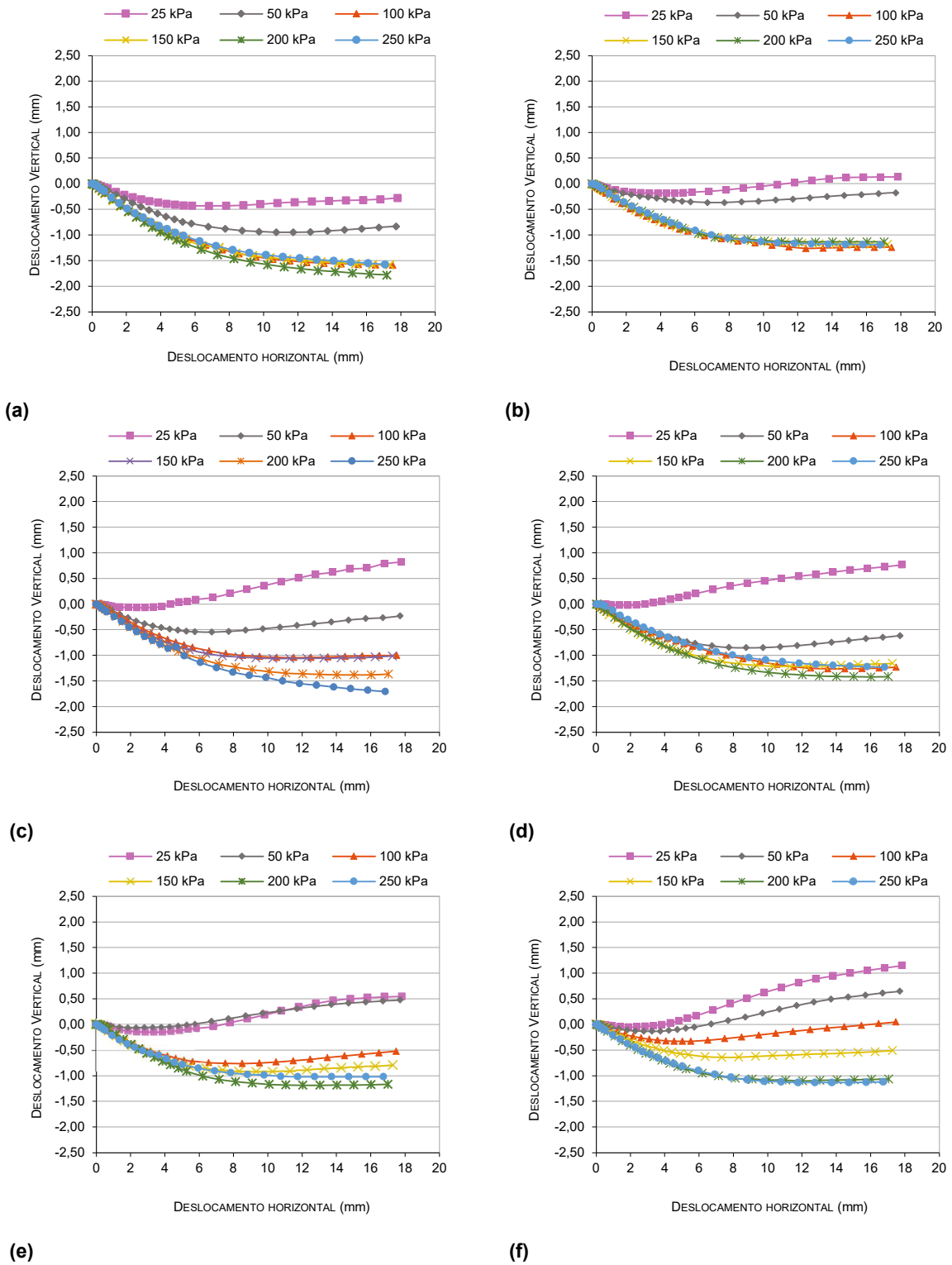
As determinações dos percentuais de fibras de madeira tiveram como base o trabalho da ATEPE/GRS - UFPE (2014), onde a média da composição gravimétrica da madeira de todos os setores da cidade do Recife – PE foi de 5,33%, e a composição gravimétrica realizada neste trabalho. Portanto, as percentagens ensaiadas foram 1%; 2,44% - definida na composição gravimétrica; 3%; 4% e 5% de material fibroso. O intuito da variação na percentagem deste tipo de fibra é analisar a influência deste material no comportamento da massa de resíduo e, consequentemente, seus parâmetros de resistência.

A Figura 40 apresenta a compilação dos gráficos da variação de volume ao longo dos deslocamentos horizontais para todas as percentagens ensaiadas com as fibras de madeira. O gráfico (a) da Figura 40 representa as curvas da matriz básica para se ter uma referência de comparação.

Para todas as percentagens estudadas, a curva de tensão normal igual 25 kPa apresentou uma pequena compressão até 4 mm de deslocamento horizontal, porém, com o aumento do deslocamento, o volume do corpo de prova aumentou. Essa dilatância em 25 kPa foi maior para maiores tensões normais, tendo uma expansão mínima de Δh = 0,135 mm para 1% de fibras e máxima de Δh = 1,150 mm para 5% de fibras presentes no corpo de prova.

Para tensões normais maiores, acima de 100 kPa, o comportamento das curvas foi parecido, apresentando compressão ao longo de praticamente todo o deslocamento horizontal e uma leve expansão ao término do ensaio. A compressão máxima foi de Δh = 1,705 mm para a tensão de 250 kN/m^2 com corpo de prova com 2,44% de fibras presentes.

Figura 40 - Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%.



Fonte: A Autora (2019).

Quando comparado com os resultados da matriz composta reforçada de resíduos sólidos estabilizados estudado por Fucale (2005) utilizando uma caixa cisalhante de grande dimensão, nota-se semelhanças quanto à variação do volume

para baixas e altas tensões aplicadas nas amostras. Fucale (2005) obteve para as tensões de 50 e 100 kPa o comportamento de compressão inicial seguido de dilatância, porém para 50 kPa, esse aumento do volume foi mais de 4 vezes superior que a tensão de 100 kPa. Já para as tensões de 200 e 300 kPa a compressão prevaleceu no comportamento do material, como observa-se nas curvas exibidas na Figura 40.

A Tabela IV.34 apresenta os índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio de cisalhamento direto para os diferentes teores de fibras de madeira estudados. Os índices de vazios iniciais das amostras com acréscimo de fibras de madeira variam de aproximadamente 1,3 a 1,5 em todos os ensaios, sendo menores para menores teores de fibras, pois a densidade da fibra de madeira é inferior à do material misto.

Tabela 34 - Índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio – amostras com acréscimo de fibras de madeira.

Dados do Ensaio	**σ_N(kPa)**					
	25	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**
			1%			
e_0	1,265	1,270	1,279	1,284	1,274	1,284
e_i	1,190	1,149	1,061	1,074	0,971	0,955
e_f	1,198	1,140	0,992	1,009	0,908	0,889
			2,44%			
e_0	1,414	1,374	1,414	1,392	1,414	1,365
e_i	1,328	1,249	1,212	1,134	1,090	1,030
e_f	1,373	1,236	1,157	1,079	1,014	0,936
			3%			
e_0	1,482	1,468	1,468	1,475	1,487	1,479
e_i	1,359	1,302	1,193	1,173	1,126	1,021
e_f	1,401	1,268	1,125	1,109	1,048	0,954
			4%			
e_0	1,436	1,436	1,435	1,438	1,448	1,446
e_i	1,300	1,259	1,193	1,134	1,045	1,033
e_f	1,330	1,285	1,165	1,091	0,983	0,978
			5%			
e_0	1,498	1,461	1,426	1,535	1,517	1,509
e_i	1,351	1,255	1,200	1,181	1,078	1,075
e_f	1,413	1,290	1,203	1,154	1,021	1,015

Fonte: A Autora (2019).

Como dito anteriormente, o índice de vazios varia com o volume do corpo de prova, logo, nota-se um aumento do índice de vazios para todos os teores de fibras analisadas para a tensão normal aplicada de 25 kPa. A variação máxima durante a realização do ensaio (e_f - e_i) foi de Δe = 0,062 para a tensão de 250 kN/m^2 com corpo de prova com 5% de fibras presentes.

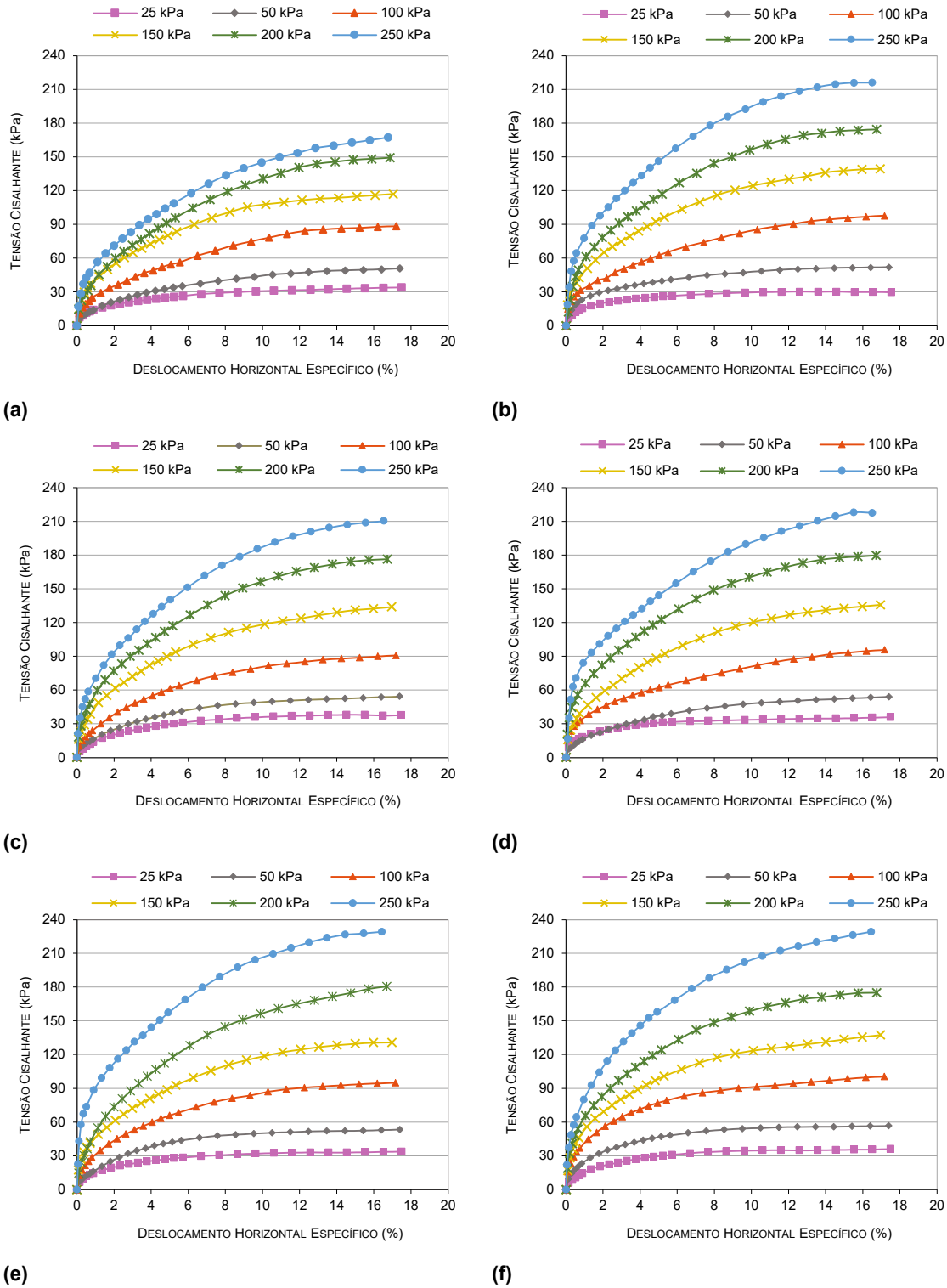
A Δe tende a crescer com o aumento da tensão normal aplicada, independente do teor de fibras de madeira, variando entre 0,03 (matriz básica (MB) + 5% de fibras de madeira para a tensão normal de 100 kPa) e 0,094 (MB + 2,44% de fibras de madeira para a tensão normal de 250 kPa).

A Figura 41 indica as curvas de tensão cisalhante ao longo do deslocamento horizontal específico para todos os corpos de prova reforçados com madeira.

Todas as curvas apresentadas nos gráficos da Figura 41 exibem aumento na resistência com o aumento do deslocamento horizontal, não apresentando claramente um valor máximo, no entanto, identifica-se uma tendência de estabilização do valor máximo a partir de deslocamentos horizontais em torno de 14% para as altas tensões normais aplicadas, como 150, 200 e 250 kN/m^2. Já para as tensões normais de 25 e 50 kPa, essa mobilização ocorre bem antes, próximo aos 8% do deslocamento horizontal específico. Essa diferença explica-se pela ativação das fibras. Apesar dos teores de fibras de madeira não terem sido elevados, variando de 1 a 5%, os materiais fibrosos necessitam de um deslocamento horizontal maior do corpo de prova para serem ativadas e, além disso, com o aumento da carga normal aplicada, os materiais, fibrosos e granulares, tendem a criar uma melhor aderência.

Os ensaios realizados com corpos de prova da mistura material misto + madeira apresentam características mecânicas semelhantes aos ensaios do material misto sem acréscimo de fibras e não semelhantes aos ensaios com a composição determinada na composição gravimétrica, matriz composta reforçada com 13,54% de fibras. Isso deve-se às fibras passantes no peneiramento no material misto com partículas < 8 mm, enquanto o alto teor de fibras da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras ocorre um provável deslizamento do material devido ao contato fibra-fibra.

Figura 41 - Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Específico % – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%.



Fonte: A Autora (2019).

A Figura 42 apresenta a normalização dos resultados das curvas tensão – deslocamento da Figura 41. Vale lembrar que a razão da tensão cisalhante pela tensão normal efetiva aplicada é a razão de tensões. Para tensão de 25 kPa, os

índices de tensões serão maiores que 1 para deslocamentos acima de aproximadamente 3% para todos os teores de fibras, à exceção de 1% de materiais fibrosos. É relevante atentar para o crescimento da razão de tensões com o aumento do teor das fibras nos corpos de provas, atingindo valores em torno de 1,25. Observando as demais tensões normais aplicadas, verifica-se que elas obtêm valores próximos a 0,75 a partir de um deslocamento horizontal de aproximadamente 10%.

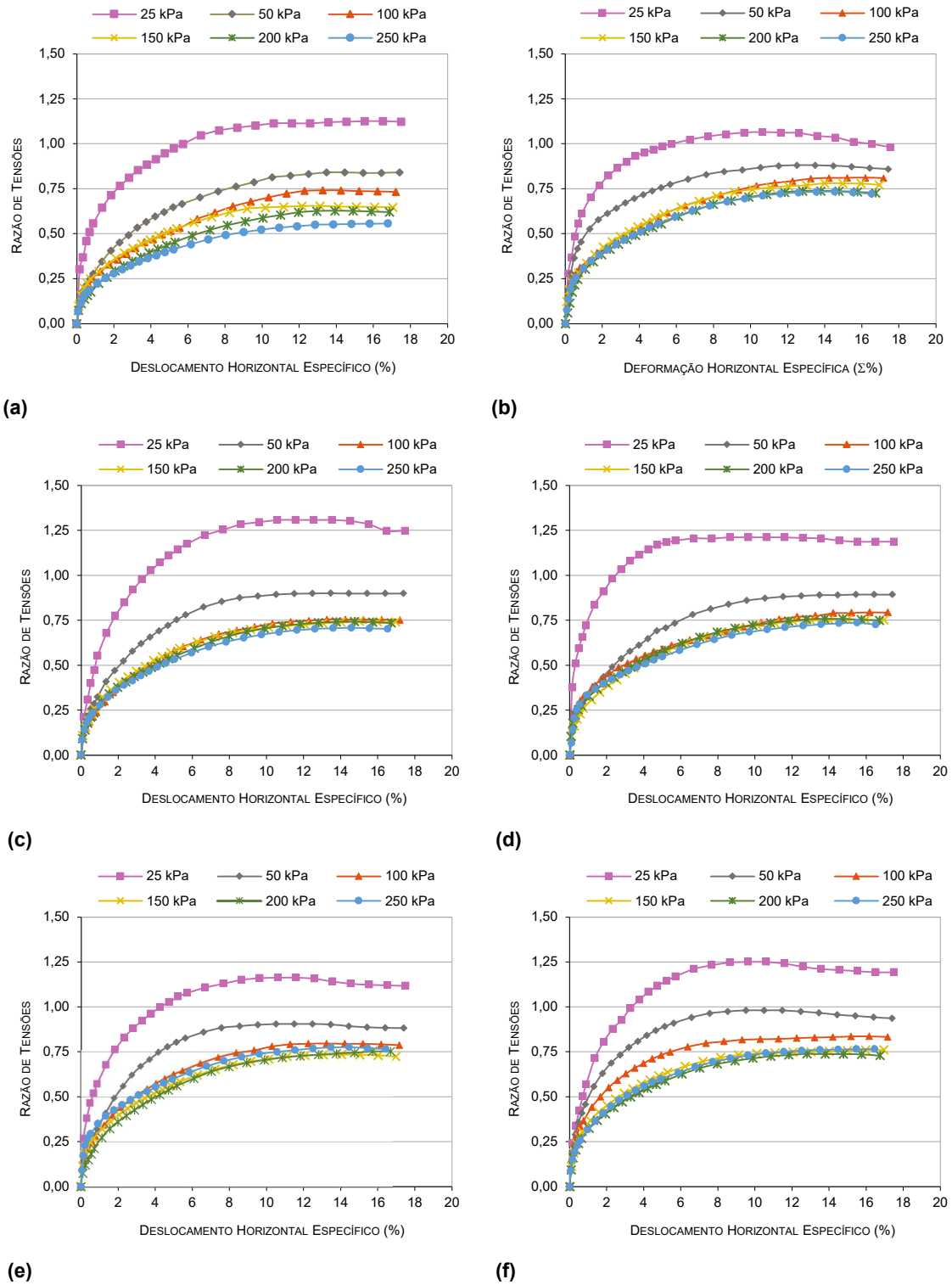
As envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico dos corpos de provas ensaiados com adição das fibras de madeira estão indicadas na Figura 43 e os valores das tensões cisalhantes correspondentes estão indicados na Tabela 35.

Verifica-se que as envoltórias das amostras com acréscimo de fibras de madeira apresentam comportamentos parcialmente similares aos da matriz básica, onde a resistência ao cisalhamento aumenta com o deslocamento horizontal representada pelo aumento do ângulo de atrito, já que a coesão, com exceção da envoltória ~1,2% de deslocamento, conservou-se dentro de uma faixa de valores. No entanto, além da envoltória ~1,2% de deslocamento horizontal, a envoltória ~ 14,4% da matriz básica apresenta valor de coesão fora da faixa de valores, sendo superior aos demais.

As coesões apresentam menores variações em suas curvas quanto menor o teor das fibras presentes nas amostras. A coesão variou entre 8,8 a 17,3 kPa para envoltórias maiores que ~ 1,2% de deslocamento horizontal e 3,7 a 9 kPa para as envoltórias ~ 1,2% de deslocamento horizontal específico. Já o ângulo de atrito variou entre 31,7 e 35,9º para deslocamentos igual ou superior a ~ 9,6%. As curvas ~ 1,2% e ~ 4,5% apresentam ângulo de atrito inferiores as demais como é facilmente observado nos gráficos Figura 43.

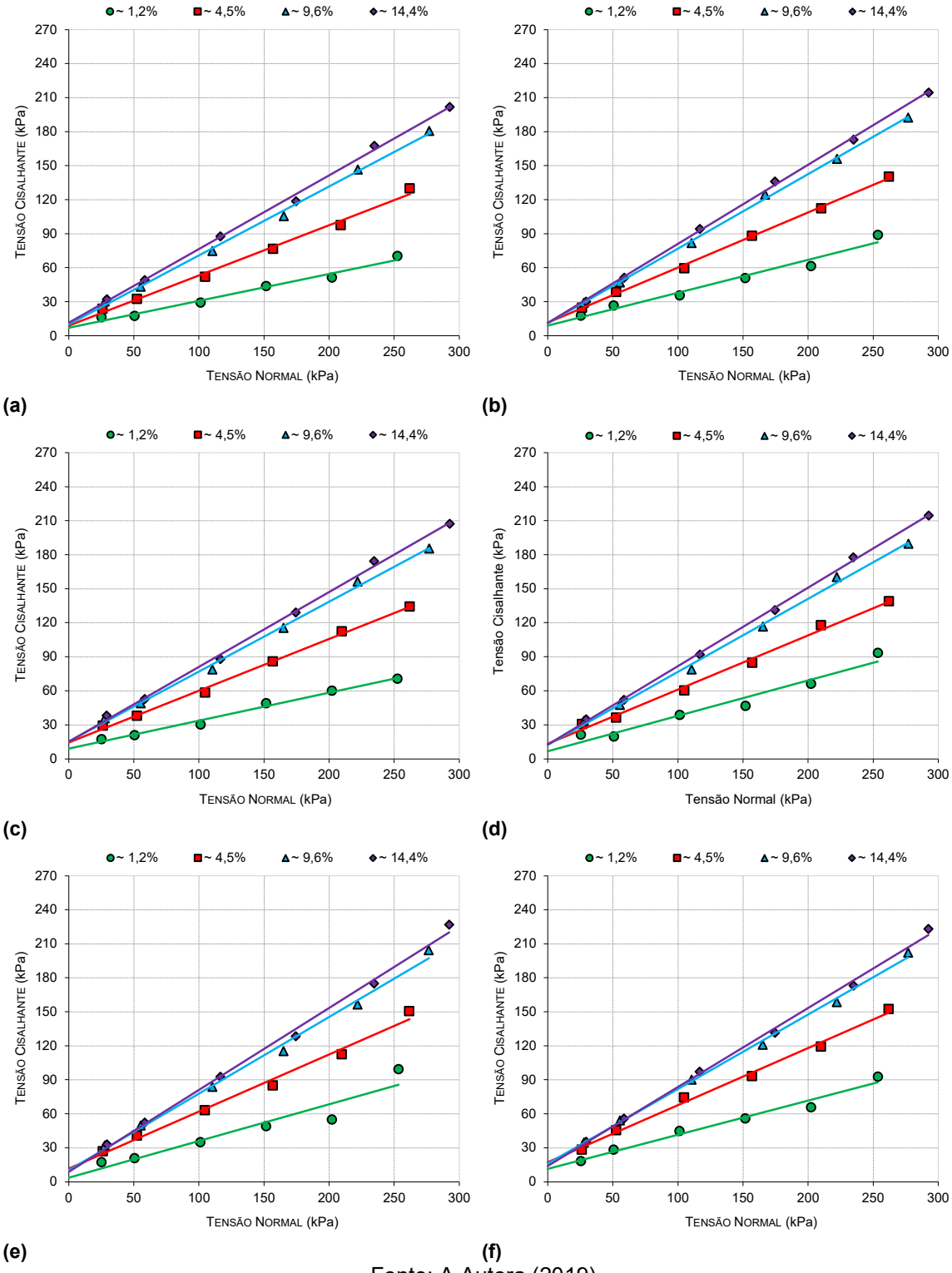
Os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento direto convencional para as amostras da matriz reforçada com diferentes taxas de fibras de madeira são apresentados nos gráficos das Figuras 44 e Figura 45. A Figura 44 e Figura 45 representam os valores dos ângulos de atrito e coesões ao longo do deslocamento horizontal específico, respectivamente.

Figura 42 - Razão de Tensões x Deslocamento Horizontal Específico % – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%.



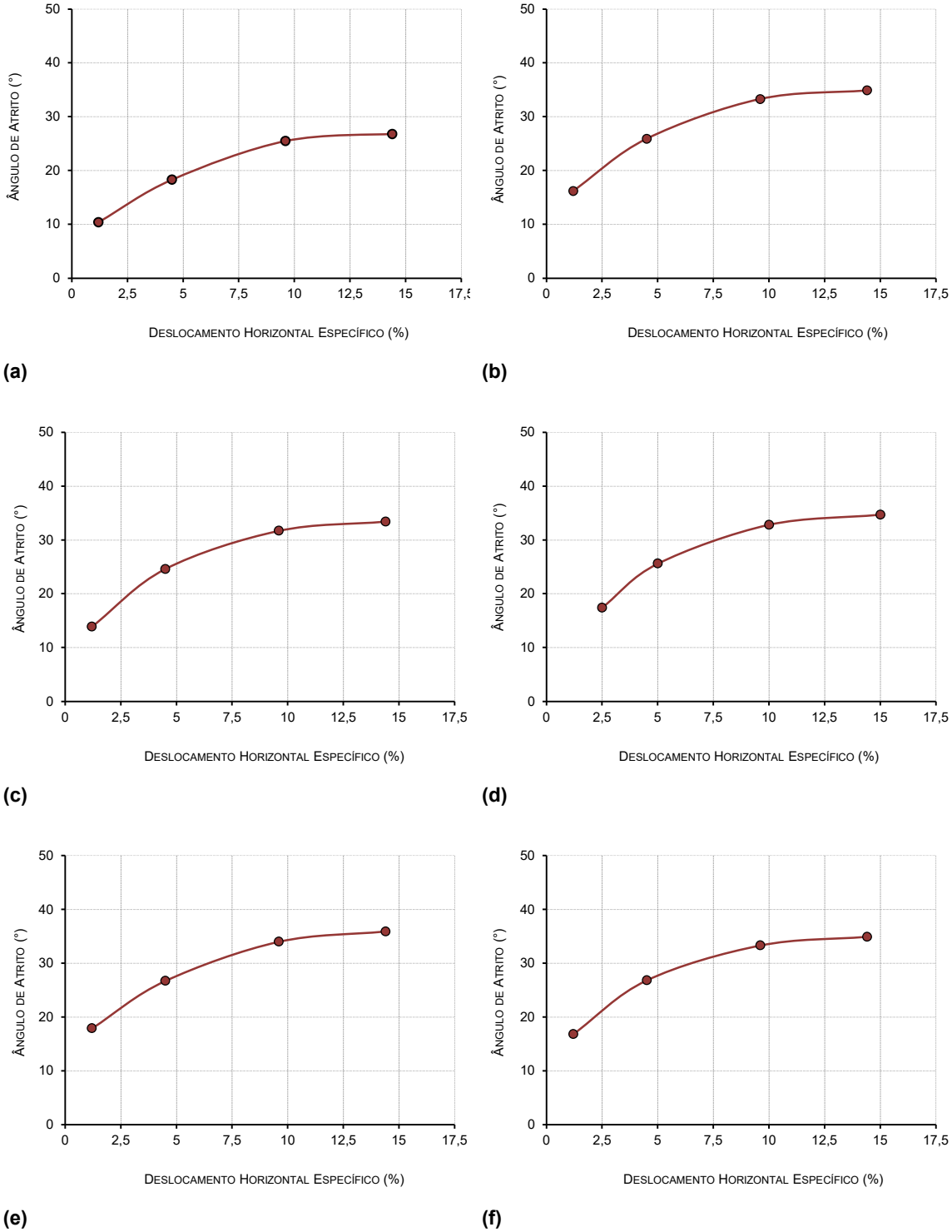
Fonte: A Autora (2019).

Figura 43 - Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%.



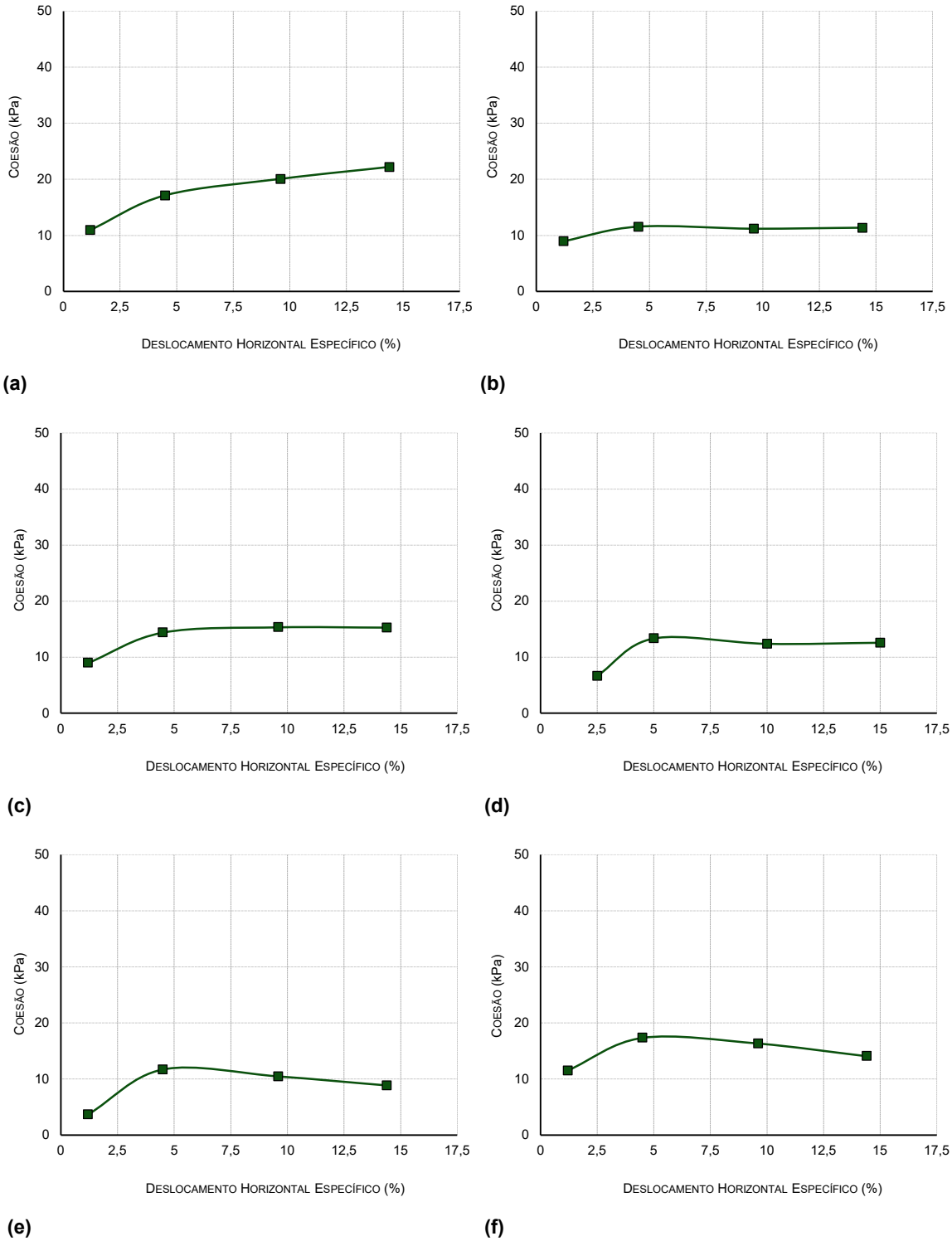
Fonte: A Autora (2019).

Figura 44 - Variação do ângulo de atrito ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%.



Fonte: A Autora (2019).

Figura 45 - Variação da coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%.



Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 36 indica todos os valores dos parâmetros de resistência apresentados graficamente nas Figuras 44 e 45. Esta diferença é explicada através

da ativação das fibras no ensaio de resistência ao cisalhamento. A ativação das fibras ocorre para deslocamentos horizontais mais elevados.

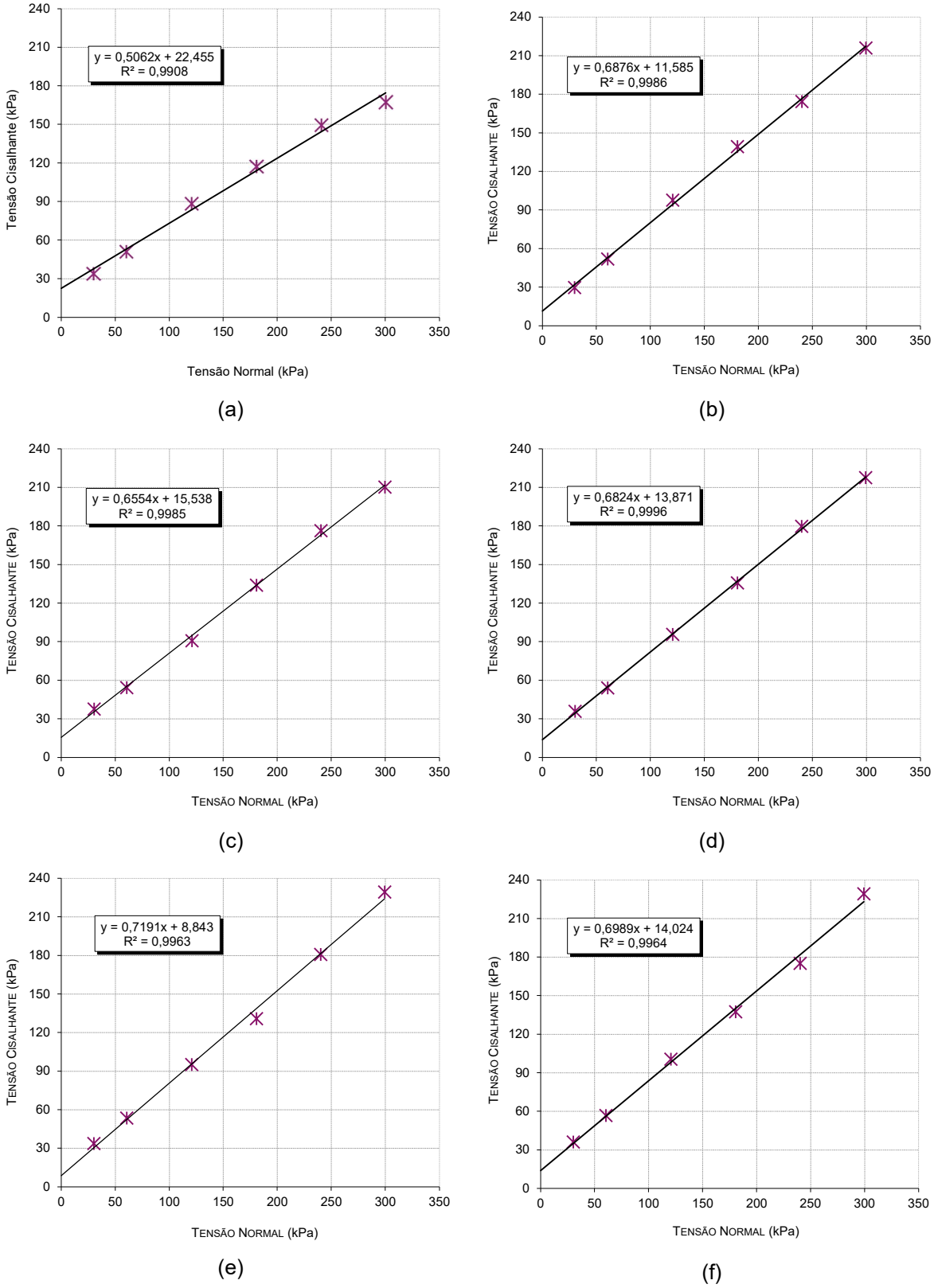
As envoltórias de resistência para deslocamentos horizontais específicos máximas de aproximadamente 17% do comprimento das amostras com inclusão das fibras de madeira estão ilustradas nos gráficos da Figura 46. Os parâmetros de resistência da matriz composta reforçada por diferentes percentagens fibras de madeira encontradas nos RSU, para os níveis de tensões normais ensaiados, têm como faixa de resultados encontrados ϕ' = 33,3° a 35,7° e c' = 8,8 kPa a 15,5 kPa, representado também na Tabela 37.

Os maiores e menores valores encontrados foram nos ensaios de 2,44% e 4% de inclusão de fibras de madeira. Enquanto as demais porcentagens tiveram os valores, tanto do ângulo de atrito como da coesão, gradativamente elevados com o aumento do teor das fibras. Não existe um padrão para explicar essa diferença. Apenas sabe-se que existe uma heterogeneidade muito grande dos materiais encontrados nos resíduos sólidos urbanos depositados em aterros, mesmo entre as fibras de madeira, e dependendo da densidade de cada partícula, pode ocorrer certas incoerências como a apresentada na Figura 46.

Comparando os resultados entre a matriz básica (MB) e os demais ensaios com fibras de madeira, verifica-se que o acréscimo das fibras eleva o ângulo de atrito e reduz a coesão, visto que o ϕ_{MB}' = 26,8° e a c_{MB}' = 22,5 kPa. O acréscimo no ângulo de atrito ($\phi_{máx}'$ = 35,7°) decorre das forças de tração dos elementos de reforço existentes na matriz composta por fibras de madeira.

Ao analisar os resultados de Fucale (2005) dos resíduos estabilizados do aterro de Ihlenberg, Alemanha, observa-se o aumento do ângulo de atrito e a redução da coesão da matriz composta com 3 e 8% de fibras em relação a matriz básica, assim como ocorre neste trabalho. Já Borgatto (2010) apresenta redução para os dois parâmetros de resistência para os resíduos estabilizados do CTR Northeim, Alemanha.

Figura 46 - Envoltória de Resistência – madeira – (a) 0%, (b) 1%, (c) 2,44%, (d) 3%, (e) 4% e (f) 5%.



Fonte: A Autora (2019).

4.2.1.3.1 Resumo dos Parâmetros de Resistência com Inclusão das Fibras de Madeira

Tabela 35 - Valores das tensões cisalhantes ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – amostras com acréscimo de fibras de madeira.

PARÂMETROS	TENSÃO NORMAL APLICADA	DESLOCAMENTO HORIZONTAL ESPECÍFICO (%)	PERCENTUAIS DE MADEIRA				
			1%	2,44%	3%	4%	5%
τ (kPa)	25 kPa	1,2%	17,81	17,19	21,18	17,19	18,11
		4,5%	24,83	29,16	30,67	26,94	28,30
		9,6%	29,41	35,85	33,51	32,09	34,59
		14,4%	30,31	38,08	34,90	33,05	35,26
	50 kPa	1,2%	26,69	20,72	19,64	20,79	28,22
		4,5%	38,75	37,88	36,30	40,81	45,56
		9,6%	47,29	48,87	47,54	49,79	54,21
		14,4%	51,32	52,56	52,03	52,21	55,91
	100 kPa	1,2%	35,57	30,06	38,48	34,80	44,74
		4,5%	59,64	58,22	60,27	63,19	74,48
		9,6%	82,00	78,76	78,84	83,66	90,14
		14,4%	94,51	88,01	91,96	92,75	97,05
	150 kPa	1,2%	51,00	48,87	46,57	48,94	55,73
		4,5%	88,18	85,82	84,64	84,88	93,06
		9,6%	124,60	115,32	116,64	115,23	120,94
		14,4%	136,23	128,98	131,16	128,37	131,34
	200 kPa	1,2%	61,53	59,85	66,18	54,82	65,64
		4,5%	112,41	112,33	117,85	112,41	119,19
		9,6%	156,18	156,27	160,26	156,27	158,51
		14,4%	173,01	174,24	177,75	174,85	173,09
	250 kPa	1,2%	89,06	70,52	93,26	99,28	92,72
		4,5%	140,52	134,07	138,79	150,57	152,45
		9,6%	192,60	185,48	189,62	204,35	202,20
		14,4%	214,78	207,18	214,52	226,74	223,07

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 36 - Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico – amostras com acréscimo de fibras de madeira.

Parâmetros	Deslocamento Horizontal Específico (%)	Percentuais de Madeira					
		0%	1%	2,44%	3%	4%	5%
c' (kPa)	1,2%	7,1	9,0	9,0	6,6	3,7	11,5
	4,5%	8,9	11,6	14,4	13,3	11,7	17,3
	9,6%	10,1	11,2	15,3	12,4	10,4	16,3
	14,4%	17,7	11,4	15,3	12,6	8,8	14,1
ϕ' (º)	1,2%	13,4	16,2	13,9	17,4	17,9	16,8
	4,5%	23,9	25,9	24,6	25,6	26,7	26,8
	9,6%	31,3	33,3	31,7	32,8	34,0	33,3
	14,4%	29,6	34,9	33,4	34,7	35,9	34,9

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 37 - Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para amostras com acréscimo de fibras de madeira.

Parâmetros	Teor de Fibras de Madeira					
	0%	1,0%	2,44%	3%	4%	5,00%
c' (kPa)	22,5	11,6	15,5	13,9	8,8	14,0
ϕ' (º)	26,8	34,5	33,3	34,3	35,7	34,9
R^2	0,9908	0,9986	0,9985	0,9996	0,9963	0,9964

Fonte: A Autora (2019).

4.2.1.4 Amostras com Acréscimo de Fibras de Plástico

As amostras desta etapa foram preparadas com a matriz básica, representada pelo material misto com partículas inferiores a 8 mm, e a matriz reforço composta pelas fibras de plástico encontradas na composição física dos RSU, sendo sua maioria fibras oriundas de sacolas plásticas e embalagens de alimentos não perecíveis.

As determinações dos percentuais de fibras de plásticos tiveram como base os trabalhos de Alcântara (2007), Corrêa (2013), ATEPE/GRS - UFPE (2014) e a caracterização gravimétrica realizada nesta pesquisa. Portanto, as percentagens ensaiadas foram 1%; 3%; 5%; 7% e 9,73% - definidas na composição gravimétrica de material fibroso. Assim como as amostras com acréscimo de fibras de madeira, o intuito da variação na percentagem das fibras de plástico é analisar a influência deste material no comportamento da massa de resíduo e seus parâmetros de resistência.

Em todas as figuras apresentadas nesta seção, o primeiro gráfico (a) representa as curvas da matriz básica com o propósito de servir como referência.

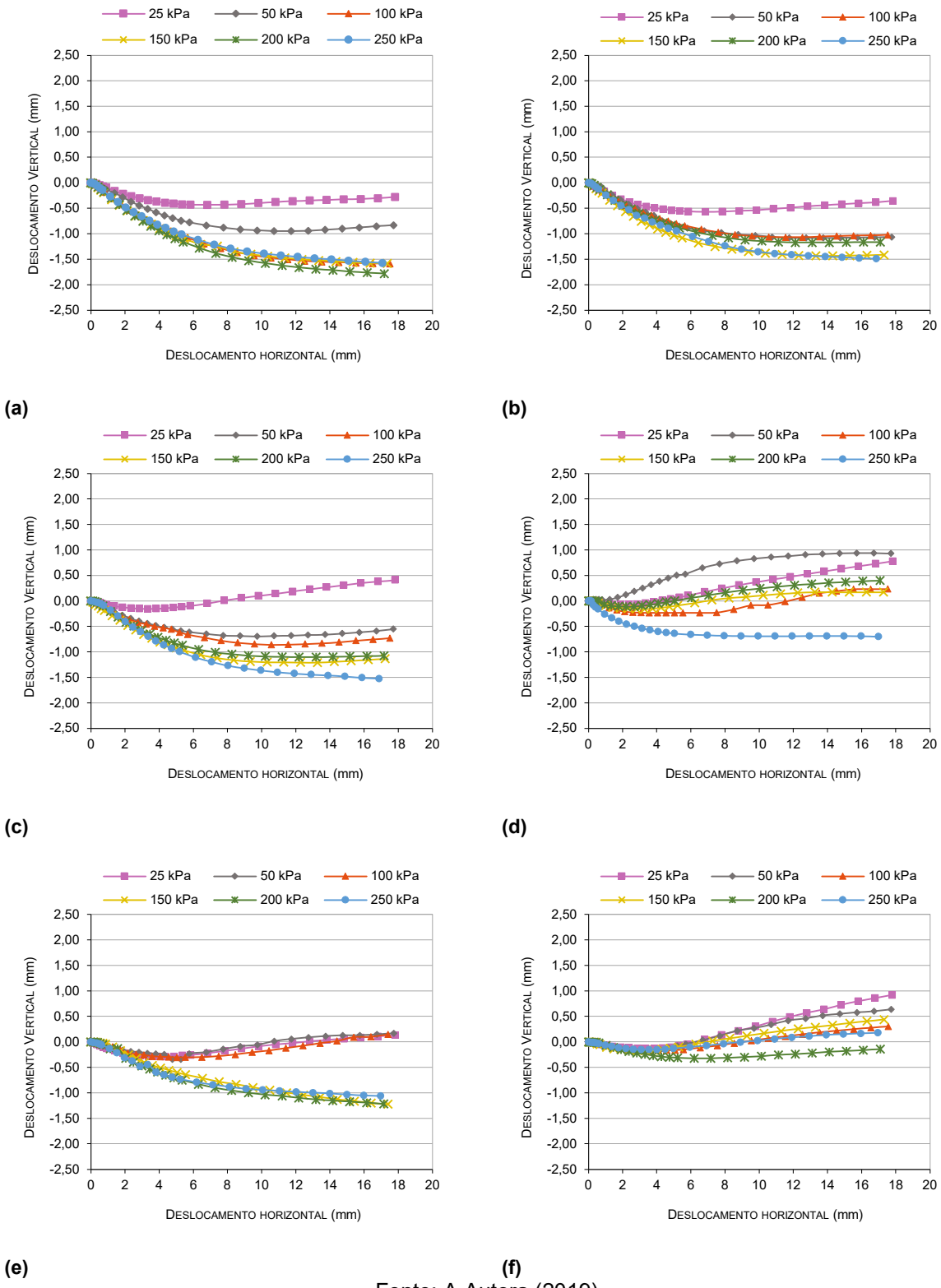
Os gráficos da variação de volume ao longo dos deslocamentos horizontais para todas as percentagens ensaiadas com as fibras de plásticos estão ilustrados na Figura 47.

Assim como a matriz básica, o comportamento das amostras com 1 e 3% de plástico foi similar, pois o teor do reforço é pequeno. Todavia, com o acréscimo de fibras nas amostras, esse comportamento foi alterando, ocorrendo compressão no início do ensaio seguida de aumento do volume do corpo de prova, como evidenciado no gráfico das amostras com teor de plástico de 9,73% (Figura 47(f)). Neste último caso, para tensão normal 25 kPa ocorre $\Delta h \sim 1$ mm e para tensão normal de 250 kPa, $\Delta h \sim 0{,}2$ mm.

Comparando os resultados com os trabalhos de Fucale (2005) e Corrêa (2013), verifica-se uma semelhança de comportamento mais próxima ao trabalho de Fucale (2005), visto que esta trabalhou também com resíduos estabilizados e Corrêa (2013), uma simulação com areia + plásticos.

A Tabela 38 apresenta os índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio para os diferentes teores de fibras de plásticos estudados neste trabalho. Os índices de vazios iniciais variam entre 1,1 a 1,7 em todos os ensaios realizados com fibras de plástico, não tendo uma real coerência, pois como as fibras de plásticos presentes nos resíduos sólidos retirados do aterro da Muribeca possuem uma enorme diversidade e, como os corpos de provas foram moldados escolhendo aleatoriamente as fibras, as densidades podem oscilar bastante. Logo, essa variação dos índices de vazios é normal.

Figura 47 - Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%.



Fonte: A Autora (2019).

Tabela 38 - Índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio – amostras com acréscimo de fibras plásticas.

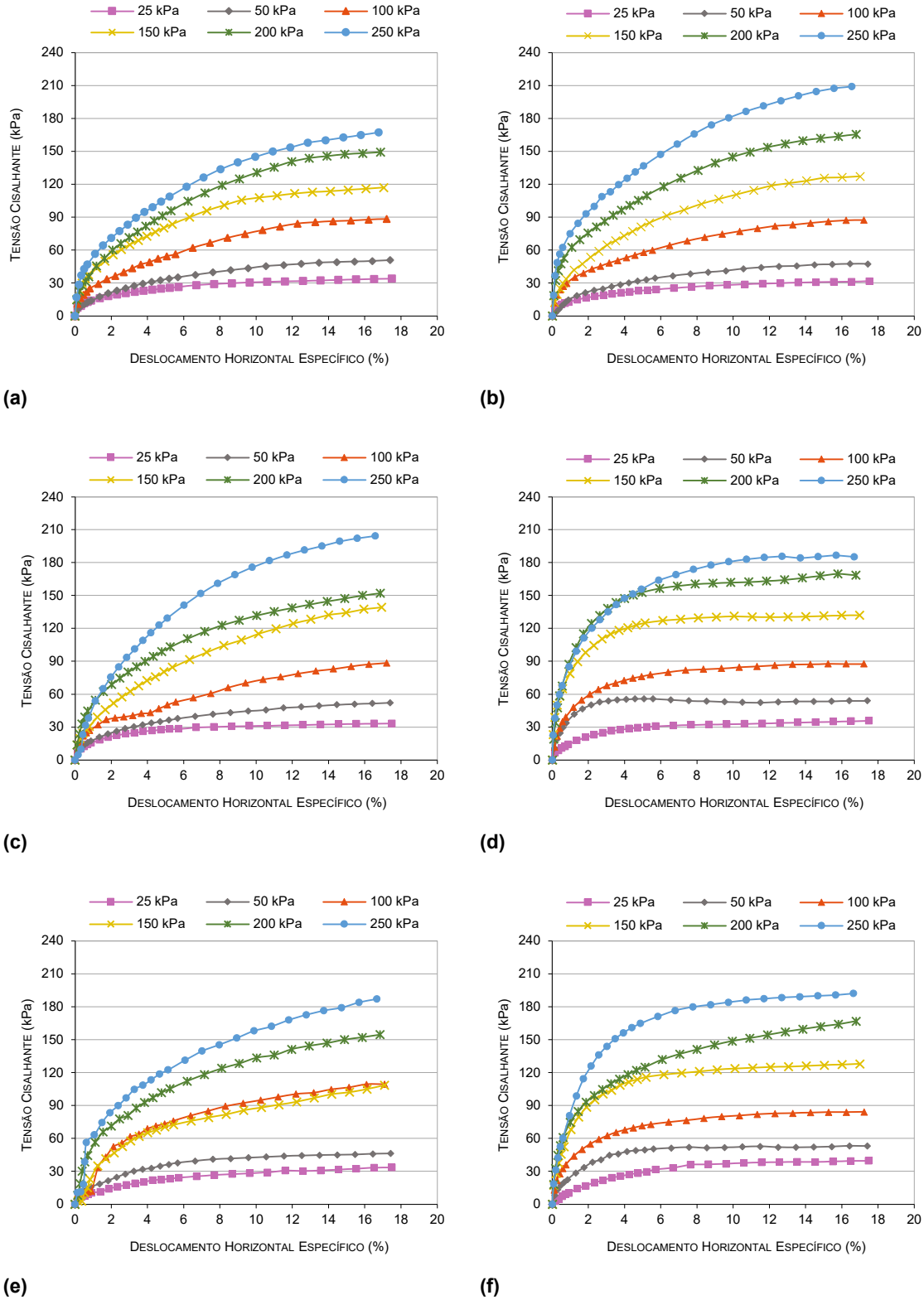
Dados do Ensaio	σ_N(kPa)					
	25	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**
			1%			
e_0	1,362	1,377	1,374	1,359	1,361	1,365
e_i	1,212	1,159	1,014	0,972	0,934	0,869
e_f	1,192	1,100	0,957	0,893	0,869	0,785
			3%			
e_0	1,405	1,412	1,428	1,386	1,398	1,393
e_i	1,200	1,199	1,165	1,099	0,869	0,850
e_f	1,223	1,168	1,125	1,037	0,810	0,766
			5%			
e_0	1,103	1,109	1,175	1,148	1,139	1,125
e_i	0,914	0,979	0,887	0,876	0,836	0,837
e_f	0,950	1,024	0,898	0,884	0,855	0,804
			7%			
e_0	1,684	1,566	1,394	1,711	1,398	1,429
e_i	1,346	1,221	0,931	1,303	0,866	0,913
e_f	1,355	1,230	0,939	1,229	0,801	0,856
			9,73%			
e_0	1,456	1,433	1,211	1,221	1,249	1,242
e_i	1,185	1,104	0,868	0,847	0,898	0,904
e_f	1,232	1,137	0,883	0,868	0,891	0,913

Fonte: A Autora (2019).

