DANIELY CAMARGOS LUCARELLI

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET) DE DISTRIBUIÇÃO ALEATÓRIA

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T
L932e
2018

Lucarelli, Daniely Camargos, 1992-
Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras de polietileno tereftalato (PET) de distribuição aleatória / Daniely Camargos Lucarelli. – Viçosa, MG, 2018.
xiv, 153f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.
Orientador: Heraldo Nunes Pitanga.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Mecânica do solo. 2. Cisalhamento. 3. Solos - Compactação. 4. Solos - Testes. 5. Polietileno. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.15136

DANIELY CAMARGOS LUCARELLI

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET) DE DISTRIBUIÇÃO ALEATÓRIA

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae.*

APROVADA: 19 de novembro de 2018.

Maria Esther Soares Marques
(Coorientadora)

Dario Cardoso de Lima
(Coorientador)

Roberto Lopes Ferraz

Heraldo Nunes Pitanga
(Orientador)

Aos meus pais Maria Auxiliadora e Henrique,
ao meu irmão Daniel e
ao Darlan,
dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

A todos os familiares e principalmente aos meus pais Henrique e Maria Auxiliadora e ao meu irmão Daniel, pelo amor e constante exemplo de esforço e dedicação, por todas as formas de apoio, conselhos, confiança, carinho e por sempre estarem presentes e me incentivarem a alcançar meus objetivos.

Ao Darlan pelo amor, companheirismo, carinho, compreensão, paciência e ajuda durante todo este tempo.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Instituto Militar de Engenharia pela oportunidade, por todos os conhecimentos adquiridos e pela infraestrutura disponibilizada ao longo do mestrado.

Ao meu orientador, Heraldo Nunes Pitanga, pela dedicação, orientação, compreensão, enriquecedores ensinamentos e ideias valiosas fornecidas.

À professora Maria Esther Soares Marques pela receptividade no IME e por toda ajuda, apoio, amizade, paciência, compreensão, ensinamentos, discussões, dedicação, incentivo e coorientação a este trabalho.

Aos amigos do IME, em especial ao Filipe Ribeiro, Mayara Gomes e Marina Donato pela receptividade, amizade e companheirismo, ao Sargento Gonçalves, Sargento Melo e Tenente Cravo por todo auxílio técnico e apoio na realização dos ensaios.

Aos amigos do Mestrado da UFV, em especial a Andressa Mesquita, Gissele Rocha, Leone Meireles e Lucas Almeida, pela amizade, companheirismo, horas de estudos, enriquecedoras discussões, cafezinhos e momentos de lazer.

Ao João Batista Gioia pelo fornecimento dos aditivos e auxílio técnico.

Ao Denilson Miranda pela montagem, fornecimento e apoio com o uso do filetador de garrafas PET.

Aos amigos Francisco Neto e Alessandra Braga pela amizade, carinho, incentivo e auxílio em todos os momentos em Viçosa.

Às amigas da república Estrela, pelo apoio, conversas e abrigo em Viçosa.

A todos os membros da banca pelas sugestões e contribuições.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho, muito obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.,.....vii

LISTA DE TABELAS.....xi

RESUMO.....xiii

ABSTRACT xiv

1. INTRODUÇÃO GERAL 1

1.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS 1

1.2.OBJETIVOS 3

1.3.JUSTIFICATIVAS..... 4

1.4.ESTRUTURA DO TRABALHO 5

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 8

2. ANÁLISE GEOTÉCNICA E MICROESTRUTURAL DE DOIS SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS DA REGIÃO DE VIÇOSA..... 12

2.1.INTRODUÇÃO 13

2.2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 15

2.2.1. Caracterização dos Solos para Fins de Engenharia 15

2.2.2. Composição Mineralógica dos Solos Tropicais 18

2.3.MATERIAIS E MÉTODOS..... 20

2.3.1. Materiais 20

2.3.2. Métodos 21

2.4.RESULTADOS E DISCUSSÕES 22

2.4.1. Caracterização dos Solos..... 22

2.4.2. Resultados da classificação MCT..... 24

2.4.3. Comparação entre as classificações..... 25

2.4.4. Resultados de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)..... 27

2.4.5. Resultados de Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X(EDS) e Fluorescência de Raios-X (XRF) 29

2.4.6. Resultados dos Ensaios de Compactação 32

2.5.CONCLUSÕES 33

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 35

3. INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET) DE DISTRIBUIÇÃO ALEATÓRIA NA COMPACTAÇÃO E CAPACIDADE DE SUPORTE DE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS 39

3.1. INTRODUÇÃO 40

3.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 41

3.2.1. Aspectos gerais sobre o Polietileno Tereftalato (PET) 41

3.2.2. Reciclagem de garrafas PET 42

3.2.3. Pesquisas sobre reforço de solos com PET 44

3.3. MATERIAIS E MÉTODOS 45

3.3.1. Área de estudo 45

3.3.2. Materiais utilizados 46

3.3.3. Métodos 48

3.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 49

3.4.1. Considerações iniciais 49

3.4.2. Ensaios de Compactação 50

3.4.3. Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) 56

3.5. CONCLUSÕES 59

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 61

4. APROVEITAMENTO DE FIBRAS DE GARRAFAS PET VISANDO AO MELHORAMENTO GEOTÉCNICO DE SOLOS TROPICAIS. 65

4.1. INTRODUÇÃO 66

4.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 67

4.2.1. Reforço de solos com fibras 67

4.2.2. Aspectos gerais sobre o Polietileno Tereftalato (PET) 68

4.2.3. Pesquisas sobre reforço de solos com PET 69

4.3. MATERIAIS E MÉTODOS 72

4.3.1. Área de estudo 72

4.3.2. Materiais utilizados 73

4.3.3. Métodos 74

4.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 75

4.4.1. Considerações iniciais 75

4.4.2. Ensaio de Cisalhamento Direto 77
4.5. CONCLUSÕES 91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 93
5. ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE SOLO-CIMENTO REFORÇADO COM FIBRAS DE GARRAFA PET E MELHORADO COM ADITIVOS. 97
5.1. INTRODUÇÃO 98
5.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 100
5.2.1. Influência do cimento Portland no comportamento dos solos 100
5.2.2. Comportamento dos Solos Melhorados com Cimento Reforçados com Fibras 101
5.3. MATERIAIS E MÉTODOS 103
5.3.1. Materiais 103
5.3.2. Métodos 106
5.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 110
5.4.1. Considerações iniciais 110
5.4.2. Ensaio de Compactação 111
5.4.3. Ensaio de Cisalhamento Direto 113
5.5. CONCLUSÕES 120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 122
6. CONCLUSÕES GERAIS 125
APÊNDICE 131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Localização das áreas de coleta das amostras dos solos pesquisados. 21
Figura 2: Composição granulométrica das amostras de solo estudadas: a) Curvas granulométricas dos solos; b) gráfico geral da composição granulométrica dos solos. 23
Figura 3: Ábaco da Classificação MCT, contendo as localizações dos solos estudados. 25
Figura 4: MEV das amostras: a) Solo 1 e b) Solo 2 28
Figura 5: Gráficos obtidos no ensaio de EDS: a) Solo 1 e b) Solo 2 29
Figura 6: Resultados de Fluorescência de Raios-X dos solos: a) Solo 1 e b) Solo 2. 31
Figura 7: Curvas de compactação Proctor Normal dos solos. 33
Figura 8: Localização do município de Viçosa –MG e das áreas de coleta das amostras dos solos pesquisados..... 45
Figura 9: Solos utilizados na pesquisa: a) talude de coleta do Solo 1 (“Cavalos”) e b) talude de coleta do Solo 2 (“Vila Secundino”) 46
Figura 10: Filetador utilizado na produção das fibras..... 47
Figura 11: Fibras utilizadas no programa experimental da pesquisa. 47
Figura 12: Curvas Granulométricas dos Solos..... 49
Figura 13: Solo 1 - Análise do efeito do teor de fibras adicionadas no comportamento à compactação do compósito solo-fibras em relação ao solo: a) misturas com fibra lisa de 2mm; b) misturas com fibra lisa de 4mm; c) misturas com fibra rugosa de 2mm; d) misturas com fibra rugosa de 4mm. 50
Figura 14: Solo 2 - Análise do efeito do teor de fibras adicionadas no comportamento à compactação do compósito solo-fibras em relação ao solo: a) misturas com fibra lisa de 2mm; b) misturas com fibra lisa de 4mm; c) misturas com fibras rugosas de 2mm; d) misturas com fibras rugosas de 4mm..... 51
Figura 15: Solo 1 - Análise do efeito da rugosidade das fibras no comportamento à compactação do compósito solo-fibras em relação ao solo: a) misturas com 0,5% de fibras de 2mm; b) misturas com 1% de fibras de 2mm; c) misturas com 0,5% de fibras de 4mm; d) misturas com 1% de fibras de 4mm..... 52
Figura 16: Solo 2 - Análise do efeito da rugosidade das fibras no comportamento à compactação do compósito solo-fibras em relação ao solo: a) misturas com 0,5% de

fibras de 2mm; b) misturas com 1% de fibras de 2mm; c) misturas com 0,5% de fibras de 4mm; d) misturas com 1% de fibras de 4mm. 53
Figura 17: Solo 1 - Análise do efeito da largura das fibras no comportamento à compactação do compósito solo-fibras frente ao solo: a) misturas com 0,5% de fibras lisas; b) misturas com 1% de fibras lisas; c) misturas com 0,5% de fibras rugosas; d) misturas com 1% de fibras rugosas. 54
Figura 18: Solo 2 - Análise do efeito da largura das fibras no comportamento à compactação do compósito solo-fibras frente ao solo: a) misturas com 0,5% de fibras lisas; b) misturas com 1% de fibras lisas; c) misturas com 0,5% de fibras rugosas; d) misturas com 1% de fibras rugosas. 55
Figura 19: Solo 1 - Resultados de Índice de Suporte Califórnia (ISC) do solo puro e das misturas solo-fibras (FL: Fibra Lisa; FR: Fibra Rugosa). 56
Figura 20: Solo 1 - Resultados de Expansão do solo puro e das misturas solo-fibras (FL: Fibra Lisa; FR: Fibra Rugosa). 57
Figura 21: Solo 2 - Resultados de Índice de Suporte Califórnia (ISC) do solo puro e das misturas solo-fibras (FL: Fibra Lisa; FR: Fibra Rugosa). 57
Figura 22: Solo 2- Resultados de Expansão do solo puro e das misturas solo-fibras (FL: Fibra Lisa; FR: Fibra Rugosa). 57
Figura 23: Localização das áreas de coleta das amostras dos solos pesquisados. 72
Figura 24: Solos utilizados na pesquisa: a) Solo 1; b) Solo 2. 73
Figura 25: Fibras utilizadas no programa experimental da pesquisa: a) Fibra lisa com largura de 4 mm; b) Fibra rugosa com largura de 4 mm; c) Fibra lisa com largura de 2 mm; d) Fibra rugosa com largura de 2 mm. 74
Figura 26: Curvas Granulométricas dos Solos 76
Figura 27: Solo 1- Envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico do solo e suas misturas com fibras PET. 79
Figura 28: Solo 2 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico do solo e suas misturas com fibras PET. 81
Figura 29: Resultados de intercepto de coesão do solo 1 e suas misturas solo-fibras obtidos nos ensaios de cisalhamento direto. 82
Figura 30: Resultados de ângulo de atrito interno do solo 1 e suas misturas solo-fibras obtidos nos ensaios de cisalhamento direto. 83

Figura 31: Resultados de intercepto de coesão do solo 2 e suas misturas solo-fibras obtidos nos ensaios de cisalhamento direto. 83
Figura 32: Resultados de ângulo de atrito interno do solo 2 e suas misturas solo-fibras obtidos nos ensaios de cisalhamento direto. 84
Figura 33: Solo 1 - Análise da influência das fibras no solo, independente das suas características. 85
Figura 34: Solo 2 - Análise da influência das fibras no solo, independente das suas características. 86
Figura 35: Solo 1 - Análise comparativa entre as envoltórias do solo, do solo-fibras lisas e do solo-fibras rugosas..... 88
Figura 36: Solo 2 - Análise comparativa entre as envoltórias do solo, do solo-fibras lisas e do solo-fibras rugosas..... 88
Figura 37: Variações volumétricas de pico apresentadas nas curvas Variação volumétrica x Deslocamento horizontal nos ensaios de cisalhamento direto: a) solo 1 e suas misturas solo-fibras; b) solo 2 e suas misturas solo-fibras. 90
Figura 38: Localização da área de coleta das amostras do solo pesquisado. 104
Figura 39: Fibras de garrafa PET utilizadas no programa experimental da pesquisa. 104
Figura 40: Aditivos utilizados na pesquisa: a) aditivo 1; b) aditivo 2. 105
Figura 41: Primeira fase da preparação dos corpos de prova em misturas com cimento e aditivos: a) Solução de aditivo 1 e água; b) Homogeneização do solo com a solução de aditivo 1 e água; c) Mistura após homogeneização..... 107
Figura 42: Terceira fase da preparação dos corpos de prova em misturas com cimento e aditivos: a) Adição de cimento à mistura 1; b) Acréscimo da solução de aditivo 2 e água à mistura 1 com cimento..... 108
Figura 43: Etapas de moldagem dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento direto: a) moldagem estática do corpo de prova; b) corpo de prova moldado no anel; c) cura dos corpos de prova; d) corpo de prova transferido à caixa de cisalhamento pós cura de 7 dias..... 109
Figura 44:Ensaio de cisalhamento direto: a) equipamento utilizado; b) corpo de prova após ensaio. 110
Figura 45: Curva Granulométrica do Solo estudado..... 111

Figura 46: Resultados obtidos nos ensaios de compactação Proctor Normal dos solos: a) Curva de compactação do Solo puro e misturas com 3% de cimento; b) Curva de compactação do Solo puro e misturas com 5% de cimento. 112
Figura 47: Envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico do solo puro e suas misturas com cimento, aditivos e fibras PET: a) Misturas com 3% de cimento; b) Misturas com 5% de cimento. 115
Figura 48: Análise do efeito da adição de fibras e aditivos ao solo melhorado com cimento: a) solo com 3% de cimento; b) solo com 5% de cimento. 116
Figura 49: Variações volumétricas de pico apresentadas nas curvas Variação volumétrica x Deslocamento horizontal nos ensaios de cisalhamento direto: a) solo com 3% de cimento; b) solo com 5% de cimento. 119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos estudados. 23
Tabela 2: Índices e classificação dos solos segundo a metodologia MCT. 24
Tabela 3: Comparativo entre as classificações dos solos estudados 25
Tabela 4: Correlação entre a Metodologia MCT e os Sistemas USCS e TRB, segundo Nogami e Villibor (1995). 26
Tabela 5: Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos estudados. 49
Tabela 6: Classificação geotécnica dos solos segundo os sistemas tradicionais TRB e USCS. 50
Tabela 7: Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos estudados. 76
Tabela 8: Classificação geotécnica dos solos segundo os sistemas TRB, USCS e MCT. 76
Tabela 9: Resultados obtidos nos ensaios de compactação Proctor Normal dos solos puros e das misturas solo-fibras. 77
Tabela 10: Solo 1 - Resultados de tensão cisalhante de pico e variação volumétrica de pico do ensaio de cisalhamento direto para o solo e suas misturas com fibras PET.. 78
Tabela 11: Solo 1 – Parâmetros de resistência de pico obtidos nos ensaios de cisalhamento direto do solo e suas misturas com fibras PET. 78
Tabela 12: Solo 2 -Resultados de tensão cisalhante de pico e variação volumétrica de pico do ensaio de cisalhamento direto para o solo e suas misturas com fibras PET.. 80
Tabela 13: Solo 2 - Parâmetros de resistência de pico obtidos nos ensaios de cisalhamento direto do solo e suas misturas com fibras PET. 80
Tabela 14: Propriedades dos aditivos utilizados. 106
Tabela 15: Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do solo estudado. 111
Tabela 16: Classificação geotécnica do solo segundo os sistemas tradicionais TRB e USCS. 111
Tabela 17: Resultados de tensão cisalhante de pico obtidos dos ensaios de cisalhamento direto para o solo puro e suas misturas com cimento, aditivos e fibras PET. 114

Tabela 18: Parâmetros de resistência de pico obtidos nos ensaios de cisalhamento direto do solo puro e suas misturas com cimento, aditivos e fibras PET. 114

RESUMO

LUCARELLI, Daniely Camargos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2018. **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Reforçados com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET) de Distribuição Aleatória**. Orientador: Heraldo Nunes Pitanga. Coorientadores: Maria Esther Soares Marques, Dario Cardoso de Lima e Taciano de Oliveira da Silva.