A variação do índice de vazios – Δe (e_f - e_i) tende a crescer com o aumento da tensão normal aplicada, variando entre 0,007 para a mistura com 9,73% de fibras para a tensão normal de 200 kPa e 0,084 para a mistura com 3% de fibras para a tensão normal de 250 kPa.

Os gráficos das curvas de tensão cisalhante ao longo do deslocamento horizontal específico para todas as percentagens analisadas com fibras de plástico estão representados na Figura 48.

Figura 48 - Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Específico % – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%.



Fonte: A Autora (2019).

Apesar de todas as curvas apresentarem um aumento de resistência com o aumento da tensão normal aplicada, verifica-se uma diferença de comportamento a

partir de 5% de acréscimo das fibras de plástico nos corpos de prova. A resistência ao cisalhamento para os gráficos das amostras com uma porcentagem acima de 5% de fibras reduz, finalizando o ensaio em torno de 180 kN/m^2, enquanto para as percentagens menores apresentam um comportamento tendendo ao linear com valores máximos em torno de 210 kN/m^2 para a tensão normal de 250 kPa.

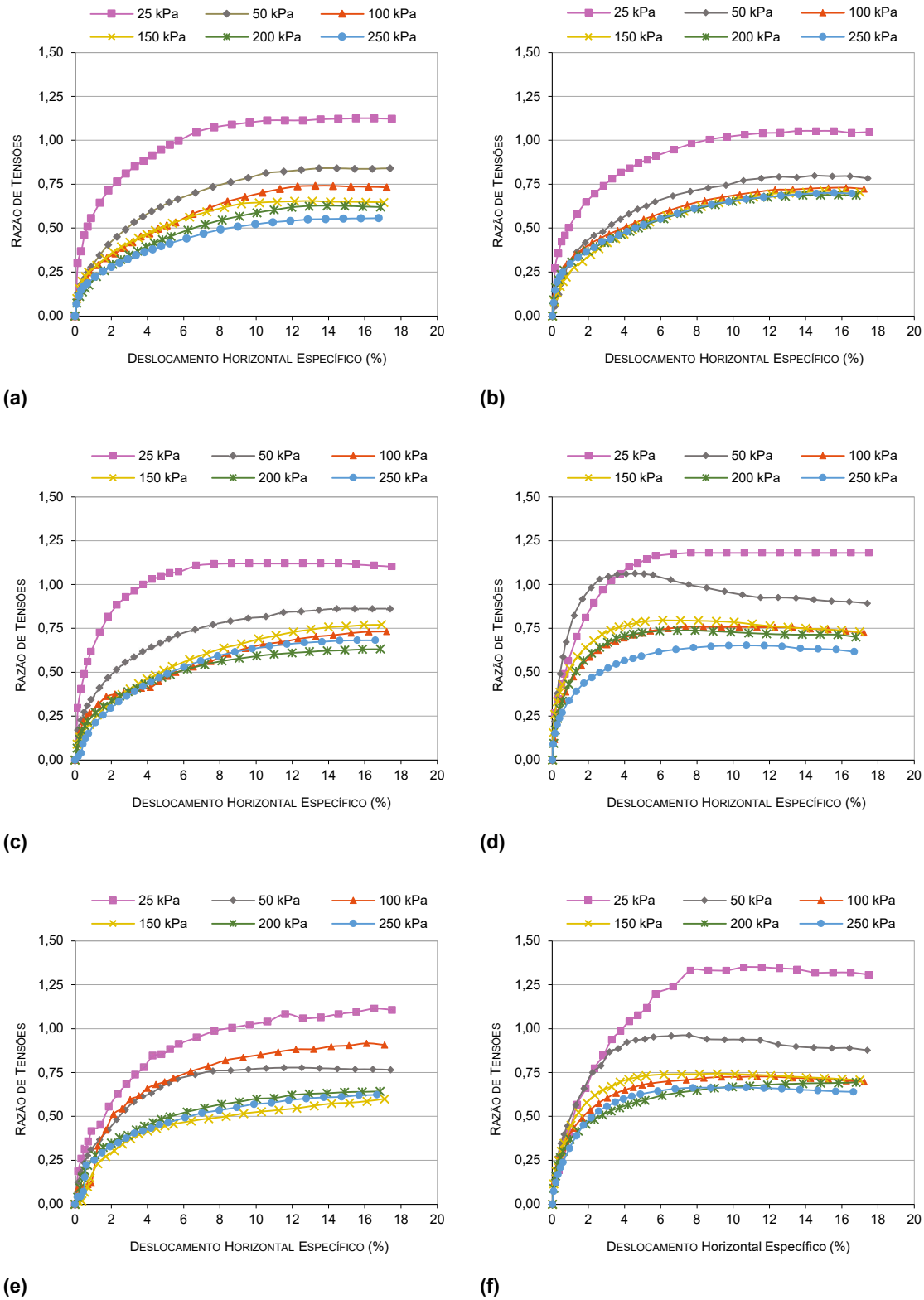
Os ensaios realizados com as fibras de madeira apresentaram valores superiores de resistência aos ensaiados com fibras de plásticos. À medida que os valores das resistências ao cisalhamento máximo obtidos nos ensaios com fibras de madeira foram entre 210 e 240 kN/m^2, os desta seção foram entre 180 e 210 kN/m^2.

Os ensaios realizados com corpos de prova da mistura material misto + plástico começam a apresentar características mecânicas semelhantes aos ensaios com a composição determinada na composição gravimétrica, matriz composta reforçada com 13,54% de fibras, principalmente para o teor de fibras de 9,73%. Esta semelhança se deve à proximidade no teor das fibras e a maior percentagem dessa fibra na composição original, pois para índices menores, o comportamento se assemelha aos ensaios realizados para a matriz básica.

A Figura 49 apresenta a normalização dos resultados das curvas tensão – deslocamento da Figura 48.

Para tensão de 25 kPa, as razões de tensões serão maiores que 1 para deslocamentos acima de aproximadamente 4%, com exceção de 1 e 7% de materiais fibrosos, que apresentam razões de tensões superiores a 1 acima de 8% de deslocamento horizontal específico. O crescimento da razão de tensões com o aumento do teor das fibras nos corpos de prova é evidente, atingindo valores em torno de 1,35 para os corpos de prova com teor de plásticos de 9,73%. Para as demais tensões normais ensaiadas, verifica-se que elas obtêm valores variando entre 1 e 0,75.

Figura 49 - Razão de Tensões x Deslocamento Horizontal Específico % – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%.



Fonte: A Autora (2019).

As envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico para os diferentes teores de fibras de plástico acrescidas nas amostras

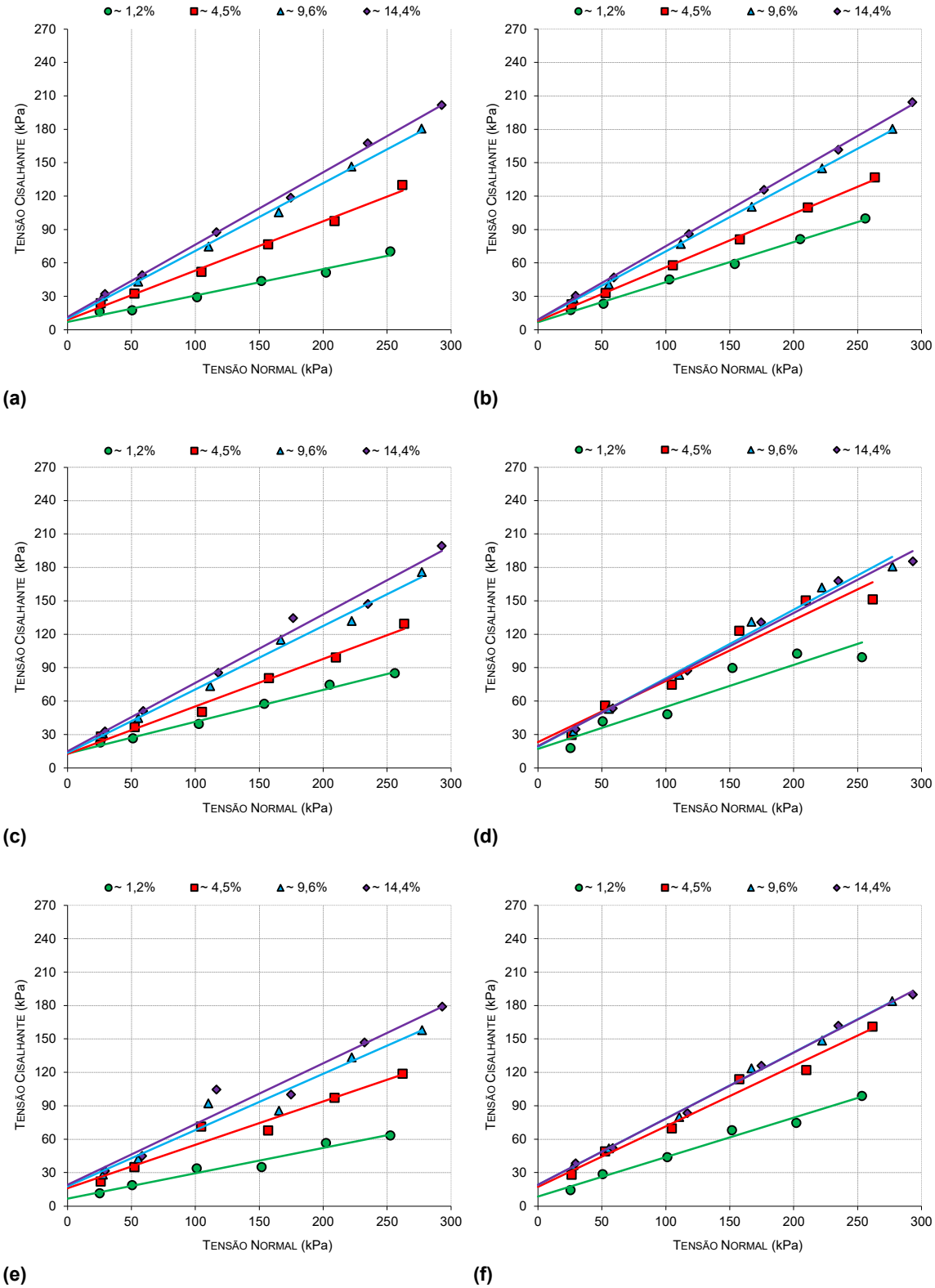
estão indicadas na Figura 50 e os valores correspondentes das tensões cisalhantes estão indicados na Tabela 39.

Com exceção da envoltória de 1,2% de deslocamento, as demais envoltórias apresentam valores de coesão com uma variação máxima de 4 kPa, logo o aumento da resistência ao cisalhamento se dá, majoritariamente, pelo ângulo de atrito, da mesma forma que ocorreu com os ensaios executados com as fibras de madeira.

De modo geral, a coesão aumenta com o aumento do teor de fibras, tendo uma variação entre 6,8 a 17 kPa para envoltórias com deslocamentos de ~ 1,2% e de 8,1 a 23,2 kPa para envoltórias com deslocamentos horizontais superiores. Já os ângulos de atrito apresentam valores bastante semelhantes para os deslocamentos de ~ 9,6% e ~ 14,4%, com valores entre 26,8 e 33,4º. É possível observar que as duas envoltórias são quase paralelas. As curvas de deslocamentos de ~ 1,2% e ~ 4,5% apresentam ângulo de atrito inferiores às demais, apesar das curvas de ~ 4,5% dos gráficos (d) e (f) da Figura 50 exibirem ângulos próximos aos dos deslocamentos superiores.

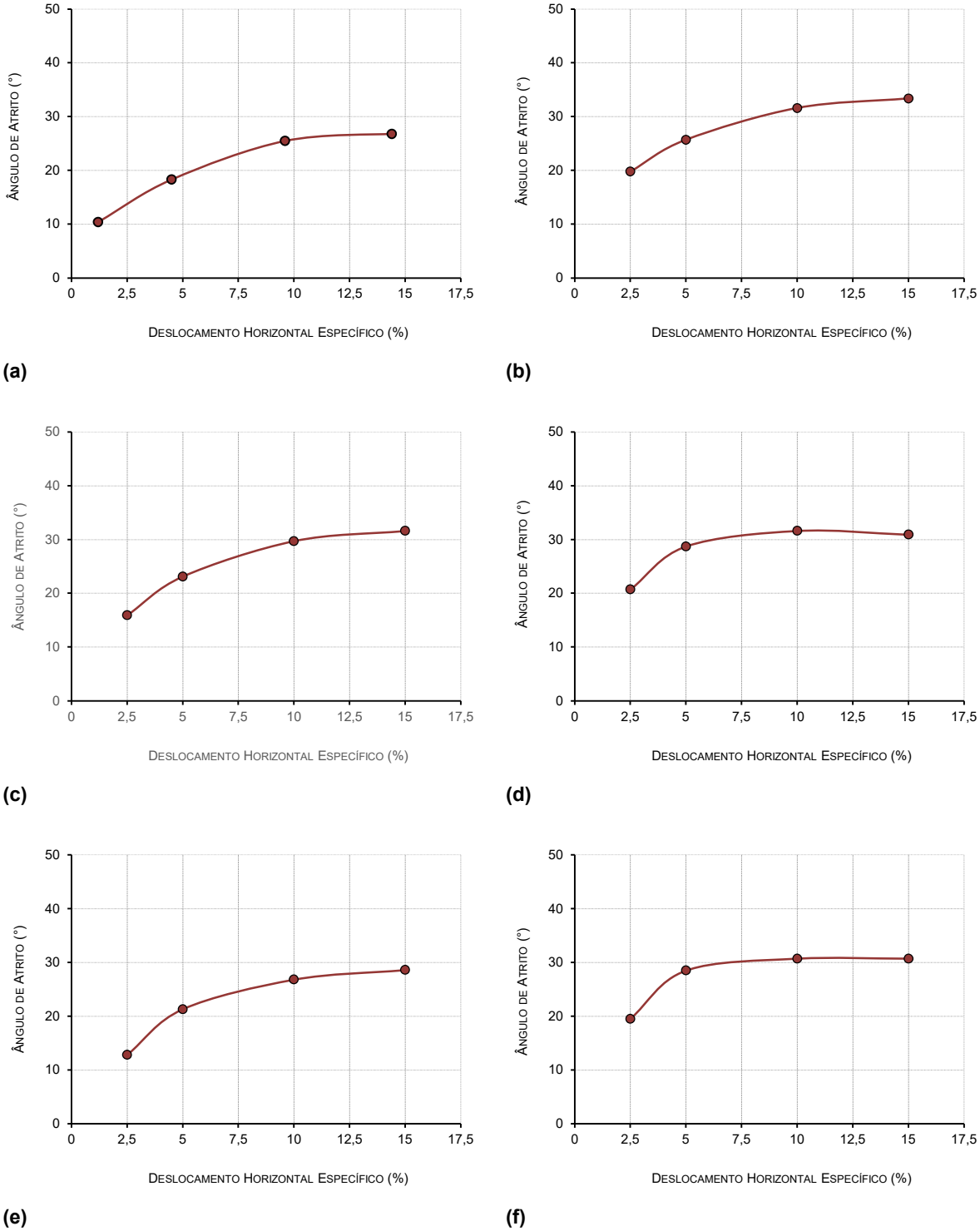
Os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento direto convencional, ângulo de atrito e coesão, para as amostras da matriz composta reforçada com diferentes taxas de fibras de plástico ao longo do deslocamento horizontal específico são apresentados nos gráficos das Figura 51 e Figura 52, respectivamente.

Figura 50 - Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%.



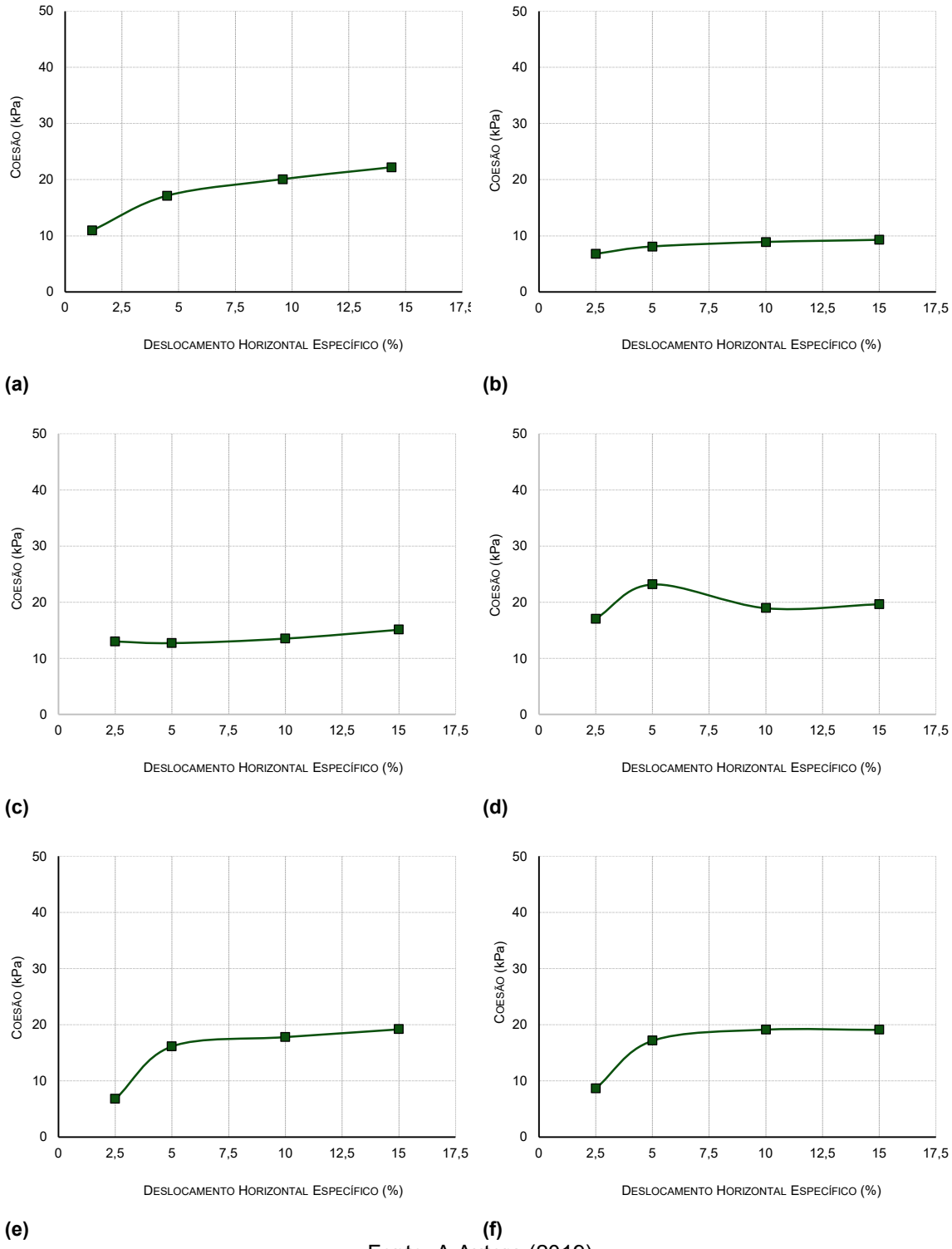
Fonte: A Autora (2019).

Figura 51 - Variação do ângulo de atrito ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%.



Fonte: A Autora (2019).

Figura 52 - Variação da coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%.



Fonte: A Autora (2019).

Através dos gráficos dos parâmetros de resistência, fica claro o aumento da coesão com o aumento do deslocamento horizontal específico e o teor das fibras de plástico, com exceção da taxa de 5% de plástico. No entanto, o ângulo de atrito,

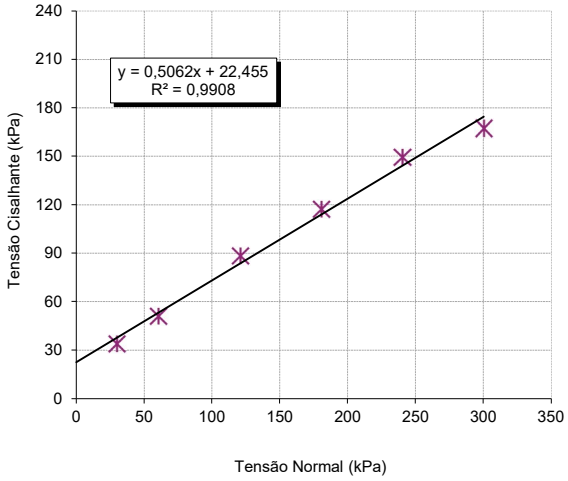
apesar de aumentar com o deslocamento horizontal, apresenta uma pequena redução com adição das fibras plásticas nas amostras. Como a ativação das fibras ocorre para deslocamentos horizontais mais elevados, explica-se o aumento dos valores com o deslocamento horizontal. Os valores desses parâmetros de resistência apresentados graficamente nas Figuras 51 e 52 estão compilados na Tabela 40.

A Figura 53 ilustra os gráficos das envoltórias de resistência para deslocamentos horizontais específicos máximos de aproximadamente 17% do comprimento das amostras incorporadoras com fibras plásticas. Os valores dos parâmetros de resistência da matriz composta reforçada por diferentes percentagens de fibras de plástico encontradas nos resíduos sólidos coletados no aterro da Muribeca, para os níveis de tensões normais estudados, estão representados na Tabela 41, apresentando faixas de resultados de ϕ' = 29,7° a 33,4° e c' = 8,8 kPa a 20,1 kPa.

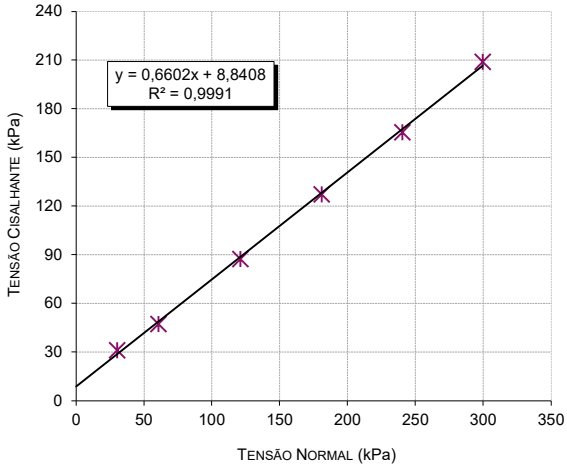
A coesão teve o valor gradativamente elevado com o aumento do teor de fibras, tendo uma leve discrepância para as amostras com 5% de fibras de plástico. Já o ângulo de atrito tem uma leve redução com o aumento do teor das fibras.

Comparando os resultados dos ensaios realizados com acréscimos de fibras plásticas com a matriz básica, verifica-se que o acréscimo das fibras, no geral, eleva o ângulo de atrito e reduz a coesão, visto que o ϕ_{MB}' = 26,8° e a c_{MB}' = 22,5 kPa. O mesmo ocorre ao comparar com os ensaios realizados com fibras de madeira.

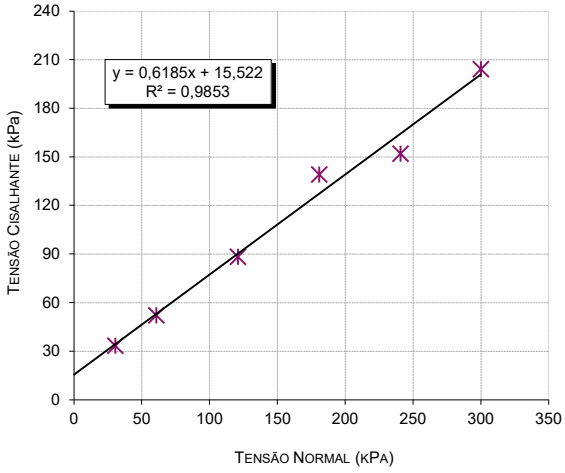
Figura 53 - Envoltória de Resistência – plástico – (a) 0%, (b) 1%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 9,73%.



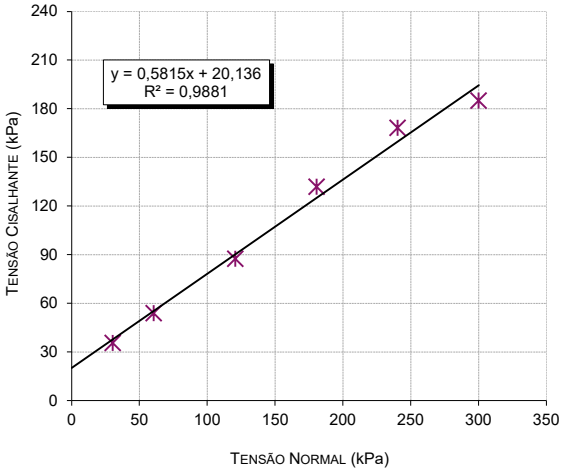
(a)



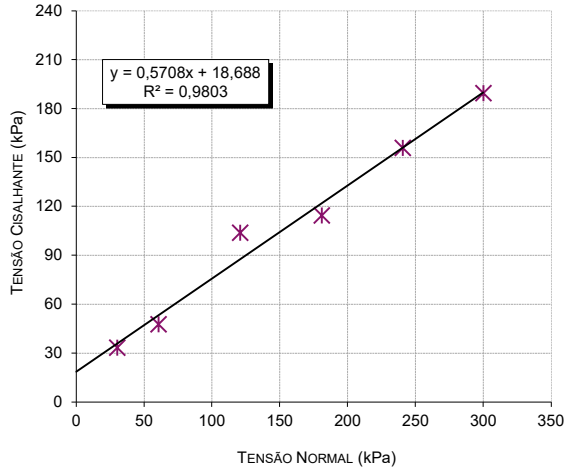
(b)



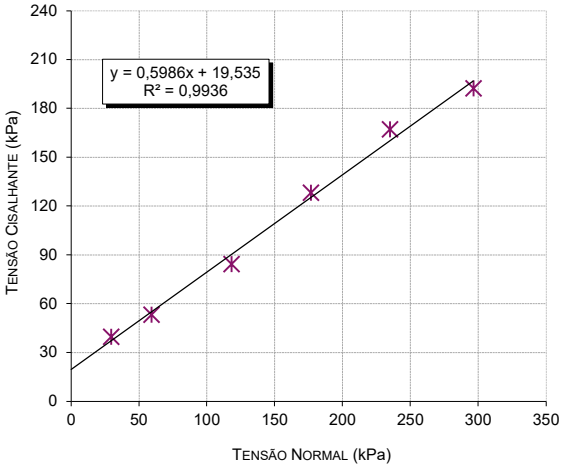
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: A Autora (2019).

4.2.1.4.1 Resumo dos Parâmetros de Resistência com Inclusão das Fibras de Plástico

Tabela 39 - Valores das tensões cisalhantes ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – amostras com acréscimo de fibras de plástico.

PARÂMETROS	TENSÃO NORMAL APLICADA	DESLOCAMENTO HORIZONTAL ESPECÍFICO (%)	PERCENTUAIS DE PLÁSTICO				
			1%	3%	5%	7%	9,73%
τ (kPa)	25 kPa	1,2%	17,83	22,63	17,81	11,52	14,43
		4,5%	22,89	28,12	29,40	22,15	28,29
		9,6%	28,24	31,00	32,67	28,32	36,85
		14,4%	30,84	32,78	34,55	31,72	38,61
	50 kPa	1,2%	23,56	26,34	41,69	18,73	28,68
		4,5%	33,06	36,41	55,69	34,95	49,04
		9,6%	41,19	44,70	53,04	42,53	51,87
		14,4%	47,10	51,03	53,44	45,15	52,21
	100 kPa	1,2%	45,42	39,37	47,95	33,73	43,98
		4,5%	58,04	50,25	74,63	71,48	69,74
		9,6%	77,27	73,49	83,50	92,29	80,01
		14,4%	86,10	85,39	87,22	104,76	83,71
	150 kPa	1,2%	59,05	57,51	89,52	35,11	68,23
		4,5%	81,36	80,41	123,05	67,85	113,91
		9,6%	110,72	115,07	131,11	85,65	123,76
		14,4%	125,79	134,45	130,82	100,38	126,19
	200 kPa	1,2%	81,39	74,52	102,48	56,65	74,78
		4,5%	109,90	98,91	150,25	97,31	122,26
		9,6%	145,03	131,78	161,92	133,61	148,78
		14,4%	161,93	147,23	167,91	147,03	162,11
	250 kPa	1,2%	99,97	84,86	99,13	63,51	98,82
		4,5%	136,82	129,39	151,19	118,80	161,07
		9,6%	180,59	175,70	180,68	158,10	184,07
		14,4%	204,55	199,31	185,47	179,33	190,02

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 40 - Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico – amostras com acréscimo de fibras de plástico.

Parâmetros	Deslocamento Horizontal Específico (%)	Teor de Fibras de Plástico					
		0%	1,0%	3%	5%	7%	9,73%
c' (kPa)	1,2%	7,1	6,8	13,0	17,0	6,8	8,6
	4,5%	8,9	8,1	12,7	23,2	16,1	17,2
	9,6%	10,1	8,9	13,5	18,9	17,8	19,1
	14,4%	17,7	9,3	15,1	19,6	19,2	19,1
ϕ' (º)	1,2%	13,4	19,8	15,9	20,7	12,8	19,5
	4,5%	23,9	25,7	23,1	28,7	21,3	28,5
	9,6%	31,3	31,6	29,7	31,6	26,8	30,7
	14,4%	29,6	33,4	31,6	30,9	28,6	30,7

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 41 - Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para amostras com acréscimo de fibras de plástico.

Parâmetros	Teor de Fibras de Plástico					
	0%	1,0%	3%	5%	7%	9,73%
c' (kPa)	22,5	8,8	15,5	20,1	18,7	19,5
ϕ' (º)	26,8	33,4	31,7	30,2	29,7	30,9
R^2	0,9908	0,9991	0,9853	0,9881	0,9803	0,9936

Fonte: A Autora (2019).

4.2.1.5 Amostras com Acréscimo de Fibras de Têxtil

As amostras desta etapa foram preparadas com a matriz básica, representada pelo material misto com partículas inferiores a 8 mm, e a matriz reforço composta pelas fibras de têxtil encontradas na composição física dos RSU.

Os percentuais dos tecidos foram baseados em dados de caracterizações gravimétricas de diversas cidades brasileiras, tentando incluir alguns polos têxteis presentes no país (Tabela 42). Desta forma, as percentagens ensaiadas foram 1,37% - definida na composição gravimétrica, 3%; 5%; 7% e 10% de material fibroso.

Os gráficos da variação de volume ao longo dos deslocamentos horizontais para todas as percentagens ensaiadas com as fibras têxteis estão apresentados na Figura 54.

Tabela 42 - Percentagens de fibras têxteis presentes em diversos municípios brasileiros.

LOCALIZAÇÃO	PERCENTAGEM GRAVIMÉTRICA TÊXTIL	REFERÊNCIA
Recife - PE	2,00%	(ATEPE/GRS - UFPE, 2014)
Aterro da Muribeca - PE	1,37%	Análise gravimétrica desta pesquisa
Porto Alegre - RS	3,60%	
Salvador - BA	3,10%	
Cisures - SC	4,29%	(Guadagnin et al., 2014)
Criciúma - SC	10,00%	(Guadagnin et al., 2014)
Jaguaruna - SC	6,67%	(Guadagnin et al., 2014)
Nova Veneza - SC	6,41%	(Guadagnin et al., 2014)

Fonte: A Autora (2019).

Para todas as percentagens estudadas, a curva de tensão normal igual 25 kPa apresentou uma pequena compressão até aproximadamente 2 mm de deslocamento horizontal, porém, com o aumento do deslocamento, o volume do corpo de prova aumentou.

Para amostras com até 5% de fibras inclusas, as tensões normais maiores apresentam um comportamento parecido, tendo uma compressão ao longo de praticamente todo o deslocamento horizontal e uma leve expansão ao término do ensaio. A compressão máxima foi de Δh = 1,481 mm para a tensão de 250 kN/m^2 com corpo de prova com 1,37% de fibras presente.

Comparando os resultados com o trabalho de Fucale (2005), verifica-se uma semelhança de comportamento, pois a mesma trabalhou também com resíduos sólidos estabilizados. A matriz composta 2 – resíduos sólidos pré-tratados, apresenta uma dilatância bem maior para a tensão normal 100 kPa, em comparação com as tensões de 200 e 300 kPa. Na Figura 54, como na matriz composta 2 apresentada por Fucale (2005), as tensões normais maiores apresentam uma expansão menor do que as apresentadas para tensões normais menores.

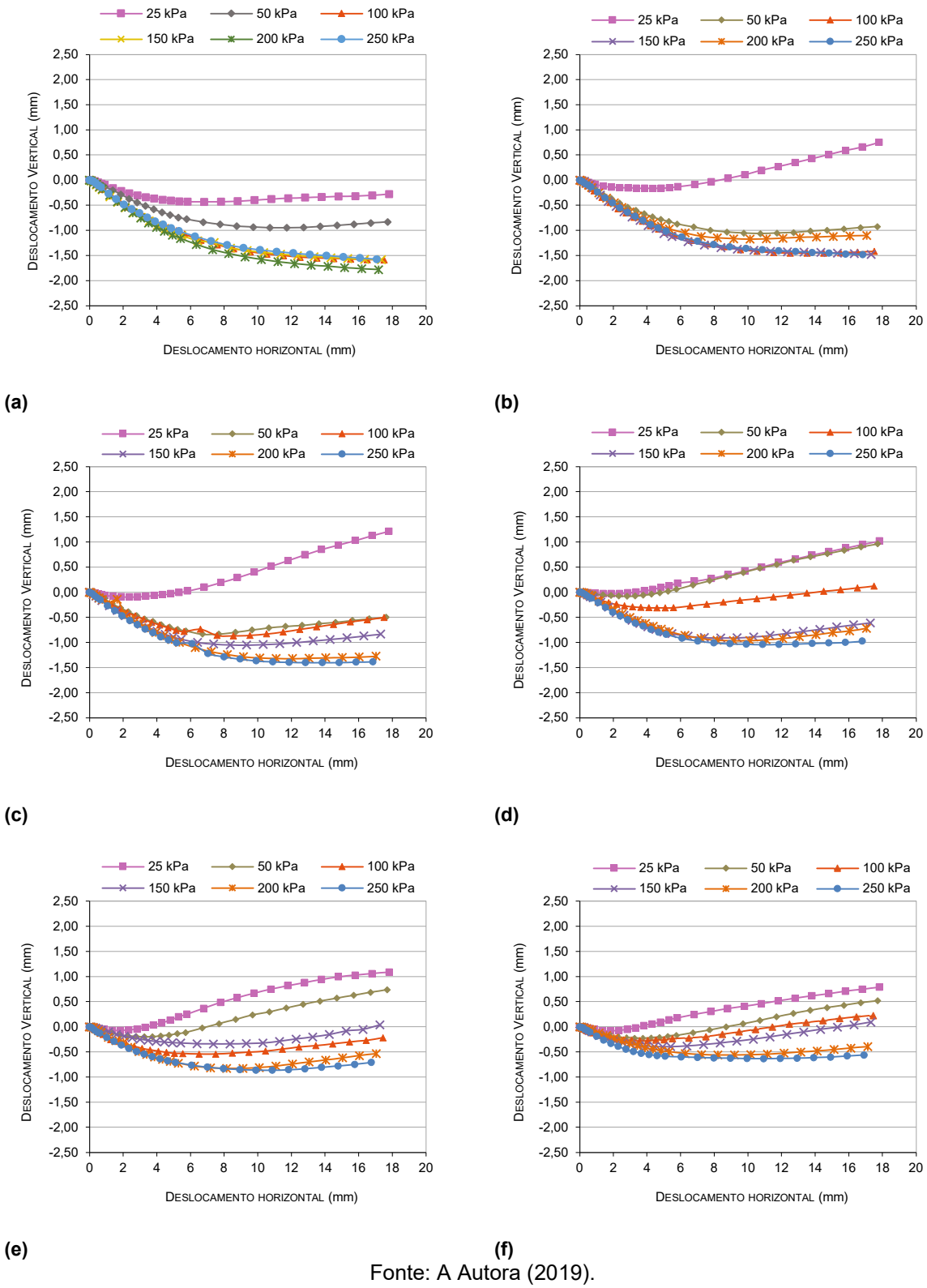
Os índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio de cisalhamento direto para todas as percentagens ensaiadas com fibras de têxteis são apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 - Índices de vazios nas diferentes etapas do ensaio – amostras com acréscimo de fibras plásticas.

Dados do Ensaio	σ_N(kPa)					
	25	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**
			1,37%			
e_0	1,383	1,389	1,384	1,362	1,443	1,406
e_i	1,265	1,259	1,128	1,033	1,122	0,995
e_f	1,307	1,208	1,050	0,952	1,060	0,913
			3%			
e_0	1,402	1,412	1,488	1,457	1,434	1,468
e_i	1,296	1,221	1,181	1,068	1,099	1,061
e_f	1,362	1,194	1,154	1,022	1,030	0,985
			5%			
e_0	1,396	1,454	1,454	1,446	1,448	1,411
e_i	1,241	1,244	1,176	1,135	1,079	1,067
e_f	1,296	1,296	1,182	1,102	1,040	1,015
			7%			
e_0	1,282	1,339	1,406	1,328	1,387	1,427
e_i	1,087	1,105	1,138	1,027	1,001	0,961
e_f	1,143	1,143	1,126	1,029	0,974	0,924
			10%			
e_0	1,412	1,374	1,388	1,371	1,418	1,401
e_i	1,208	1,094	1,076	1,000	1,046	0,952
e_f	1,248	1,120	1,088	1,005	1,026	0,923

Fonte: A Autora (2019).

Figura 54 - Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal – têxtil – (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%.



Fonte: A Autora (2019).

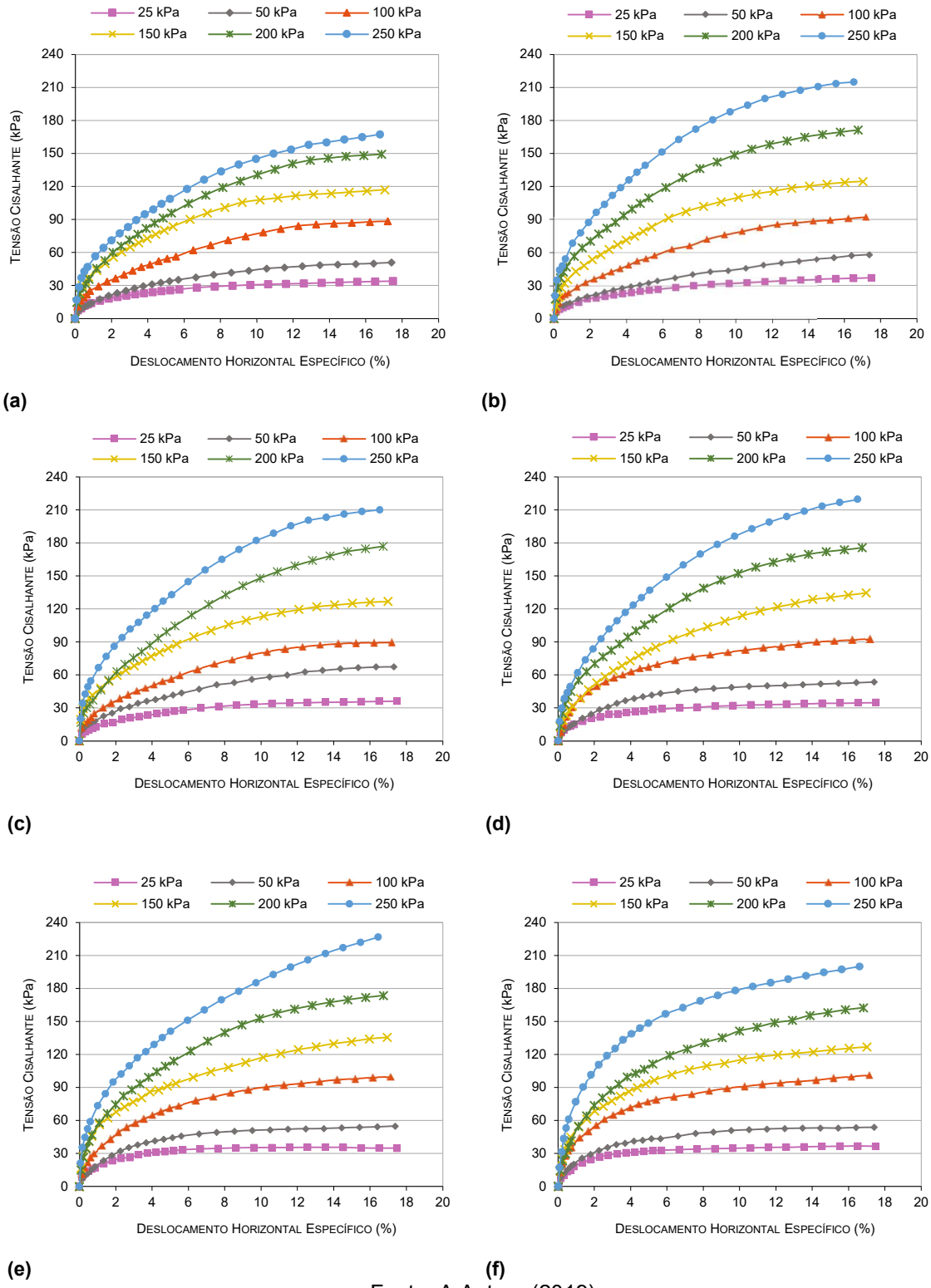
O índice de vazios inicial (e_0) é em torno de 1,4 para todas as tensões em todas as amostras trabalhadas, tendo como valor mínimo de 1,282 para 7% de fibras na

mistura e tensão normal de 25 kPa, e valor máximo de 1,488 para 3% de fibras na mistura e tensão normal aplicada de 100 kPa. O índice de vazios reduz com o aumento da tensão normal aplicada no corpo de prova após a etapa de adensamento. Para altas tensões normais aplicadas, 150 a 250 kPa, a variação do índice de vazios do início ao término do ensaio de cisalhamento ($e_f - e_i$) é entre 0,020 (σ_N = 250 kPa e 1,37% de fibras inclusas) a 0,082 (σ_N = 150 kPa e 7% de fibras inclusas). Para as tensões 25 e 50 kPa, a variação máxima foi de 0,071 (σ_N = 25 kPa e 3% de fibras inclusas) e mínima de 0,038 (σ_N = 50 kPa e 10% de fibras inclusas).

A Figura 55 ilustra os gráficos da tensão cisalhante ao longo do deslocamento horizontal específico para as amostras com diferentes percentagens de fibras têxteis estudadas. Nota-se que a resistência ao cisalhamento cresce com o aumento do deslocamento horizontal específico do material, atingindo um valor máximo ao término do ensaio, apresentando curvas com características típicas de materiais que possuem reforços em sua composição, com exceção do teor de fibras têxteis de 10%. Para tensões normais baixas, 25 e 50 kPa, o aumento da tensão cisalhante é igualmente baixo, pois as fibras presentes no corpo de prova ativam com o aumento da tensão normal aplicada e deslocamento horizontal. O valor máximo encontrado foi τ = 226,71 kPa para o corpo de prova com 7% de fibras inclusas e tensão normal aplicada de σ_N = 250 kPa.

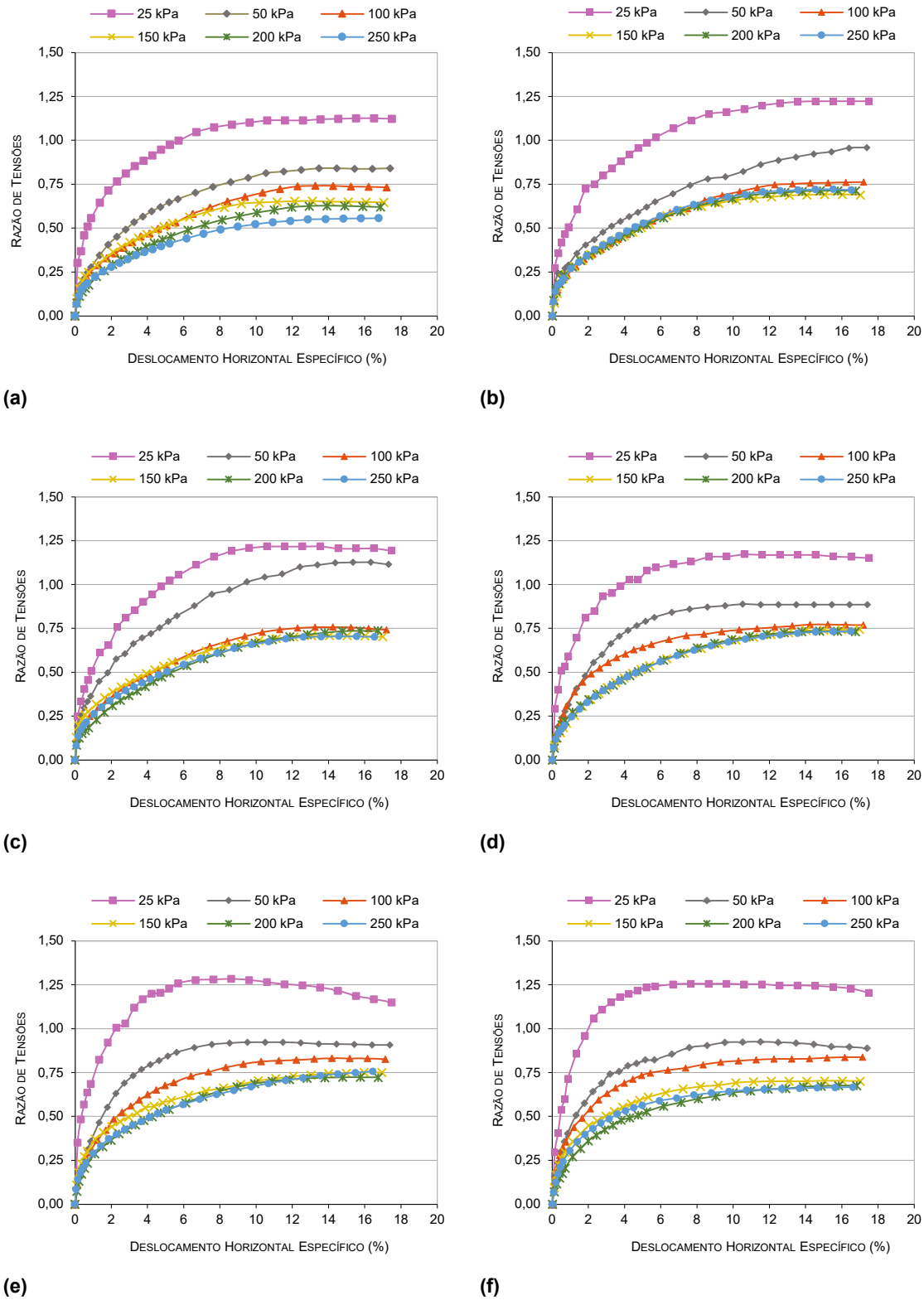
O gráfico da Figura 55(f), que representa o ensaio com 10% de fibras têxteis inseridas nos corpos de prova, apresenta um comportamento um pouco diferente dos demais. Nota-se que, ao invés das curvas apresentarem uma tendência mais linear, o aumento da resistência ao cisalhamento é reduzido após um deslocamento horizontal superior a 5%. Consequentemente, os ensaios para esta percentagem, por ter um alto teor, se assemelham aos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras – valor de fibras determinado na composição gravimétrica dessa pesquisa.

Figura 55 - Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal Específico % – têxtil – (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%.



Fonte: A Autora (2019).

Figura 56 - Razão de Tensões x Deslocamento Horizontal Específico % – têxtil – (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%.



Fonte: A Autora (2019).

A Figura 56 mostra a normalização dos resultados das curvas tensão – deslocamento da Figura 55. Para tensão de 25 kPa, os índices de tensões serão

maiores que 1 para deslocamentos a partir de 2% para amostras com 7 e 10% de fibras de tecido inclusas e acima de 4% para teores de fibras menores. A razão de tensões, neste caso, atinge valores em torno de 1,25. Entretanto, para tensões normais mais elevadas, observa-se valores próximos a 0,75 com a tensão normal de 50 kPa oscilando entre a tensão mínima e as demais.