O presente trabalho teve como objetivo o estudo do comportamento mecânico de solos residuais tropicais reforçados com Fibras PET, os quais foram amostrados no município de Viçosa, Minas Gerais. Para tanto, foi necessário o estudo de diferentes métodos, com a execução de ensaios de Caracterização, Compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Cisalhamento Direto. Para caracterização das amostras dos solos, em um primeiro caso, foram aplicados três métodos classificatórios existentes (MCT, TRB e USCS), e, através dos resultados obtidos, foram evidenciadas as diferenças entre estes, qualificando ou não as amostras para uso em pavimentação. Os ensaios de análise microestrutural possibilitaram analisar as possíveis relações entre a composição química e o comportamento de engenharia dos solos. Também, por meio da adição de fibras PET de garrafas de refrigerante, em diferentes teores, larguras e texturas, foram investigados vários parâmetros de comportamento de engenharia dos solos. Constatou-se, através das análises dos resultados dos ensaios ISC, que, para reforço de subleito, seria possível o emprego das misturas solos-fibras ensaiadas conforme as exigências técnicas do DNIT. Considerando ainda a influência da adição de fibras na resistência ao cisalhamento, verificou-se, em geral, uma melhoria das propriedades mecânicas dos solos-fibras, evidenciando ser promissor o uso destes em obras geotécnicas. Por fim, através da análise do comportamento geotécnico de solo-cimento reforçado com fibras e aditivos, verificou-se melhorias na resistência ao cisalhamento com a adição de fibras, tanto para a parcela correspondente à coesão, quanto àquela correspondente ao atrito interno do material, em comparação aos compósitos de solo-cimento e solo-cimento-aditivos. Além disso, observou-se pouca eficiência dos aditivos no processo de estabilização dos solos, no que diz respeito aos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT

LUCARELLI, Daniely Camargos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2018. **Study of the Mechanical Behavior of Reinforced Soils with Polyethylene Terephthalate (PET) Fibers of Random Distribution**. Adviser: Heraldo Nunes Pitanga. Co-advisers: Maria Esther Soares Marques, Dario Cardoso de Lima and Taciano de Oliveira da Silva.

The current work has aimed to study the mechanical behavior of tropical residual soils reinforced with PET fibers, which were sampled in the Viçosa municipality, Minas Gerais state. Therefore, it was necessary to study different methodologies, with the execution of Characterization, Compaction, California Bearing Ratio (CBR) and Direct Shear tests. For soil samples characterization, in the first case three existing classificatory methods (MCT, TRB and USCS) were applied, and through the results achieved the differences between these were evidenced, qualifying or not the samples for paving use. The microstructural analysis tests enabled to analyze the possible relationships between chemical composition and soil engineering behavior. Furthermore, through addition of PET fibers of bottles of a same brand of refrigerant, in different percentage, widths and textures, several parameters of soil engineering behavior were investigated. It was verified by the analysis of the results of the CBR tests, that for soil reinforcement can be possible to use the soil-fiber mixtures tested according to the technical requirements of DNIT. Also, considering the adding fibers influence on the shear strength, in general, it was noted an improvement in soil-fibers mechanical properties, evidencing that the use of these in geotechnical works is promising. Finally, through the analysis of the geotechnical behavior of soil-cement reinforced with fibers and additives, it was verified improvements in the shear strength with the fibers addition for the part corresponding to cohesion, as well as that corresponding to material internal friction, in comparison to the soil-cement composites and soil-cement-additives. In addition, it was observed poor efficiency of the additives in the soil stabilization process regarding to the shear strength parameters.

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Considerações Iniciais

O solo é o material mais utilizado pelo homem em suas construções, desde os tempos mais longínquos. Desde a antiguidade, tem sido empregada a técnica de reforço de solos com a inclusão de diversos tipos de materiais, como raízes de árvores, telas de bambu, fibras de coco, dentre outros (OLIVEIRA et al., 2016).

Dentro deste contexto, encontra-se a técnica de reforço de solos com fibras, que é bastante conhecida e há muito tempo utilizada pela humanidade. Segundo Girardello (2010), os babilônios inseriram materiais fibrosos na construção de alguns "Ziggurates" (uma forma de templo, comum para os babilônios e assírios, pertinente à época do antigo vale da Mesopotâmia e construído na forma de pirâmides terraplanadas), há mais de 1400 a.C. Além disso, algumas seções da Muralha da China também foram construídas com argila e cascalho entremeados com fibras naturais.

O modelo de técnica de reforço de solos com fibras como se tem hoje começou a ser investigado há pouco mais de quatro décadas. De acordo com Feuerharmel (2000), a técnica inicialmente desenvolvida enfocava o reforço de solos através de inclusões discretas e orientadas. Contudo, com o passar do tempo, passou-se a enfocar no reforço de solos através de inclusões aleatoriamente distribuídas na massa de solo.

A técnica de reforço de solos utilizando fibras tem sido estudada por vários pesquisadores nos últimos anos, visando à utilização de diversos tipos de fibras em múltiplos tipos de aplicações (LIMA et al., 1999; CAPRONI JÚNIOR et al., 1999; FEUERHARMEL, 2000; CASAGRANDE, 2001; CASAGRANDE, 2005; LEOCÁDIO, 2005; TRINDADE et al., 2006; SILVA, 2007; TANG et al., 2007; GIRARDELLO, 2010; TANG et al., 2010; DIAS, 2013; SOTOMAYOR, 2014; GIRARDELLO, 2014; MOGROVEJO e ALBUQUERQUE, 2014; AZEVEDO, 2015; PALACIOS et al., 2015; DARVISHI e ERKEN, 2018).

Em contrapartida, insere-se no contexto atual a preocupação com as questões ambientais, como, por exemplo, o consumo excessivo de garrafas de Polietileno Tereftalato (PET) e a sua destinação final no meio ambiente. Este é um problema de difícil solução, pois as garrafas ocupam um amplo espaço de armazenamento e demoram bastante para se decomporem na natureza. Segundo Senez (2016), a

disposição final inadequada deste resíduo, diretamente na natureza, pode contribuir para a poluição da água de rios, podendo agravar problemas de enchentes e também de contaminação do lençol freático.

A solução para minimizar o impacto ambiental causado por esse tipo de polímero é a reciclagem sistemática do mesmo. Neste sentido, a inserção deste tipo de material alternativo em trabalhos geotécnicos é algo bastante promissor e pode contribuir com a redução dos problemas ambientais gerados por este resíduo, além de estimular investimentos em pesquisas neste ramo, pois, para que esta possibilidade de destino do PET seja empregada, faz-se necessário o estudo do comportamento da mistura solo-PET e de suas características físicas, químicas e ambientais.

Alguns estudos foram realizados a fim de verificar os efeitos gerados pela inserção de resíduos de Polietileno Tereftalato (PET) em solos em aplicações diversas (MONTARDO et al., 1998; PRIETTO et al., 1999; CONSOLI et al., 2002; PINTO et al., 2010; ASSIS e MELO, 2012; ORTIZ, 2013; LOUZADA, 2015; ROCHA e NOVO, 2015; SANTOS e SILVA, 2015; LOUZADA e CASAGRANDE, 2016; OLIVEIRA et al., 2016; SOUSA et al., 2016; SENEZ, 2016).

Dentre estes pesquisadores, Santos e Silva (2015) estudaram a aplicação do compósito solo-fibra PET em sistemas de cobertura de aterros sanitários e Sousa et al. (2016) visaram o uso do mesmo em *liners* (camadas impermeabilizantes de aterros sanitários). No trabalho de Louzada e Casagrande (2016) foi analisada a mistura de PET moído fino e solo, sendo verificada a possibilidade de aplicação da mesma em pavimentos ou outras obras geotécnicas.

Visando a aplicação em obras rodoviárias, é possível encontrar na literatura alguns estudos que analisaram o uso de misturas de resíduo de PET com materiais usualmente empregados em pavimentação, buscando a sua aplicação tanto em aterros, quanto em reforço de subleito, em sub-base e no revestimento (CONSOLI et al., 2002; BENTO, 2006; CHOUDHARY et al., 2010; PINTO et al., 2010; ASSIS e MELO, 2012; QUEIROZ e MELO, 2015; OLIVEIRA et al., 2016).

Dentre estes autores, Consoli et al. (2002) estudaram a adição de PET em solo-cimento, constatando um aumento da resistência mecânica com o incremento de fibra. Choudhary et al. (2010) verificaram a viabilidade do uso de misturas solo-fibras PET na construção de obras rodoviárias de baixo custo, com aplicações em aterros e camadas de pavimentos. Assis e Melo (2012) analisaram o uso de resíduo de PET

como alternativa de aditivos para misturas asfálticas porosas, buscando uma opção econômica para a pavimentação. Esses estudos comprovaram a viabilidade de emprego do resíduo PET em obras rodoviárias, como reforço em camadas de pavimento.

Dentro deste panorama, o presente trabalho busca contribuir para uma melhor compreensão do comportamento de engenharia de misturas solo-fibras PET, analisando vários fatores que podem influenciar suas propriedades geotécnicas.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é estudar o comportamento mecânico de solos residuais tropicais reforçados com fibras de Polietileno Tereftalato (PET) de distribuição aleatória. Considerando o foco principal, têm-se como objetivos específicos:

i. Realizar um estudo comparativo entre a classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) e as classificações tradicionais de solos, complementando as mesmas com o auxílio de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) e Fluorescência de Raios-X (XRF), em duas amostras de solos tropicais residuais com características granulométricas diferentes, buscando analisar a microestrutura e a composição dos elementos presentes na fração fina dos solos, inferindo, a partir desta análise, possíveis comportamentos geotécnicos dos materiais estudados;

ii. Avaliar o comportamento mecânico das misturas de dois solos residuais tropicais, com características granulométricas distintas, com diferentes teores, rugosidades e larguras de fibras PET, através dos parâmetros de compactação, capacidade de suporte e expansão;

iii. Avaliar o comportamento de misturas solo-fibras PET, analisando a influência da quantidade, rugosidade e largura das fibras nos parâmetros de resistência ao cisalhamento de dois solos residuais tropicais com características granulométricas diferentes, através da realização de ensaios de cisalhamento direto;

iv. Estudar o efeito da adição fibras de Polietileno Tereftalato (PET) a misturas de solo-cimento e avaliar as possíveis melhorias geradas pelo acréscimo de um conjunto de dois tipos de aditivos, sendo um melhorador de impermeabilização e outro

melhorador de aderência, na mistura solo-cimento-fibras PET, através dos parâmetros de compactação e resistência ao cisalhamento, em um solo residual tropical de textura areno-silto-argilosa.

1.3. Justificativas

O reforço de solos é uma técnica eficaz e segura para melhorar sua resistência e estabilidade, podendo ser utilizada em uma variedade de aplicações, como estruturas de contenção, estabilização de camadas de pavimentos, etc. Nesse contexto, pode-se citar a técnica de reforço de solos com fibras, um método que tem demonstrado eficácia, devido à melhoria das propriedades mecânicas que é capaz de conferir a estes materiais, principalmente sob a forma de aumentos de resistência, ductilidade e tenacidade, e à diminuição da queda da resistência pós-pico (LEOCÁDIO, 2005).

Ao mesmo tempo, segundo Consoli et al. (2009), existem as técnicas de estabilização dos solos, que são frequentemente empregadas com o intuito de se obter melhorias geotécnicas para estes materiais, através, por exemplo, da adição de agentes cimentícios.

Neste sentido, Caproni Junior et al. (1999) afirmam que a estabilização química do solo com cimento é uma técnica consagrada e que tem sido utilizada com sucesso em muitas obras de engenharia, especialmente em pavimentos e na confecção de alvenaria em paredes monolíticas, tendo demonstrado grande aumento de resistência e rigidez em comparação ao solo natural. Por outro lado, Specht (2000) afirma que a adição de cimento ao solo gera aumento da fragilidade e fissuração excessiva. Neste sentido, Fernandes (2009) considera que a incorporação aleatória de fibras neste tipo de mistura pode contribuir para o controle da fissuração e para o aumento da durabilidade e ductilidade do material cimentado.

Segundo Oliveira et al. (2016), a adição de fibras ao solo tende a reduzir o peso específico aparente seco na compactação, devido à influência exercida pelas mesmas, que são mais leves que as partículas do solo, durante a homogeneização do material, ocupando os vazios que seriam preenchidos por estas. Nesse sentido, o acréscimo de determinados aditivos poderia contribuir para a melhoria destes parâmetros.

Em conjunto, devem-se citar as questões ambientais que ocorrem atualmente, como, por exemplo, o grande crescimento da produção mundial de plásticos e o seu consequente acúmulo na natureza. Um dos tipos de resíduos plásticos mais comuns é o Polietileno Tereftalato (PET), o qual é muito utilizado na produção de garrafas de refrigerante. Estas são pouco aproveitadas pela indústria de reciclagem e demoram cerca de um século para se decomporem na natureza, segundo a ABIPET (2018).

De acordo com Montardo et al. (1998), o conhecimento de técnicas que permitam a reutilização racional desses resíduos plásticos é uma das principais formas de combate ao sério problema ambiental causado pela produção crescente, em escala mundial, deste tipo de material, devendo os seus métodos de reutilização prover um meio eficaz para a sua disposição, assim como ajudar a resolver as questões econômicas e ambientais envolvidas no problema.

Nesse sentido, é relevante o desenvolvimento de pesquisas e estudos que procurem verificar a viabilidade do uso de resíduos de PET como reforço de solos e como reforço de misturas solo-cimento, podendo também atuar nestas em conjunto com alguns aditivos, dada a possibilidade de contribuir com melhorias de algumas das características geotécnicas do solo, sendo uma solução economicamente mais vantajosa e sustentável, uma vez que possibilita garantir um novo destino para estes resíduos e ajudar a conter a poluição causada pelo acúmulo de garrafas PET na natureza. Nessa perspectiva, o estudo do reforço de solos com fibras PET é de suma importância, pois visa contribuir tanto com a resolução de questões técnicas, quanto ambientais envolvidas no problema.

1.4. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em seis tópicos, conforme seguem:

- Introdução geral: apresenta as considerações iniciais sobre o uso de misturas solo-fibras PET para reforço de solos, os objetivos gerais e específicos, a justificativa e a importância do presente estudo;

- Análise geotécnica e microestrutural de dois solos residuais tropicais da região de Viçosa-MG: tem como objetivo o estudo comparativo

entre a metodologia MCT, específica para aplicação em solos tropicais, e as classificações tradicionais de solos, a saber, *Unified Soil Classification System* (USCS) e *Transportation Research Board* (TRB*)*, em duas amostras de solos tropicais residuais, os quais apresentam características granulométricas diferentes, amostrados no município de Viçosa - MG. São também utilizados ensaios de análise microestrutural, tais como MEV, EDS e Fluorescência de Raios-X, visando verificar a relação entre a composição química e o comportamento de engenharia dos solos estudados;

- Influência da adição de fibras de Polietileno Tereftalato (PET) de distribuição aleatória na compactação e capacidade de suporte de solos residuais tropicais: apresenta a influência da adição de diferentes teores, rugosidades e larguras de fibras PET nas características de compactação, capacidade de suporte e expansão dos solos residuais tropicais estudados, através da realização de ensaios de caracterização geotécnica, compactação e CBR;

- Aproveitamento de fibras de garrafas PET visando o melhoramento geotécnico de solos tropicais: apresenta a análise do comportamento de misturas solo-fibras PET na resistência ao cisalhamento, na condição compactada. Para tanto, foram adicionadas fibras em diferentes teores, larguras e texturas. Ao final, é realizada a análise dos resultados em termos de melhoria nas propriedades mecânicas das misturas de solo-fibras estudadas;

- Estudo do comportamento geotécnico de solo-cimento reforçado com fibras de garrafa PET e melhorado com dois aditivos, um melhorador de impermeabilização e outro melhorador de aderência: é apresentada a avaliação dos efeitos da adição de fibras PET a misturas de solo-cimento e das possíveis melhorias geradas pelo acréscimo de um conjunto de dois tipos de aditivos (melhoradores de

impermeabilização e aderência) nos parâmetros de compactabilidade e na resistência ao cisalhamento de um dos solos estudados; e

- Conclusões gerais: expõem as considerações finais acerca do trabalho desenvolvido e recomendações para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPET. **Resina PET - Fabricação**, 2018. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=65>. Acesso em: 08 de abril de 2018.

ASSIS, S. R. H.; MELO, R. A. Viabilidade técnica do uso de misturas de solo e pet granulado em camadas de pavimentos. In: 18ª RPU – REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 2012, São Luis. **Anais 18ª RPU,** São Luis, 2012.

AZEVEDO, M. B. **Misturas solos-agentes cimentantes-fibra: aplicação de ensaios de laboratório para obtenção de parâmetros de projeto**. 2015. 90 f. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2015.

BENTO, P. F. B. **Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para a utilização em estruturas de pavimentos**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

CAPRONI JÚNIOR, N.; PALOCCI, A.; BUENO, B. S. Estudo do solo-cimento reforçado com fibras de polipropileno. In: 1º SIMPÓSIO SUL-AMERICANO DE GEOSSINTÉTICOS, 1999, Rio de Janeiro. **Anais 1º Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos,** Rio de Janeiro, 1999.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superfíciais**. 2001. 94 f. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. 219 f. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005.

CHOUDHARY, A. K.; JHA, J. N.; GILL, K. S. Utilization of plastic wastes for improving the sub-grades in flexible pavements. In: GEOSHANGHAI INTERNATIONAL CONFERENCE, 2010, Shangai. **Proceedings Geoshanghai,** Shangai, 2010.

CONSOLI, N. C.; VENDRUSCOLO, M. A.; FONINI, A; ROSA, F. D. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. **Geotextiles and Geomembranes**, v.27, P. 196 – 203, 2009.

CONSOLI, N. C.; MONTARDO, J. P.; PRIETTO, P. D. M.; PASA, G. S. Engineering Behavior of a Sand Reinforced with Plastic Waste. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.** P. 462 - 472, June 2002.

DARVISHI, A.; ERKEN, A. Effect of polypropylene fiber on shear strength parameters of sand. In: 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL RESEARCH AND ENGINEERING, 2018, Hungary. In: **Proceedings of the 3rd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'18),** 2018, Hungary.

DIAS, M. V. P. **Utilização de fibras de polipropileno na melhoria do comportamento de solos coesivos**. 2013. 124 f. Dissertação (mestrado), Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. 2013.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. 133 f. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2000.

FERNANDES, M. G. M. **Análise do comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. Projeto Fim de Curso (Graduação em Engenharia de Fortificação e Construção), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GIRARDELLO, V. **Ensaios de placa em areia não saturada reforçada com fibras**. 2010. 121 f. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2010.

GIRARDELLO, V. **Comportamento de ensaios de arrancamento de placas embutidas em camadas de solo-cimento-fibra**. 2014. 175 f. Tese (doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2014.

LEOCÁDIO, G.A.S. **Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado**. 2005. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais. 2005.

LIMA, D. C.; MINETTE, E.; BUENO, B. S.; MARQUES, E. T. Influência da adição de fibra de polipropileno e da energia de compactação na resposta mecânica de uma mistura solo-cal . In: 1º SIMPÓSIO SUL-AMERICANO DE GEOSSINTÉTICOS, 1999, Rio de Janeiro. **Anais 1º Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos,** Rio de Janeiro, 1999.

LOUZADA, N. S. L. **Experimental study of soils seinforced with srushed polyethylene terephthalate (PET) residue**. 2015. 126 f. Dissertação (mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

LOUZADA, N. S. L.; CASAGRANDE, M. D. T. Behavior of a clayey soil mixture with fine crushed polyethylene terephthalate. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais COBRAMSEG,** Belo Horizonte, 2016.

MOGROVEJO, D. R. L.; ALBUQUERQUE, P. J. R. Avaliação da resistência ao cisalhamento de um solo argiloso com adição de fibras de papel kraft. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2014, Goiânia. **Anais COBRAMSEG,** Goiânia, 2014.

MONTARDO, J. P., VENDRUSCOLO, M. A., CONSOLI, N. C., PRIETTO, P. D. M. Características de resistências e deformação de um solo cimentado reforçado com fibras PET: Estudo Preliminar. In:**Anais Associação Brasileira de Mecânica do Solos e Engenharia Geotécnica**, p. 1163-1167, 1998.

OLIVEIRA, T. G.; PEREIRA, E. L.; MENDES, G. C.; DUARTE, A. P.; SOARES, C. C. Avaliação do uso de fibras de garrafas PET como reforço de solos compactados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais COBRAMSEG,** Belo Horizonte, 2016.

ORTIZ, J. A. L. **Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET)**. 2013. 90 f. Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado. 2013.

PALACIOS, M. A. P.; CASAGRANDE, M. D. T.; FOLLE, D.; ANVERSA, J. Estudo do comportamento de um compósito areia-fibra em extensão axial. **Revista de Engenharia Civil IMED.** Passo Fundo, RS., v. 2, n. 1, p. 33 - 39, 2015.

PINTO, L. E. M.; MELO, R. A.; ASSIS, S. R. H. Estudo de viabilidade do uso de resíduo pet em obra rodoviária. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2010, Bauru. **Anais-congresso brasileiro de gestão ambiental**, Bauru, 2010, p.1-6.

PRIETTO, P.D.; MONTARDO, J. P.; CONSOLI, N.C. Comportamento mecânico de uma areia cimentada reforçada com fibras PET. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 3., 1999, Rio de Janeiro. **Anais Geossintéticos 99**, Rio de Janeiro, 1999, p.199-206.

QUEIROZ, B. O.; MELO, R. A. Propriedades mecânicas e hidráulicas de misturas asfálticas porosas com adição de politereftalato de etileno (PET). In: XXIX CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTES DA ANPET, 2015, Ouro Preto. **Anais XXIX ANPET,** Ouro Preto, 2015.

ROCHA, L. V.; NOVO, B. F. **Estudo experimental do solo argiloso reforçado com pó de PET**. Pontíficia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015.

SANTOS, J. R.; SILVA, T. J. L. **Análise de viabilidade de utilização de solo tropical com a adição de fibras PET em sistemas de cobertura de aterros sanitários**. 2015. 76 f. Monografia de projeto final em Engenharia Civil - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal. 2015.

SENEZ, P. C. **Comportamento de uma areia reforçada com fibras de polietileno tereftalato (PET)**. 2016. 124 f. Dissertação (mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SILVA, C. C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânico**. 2007. 170 f. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2007.

SOTOMAYOR, J. M. G. **Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibras de coco submetidos a ensaios de placa em verdadeira grandeza**. 2014. 132 f. Dissertação (mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 132. 2014.

SOUSA, A. A. C.; GURJÃO, C. M. C.; RIBEIRO, L. F. M; COSTA, C. M. C. Avaliação do Comportamento Hidromecânico de Liners Executados com Misturas de Solo e Fibras de PET. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais COBRAMSEG,** Belo Horizonte, 2016.

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2000.

TANG, C. S.; SHI, B.; GAO, W.; CHEN, F.; CAI, W. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 25, p. 194 - 202, 2007.

TANG, C. S.; SHI, B.; ZHAO, L. Z. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, p. 54-62, 2010.

TRINDADE, T. P.; IASBIK, I.; LIMA, D. C.; MINETTE, E.; SILVA, C. H. C. S.; CARVALHO, C. A. B.; BUENO, B. S.; MACHADO, C. C. Estudos laboratoriais do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em estradas florestais. **R. Árvore.** Viçosa, MG., v. 30, n. 2, p. 215 - 222, 2006.

2. ANÁLISE GEOTÉCNICA E MICROESTRUTURAL DE DOIS SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS DA REGIÃO DE VIÇOSA

Resumo – Os solos formados em regiões de clima tropical úmido, como é o caso dos solos de grande ocorrência no Brasil, apresentam peculiaridades que limitam a aplicação das técnicas de classificação geotécnica tradicionais, desenvolvidas em países de clima temperado, por meio das quais se busca alcançar resultados que classifiquem os solos como material adequado para utilização em determinada aplicação. Neste contexto, no presente trabalho, procurou-se realizar um estudo comparativo entre um sistema específico de classificação de solos tropicais, denominado MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), e dois sistemas de classificações tradicionais de solos, a saber, *Unified Soil Classification System* (USCS) e *Transportation Research Board* (TRB), quando aplicados na definição das respectivas classes de duas amostras de solos tropicais residuais com características granulométricas diferentes, amostrados no município de Viçosa - MG. Através dos resultados obtidos, evidenciaram-se, para ambas as amostras de solos, as diferenças existentes entre os três métodos classificatórios existentes. A amostra do solo 1 foi classificada como MH (silte de alta compressibilidade) pelo USCS e como A-7-5 (20) (argila plástica) pelo TRB, que a considera imprópria para uso como material de subleito. No entanto, através dos resultados de classificação MCT, essa amostra foi qualificada como LG', a qual prevê o uso até em camadas de sub-base de pavimentos. Já a amostra do solo 2 foi classificada pelo USCS como uma areia argilosa (SC), o que a considera um solo com boa trabalhabilidade como material de construção e com certo valor para aplicação em fundações de pavimentos, enquanto pelo TRB foi considerada pertencente ao grupo A-2-4 (0), sendo considerado por este último sistema de classificação como um material com bom comportamento para uso em subleito. Porém, pela classificação MCT, esta foi considerada um NA', que se refere a solos que necessitam de cuidados especiais durante a execução das camadas estruturais de um pavimento. Com intuito de complementar estas classificações, foram feitos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para a visualização do tamanho e da forma das partículas do solo, além de ensaios de Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) e Fluorescência de Raios-X (XRF), visando a identificação dos elementos químicos existentes. Os resultados obtidos nestes ensaios permitiram

analisar a microestrutura e a composição dos elementos presentes na fração fina dos solos, inferindo, a partir desta análise, possíveis comportamentos geotécnicos dos materiais estudados.

Palavras-Chave: Classificação de solos. Solos tropicais. Caracterização Microestrutural.

2.1. Introdução

As rodovias desempenham um enorme papel nos crescimentos econômico e social de uma nação. No Brasil, o transporte rodoviário é considerado a principal via de integração do país, sendo, segundo CNT (2017a), o segmento de maior participação na matriz de transporte de cargas (representando 61% em 2016) e o principal modo de deslocamento de passageiros, independentemente da distância.

Apesar da importância deste modal no país e da extensão de sua malha em comparação com outros países, de acordo com Moreira et al. (2018), o Brasil não oferece uma boa infraestrutura rodoviária e os investimentos em manutenção e na construção da mesma são insuficientes ou pouco eficazes, uma vez que as condições dos pavimentos das estradas brasileiras, em geral, são insatisfatórias.

Este fato se apresenta como algo bastante preocupante, uma vez que a qualidade do pavimento é um fator imprescindível neste modal, impactando diretamente no desempenho do transporte rodoviário e na economia do Brasil. Para CNT (2017b), uma rodovia com más condições de pavimento gera um aumento no custo operacional do transporte e uma redução no conforto e na segurança dos passageiros e das cargas, além de causar prejuízos ambientais.

Neste contexto, é de fundamental importância o conhecimento das propriedades dos materiais geotécnicos utilizados no subsolo de fundação, nas camadas do pavimento e nos aterros durante as etapas de construção de uma rodovia. Além disso, Silva et al. (2010) afirmam que, por apresentarem grandes extensões no sentido longitudinal, os solos encontrados nos subleitos das estradas apresentam em geral comportamentos geotécnicos bastante distintos, devido às suas peculiaridades físicas, químicas e mineralógicas.

A variedade de solos existentes e suas diferenças de comportamento frente aos diversos fins de aplicação no âmbito da Engenharia Civil geraram um natural

agrupamento destes materiais em distintos conjuntos, determinados pelas suas propriedades geotécnicas. A partir deste agrupamento, surgiram os sistemas de classificação dos solos.

Os dois sistemas de classificação de solos mais presentes no âmbito geotécnico são o *Transportation Research Board (*TRB*)* e o *Unified Soil Classification System (*USCS*)*, que são sistemas denominados tradicionais, baseados nos Limites de *Atterberg* (Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade) e na granulometria dos solos. Estes sistemas foram desenvolvidos em países de clima temperado, apresentando certas limitações quando utilizados para a previsão de propriedades dos solos tropicais.

Nogami e Villibor (1981) levaram em consideração essas limitações e desenvolveram uma nova metodologia específica para solos compactados tropicais, não baseada nas propriedades índices como as classificações tradicionais, que foi denominada Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical).

A Metodologia MCT se baseia nos ensaios de compactação Mini-MCV (*Moisture Condition Value*) e de Perda de Massa por Imersão em corpos de prova de dimensões reduzidas (50 mm de diâmetro) e com diferentes teores de umidade, de forma que seja possível a classificação dos solos tropicais, quanto ao seu comportamento, em lateríticos ou não lateríticos.

Em conjunto a essas classificações, é de suma importância o conhecimento dos minerais componentes de determinado solo, pois, segundo Mitchell e Soga (2005), a composição mineralógica é o principal fator que controla o tamanho, a forma e as propriedades das partículas do solo, determinando, ao mesmo tempo, as possíveis faixas de propriedades químicas de qualquer solo. Logo, um conhecimento *a priori* dos minerais presentes neste tipo de material fornece possíveis inferências intuitivas quanto ao seu comportamento.

Soares (2008) afirma que este tipo de caracterização é bastante conhecido, principalmente em solos tropicais, uma vez que seu comportamento mecânico pode ser influenciado em função dos seus argilo-minerais constituintes, sendo que, a partir do conhecimento destes, é possível obter indícios das características superficiais de suas partículas, como resistência, expansibilidade, plasticidade e outras que estão relacionadas, também, ao seu tamanho e forma.

Dentro deste panorama, o presente trabalho busca realizar um estudo comparativo entre a classificação MCT e as classificações tradicionais de solos,

complementando-as com o auxílio de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) e Fluorescência de Raios-X (XRF), em duas amostras de solos tropicais residuais com características granulométricas diferentes, amostrados no município de Viçosa – MG. Esta complementação foi feita com intuito de analisar a microestrutura e a composição dos elementos presentes na fração fina dos solos, inferindo, a partir desta análise, possíveis comportamentos geotécnicos dos materiais estudados.

2.2. Fundamentação Teórica

2.2.1. Caracterização dos Solos para Fins de Engenharia

A classificação geotécnica tem o objetivo de relacionar as características físicas do solo ao seu comportamento a fim de obter resultados que o qualifique como material adequado para utilização em determinada obra (SOUSA, 2016).

São várias as particularidades dos solos formados em regiões de clima tropical úmido, como é o caso dos solos de grande ocorrência no Brasil, que os levam a serem comumente descartados nos sistemas de classificações geotécnicas tradicionais, desenvolvidos para condições climáticas diferentes das apresentadas no Brasil.

Para Marangon (2004), dois aspectos principais devem ser analisados e considerados no desenvolvimento do projeto de pavimentos construídos em clima tropical úmido: a natureza peculiar do ambiente a que as camadas do pavimento ficam sujeitas e os materiais disponíveis para a construção.

Devido a estas peculiaridades e visando o uso dos solos tropicais em pavimentação, foram desenvolvidos estudos para a criação de uma nova metodologia que avaliasse as peculiaridades destes solos e verificasse os seus comportamentos quando aplicados em pavimentos. Neste contexto, na década de 80, Nogami e Villibor elaboraram uma metodologia específica para a identificação de solos tropicais denominada MCT – Miniatura Compactado Tropical (SOUSA, 2016).

Esta classificação diferencia os solos de comportamento laterítico (L) daqueles com comportamento não laterítico (N) e é composta por um conjunto de ensaios com caráter tecnológico essencial para relacionar as propriedades dos solos com a sua aplicação na Engenharia Civil.

Devido às limitações existentes quando utilizadas as classificações tradicionais para a previsão de propriedades dos solos tropicais e às diferenças entre estas e a Metodologia MCT para um mesmo tipo de solo, muitos estudos foram feitos com diferentes solos tropicais (SANTOS, 1998; PASSOS, 2000; MARANGON, 2004; MARSON, 2004; SANTOS, 2006, TAKEDA, 2006, SILVA et al., 2010; VIANA, 2007; MEDRADO, 2009; VON DER OSTEN, 2012; SOUSA, 2016; DARIVA, 2016; MENDES, 2017; GOMES, 2018), a fim de se conhecer e compreender melhor as características destes tipos de materiais.

Dentro deste panorama, Marangon (2004), por exemplo, abordou a construção de pavimentos para a condição de baixo tráfego com o uso de solo fino laterítico predominantemente argiloso. O autor analisou diversas amostras de solo presentes em uma região do Estado de Minas Gerais, identificando suas características segundo a pedologia, o sistema de classificação MCT e as referentes ao comportamento resiliente, concluindo ser extremamente oportuna e conveniente, na avaliação da qualidade dos mesmos, a análise destes conhecimentos em conjunto.

Silva et al. (2010) abordaram uma contribuição às classificações geotécnicas tradicionais de solos e a Metodologia MCT para um caso aplicado à rodovia municipal não pavimentada VCS 346, no município de Viçosa-MG. Foram consideradas várias amostras deformadas de solos coletadas no subleito da referida via, buscando um aporte a um banco de dados geotécnicos sobre classificações de solos tropicais e verificando possíveis agrupamentos entre os sistemas geotécnicos tradicionais de classificação e a metodologia MCT. Esses autores verificaram que vários resultados obtidos pelas classificações geotécnicas tradicionais coincidiram com aqueles já apresentados na metodologia MCT, e, considerando a pedogênese da região de Viçosa-MG, para o grupo NG', houve a equivalência com os grupos SC, SM e CL, do USCS, e com o grupo A-4, do Sistema TRB.

Com intuito de comparar os resultados de caracterização e inferir possíveis comportamentos geotécnicos dos solos, alguns destes autores, como Takeda (2006), Sousa (2016) e Gomes (2018), também realizaram caracterizações mineralógicas e microestruturais dos materiais estudados, através de diferentes ensaios, como, por exemplo, Difração de Raios-X, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) e o ensaio de Azul de Metileno.