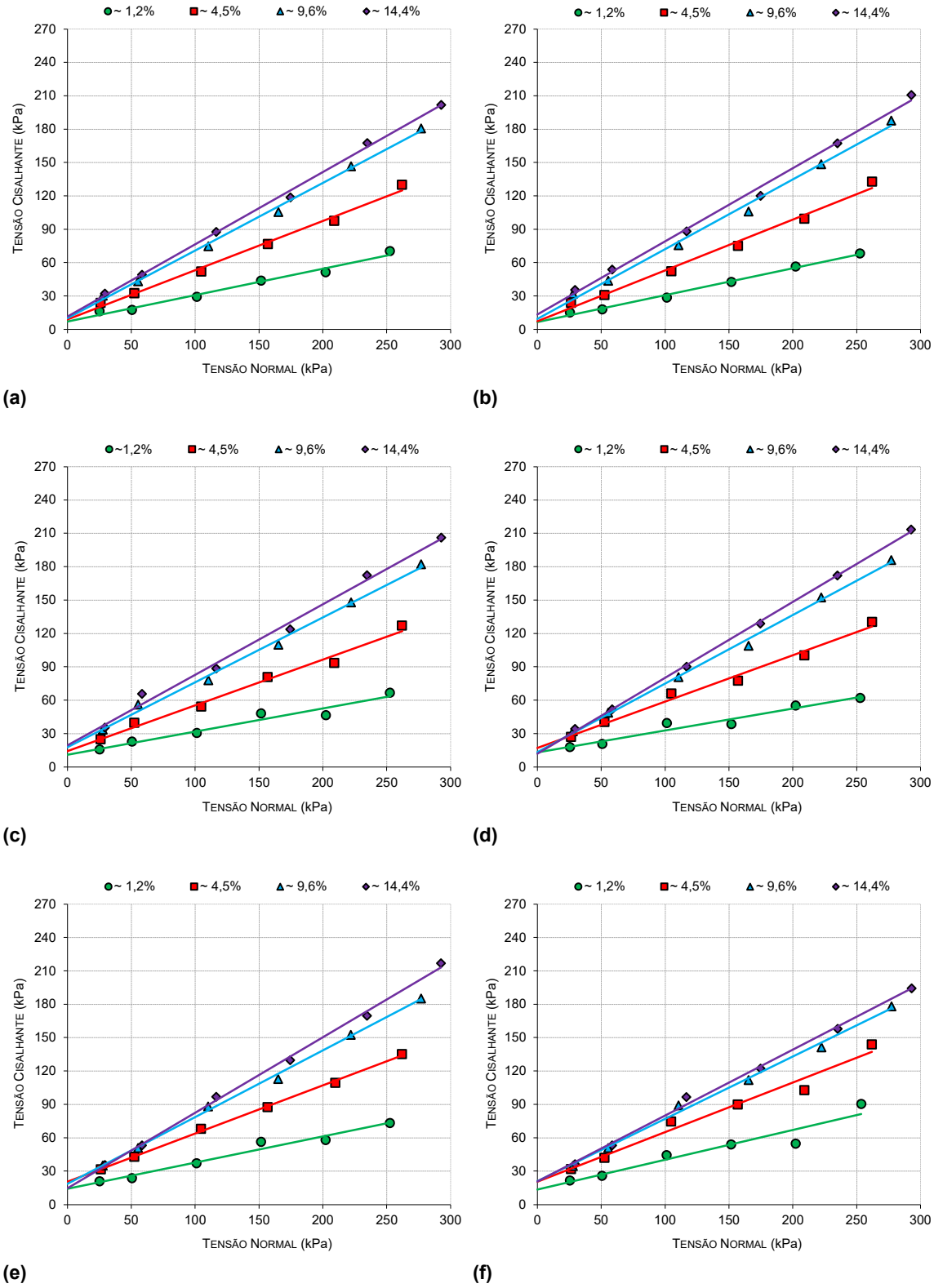
As envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico dos corpos de provas ensaiados com adição das fibras têxteis estão indicadas na Figura 57 e os valores das tensões cisalhantes correspondentes estão indicados na Tabela 44.

Verifica-se que a resistência ao cisalhamento aumenta com o deslocamento horizontal em todos os gráficos da Figura 57, que ilustra as envoltórias das amostras com inclusão de fibras têxteis. Este aumento da resistência ao cisalhamento é representado em grande parte pelo aumento do ângulo de atrito, já que a coesão, com exceção da envoltória ~1,2% de deslocamento, apresentou uma variação pequena.

A coesão variou entre 7,3 (deslocamento de ~ 4,5% e 1,37% de fibras inclusas) a 20,7 kPa (deslocamento de ~ 14,4% e 10% de fibras inclusas) para envoltórias maiores que ~ 1,2% de deslocamento horizontal e 6,7 (1,37% de fibras inclusas) a 14,2 kPa (7% de fibras inclusas) para as envoltórias ~ 1,2% de deslocamento horizontal específico. O ângulo de atrito variou entre 29,2 e 34,3º para deslocamentos igual ou superior a ~ 9,6%, apontando um certo paralelismo entre essas duas curvas. Para as curvas de deslocamentos de ~ 1,2% e ~ 4,5%, os ângulos de atrito são inferiores, como observado nos gráficos da Figura 57, variando entre 11,2 e 24,6º.

Os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento direto convencional, ângulo de atrito e coesão, para as amostras com diferentes teores de fibras têxteis ao longo do deslocamento horizontal específico são apresentados nos gráficos das Figuras 58 e Figura 59, respectivamente.

Figura 57 - Envoltórias de resistência para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – têxtil– (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%.



Fonte: A Autora (2019).

Os gráficos da Figura 58 mostram o crescimento do ângulo de atrito com o deslocamento horizontal além de evidenciarem que os valores para os deslocamentos

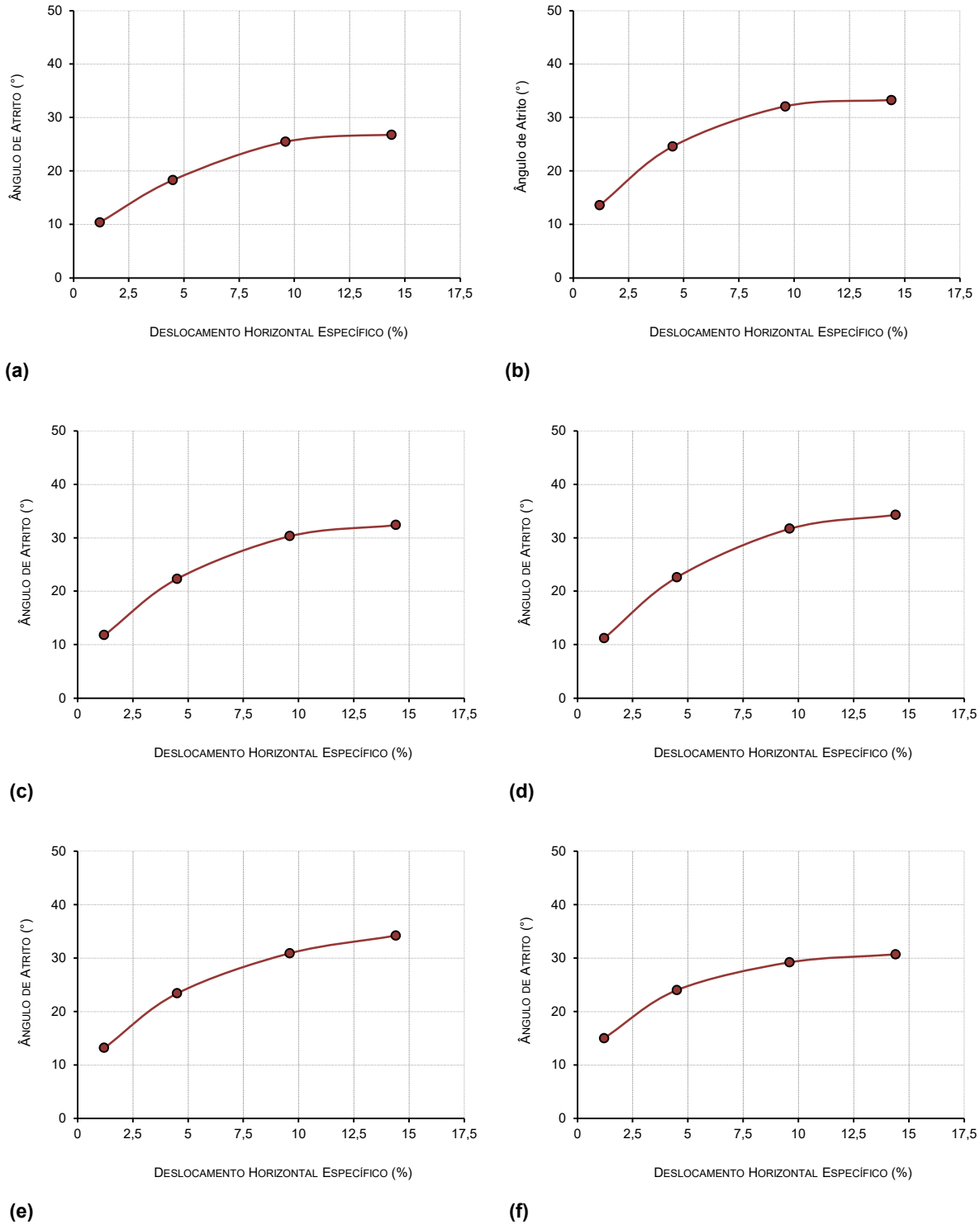
~ 9,6% e ~ 14,4% são bastante próximos. Enquanto a coesão não apresenta um padrão, ocorrendo uma variação entre os valores, aumentando, reduzindo ou se mantendo praticamente constante, dependendo do teor analisado. Os valores desses parâmetros de resistência apresentados graficamente nas Figuras 58 e 59 estão compilados na Tabela 45.

A Figura 60 exibe os gráficos das envoltórias de resistência para deslocamentos horizontais específicos máximos de aproximadamente 17% do comprimento das amostras incorporadoras com fibras têxteis. Os valores dos parâmetros de resistência da matriz composta reforçada por diferentes taxas fibras têxteis encontradas nos RSU estudados nesta pesquisa, para os níveis de tensões normais ensaiados, estão representados na Tabela 46, onde o ângulo de atrito encontra-se entre ϕ' = 30,9 e 34,8° e a coesão entre c' = 12 e 20,3 kPa.

A coesão mínima foi encontrada para a amostra com 5% de fibras inclusas na mistura, enquanto a maior foi para a amostra com uma taxa de 10% de fibras têxteis. Para o ângulo de atrito, o resultado foi praticamente o oposto da coesão. Apesar do ângulo de atrito máximo ter sido 34,8º, o ϕ = 34,4º foi encontrado nos ensaios com 5% de fibras.

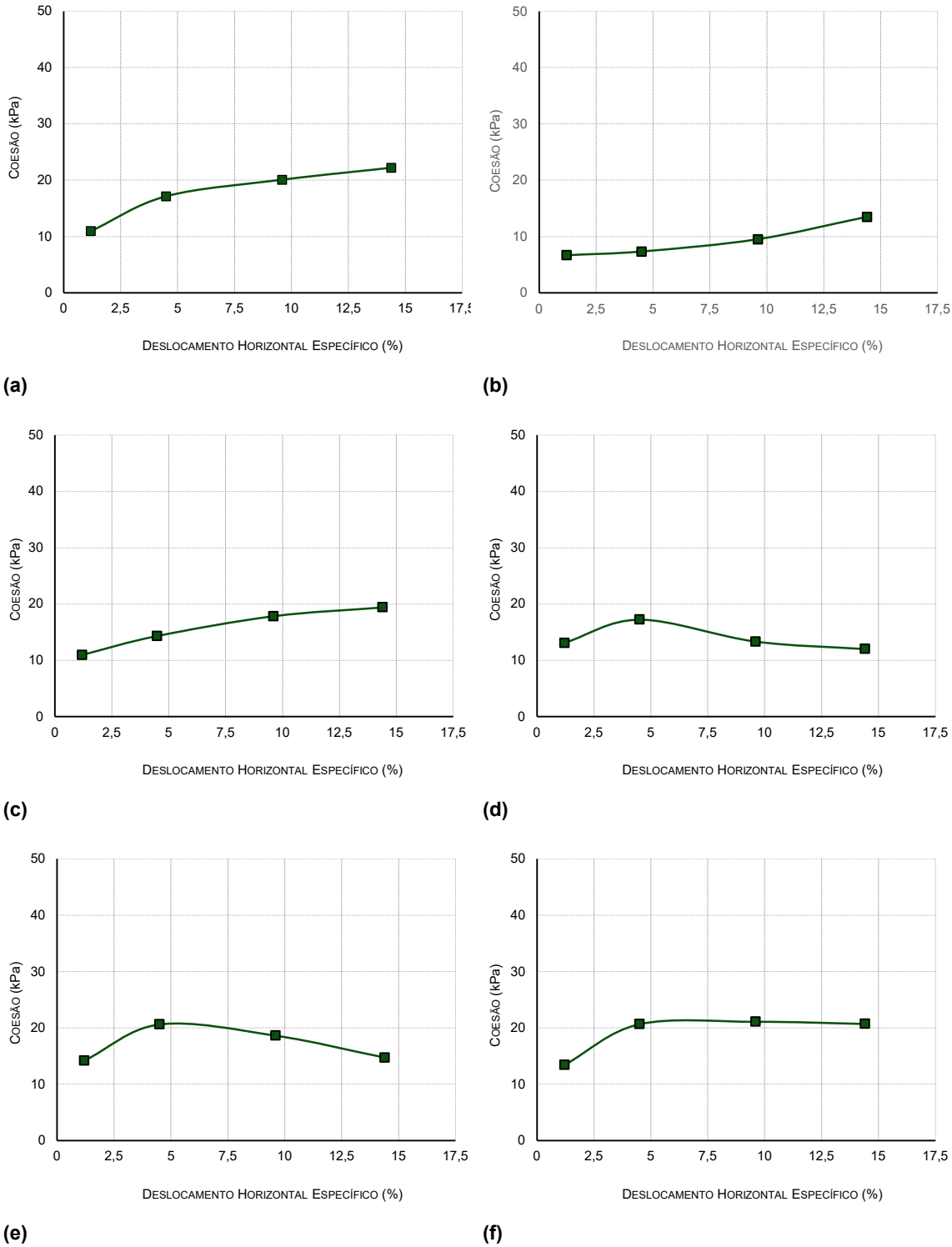
Não foi observado tendência ao crescimento ou redução dos parâmetros de acordo com o teor das fibras. Isto se deve a variação das fibras têxteis encontradas na massa dos resíduos sólidos, que foi bastante ampla, tendo fibras orgânicas e sintéticas.

Figura 58 - Variação do ângulo de atrito ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – têxtil – (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%.



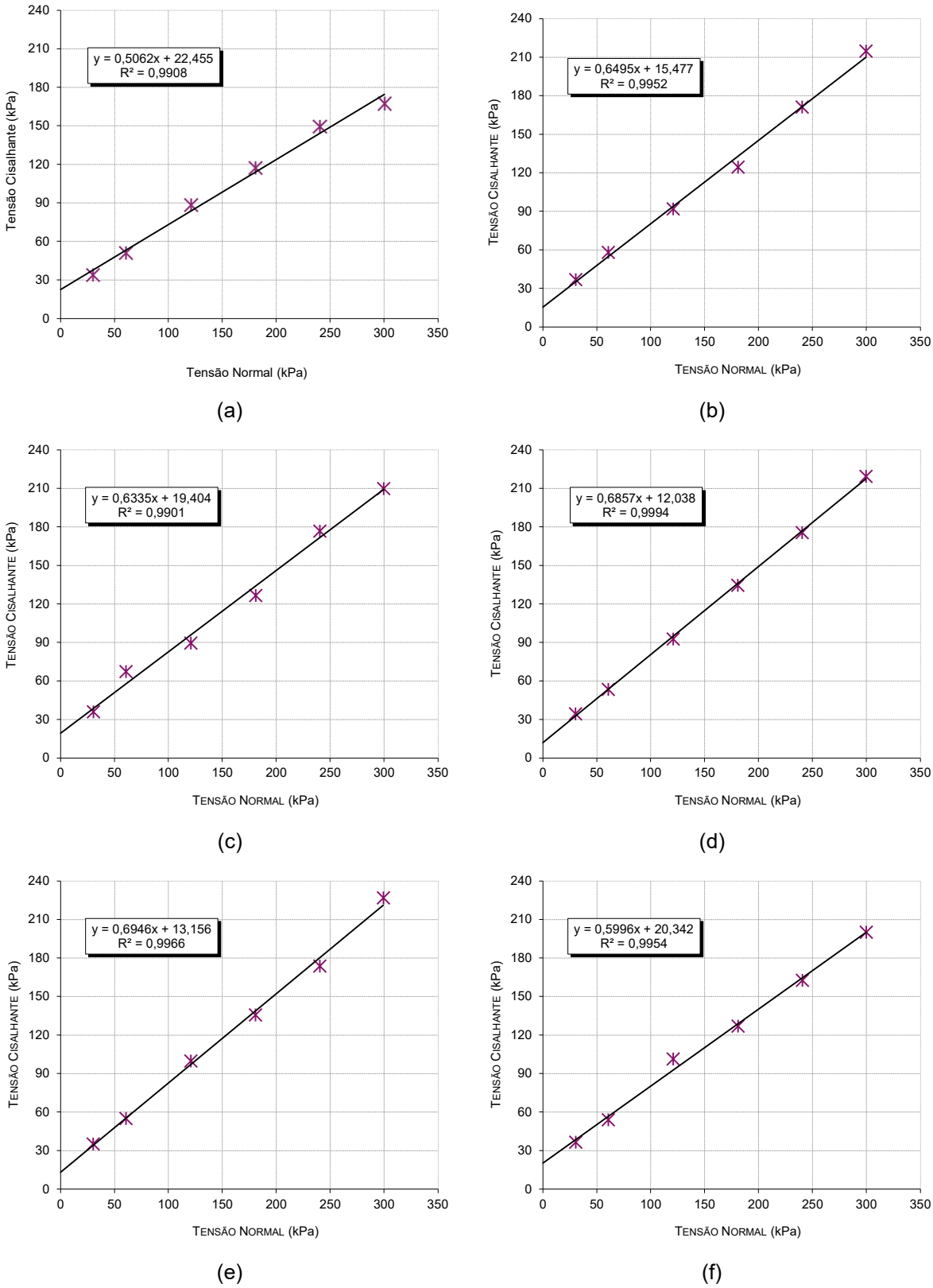
Fonte: A Autora (2019).

Figura 59 - Variação da coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – têxtil – (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%.



Fonte: A Autora (2019).

Figura 60 - Envoltória de Resistência – têxtil – (a) 0%, (b) 1,37%, (c) 3%, (d) 5%, (e) 7% e (f) 10%.



Fonte: A Autora (2019).

4.2.1.5.1 Resumo dos Parâmetros de Resistência com Inclusão das Fibras de Têxtil

Tabela 44 - Valores das tensões cisalhantes ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico % – amostras com acréscimo de fibras de têxtil.

PARÂMETROS	TENSÃO NORMAL APLICADA	DESLOCAMENTO HORIZONTAL ESPECÍFICO (%)	PERCENTUAIS DE TÊXTIL				
			1,37%	3%	5%	7%	10%
τ (kPa)	25 kPa	1,2%	15,35	15,51	17,65	20,87	21,71
		4,5%	24,04	24,67	26,94	31,62	31,94
		9,6%	32,17	33,42	32,09	35,35	34,76
		14,4%	35,79	35,26	34,20	35,61	36,40
	50 kPa	1,2%	18,11	22,71	20,64	23,63	25,77
		4,5%	30,99	39,55	40,18	42,95	42,08
		9,6%	43,86	56,04	48,62	51,04	50,96
		14,4%	53,97	65,60	51,77	53,35	53,26
	100 kPa	1,2%	28,68	30,37	39,24	37,10	44,44
		4,5%	52,37	54,11	65,80	68,16	74,63
		9,6%	75,85	77,76	80,67	88,23	89,31
		14,4%	88,28	88,36	90,03	97,05	96,70
	150 kPa	1,2%	42,76	48,10	38,48	56,34	54,06
		4,5%	75,11	80,62	77,47	87,71	89,91
		9,6%	106,22	109,69	108,95	113,00	112,01
		14,4%	120,33	123,57	128,72	129,94	122,43
	200 kPa	1,2%	56,65	46,27	55,12	58,02	54,82
		4,5%	99,59	93,37	100,29	109,49	102,96
		9,6%	148,69	147,95	152,27	152,77	141,37
		14,4%	167,38	172,30	172,13	169,84	158,06
	250 kPa	1,2%	68,39	66,56	61,99	73,41	90,43
		4,5%	132,97	126,99	130,29	135,33	143,97
		9,6%	187,97	182,17	185,98	185,32	178,19
		14,4%	210,94	206,22	213,47	217,14	194,58

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 45 - Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para diferentes níveis de deslocamento horizontal específico – amostras com acréscimo de fibras de têxtil.

Parâmetros	Deslocamento Horizontal Específico (%)	Teor de Fibras de Têxtil					
		0%	1,37%	3%	5%	7%	10%
c' (kPa)	1,2%	7,1	6,7	11,0	13,1	14,2	13,4
	4,5%	8,9	7,3	14,3	17,2	20,6	20,6
	9,6%	10,1	9,5	17,8	13,3	18,6	21,1
	14,4%	17,7	13,5	19,4	12,0	14,7	20,7
ϕ' (º)	1,2%	13,4	13,6	11,8	11,2	13,2	15,0
	4,5%	23,9	24,6	22,3	22,6	23,4	24,0
	9,6%	31,3	32,1	30,3	31,7	30,9	29,2
	14,4%	29,6	33,3	32,4	34,3	34,2	30,7

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 46 - Parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito para amostras com acréscimo de fibras de têxtil.

Parâmetros	Teor de Fibras de Têxtil					
	0%	1,37%	3%	5%	7%	10%
c' (kPa)	22,5	15,5	19,4	12,0	13,2	20,3
ϕ' (º)	26,8	33,0	32,4	34,4	34,8	30,9
R^2	0,9967	0,9952	0,9901	0,9994	0,9966	0,9954

Fonte: A Autora (2019).

4.2.1.6 Comparação dos Ensaios da Matriz Básica e Matriz Composta

Uma análise comparativa dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto executados nesta pesquisa foi realizada para melhor observar o comportamento mecânico quanto a inclusão das diferentes fibras presentes nos resíduos sólidos urbanos. Desta forma, foram realizadas as seguintes comparações:

a) Matriz básica x Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras (percentagem de fibras determinada na composição gravimétrica);
b) Matriz composta reforçada com 3% de fibras de madeira x Matriz composta reforçada com 3% de fibras de plástico x Matriz composta reforçada com 3% de fibras de têxtil;

c) Matriz composta reforçada com 5% de fibras de madeira x Matriz composta reforçada com 5% de fibras de plástico x Matriz composta reforçada com 5% de fibras de têxtil.

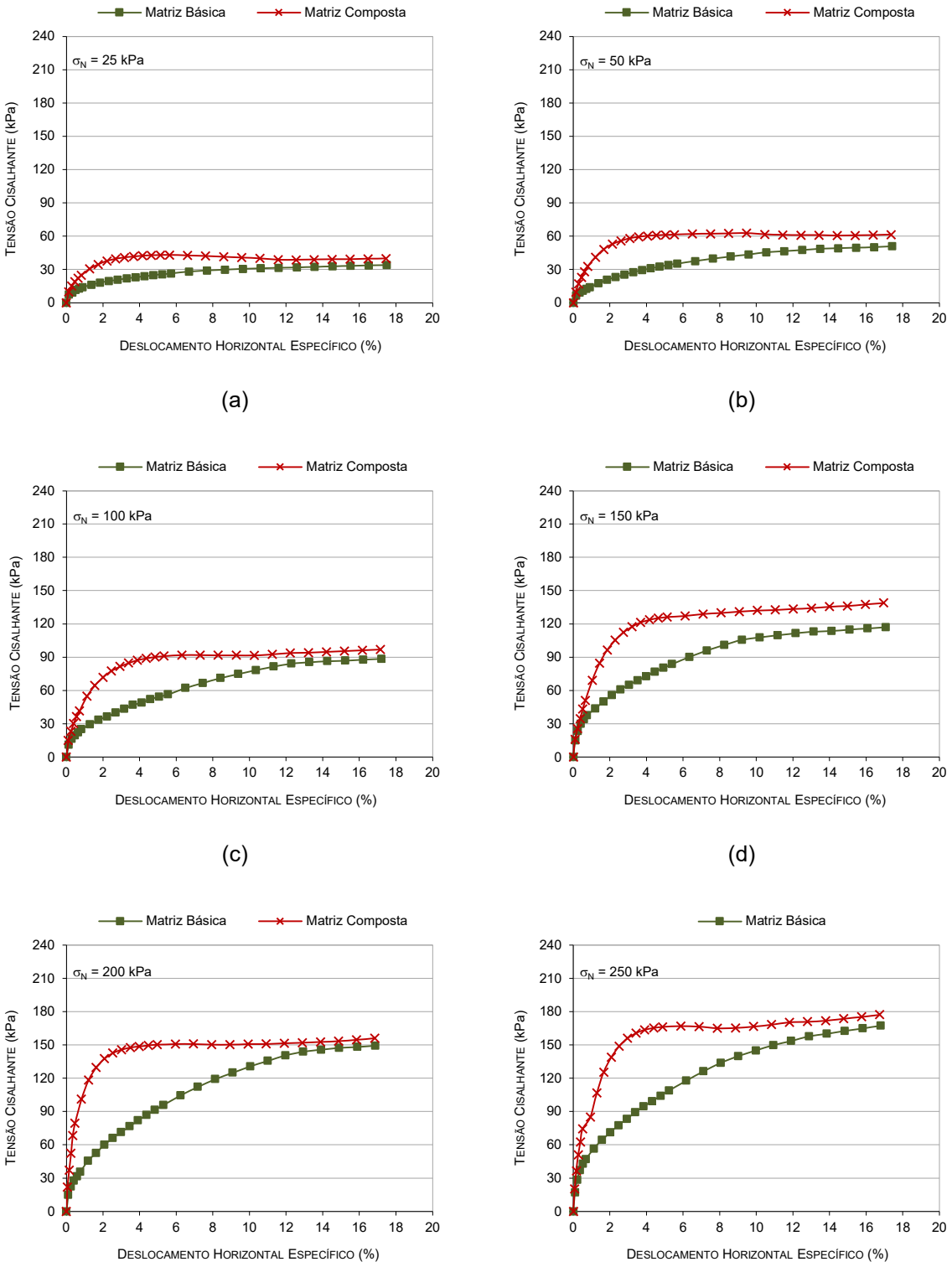
4.2.1.6.1 Reforçada com as 13,54% de Fibras - Madeira, Plástico e Têxtil

Uma comparação das curvas tensão cisalhante ao longo do deslocamento horizontal das amostras com 100% do material misto com partículas inferiores que 8 mm (matriz básica) e com acréscimo das fibras encontradas na composição gravimétrica (matriz composta reforçada com 13,54% de fibras) investigadas nos resíduos sólidos do Aterro da Muribeca está apresentada na Figura 61. Os gráficos estão apresentados para as seis diferentes tensões normais aplicadas.

Diferentemente do esperado, o comportamento da curva da matriz composta com reforço das fibras, a tensão cisalhante aumenta até um valor “máximo”, permanecendo praticamente constante com o aumento do deslocamento horizontal. Como discutido anteriormente, essa mudança de comportamento pode ser explicada pelo alto teor de fibras, 13,54%.

A matriz básica apresenta crescimento da resistência com o aumento do deslocamento horizontal, sem apresentar uma ruptura do material, característico de solos reforçados. No entanto, em todos os casos, a resistência ao cisalhamento da matriz composta é maior que da matriz básica.

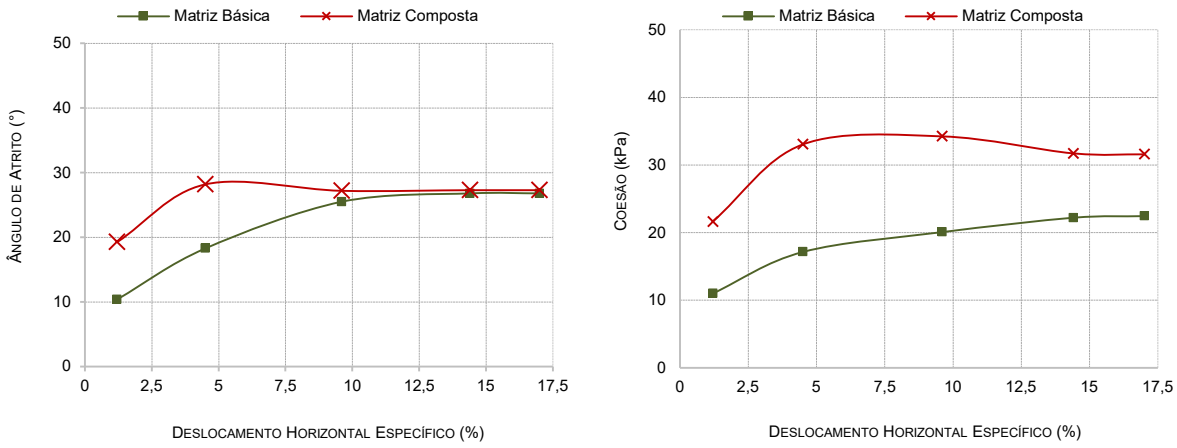
Figura 61 - Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal específico das amostras de resíduos sólidos estabilizados.



Fonte: A Autora (2019).

Ao comparar os resultados das amostras com a composição determinada na composição gravimétrica com a matriz básica em termos de parâmetros de resistência, a coesão da matriz composta reforçada apresentou um aumento de cerca de 40% em relação ao da matriz básica. Porém, esse aumento não se deve efetivamente à coesão do material granular, ou seja, devido ao atrito, mas sim à coesão das fibras que foi parcialmente mensurada nos ensaios de resistência ao cisalhamento direto, como Fucale (2005) explica. O efeito de tração dos elementos de reforço gera esse aumento na coesão, produzindo um ganho na resistência ao cisalhamento. Contudo, para essa matriz composta com 13,54% de fibras, apesar do aumento na coesão, nota-se um pequeno aumento na tensão cisalhante em comparação a matriz básica. Isto se deve aos tipos de fibras presentes e ao alto teor do conjunto, como apresentado em Corrêa (2013). As fibras passaram a deslizar uma sobre a outra com o aumento do deslocamento horizontal, reduzindo o efeito de tração das fibras e o aumento da resistência. A Figura 62 mostra a comparação dos parâmetros de resistência das duas amostras ensaiadas.

Figura 62 - Comparação da variação do (a) ângulo de atrito e (b) coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específico das amostras de resíduos sólidos estabilizados.

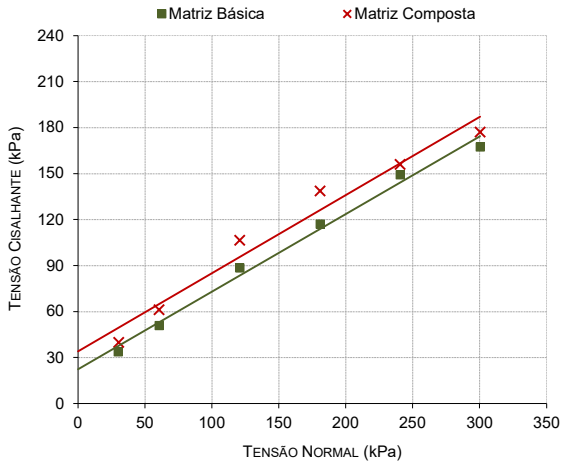


(a) (b)

Fonte: A Autora (2019).

As envoltórias de resistência das amostras da matriz básica e da matriz composta dos resíduos sólidos são mostradas na Figura 63, e um resumo dos parâmetros de resistência estão indicados na Tabela 47.

Figura 63 - Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento das amostras de resíduos sólidos estabilizados.



Fonte: A Autora (2019).

O intercepto coesivo c' e o ângulo de atrito interno ϕ' medidos na matriz composta reforçada com fibras de madeira, plástico e têxtil foram de 31,6 e 27,3º, respectivamente. Ao comparar com valores encontrados na literatura para resíduos sólidos urbano estabilizados, os valores aqui determinados para a matriz composta se enquadram aos encontrados em autores como Fucale (2005) com ϕ' entre 46,1 e 47º e c' entre 29,6 e 37,1 kN/m^2; Corrêa (2013) com ϕ' entre 30 e 41º e c' entre 18 e 46 kN/m^2 para diferentes percentagens de fibras; GRS - UFPE (2017) com ϕ' = 22,1º c' = 22,3 kPa para a matriz básica e ϕ' = 22,9 e 28,9º e c' = 24,9 e 27,7 kN/m^2 para percentagens de 15 a 30% de fibras, respectivamente.

Tabela 47 - Resumo dos dados do ensaio de resistência ao cisalhamento – 86,46% de material misto < 8 mm natural + 2,44% madeira + 1,37% têxtil + 9,73% plástico – Matriz composta reforçada.

AMOSTRA	γ_{seco} (kN/m^3)	ϕ (º)	c (kN/m^2)
Matriz Básica	10,7 - 10,9	26,8	22,5
Mariz Composta	10,6 - 11,3	27,3	31,6

Fonte: A Autora (2019).

4.2.1.6.2 Comparação das Amostras de RSU

A comparação entre as amostras de resíduos sólidos foi realizada para as mesmas taxas de fibras estudadas nos três casos. Assim sendo, foram comparados os ensaios para 3 e 5% de fibras.

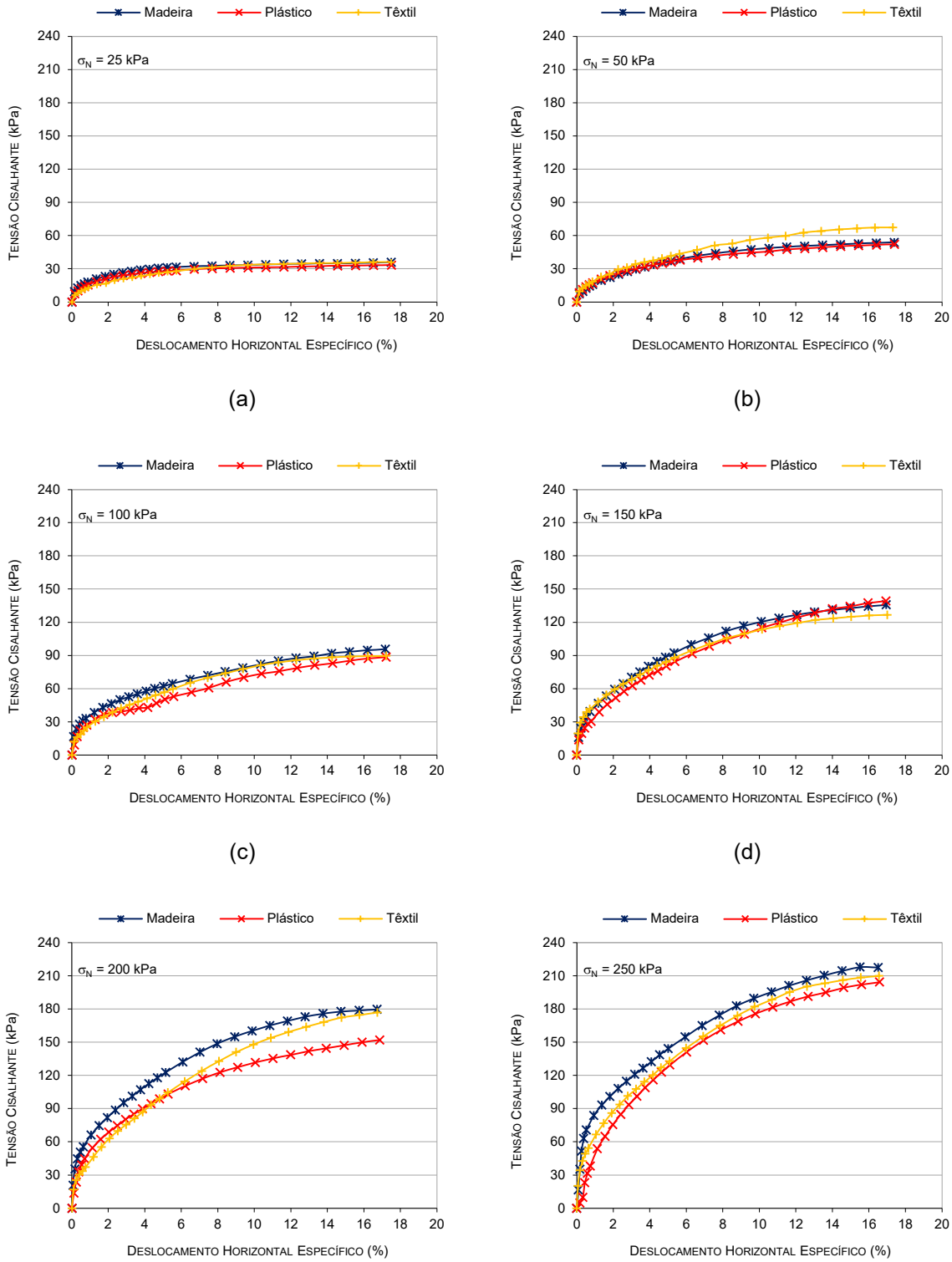
As Figuras 64 e 65 apresentam a comparação gráfica das curvas tensão cisalhante ao longo do deslocamento horizontal das amostras com 3% e 5% de fibras de madeira, plástico e têxtil, respectivamente. Os gráficos estão apresentados para as seis diferentes tensões normais aplicadas.

As três amostras apresentam, para uma percentagem de 3% de fibras, crescimento da resistência com o aumento do deslocamento horizontal, característico de solos reforçados. Também se nota uma tendência de verticalização das curvas com o aumento da tensão normal aplicada. O mesmo irá acontecer para a percentagem de 5% de fibras (Figura 65). Porém, para a amostra de plástico, o comportamento da curva será outro. Para este caso, com o aumento da tensão normal aplicada, a curva não tende à verticalização. Tem-se o crescimento rápido da tensão cisalhante, pequeno deslocamento horizontal específico, seguida de uma tensão cisalhante praticamente constante até o término do ensaio.

Como a matriz composta reforçada com 13,54% de fibras possui 9,73% de plástico, é o comportamento das fibras plásticas que predomina no comportamento das curvas dos gráficos ilustrados na Figura 61. Nota-se uma clara semelhança no comportamento da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras com a matriz composta reforçada com 5% de fibras plásticas apresentadas na Figura 65.

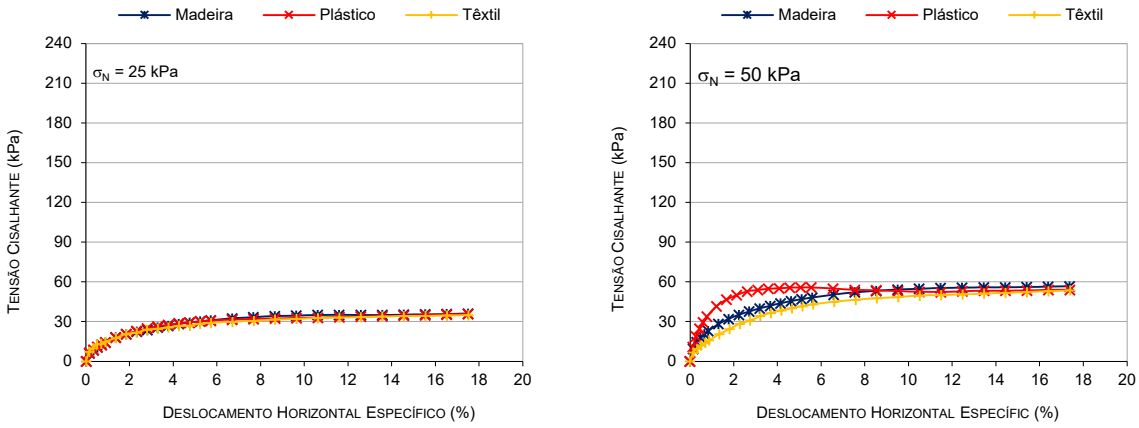
As Figuras 66 e 67 mostram a comparação dos parâmetros de resistência das três amostras ensaiadas para 3% e 5% de inclusão de fibras na mistura com a matriz básica, respectivamente.

Figura 64 - Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal específico das amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de 3% de fibras.



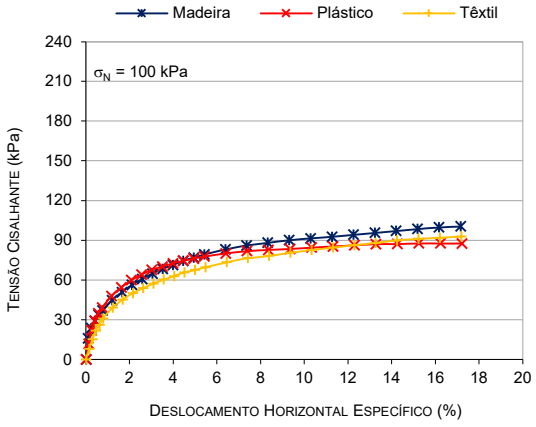
Fonte: A Autora (2019).

Figura 65 - Comparação das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal específico das amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de 5% de fibras.

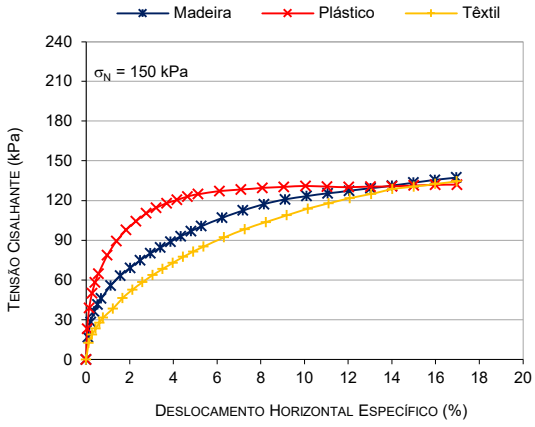


(a)

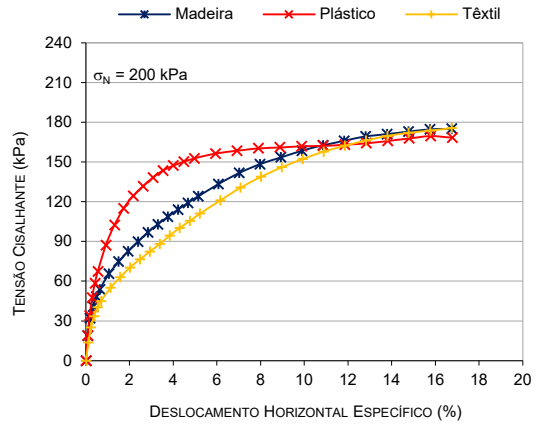
(b)



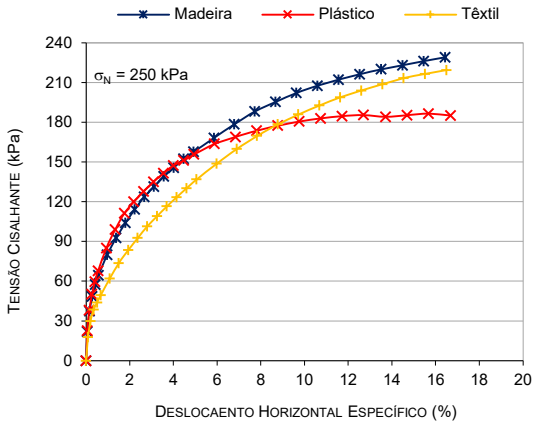
(c)



(d)



(e)

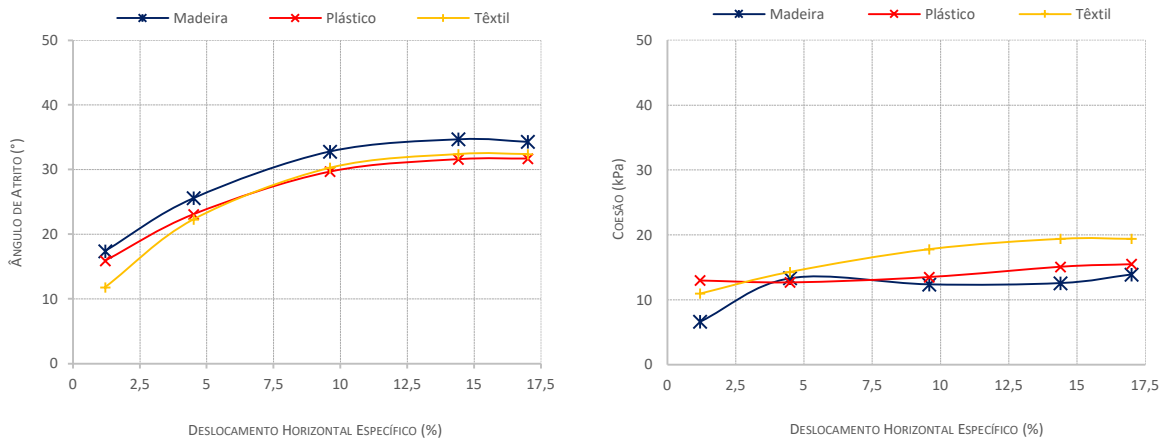


(f)

Fonte: A Autora (2019).

Ao comparar os resultados das amostras em termos de parâmetros de resistência, consta que, para 3% de fibras inclusas na mistura, o comportamento do ângulo de atrito ao longo do deslocamento horizontal foi semelhante, apesar da amostra de madeira apresentar os maiores valores. Quanto à coesão, a amostra de têxteis apresenta valores superiores em relação as duas outras fibras. Em termos percentuais, para o deslocamento máximo horizontal ensaiada, constata-se que o ângulo de atrito da amostra com fibras de madeira foi aproximadamente 8 e 6% maior que as amostras de fibras plásticas e têxteis, respectivamente. Enquanto a coesão da amostra de fibras têxteis foi aproximadamente 25 e 40% maior que as amostras de fibras plásticas e de madeira, respectivamente.

Figura 66 - Comparação da variação do (a) ângulo de atrito e (b) coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específica das amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de 3% de fibras.

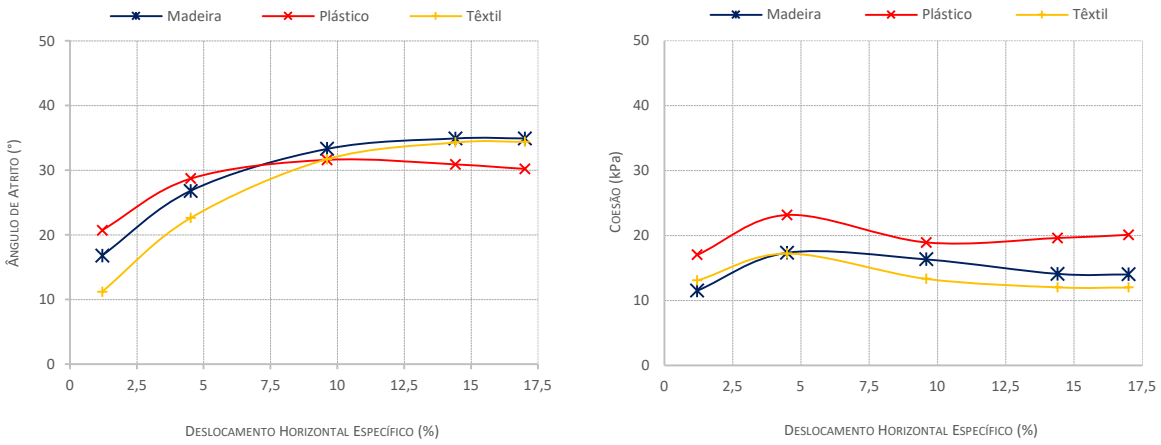


(a) (b)

Fonte: A Autora (2019).

Na comparação dos resultados das amostras em termos de parâmetros de resistência para uma inclusão de fibras de 5% na mistura, nota-se uma diferença de comportamento com as amostras de plástico. A coesão do plástico foi maior ao longo de todo o deslocamento horizontal ensaiada, tendo 20,1 kPa como valor para o deslocamento máximo de aproximadamente 17%. Já o ângulo de atrito, teve uma redução do valor a partir do deslocamento horizontal de ~ 9,6%.

Figura 67 - Comparação da variação do (a) ângulo de atrito e (b) coesão ao longo de diferentes níveis de deslocamento horizontal específica das amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de 5% de fibras.



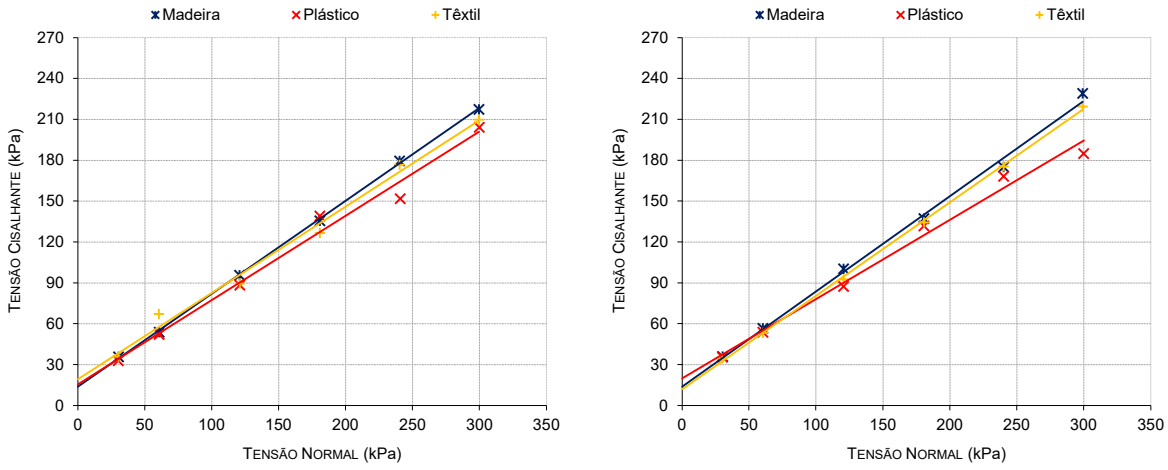
(a) (b)

Fonte: A Autora (2019).

O parâmetro de resistência, ângulo de atrito, determinado neste trabalho está de acordo com variação do parâmetro em função dos deslocamentos, analisada por meio de ensaios de laboratório por diversos autores como Jessberger (1990); Jessberger & Kockel (1995); Kockel (1995); e Motta (2011). De acordo com esses autores, em geral, o valor limite do ângulo de atrito é mobilizado para deslocamentos máximos de 20%. No entanto, em relação à mobilização da coesão, essa só começa a se acentuar para deslocamentos superiores a 10%, com o seu valor tendendo a crescer indefinidamente com o deslocamento, não sendo possível caracterizar um máximo. Já no trabalho de Fucale (2005), tanto a matriz composta, quanto a composta reforçada, apresentaram um crescimento do ângulo de atrito, como nos demais autores citados e nos resultados desse trabalho. A coesão, porém, apresentou comportamento diferenciado, atingindo seu valor máximo a 10% de deslocamento horizontal nos dois casos, equiparando-se com os valores desta pesquisa, apesar de que, para 5% de inclusão de fibras, o valor máximo das coesões deu-se para um deslocamento horizontal em torno de 5%.

As envoltórias de resistência das amostras de RSU com inclusão de 3% e 5% de fibras são mostradas na Figura 68, e um resumo dos parâmetros de resistência estão indicados nas Tabelas 48 e 49.

Figura 68 - Comparação das envoltórias de resistência ao cisalhamento das amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de fibras – (a) 3% e (b) 5%.



(a) (b)

Fonte: A Autora (2019).

O intercepto coesivo c' e o ângulo de atrito interno ϕ', medidos na matriz composta reforçada com fibras, apresentaram valores variados para as duas percentagens comparadas. No entanto, nota-se um certo paralelismo entre as envoltórias para 3% de fibras (Figura 68(a)) e uma faixa de valores para a coesão mais reduzida. No gráfico das amostras de RSU com inclusão de 5% de fibras, as envoltórias de madeira e têxtil são praticamente paralelas, apresentando valores de ângulo de atrito e coesão muito próximos. No entanto, como visto desde o início da comparação entre as três diferentes fibras, a amostra de plástico apresentou um comportamento diferente, com um menor ângulo de atrito e maior coesão, tornando a curva menos íngreme (Figura 68(b)).

Tabela 48 - Resumo dos dados do ensaio de resistência ao cisalhamento para amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de 3% de fibras – madeira, plástico e têxtil.

Amostra	γ_{seco} **(kN/m³)**	**ϕ (º)**	**c (kN/m²)**
Madeira	9,8 - 9,9	34,3	13,9
Plástico	10,2 - 10,3	31,7	15,5
Têxtil	9,8 - 10,2	32,4	19,4

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 49 - Resumo dos dados do ensaio de resistência ao cisalhamento para amostras de resíduos sólidos estabilizados com inclusão de 5% de fibras – madeira, plástico e têxtil.