Segundo Mitchell e Soga (2005), o estudo da mineralogia colabora expressivamente na classificação dos solos, ao possibilitar a discriminação dos minerais presentes nestes, os quais contribuirão para a diferenciação do comportamento do material. Para Bulbak (2008), a interação entre as análises mineralógicas e outros ensaios é extremamente importante, já que a caracterização do material se torna difícil quando são executados ensaios que focam apenas em uma mesma análise, não abrangendo diferentes comportamentos do material, tanto em termos físicos, quanto químicos, mineralógicos, entre outros.

Neste contexto, Santos et al. (2003) definem MEV como uma técnica que permite a observação e a caracterização de diferentes tipos de materiais, a partir da emissão e interação de feixes de elétrons sobre uma amostra, sendo possível caracterizá-los do ponto de vista de sua morfologia, sua organização e sua composição química, sendo uma ferramenta eficaz e complementar aos trabalhos de gênese de solos.

Bulbak (2008) também afirma que o uso do método de MEV, em conjunto com o método de EDS, é de suma importância na caracterização petrográfica e no estudo petrológico dentro das Geociências, ao proporcionar nítidas imagens, enquanto sua imediata identificação e mapeamento da distribuição de elementos químicos por minerais é realizada pelo EDS.

Neste panorama, Takeda (2006) realizou caracterizações tradicionais e classificações pelas metodologias MCT e MCT modificada de diversas amostras de solos de rodovias do interior paulista, determinando conjuntamente, a partir dos ensaios de Difração de Raios-X, MEV e Azul de Metileno, a gênese das amostras, identificando os seus caráteres lateríticos ou não lateríticos. Como resultado, por meio do ensaio de MEV, para todas as amostras classificadas como lateríticas pelo MCT, foram encontrados padrões de imagem que indicam a presença de cimentação entre suas partículas constituintes, característica esta marcante dos solos lateríticos, enquanto que, para os solos não-lateríticos, houve discordâncias entre o comportamento indicado pela classificação MCT e os padrões de imagens obtidos, sendo a maior parte destes casos relacionada a solos classificados como NA’.

Ao realizar uma análise conjunta dos ensaios, Takeda (2006) observou que a classificação MCT conseguiu prever com eficiência o caráter laterítico ou não-laterítico dos solos selecionados na pesquisa. Esse autor também avaliou efeitos da

laterização nos parâmetros de compactação, concluindo não ser possível assinalar características distintas entre os solos lateríticos e não-lateríticos. Quanto à granulometria, o autor destacou diferenças de comportamento entre os solos grossos, intermediários e finos, sendo estes os que apresentam maiores teores de umidade ótima.

Gomes (2018), ao estudar a aplicabilidade dos solos tropicais de granulometria transicional, normalmente descartados pelas metodologias tradicionais, e que não podem, a rigor, ser avaliados pela metodologia MCT, em pavimento ferroviário, realizou análises em amostras de solo de ocorrência na Estrada de Ferro Carajás, por meio de ensaios de granulometria por peneiramento, limites de consistência, MEV, EDS e triaxiais dinâmicos, correlacionando seus resultados com a classificação segundo a metodologia MCT. Como resultado, foi possível constatar que um material classificado como laterítico não representa, necessariamente, um comportamento mecânico do ponto de vista de módulo de resiliência superior ao material não laterítico, sendo necessária a identificação das peculiaridades da natureza, constituição do solo e condições de erodibilidade.

2.2.2. Composição Mineralógica dos Solos Tropicais

Dentre os solos tropicais, segundo Nogami e Villibor (1995), destacam-se duas grandes classes: os solos lateríticos e os solos saprolíticos. Estes são formados a partir da decomposição e/ou desagregação de rochas *in situ*. São considerados solos residuais jovens, pois apresentam a estrutura da rocha que lhe deu origem, denominada rocha mãe (SOUSA, 2016). Já aqueles são, em geral, resultantes da atuação de processos pedológicos em condições bem drenadas, clima úmido e tropical (VENTURINI, 2015).

Do ponto de vista mineralógico e microestrutural, os solos lateríticos são caracterizados por apresentarem, nas frações areia e pedregulho, grãos com elevadas resistências química e mecânica. Neste sentido, Castro (2002) afirma que, nestas frações, o mineral encontrado com mais frequência é o quartzo, que imprime ao solo boas propriedades mecânicas. Além disso, também pode haver a presença de minerais pesados, como a magnetita e a ilmenita, predominantes nas “terras roxas”, além de ser

frequentemente encontrada a laterita ou concreção laterítica, constituída basicamente de óxidos hidratados de ferro (Fe) e alumínio (Al).

Na fração silte, além dos minerais também presentes na fração areia, pode ocorrer a presença de torrões de argila dificilmente desagregáveis, mesmo com uso de defloculante e aparelhos dispersores (CASTRO, 2002). Já na fração argila, devido à laterização, estão geralmente presentes o argilomineral caulinita e elevada quantidade de partículas compostas de hidróxidos e óxidos de Fe e Al, minerais estes que, de acordo com Medrado (2009), conferem a estes solos as cores vermelho, amarelo, marrom e alaranjado.

Já os solos saprolíticos, microestruturalmente, "são mais heterogêneos e constituídos por uma mineralogia mais complexa, pois contêm minerais ainda em decomposição" (DARIVA, 2016). Neste sentido, pode-se citar como peculiaridades a existência de grande diversidade de minerais diferentes do quartzo nas frações areia e pedregulho. Dentre estes, Nogami e Villibor (1995) destacam os fragmentos de rochas, os feldspatos e as micas. Apesar disso, muitos solos saprolíticos também podem apresentar o quartzo com predominância.

As propriedades dos fragmentos de rochas podem ser bastante variáveis, pois dependem da sua natureza petrográfica particular. Já os feldspatos possuem relativa facilidade em se fragmentarem e conferem considerável absorção de água ao solo. As micas, de acordo com Nogami e Villibor (1995), possuem como efeitos mais marcantes a elevação do limite de liquidez, a diminuição do índice de plasticidade, a alta expansibilidade por aumento de umidade, a elevação da umidade ótima e a redução da massa específica aparente seca máxima na compactação, além da redução da capacidade de suporte e do módulo de resiliência.

A fração silte dos solos saprolíticos também tende a apresentar, segundo Nogami e Villibor (1995), uma constituição de minerais muito variada, mesmo ocorrendo casos em que a mesma é composta por somente um mineral, sendo o quartzo um mineral de comum ocorrência nesta fração. Também podem estar presentes os minerais caulinita e mica. A primeira, por exemplo, pode levar o solo a apresentar índice de plasticidade diferente de zero, enquanto a segunda tende a ocasionar grande expansão nos mesmos quando imersos em água e baixa capacidade de suporte.

Já na fração argila, podem existir a caulinita, a montmorilonita e a illita, sendo que as últimas correspondem a minerais mais ativos do que a primeira, segundo Dariva

(2016). Podem ocorrer também, segundo Villibor e Nogami (2009), óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, porém os minerais não se apresentam recobertos por estes, ao contrário do que ocorre nos solos lateríticos.

2.3. Materiais e métodos

2.3.1. Materiais

2.3.1.1. Solos

As áreas de coleta dos solos analisados estão situadas dentro do campus Viçosa da Universidade Federal de Viçosa, no município de Viçosa. Este município está geograficamente localizado entre as latitudes de 20º41’20" S a 20º49’35" S e entre as longitudes de 42º49’36" W a 42º54’27" W, a uma altitude média de 650 metros e se encontra no norte da região conhecida como Zona da Mata Mineira, no estado de Minas Gerais (MG), Brasil.

Com relação às áreas de coleta das amostras, estas estão representadas na Figura 1 e referidas neste estudo como:

- “Cavalos”: localizada em um trecho de acesso interno ao campus Viçosa da UFV, conhecido como Alto dos Barbados. Trata-se de um solo residual maduro, com horizonte B latossólico de tonalidade avermelhada, blocos bem individualizados, aspecto bem poroso, com granulometria argilo-areno-siltosa;
- “Vila Secundino”: localizada em um talude existente próximo à Vila Secundino, entre o Departamento de Medicina e Enfermagem e o Departamento de Zootecnia, no campus Viçosa da UFV. Trata-se de um solo residual jovem, com horizonte C saprolítico profundo, de coloração acinzentada, oriundo de um perfil de intemperismo desenvolvido, de origem gnáissica. Sua composição é basicamente quartzosa, com granulometria entre argila e areia grossa, com predominância de areia média.

Figura 1:Localização das áreas de coleta das amostras dos solos pesquisados.

Fonte: (GOOGLE EARTH, 2018).

2.3.2. Métodos

2.3.2.1. Coleta e Preparação do Solo

Após a seleção das áreas, foram coletadas amostras deformadas representativas dos solos em questão, conforme a NBR 9604 (ABNT, 2016a), que foram ensacadas, identificadas, transportadas e posteriormente armazenadas no Laboratório de Mecânica dos Solos do Instituto Militar de Engenharia (IME), no Rio de Janeiro-RJ.

As amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas na peneira de abertura nominal de 2 mm e guardadas para uso nos procedimentos experimentais descritos a seguir, em obediência à NBR 6457 (ABNT, 2016b).

2.3.2.2. Ensaios de Caracterização Geotécnica

Para a caracterização geotécnica das amostras de solo, foram realizados os seguintes ensaios: granulometria conjunta (ABNT, 2016c), limites de Atterberg

(ABNT, 2016d; ABNT, 2016e) e peso específico dos grãos sólidos do solo (ABNT, 1984).

2.3.2.3. Ensaios de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 2016f), na energia do Proctor Normal, sem reuso de material, utilizando cilindro grande (CBR), visando à obtenção do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima dos solos.

2.3.2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a visualização do tamanho e da forma das partículas e a conseqüente correlação destes com prováveis comportamentos geotécnicos dos solos investigados, foram feitos, no Laboratório de Microscopia do Departamento de Ciência dos Materiais do IME/RJ, ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em amostras da fração fina (material passante na peneira nº200) dos dois solos.

2.3.2.5. Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X(EDS) e Fluorescência de Raios-X (XRF).

Visando à identificação dos elementos químicos existentes e a conseqüente correlação destes com prováveis comportamentos geotécnicos dos solos investigados, foram feitos, no Laboratório de Microscopia do Departamento de Ciência dos Materiais do IME/RJ, os ensaios de Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios X (EDS) e de Fluorescência de Raios-X, em amostras da fração fina (material passante na peneira nº200) dos dois solos.

2.4. Resultados e Discussões

2.4.1. Caracterização dos Solos

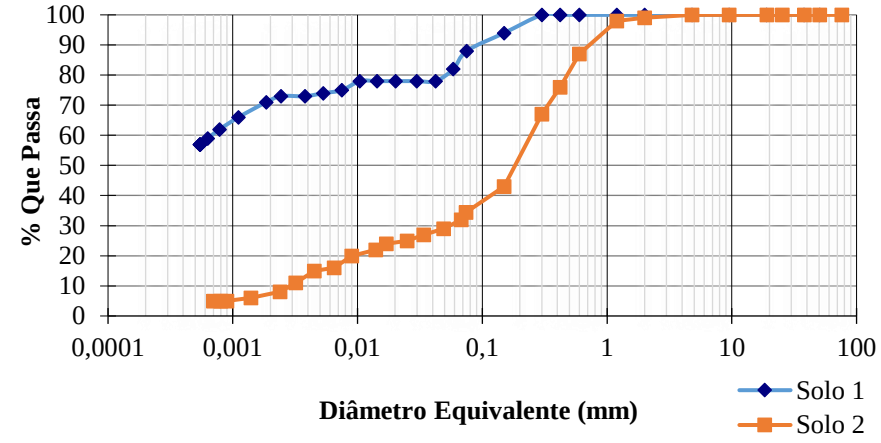
Na Tabela 1, encontram-se os resultados dos ensaios de caracterização dos dois solos estudados. A Figura 2 apresenta as curvas granulométricas dos mesmos e um gráfico geral indicativo da composição dos solos estudados segundo suas frações granulométricas.

Tabela 1: Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos estudados.

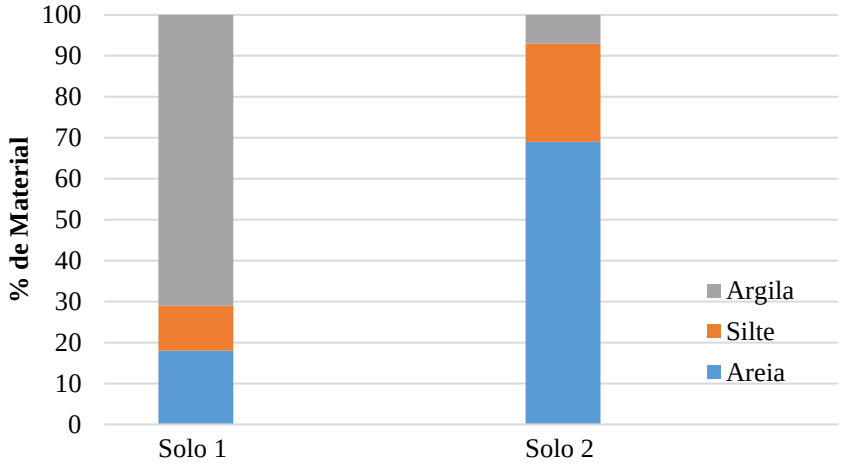
Amostra	Análise Granulométrica (%)					Limites de Consistência (%)			Peso Específico dos Grãos Sólidos (kN/m³)
	Areia[1]			Silte[1]	Argila[1]	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)	
	Grossa[1]	Média[1]	Fina[1]						
Solo 1	0	4	14	11	71	82	44	38	27,39
Solo 2	13	41	15	24	7	28	18	10	26,29

[1] Classificação segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 2: Composição granulométrica das amostras de solo estudadas: a) Curvas granulométricas dos solos; b) gráfico geral da composição granulométrica dos solos.



a)



b)

Fonte: Elaborada pela autora.

A partir da análise granulométrica, é possível verificar que o Solo 1 apresenta grande porcentagem de finos, predominando a fração argila. Texturalmente, esta amostra foi classificada como argila areno-siltosa. Já o Solo 2 apresentou predominância da fração areia, preponderando a areia média, sendo considerado uma areia silto-argilosa.

Tomando como base a granulometria e os limites de *Atterberg*, os solos foram assim classificados de acordo com o *Unified Soil Classification System* (USCS) e com o *Transportation Research Board* (TRB*):*

- O solo 1 foi classificado pelo USCS como um silte de alta compressibilidade (MH), o que confronta com a classificação TRB, que o qualifica como uma argila plástica [A-7-5 (20)]
- O solo 2, de acordo com o USCS, foi qualificado como uma areia argilosa (SC), enquanto que, pela classificação TRB, ele se enquadra no grupo A-2-4 (0), podendo ser uma areia siltosa ou argilosa.

2.4.2. Resultados da classificação MCT

Os ensaios necessários para a classificação MCT do solo 1 e solo 2 foram executados por Batista (2001) e Trindade (2006), respectivamente. Os índices obtidos assim como a classificação dos solos por este sistema se encontram resumidos na Tabela 2. Além disso, na Figura 3, é possível observar o gráfico para a classificação de solos pelo sistema MCT, contendo as localizações dos dois solos estudados.

Tabela 2: Índices e classificação dos solos segundo a metodologia MCT.

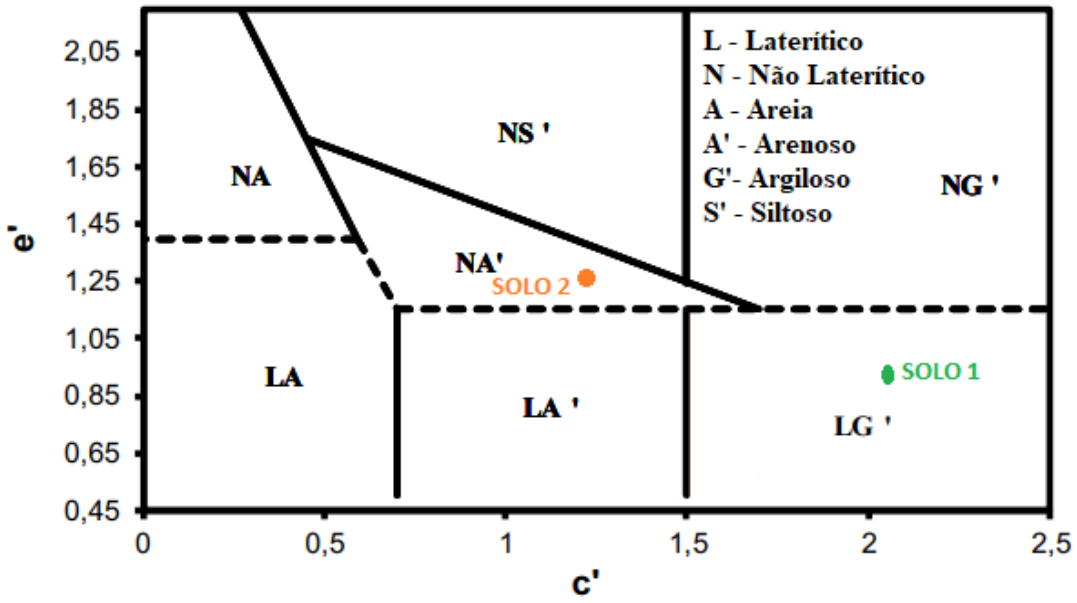
Solos	Índice c'	Índice d'	Índice PI	Índice e'	Classificação MCT
Solo 1 [1]	2,09	20,28	0	0,99	LG' (Laterítico Argiloso)
Solo 2 [2]	1,22	31,28	125	1,25	NA' (Não-Laterítico Arenoso)

Fonte: [1] (BATISTA, 2001); [2] (TRINDADE, 2006).