Amostra	**γ_{seco} (kN/m^3)**	**ϕ (º)**	**c (kN/m^2)**
Madeira	9,5 - 9,9	34,9	14
Plástico	11,2 - 11,6	30,2	20,1
Têxtil	10,0 - 10,2	34,4	12

Fonte: A Autora (2019).

5 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRAÇÃO ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Muitos estudos, em concordância com Kölsch (1993,1995, 1996), reiteram que a resistência ao cisalhamento dos RSU é dividida em duas partes. A primeira refere-se ao cisalhamento proveniente do atrito das partículas, sendo expresso através dos parâmetros ângulo de atrito (ϕ_{MB}) e coesão (c_{MB}) da matriz básica (MB) dos resíduos sólidos, como visto no capítulo 4. A segunda parte diz respeito ao reforço pela resistência à tração das fibras, representado pelo ângulo de tensão à tração (ζ) e a máxima resistência à tração das fibras ($Z_{Máx}$).

Neste capítulo será analisada a segunda parte referida, que representa a resistência ao cisalhamento dos RSU, a fim de obter todos os parâmetros de tração necessários para estudos de projetos e operações de aterros de resíduos sólidos.

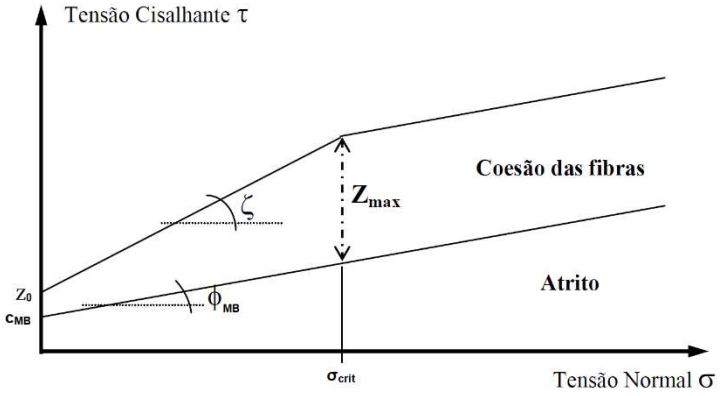
5.1 MODELO GEOTÉCNICO BASEADO NO EFEITO DAS FIBRAS PARA ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DOS RSU PROPOSTO POR KÖLSCH

Kölsch (1996) apresentou um modelo de resistência mecânica dos RSU onde a envoltória de resistência é bi-linear. A inclinação íngreme da envoltória de resistência se deve ao reforço das fibras, enquanto a variação desta inclinação representa a resistência à tração máxima e deixa de contribuir para a resistência total ao cisalhamento, passando a representar apenas a parcela referente ao atrito. Desta forma, pode-se afirmar que a dependência linear da tensão de tração nas fibras pela tensão normal que atua nas fibras é expressa pelo ângulo de tensão de tração (ζ), e o valor máximo da tensão de tração ativada em função da carga aplicada é denominada de resistência à tração específica das fibras ou tensão de tração máxima ($Z_{Máx}$) e a tensão necessária para mobilizar esta resistência à tração é denominada de tensão normal crítica ($\sigma_{crít}$). Existe uma parcela que independe da carga normal aplicada (Z_0).

A resistência total ao cisalhamento dos resíduos é representada na Figura 69, onde apresenta a parcela da matriz básica (atrito) e a parcela do matriz reforço (coesão das fibras), que pode ser obtida superpondo as duas componentes.

Desta forma, na parcela do reforço, o parâmetro fica representado pela coesão das fibras descrita através do ângulo de tensão à tração ζ e da tensão à tração independente da tensão normal, Z_0. A transformação da tensão à tração em coesão das fibras resulta da consideração da anisotropia, bem como da resistência à tração específica das fibras $Z_{Máx}$ (BORGATTO, 2010).

Figura 69 - Modelo bi-linear de resistência ao cisalhamento dos RSU. Sobreposição das propriedades da resistência dos RSU, atrito e reforço.



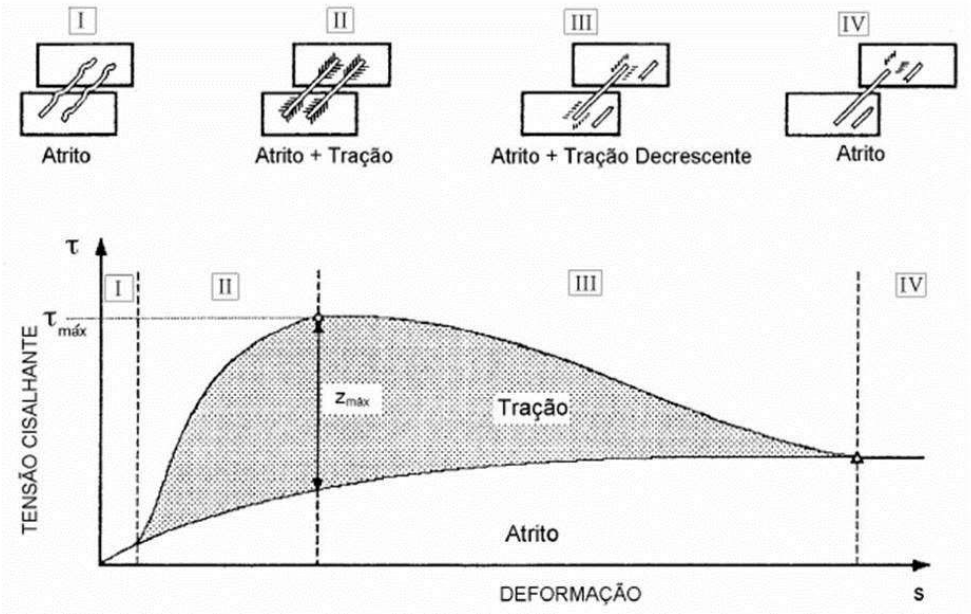
Fonte: KÖLSCH (1996) apud BORGATTO (2010).

O modelo proposto por Kölsch, bastante difundido no meio científico, afirma que materiais fibrosos presentes na composição dos resíduos sólidos urbanos produzem forças resistentes de tração que dependem do entrosamento destas fibras com a massa do resíduo, sendo função da tensão normal e do grau de compactação. Através de ensaios triaxiais e cisalhamento direto foi desenvolvido um modelo baseado no conhecimento da capacidade de cargas das fibras dos RSU e outros materiais de misturas com acréscimos de fibras (Figura 70 e Figura 71).

O modelo considera que as fibras dos materiais são capazes de incorporar forças de tração e transmiti-las para fora da zona de deformação. Além disso, o modelo considera que o desenvolvimento das forças de tração nas fibras tem o mesmo efeito de um reforço, dependendo da ligação das fibras que são dependentes da tensão normal. A resistência total ao cisalhamento é composta do atrito no plano cisalhante e da força de tração nas fibras. Dependendo da transmissão das forças nas fibras, as quais aumentam com a tensão normal, e dependendo da resistência à tração das fibras, a resistência total ao cisalhamento em um determinado intervalo de tensão normal é maior do que a resistência friccional. Uma vez que existe uma correlação

linear entre a resistência ao atrito e a tensão normal, descrita pelo ângulo de atrito interno ϕ e uma correlação não linear descontínua entre a resistência total ao cisalhamento e a tensão normal, resultando na atuação da força de tração das fibras.

Figura 70 - Comportamento dos RSU – Modelo de interação entre as forças de atrito e tração.



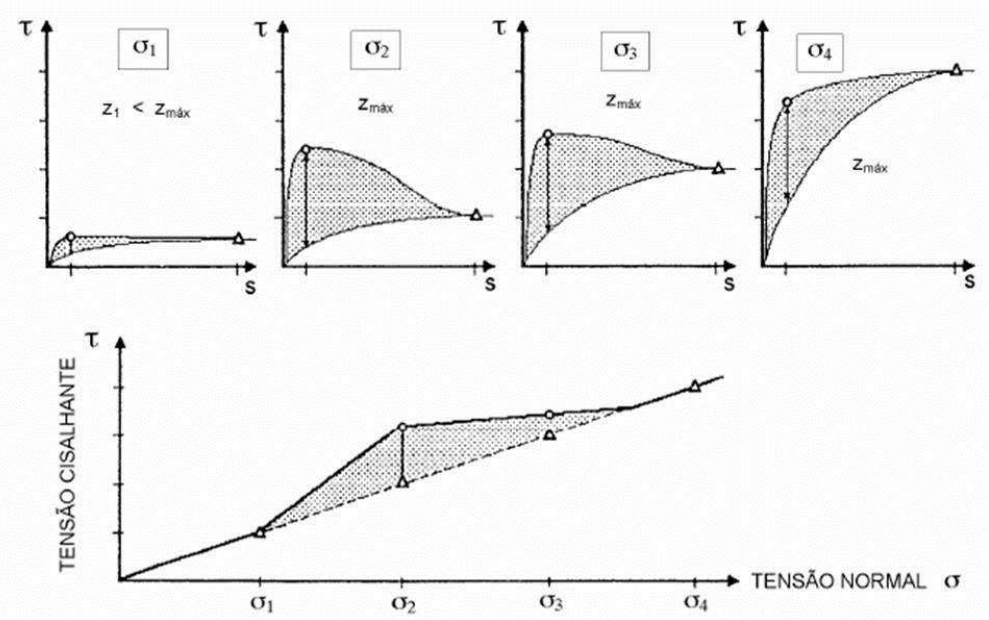
Fonte: KÖLSCH (1995).

A Figura 70 demonstra o modelo de Kölsch de interação entre as forças de atrito e tração durante uma deformação por cisalhamento de um material fibroso com tensão normal constante. O modelo apresenta quatro fases distintas. Na primeira fase (I), apenas forças de atrito regem durante a deformação. Com o aumento da deformação, na segunda fase (II), as fibras passam a ser solicitadas, surgindo a força de tração que é gradualmente aumentada, tendo um efeito equivalente a um reforço. A terceira fase (III) se dá quando excede a resistência à tração das fibras, ocorrendo o rompimento ou escorregamento das mesmas (decréscimos da resistência ao cisalhamento devido à tração). No limiar desta fase tem-se a máxima de tensão de tração ($Z_{Máx}$). A última fase (IV) apresenta a tensão cisalhante representada apenas pelas forças de atrito com o aumento das deformações.

O atrito é determinado pela carga normal, tendo uma relação linear com a tensão normal, representada pelo ângulo de atrito interno. A resistência à tração também aumenta com a tensão normal, porque a transmissão das forças de tração melhora com uma forte ligação das fibras. A incorporação de forças de tração nas

fibras é restrita à sua resistência à tração, deste modo há uma tensão normal onde o valor da força de tração atinge um nível máximo. Várias interações de forças de atrito e tração, dependendo das diferentes condições normais de tensão, resultam deste mecanismo.

Figura 71 - Comportamento dos RSU – Aumento da resistência ao cisalhamento total devido às forças de tração.



Fonte: KÖLSCH (1995).

A Figura 71 apresenta a interação das forças de tração e atrito para diferentes níveis de tensões normais, nos quais os círculos indicam os pontos de tensão de tração máxima e os triângulos marcam os pontos de atrito máximo em uma determinada tensão normal. Observa-se que, para tensão normal mais baixa (σ_1), as forças de tração atuantes são baixas devido à falta de mobilização das fibras. Para tensões normais mais elevadas, as forças de tração aumentam, devido à interação das fibras, até atingirem um valor máximo (σ_2). Para tensões normais onde $\sigma \geq \sigma_2$ somente a componente de atrito da resistência total ao cisalhamento aumenta. Dependendo das proporções entre as forças de atrito e de tração, a resistência total ao cisalhamento é regida pelas forças de tração ($\sigma 1 \leq \sigma \leq \sigma 4$) ou pelas forças de atrito ($\sigma \leq \sigma 1$ e $\sigma \leq \sigma 4$). No intervalo de tensão normal, onde a resistência total ao cisalhamento é controlada pelas forças de tração, a envoltória linear de cisalhamento mostra uma

ruptura, característica dos materiais fibrosos. O tamanho e a extensão dessa ruptura dependem das propriedades do material (resistência das fibras, propriedade da fricção).

De acordo com Fucale (2005), no estudo das propriedades de resistência dos RSU deve determinar a magnitude de ambas componentes da resistência ao cisalhamento (atrito e reforço) em ensaios separados, assim como descrever a resistência através de diferentes parâmetros. E, a partir destes dados, pode-se conduzir os cálculos de estabilidade de talude.

Com o objetivo de caracterizar cada um dos parâmetros das componentes da resistência ao cisalhamento de RSU, o atrito e a tração , Kölsch (1996) desenvolveu um equipamento de grande porte destinado exclusivamente à medição das forças de tração das fibras (obtenção dos parâmetros: ângulo de tensão de tração (ζ), tensão de tração máxima ($Z_{Máx}$) e tensão à tração independente da carga (Z_0)).

5.2 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRAÇÃO A PARTIR DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO CONVENCIONAL DOS RSU

Como visto anteriormente, o ensaio de resistência ao cisalhamento direto fornece os parâmetros da componente da resistência ao cisalhamento referente ao atrito, sendo eles a coesão (c_{MB}) e o ângulo de atrito (ϕ_{MB}) da matriz básica. No entanto, um dos objetivos desta pesquisa é a obtenção dos parâmetros da componente de tração da resistência ao cisalhamento através do ensaio de cisalhamento direto, visto que a construção do equipamento de tração não é algo simples e, até hoje, só se encontra referência deste equipamento na Alemanha, desenvolvido por Kölsch (1996).

Baseando-se nos estudos dos resíduos sólidos urbanos, desenvolvidos por Kölsch (1996), é possível estimar uma parcela da resistência devido às forças de tração existentes nas matrizes compostas, representada pelo ângulo de atrito (ζ) (FUCALE, 2005). Todavia, Fucale (2005) alega que não é possível estimar o parâmetro de resistência máxima de tração das fibras.

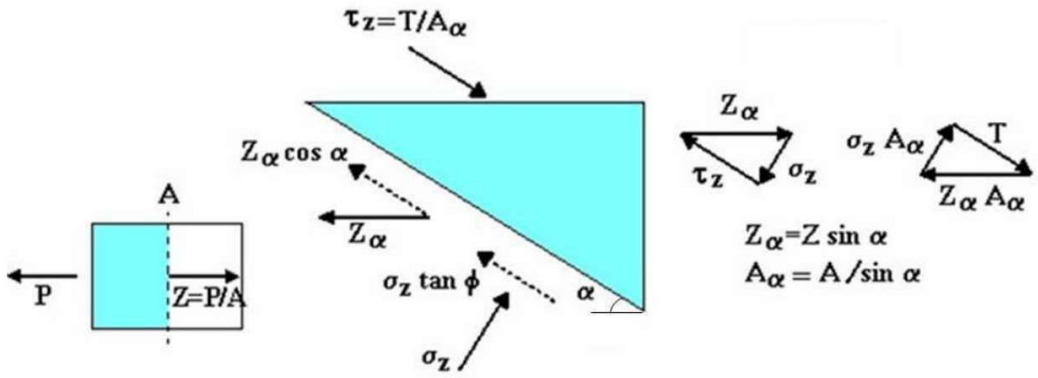
Neste capítulo será apresentado um meio matemático adaptado de obtenção dos parâmetros de tração necessários para os cálculos de estabilidade de talude,

como o ângulo de tração, o fator de transmissão das fibras (a_ζ) e a coesão devida à tração (Z).

A partir da tensão de tração determinada no ensaio de tração desenvolvido por Kölsch (1996) e descrito em Fucale (2005), Calle (2007) e Borgatto (2010) foram utilizadas as formulações para estimar os parâmetros de tração.

A Figura 72 apresenta o equilíbrio de forças em um elemento reforçado horizontalmente, o qual é carregado através de uma força de tração P, axial à direção das fibras e de uma força cisalhante T paralela ao plano de ruptura $A\alpha$. A tensão de tração pode ser calculada conforme a aplicação de combinações mecânicas resultando na contribuição da matriz fibrosa denominada coesão das fibras. Este parâmetro é composto de duas partes: resistência ao cisalhamento (τ_z), devido às forças de tração no reforço, que atua paralela ao plano de ruptura, e tensão de atrito adicional ($\tau_R(z)$), que é causada por uma tensão normal adicional σ_z resultante das forças de equilíbrio. A tensão de tração no reforço é representada por $Z\alpha$.

Figura 72 - Diagramas de equilíbrio de forças em um elemento reforçado horizontalmente.



Fonte: MOTTA (2011) apud KÖLSCH (1996).

Para o cálculo da coesão das fibras, chegou-se à Equação 7:

$$\tau(z)_\alpha = \tau_z + \tau_R(z)$$
$$\tau(z)_\alpha = Z_\alpha \cdot \cos\alpha + \sigma_z \cdot \tan\phi$$
$$\tau(z)_\alpha = Z_\alpha \cdot \cos\alpha + Z_\alpha \cdot \text{sen}\alpha \cdot \tan\phi$$
$$\tau(z)_\alpha = Z_\alpha \cdot (\cos\alpha + \text{sen}\alpha \cdot \tan\phi)$$
$$Z_\alpha = Z \cdot \text{sen}\alpha$$

$\tau(z)_{\alpha} = Z \cdot \sin\alpha \cdot (\cos\alpha + \text{sen}\alpha \cdot \tan\phi)$

$$\boldsymbol{\tau(z)_{\alpha} = Z \cdot a\zeta} \quad (7)$$

Onde:

$\tau(z)_{\alpha}$ – Coesão das fibras;

τ_z – Resistência ao cisalhamento das fibras;

$\tau_R(z)$ – Resistência de atrito (efeito clamp);

Z – Tensão de tração;

α – Ângulo entre a superfície das fibras e a superfície de cisalhamento;

aζ – Fator de transmissão que descreve a quantidade máxima de fibras mobilizadas variando entre 0,65 a 0,95 para ângulos de atrito (ϕ) entre 15 e 35º.

Sendo σ_v, a tensão normal, perpendicular à direção principal das fibras e ζ, o ângulo de tensão à tração, tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$Z = \sigma v \cdot \tan\zeta \qquad \text{para } [\sigma v < \sigma cri] \quad (8)$$

$$Z = Z\max \qquad \text{para } [\sigma v > \sigma cri] \quad (9)$$

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

$$\tau_f = \sigma \cdot \tan\phi_{MB} + Z \cdot a_{\zeta}$$

Assim, as Equações 10 e 11 descrevem a resistência ao cisalhamento dos RSU com inclusão do efeito reforço das fibras.

$$\tau f = \sigma \cdot \tan\phi + \sigma v \cdot \tan\zeta \cdot a\zeta \qquad \text{para } [\sigma v < \sigma cri] \quad (10)$$

$$\tau f = \sigma \cdot \tan\phi + Z\max \cdot a\zeta \qquad \text{para } [\sigma v > \sigma cri] \quad (11)$$

A Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA-EMPFEHLUNGEN E2-29 (DGGT, 1998) apresenta um quadro resumo com exemplos de valores das propriedades de tração da resistência ao cisalhamento (Tabela 50). No entanto, existe uma ressalva. Apesar desses valores terem sido obtidos de ensaios em amostras reais, é necessária a determinação experimental em cada caso, pois a

massa de resíduos varia muito em sua composição e em outras propriedades físico-químicas.

Tabela 50 - Resumo dos parâmetros de tração da resistência ao cisalhamento para amostras de resíduos sólidos.

PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA	AMOSTRA DE RSU NOVO	AMOSTRA DE RSU ESTABILIZADO
$Z_{MÁX}$ (kN/m²)	220	115
ζ (º)	35	14
σ_{cri} (kN/m²)	284	380

Fonte: A Autora (2019).

Borgatto (2010) realizou ensaios de resistência à tração na caixa desenvolvida por Kölsch (1996) para amostras com resíduos frescos com tratamento mecânico e resíduos estabilizados por tratamento mecânico biológico para composições originais, com adição de 5% de fibras e excluindo o grupo de substância plástico filme (Tabela 51).

Fucale (2005), por meio de correlações experimentais, obteve valores de ângulo de tração ζ =13º para amostras de resíduos pré-tratados mecânica e biologicamente e a matriz reforço, que representa 20% do material (em termos de peso seco) e ζ = 19º para a mesma amostra, porém a matriz reforço representa 10% do material (em termos de peso seco).

O ângulo de tração (ζ), como explicado em Fucale (2005), é determinado a partir das envoltórias de resistência ao cisalhamento, utilizando o critério de Mohr-Coulomb. A matriz básica, assim como as matrizes compostas reforçadas com diferentes teores de fibras, tendo em vista que as envoltórias se apresentam quase que paralelas entre si, correspondem a resíduos sólidos de comportamento anisotrópico.

Tabela 51 - Resumo dos parâmetros de tração das amostras de resíduos sólidos ensaiadas.

AMOSTRAS	$Z_{MÁX}$ (kN/m²)	ζ (º)
Resíduo fresco pós-tratamento mecânico (TM), composição original	115,7	20,4

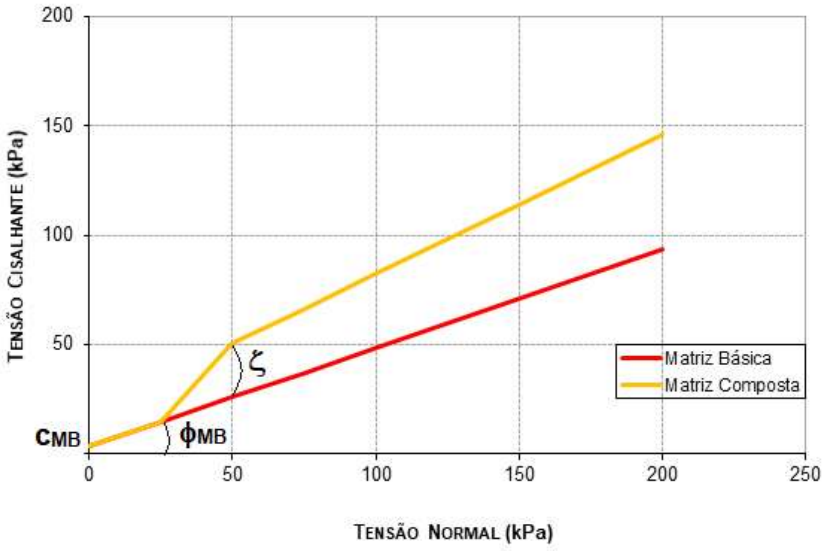
Resíduo fresco pós-tratamento mecânico (TM), composição original com adição de 5% de fibras	138,6	23,5
Resíduo fresco pós-tratamento mecânico (TM), composição alterada (sem o grupo de substância plástico filme)	38,7	6,2
Resíduo estabilizado TMB, composição original	106,3	17,8
Resíduo estabilizado TMB, composição original com adição de 5% de fibras	118,2	19,5
Resíduo estabilizado TMB, composição alterada (sem o grupo de substância plástico filme)	38,8	5,5

Fonte: Borgatto (2010).

A Figura 71 diz que até uma tensão normal σ_1, devido à falta de mobilização das fibras, a tensão cisalhante se deve essencialmente as forças friccionais (atrito), logo resulta das forças da parte granular da matriz composta, em outras palavras, da matriz básica. Consequentemente, as equações das envoltórias de resistência das matrizes compostas foram alteradas, inicialmente, até σ_1, pois serão regidas exclusivamente pela equação da envoltória da matriz básica, que nos fornecerá o ângulo de atrito (ϕ_{MB}) e a coesão (c_{MB}). O ângulo formado entre a envoltória da matriz básica com a envoltória da matriz composta será o ângulo de tração (ζ), como ilustrado na Figura 73. Nesta figura fica evidente o efeito bi-linear descrito por Kölsch (1996).

Quanto ao fator de transmissão (a_ζ), este varia de acordo com o ângulo de atrito como explicado na Equação 7 onde $a_\zeta = \sin\alpha \cdot (\cos\alpha + \text{sen}\alpha \cdot \tan\phi)$ e varia entre 0,65 e 0,95 para ângulo de atrito entre 15 e 35º. A determinação desse parâmetro foi realizada por interpolação linear entre os limites descritos acima, utilizando os ângulos de atrito obtidos nos ensaios de cisalhamento direto convencional apresentados no Capítulo 4.

Figura 73 - Método utilizado para o cálculo do ângulo de tração através do trabalho desenvolvido por Kölsch (1996) e expandido por Fucale (2005).



Fonte: Fucale (2005).

Apesar de Fucale (2005) ter sido relutante na obtenção desse parâmetro através do ensaio cisalhante, a coesão devida à tração (Z) pode ser estimada através de cálculos para o equipamento de tração desenvolvido por Kölsch (1996) e expressos nas Equações 12, 13 e 14 adaptadas das Equação 8 e 9.

$$Z = \sigma z \cdot \tan\zeta \qquad \text{para } [\sigma v < \sigma cri\,] \tag{12}$$

$$Z = Zmax \qquad \text{para } [\sigma v > \sigma cri\,] \tag{13}$$

$$\sigma z = \gamma \cdot h \tag{14}$$

Onde:

Z – Coesão de tração;

σz – Tensão vertical devido ao peso próprio de aterro;

ζ – Ângulo de tração determinado através das envoltórias determinado no ensaio de resistência ao cisalhamento direto;

$Zmáx$ – Tensão de tração máxima;

γ – Peso específico do aterro;

h – Altura total do aterro;

σv – Tensão normal aplicado no ensaio de resistência ao cisalhamento direto;

$\sigma crit$ – Tensão normal crítica/ruptura do ensaio de resistência ao cisalhamento direto.

A Tabela 52 apresenta os ensaios de resistência ao cisalhamento utilizados neste capítulo para determinar os parâmetros de tração das fibras.

Como a determinação da coesão de tração depende da tensão vertical devido ao peso próprio do aterro, logo, de sua altura total, para os cinco diferentes tipos de amostras citados na Tabela 52, foram analisados dois casos: o primeiro leva em consideração aterros de médio porte, pois grande parte dos projetos e aterros sanitários de pequenos municípios, apesar de às vezes as municipalidades trabalharem em consórcio, são aterros de médio porte, seja por problemas de área, volume de resíduos diários ou financeiros. O segundo caso trata de aterros de grande porte, onde o volume de resíduos diário é elevado, buscando otimizar ao máximo a área disponível.

Tabela 52 - Resumo dos tipos e percentuais de fibras nas amostras ensaiadas para determinação dos parâmetros de tração.

Amostras	Composições
1. Material Misto < 8 mm	100% M.M. < 8 mm
2. Material Misto < 8 mm + Madeira	97,56% M.M. < 8 mm + 2,44% Madeira
3. Material Misto < 8 mm + Plástico	90,27% M.M. < 8 mm + 9,73% Plástico
4. Material Misto < 8 mm + Têxtil	98,63% M.M. < 8 mm + 1,37% Têxtil
5. Material Misto < 8 mm + Madeira + Plástico + Têxtil	86,46% M.M. < 8 mm + 2,44% Madeira + 9,73% Plástico + 1,37% Têxtil

Fonte: A Autora (2019).

Os gráficos da Figura 74 apresentam as envoltórias de resistência modificando as das amostras reforçadas para obtenção do ângulo de tração, como explicado anteriormente.

A partir da envoltória de resistência do material sem reforço, matriz básica, representado em todos os gráficos da Figura 74, obtêm-se os parâmetros de coesão (c_{MB}) e ângulo de atrito (ϕ_{MB}) do material granular através do modelo de Mohr-Coulomb, pois esta é linear.

As envoltórias das matrizes compostas são regidas pelo material granular (matriz básica) até uma tensão normal σ_1 = 25 kPa. A partir desta tensão, as fibras

começam a ser mobilizadas, resultando num aumento da resistência do material, sendo expressa pelo aumento da inclinação das envoltórias como apresentado em todos os casos da Figura 74. Desta forma, a diferença entre a envoltória da matriz básica e a matriz composta é o ângulo de tração. Portanto, os valores encontrados para os ângulos de tração são $\zeta_{1,37\%\ Têxtil} = 0,34º$, $\zeta_{2,44\%\ Madeira} = 0,87º$, $\zeta_{9,73\%\ Plástico} = 3,02º$ e $\zeta_{13,54\%\ Fibras} = 14, 87º$.

A recomendação alemã, de acordo com a Tabela 50, apresenta para resíduos estabilizados ângulo de tração de 14º, enquanto Fucale (2005) obteve valores de $\zeta = 13º$ para resíduos com 20% de fibras e $\zeta = 19º$ para resíduos com 10% de fibras. Borgatto (2010), como apresentado na Tabela 51, atingiu valores para as matrizes com a composição original (aproximadamente 14% de fibras), $\zeta = 17,8º$ e adicionada de 5% de fibras, $\zeta = 19,5º$. Já para a amostra alterada sem o grupo de substância plástico filme (em torno de 7% de fibras), o ângulo de tração encontrado foi de $\zeta = 5,5º$.

Assim, o valor encontrado nesta pesquisa para a amostra da matriz composta reforçada com as percentagens das fibras determinadas pela composição gravimétrica se encontra alinhado aos valores encontrados na literatura. Se comparado exclusivamente com os valores obtidos por Borgatto (2010), o valor se encontra ligeiramente abaixo. Esta redução pode ser explicada pela diferença da composição dos resíduos em questão, pela existência de um tratamento mecânico biológico e pela diferente forma de obtenção do parâmetro.

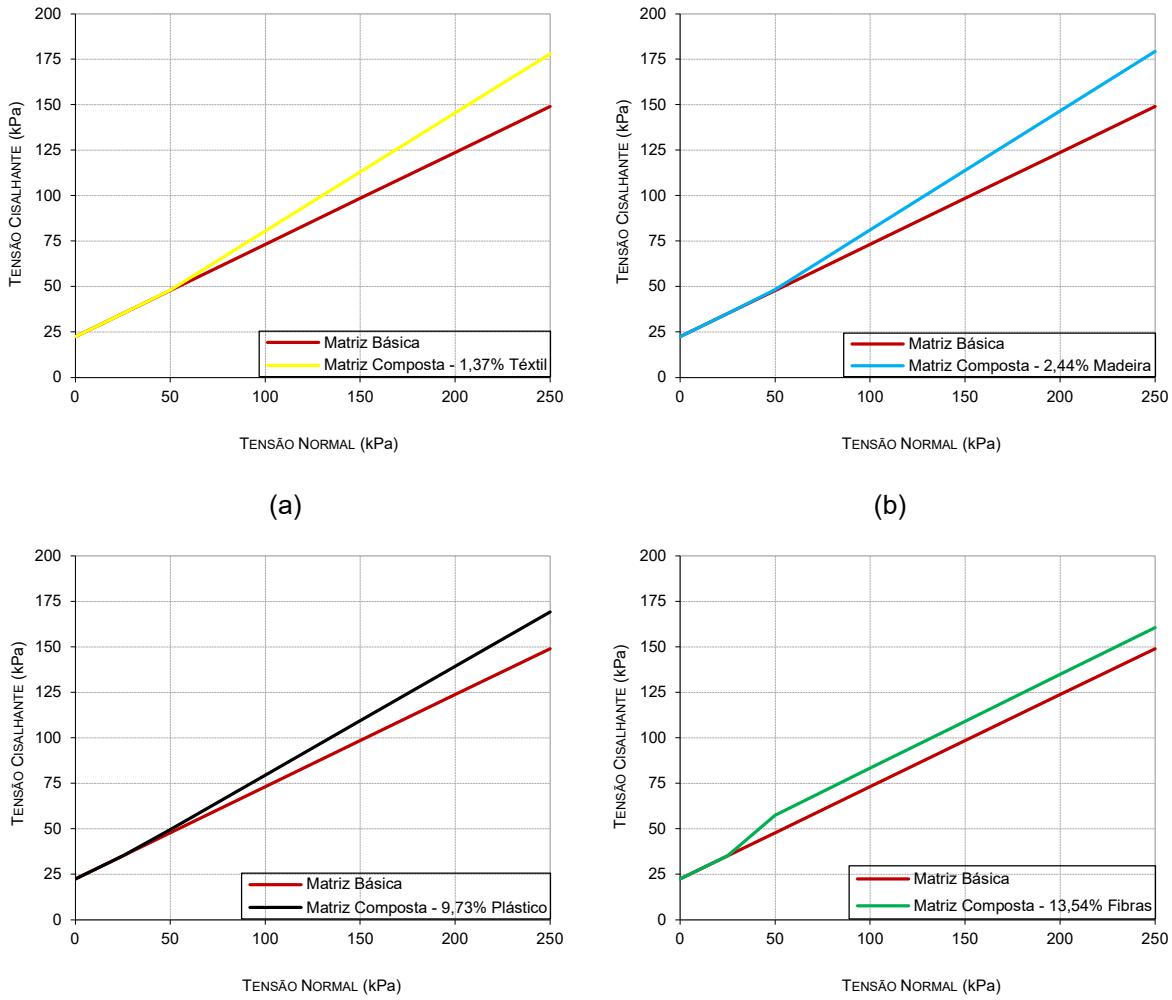
Quando comparamos as demais amostras, tem-se apenas o resultado encontrado por Borgatto (2010). Este valor, assim como o da matriz composta reforçada com as percentagens das fibras determinadas pela composição gravimétrica, apresenta-se ligeiramente elevado quando comparado ao da matriz composta reforçada com 9,73% de plástico, $\zeta = 3,02º$. Já os baixos valores encontrados para as matrizes reforçadas com madeira e tecido são explicados pelo baixo teor dessas fibras.

Os parâmetros de tração estão compilados na Tabela 53. O fator de transmissão será semelhante em todos os casos, pois ele depende do ângulo de atrito. E como o ângulo de atrito, como já explicado, é o da matriz básica $\phi_{MB} = 26,8º$ para todos os casos, e, por interpolação, encontra-se o fator de transmissão $a_\zeta = 0,83$.

A coesão de tração, $Z_{máx}$, de acordo com as Equações 10 e 12, depende da altura total do aterro e do seu peso específico. No capítulo 4 foi explicado que o peso específico adotado para os ensaios de resistência ao cisalhamento direto convencional, simulando um aterro para a idade de resíduos encontrados, é γ_{aterro} = 11,3 kN/m^3. A altura do aterro foi determinada através de uma geometria usual em projetos no Brasil para aterros de médio e grande porte, sendo as alturas $h_{aterro_médio1}$ = 30 m, $h_{aterro_médio2}$ = 40 m e $h_{aterro_grande1}$ = 60 m, $h_{aterro_grande2}$ = 70 m, respectivamente.

Para a matriz composta reforçada com 13, 54% de fibras as coesões de tração encontradas para aterros de médio porte foi de $Z_{máx1}$ = 90,01 kN/m^2 e de $Z_{máx2}$ = 120,02 kN/m^2, e de grande porte foi de $Z_{máx1}$ = 180,03 kN/m^2 e $Z_{máx2}$ = 210,03 kN/m^2, respectivamente. O valor da Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA-EMPFEHLUNGEN E2-29 (DGGT, 1998), $Z_{máx}$ = 115,00 kN/m^2 para resíduos estabilizados, encontra-se entre os valores encontrados. Enquanto a matriz composta reforçada com 9,73% de plástico obteve $Z_{máx1}$ = 35,72 kN/m^2 e de $Z_{máx1}$ = 41,67 kN/m^2 para aterros de grande porte, valor próximo ao encontrado por Borgatto (2010) para Resíduo estabilizado TMB, composição alterada (sem o grupo de substância plástico filme), $Z_{máx}$ = 38,80 kN/m^2. Porém, é importante notar que a norma GDA-EMPFEHLUNGEN E2-29 (DGGT, 1998) deixa clara a necessidade de analisar cada caso individualmente, pois existem diversos fatores que podem alterar este parâmetro. Portanto, os valores encontrados nesta pesquisa são consistentes com os da literatura aqui apresentados nas Tabelas 50 e 51.

Figura 74 - Envoltórias de resistência das amostras dos resíduos sólidos estabilizados, levando-se em consideração o efeito das fibras, segundo modelo de Kölsch (1996) para resíduos sólidos urbanos – (a) matriz composta reforçada com 1,37% têxtil, (b) matriz composta reforçada com 2,44% madeira, (c) matriz composta reforçada com 9,73% plástico e (d) matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico.



Fonte: A Autora (2019).

Tabela 53 - Resumo dos parâmetros de tração para as diferentes amostras ensaiadas.

Amostras	ζ(º)	$a_ζ$	$Z_{MÁX}$ (kN/m²) Aterro Médio Porte		$Z_{MÁX}$ (kN/m²) Aterro Grande Porte	
			30 m	40 m	60 m	70 m
1. Matriz Composta reforçada com 1,37% Têxtil	0,34	0,83	2,01	2,68	4,02	4,70
2. Matriz Composta reforçada com 2,44% Madeira	0,87	0,84	5,14	6,86	10,28	12,00
3. Matriz Composta reforçada com 9,73% Plástico	3,02	0,87	23,36	31,14	35,72	41,67
4. Matriz Composta reforçada com 1,37% Têxtil + 2,44% Madeira + 9,73% Plástico	14,87	0,95	90,01	120,02	180,03	210,03

Fonte: A Autora (2019).

6 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A análise de estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos se baseia, em sua maioria, em métodos usuais da Mecânica dos Solos, levando em conta diversos problemas devido às diferenças entre as propriedades dos solos e dos resíduos sólidos. Os resíduos, como já mencionado em capítulos anteriores, possuem uma composição muito heterogênea, anisotrópica, e sujeita a mudança de sua composição inicial e de suas propriedades físico-química-biológicas ao longo do tempo, em razão da biodegradação da matéria orgânica e dos desgastes dos materiais fibrosos. Apesar disso, a análise de estabilidade de taludes dos resíduos a partir de modelos e métodos estabelecidos para solos continua sendo muito utilizada, porém, como Motta (2011) relata, é necessário cautela, pois valores muito baixos de fatores de segurança encontrados nas análises são considerados contraditórios diante de condições de estabilidade encontradas em campo. Portanto, o conhecimento sobre a mecânica dos resíduos é essencial para uma análise de estabilidade consistente.

Nos últimos anos, incidentes graves de colapso ocorreram frequentemente em locais de disposição final de resíduos sólidos em áreas urbanas de países em desenvolvimento. Muitos desses incidentes ocorreram em lixões abertos, lixões insuficientemente controlados, onde os resíduos sólidos se acumulam cada vez mais em terrenos limitados e o colapso repentino é precipitado pelas chuvas, sobretudo em aterros sanitários com problemas de projetos e/ou monitoramento. Esses incidentes, além de gerar gravíssimos inconvenientes no entorno, também ocasionaram perda de vidas humanas, principalmente nos países em desenvolvimento. Em casos de colapsos de lixões urbanos, os seguintes fatores foram associados: urbanização rápida e expansão urbana descontrolada, aumento rápido do volume de resíduos sólidos, com aumento de diferenças sociais e econômicas acentuadas na população urbana, formação de grupos informais de catadores, tecnologia inadequada para o gerenciamento de locais de descarte e dificuldade de conseguir consenso para a localização de aterros sanitários. Verifica-se nos colapsos ocorridos em aterros sanitários, além de alguns fatores já citados, que o principal fator associado é o excesso de poro-pressão devido aos gases produzidos na biodegradação da matéria orgânica associados ou não ao lixiviado, também produzido no processo de biodegradação. Esse excesso pode estar relacionado à deficiência do projeto ou de

monitoramento e manutenção do aterro. Outro fator importante é a determinação da geometria do aterro. Esses fatores formam uma cadeia complexa de problemas e estão inter-relacionados.

Estudos realizados pela ISWA (2016) registraram, entre dezembro de 2015 a junho de 2016, apenas sete meses, mais de 750 mortes relacionadas ao mau gerenciamento de resíduos em aterros de resíduos sólidos, em sua grande maioria lixões, e vários incidentes com importantes impactos à saúde. Alguns incidentes de instabilidade de aterros desde 2000 estão exemplificados na Tabela 54.

Tabela 54 - Lista de incidentes relatados de colapso de aterros de resíduos sólidos nos países em desenvolvimento desde 2000.

ANO	MÊS	ÁREA, PAÍS	NOME DO ATERRO/LIXÃO	NÚMERO DE MORTES	REFERÊNCIA
2000	Julho	Grande Manila, Filipinas	Payatas	200 <	**(Kölsch, 2007)**
2005	Fevereiro	Cidade de Bandung, Indonésia	Leuwigajah	143	(Kölsch et al., 2005)
2011	Abril	Itaquaquecetuba, Brasil	Pajoan	0	(G1, 2011); (CESTEB, 2011)
2015	Dezembro	Shenzhen, China	Hongao	77	(XU et al., 2017)
2016	Abril	Cidade da Guatemala, Guatemala	Guatemala	24	(REUTERS, 2016)
2017	Março	Addis Ababa, Etiópia	Qoshe	113	(WHO, 2017)
2017	Abril	Região Metropolitana de Colombo, Sri Lanka	Meethotamulla	29 (30 desaparecidos)	(JICA, 2017)
2017	Setembro	Região Metropolitana de Delhi, Índia	Ghazipur	2	(Hindustan Time, 2017)
2018	Fevereiro	Cidade de Maputo, Moçambique	Hulene	16	(Made for Minds, 2018); (Online Noticias, 2018)
2018	Dezembro	Guarulhos, Brasil	Guarulhos	0	(G1, 2018)

Fonte: Adaptada de YOSHIDA (2018).

6.1 MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANO (KÖLSCH, 1996)

Os cálculos aplicados à geotecnia de resíduos sólidos são baseados na teoria clássica de equilíbrio limite do talude, utilizando o método de fatias nas análises de estabilidade, adotando-se parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito interno para os RSU, obtidos principalmente através de bibliografias internacionais, ensaios “in situ”, retroanálises de escorregamento e ensaios de laboratório.

Fucale (2005) descreve que a comunidade científica alemã desenvolveu um procedimento para cálculo da estabilidade de talude de resíduos sólidos em que

considera o efeito de reforço gerado por forças de tração nos componentes fibrosos dos resíduos. A mobilização de forças de tração depende da tensão normal nas fibras. A tensão de tração e a tensão normal estão relacionadas por uma função linear, que é matematicamente descrita pelo ângulo interno da tensão de tração ζ (Figura 75). A componente da resistência ao cisalhamento criada pelas forças de tração é chamada de coesão fibrosa (coesão de tração). A coesão fibrosa é calculada a partir do ângulo interno da tensão de tração ζ, da tensão normal σ, de um fator de transmissão a_ζ e em função da anisotropia (direção entre as fibras e o plano de cisalhamento).

O princípio do cálculo de estabilidade de talude de RSU de Kölsch (1996) considera as Equações 10 e 11, expressas no capítulo anterior, e utiliza o método de Bishop, para as análises da estabilidade de talude de aterros sanitários, que efetua a divisão da cunha de escorregamento em diversas fatias. Porém, para levar em consideração o parâmetro da coesão fibrosa ($Z_{máx}$) nos cálculos computacionais, os métodos clássicos de cálculo de estabilidade de talude precisam ser modificados. O critério de ruptura baseado na fórmula de Bishop para o cálculo da força na fatia terá, neste caso, a adição de mais um termo, que corresponde à coesão das fibras ($Z_{máx}$). Nestes cálculos, a anisotropia das forças decorrente das fibras é dependente do ângulo α (entre a direção das fibras e o plano de ruptura), o qual descreve a inclinação da fatia (lamela). Deste termo adicional, que é obtido pelo uso das relações entre tensão à tração e carga normal em ensaios de tração, resulta a força de cisalhamento na fatia (T), conforme a Equação 15.

$$T = \frac{G \cdot \tan \phi_{MB} + c_{MB} \cdot b + G \cdot \tan \zeta \cdot a_\zeta \cdot \sin 1{,}5\alpha}{{}^{1}/_{FS} \cdot \sin \alpha \cdot \tan \phi_{MB} + \cos \alpha} \quad (15)$$

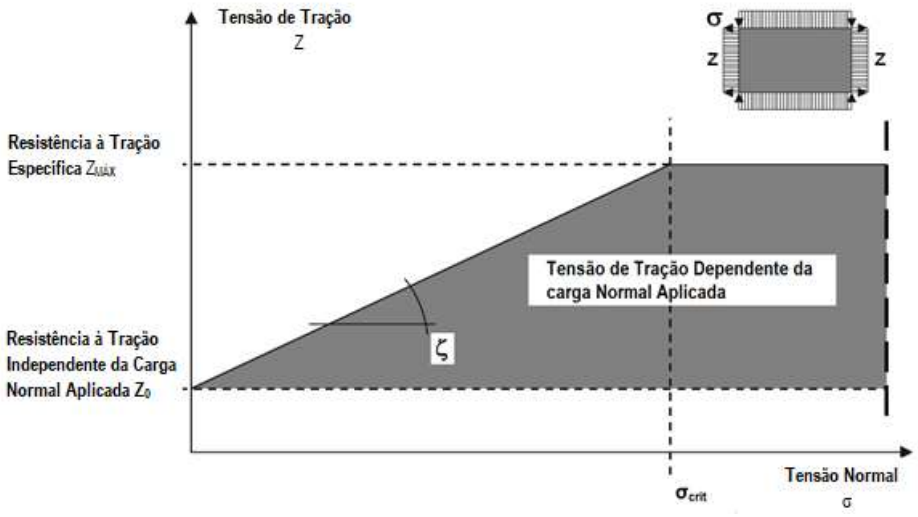
Onde:

G – Massa efetiva do elemento (kN);
ζ – Ângulo de tensão de tração;
c_{MB} – Coesão da matriz básica (kN/m^2);
ϕ_{MB} – Ângulo de atrito da matriz básica;
α – Ângulo da superfície de ruptura com a direção das fibras;
b – Espessura da fatia (m);

FS – Fator de segurança;

a_ζ – Fator de transmissão.

Figura 75 - Descrição das tensões de tração possíveis na matriz fibrosa.



Fonte: DGGT (1998).

Kölsch (1996) apud Fucale (2005), conduziu análises de estabilidade e retro-análises de diferentes ensaios de campo documentados na literatura, utilizando o método modificado de cálculo de estabilidade de talude. Para aterros de resíduos novos, os parâmetros encontrados foram: ϕ_{MB} = 15°, c_{MB} = 15 kN/m^2, ζ = 35°, $Z_{máx}$ = 225 kN/m^2, γ = 9,5 kN/m^3, com uma altura de até 100 m e inclinação de até 90°, sob condições normais (nenhuma infiltração de água, nenhuma pressão devido a esta água) não sofreriam colapso. Este resultado coincide com muitas condições de estabilidade encontradas em campo. Geralmente, as análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU reportadas na literatura subestimam o fator de segurança, porém, este novo método leva em consideração as propriedades dos reforços dos resíduos, obtendo valores da resistência ao cisalhamento mais realistas, que resultam em fatores de segurança mais elevados nas análises de estabilidade dos taludes de aterros de resíduos sólidos urbanos.

Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA – EMPEFEHLUNGEN E 2-35 (DGGT, 2000) se refere aos parâmetros geotécnicos para resíduos sólidos. Nesta norma consta uma tabela que inclui valores validados cientificamente para algumas propriedades físicas dos resíduos (Tabela 55).

Tabela 55 - Valores de cálculo geotécnico para resíduos sólidos urbanos.

		Resíduos Não Tratados	Resíduos Tratados Mecânico-Biológico
Dimensão		Dim. 1;2(1) [E 1-7] 30% > em peso	Dim. 1;2(1) [E 1-7] 20% < em peso
Peso específico seco γ_{seco} (t/m^3)		0,2 - 0,5	0,2 - 0,7
		0,5 -1,0	0,8 - 1,5
Resistência para resíduos depositados em condição anisotropia (2) [E 2-29]		20° - 35°	10° - 14°
		30° - 35°	
		10° - 15°	
Resistência para resíduos depositados em condição isotrópica (3) [E 2-23]	$\phi\varepsilon_1$ (°)	ε_1 = 0%:	$\phi\varepsilon_1$ = 0
		ε_1 = 10%:	$\phi\varepsilon_1$ = 20° - 35°
		ε_1 = 20%:	$\phi\varepsilon_1$ = 22° - 35°
	$c\varepsilon_1$ (kN/m^2)	ε_1 = 0%:	$c\varepsilon_1$ = 0
		ε_1 = 10%:	$c\varepsilon_1$ = 20° - 35°
		ε_1 = 20%:	$c\varepsilon_1$ = 22° - 35°
Módulo de Rigidez [E 2-24]	E_s (kN/m^2) a e σ (kN/m^2)	$E_s = a + b*\sigma$ a: -100 até -300 b: 10 até 13	
Coeficiente de Permeabilidade	k_f (m/s)	10^{-3} até 10^{-6}	10^{-6} até 10^{-9}

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

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

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

Fonte: DGGT (2000).

6.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANO SIMULADO

Com o objetivo de avaliar os efeitos das fibras presentes nos resíduos sólidos urbanos como componentes de reforço, foram realizadas análises de estabilidade de talude de aterro de RSU simulado. Apesar de existir vários softwares especializados na modelagem de análise de estabilidade, optou-se pelo o GGU Stability, pois este permite a incorporação dos efeitos de tração das fibras em suas análises. Os dados de entrada foram geometria comumente aplicada em projetos de aterros sanitários no Brasil, os parâmetros e resistência obtidos nesta pesquisa para resíduos estabilizados.

A estabilidade de talude é uma das principais verificações para novos projetos de aterro de resíduos sólidos urbanos, pois a partir dela pode-se realizar de forma mais precisa um bom dimensionamento do sistema de drenagem, geometria, camada

de cobertura, entre outros, a fim de proporcionar um nível de risco mínimo para o entorno do aterro (MOTTA, 2011).

6.2.1 Metodologia

A metodologia para a análise de estabilidade de talude de resíduos sólidos urbanos baseada no método de equilíbrio limite de Kölsch (1996) foi dividida em três partes: software, geometria e casos considerados nas análises de estabilidade.