A partir dos resultados obtidos, foi possível, pela classificação MCT, enquadrar o solo 1 como Laterítico Argiloso ou LG'. Este grupo é caracterizado por ser formado por argilas e argilas arenosas, que constituem o horizonte B dos solos pedologicamente conhecidos por latossolos, solos podzólicos e terras roxas estruturadas. Ao apresentarem percentagem relativamente elevada de grãos de areia, podem também exibir um comportamento semelhante ao dos solos do grupo LA'.

Já o solo 2 foi classificado como Não-Laterítico arenoso ou NA', que são geralmente solos compostos granulometricamente por misturas de areias quartzosas (ou de minerais de propriedades análogas), com finos passando na peneira de 0,075mm, possuindo como tipos mais representativos os solos saprolíticos originados de rochas ricas em quartzo, tais como os granitos, gnaisses, arenitos e quartzitos impuros.

Figura 3: Ábaco da Classificação MCT, contendo as localizações dos solos estudados.



Fonte: Elaborada pela autora.

2.4.3. Comparação entre as classificações

Na Tabela 3, é apresentado o comparativo entre as classificações dos dois solos estudados.

Tabela 3: Comparativo entre as classificações dos solos estudados

Solos	TRB	USCS	MCT
Solo 1	A-7-5 (20)	MH	LG'
Solo 2	A-2-4 (0)	SC	NA'

Fonte: Elaborada pela autora.

Ao comparar as classificações, observa-se que a classificação TRB do solo 1 o avalia como uma argila plástica e o considera impróprio para uso como material de subleito. Já pelo USCS, este solo é avaliado como um silte de alta compressibilidade

(MH), sendo considerado um solo com má trabalhabilidade como material de construção e não sendo indicado para aplicação em fundações de pavimentos, com péssima qualidade para camada de subleito. De forma contrária, ao ser considerado uma argila laterítica (LG') pela metodologia MCT, passa a ser previsto o seu uso até em camadas de sub-base de pavimentos.

Já o solo 2, pela classificação TRB, foi estimado como pertencente ao grupo A-2-4, sendo considerado um material com bom comportamento para uso em subleito, enquanto que, pela USCS, este material foi avaliado como uma areia-argilosa (SC), sendo considerado um solo com boa trabalhabilidade como material de construção e que pode apresentar certo valor para aplicação em fundações de pavimentos. Porém, pela metodologia MCT, ele foi considerado um NA', que, para Nogami e Villibor (1995), é um material que pode ser aplicado na execução das camadas estruturais de um pavimento, porém, de acordo com Dariva (2016), quando for composto por areia mal graduada ou contiver, na fração areia ou silte, mica e/ou microcristais de caulinita e/ou haloisita, são materiais totalmente inapropriados para bases de pavimentos.

Por outro lado, o solo 2 apresenta uma composição granulométrica que o enquadra próximo da faixa recomendada pela equação de Fuller-Talbot para misturas densas de solos com partículas com diâmetro máximo de 2 mm (LIMA et al., 1993).

Além disso, Nogami e Villibor (1995) propuseram uma correlação entre a Metodologia MCT e os Sistemas USCS e TRB, apresentada na Tabela 4. Ao comparar os resultados obtidos nesta pesquisa com estes agrupamentos, é possível verificar que a comparação entre as três classificações, para ambos os solos estudados, está em conformidade com o proposto pelos citados autores.

Tabela 4: Correlação entre a Metodologia MCT e os Sistemas USCS e TRB, segundo Nogami e Villibor (1995).

Classificações Geotécnicas tradicionais	**Classes e grupos da classificação MCT**						
	NA	**NA'**	**NS'**	**NG'**	**LA**	**LA'**	**LG'**
USCS	SP; SM	MS; SC; ML	SM; CL; ML; MH	MH; CH	SP; SC	SC	MH; ML; CH
TRB	A-2	A-2; A-4; A-7	A-4; A-5; A-7-5	A-6; A-7-5; A-7-6	A-2	A-2; A-4	A-6; A-7-5

Adaptado de: (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Ao analisar esta correlação, percebe-se que solos tradicionalmente considerados impróprios para a utilização em obras de pavimentação podem ser considerados materiais com boas propriedades geotécnicas, de forma a serem considerados passíveis de utilização como material de base, sub-base e/ou subleito de muitos pavimentos brasileiros. Este fato foi observado nesta pesquisa, principalmente para o solo 1, considerado impróprio para utilização em pavimentos pelas classificações tradicionais, mas que possui o seu emprego em camadas de pavimentos previsto pela metodologia MCT.

2.4.4. Resultados de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As duas amostras de solos estudadas foram submetidas a ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com a finalidade de identificar padrões de imagem que permitissem as suas caracterizações segundo sua formação laterítica ou não laterítica (Figura 4).

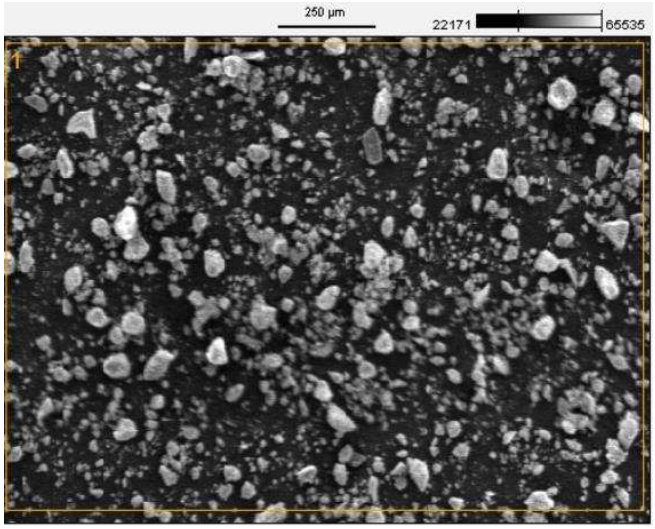
Para Nogami e Villibor (1995), os solos que possuem comportamento laterítico caracterizam-se por apresentar um aspecto “cimentado” no MEV. Isso se deve ao fato dos mesmos, em geral, possuírem a sua fração argila constituída pelo argilomineral caulinita recoberto por óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio. Segundo Sousa (2016), para este tipo de solo, os contornos aparentes dos grãos são nitidamente arredondados, com indícios de vazios internos, e apresentam, em geral, aspecto do tipo “pipoca” ou “esponja”. Estas particularidades apresentadas pelos solos lateríticos faz com que eles, segundo Venturini (2015), quando compactados em condições ideais, adquiram alta capacidade de suporte e baixa perda dessa capacidade quando imerso em água.

Já no caso dos solos saprolíticos, Nogami e Villibor (1995) afirmam que os argilominerais e, eventualmente, outros minerais presentes não se apresentam recobertos por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, diferentemente dos solos lateríticos. Deste modo, os contornos dos argilominerais que os constituem podem ser distinguidos com nitidez nas imagens obtidas pelo MEV.

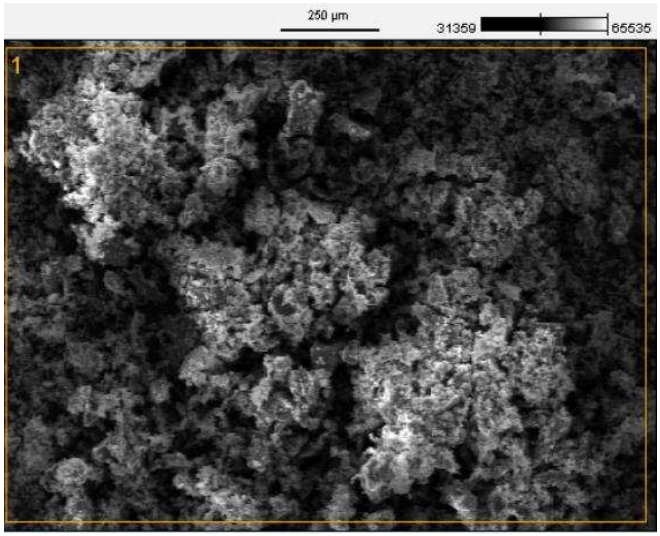
Ao observar a Figura 4 - a, referente ao solo 1, é possível notar a presença de grãos com contorno arredondado e uma certa cimentação. Essas características são indicativas de um solo laterítico, o que se confirma com a classificação MCT (LG').

Já a Figura 4 - b, referente ao solo 2, exibe uma feição muito similar às dos solos apresentados como padrões não lateríticos por Takeda (2006) e Santos (2006), o que, consequentemente, pode indicá-lo como solo não laterítico e está de acordo com a sua classificação MCT (NA').

Figura 4: MEV das amostras: a) Solo 1 e b) Solo 2



a)



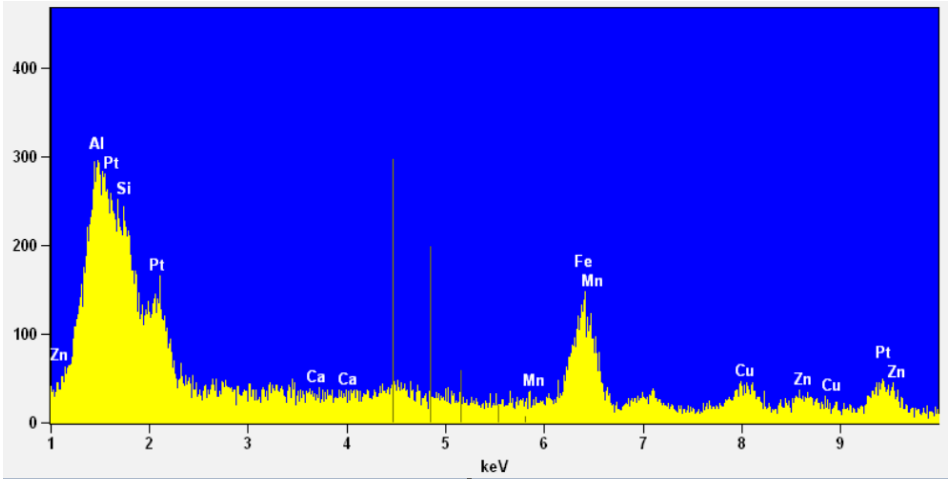
b)

Fonte: Elaborada pela autora.

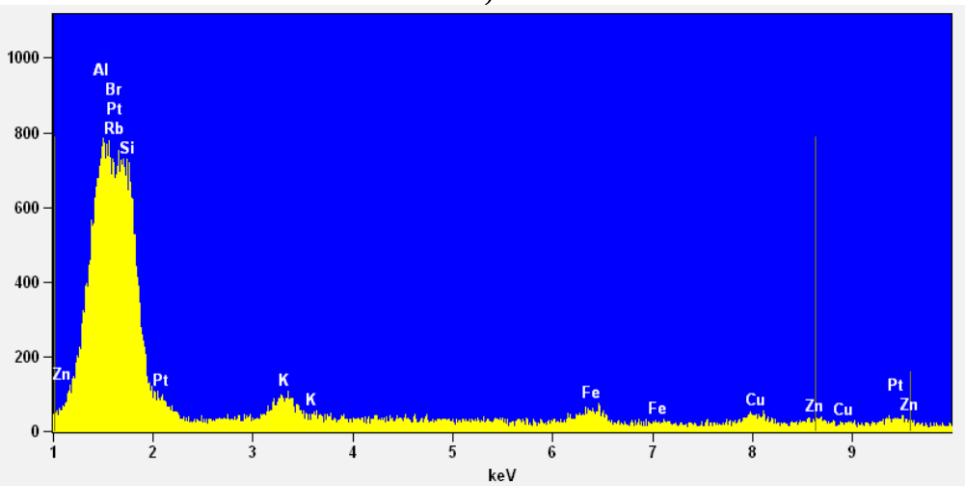
2.4.5. Resultados de Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X(EDS) e Fluorescência de Raios-X (XRF)

Nas Figuras 5 e 6, são apresentados, respectivamente, os gráficos obtidos nos ensaios de EDS e de XRF, os quais indicam os possíveis elementos químicos constituintes de cada solo. A partir destes resultados, é possível identificar, na composição dos solos, a predominância de ferro (Fe) e/ou alumínio (Al), o que pode indicar características de solos lateríticos. Além disso, Sousa (2016) afirma que, na fase de laterização dos solos tropicais, é comum a ocorrência de acúmulo de alguns óxidos, como o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3), além do dióxido de titânio (TiO_2).

Figura 5: Gráficos obtidos no ensaio de EDS: a) Solo 1 e b) Solo 2



a)



b)

Fonte: Elaborada pela autora.

Ao analisar os resultados, verificou-se a predominância dos elementos Al, Si (silício) e Fe em ambos os solos. Além disso, as duas amostras apresentaram Ti (titânio) em sua composição, o que pode indicar um solo em processo de laterização.

Neste sentido, Delgado (2007) afirma que, para um solo em seu estado natural, quanto maior o seu grau de laterização, menor será a sua susceptibilidade à erosão. Além disso, solos com alto grau de laterização tendem a ser altamente permeáveis, possuirem baixa capacidade de suporte, elevada deformabilidade, excelentes condições de drenagem e possibilidade de colapso quando submetidos a determinadas cargas e molhagem. Já Godoy e Bernucci (2000) afirmam que estes tipos de solo em seu estado compactado, ao perderem umidade, adquirem condição de baixa perda de resistência ou até nenhuma perda, mesmo na presença de água.

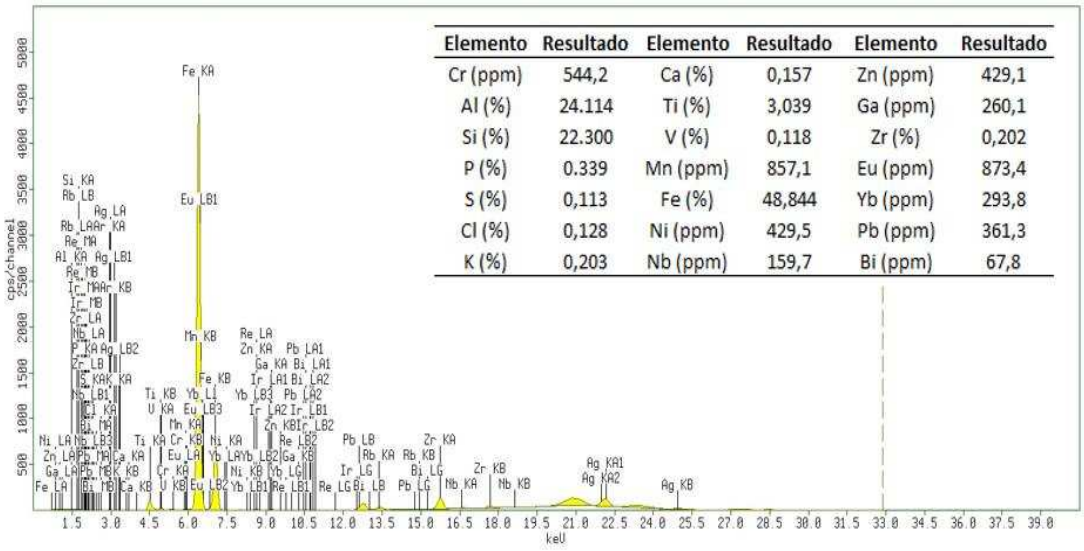
Para o solo 1, devido ao seu comportamento laterítico definido pelo ensaio MCT e pela presença predominante de Fe, seguido por Al e Si, pode-se inferir que o mesmo provavelmente é composto pelo argilomineral caulinita recoberto por óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio, o que possivelmente confere a sua coloração avermelhada.

A predominância deste argilomineral também foi identificada nos resultados de difração de raios-X obtidos por Velten (2008), nas frações silte e argila deste solo, assim como a presença dos minerais goethita e hematita. Segundo Almeida (2012), os óxidos e hidróxidos de ferro aparecem principalmente sob a forma de Goethita (FeOOH), presente em quase todos os tipos de solos e regiões climáticas e Hematita (Fe2O3), que apesar de estar presente em menores quantidades que a Goethita, apresenta alto poder pigmentante. Portanto, estes resultados obtidos por Velten (2008) confirmam as inferências feitas no presente estudo a partir dos resultados de MEV, EDS e XRF obtidos.