6.2.1.1 Software

O software GGU Stabiity utiliza como base a norma alemã DIN 4084:2009, que descreve os cálculos para análise de estabilidade de um talude. O programa é baseado em dois métodos de cálculo: Bishop, para superfícies de ruptura circulares, e Janbu, para superfícies de ruptura poligonais (não circulares). Optou-se pelo método de Bishop, o qual tem como hipótese que a resultante das forças entre as fatias é horizontal e que a reação normal na base é determinada através do equilíbrio das forças segundo a direção vertical, utilizando a teoria de equilíbrio limite para calcular o fator de segurança (FS), baseado na Equação 16:

$$\eta = \frac{r \cdot \sum T_i + \sum M_s}{r \cdot \sum G_i \cdot \sin \vartheta_i + \sum M} \tag{16}$$

Com:

$$T_i = \frac{G_i - (u_i - \Delta u_i) \cdot \tan \varphi + c_i \cdot b_i}{\cos \vartheta_i + \frac{1}{\eta} \tan \varphi_i \cdot \sin \vartheta_i} \tag{17}$$

Onde:

η – Fator de segurança do terreno ou ruptura do talude;

G_i – Peso próprio de uma fatia individual em kN/m, considerando as estimativas de peso unitário, incluindo sobrecargas;

M – Momentos das cargas e forças não incluídas em G_i, em torno do ponto central da superfície circular de deslizamento em kNm/m;

M_s – Momentos em torno do ponto central da superfície circular de deslizamento em kNm/m, que não são consideradas em T_i;

T_i – Força tangencial de resistência do solo na superfície de escorregamento para cada fatia em kN/m

ϑ_i – Ângulo tangencial da fatia à horizontal em graus;

r – Raio da superfície circular de deslizamento em m;
b_i – Largura da fatia em m;
φ_i – Ângulo de atrito em graus;
c_i – Coesão em kN/m²;
u_i – Poro-Pressão em kN/m²;
Δu_i – Poro-Pressão para a fatia em kN/m²;

Os parâmetros geotécnicos necessários para análise de estabilidade de taludes de resíduos sólidos urbanos considerando o efeito das fibras foram o ângulo de atrito interno, a coesão e o peso específico, além dos parâmetros de tração das fibras que são: o fator de transmissão das fibras, o ângulo de tração e a coesão devido à tração. Desta forma, utiliza-se a Equação 15 do método de Kölsch (1996).

6.2.1.2 Geometria

As geometrias escolhidas para as análises de estabilidade estão de acordo com as geometrias usualmente utilizadas em projetos de aterros sanitários no Brasil. É recomendado que os taludes finais dos aterros apresentem uma inclinação de 1:3 (v:h), devendo ser previstas bermas a cada 2,0 a 6,0 m de elevação do aterro e altura das células de resíduos até 6,0 metros. Todavia, com o intuito de otimizar os aterros aumentando sua vida útil, verificou-se em exemplos práticos pelo mundo que, dependendo da altura final do aterro, poderia apresentar inclinações 1:2,5 ou até mesmo 1:2. Quanto à altura final dos aterros, recomenda-se que aterros de médio porte atinjam uma altura máxima de 40 m. Já em um aterro de grande porte a altura inicial é de 50 m, não tendo uma altura máxima definida. As geometrias estipuladas estão apresentadas na Tabela 56.

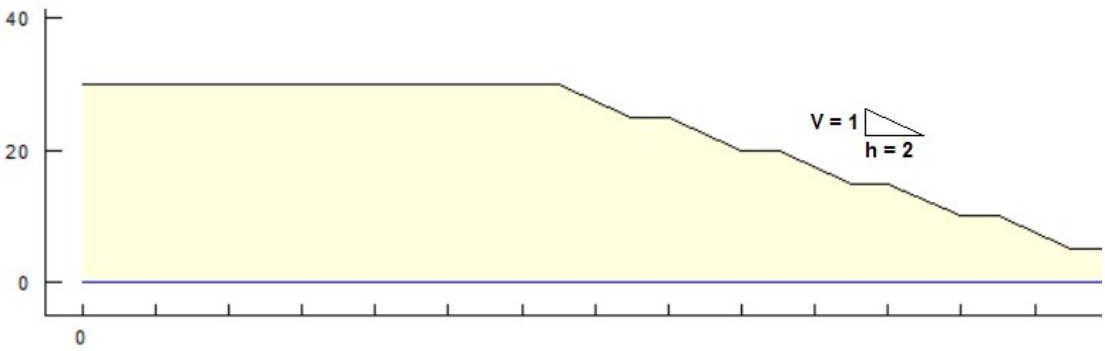
Tabela 56 - Valores adotados para a geometria dos perfis dos aterros de resíduos sólidos urbanos.

Dados	Médio Porte 1	Médio Porte 2	Grande Porte 1	Grande Porte 2	Grande Porte 3	Grande Porte 4
Comprimento das bermas (m)	5	5	5	5	5	5
Camadas das células (m)	5	5	5	5	5	5
Inclinação do talude (h:v)	2:1	2:1	2,5:1	2:1	2,5:1	2:1
Altura total do talude (m)	30	40	60	60	70	70

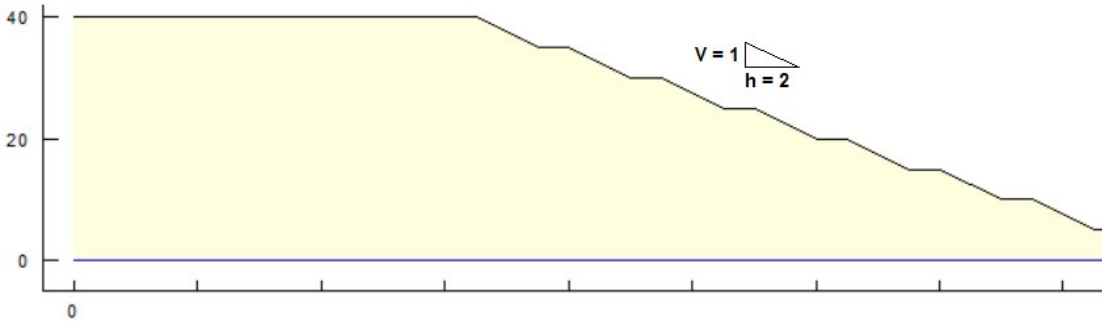
Fonte: A Autora (2019).

A Figura 76 apresenta os perfis adotados para as análises de estabilidade dos aterros de RSU.

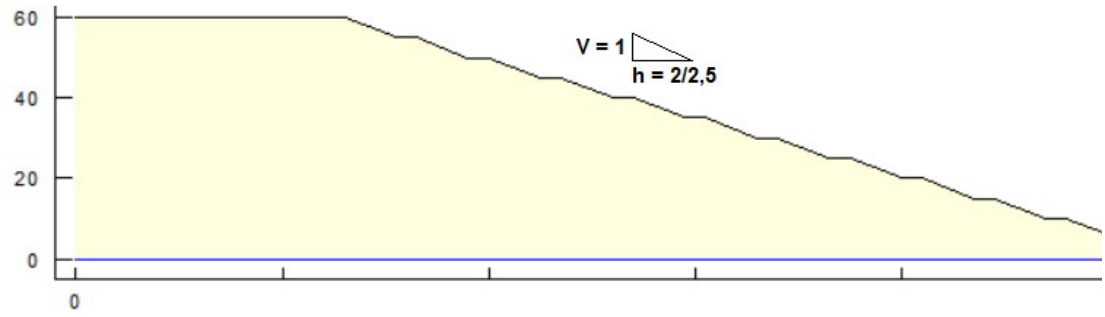
Figura 76 - Perfis dos taludes de RSU utilizados nas análises de estabilidade – (a) Médio Porte 1; (b) Médio Porte 2; (c) Grande Porte 1 e 2 e (d) Grande Porte 3 e 4.



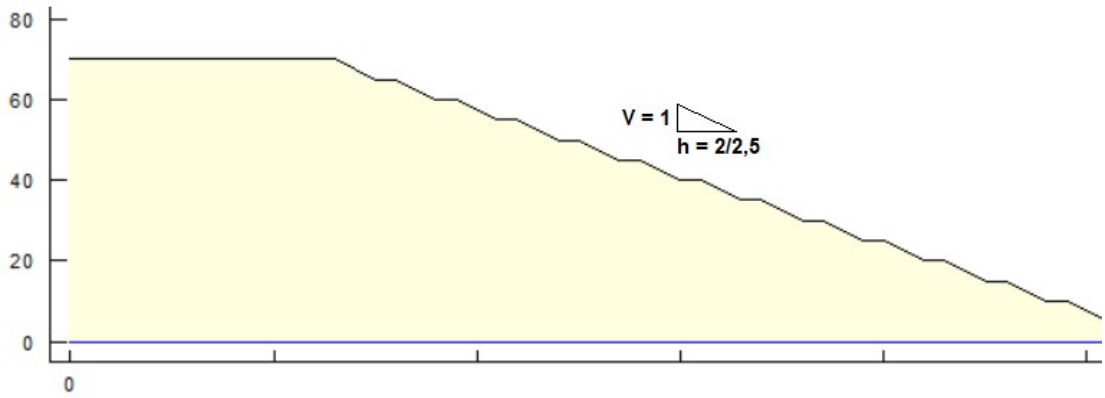
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: A Autora (2019).

6.2.1.3 Casos Considerados nas Análises de Estabilidade

Na análise de estabilidade dos taludes de Aterro Sanitário simulado foram considerados diferentes tipos de situações possíveis de ocorrer quanto ao nível piezométrico do aterro. Os casos considerados neste estudo foram dois: aterros de médio e grande porte, variando a inclinação e altura, descritos acima na geometria, Tabela 56. Para cada caso foram admitidos diferentes cenários nas análises do cálculo de estabilidade, que estão apresentados na Tabela 57.

Tabela 57 - Cenários descritos para as análises de estabilidade de aterros de RSU.

CENÁRIOS	DESCRIÇÃO
1.1	Nível piezométrico 0; Altura total de resíduo estabilizado
1.2	Nível piezométrico 1/3 da altura total do aterro; Altura total de resíduo estabilizado
1.3	Nível piezométrico 2/3 da altura total do aterro; Altura total de resíduo estabilizado

Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 58 apresenta os parâmetros e resistência obtidos nesta pesquisa para resíduos sólidos estabilizados, ângulo de atrito interno da matriz básica, coesão da matriz básica, peso específico, e os parâmetros de tração obtidos no Capítulo 5, através do ensaio de resistência ao cisalhamento direto convencional da amostra da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico (ângulo de tração, fator de transmissão e coesão de tração), utilizados para a análise da estabilidade de taludes dos RSU considerando o efeito das fibras segundo o método de equilíbrio limite dos resíduos sólidos urbano (Kölsch, 1996).

O peso específico foi considerado bem compactado, conforme dados citados na literatura e apresentados na Tabela 10 e dados utilizados em projetos.

Para efeito comparativo, foram realizadas análises com os parâmetros da matriz básica (Tabela 59) e os parâmetros obtidos no ensaio de resistência ao cisalhamento direto convencional da amostra da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico (Tabela 60), sem considerar e considerando o efeito das fibras através do método de equilíbrio limite dos resíduos sólidos urbano (Kölsch, 1996).

Tabela 58 - Parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU considerando o efeito das fibras.

PARÂMETROS	**RSU ESTABILIZADO**			
ϕ_{MB} (º)	26,8			
c_{MB} (kN/m²)	22,5			
γ (kN/m³)	11,3			
ζ (º)	14,9			
a_ζ	0,83			
$Z_{Máx}$ (kN/m²)	90,01[1]	120,02[2]	180,03[3]	210,03[4]

Fonte: A Autora (2019).

(1) Aterro de médio porte - 30 m; (2) Aterro de médio porte - 40 m; (3) Aterro de grande porte - 60 m; (4) Aterro de grande porte -70 m

Tabela 59 - Parâmetros geotécnicos da matriz básica utilizados nas análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU sem considerar o efeito das fibras.

PARÂMETROS	**RSU ESTABILZADO**
ϕ (º)	26,8

c (kN/m²)	22,5
γ (kN/m³)	11,3

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 60 - Parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico utilizados nas análises de estabilidade de taludes de aterros de RSU sem considerar o efeito das fibras.

PARÂMETROS	**RSU ESTABILIZADO**
ϕ (º)	27,3
c (kN/m²)	31,6
γ (kN/m³)	11,3

Fonte: A Autora (2019).

6.3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para realizar uma melhor comparação das análises de estabilidade com e sem o efeito das fibras, foram analisadas três situações:

a) Sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz básica;
b) Sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico e
c) Considerando o efeito das fibras de acordo com o método de Kölsch (1996).

Na literatura quando ocorre a comparação das análises de estabilidade com e sem o efeito das fibras, normalmente os autores utilizam os parâmetros geotécnicos de ângulo de tração (ϕ) e coesão (c) iguais para os dois casos, adotando os obtidos no ensaio de resistência ao cisalhamento direto da matriz composta reforçada. No entanto, Kölsch (1996), a Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA – EMPEFEHLUNGEN E 2-29, *Standsicherheitsnachweis für Deponiekörper mit anisotropen Festigkeite*n (DGGT, 1998), Fucale (2005) e o manual do usuário do GGU Stability – Slope stability analysis and analysis of soil nailing and reinforced earth walls to DIN 4084 and EC 7, versão 13 deixam claro que o método de cálculo de estabilidade considerando o efeito das fibras utiliza o ângulo de atrito (ϕ_{MB}) e a coesão (c_{MB}) da

matriz básica, como apresentado na Equação 15. Por este motivo, realizou-se a comparação para as três situações citadas acima.

6.3.1 Caso 1 - Aterro de Médio Porte

No Caso 1 foram analisadas duas geometrias distintas, como ilustradas na Figura 76 (a) e (b) e Tabela 56 e os parâmetros geotécnicos obtidos através dos ensaios de resistência ao cisalhamento e cálculos aproximados para os resíduos sólidos da célula 1 do aterro da Muribeca, localizado no município de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco.

As Tabelas 61 a 69 apresentam as estimativas dos fatores de segurança mínimos para os dois cenários estudados, onde têm-se o aterro de 30 m de altura total e inclinação i = 0,5 e o aterro de 40 m de altura total com inclinação i = 0,5 e as três situações comparativas com e sem fibras citadas acima. As Tabelas 61, 62 e 63 indicam os resultados para o nível piezométrico igual a 0 para as situações I, II e III, respectivamente, as Tabelas 64, 65 e 66, para o nível piezométrico igual a 1/3 da altura total do aterro para as situações I, II e III, respectivamente, e, as Tabelas 67, 68 e 69, para o nível piezométrico igual a 2/3 da altura total do aterro para as situações I, II e III, respectivamente.

Tabela 61 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 0 e situação I – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros. geotécnicos da matriz básica

CENÁRIO	MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	FS
30 m	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	26,849	22,455	11,3	2,52
40 m					2,33

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 62 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 0 e situação II – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico.

CENÁRIO	MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	FS
30 m	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	27,300	31,609	11,3	2,87
40 m					2,61

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 63 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 0 e situação III – Considerando o efeito das fibras de acordo com o método de Kölsch (1996).

CENÁRIO	MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	ζ (º)	a_ζ	$Z_{Máx}$	FS
30 m	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	26,849	22,455	11,3	14,87	0,83	90,01	2,87
40 m							120,02	2,67

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 64 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 1/3 e situação I – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz básica.

CENÁRIO	MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	FS
30 m	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	26,849	22,455	11,3	2,23
40 m					1,90

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 65 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 1/3 e situação II – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico.

CENÁRIO	MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	FS
30 m	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	27,300	31,609	11,3	2,56
40 m					2,15

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 66 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 1/3 e situação III – Considerando o efeito das fibras de acordo com o método de Kölsch (1996).

CENÁRIO	MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	ζ (º)	a_ζ	$Z_{Máx}$	FS
30 m	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	26,849	22,455	11,3	14,87	0,83	90,01	2,57
40 m							120,02	2,22

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 67 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 2/3 e situação I – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz básica.

CENÁRIO	MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	FS

30 m	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	26,849	22,455	11,3	1,65
40 m					1,35

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 68 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 2/3 e situação II – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico.

CENÁRIO	MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	FS
30 m	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	27,300	31,609	11,3	1,95
40 m					1,58

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 69 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de médio porte para um nível piezométrico de 2/3 e situação III – Considerando o efeito das fibras de acordo com o método de Kölsch (1996).

Cenário	Material	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	ζ (º)	a_ζ	$Z_{Máx}$	FS
30 m	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	26,849	22,455	11,3	14,87	0,83	90,01	1,88
40 m							120,02	1,56

Fonte: A Autora (2019).

Conforme a NBR 11682 (ABNT, 2009), um talude com nível de segurança alto apresenta um fator de segurança (FS) igual ou superior a 1,5. Logo, observa-se que apenas o aterro com 40 m de altura e nível piezométrico de 2/3, para a consideração sem o efeito das fibras com os parâmetros geotécnicos da matriz básica exibe FS inferior a 1,5. Nota-se que o fator de segurança reduz significativamente com o aumento do nível piezométrico do aterro. Porém, como Yamawaki et al. (2017) afirmam, apesar do teor de umidade do material e/ou o aumento do nível piezométrico do aterro ocasionar uma menor estabilidade, geralmente o fator de segurança ainda pode ser alto, como visto nos resultados acima.

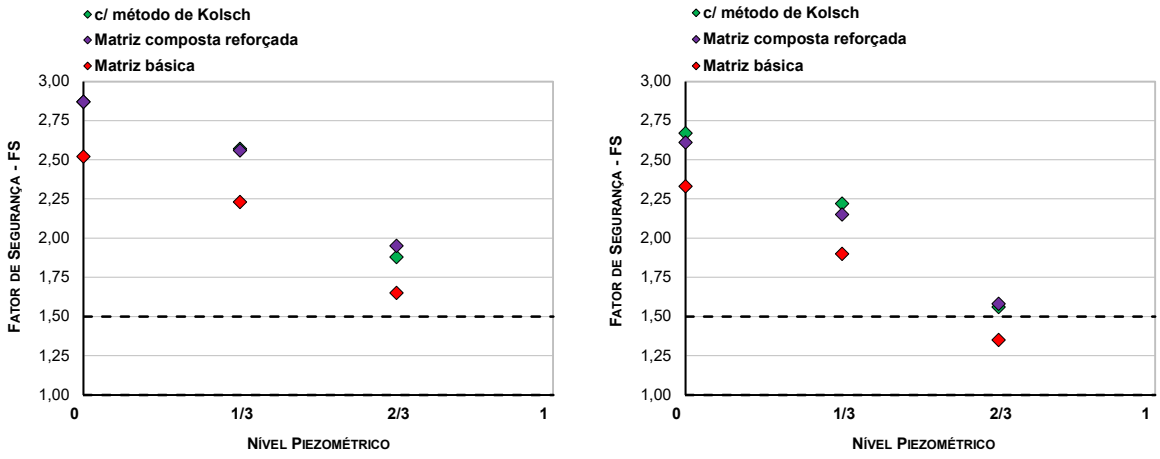
Observa-se que os fatores de segurança considerando o efeito das fibras têm valores próximos das análises realizadas sem considerar o efeito das fibras e utilizando os parâmetros geotécnicos do ensaio de resistência ao cisalhamento da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras, no entanto, difere bastante dos resultados da situação I, onde utilizou-se os parâmetros geotécnicos da matriz básica.

Como parte do ângulo de atrito obtido da matriz composta reforçada é referente ao ângulo de tração devido às fibras, é possível explicar essa aproximação dos valores obtidos nesta pesquisa. Outra observação foi na influência dos parâmetros na Equação 15, utilizada para interação do cálculo do fator de segurança. Analisando dados da literatura, constata-se uma maior contribuição das fibras como elemento de reforço nos resíduos novos.

Através do gráfico da Figura 77, pode-se observar de forma mais evidente o incremento gerado no fator de segurança devido à redução do nível piezométrico e sua variação quanto ao efeito das fibras ou não nas análises.

Analisando separadamente por nível piezométrico os gráficos da Figura 77, observa-se uma redução nos valores dos fatores de segurança entre um aterro de 30 m e 40 m com as demais geometrias semelhantes em torno de 8%, 15% e 18% para os níveis de 0, 1/3 e 2/3 da altura do aterro, respectivamente. Enquanto as reduções desses fatores do nível piezométrico 0 para 2/3 da altura são de aproximadamente 35% e 40% para o aterro de 30 m e 40 m, respectivamente.

Figura 77 - Fator de segurança – FS versus Nível piezométrico, Caso 1 – aterro de médio porte (a) 30 m e (b) 40 m.



(a) (b)

Fonte: A Autora (2019).

6.3.2 Caso 2 – Aterro de Grande Porte

As análises do Caso 2 – aterro de grande porte (Figura 76(b) e (c)) são representadas pelos valores dos fatores de segurança mínimos apresentados nas

Tabelas 70 a 78 para os quatro cenários proposto na Tabela 56, onde têm-se GP1, aterro de 60 m de altura com inclinação i = 0,4; GP2, aterro de 60 m de altura com inclinação i = 0,5; GP3, aterro de 70 m de altura com inclinação i = 0,4 e GP4, aterro de 70 m de altura com inclinação i = 0,5, e as três situações comparativas com e sem fibras citadas no início deste item 6.3. As Tabelas 70, 71 e 72 apresentam os valores do FS para o nível piezométrico igual a 0 para as situações I, II e III, respectivamente, as Tabelas 73, 74 e 75, para o nível piezométrico igual a 1/3 da altura total do aterro para as situações I, II e III, respectivamente, e, as Tabelas 76, 77 e 78, para o nível piezométrico igual a 2/3 da altura total do aterro para as situações I, II e III, respectivamente.

Tabela 70 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 0 e situação I – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz básica.

CENÁRIO		MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	FS
60 m	i = 0,4	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	26,849	22,455	11,3	2,41
	i = 0,5					2,12
70 m	i = 0,4					2,33
	i = 0,5					2,05

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 71 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 0 e situação II – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico.

CENÁRIO		MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	FS
60 m	i = 0,4	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	27,300	31,609	11,3	2,63
	i = 0,5					2,33
70 m	i = 0,4					2,54
	i = 0,5					2,23

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 72 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 0 e situação III – considerando o efeito das fibras de acordo com o método de Kölsch (1996).

CENÁRIO		MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	ζ (º)	a_ζ	$Z_{Máx}$	FS
60 m	i = 0,4	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	26,849	22,455	11,3	14,87	0,83	180,03	2,75
	i = 0,5							180,03	2,46

70 m	i = 0,4	210,03	2,68
	i = 0,5	210,03	2,39

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 73 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 1/3 e situação I – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz básica.

CENÁRIO		MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m²)	γ (kN/m³)	FS
60 m	i = 0,4	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	26,849	22,455	11,3	1,89
	i = 0,5					1,70
70 m	i = 0,4					1,76
	i = 0,5					1,62

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 74 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 1/3 e situação II – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico.

CENÁRIO		MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m²)	γ (kN/m³)	FS
60 m	i = 0,4	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	27,300	31,609	11,3	2,10
	i = 0,5					1,88
70 m	i = 0,4					1,94
	i = 0,5					1,78

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 75 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 1/3 e situação III – considerando o efeito das fibras de acordo com o método de Kölsch (1996).

CENÁRIO		MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m²)	γ (kN/m³)	ζ (º)	a_ζ	$Z_{Máx}$	FS
60 m	i = 0,4	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	26,849	22,455	11,3	14,87	0,83	180,03	2,20
	i = 0,5							180,03	2,01
70 m	i = 0,4							210,03	2,05
	i = 0,5							210,03	1,92

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 76 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 2/3 e situação I – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz básica.

CENÁRIO		MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	FS
60 m	i = 0,4	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	26,849	22,455	11,3	1,33
	i = 0,5					1,18
70 m	i = 0,4					1,16
	i = 0,5					1,06

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 77 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 2/3 e situação II – sem considerar o efeito das fibras, utilizando os parâmetros geotécnicos da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras - composição determinada na gravimetria: 1,37% têxtil + 2,44% madeira + 9,73% plástico.

CENÁRIO		MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	FS
60 m	i = 0,4	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	27,300	31,609	11,3	1,51
	i = 0,5					1,34
70 m	i = 0,4					1,32
	i = 0,5					1,21

Fonte: A Autora (2019).

Tabela 78 - FS determinado para os cenários de aterro de RSU estabilizado de grande porte para um nível piezométrico de 2/3 e situação III – considerando o efeito das fibras de acordo com o método de Kölsch (1996).

CENÁRIO		MATERIAL	ϕ (º)	c (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	ζ (º)	a_ζ	$Z_{Máx}$	FS
60 m	i = 0,4	RSU Estabilizado c/ efeito das fibras	26,849	22,455	11,3	14,87	0,83	180,03	1,54
	i = 0,5							180,03	1,39
70 m	i = 0,4							210,03	1,35
	i = 0,5							210,03	1,26

Fonte: A Autora (2019).

Sabe-se que o aumento da inclinação do talude e a altura do aterro reduz o fator de segurança como constatado nos valores apresentados nas tabelas acima. Para o mesmo nível piezométrico, a redução média devido à inclinação foi de 10,5% e 9% para altura de 60 m e 70 m, respectivamente. Enquanto a redução média devido

à altura foi de 7,5% e 6% para inclinação de 0,4 e 0,5, porém, neste caso, fica evidente que a percentagem de redução também aumenta com o NA, sendo de 3% para NA 0 e até 13% para NA 2/3.

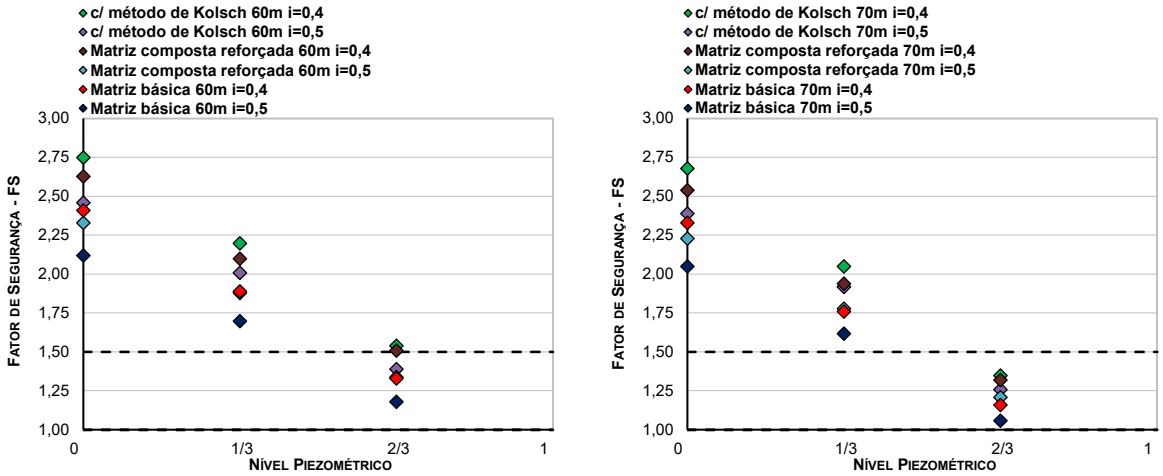
Os fatores de segurança, neste Caso 2, apesar da proximidade dos valores, as análises considerando o efeito das fibras apresentaram valores superiores em todos os cenários quando comparados com as análises sem considerar o efeito das fibras. Tambem apresentaram valores superiores as análises sem considerar o efeito das fibras no cálculo do software, mas utilizando os parâmetros geotécnicos obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para a matriz composta reforçada com 13,54% de fibras. Quanto maior a inclinação e o nível piezométrico, menor será a diferença entre essas duas situações. Quando se compara a situação I (análise da matriz básica, sem efeito das fibras) com a situação III (análise através do método de Kölsch (1996)), os resultados superiores da situação III são esperados, pois além do ângulo de atrito, o método leva em consideração o ângulo de tração. Os FS encontrados variam de 12 a 16%, nesta comparação.

Para o nível piezométrico equivalente a 2/3 da altura do aterro, nota-se que o fator de segurança não está em conformidade com a NBR 11682 (ABNT, 2009), pois para todas as análises realizadas, com exceção dos cenários de altura igual a 60 m e inclinação de 0,4, com efeito das fibras e sem efeito das fibras com parâmetros da matriz básica, todos os valores encontrados foram abaixo de 1,5, o que representa um talude com nível de segurança baixo.

A Figura 78 apresenta os gráficos de fator de segurança versus o nível piezométrico para melhor visualizar esta comparação dos métodos de análise com e sem efeito das fibras.

Observa-se um ganho de aproximadamente 17% e 5% no fator de segurança devido à ativação do efeito das fibras com as análises realizadas sem ativação do efeito das fibras com os parâmetros geotécnicos resultantes dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da matriz básica e da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras, respectivamente.

Figura 78 - Fator de segurança – FS versus Nível piezométrico, Caso2 – aterro de grande porte (a) 60 m e (b) 70 m.



(a) **(b)**

Fonte: A Autora (2019).

6.3.3 Considerações Finais

No Caso 1, para taludes de médio porte, em todas as análises realizadas, apenas o talude de 40 m, inclinação de 0,5 e nível piezométrico de 2/3 da altura sem considerar o efeito das fibras e utilizando os parâmetros obtidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da matriz básica, estava fora do limite estabelecido pela NBR 11682 (ABNT, 2009), como taludes com nível de segurança alto (FS ≥ 1,50). Os aterros com níveis piezométricos iguais a 0 apresentaram fatores de segurança cerca de 34% e 41% maiores que os com níveis piezométricos iguais a 2/3 da altura total do aterro para 30 e 40 m, respectivamente.

No Caso 2, observou-se que os resultados das análises com a ativação do efeito das fibras obtiveram valores mais elevados quando comparado com as análises sem a ativação do efeito das fibras. É importante pontuar que os parâmetros de ângulo de atrito e coesão utilizados nas análises considerando o efeito das fibras foram os mesmos da matriz básica como proposto por Kölsch (1996). Desta forma, ao comparar as análises com e sem ativação do efeito das fibras com os parâmetros provenientes da matriz básica, observa-se um ganho na ordem de 17% devido à ativação das fibras. Esse ganho, quando comparado com as análises sem considerar o efeito das fibras com os parâmetros provenientes da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras foi apenas 5%, aproximadamente.

No Caso 1 e Caso 2, o aumento do nível piezométrico foi o fator mais relevante para afetar a estabilidade do talude. Porém, no Caso 2, a inclinação também teve grande importância, propiciando uma redução em torno de 10% no FS com o aumento da inclinação.

Devido à grande heterogeneidade e variações físico-químico-biológicas ao longo do tempo pelo processo de biodegradação da parte orgânica da massa dos resíduos, é necessária cautela nos projetos de aterros sanitários, pois apesar das fibras beneficiarem a estabilidade dos taludes, as alterações dos parâmetros geotécnicos com o tempo, devido à degradação de seus componentes, às altas temperaturas e aos incêndios na massa de resíduos, podem reduzir sensivelmente os fatores de segurança. E mesmo os resíduos estabilizados trabalhados nesta pesquisa, com os materiais fibrosos, podem sofrer alteração com o tempo, reduzindo o acréscimo de resistência devido à tração e, consequentemente, a estabilidade do talude de resíduos sólidos. Todavia, observou-se que a utilização do método proposto por Kölsch (1996) é o melhor para retratar o comportamento dos resíduos e obter melhores fatores de segurança na estabilidade de talude dos aterros sanitários.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Neste capítulo será citado as conclusões desta pesquisa e sugestões para futuras pesquisas.

7.1 CONCLUSÕES

As conclusões foram divididas em:

a) Ensaios de caracterização dos resíduos sólidos urbanos;
b) Ensaios de cisalhamento direto;
c) Obtenção dos parâmetros de tração através dos ensaios de cisalhamento direto;
d) Análise de estabilidade de talude;
e) Considerações finais.

7.1.1 Ensaios de caracterização dos resíduos sólidos urbanos

Em relação à composição física dos resíduos coletados no Aterro encerrado da Muribeca-PE, foi observada uma predominância de materiais mistos com granulometria inferior a 8 mm, típicos de resíduos estabilizados, com percentuais acima de 60%. Para os componentes fibrosos, foram observados três grupos: madeira, representando 2,44% do total dos resíduos em peso; plástico, contabilizando 9,73% e têxtil, estimado em 1,37% do total de RSU. Comparando a composição gravimétrica com a volumétrica dos grupos citados, têm-se um aumento nos componentes fibrosos e uma redução no material misto. O têxtil apresentou o maior ganho percentual de volume, 5,02 maior que em peso, representando 6,88% do volume total da massa de resíduos. O plástico teve um aumento de 4,68, caracterizando 45,54% do volume de RSU, enquanto a madeira contabiliza 6,54% do volume, com aumento de 2,68. O material misto com partículas menores que 8 mm apresentou um volume de 26,28% dos resíduos, tendo uma redução de 2,35 vezes em relação ao peso.

O ensaio de granulometria foi realizado apenas no grupo dos materiais mistos com partículas < 8 mm, devido a proposta do trabalho. No entanto, sabe-se que pelo alto teor deste grupo, as amostras dos resíduos utilizados nesta pesquisa conduzem a maiores valores de peso específico devido a sua estrutura mais homogênea.

Os resultados da classificação morfológica mostraram uma predominância de dimensão DIM 0, 75,68% do total. A soma das dimensões DIM 1 (fibras) e DIM 2 (área) trata-se de um indicador utilizado para avaliar a influência do reforço dos materiais fibrosos nas propriedades de resistência ao cisalhamento dos RSU. O resultado encontrado neste trabalho para o somatório de DIM 1 e DIM 2 foi de 14,72%, comprovando que se trata de resíduos estabilizados.

As densidades encontradas para as fibras foram de forma amostral, já que a quantidade e os tipos de cada fibra eram enormes. As densidades encontradas foram de 0,156 g/cm^3 para as fibras têxteis, 0,435 g/cm^3 para as fibras de madeira e 0,990 g/cm^3 para as fibras plásticas. O valor elevado da densidade do plástico em relação às outras duas fibras se deve a pequenas partículas de plástico duro presente no grupo dos plásticos. O material misto com partículas < 8 mm apresentou uma densidade de 2,561 g/cm^3.

Como a massa de resíduos analisada nesta pesquisa é proveniente de um material com uma matéria orgânica praticamente nula, uma profundidade de coleta de aproximadamente uns 4 metros e a coleta da amostra realizada no período de seca da região (mês de novembro de 2016), o percentual médio do teor de umidade encontrado foi de 10,47% na base seca e 9,48% na base úmida.

A matriz básica (material misto com partículas < 8 mm) indica valores de 15,78% de teor de umidade e 15,62 kN/m^3 de peso específico seco. A amostra com 24,32% de fibras (madeira; plástico e têxtil) possui densidade seca de 12,95 kN/m^3 e 16,88% e umidade. A redução da densidade dos resíduos com inclusão de fibras é devida a baixa densidade das fibras e resistência à compactação, devido ao seu alto volume.

O teor de sólidos voláteis correspondente aos resíduos estabilizadoss analisados nesta pesquisa foi 2,2%. O baixo teor encontrado para a amostra analisada é decorrente do avanço da degradação do material orgânico, apresentando praticamente nenhuma atividade de biodegradação dos resíduos.

7.1.2 Ensaios de cisalhamento direto

As curvas de resistência ao longo do deslocamento horizontal da matriz básica das amostras dos resíduos sólidos estudados são crescentes, não apresentando um valor máximo para tensão cisalhante. A matriz básica dos resíduos sólidos desta pesquisa, embora possua partículas inferiores a 8 mm, possui pequenos materiais fibrosos, que apesar do peneiramento, passou uma certa quantidade. Estas partículas fibrosas provocaram um aumento da resistência, apresentando curvas com características de materiais que possuem algum reforço em sua composição.

A matriz composta reforçada com 13,54% das fibras, composição gravimétrica original, apresentou curva tensão cisalhante – deslocamento horizontal semelhante ao comportamento de materiais com ruptura plástica apresentando uma mudança no módulo cisalhante num deslocamento horizontal em torno de 4%. Apesar da inclusão das fibras, o comportamento das curvas não é propriamente típico dos materiais que possuem em sua composição a inclusão de reforço, no qual a curva tende a linearidade, sem apresentar ruptura. Porém, ainda assim as curvas da matriz composta reforçada com 13,54% das fibras apresentam aumento da resistência com o deslocamento. Este comportamento pode ser explicado devido ao alto teor dos materiais fibrosos, onde as fibras do RSU contribuem na resistência até um certo limite. Após atingir este teor, as fibras começam a deslizar entre elas alterando suavemente o comportamento.

As matrizes compostas com diferentes teores de fibras de madeira apresentaram aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento do deslocamento horizontal nas curvas de tensão – deslocamento sem atingir o estado de ruptura do material. O mesmo ocorreu para as matrizes compostas com diferentes teores de fibras têxteis, com exceção do teor igual a 10%, onde o comportamento apresentado foi semelhante ao da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras. Já as matrizes compostas com diferentes teores de fibras plásticas para teores abaixo de 5%, apresentaram comportamento semelhante às amostras com inclusão de fibras de madeira, enquanto as com teores superiores a 5% de fibras plásticas apresentaram comportamento parecido com a matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.

Os parâmetros de resistência das matrizes compostas reforçadas com fibras de madeira, fibras de plásticos e fibras têxteis, para diferentes níveis de deslocamento horizontal, apresentaram um aumento com o deslocamento. Enquanto a matriz

composta reforçada com 13,54% de fibras, composição original, obteve um crescimento para o ângulo de atrito e coesão até um certo deslocamento horizontal e depois teve uma leve redução. O comportamento desse crescimento se deve, provavelmente, às forças de tração desenvolvidas pelo reforço. Ao passo que a redução pode ser atribuída ao excesso de fibras, tendo parte do esqueleto estrutural o contato fibra-fibra, ocorrendo deslizamentos.

A envoltória de resistência da matriz composta reforçada com a composição original dos resíduos coletados na Muribeca foi quase paralela com a da matriz básica, porém apresentando uma coesão mais elevada, devido às fibras presentes na matriz composta.

Quando comparado às matrizes compostas com fibras isoladas para as mesmas taxas inclusas, nota-se que para a inclusão igual a 3%, as três fibras, madeira, plástico e têxtil, exibem o mesmo comportamento mecânico. Todavia, para uma mistura com 5% de fibras, as amostras de plástico apresentaram comportamento distinto das outras fibras, obtendo um ângulo de atrito inferior e uma coesão maior de ϕ = 30,2º e c = 20,1 kPa.

De um modo geral, verifica-se que os resultados dos parâmetros de resistência obtidos nesta pesquisa indicam que o acréscimo das fibras eleva o ângulo de atrito e reduz a coesão.

7.1.3 Obtenção dos parâmetros de tração através dos ensaios de cisalhamento direto

Os parâmetros de tração necessários para uma análise de estabilidade são o ângulo de tração, o fator de transmissão e a coesão de tração.

A obtenção do ângulo de tração se dá pela diferença entre a envoltória de resistência determinada nos ensaios de cisalhamento direto da matriz básica e a matriz composta. Portanto, os valores encontrados para os ângulos de tração das amostras ensaiadas são $\zeta_{1,37\%\ \text{Têxtil}}$ = 0,34º (matriz composta reforçada com 1,37% de fibras têxteis), $\zeta_{2,44\%\ \text{Madeira}}$ = 0,87º (matriz composta reforçada com 2,44% de fibras de madeira), $\zeta_{9,73\%\ \text{Plástico}}$ = 3,02º (matriz composta reforçada com 9,73% de fibras plásticas) e $\zeta_{13,54\%\ \text{Fibras}}$ = 14, 87º (matriz composta reforçada com 13,54% de fibras,

onde 1,37% são de fibras têxteis, 2,44% de fibras de madeira e 9,73% de fibras plásticas – de acordo com a composição gravimétrica desta pesquisa).

O fator de transmissão depende do ângulo de atrito da matriz básica e, através de interpolação, foi obtido um valor de a_{ζ} = 0,83.

A coesão de tração foi determinada através de cálculos formulado por Kölsch (1996), os quais dependem da altura total do aterro e do seu peso específico. Como a proposta da pesquisa era simular aterros de médio e de grande porte para analisar a estabilidade de talude, as alturas selecionadas foram $h_{aterro_médio1}$ = 30 m, $h_{aterro_médio2}$ = 40 m e $h_{aterro_grande1}$ = 60 m, $h_{aterro_grande2}$ = 70 m. Para a matriz composta reforçada com 13,54% de fibras as coesões de tração encontradas para aterros de médio foi de $Z_{máx1}$ = 90,01 kN/m^2 e de $Z_{máx2}$ = 120,02 kN/m^2 e grande porte foi de $Z_{máx1}$ = 180,03 kN/m^2 e $Z_{máx2}$ = 210,03 kN/m^2, respectivamente.

Os valores do ângulo e coesão de tração da matriz composta reforçada com 13,54% de fibras encontrados estão dentro da Recomendação Técnica da Sociedade Alemã de Geotecnia GDA-EMPFEHLUNGEN E2-29 (DGGT, 1998) para resíduos estabilizadoss. Portanto, os parâmetros de tração estimados através dos ensaios de cisalhamento direto são adequados para utilização de análises de estabilidade de taludes como forma simplificadora do método de cálculo proposto por Kölsch (1996).

7.1.4 Análise de estabilidade de talude

As análises de estabilidade de talude de aterros de resíduos sólidos relatadas neste trabalho permitiram verificar o efeito das fibras e do nível piezométrico nos cálculos. Nas análises de estabilidade admitindo deficiência no sistema de drenagem de líquidos, adotando um nível piezométrico de 2/3 da altura total do aterro simulado, verifica-se que para praticamente todos os aterros de grande porte o fator de segurança se encontra abaixo do recomendado pela NBR 11682 (ABNT, 2009) (FS ≥ 1,50), com ou sem o efeito das fibras. Para os aterros de médio porte simulados, o fator de segurança teve um aumento de aproximadamente cerca de 14% para altura total de 30 m e 16% para altura total de 40 m devido à incorporação das fibras dos resíduos. Para os aterros de grande porte simulados, houve dois parâmetros geométricos variáveis, altura e inclinação do talude. No entanto, o aumento do FS

devido ao efeito das fibras foi de aproximadamente 16% para inclinações 2,5:1 (h:v) e 18% para inclinações 2:1 (h:v).

Os aterros com níveis piezométricos iguais a 0 apresentaram fatores de segurança próximos a 34%, 41%, 44% e 48% maiores que os com níveis piezométricos iguais a 2/3 da altura total do aterro para 30, 40, 60 e 70 m, respectivamente, e independente da inclinação do talude.

É importante pontuar que os parâmetros de ângulo de atrito e coesão utilizados nas análises considerando o efeito das fibras foram os mesmos da matriz básica como proposto por Kölsch (1996). Isto ocorre com o intuito de evitar a consideração do efeito das fibras mais de uma vez, supervalorizando o FS final do aterro de resíduos sólidos urbanos.

Visto as diferenças dos fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade de talude de aterros de resíduos sólidos utilizando os parâmetros determinados nessa pesquisa para diferentes métodos de análise, recomenda-se a utilização do método de Kolsch, que é o método mais realístico quando se investiga o comportamento mecânico dos resíduos sólidos.

7.1.5 Considerações finais

A mecânica dos resíduos não dispõe de uma metodologia consolidada e eficaz para se obter os parâmetros geotécnicos que representam o comportamento resistente de aterros sanitários. No entanto, o método proposto por Kölsch (1996) é o que melhor se aproxima deste comportamento e vem se consolidando como a melhor metodologia atualmente.

Esta pesquisa proporcionou a confirmação da influência dos elementos fibrosos no comportamento mecânico na massa de resíduos sólidos, proporcionando maiores valores de resistência ao cisalhamento e, consequentemente, um maior fator de segurança nas estabilidades de talude de aterros sanitários. Também verificou-se a possibilidade da obtenção dos parâmetros de tração através dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto. Todavia, devido à grande heterogeneidade e variações físico-químico-biológica ao longo do tempo pelo processo de biodegradação da parte orgânica da massa dos resíduos, é necessário cautela nos projetos de aterros sanitários, pois apesar das fibras beneficiarem a estabilidade dos taludes, as alterações dos parâmetros geotécnicos com o tempo devido à degradação de seus

componentes, às altas temperaturas e aos incêndios na massa de resíduos podem reduzir sensivelmente os fatores de segurança. E mesmo os resíduos estabilizados trabalhados nesta pesquisa, com os materiais fibrosos, podem sofrer alteração com o tempo, reduzindo o acréscimo de resistência devido à tração e, consequentemente, a estabilidade do talude de resíduos sólidos. Por isso a importância do estudo da matriz básica isolada, pois trata-se da pior situação possível em um futuro em que não haverá mais o efeito das fibras na massa de resíduos.

7.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Algumas sugestões para futuras pesquisas são propostas:

a) Realizar ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões com resíduos de diferentes níveis de degradação para determinação dos parâmetros de tração;
b) Investigar o comportamento de resíduos naturais e saturados, de diferentes níveis de degradação, incluindo a pressão de gás, nos ensaios triaxial;
c) Estudar a influência do teor de umidade dos RSU nos parâmetros de resistência, avaliando o efeito da poro-pressão;
d) Realizar análises de estabilidade de taludes utilizando parâmetros de resíduos de diferentes idades, incluindo a poro-pressão;
e) Realizar retro-análises dos casos de ruptura ocorridos em aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE**. La composition des ordures ménagères et assimilées en France.** Angers, FR: ADEME, 2010. Disponível em: http://www.ademe.fr. Acesso em: 1 mar. 2018.

AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE**. Guide Pour La Realisation De Campagnes De Caracterisation Des Dechets Menagers**. Angers, FR: ADEME, 2014. Disponível em: http://www.ademe.fr. Acesso em: 5 mar. 2018.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da Influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2007. 364p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ALVES, I. R. F. S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. 2008. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012**. São Paulo: ABRELPE, 2012. Disponível em: http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm. Acesso em: 9 fev. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682:** Estabilidade de Encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 6457:** Amostras de Solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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: ABNT, 2016d.

BAREITHER, CHRISTOPHER A AND BREITMEYER, RONALD J AND BENSON, CRAIG H AND BARLAZ, MORTON A AND EDIL, T. B. Deer Track Bioreactor Experiment: Field-Scale Evaluation of Municipal Solid Waste Bioreactor Performance. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 138, n. 6, 2011, p. 658–670.

BORGATTO, A. V. A. **Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de**

aterros de resíduos sólidos urbanos. 2006. 157p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, 2006.

BORGATTO, A. V. A. **Estudo das propriedades geomecânicas de resíduos sólidos urbanos pré-tratados**. 2010. 271p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, 2010.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.305**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos., 2010.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 2.289/2015**. Prorroga o prazo para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos de que trata o art. 54 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010., 2015.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 3.261/2019**. Tratar de prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, art. 54 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010., 2019.

CAICEDO, B. *et al.* Geomechanical Properties of Municipal Solid Waste in Doña Juana Sanitary Landfill. In: 4th Environmental Geotechnics – 4th ICEG, 2002, Rio de Janeiro, Brasil. **Anais [...].** Rio de Janeiro, Brasil, 2002. p 177-182.

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

CARDIM, R. D. **Estudo da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por meio de Ensaios de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões.** 2008. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2008.

CARVALHO, M. de F. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. 1999. 300p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CHIEMCHAISRI, C. et al. Solid waste characteristics and their relationship to gas production in tropical landfill. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 135, n. 1–3, 2007, p. 41–48. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/s10661-007-9706-2. Acesso em: 4 jul. 2018.

CHUGH, S. et al. Effect of Recirculated Leachate Volume on MSW degradation. **Waste Management & Research**, v. 16, n. 6, 1998, p. 564–573. Disponível em: http://wst.iwaponline.com/content/48/4/147. Acesso em: 6 abr. 2018.

COLLINS, H. J.; KOLSCH, F; ZIEHMANN, G. Veränderung des Tragverhaltens und der mechanischen Eingeschaften von Abfällen durch Alterung und Abbau. **Abschlußbericht zum DFG-Verbundvorhaben "Geotechnik der Abfallstoffe", TU Braunschweig**, **Leichtweiss-Institut für Wasserbau,** 1997.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Empreiteira Pajoan é**

multada em 10.000 UFESPs. São Paulo: CESTEB. 2011. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/blog/2011/04/26/empreiteira-pajoan-e-multada-em-10-000-ufesps/. Acesso em: 5 dez. 2019.

CONSELHO municipal pode ser processado pela tragédia na lixeira de Hulene. Made for Minds. Disponível em: https://www.dw.com/pt-002/conselho-municipal-pode-ser-processado-pela-trag%C3%A9dia-na-lixeira-de-hulene/a-42760315. Acesso em: 5 dez. 2019.

CORRÊA, C. L. **Análise da influência do plástico mole na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos**. 2013. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

COUMOULOS, D. *et al*. Geotechnical Investigation at the Main Landfill of Athens. *In*: Sardinia 95: 5th International Landfill Symposium, 1995, Cagliari. **Proceedings** [...]. Cagliari, Itália, 1995. p. 885-895.
COWLAND, JW AND TANG, KY AND GABAY, J. Density and Strength Properties of Hong Kong Refuse. *In*: Sardinia, 1993. **Proceedings** [...].Sardinia, Itália,1993. v. 93, p. 1433-1446.

DECOTTIGNIES, V. **et al**. Comparison of Analytical Methods to Determine the Stability of Municipal Solid Waste and Related Wastes. *In*: Sardinia, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, 2005, Cagliari, Italy. **Proceedings** [...]. Cagliari, Italy: 2005. p. 3-7.

DEL-GRECO, O.; OGERRI, C. Geotechnical Parameters of Sanitary Wastes. *In*: IV International Landfill Symposium – Sardinia 93, 1993, S. Margherita di Pula, Italy. **Anais [...]**. S. Margherita di Pula, Italy: 1993. p. 12.

Delhi's Ghazipur Landfill Collapse: 2 Dead as Mountain of Trash Sweeps Many Into Nearby Canal. **Hindustan Times**. Disponível em: https://www.hindustantimes.com/delhi-news/ghazipur-landfill-site-collapses-in-east-delhi-one-dead-many-fear-trapped/story-oSqDJtp4zqrB0yHOWCER9J.html. Acesso em: 5 Dez. 2019.

Deslizamento de Lixo no Hulene: Nyusi quer Reassentamento dos Afectados o mais Breve Possível. **Sociedade do Noticias**, AS. Disponível em: https://www.jornalnoticias.co.mz/index.php/capital/76300-deslizamento-de-lixo-no-hulene-nyusi-quer-reassentamento-dos-afectados-o-mais-breve-possivel.html. Acesso em: 5 dez. 2019.

Deslocamento em Aterro Sanitário de Guarulhos Deixa Cidade em Estado de Emergência. **G1**. 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: 5 dez. 2019.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK. **Empfehlungen zur geotechnischen Erkundung des Untergrundes und des Abfallkörpers. E 1 - 7:** Identifizierung von Abfällen und Stoffgruppen. DGGT, 1997.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK. **Empfehlungen zu Entwurfsgrundsätzen.** E 2-29: Standsicherheitsnachweis für Deponiekörper mit anisotropen Festigkeiten. DGGT, 1998.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK. **Empfehlungen zu Entwurfsgrundsätzen.** E 2-35: Geotechnische Kennwerte für Siedlungsabfälle. DGGT, 2000.

DIXON, N.; JONES, D. R. V. Engineering properties of municipal solid waste. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, n. 3, 2005, p. 205–233.

DIXON, N.; LANGER, U. Development of a MSW classification system for the evaluation of mechanical properties. **Waste Management**, v. 26, n. 3, 2006, p. 220–232.

EDINCLILER, A.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. Shear strength of municipal solid waste: interim report - year 1. **Environmental Geotechnics Report 96**, vol.2, 1996.

FIRMO, A. L. B. **Estudo númerico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. 2013. 268p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife,2013.

FUCALE, S. P. **Influência dos componentes de reforço na resistência de resíduos sólidos urbanos**. 2005. 216p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

GABR, A. M.; VALERO, M. S. Geotechnical properties of municipal solid waste (Geotechnkal properties of municipal solid waste). **Geotechnical Testing Journal, GTJODJ**, v. 18, 1995, p. 241–251.

GOMES, C. C.; LOPES, M. L.; LOPES, M. G. A Study of MSW Properties of a Portuguese Landfill. *In*: International workshop on hydro-physico-mechanics of landfills, LIRIGM, Grenoble. **Proceedings [...]**. Grenoble, França: 2005. v. 1, p. 1353-1360.

GOMES, C. M. B. C. **Estudo do comportamento de aterros de resíduos:** caracterização física, bioquímica e mecânica dos resíduos sólidos urbanos. 2008. 536p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto, PT, 2008.

GRISOLIA, M., NAPOLEONI, Q., & TANCREDI, G. The Use of Triaxial Tests for the Characterization of MSW. Sardinia 95. *In*: Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, **Anais [...]**.S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy: 1995. p. 761-768.

GUADAGNIN, M. R. et al. Estudo de Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos em Municípios do Sul Catarinense. *In*: Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, Porto Alegre - RS. **Anais [...]**. Porto Alegre - RS: 2014. p. 15.

HANSON, JAMES L AND LIU, WEI-LIEN AND YESILLER, N. Analytical and

Numerical Methodology for Modeling Temperatures in Landfills. *In*: GeoCongress 2008: Geotechnics of Waste Management and Remediation, New Orleans, Louisiana, EUA. **Anais [...]**. New Orleans, Louisiana, EUA: 2008. p. 24–31.

HOSSAIN, M. S.; PENMETHSA, K. K.; HOYOS, L. Permeability of Municipal Solid Waste in Bioreactor Landfill with Degradation. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 27, n. 1, 2009, p. 43–51. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/s10706-008-9210-7. Acesso em: 4 Jul. 2018.

HULL, R. M.; KROGMANN, U.; STROM, P. F. Composition and Characteristics of Excavated Materials from a New Jersey Landfill. **Journal of Environmental Engineering**, v. 131, n. 3, 2005, p. 478–490. Disponível em: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-14644423975&partnerID =40&md5=0c111a02d2255051e343576164fdcb09>. Acesso em: 4 Jul. 2018.

ISWA. **A Roadmap for closing Waste Dumpsites** - The World's most Polluted Places. p. 122, 2016.

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. **Japan provides relief assistance to victims and expertise to resolve meethotamulla garbage crisis. News from Sri Lanka**. Japan: JICA, 2017. Disponível em: https://www.jica.go.jp/ srilanka/english/office/others/c8h0vm00006fz16a-att/newsletter_2017_04_06.pdf. Acesso em: 5 Dez. 2019.

JESSBERGER, H. L. Some Geotechnical Aspects of Wasre Disposal. *In*: 6th International Congress of IAEG, Balkema, Rotterdam. **Proceedings [...]**. Rotterdam, Holanda, 1990. p.131-138.

JESSBERGER, H. L. Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction. Part 2: Material Parameters and Test Methods. (Second of a Series of Three Papers from the Author's British Geotechnical Society Touring Lecture in 1993). **Geotechnical Engineering**, v. 107, n. 2, 1994, p. 105–113.

JESSBERGER, H. L.; KOCKEL, R. Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Materials. *In*: Symposium GREEN'93-Geotechnics related to the environment, UK. **Anais [...]**. Bolton, UK: 1995. p.313-322.

JESSBERGER, H. L.; SYLLWASSCHY, O.; KOCKEK, R. Investigation of Waste Body Behaviour and Waste Structure Interaction. *In*: Sardinia International Landfill Symposium, S. Margherita Di Pula, Cagliari, Italy. **Anais [...]**. S. Margherita Di Pula , Cagliari, Italy: 1995. Vol.95, p.731-743.

JIE, Y. X. XU, W. J.; DUNZHU, D.; WEI, Y. F.; PENG, T.; & ZHOU, Z. Y. Laboratory testing of a densified municipal solid waste in Beijing. **Journal of Central South University**, v. 20, n. 7, 2013, p. 1953–1963.

JUCÁ, J. F. Situação Atual e Perspectivas para a Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil. In: 2nd International AFRICA Sustainable Waste Management Conference, Luanda, Angola. **Anais [...]**. 2014.

JUCÁ, J. F. T.; CABRAL, J. J. P. S.; MONTEIRO, V. E. D.; SANTOS, S. M.; PERRIER JR, G. S. Geotechnics of a municipal solid waste landfill in Recife, Brazil. *In*: SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, 1997, Rio de Janeiro. **Proceedings [...]**. Rio de Janeiro: CAPES; CNPq; FAPERJ; FINEP, 1997.

KAVAZANJIAN, E. Mechanical Properties of Municipal Solid Waste. In: Proceedings Sardinia, Italy. **Anais [...]**. Sardinia, Italy: 2001. Vol.1, n.8, p. 415-424.

KELLY, R. J. **Solid Waste Biodegradation Enhancements and the Evaluation of Analytical Methods Used to Predict Waste Stability**. 2002. 66p. Dissertation (Masters in Science in Environmental Science and Engineering) - Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, EUA.

KOCKEL, R. **Scherfestigkeit von Mischabfallen in Hinblick auf die Standsicherheit von Deponien.** Schriftenreihe des Institute fur Greendbau, Ruhr Universitat Bochum, Heft 24, 1995.

KOLSCH, F. **Materialkennwerte von Abfall im Hinblick auf die Standsicherheit von Mülldeponien**. Diplomarbeit am FB Bauingenieurwesen, TU Braunschweig, Deutschland. 1990. (não publicado).

KÖLSCH, F. The Bearing Behaviour of Domestic Waste and Related Consequences for Stability. *In*: 4th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy), **Anais [...]**. Cagliari, Italy:1993. Vol.2, p.1393-1410.

KÖLSCH, F. Material Values for Some Mechanical Properties of Domestic Waste. *In*: 5th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy), **Anais [...]**. Cagliari, Italy: 1995. Vol.2, p.711-729.

KÖLSCH, F. **Der Einfluß der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall (The influence of fibrous constituents on shear strength of municipal solid waste)**. 1996. 158p. Dissertação. Mitteilungen des Leichtweiss-Institut fur Wasserbau der Technischen Universitat Braunschweig.

KÖLSCH, F.; FRICKE, K.; MAHLER, C.; & DAMANHURI, E.. Stability of Landfills - The Bandung Dumpsite Desaster. *In*: 10th International Landfill Symposium, Cagliari, Sardinia (Italy). **Anais[...]**. Cagliari, Sardinia, Italy: 2005. p.8.

KÖLSCH, F. Stability Problems of Landfills – The Payatas Landslide. *In*: 17th Int. Conf. on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, PA, EUA. **Anais [...]**. Philadelphia, PA, EUA: 2007. 7p.

KÖLSCH, F. Shear strength of waste. *In*: Third International Workshop “Hydro-Physico-Mechanics of Landfill", Braunschweig, Germany. **Anais [...]**. Braunschweig, Germany: 2009. p.10-13.

LAMARE NETO, A. **Resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos e de materiais granulares com fibras.** 2004. 190p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, 2004.

LANDVA, A.; CLARK, J. Geotechnics of Waste Fill. *In*: STP1070-EB Geotechnics of Waste Fills—Theory and Practice. West Conshohocken, PA, **Anais [...]**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1990. p. 86–103.

LI, X.; SHI, J. Stress-strain Behaviour and Shear Strength of Municipal Solid Waste (MSW). **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 5, 2016, p. 1747–1758. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-015-0268-5>. Acesso em: 27 Fev. 2018.

MACHADO, S. L. *et al*. Evaluation of the Geotechnical Properties of MSW in Two Brazilian Landfills. **Waste Management**, v. 30, n. 12, p. 2579–2591, 2010. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.07.019. Acesso em: 4 Jul. 2018.

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

MCDOUGALL, J. A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behaviour in landfilled waste. **Computers and Geotechnics**, v. 34, 2007, p. 229–246. Disponível: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266352X07000158. Acesso em: 17 mai. 2018.

MCDOUGALL, J. R.; PYRAH, I. C.; YUEN, S. T. S. Extended phase relations and load effects in MSW. **Waste Management**, v.24, 2004, p. 251-257. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X03002289. Acesso em: 9 Abr 2018.

MOTTA, E. de 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**. 2011. 190p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

MUNNICH, K. **Bericht über Versuche zur mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Restabfälle** – Deponie Pinnow. Leichtweiß-Institut, TU Braunschweig, DE. 2001. 13p. (não publicado)

OECD Environmental Data — Waste. OECD. Disponível em: http://stats.oecd.org/. Acesso em: 28 fev. 2018.

OLIVEIRA, L. R. G. de. **Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas dde aterro de resíduos sólidos urbanos**. 2013. 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

PERNAMBUCO. Governo do Estado. Secretaria das Cidades. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da região metropolitana e prognóstico**. Recife: SECID, 2008.

POWRIE, W AND RICHARDS, DJ AND BEAVEN, R. Compression of Waste and Implications for Practice. *In*: **Geotechnical Engineering of Landfills: Proceedings of the symposium held at The Nottingham Trent University Department of Civil and Structural Engineering**. Thomas Telford Publishing, p. 1–18, 1998.

RAKESH KUMAR PANDEY; R.P.TIWARI. Physical Characterization and Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)**, v. 12, n. 1, 2015, p. 15–21. Disponível em: http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol12-issue1/Version-2/C012121521.pdf. Acesso em: 12 Jul. 2018.

RUSSO, M. A. T. **Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário**. 298p. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2005.

SANTOS FILHO, D. A. **Avaliação temporal do lixiviado da Muribeca**. 2013. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SCHEELHAASE, T. *et al*. Geotechnical Behaviour of Mechanically Pretreated Residual Waste. In: Sardinia, 8th International Waste Management and Landfill symposium, S. Margherita di Pula, Gagliari, Italy. **Anais [...]**. S. Margherita di Pula, Gagliari, Italy: 2001. p. 445-453.

SIEGEL, R. A.; ROBERTSON, R. J.; ANDERSON, D. G. Slope Stability Investigations at a Landfill in Southern California. *In*: STP1070-EB Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice. West Conshohocken, PA, **Anais [...]**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1990. p. 259-284.

TAPAHUASCO, W. F. C. **Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de novas equações de previsão de recalques considerando a parcela de biodegradação**. 2009. 161p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VINIL, S. **Integrated solid waste management engineering principles and management issues**. New York: McGraw Hil, 1993.

TOWNSEND, T. G.; POWELL, J.; JAIN, P.; XU, Q.; TOLAYMAT, T.; REINHART, D. **Waste management principles and practice**: sustainable practices for landfill design and operation. New York: Springer, 2015.

TWENTY-FOUR People missing after deadly garbage dump accident in Guatemala. **Reuters**, World News, April 29, 2016. Disponível em: https://fr.reuters.com/article/us-guatemala-accident-idUSKCN0XQ2F4. Acesso em: 5 Dez. 2019.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Advancing Sustainable Materials Management :** 2017 Fact Sheet. Washington, DC: EPA, 2019. Disponível em: https://www.epa.gov. Acesso em: 10 jan. 2020.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. **Análise de estabilidade de taludes do aterro de João Pessoa - PB**. Recife: GRS/UFPE, 2017. (não publicado).

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. **Estudo da geração e composição dos resíduos sólidos urbanos da cidade do Recife**. Recife: ATEPE/GRS/UFPE, 2014.

UNSD ENVIRONMENTAL INDICATORS — Waste. **United nations statistics division**. Disponível em: https://unstats.un.org/unsd/envstats/qindicators.cshtml. Acesso em: 28 fev. 2018.

VAVILIN, V. A.; RYTOV, S. V.; PAVLOSTATHIS, S. G.; JOKELA, J.; RINTALA, J.. A Distributed Model of Solid Waste Anaerobic Digestion: Sensitivity Analysis. **Water Science and Technology**, v. 48, n. 4, 2003, p. 147–154. Disponível em: http://wst.iwaponline.com/content/48/4/147. Acesso em: 6 Abr. 2018.

VIZINHOS de Aterro que Explodiu em SP Temem Novo Deslizamento. **G1**. 2011. Disponível em: http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2011/04/moradores-temem-novo-deslizamento-em-lixao-que-explodiu-na-grande-sp.html. Acesso em: 5 dez. 2019.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. International Reference Centre for Waste Disposal. **CH - 8600 Dubendorf (Switzerland)**: methods of analysis of sewage sludge, solid wastes and compost. Genève, Suíça: WHO, 1978.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Weekly Update on Outbreaks and Other Emergencies, Week 11: 11-17 March 2017. Weekly Bulletin on Outbreaks and other Emergencies, 2017. Genève, Suíça: WHO, 2017.

XU, Q. PENG; D., LI, W.; DONG, X.; HU, W.; TANG, M.; LIU, F.. The Catastrophic Landfill Flowslide at Hongao Dumpsite on 20 December 2015 in Shenzhen, China. **Natural Hazards & Earth System Sciences**, v. 17, n. 2, 2017, p. 277–290. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Fangzhou_Liu/publication/304192201_The_catastrophic_landfill_flowslide_at_Hongao_dumpsite_on_December_20_2015_in_Shenzhen_China/links/58b0648fa6fdcc6f03f5ffdd/The-catastrophic-landfill-flowslide-at-Hongao-dumpsite-on-December-20-2015-in-Shenzhen-China.pdf. Acesso em: 5 Dez. 2019.

YAMAWAKI, A., DOI, Y., & OMINE, K. (2017). Slope Stability and Bearing Capacity of Landfills and Simple On-Site Test Methods. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 7, 2017, p. 730–738.

YAQOUT, A. F. A. L.; HAMODA, M. F.; AL-SARAWI, M. A. Engineering Properties of Soil/Solid Waste at Closed Unlined Landfill - A Case Study. **Kuwait Journal of Science and Engineering**, v. 34, n. 2B, 2007, p. 1–16.

YOSHIDA, M. Technical and social factors of dumpsite collapse in developing countries and its consequences: case studies in Mozambique and Sri Lanka. *In*: The 10th Asia-Pacific Landfill Symposium, Meisei University, JAPAN. **Proceedings [...]**.

Japan: 2018. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58643394/Yoshida2018-Technical_and_social_factors_of_dumpsite_collapse_in_developing_countries_Mozambique_and_Sri_Lanka.pdf?1552879245=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTECHNICAL_AND_SOCIAL_FACTORS_OF_DUMPSITE.pdf&Expires=1601569281&Signature=RmBv2UnDUtvUE0w3jMq~KYxoXWbO86-t17DL0~cQHMkZ~fO8QXCRPfTu0D6kH8ESvNKKPqE7vLwRuJVz~pB6BJRHy~E1u9Va-vaaI05k2mfb~Sxk-CAbokBAPZRnlCE~SUaKy9oMpsng52fW5mLrBQBmPeupHZshvtUZ092tDTH1rjLikptX4EFhYcxAfcEs~yrTLRghUKpkrLU2K0JIToUCn0xGEduewbDphnnRQsZSgRnkFHdAkmW7U5vhBdqbEsm-HvsiwzHeMYL-0VVFG1EUXerr2eUtaZmJmyU9NDfXSyngDvHEjv8XKzCEi0ErFF9o6-NP4JLkNOpE4N~yPg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 5 Dez. 2019.

YU, L.; BATLLE, F.; CARRERA, J. Variations of waste unit weight during mechanical and degradation processes at landfills. **Waste Management and Research**, v. 29, n. 12, 2011, p. 1303–1315. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0734242x10394912. Acesso em: 12 Jul. 2018.

YUEN, S. T. S. Bioreactor landfills promoted by leachate recirculation: a full-scale study. **Laboratory Investigation**, v. 5, n. 11, 1999.

ZEKKOS, D.; D.BRAY, J.; RIEMER, M. F. Drained response of Municipal Solid Waste in Large-Scale Triaxial Shear Testing. **Waste management**, v. 32, n. 10, 2012, p. 1873–1885.

ZERO WASTE SCOTLAND. **The composition of household waste at the kerbside in 2014-15.** Methodology Document. United Kingdom - UK, 2017. Disponível em: http://www.zerowastescotland.org.uk/sites/default/files/Methodology - The composition of household waste at the kerbside in 2014-15.pdf. Acesso em: 27 Fev. 2018.

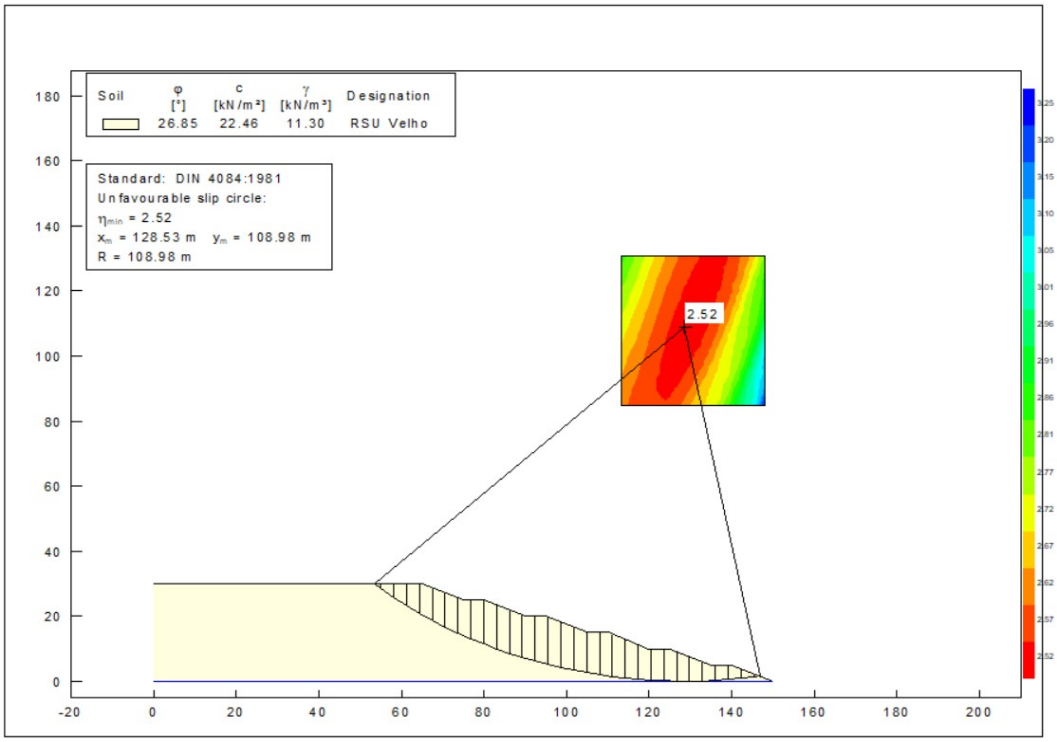
ZIEHMANN, G. Bilinear Model for Stability of Domestic Waste Landfills. *In*: International Symposium on Slope Stability Engineering - IS- Shikoku'99, Matsuyama, Japão. **Proceedings [...]**. Matsuyama, Japão: 1999. p. 853-858.

ZORNBERG, J. G.; Jernigan, B. L.; Sanglerat, T. R.; Cooley, B. H.. Retention of Free Liquids in Landfills Undergoing Vertical Expansion. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 125, n. 7, 1999, p. 583–594. Disponível em: http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291090-0241%281999%29125%3A7%28583%29. Acesso em: 6 Abr. 2018.

ANEXO A – GGU STABILITY

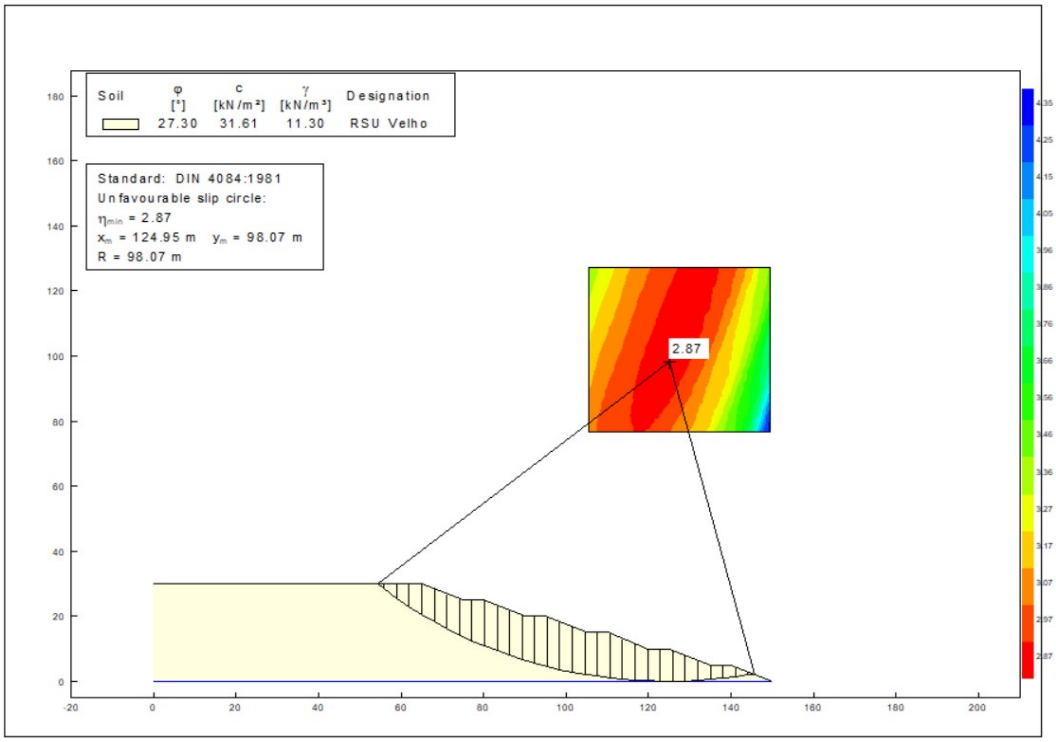
Nas Figuras A1 a A18 estão apresentados os resultados do software GGU Stability para a situação mais crítica de cada cenário analisado no Caso 1 – Médio Porte – onde são determinados o fator de segurança mínimo, a superfície potencial de ruptura, a localização do centro e o respectivo raio da superfície crítica de cada caso.

Figura A1 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 30 m e NA 0 – Matriz básica.



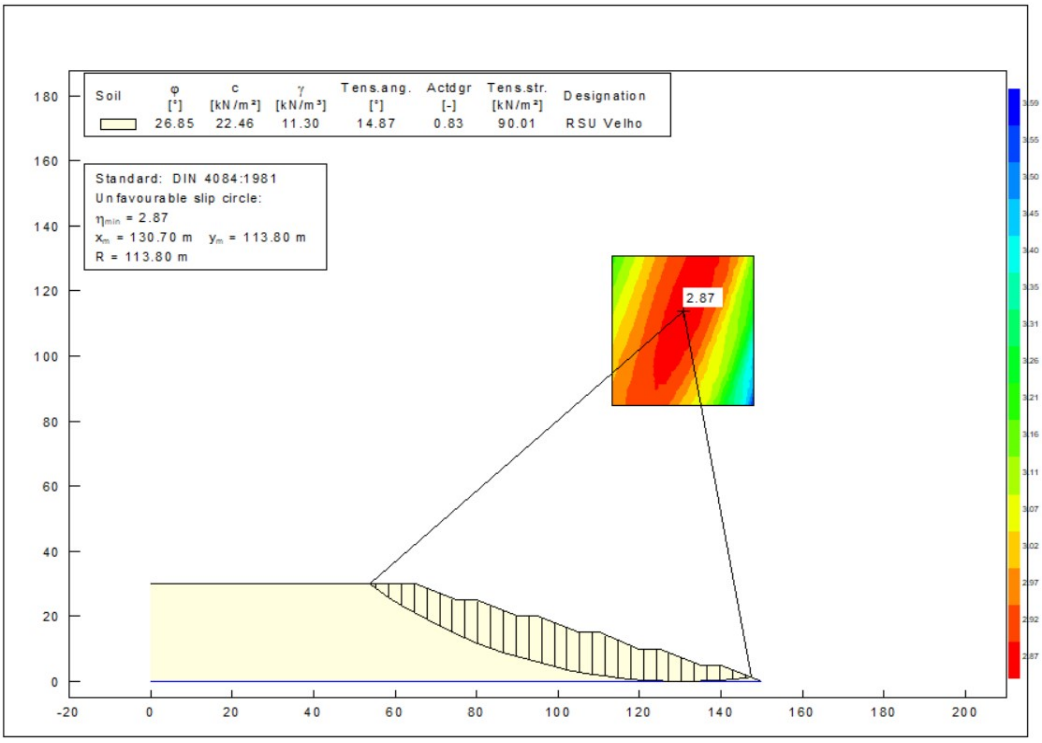
Fonte: A Autora (2019).

Figura A2 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 30 m e NA 0 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



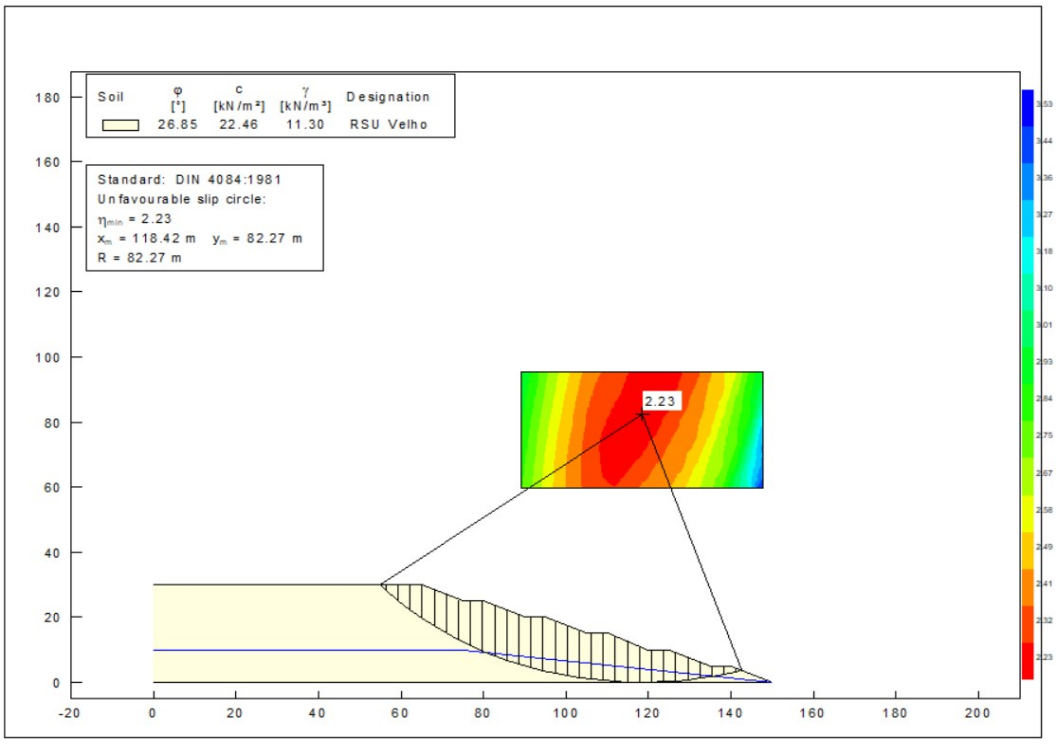
Fonte: A Autora (2019).

Figura A3 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 30 m e NA 0 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



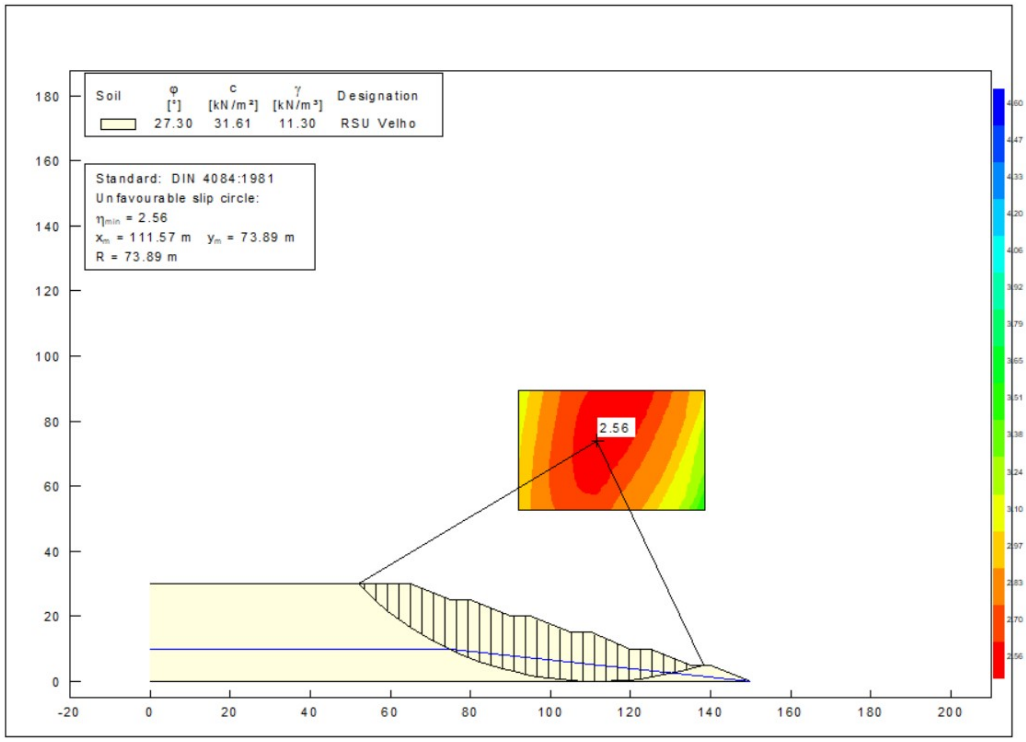
Fonte: A Autora (2019).

Figura A4 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 30 m e NA 1/3 – Matriz básica.



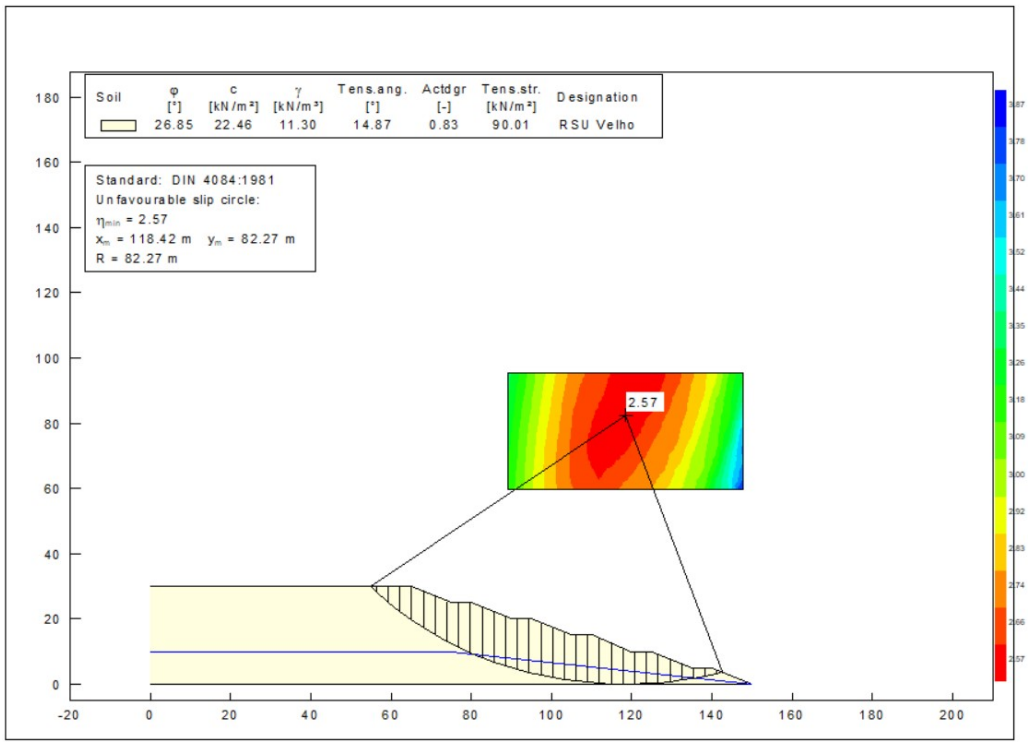
Fonte: A Autora (2019).

Figura A5 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 30 m e NA 1/3 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



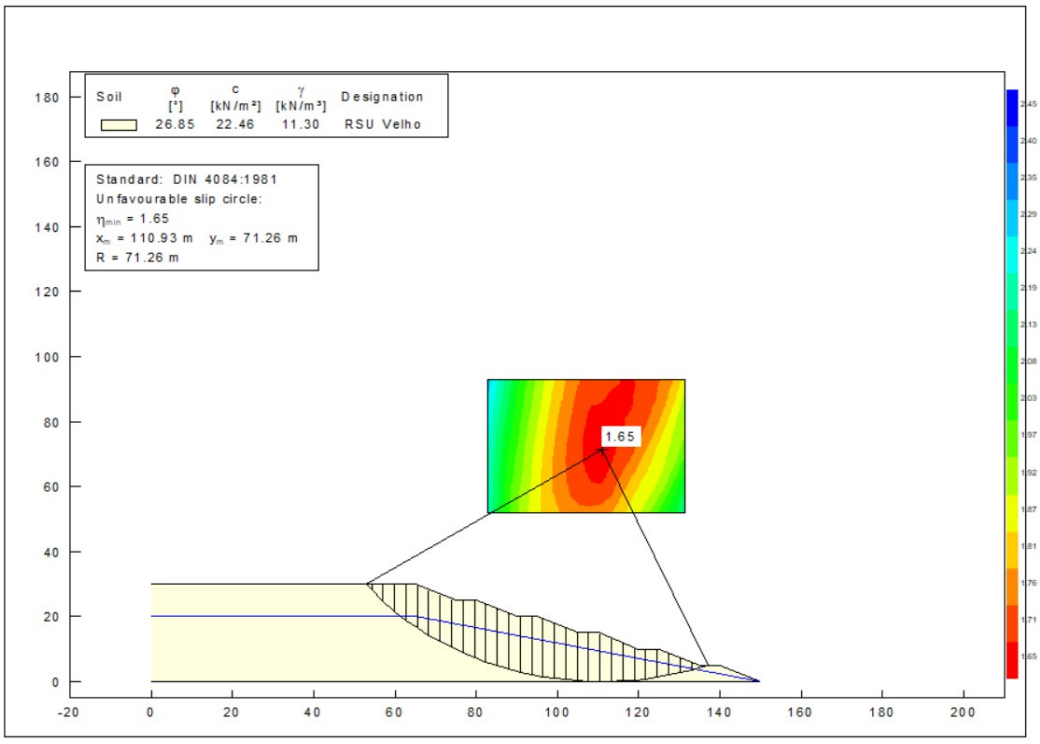
Fonte: A Autora (2019).

Figura A6 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 30 m e NA 1/3 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



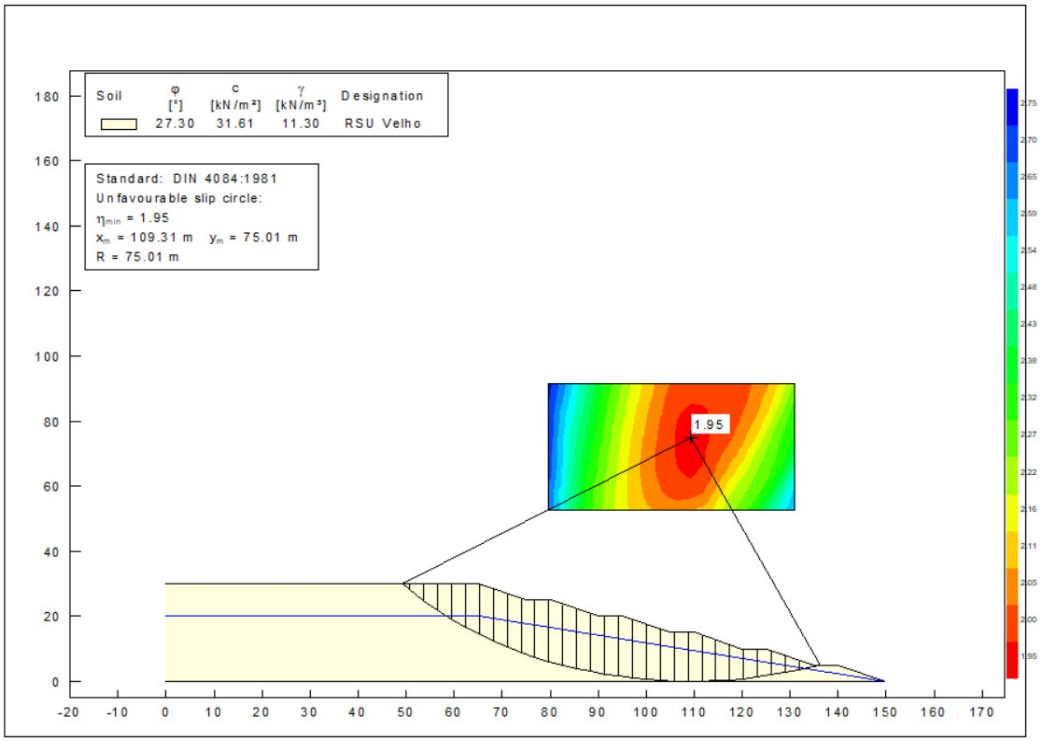
Fonte: A Autora (2019).

Figura A7 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 30 m e NA 2/3 – Matriz básica.



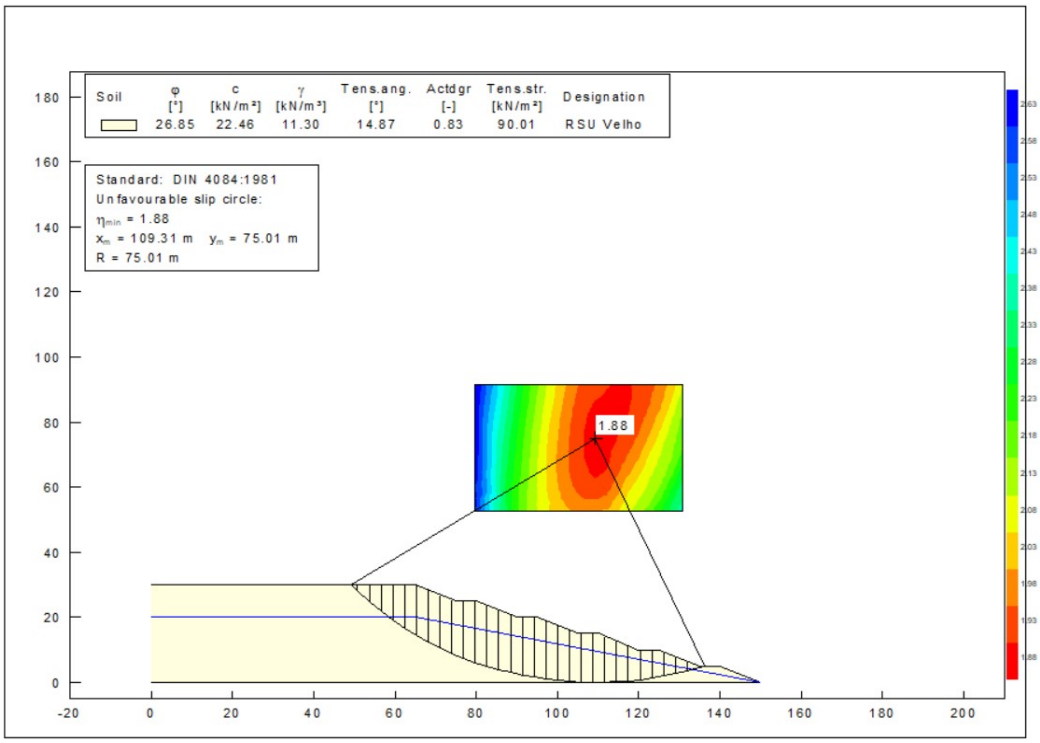
Fonte: A Autora (2019).

Figura A8 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 30 m e NA 2/3 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



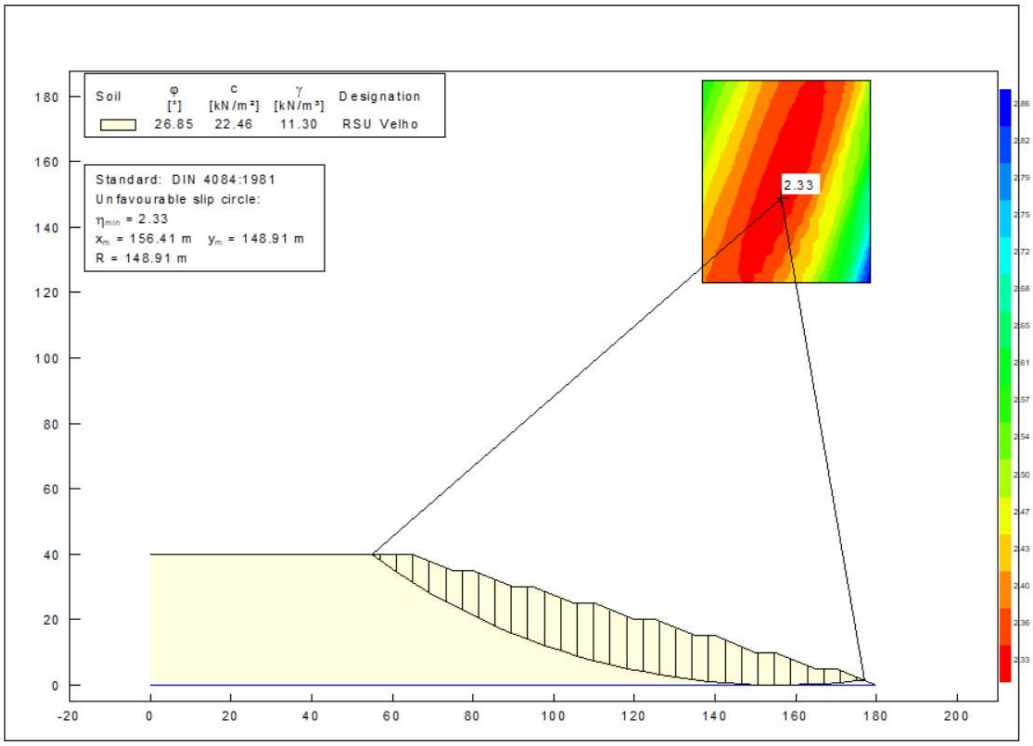
Fonte: A Autora (2019).

Figura A9 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 30 m e NA 2/3 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



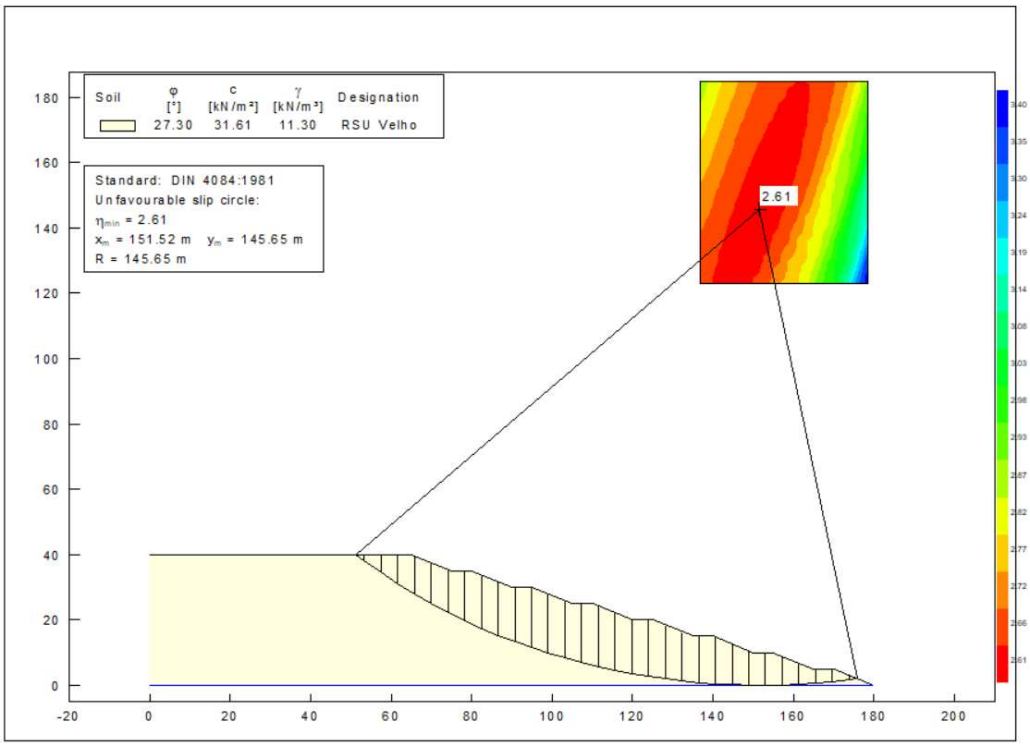
Fonte: A Autora (2019).

Figura A10 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 40 m e NA 0 – Matriz básica.



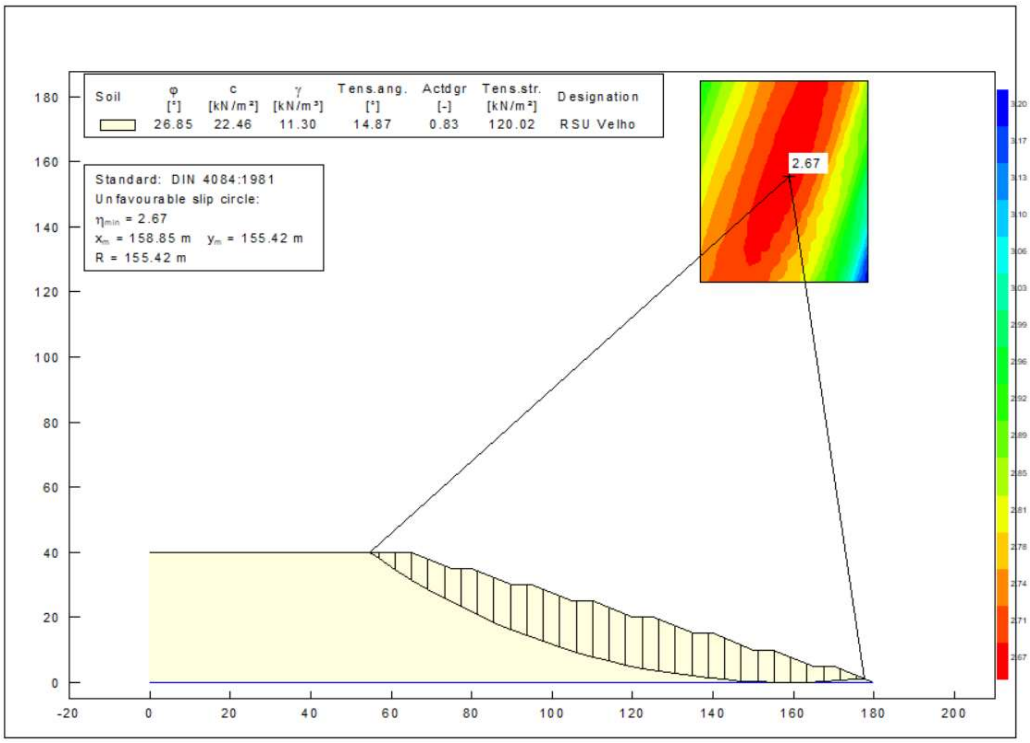
Fonte: A Autora (2019).

Figura A11 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 40 m e NA 0 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



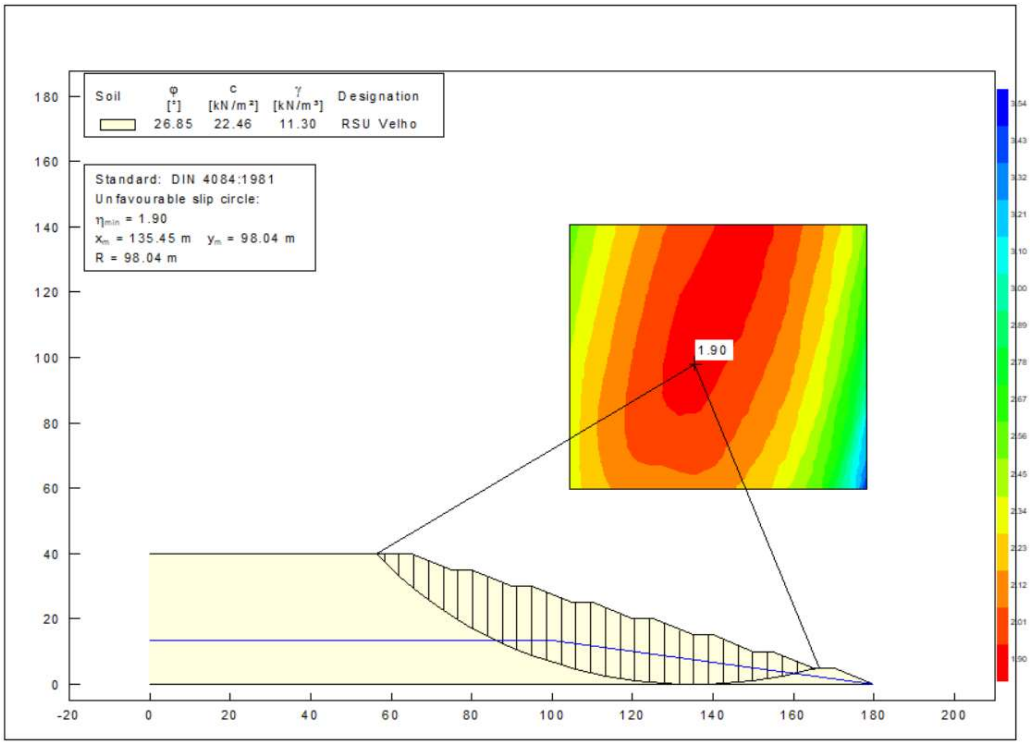
Fonte: A Autora (2019).