Este resultado leva a um bom prognóstico com relação ao comportamento de engenharia deste material, já que, segundo Santos (2006), a combinação desses componentes em um determinado solo é responsável pela formação de agregações estáveis em presença de água, graças ao recobrimento dos argilo-minerais pelos hidróxidos e óxidos hidratados que, além de reduzirem a capacidade de adsorção de água por aqueles, atuam como agentes cimentantes naturais entre as partículas, o que fornece ao solo uma resistência mecânica mais estável, pouco sensível às mudanças

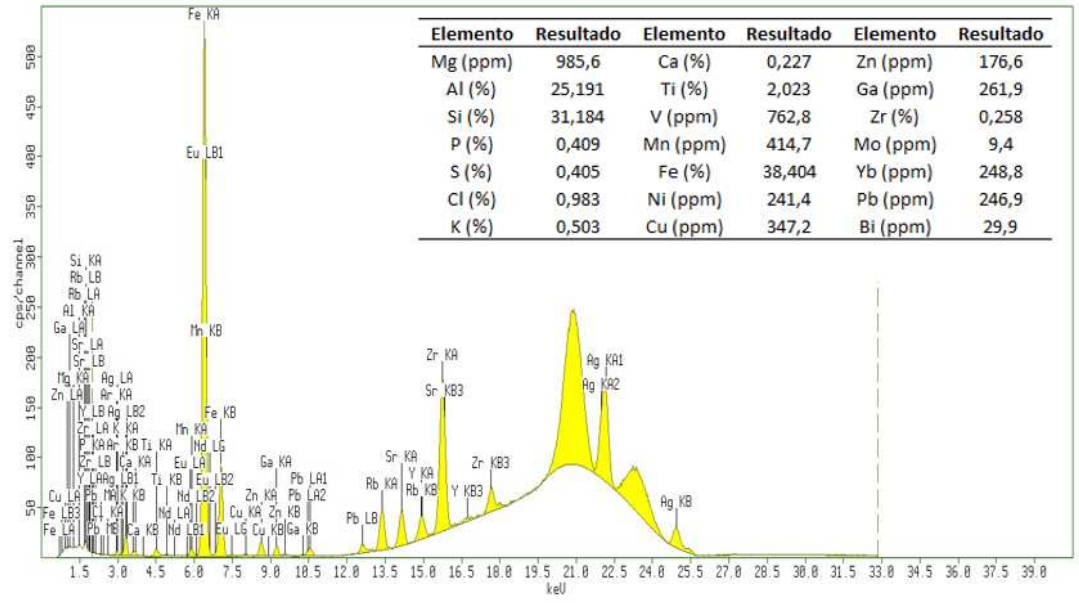
de umidade. Essa cimentação também foi observada na imagem deste solo, obtida pelo MEV (Figura 4-a).

Figura 6: Resultados de Fluorescência de Raios-X dos solos: a) Solo 1 e b) Solo 2



Elemento	Resultado	Elemento	Resultado	Elemento	Resultado
Cr (ppm)	544,2	Ca (%)	0,157	Zn (ppm)	429,1
Al (%)	24.114	Ti (%)	3,039	Ga (ppm)	260,1
Si (%)	22.300	V (%)	0,118	Zr (%)	0,202
P (%)	0.339	Mn (ppm)	857,1	Eu (ppm)	873,4
S (%)	0,113	Fe (%)	48,844	Yb (ppm)	293,8
Cl (%)	0,128	Ni (ppm)	429,5	Pb (ppm)	361,3
K (%)	0,203	Nb (ppm)	159,7	Bi (ppm)	67,8

a)



Elemento	Resultado	Elemento	Resultado	Elemento	Resultado
Mg (ppm)	985,6	Ca (%)	0,227	Zn (ppm)	176,6
Al (%)	25,191	Ti (%)	2,023	Ga (ppm)	261,9
Si (%)	31,184	V (ppm)	762,8	Zr (%)	0,258
P (%)	0,409	Mn (ppm)	414,7	Mo (ppm)	9,4
S (%)	0,405	Fe (%)	38,404	Yb (ppm)	248,8
Cl (%)	0,983	Ni (ppm)	241,4	Pb (ppm)	246,9
K (%)	0,503	Cu (ppm)	347,2	Bi (ppm)	29,9

b)

Fonte: Elaborada pela autora.

Já no solo 2, por ser desenvolvido de gnaisse basicamente quartzoso e ter apresentado nestes ensaios grande quantidade de Si, é possível que haja a presença de argilominerais do grupo Caulinita, muito comum nas frações silte e argila de solos saprolíticos. Nogami e Villibor (1995) afirmam que a presença deste mineral na fração

silte em solos saprolíticos colabora para que se obtenha índice de plasticidade diferente de zero, o que realmente foi observado nos resultados dos índices de consistência obtidos para este material (Tabela 1). Ademais, é possível inferir o desenvolvimento de coesão, devido à presença deste mineral.

Neste solo, também é possível deduzir a presença de argilominerais do grupo Illita, devido à identificação da presença de potássio (K) e de manganês (Mn), oriundo provavelmente da substituição parcial do Al. Segundo Nogami e Villibor (1995), os argilominerais do grupo Illita são de presença comum na fração argila de solos saprolíticos.

Neste sentido, Nogami e Villibor (1995) afirmam que a Illita é um argilomineral do grupo das micas, caracterizado por ser pouco expansivo, não sendo muito afetado pela presença de água. Logo, pode-se inferir que o solo 2, provavelmente, tende a ser pouco expansivo e a ter pouca variação de resistência com a alteração de umidade.

Além disso, apesar de ter apresentado grande quantidade de Fe e Al, o solo 2 não possui uma coloração avermelhada, pois, diferentemente do que ocorre no solo 1, possivelmente os argilominerais e, eventualmente, outros minerais presentes não se apresentam recobertos por óxidos e hidróxidos de Fe e Al, o que também caracteriza um comportamento de solo saprolítico. Logo, este tipo de material, diferentemente do solo laterítico 1, não necessariamente gerará formação de agregações estáveis em presença de água.

Ao verificar os resultados de difração de raios-X para este solo, obtidos por Trindade (2006), observou-se na fração silte-argila (<0,53 μm) a presença de caulinita, quartzo e goethita, além da presença de mica, o que confirma as inferências feitas para este solo no presente estudo.

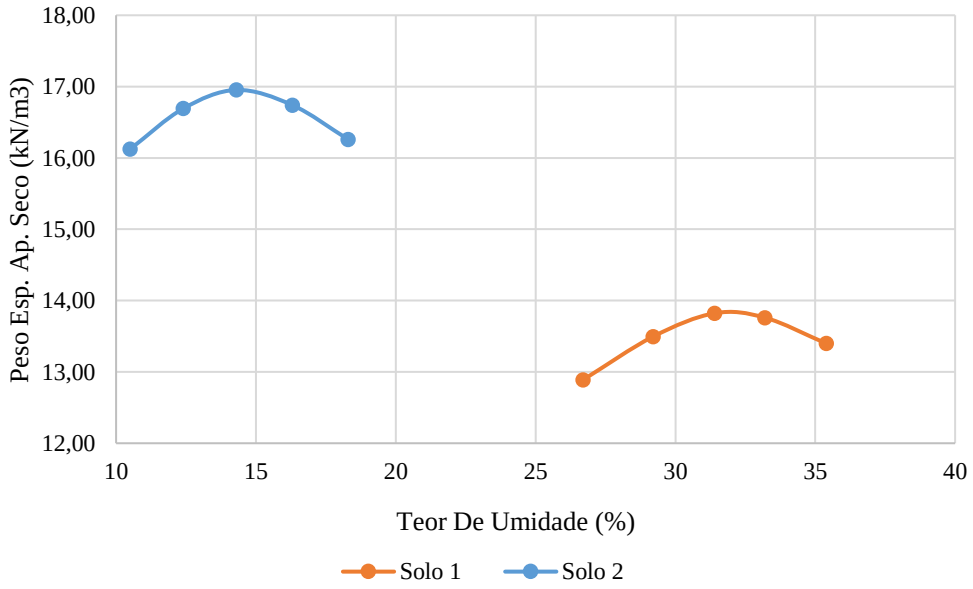
2.4.6. Resultados dos Ensaios de Compactação

Os resultados obtidos nos ensaios de compactação Proctor Normal dos solos são apresentados na Figura 7.

A partir dos resultados de compactação, é possível verificar que o solo 1 possui um peso específico aparente seco máximo menor e um teor de umidade ótimo maior que o obtido pelo solo 2, o que pode ser justificado pelo fato daquele ser um

material com uma granulometria mais fina do que a deste. Neste sentido, os solos mais finos tendem a apresentar umidades ótimas mais elevadas e pesos específicos aparentes secos máximos menores em comparação aos solos mais granulares.

Figura 7: Curvas de compactação Proctor Normal dos solos.



Fonte: Elaborada pela autora.

2.5. Conclusões

A partir dos resultados apresentados nessa pesquisa, foi possível realizar uma comparação entre a classificação MCT e as classificações geotécnicas tradicionais (USCS e TRB), complementando-as com o auxílio de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) e Fluorescência de Raios-X (XRF), em duas amostras de solos tropicais residuais com características granulométricas diferentes.

O solo 1, classificado como um silte de alta compressibilidade (MH) pelo USCS e avaliado como uma argila plástica [A-7-5 (20)] pelo TRB, foi considerado impróprio para uso em camadas de pavimentos por estas classificações tradicionais. Porém, pela classificação MCT, o mesmo foi classificado como LG', tendo o seu uso previsto até em camadas de sub-base de pavimentos. Já o solo 2 foi classificado pelo USCS como uma areia argilosa (SC) e pelo TRB como pertencente ao grupo A-2-4(0), sendo considerado por ambos um material com possível aplicação em camadas de

pavimentos. Porém, pela metodologia MCT, ele foi considerado um NA', que, segundo Nogami e Villibor (1995), são solos que possuem utilização recomendada em camadas de pavimentos rodoviários, mas não em caráter prioritário em frente a outras classes de solos tropicais.

Já os ensaios de MEV, EDS e XRF foram importantes para analisar a microestrutura e a composição dos elementos presentes na fração fina dos solos, inferindo, a partir desta análise, possíveis comportamentos geotécnicos dos materiais estudados e confirmando o seu comportamento (laterítico ou não laterítico) previsto pela classificação MCT.

Para o solo 1, devido ao seu comportamento laterítico definido pelo ensaio MCT e pela presença predominante de Fe, seguido por Al e Si, e pela cimentação observada no MEV, pode-se inferir que o mesmo é composto pelo argilomineral caulinita recoberto por óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio. Isso possivelmente confere a sua coloração avermelhada e leva a um bom prognóstico com relação ao seu comportamento de engenharia geotécnica, podendo ser um solo que possui uma tendência de formação de agregações estáveis em presença de água e que, consequentemente, possui uma resistência mecânica mais estável, pouco sensível às mudanças de umidade no solo. Estas inferências quanto à mineralogia foram confirmadas pelos resultados de difração de raios-X obtidos por Velten (2008).

Já no solo 2, por ser desenvolvido de gnaisse basicamente quartzoso e ter apresentado nestes ensaios grande quantidade de Si, é possível que haja a presença de argilominerais do grupo Caulinita. Além disso, também foi possível deduzir a presença de argilominerais do grupo Illita, o que leva a inferir um comportamento, provavelmente, pouco expansivo e com pouca variação de resistência com a alteração de umidade, para este solo. Estas inferências quanto à mineralogia estão de acordo com os resultados de difração de raios-X obtidos por Trindade (2006).

Estas características de engenharia, inferidas pelas análises químicas, mineralógicas e microestruturais dos solos estudados favorecem a confirmação da possibilidade de aplicação destes solos em camadas de pavimentos rodoviários e estão de acordo com os resultados obtidos pelo MCT. Esta aplicação em camadas de pavimentos é restrita a obtenção de determinados parâmetros de engenharia, sendo, em certos casos, necessário o uso de técnicas de reforço e/ou melhoramento dos solos, para que estes possam ser obtidos e os solos estudados possam ser utilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. D. S. **Espacialização e quantificação de sesquióxidos de ferro (goethita e hematita) em solos tropicais por meio de sensoriamento remoto hiperespectral.** Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604:** Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 2016e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016f.

BATISTA, I. M. **Comportamento mecânico de dois solos típicos da região de Viçosa-MG, para fins de utilização em camadas de pavimentos flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2001.

BULBAK, J. A. **Caracterização físico-química-mineralógica e micromorfológica de um perfil de alteração de rocha alcalina do Rio De Janeiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2008.

CASTRO, B.A.C. **Caracterização geotécnica de golos da região central de Minas Gerais para aplicação em obras rodoviárias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.2002.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos**. Brasília, 2017a.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília, 2017b.

CUSTÓDIO, J. S. **Investigação e análise de parâmetros geotécnicos obtidos em ensaios de laboratório e ensaios *in situ* (DMT, PMT, SPT, PDM).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2003.

DARIVA, L. B. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de um subleito de pavimento de via férrea do tipo *heavy haul*.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

DELGADO, A. K. C. **Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais característicos do distrito federal para uso na pavimentação rodoviária**. Tese (Doutorado em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

GODOY, H.; BERNUCCI, L. B. Caracterização de propriedades geotécnicas de solos realizada no próprio campo e de maneira expedita. In: 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2000, Brasília – D.F. **Anais 32ª RAPv**, Brasília, 2000.

GOMES, M. S. **Estudos de solos tropicais de granulometria transicional para emprego em pavimento ferroviário.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.

GOOGLE. **Google Earth website**. Disponivel em: <http://earth.google.com/>.Acesso em: 11 de Abril de 2018.

LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização dos solos II: técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa**. Caderno Didático n.333, Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1993. 32 p.

MARANGON, M. **proposição de estruturas típicas de pavimentos para região de minas gerais utilizando solos lateríticos locais a partir da pedologia, classificação MCT e resiliência**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MARSON, M. **Análise crítica da classificação MCT para solos tropicais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, SãoJosé dos Campos,2004.

MEDRADO, W.A. **Caracterização geotécnica de solo da região norte de Minas Gerais para aplicação em obras rodoviárias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto,2009.

MENDES, A. J. C. **Análise da deformabilidade de solos tropicais da microrregião de Viçosa-MG, visando à aplicação em estruturas de pavimentos flexíveis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2017.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. United States of America: JOHN WILEY & SONS, INC., 3rd ed. 2005. 529p.

MOREIRA, M. A. L.; FREITA JÚNIOR, M.; TOLOI, R. C. O transporte rodoviário no Brasil e suas deficiências. **Revista FATEC Zona Sul**, v. 4, n.4, p. 1 – 13, 2018.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: **Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia.** Rio de Janeiro, 1981, V. 1, p. 30-41.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo: Villibor, 1995.240p.

PASSOS, M. C. F. **Metodologia MCT aplicada aos solos arenosos finos lateríticos do Rio Grande do Sul visando pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

SANTOS, E.F. dos **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificação geotécnica aplicada aos solos tropicais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – área Transportes), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2006.

SANTOS, J. D. **Contribuição ao estudo dos solos lateríticos granulares como camada de pavimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1998.

SANTOS, L. J. C.; BARRIER, J.; GRIMALDI, M.; CASTRO, S. S. Utilização do microscópio eletrônico de varredura (mev) para o reconhecimento de revestimentos argilosos. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 53, p. 35-43, 2003.

SILVA, T. O.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; CALIJURI, M. L.; LANI, J. L.; OLIVEIRA, T. M. Sistemas de classificações geotécnicas de solos: estudo de caso aplicado à rodovia não pavimentada VCS 346, Viçosa, MG.**R. Árvore,** V.34, n.2, p.313-321, 2010.

SOARES, E. P. **Caracterizações geotécnica e mineralógica de um filito dolomítico do quadrilátero ferrífero com vistas ao estudo de estabilidade de taludes incorporando a sucção.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2008.

SOUSA, M. A. S. **Análise geotécnica de solos tropicais de ocorrência ao longo da Estrada de Ferro Carajás para uso como camadas de pavimento ferroviário.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

TAKEDA, M. C. **A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos do subleito de rodovias do interior paulista**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – área Transportes), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2006.

TRINDADE, T. P. **Caracterização tecnológica de três solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em geotecnia rodoviária e ambiental.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2006.

VELTEN, R. Z. **Condutividade eletrosmótica e remediação de solos contaminados com cádmio via eletrosmose.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2008.

VENTURINI, J. A. **Aplicação da metodologia MCT para classificação de alguns solos e rochas da região de Santa Maria**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, 2015.

VIANA, H. M. F. **Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior do estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – área Transportes), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2007.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso de solos finos lateríticos**. São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 291 p.