Figura A12 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 40 m e NA 0 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



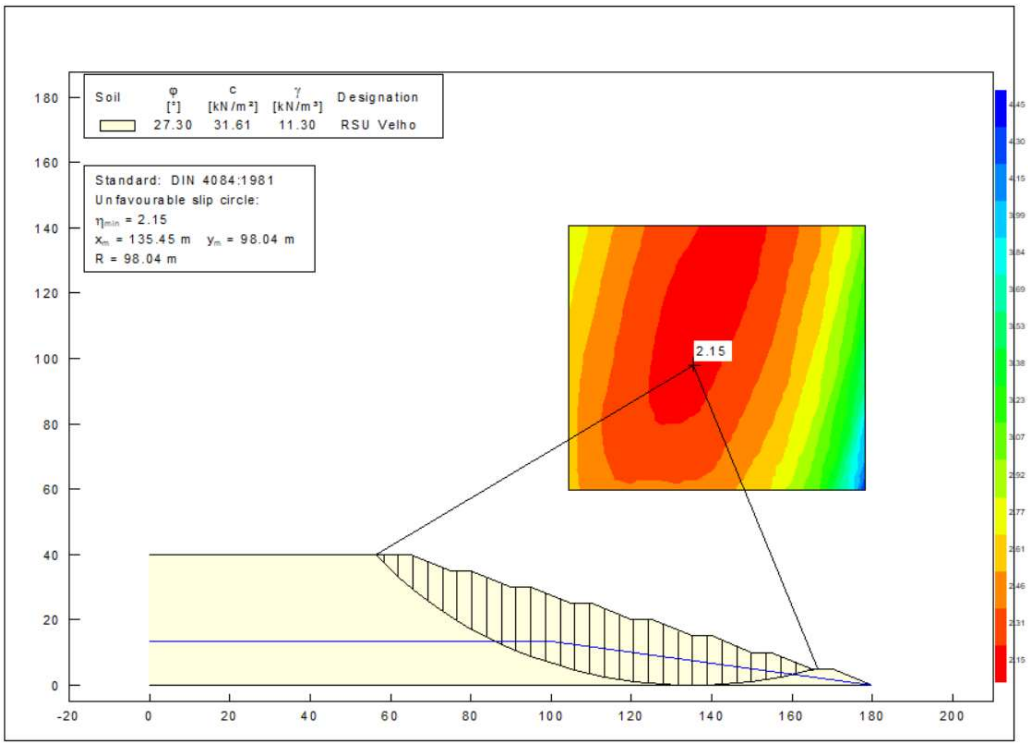
Fonte: A Autora (2019).

Figura A13 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 40 m e NA 1/3 – Matriz básica.



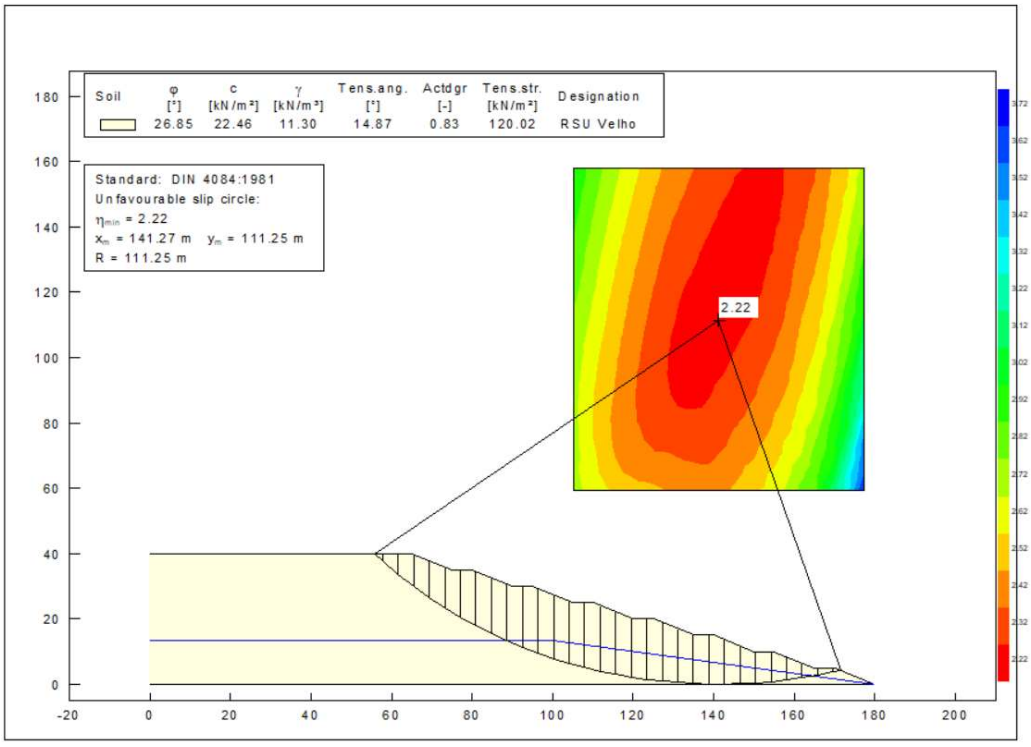
Fonte: A Autora (2019).

Figura A14 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 40 m e NA 1/3 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



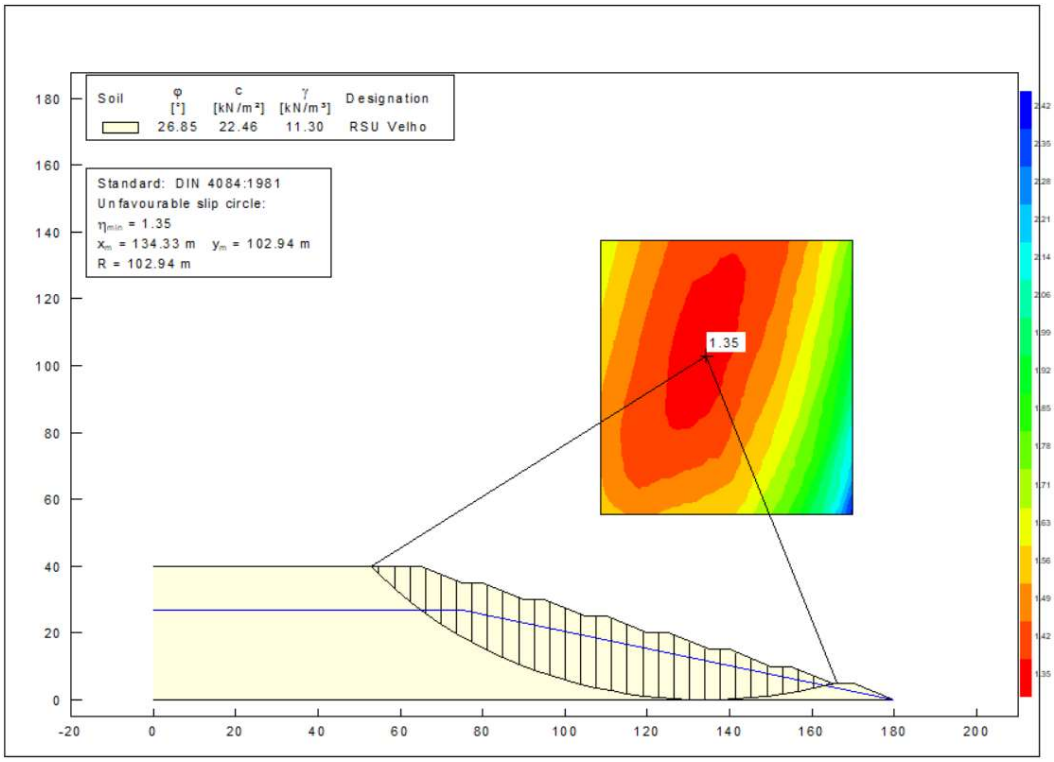
Fonte: A Autora (2019).

Figura A15 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 40 m e NA 1/3 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



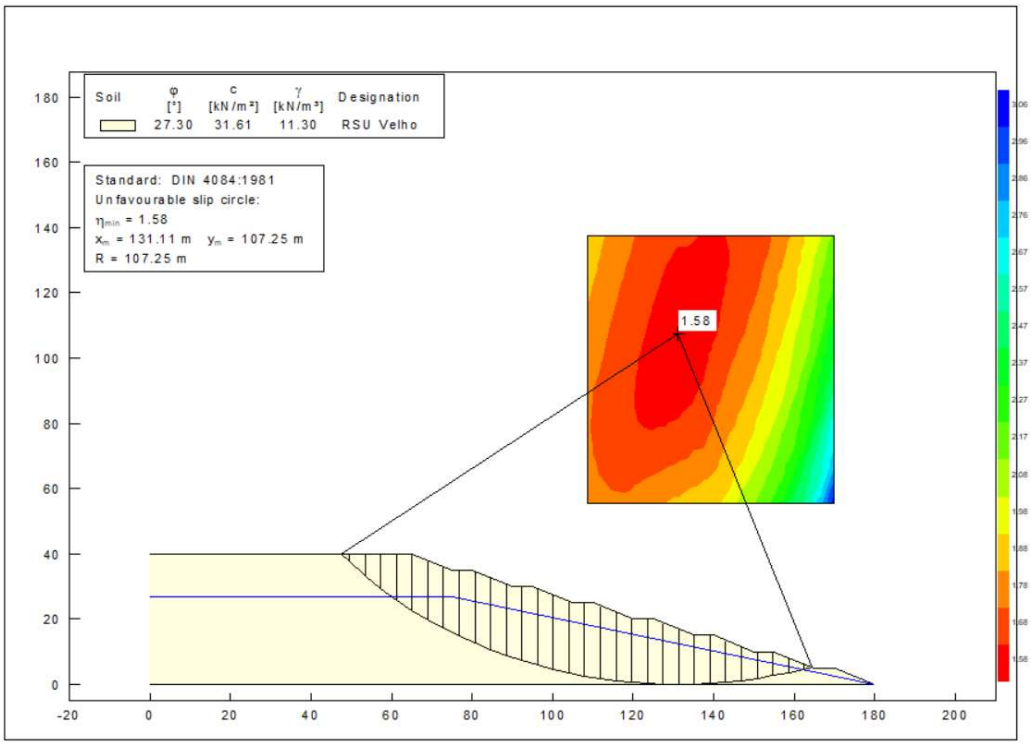
Fonte: A Autora (2019).

Figura A16 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 40 m e NA 2/3 – Matriz básica.



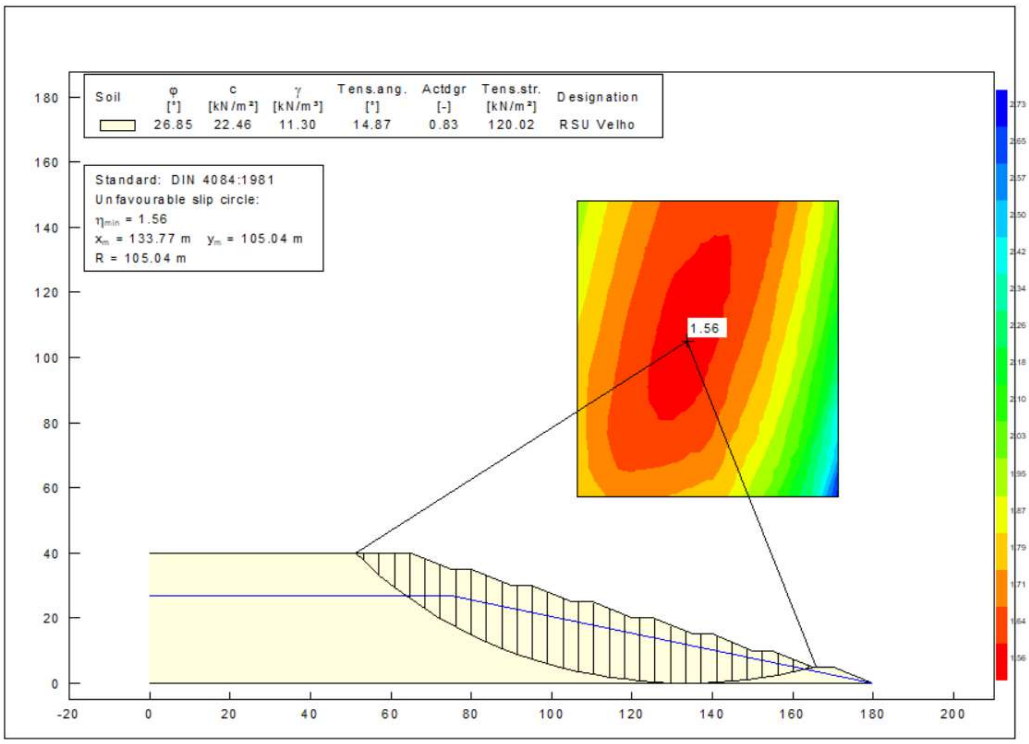
Fonte: A Autora (2019).

Figura A17 - Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 40 m e NA 2/3 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



Fonte: A Autora (2019).

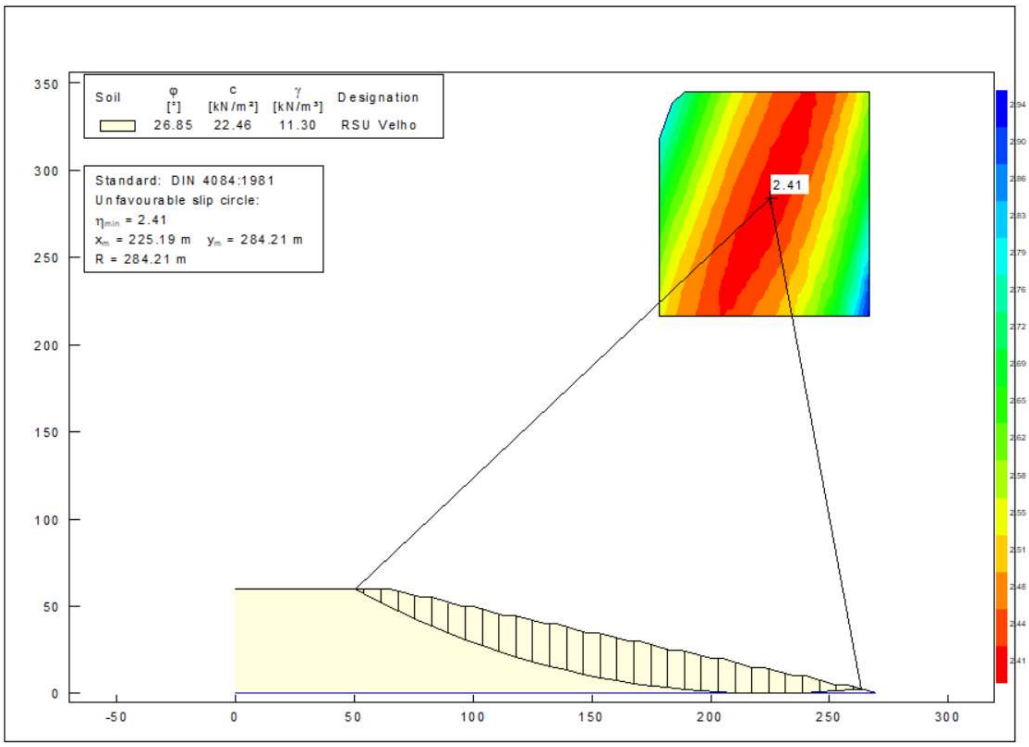
Figura A18 Análise de estabilidade para o Caso 1, altura de 40 m e NA 2/3 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



Fonte: A Autora (2019).

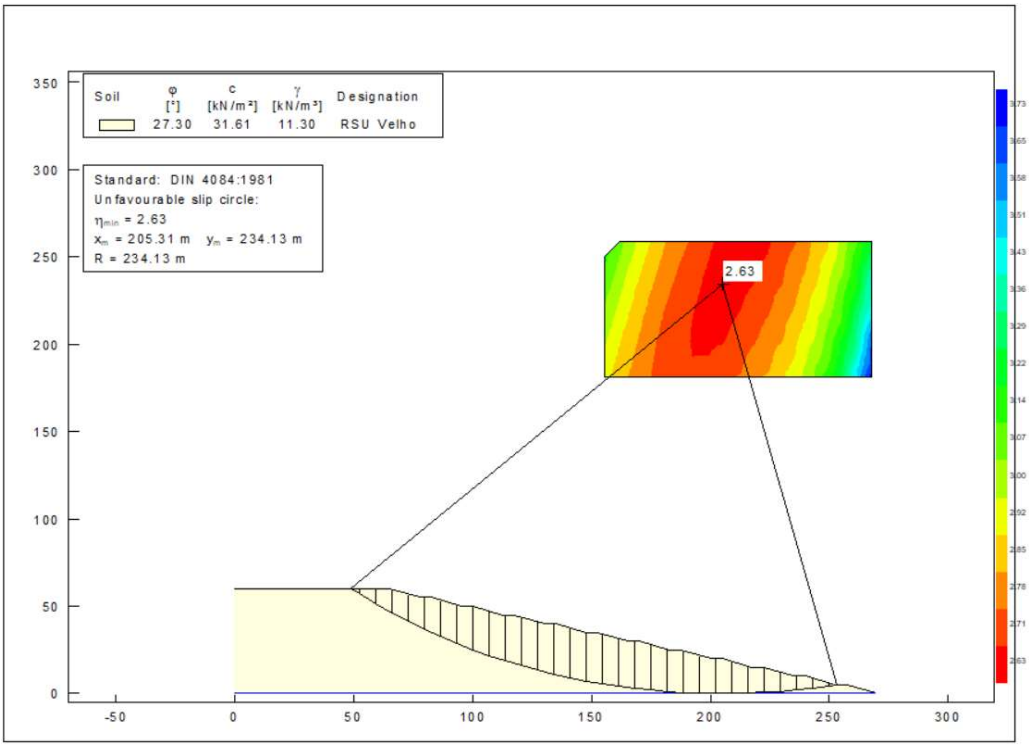
Os dados de saída do software GGU Stability são indicados nas Figuras A19 a A54 para a situação mais crítica de cada cenário analisado no Caso 2 – Grande Porte – onde são determinados o fator de segurança mínimo, a superfície potencial de ruptura, a localização do centro e o respectivo raio da superfície crítica de cada caso.

Figura A19 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,4 e NA 0 – Matriz básica.



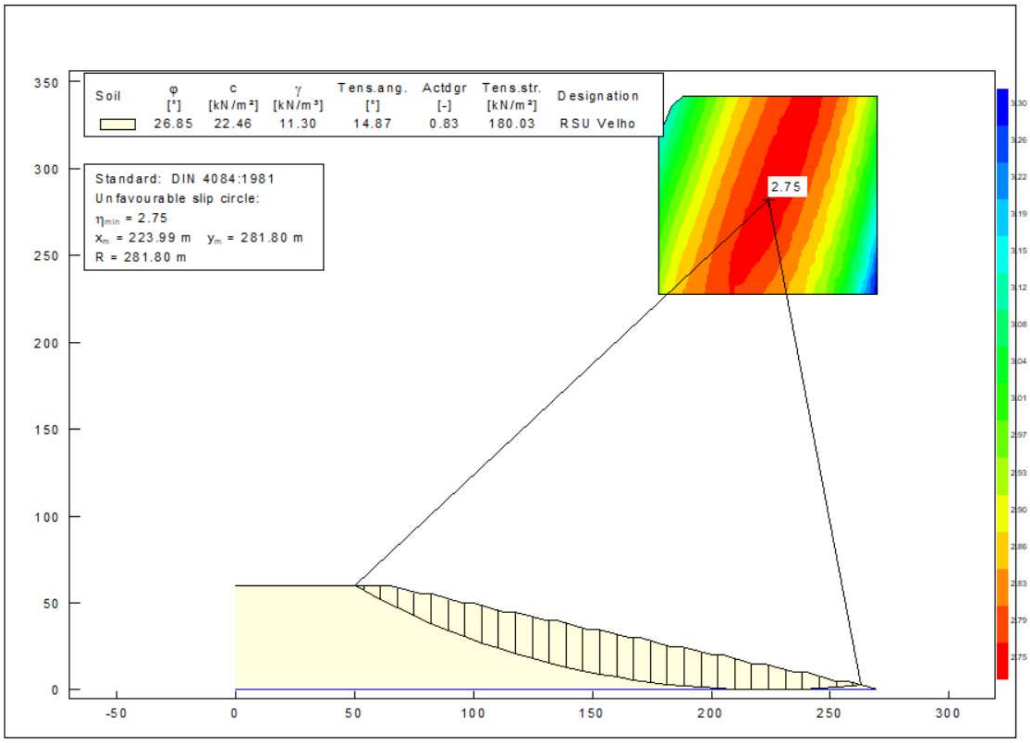
Fonte: A Autora (2019).

Figura A20 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,4 e NA 0 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



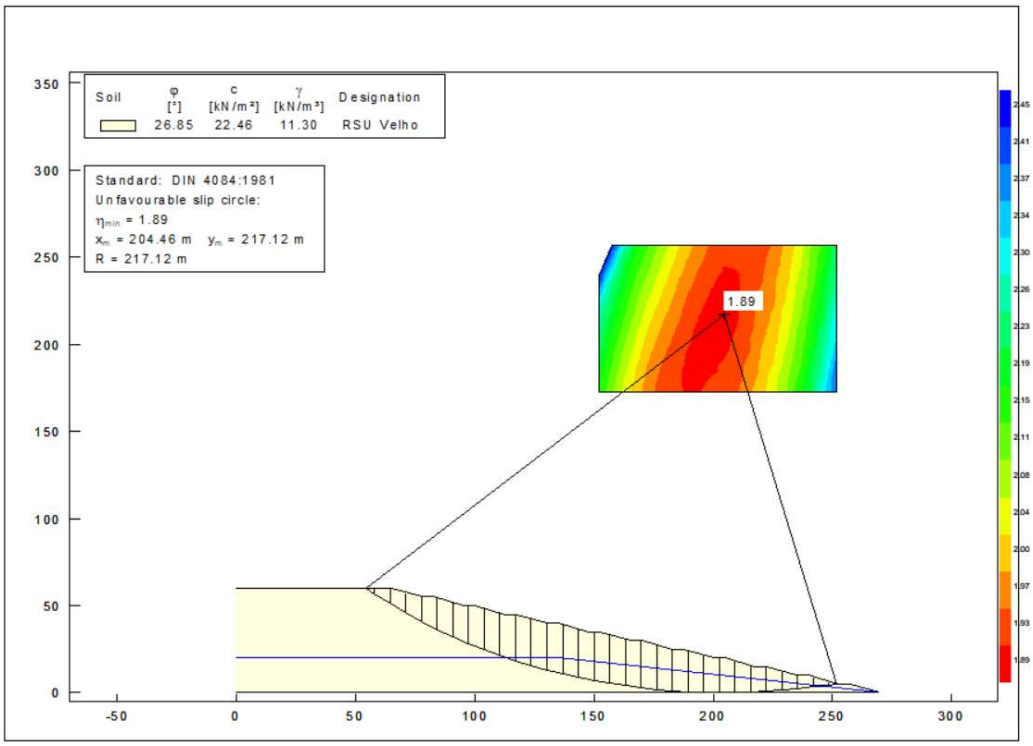
Fonte: A Autora (2019).

Figura A21 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,4 e NA 0 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



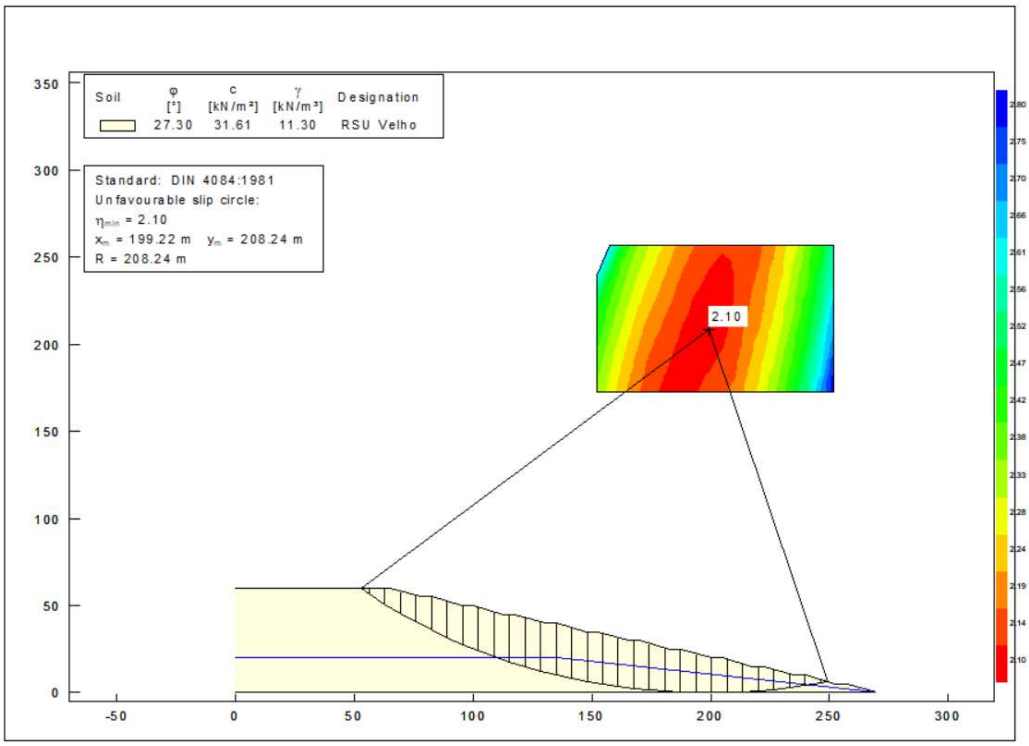
Fonte: A Autora (2019).

Figura A22 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,4 e NA 1/3 – Matriz básica.



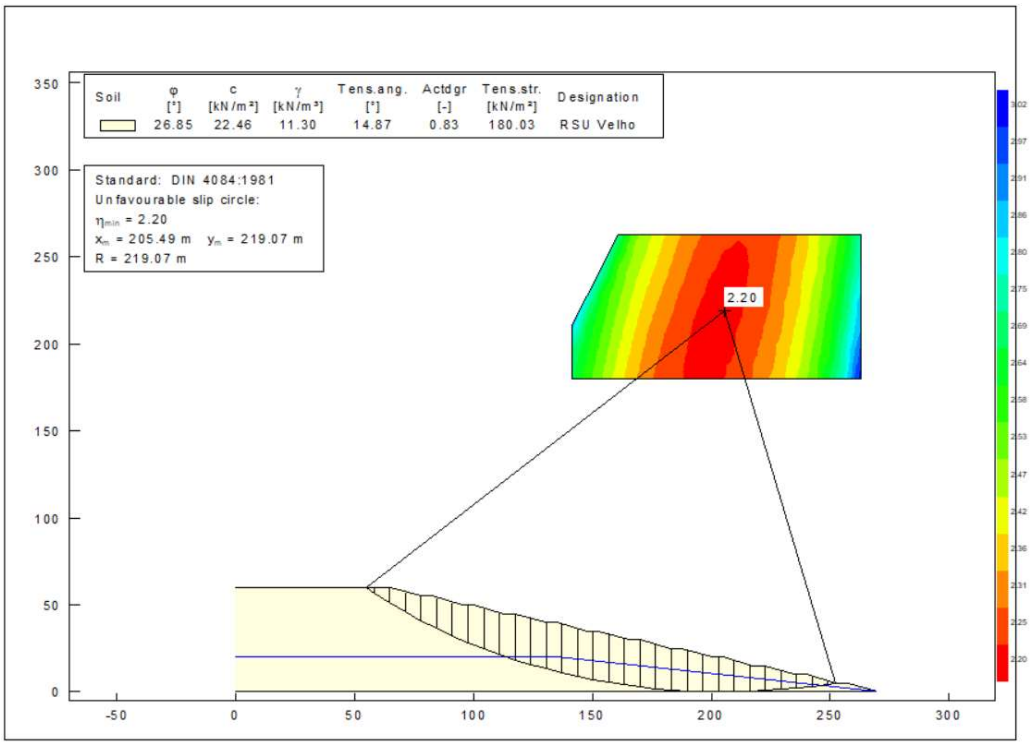
Fonte: A Autora (2019).

Figura A23 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,4 e NA 1/3 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



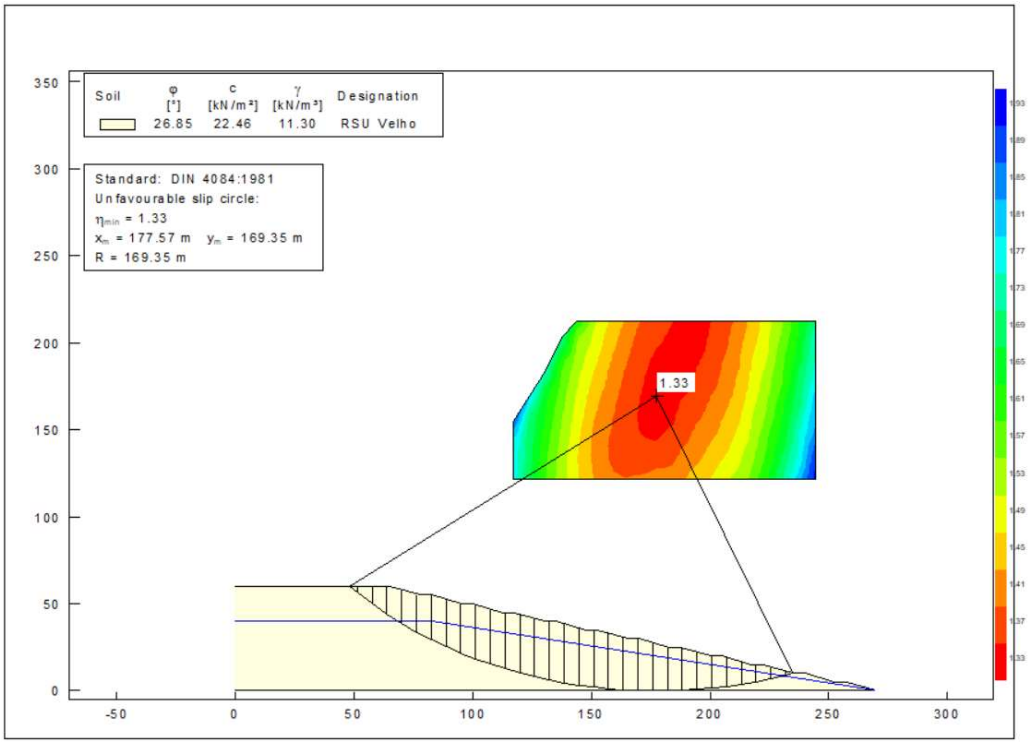
Fonte: A Autora (2019).

Figura A24 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,4 e NA 1/3 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



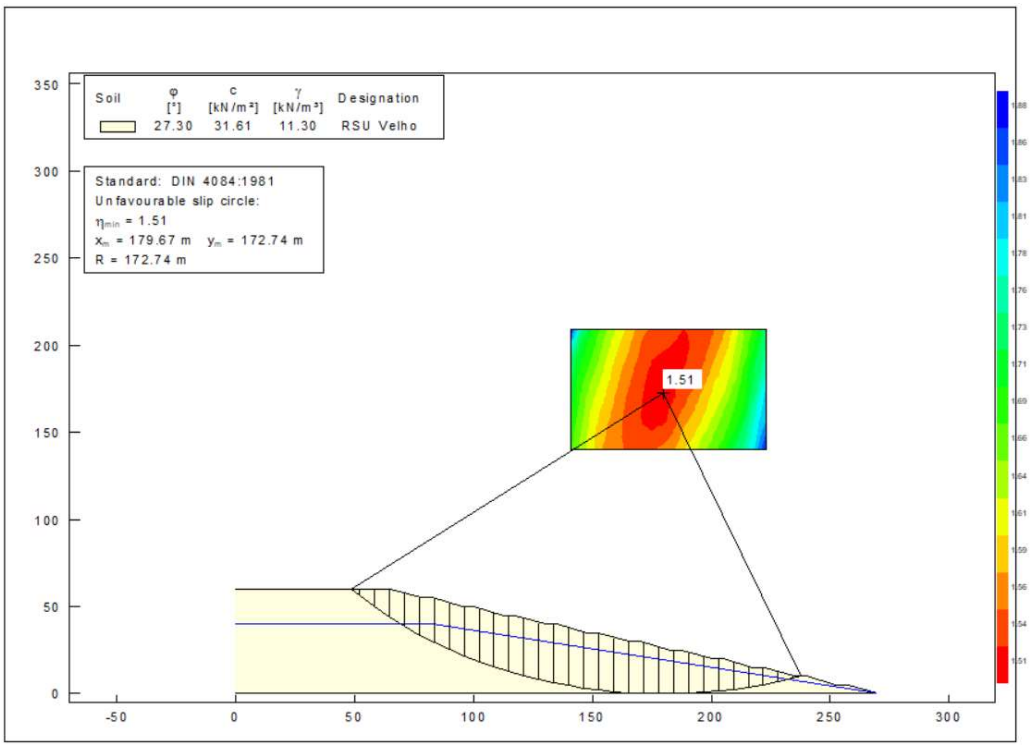
Fonte: A Autora (2019).

Figura A25 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,4 e NA 2/3 – Matriz básica.



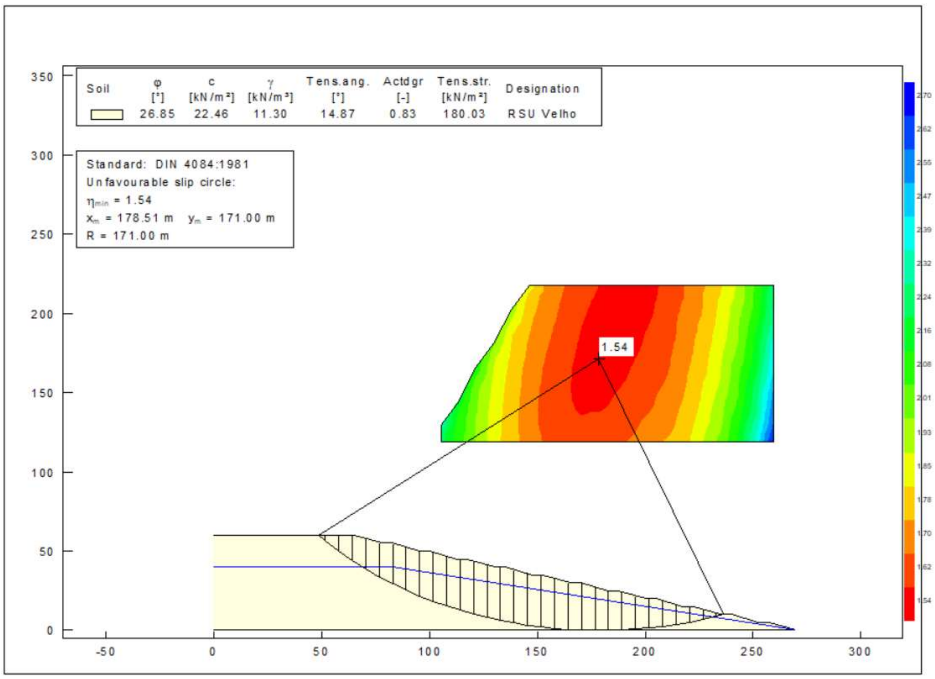
Fonte: A Autora (2019).

Figura A26 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,4 e NA 2/3 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



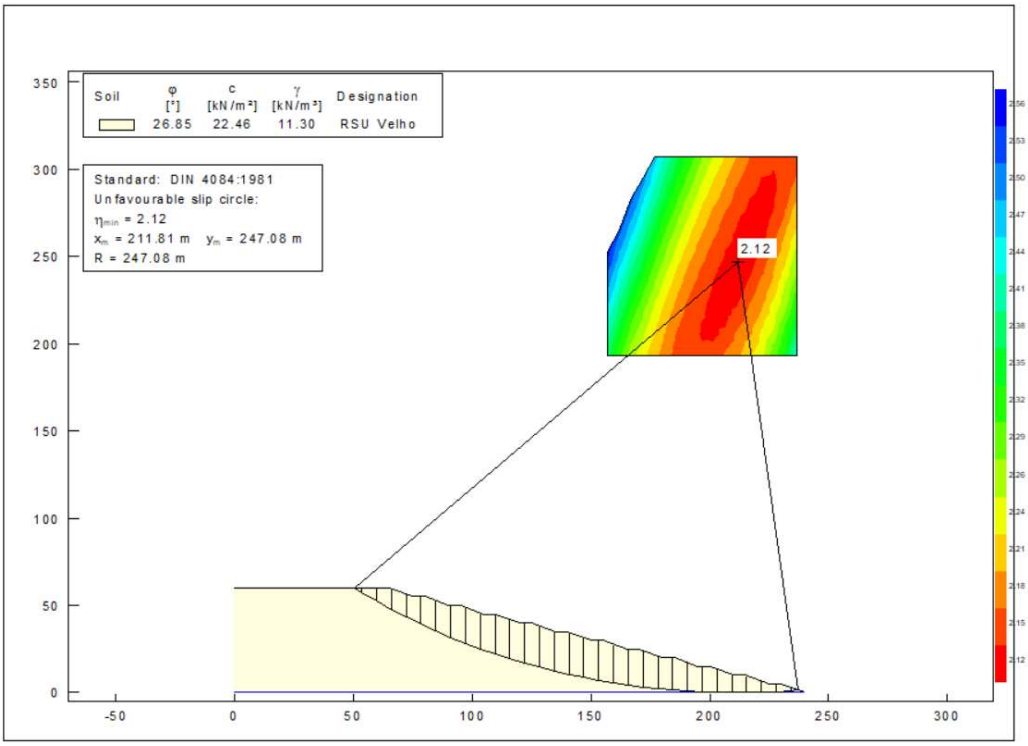
Fonte: A Autora (2019).

Figura A27 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,4 e NA 2/3 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



Fonte: A Autora (2019).

Figura A28 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,5 e NA 0 – Matriz básica.



Fonte: A Autora (2019).

Figura A29 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,5 e NA 0 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.

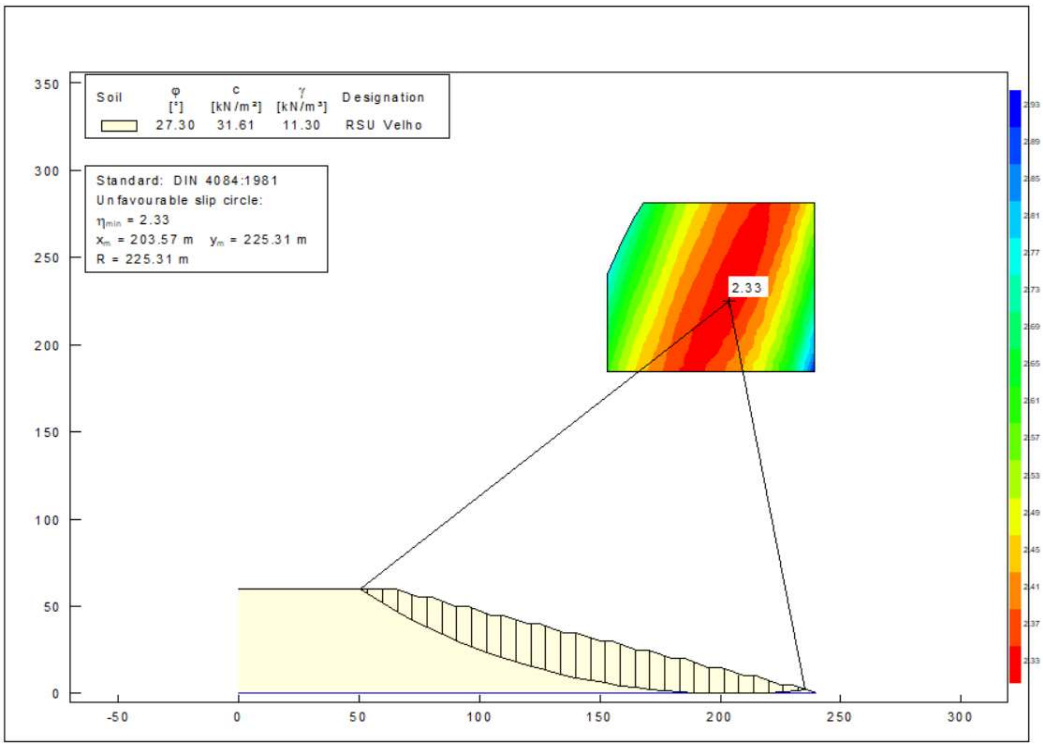
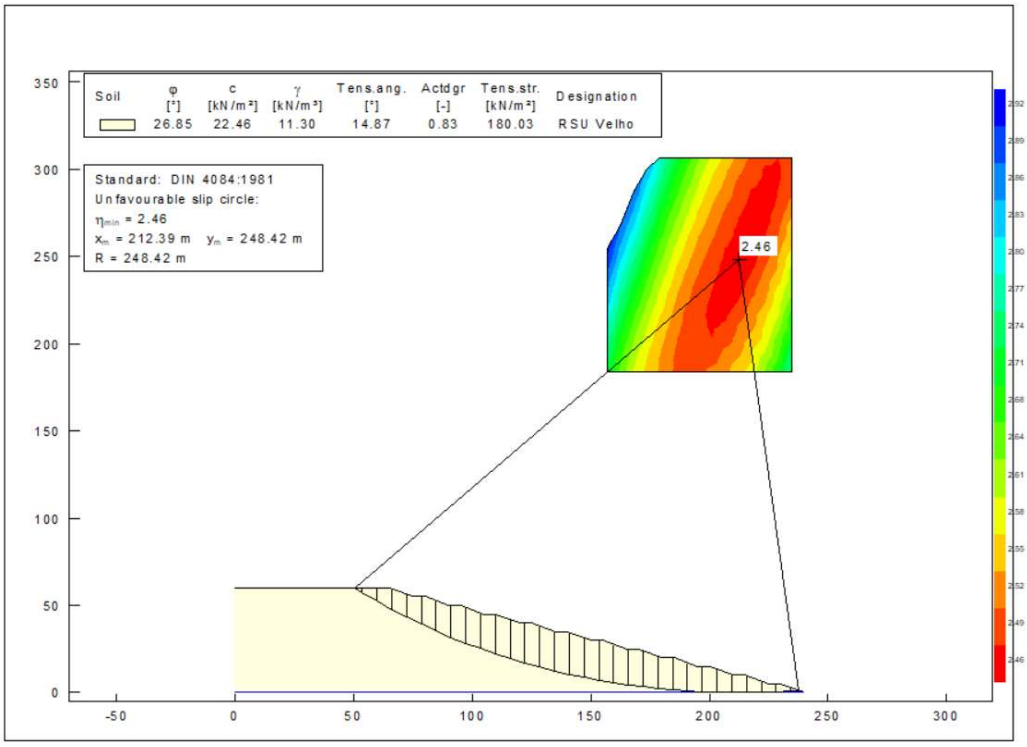
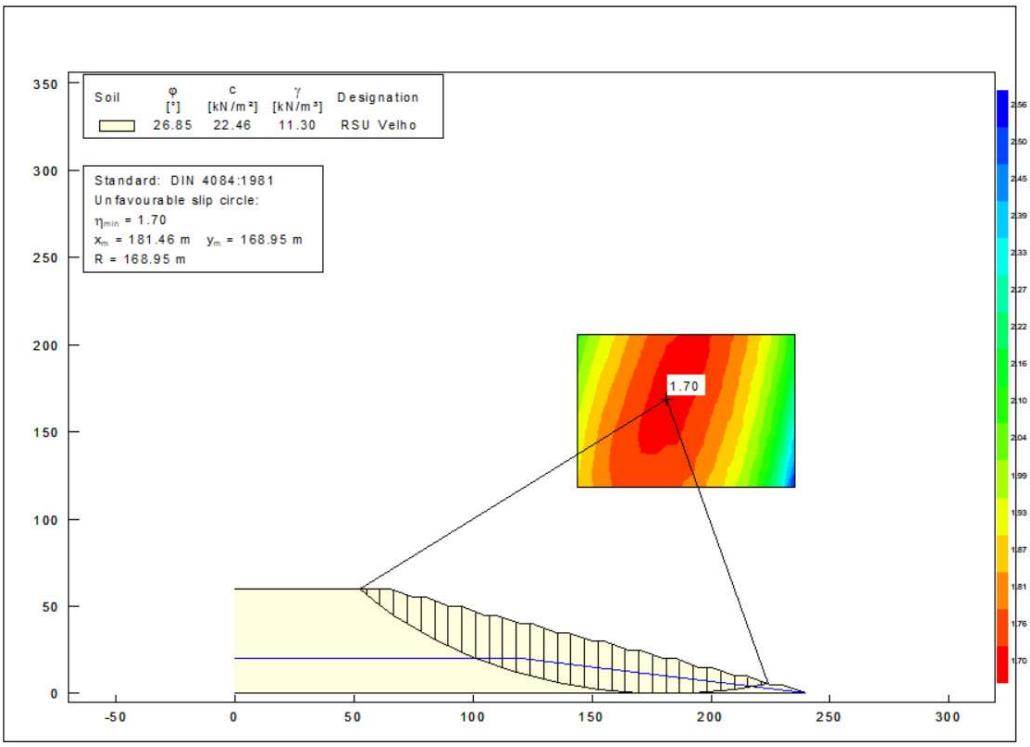


Figura A30 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,5 e NA 0 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



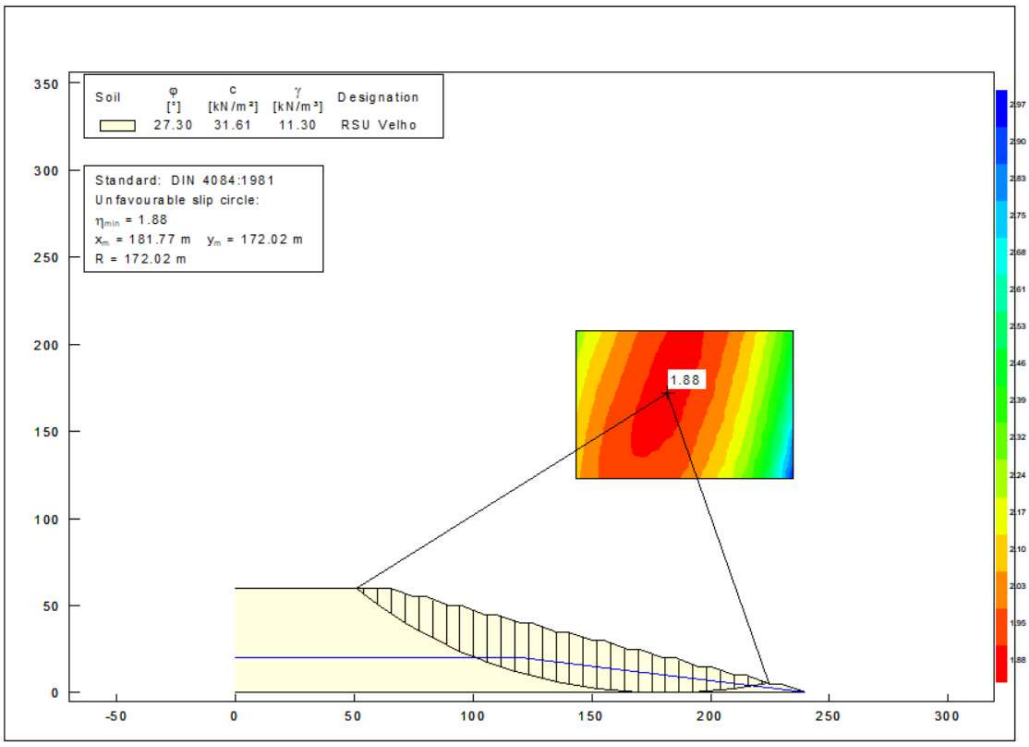
Fonte: A Autora (2019).

Figura A31 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,5 e NA 1/3 – Matriz básica.



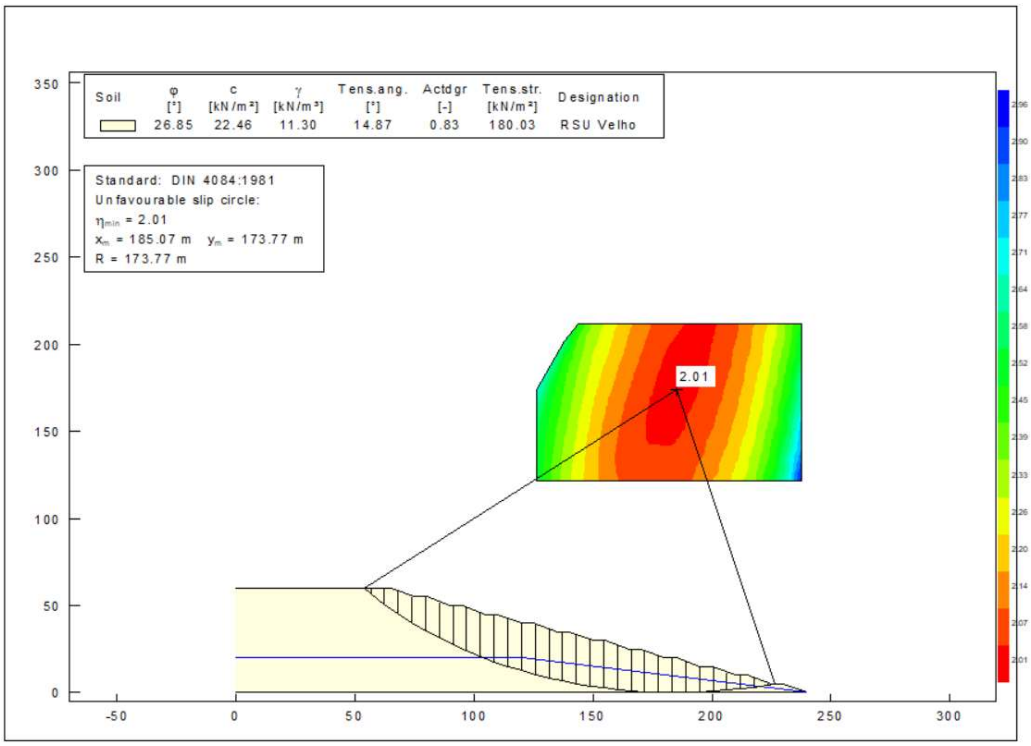
Fonte: A Autora (2019).

Figura A32 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,5 e NA 1/3 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



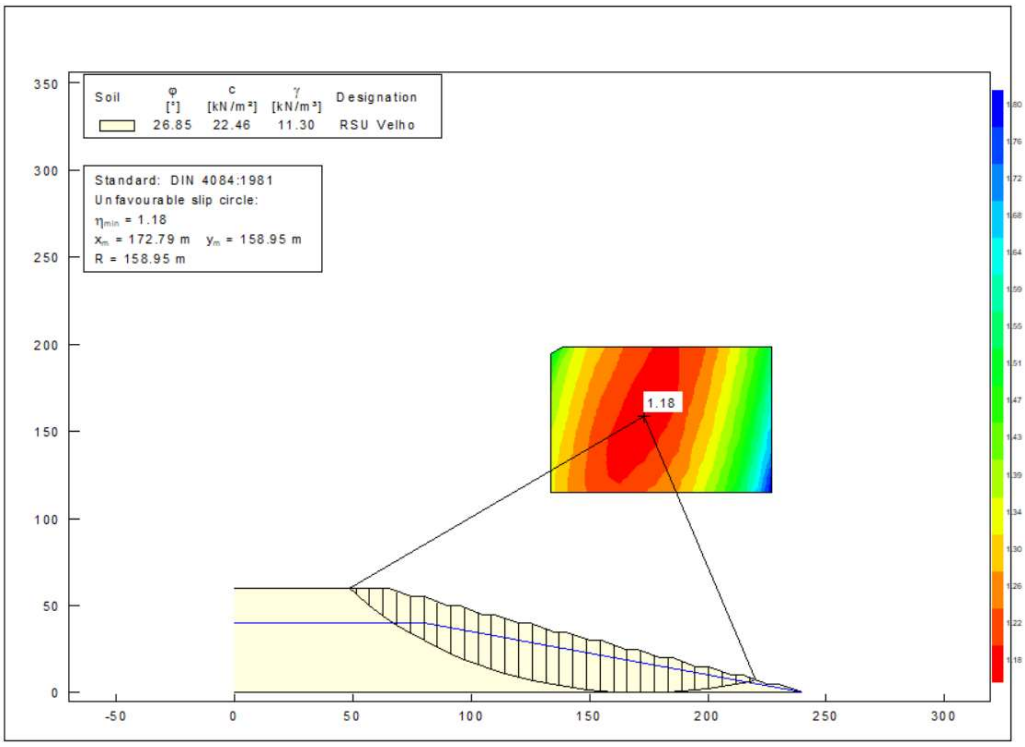
Fonte: A Autora (2019).