VON DER OSTEN, F. B. **Avaliação de quatro solos tropicais para sublastro da estrada de ferro carajás.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

3. INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIETILENO TEREFTALATO (PET) DE DISTRIBUIÇÃO ALEATÓRIA NA COMPACTAÇÃO E CAPACIDADE DE SUPORTE DE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS

Resumo – O reforço de solos é uma técnica eficaz para melhorar suas propriedades de engenharia. Neste contexto, pode-se citar o reforço de solos com fibras. Igualmente, devem-se citar questões ambientais atuais, como, por exemplo, o grande crescimento da produção mundial de plásticos e o seu consequente acúmulo na natureza. Nesse contexto, o presente trabalho busca contribuir para uma melhor compreensão do comportamento de misturas solo-fibras PET, visando colaborar diretamente com o entendimento e a definição de questões técnico-científicas envolvidas no referido tema. Para isso, foi analisada a influência da adição deste tipo de fibra nas características de compactação, na capacidade de suporte e na expansão de dois solos residuais tropicais, com características granulométricas diferentes, amostrados no município de Viçosa - MG. No desenvolvimento deste estudo, foram utilizadas fibras de garrafas PET, nos teores de 0,50% e 1,00% em relação ao peso seco do solo, com larguras de 2mm e 4mm, comprimento de 1cm e divididas em lisas e rugosas, avaliando-se o eventual efeito dessas variáveis sobre os parâmetros de comportamento de engenharia investigados. Como resultado da compactação, verificou-se que, para ambos os solos, a inclusão das fibras diminuiu a densidade aparente seca da mistura compactada em comparação com o solo compactado. Embora não tenha sido possível estabelecer uma relação direta entre as características das fibras e o valor da umidade ótima, constatou-se uma tendência de redução da umidade de compactação dos sistemas reforçados comparativamente aos solos puros compactados. A despeito da perda de densificação das misturas solo-fibras comparativamente aos solos compactados, observou-se uma melhora na resposta de engenharia para os sistemas reforçados, indicada pelos parâmetros derivados dos ensaios CBR, o que leva a concluir que, para tais sistemas e para as particularidades da pesquisa, a densificação traduzida pela curva de compactação e pelos parâmetros de ótimo não é a propriedade física mais indicada para estimar possíveis melhorias nos índices resultantes dessa modalidade particular de ensaio. Já através do índice de resistência CBR, verificou-se um aumento da capacidade de suporte de ambos os solos com a inclusão das fibras e

uma diminuição da expansão dos mesmos comparativamente ao solo puro. Também foi observado que as misturas com fibras rugosas, em relação às fibras lisas, apresentaram capacidade de suporte menor e se expandiram menos. Considerando-se as exigências da especificação do DNIT para reforço de subleito e considerando subleitos compostos pelos solos analisados, verificou-se que todas as misturas solo-fibras ensaiadas possuem possibilidade de emprego neste tipo de camada.

Palavras-Chave: Solos tropicais. Reforço. Fibras PET.

3.1. Introdução

O solo é o material mais utilizado pelo homem em suas construções, desde os tempos mais longínquos. Desde a antiguidade, tem sido empregada a técnica de reforço de solos com a inclusão de diversos tipos de materiais, como raízes de árvores, telas de bambu, fibras de coco, dentre outros (OLIVEIRA et al., 2016).

O reforço de solos é uma técnica eficaz e segura para melhorar sua resistência, rigidez e estabilidade volumétrica, podendo ser utilizada em uma variedade de aplicações pertinentes à Engenharia Civil, como em estruturas de contenção e em camadas estruturais de pavimentos, por exemplo. Neste contexto, pode-se citar a técnica de reforço de solos com fibras, que, para Leocádio (2005), é um método que tem demonstrado eficácia devido à melhoria das propriedades mecânicas que é capaz de conferir a estes materiais, sob a forma de aumentos de resistência mecânica, capacidade de suporte a deformações plásticas e capacidade de absorção de energia devido à deformação até a ruptura, além da diminuição da queda da resistência pós-pico.

Ao mesmo tempo, devem-se citar as questões ambientais que ocorrem atualmente, como, por exemplo, o grande crescimento da produção mundial de plásticos e o seu conseqüente acúmulo na natureza. No que concerne a este tema, um dos tipos de resíduos plásticos mais comuns é o Polietileno Tereftalato (PET), o qual é muito utilizado na produção de garrafas de PET, que são pouco aproveitadas pela indústria de reciclagem e demoram cerca de um século para se decomporem na natureza (ABIPET, 2018).

De acordo com Montardo et al. (1998), o conhecimento de técnicas que permitam a reutilização racional desses resíduos plásticos é uma das principais formas

de combate ao sério problema ambiental causado pela produção crescente, em escala mundial, deste tipo de material, devendo os seus métodos de reutilização prover meios eficazes para a sua disposição, assim como contribuir para a resolução de questões econômicas e ambientais envolvidas no problema.

Nesse sentido, no âmbito da Engenharia Civil Geotécnica, a qual relaciona-se diretamente com projetos de engenharia voltados para obras de terra, é relevante o desenvolvimento de pesquisas e estudos que procurem verificar a viabilidade do uso de resíduos de PET como reforço de solos. Isso se justifica, pois este material poderá corroborar com melhorias de algumas das características geotécnicas dos solos, podendo ser uma solução tecnicamente viável, além de ambientalmente sustentável, uma vez que possibilita garantir um novo destino para estes resíduos e ajuda a minimizar a poluição causada pelo acúmulo de garrafas PET na natureza. Nessa linha de pensamento, o estudo do reforço de solos com fibras PET é de suma importância, pois visa contribuir tanto com a resolução de questões técnicas, quanto ambientais envolvidas no problema.

Dentro deste panorama, o presente trabalho busca contribuir para uma melhor compreensão do comportamento de misturas solo-fibras PET, analisando a influência da adição deste tipo de fibra na compactação, na capacidade de suporte e na expansão de dois solos residuais tropicais com características granulométricas distintas.

3.2. Fundamentação Teórica

3.2.1. Aspectos gerais sobre o Polietileno Tereftalato (PET)

O Polietileno Tereftalato (PET) é um polímero termoplástico, da família do poliéster, utilizado na fabricação de diversos produtos, como fibras têxteis, recipientes para bebidas carbonatadas, filmes para fotografia, embalagens, entre outros. De acordo com Senez (2016), por ser termoplástico, este material possui capacidade de amolecer quando aquecido e se torna mais fluido quando um calor adicional é aplicado, o que permite sua remodelação e reciclagem, sem que as suas propriedades físicas sejam afetadas negativamente.

De acordo com Mano e Mendes (2004), o Polietileno Tereftalato apresenta como características o alongamento na ruptura de 7% a 50% e a densidade relativa entre 1,33 e 1,45, além de sua temperatura de fusão ser da ordem de 270ºC. Ele é

produzido industrialmente por esterificação direta do ácido tereftálico purificado (PTA) com monoetileno glicol (MEG), ou seja, esses dois elementos (PTA e MEG) são misturados, reagindo entre si e formando uma pasta que passa por um processo de cristalização e forma o PET como é conhecido (ABIPET, 2018).

Como consequência da alta utilização desse material e do fato de sua decomposição ser muito lenta, tem-se um aumento considerável da geração de resíduos. Dessa forma, uma das alternativas cabíveis a essa situação diz respeito à reciclagem dos materiais à base de PET (SILVA, 2007).

3.2.2. Reciclagem de garrafas PET

O consumo de garrafas PET na sociedade atual é muito elevado. A destinação final das mesmas é um problema difícil a ser solucionado, uma vez que estas ocupam um espaço muito grande de armazenamento e tardam bastante tempo para se decompor. Pelo fato das garrafas recicladas não poderem ser reutilizadas em contato com bebidas, alimento, remédios, brinquedos e materiais hospitalares, seu reuso fica ainda mais restrito, aumentando o descarte final do produto (GHAZI, 2015).

De acordo com ECYCLE (2014), mesmo a garrafa PET sendo um produto 100% reciclável e de baixo custo de produção, a fabricação e o descarte inadequados fazem com que a mesma represente um enorme perigo para o meio ambiente e para a saúde humana. De acordo com o Censo da reciclagem do PET no Brasil (2016), o país registrou, em 2015, uma taxa de reciclagem deste material de 51% do produto descartado, número relativamente baixo se comparado com a reciclagem de latas de alumínio que, de acordo com ABRALATAS (2018), obteve 97,9% em 2015 e 97,7% em 2016, índices maiores que o dos Estados Unidos, do Japão e de alguns países da Europa, de acordo com ECYCLE (2014).

Esta grande quantidade de PET não reciclada pode gerar graves impactos ambientais, principalmente pelo descarte inadequado deste material na natureza, que, na maioria das vezes, é levado a rios e lagos, agravando a poluição da água e gerando problemas de alagamentos nas cidades, além da perda de biodiversidade.

Este problema chega também aos oceanos, onde está se tornando notadamente grave. Segundo a Revista Galileu (2018), entre a costa do estado norte-americano da Califórnia e o Havaí, no Oceano Pacífico, existe uma mancha de lixo,

resultado do acúmulo de detritos, principalmente de plástico. No local, acumulam-se microplásticos com tamanho de até 5 milímetros junto a pedaços de lixo lançados em cursos d'água que desaguam no mar e vão parar na região, originários de diferentes países e que podem chegar a quase 2 toneladas. Para a Revista Galileu (2018), a incidência de correntes marítimas do Oceano Pacífico favorece a acumulação do lixo nessa região do planeta, em uma tendência que só aumenta e agrava a extensão do problema.

Buscando a redução dos impactos causados por resíduos na natureza, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010a), de 2 de agosto de 2010, e seu regulamento, Decreto Nº 7.404 (BRASIL, 2010b), de 23 de dezembro de 2010, introduziu os instrumentos de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa.

A PNRS define a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos como:

> o conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos, nos termos desta Lei. (BRASIL, 2010a)

Já a logística reversa é um dos instrumentos para aplicação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e é definida pela PNRS como:

> instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010a).

Alguns setores da economia utilizam produtos que levam PET reciclado, e, de acordo com ABIPET (2018), a sociedade está sempre em contato com algum artigo ou produto feito com este material. Como exemplo, podem-se citar as fitas de arquear de PET, a “madeira” plástica, mantas, edredons e roupas feitas com poliéster de PET reciclado, tintas e vernizes com PET em sua fabricação, etc.

Diante do exposto, Coelho et al. (2016) afirmam que é essencial a aplicação da logística reversa a garrafas PET, por ser uma atividade benéfica ao meio ambiente, empresas e toda a sociedade, podendo este material gerar uma diversidade de novos produtos, além de oferecer às empresas vantagem competitiva em um mercado cada vez mais sustentável.

3.2.3. Pesquisas sobre reforço de solos com PET

A grande maioria de estudos realizados em materiais compósitos tem a finalidade de comparar o comportamento de solos reforçados com o de solos não reforçados por meio de seus parâmetros de resistência ou deformabilidade, analisando, principalmente, as conseqüências em detrimento das causas (SOTOMAYOR, 2014).

Com o intuito de se encontrar alternativas para os resíduos de garrafas PET, alguns estudos foram realizados com o objetivo de se analisar a inclusão do resíduo de PET no solo e os efeitos causados pelo mesmo, visando à aplicação em diversas áreas da Geotecnia. Dentre as pesquisas mais recentes, podem ser citadas as desenvolvidas por Montardo et al. (1998), Prietto et al. (1999), Consoli et al. (2002), Bento (2006), Choudhary et al.(2010), Pinto et al. (2010), Assis e Melo (2012), Ortiz (2013), Rocha e Novo (2015), Louzada (2015), Santos e Silva (2015), Louzada e Casagrande (2016), Oliveira et al. (2016), Sousa et al. (2016) e Senez (2016).

Em geral, estas pesquisas têm avaliado a viabilidade técnica dos sistemas solo-fibras PET compactados através dos seguintes ensaios: triaxial estático, cisalhamento direto, perda de massa por imersão, permeabilidade, Índice de Suporte Califórnia, mini-CBR, cone adaptado, compressão simples, tração por compressão diametral, ciclos de umedecimento e secagem, ensaios de prova de carga em placa. Nestas pesquisas, têm sido consideradas variáveis, como tipo de solo (sedimentares, residuais), granulometria da fibra (em pó, cortada e triturada), presença de aditivos na mistura solo-fibra (cal, cimento, bentonita), textura superficial da fibra (lisa, frisada), dimensões da fibra (comprimento, largura, espessura) e porcentagem de fibra.

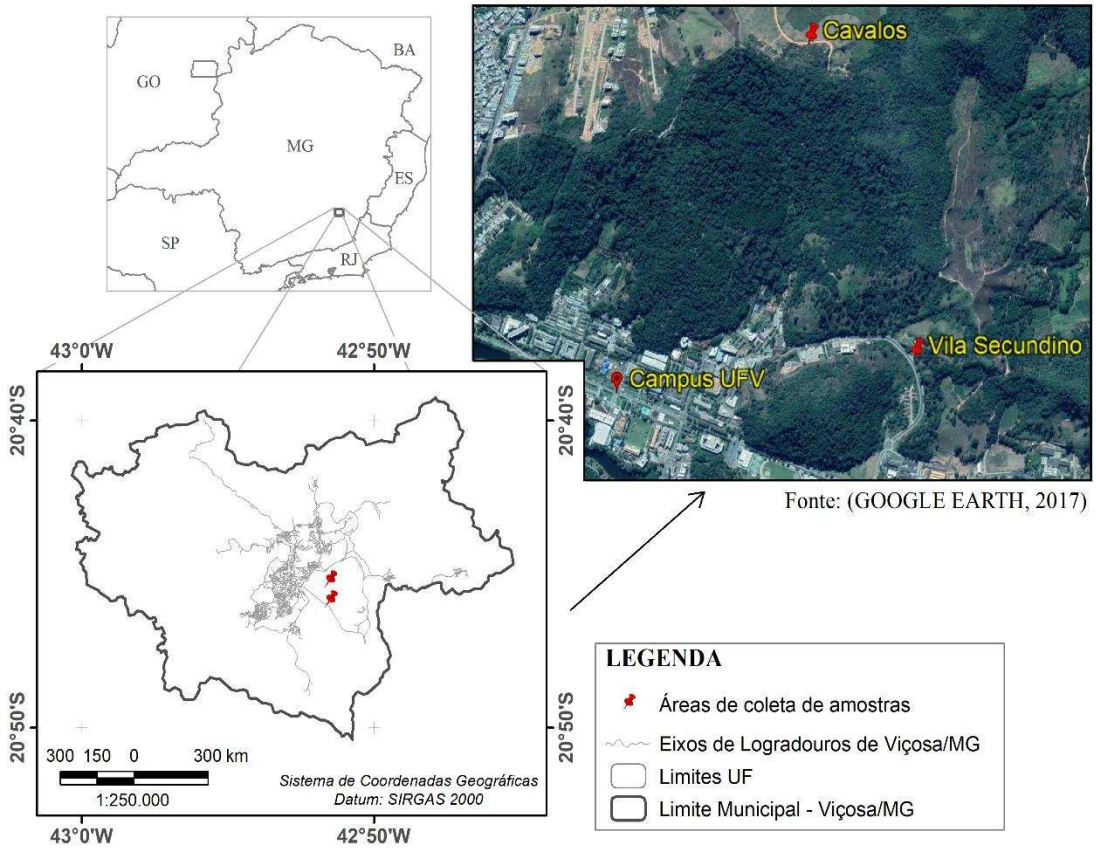
3.3. Materiais e métodos

3.3.1. Área de estudo

Para o presente estudo, foram utilizados dois tipos de solos, ambos coletados no município de Viçosa, estado de Minas Gerais (MG), Brasil (Figura 8), localizado no norte da região conhecida como Zona da Mata Mineira. O município em questão é geograficamente localizado entre as latitudes de 20º41’20" S a 20º49’35" S e entre as longitudes de 42º49’36" W a 42º54’27" W, a uma altitude média de 650 metros.

As áreas de coleta das amostras (Figura 8) são referidas pelos nomes de “Cavalos” (latitude de 20°45'8.75"S e longitude de 42°51'29.65"W) e “Vila Secundino” (latitude de 20°45'48.25"S e longitude de 42°51'29.44"W) , estando ambas localizadas dentro do *Campus* Viçosa da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Figura 8: Localização do município de Viçosa –MG e das áreas de coleta das amostras dos solos pesquisados.



Fonte: Elaborada pela autora.

3.3.2. Materiais utilizados

3.3.2.1. Solos

Neste estudo, foram utilizados dois tipos de solos granulometricamente distintos:

- Solo 1 (Figura 9a): referido nesta pesquisa como “Cavalos”, é um solo residual maduro, com horizonte B latossólico de tonalidade avermelhada, blocos bem individualizados, aspecto bem poroso e, segundo Batista (2001), classificado como um solo argiloso laterítico (LG’) pela metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical);
- Solo 2 (Figura 9b): referido nesta pesquisa como “Vila Secundino”, é um solo residual jovem, oriundo de um perfil de intemperismo desenvolvido de gnaisse, que apresenta coloração acinzentada e é essencialmente quartzoso, com horizonte C profundo. Este solo é classificado como arenoso não laterítico (NA’) pela metodologia MCT, segundo Trindade (2006).

Figura 9: Solos utilizados na pesquisa: a) talude de coleta do Solo 1 (“Cavalos”) e b) talude de coleta do Solo 2 (“Vila Secundino”)

a) b)

Fonte: Elaborada pela autora.