Figura A33 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,5 e NA 1/3 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



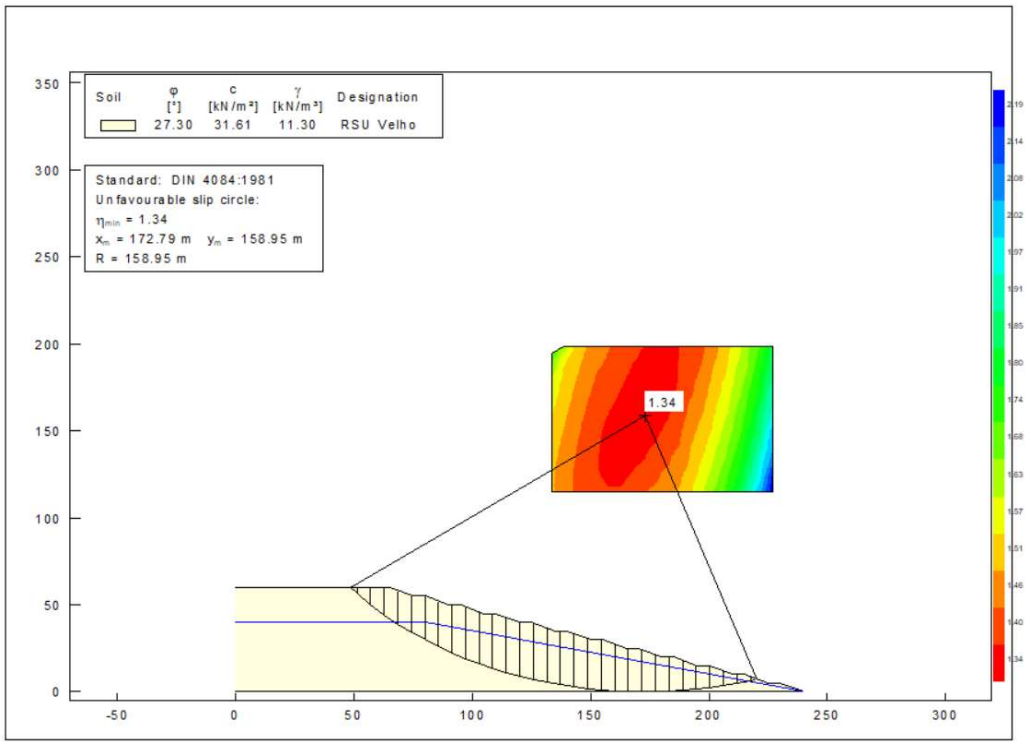
Fonte: A Autora (2019).

Figura A34 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,5 e NA 2/3 – Matriz básica.



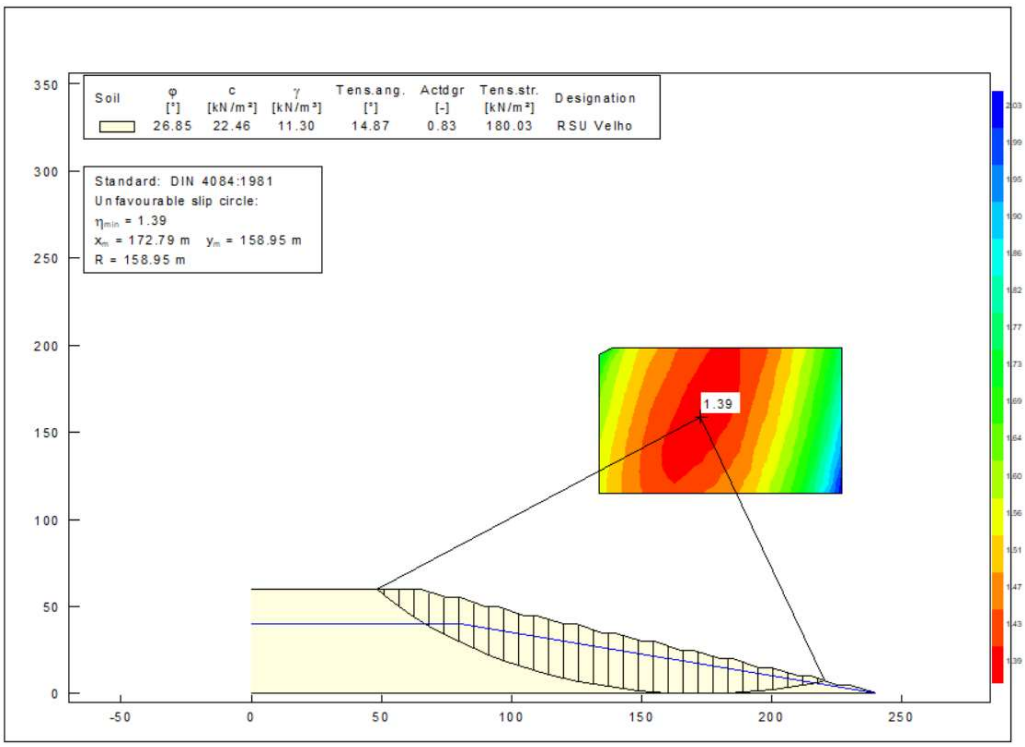
Fonte: A Autora (2019).

Figura A35 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,5 e NA 2/3 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



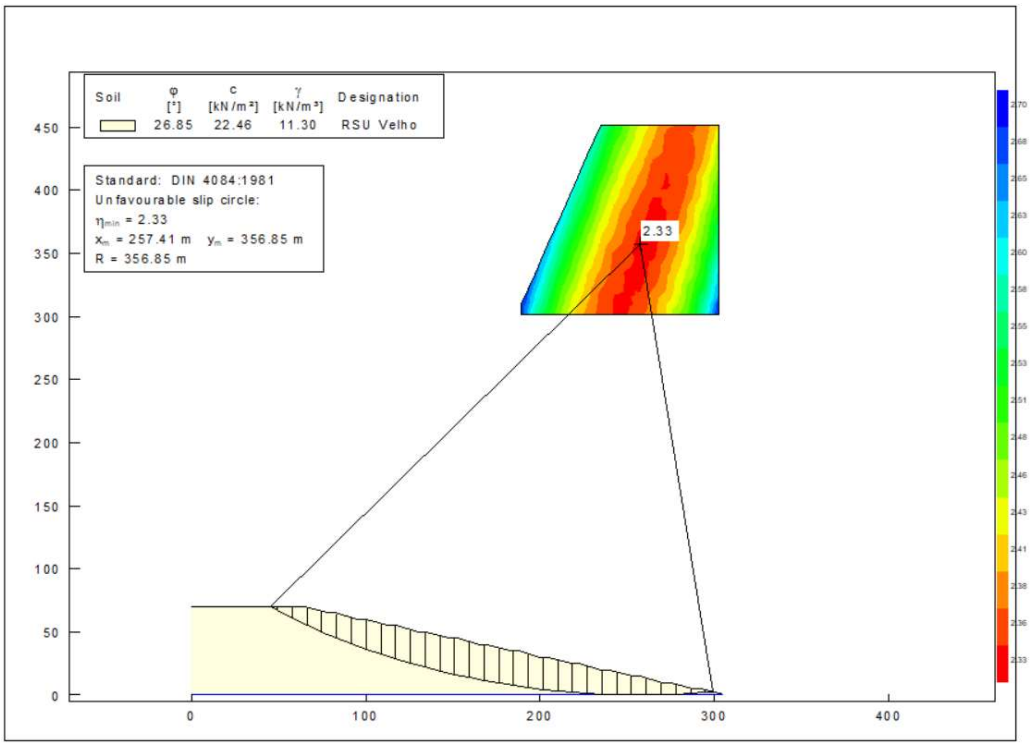
Fonte: A Autora (2019).

Figura A36 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 60 m, inclinação de 0,5 e NA 2/3 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



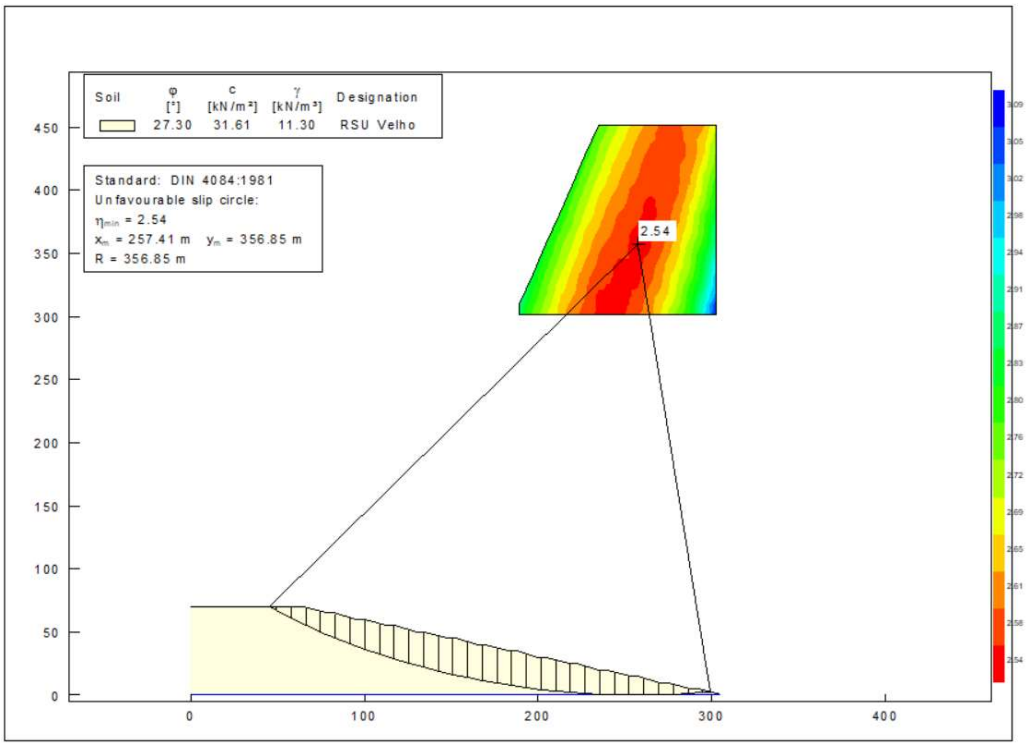
Fonte: A Autora (2019).

Figura A37 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,4 e NA 0 – Matriz básica.



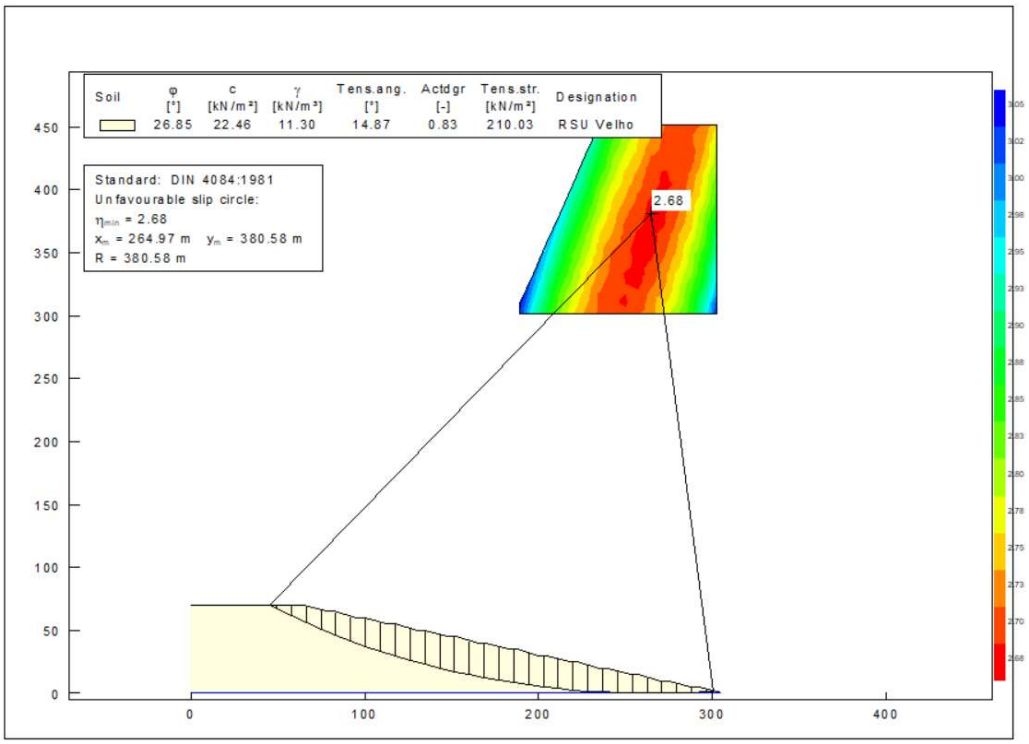
Fonte: A Autora (2019).

Figura A38 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,4 e NA 0 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



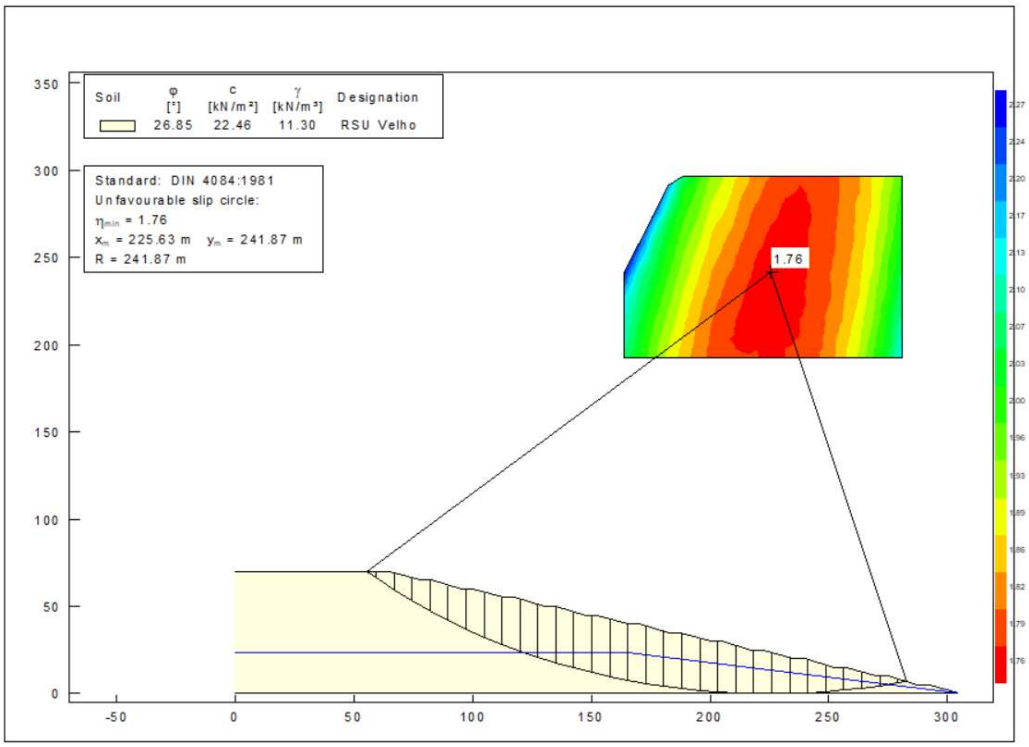
Fonte: A Autora (2019).

Figura A39 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,4 e NA 0 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



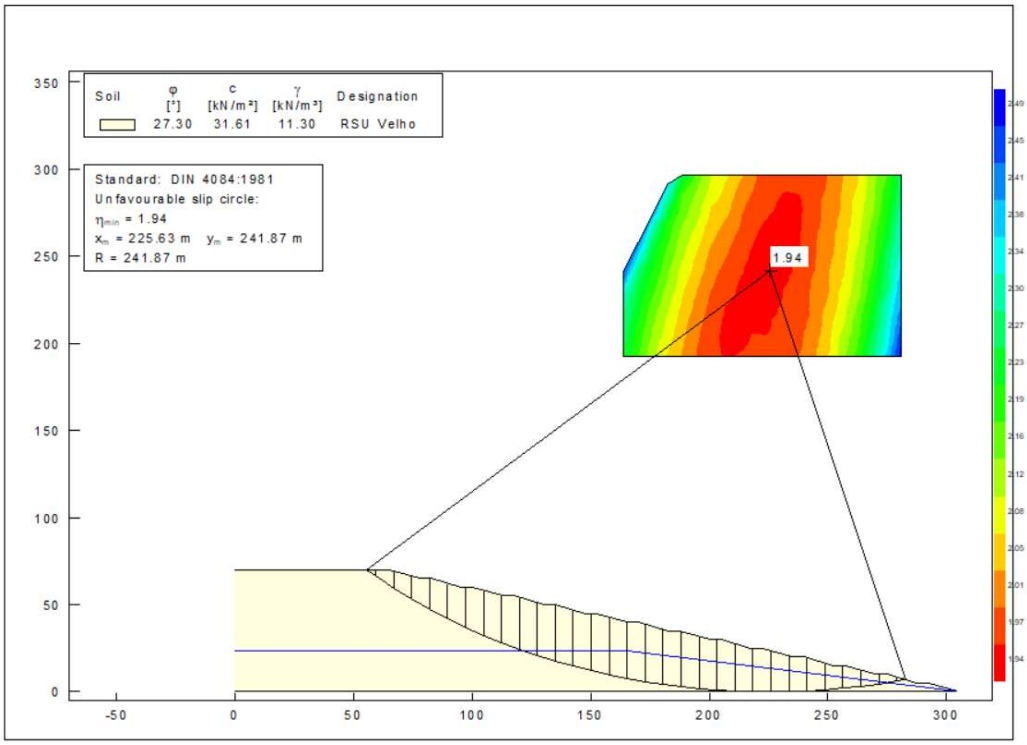
Fonte: A Autora (2019).

Figura A40 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,4 e NA 1/3 – Matriz básica.



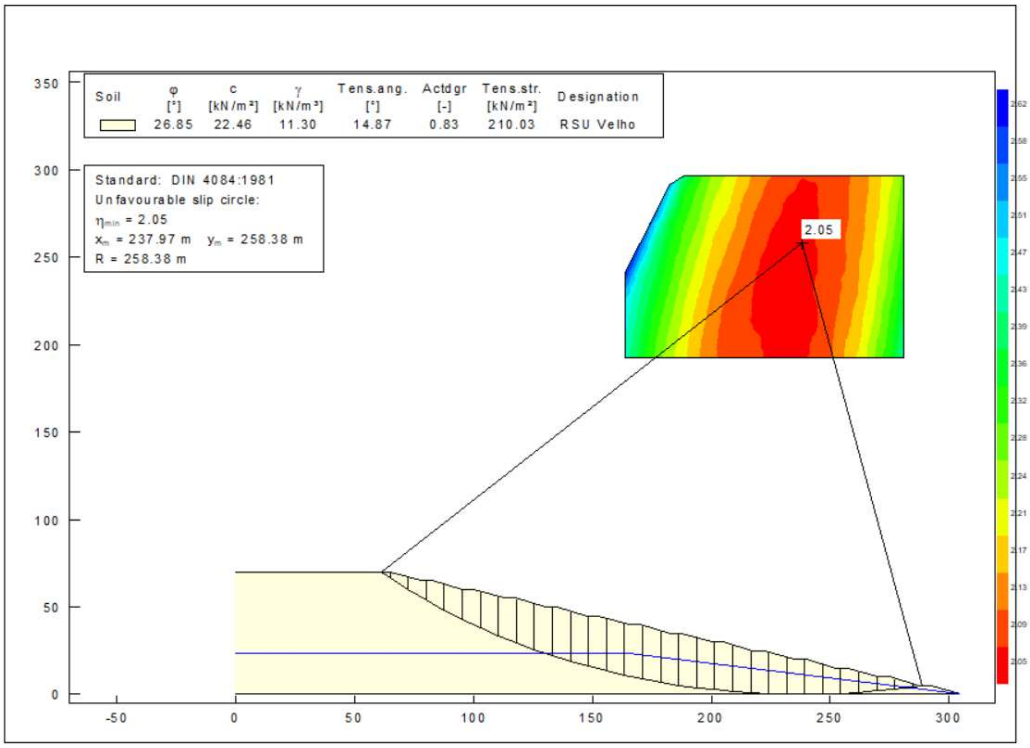
Fonte: A Autora (2019).

Figura A41 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,4 e NA 1/3 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



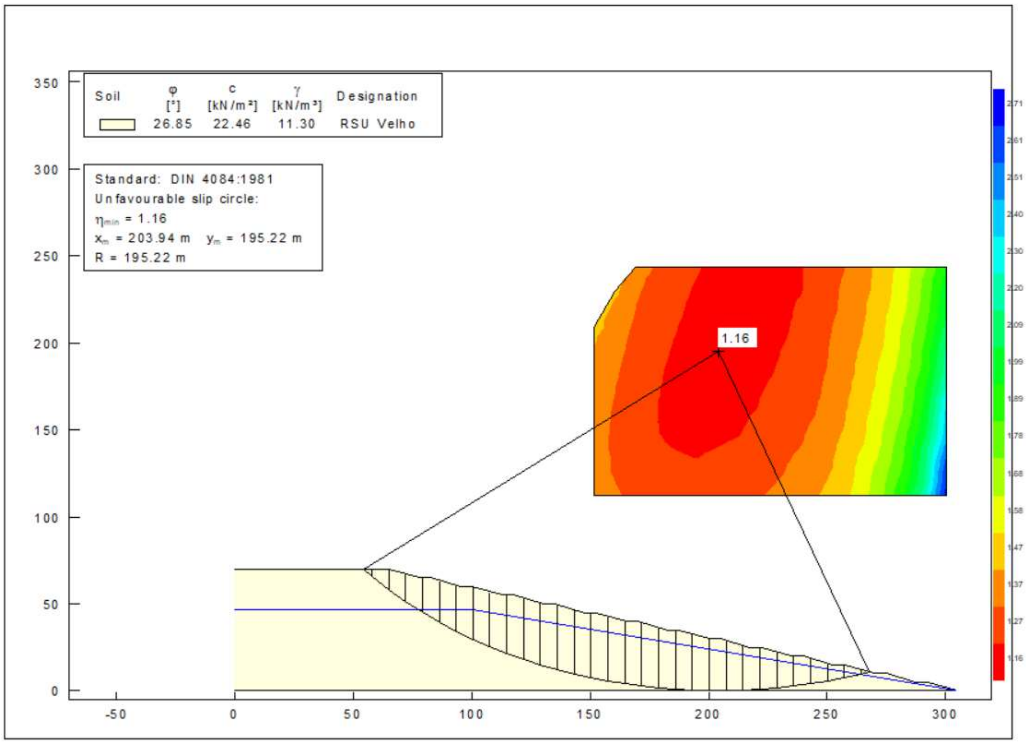
Fonte: A Autora (2019).

Figura A42 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,4 e NA 1/3 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



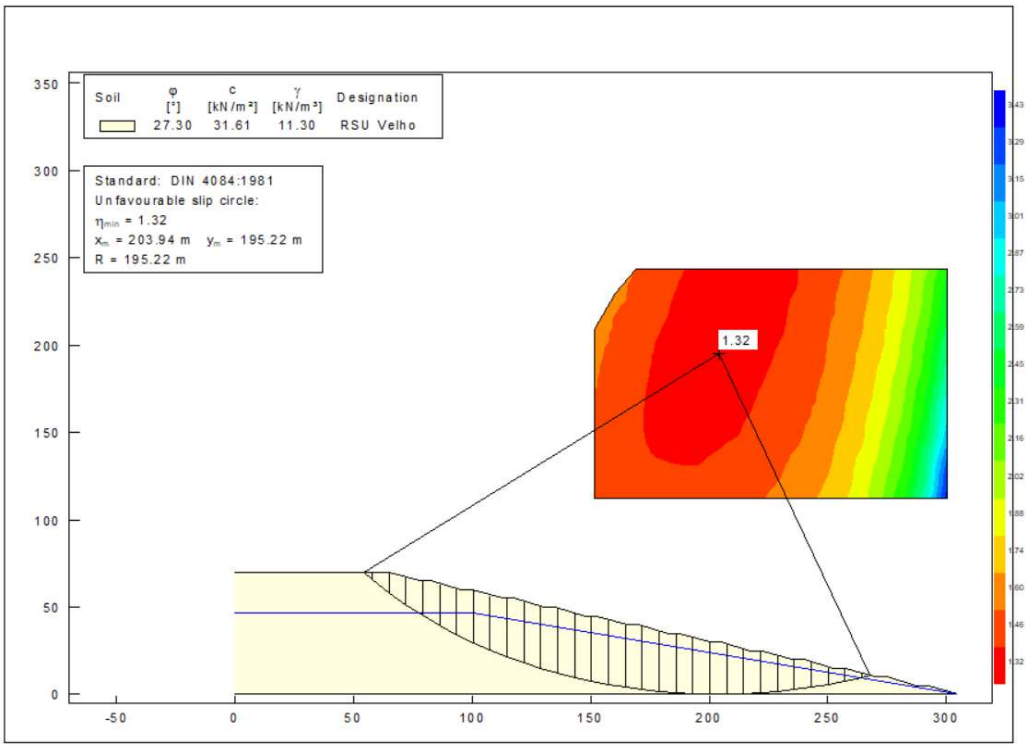
Fonte: A Autora (2019).

Figura A43 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,4 e NA 2/3 – Matriz básica.



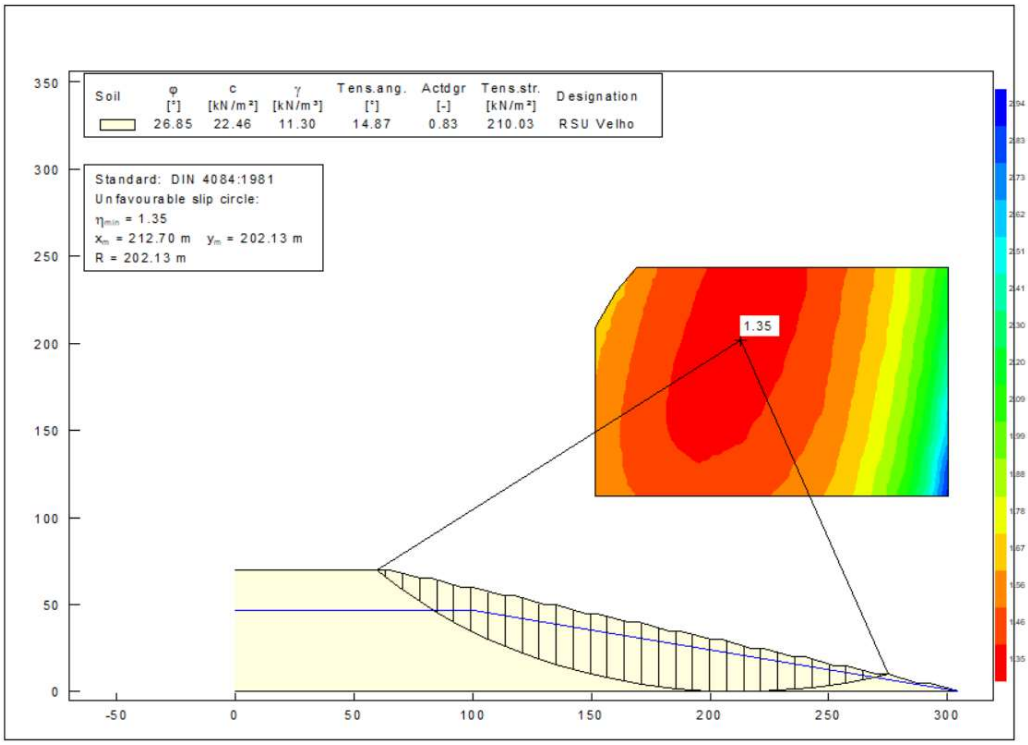
Fonte: A Autora (2019).

Figura A44 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,4 e NA 2/3 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



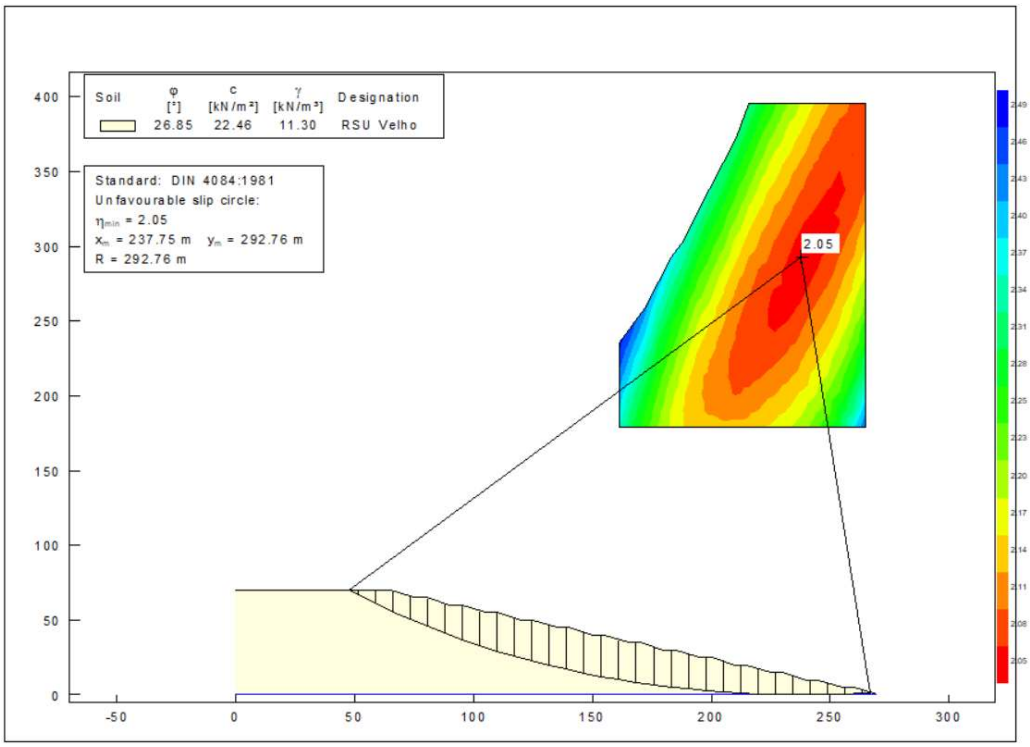
Fonte: A Autora (2019).

Figura A45 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,4 e NA 2/3 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



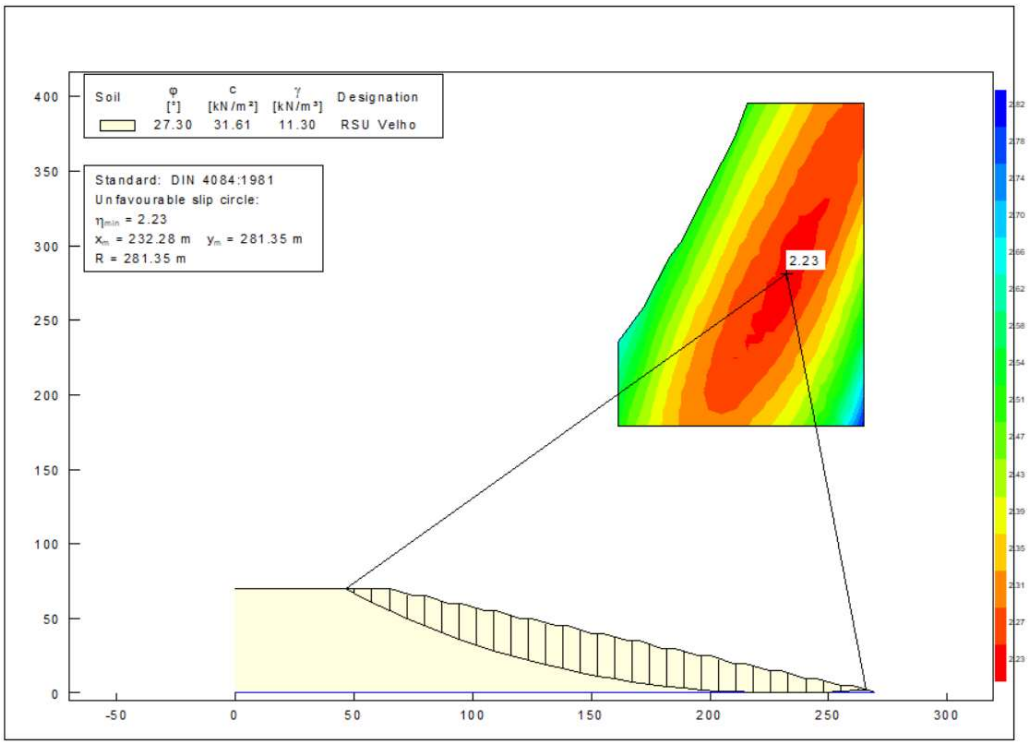
Fonte: A Autora (2019).

Figura A46 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,5 e NA 0 – Matriz básica.



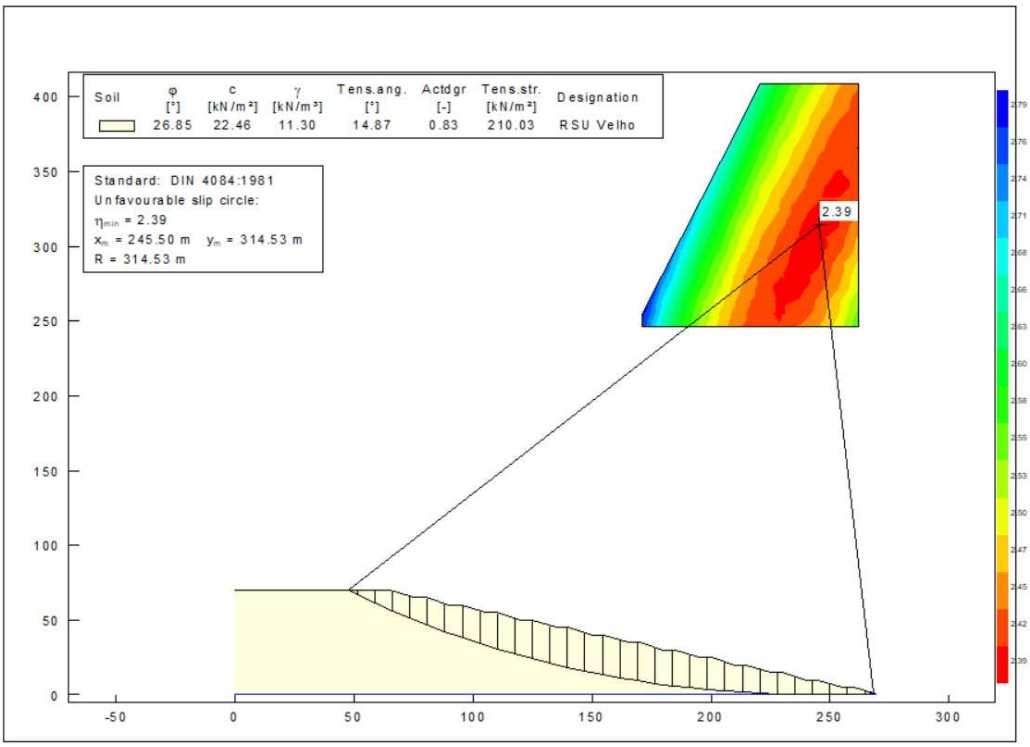
Fonte: A Autora (2019).

Figura A47 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,5 e NA 0 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



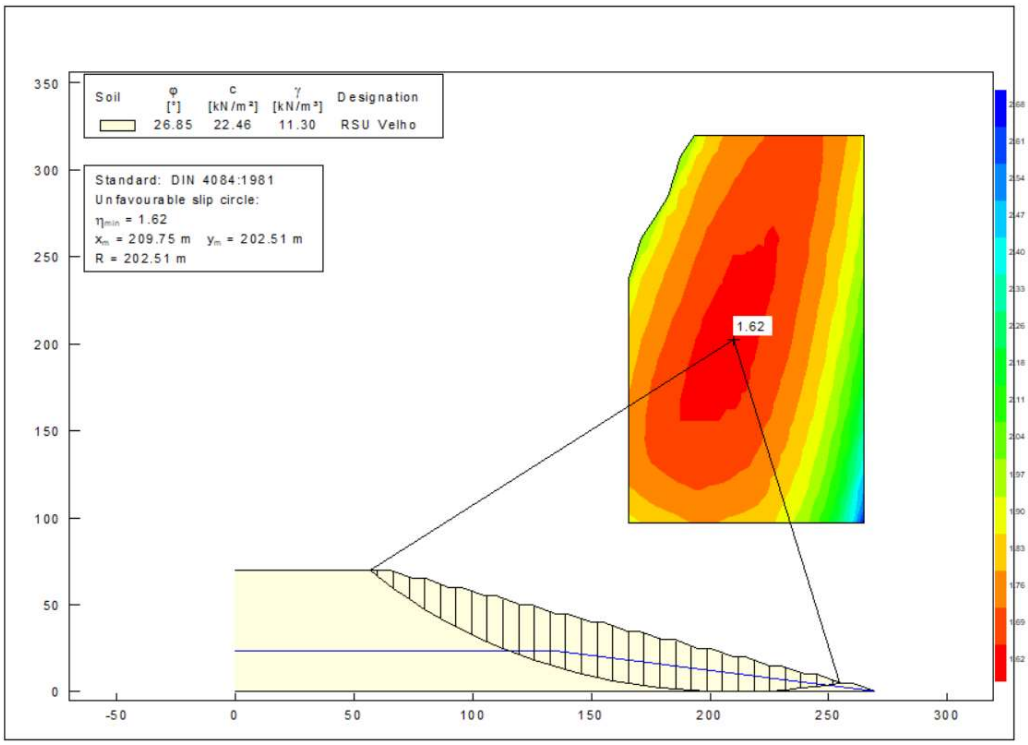
Fonte: A Autora (2019).

Figura A48 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,5 e NA 0 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



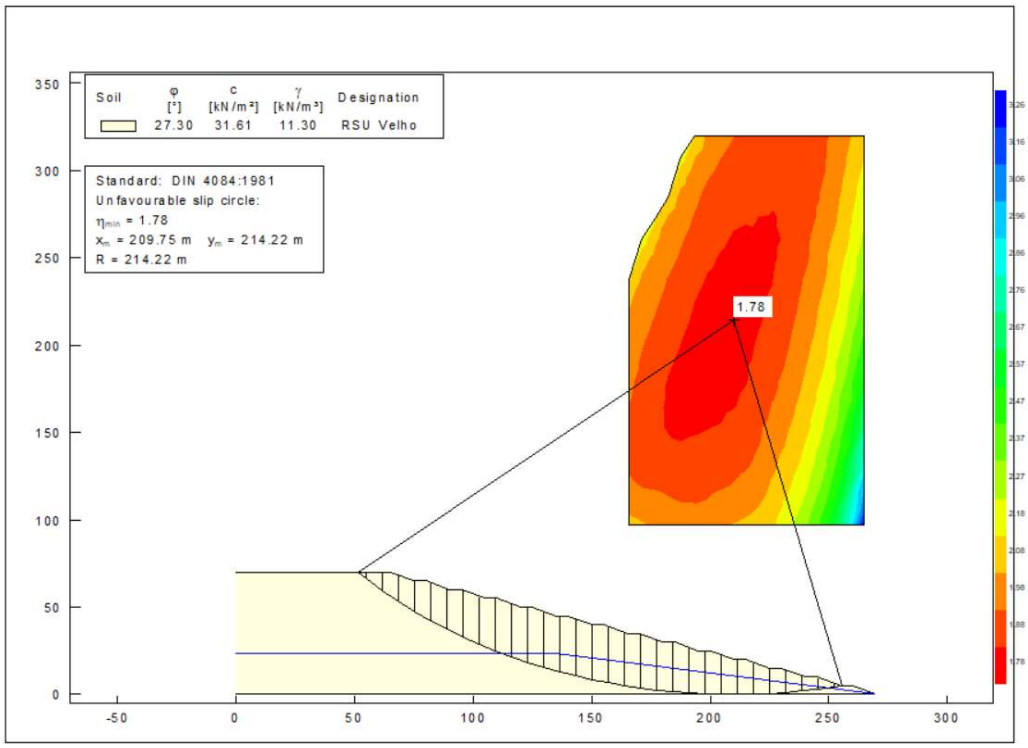
Fonte: A Autora (2019).

Figura A49 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,5 e NA 1/3 – Matriz básica.



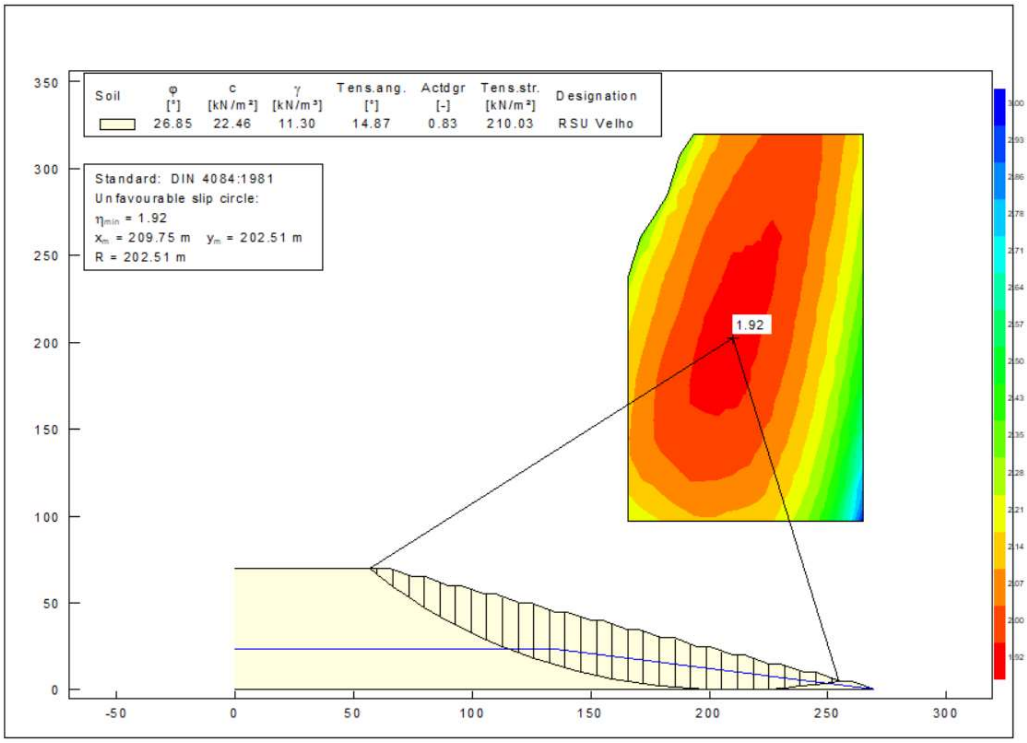
Fonte: A Autora (2019).

Figura A50 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,5 e NA 1/3 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



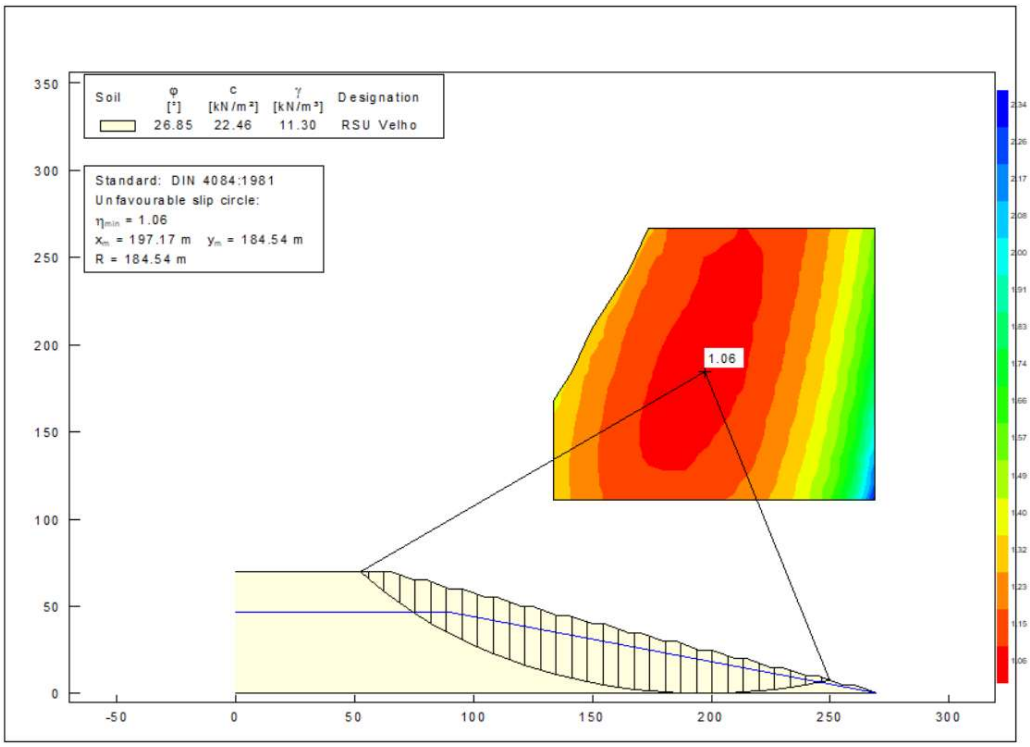
Fonte: A Autora (2019).

Figura A51 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,5 e NA 1/3 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



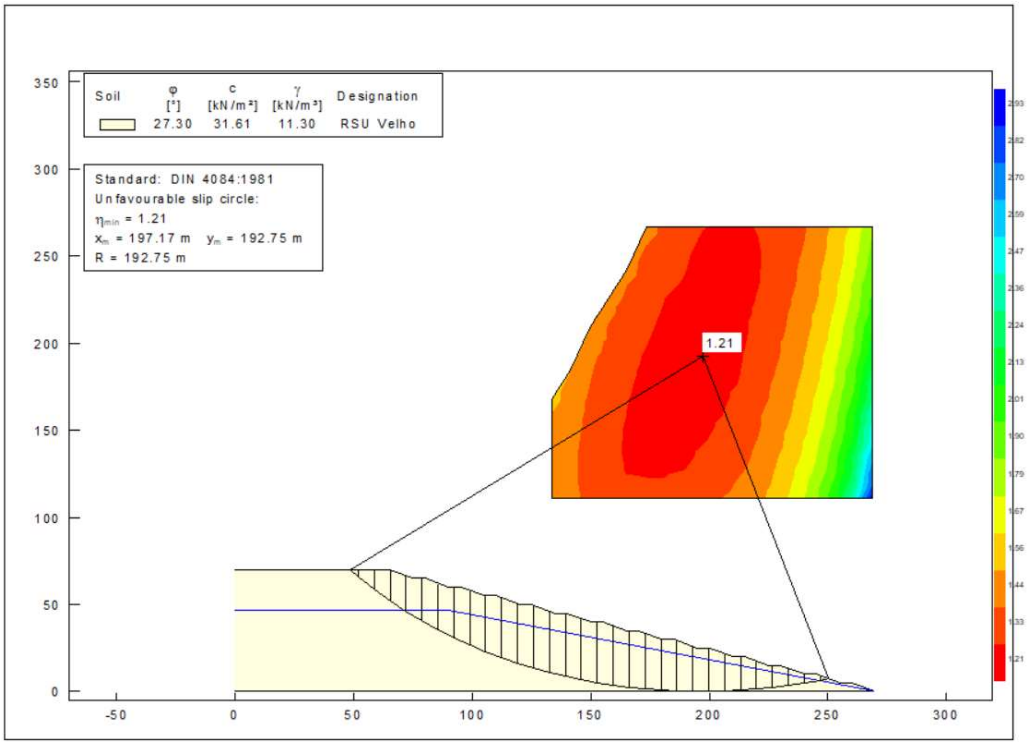
Fonte: A Autora (2019).

Figura A52 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,5 e NA 2/3 – Matriz básica.



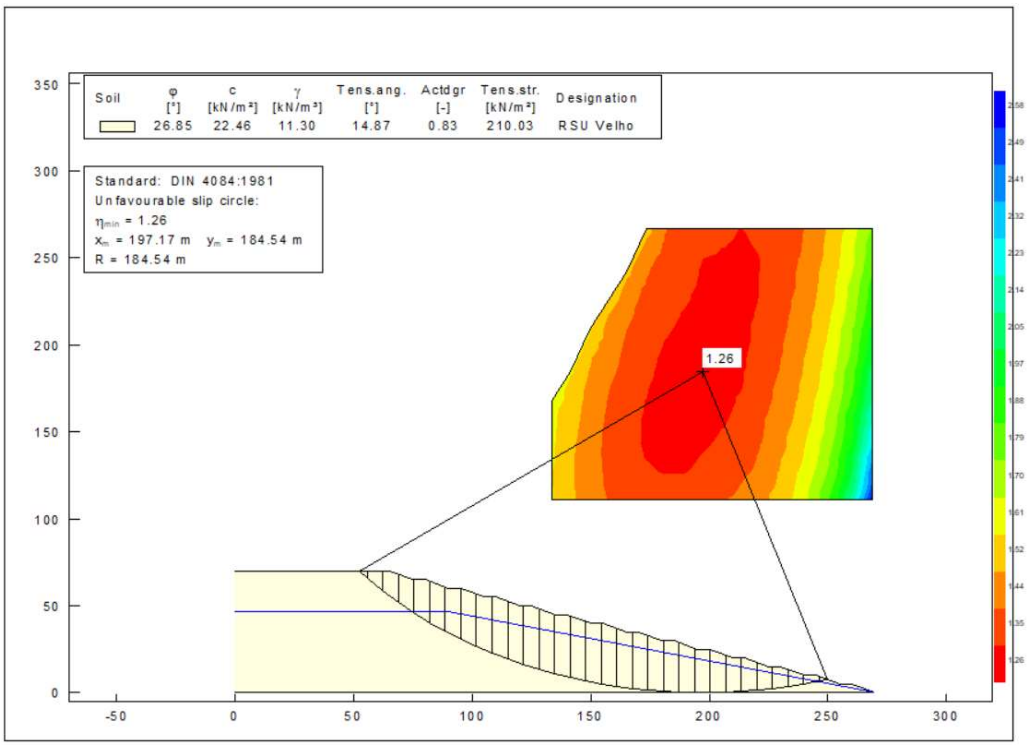
Fonte: A Autora (2019).

Figura A53 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,5 e NA 2/3 – Matriz composta reforçada com 13,54% de fibras.



Fonte: A Autora (2019).

Figura A54 - Análise de estabilidade para o Caso 2, altura de 70 m, inclinação de 0,5 e NA 2/3 – Método de kolsch, considerando o efeito das fibras.



Fonte: A Autora (2019).