3.3.2.2. Fibras

No desenvolvimento deste estudo, foram utilizadas fibras PET de garrafas de refrigerante, nos teores de 0,50% e 1,00% em relação ao peso seco do solo. As fibras PET foram obtidas com larguras de 2mm e 4mm, utilizando-se para isso um filetador de garrafas PET (Figura 10), e com comprimento de 1 cm, que foi conseguido cortando-se manualmente as fibras com tesoura.

Figura 10: Filetador utilizado na produção das fibras.

Fonte: Elaborada pela autora.

Quanto à sua textura superficial, as fibras também foram divididas em lisas e rugosas, salientando-se que a rugosidade foi obtida através do lixamento das garrafas, anteriormente à sua transformação em fibras, utilizando-se lixa de parede número 100.

Na Figura 11, estão representados todos os tipos de fibras utilizados neste programa experimental.

Figura 11: Fibras utilizadas no programa experimental da pesquisa.

Fonte: Elaborada pela autora.

3.3.3. Métodos

Após a seleção das áreas, realizou-se a coleta das amostras deformadas dos solos. Estas foram ensacadas, identificadas e transportadas até o Laboratório de Solos do Instituto Militar de Engenharia (IME), no Rio de Janeiro, para a realização dos procedimentos experimentais descritos a seguir.

3.3.3.1. Ensaios de Caracterização Geotécnica

Para a caracterização tradicional das amostras de solo, foram realizados os seguintes ensaios geotécnicos: granulometria conjunta (ABNT, 2016a), limites de *Atterberg* (ABNT, 2016b; ABNT, 2016c) e massa específica dos grãos sólidos do solo (ABNT, 1984).

3.3.3.2. Ensaios de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 2016d), tanto para amostras de solos no estado natural, quanto para amostras de solos com fibras, nas diferentes espessuras, rugosidades e teores. Foi adotada a energia do Proctor Normal, sem reuso de material, utilizando cilindro grande (CBR), visando à obtenção do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima dos solos e suas misturas com as fibras.

3.3.3.3. Ensaios CBR

Os ensaios CBR (*California Bearing Ratio*), tanto para as amostras de solos no estado natural, quanto para as amostras com fibras nas diferentes espessuras, rugosidades e teores, foram realizados segundo a norma ME 049 (DNER, 1994).

Para cada ensaio, visando uma simplificação e um número não excessivo de corpos de prova, foram ensaiados dois corpos de prova na umidade ótima obtida na compactação Proctor Normal, sendo que os resultados de ISC (Índice de Suporte Califórnia ou Índice CBR) e de Expansão foram obtidos com a média dos resultados encontrados nos dois corpos de prova em questão.

3.4. Resultados e Discussões

3.4.1. Considerações iniciais

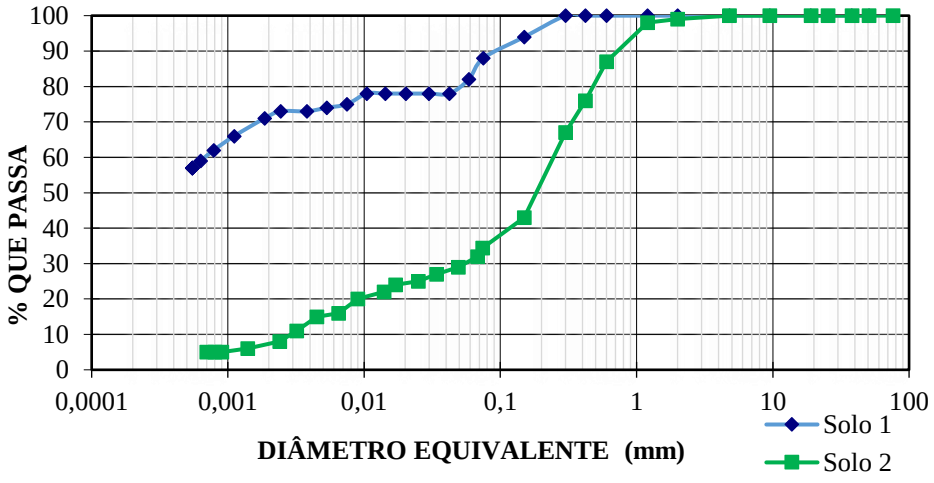
Na Tabela 5, encontram-se os resultados das análises granulométricas, dos ensaios de limites de consistência, bem como os pesos específicos dos grãos sólidos dos solos estudados. Já na Figura 12, são apresentadas as curvas granulométricas dos solos estudados.

Tabela 5: Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos estudados.

Amostra	Análise Granulométrica (%)					Limites de Consistência (%)			Peso Específico dos Grãos sólidos (kN/m³)
	Areia[1]			Silte[1]	Argila[1]	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)	
	Grossa[1]	Média[1]	Fina[1]						
Solo 1	0	4	14	11	71	82	44	38	27,39
Solo 2	13	41	15	24	7	28	18	10	26,29

[1] Classificação segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 12: Curvas Granulométricas dos Solos



Fonte: Elaborada pela autora.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5, é possível classificar os solos segundo o sistema de classificação geotécnica TRB (*Transportation Research*

Board) e o USCS (*Unified. Soil Classification System*). Estas classificações são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Classificação geotécnica dos solos segundo os sistemas tradicionais TRB e USCS.

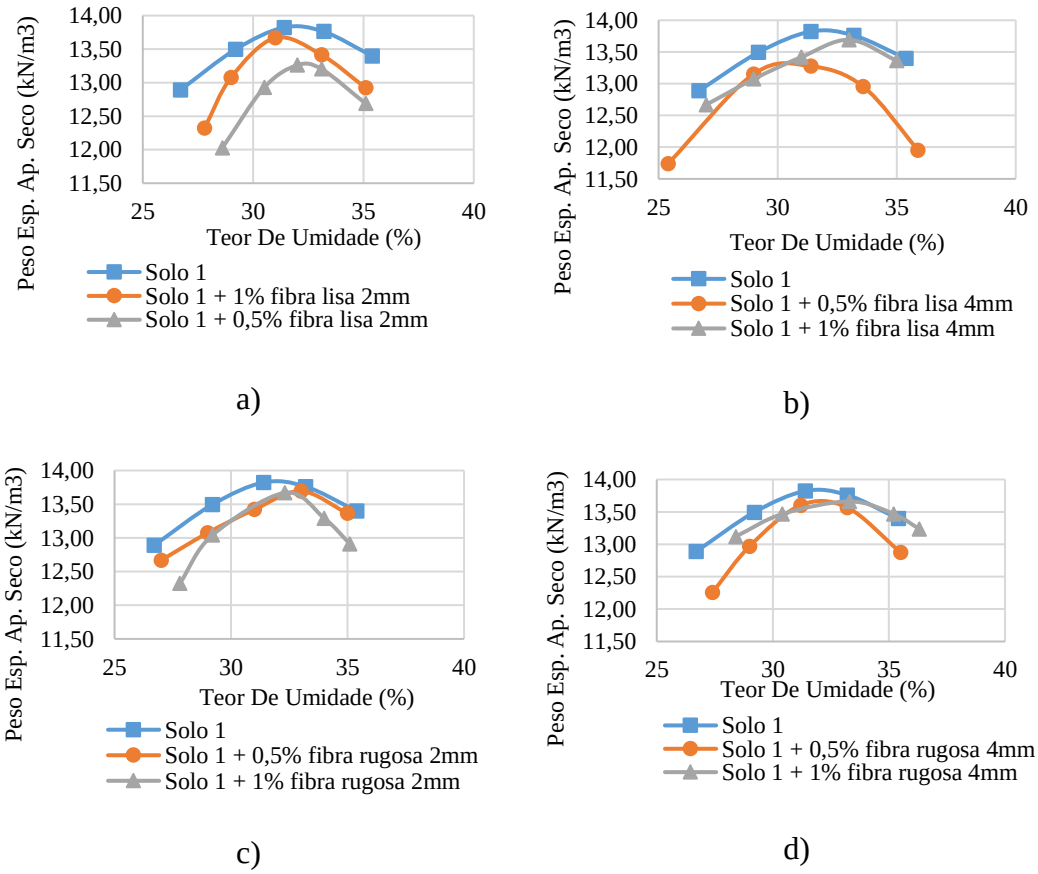
Solos	Classificação TRB	Classificação USCS
Solo 1	A-7-5 (20)	MH (silte de alta compressibilidade)
Solo 2	A-2-4 (0)	SC (areias argilosas)

Fonte: Elaborada pela autora.

3.4.2. Ensaios de Compactação

Nas Figuras 13 a 18, são apresentados os resultados e análises dos ensaios de compactação dos solos e suas misturas com fibras PET.

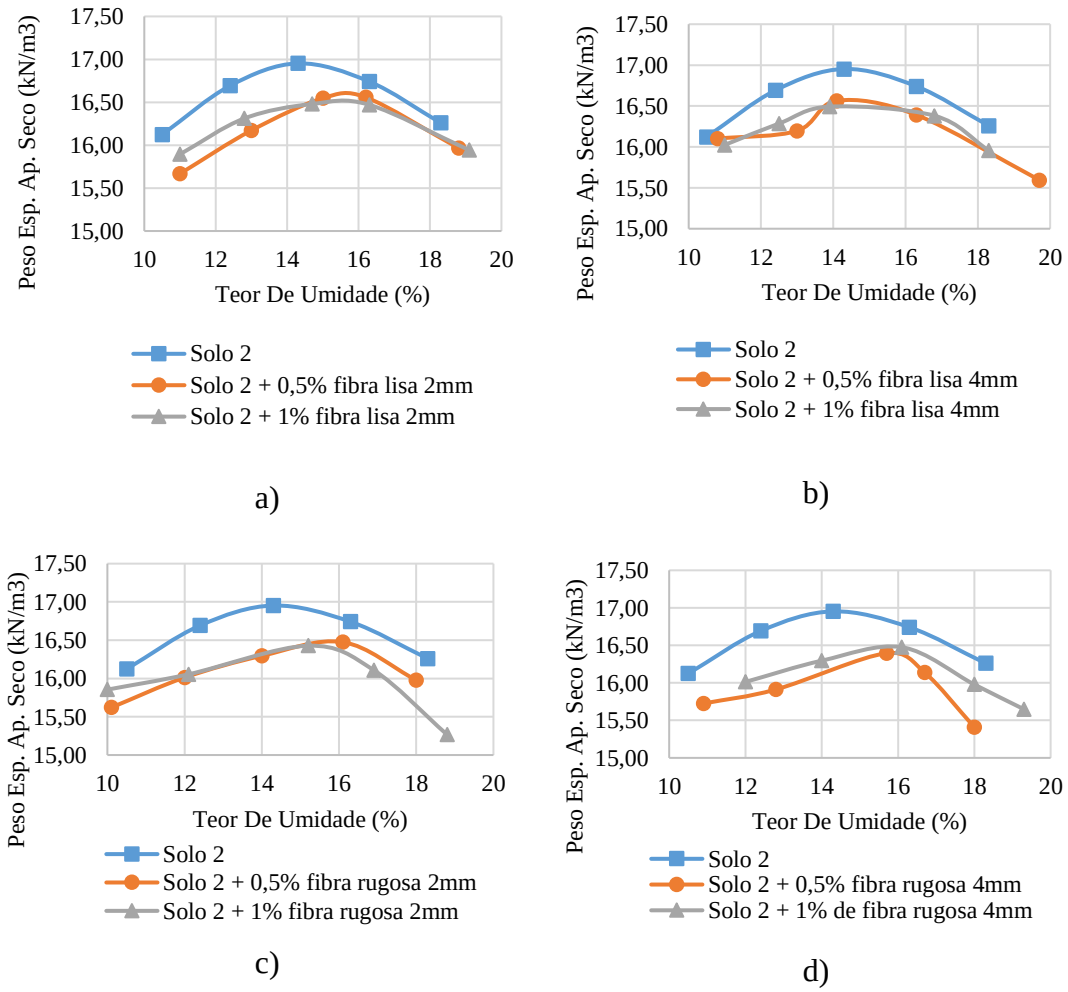
Figura 13: Solo 1 - Análise do efeito do teor de fibras adicionadas no comportamento à compactação do compósito solo-fibras em relação ao solo: a) misturas com fibra lisa de 2mm; b) misturas com fibra lisa de 4mm; c) misturas com fibra rugosa de 2mm; d) misturas com fibra rugosa de 4mm.



Fonte: Elaborada pela autora.

Por meio destes, verifica-se que, para ambos os solos, a inclusão das fibras diminui a densidade aparente seca da mistura com respeito ao solo puro. Este resultado pode ser justificado em razão da ocupação, pelas fibras, dos vazios que seriam preenchidos pelos grãos de solo na compactação, sendo aquelas mais leves (menos densas) que as partículas deste. Como a massa específica seca máxima sofre influência tanto do peso do solo quanto do peso das fibras, o fato das fibras serem mais leves que os grãos de solo conduz à redução deste parâmetro, ocasionando assim a diminuição da densidade das misturas em relação ao solo puro.

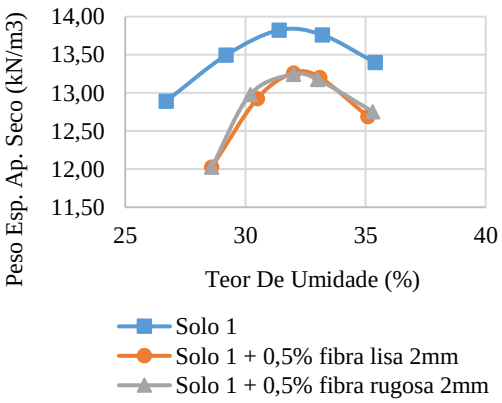
Figura 14: Solo 2 - Análise do efeito do teor de fibras adicionadas no comportamento à compactação do compósito solo-fibras em relação ao solo: a) misturas com fibra lisa de 2mm; b) misturas com fibra lisa de 4mm; c) misturas com fibras rugosas de 2mm; d) misturas com fibras rugosas de 4mm.



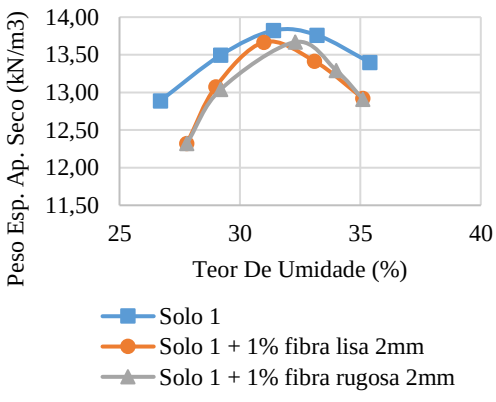
Fonte: Elaborada pela autora.

É possível também inferir que as fibras constituem uma barreira física ao rearranjo dos grãos sólidos do solo sob a ação do esforço de compactação, impedindo que estas se concentrem em volumes menores da estrutura interna do sistema solo-fibras e, conseqüentemente, restringindo a possibilidade de incremento da massa de grãos sólidos por volume unitário do sistema. Ao se apoiarem nos grãos sólidos do solo, tais fibras também são capazes de absorver parte da energia de compactação que deveria ser transmitida aos grãos, reduzindo a eficiência da compactação da fase sólida do sistema solo-fibras correspondente ao esqueleto do solo.

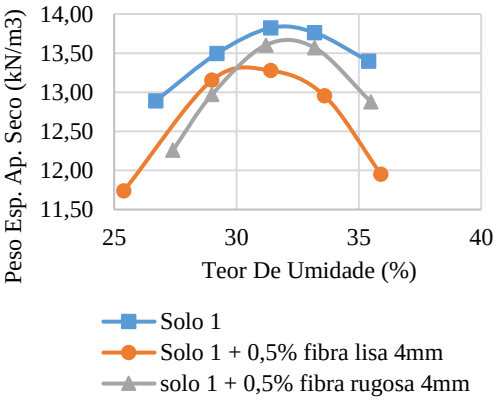
Figura 15: Solo 1 - Análise do efeito da rugosidade das fibras no comportamento à compactação do compósito solo-fibras em relação ao solo: a) misturas com 0,5% de fibras de 2mm; b) misturas com 1% de fibras de 2mm; c) misturas com 0,5% de fibras de 4mm; d) misturas com 1% de fibras de 4mm.



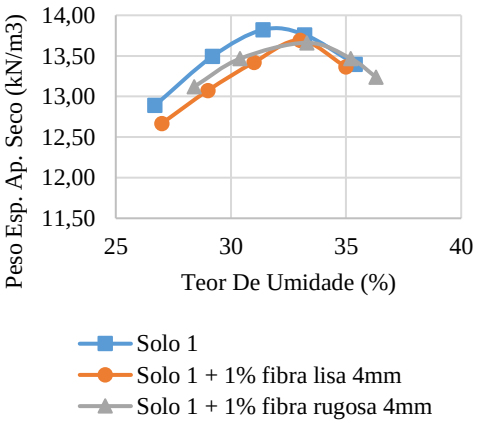
a)



b)



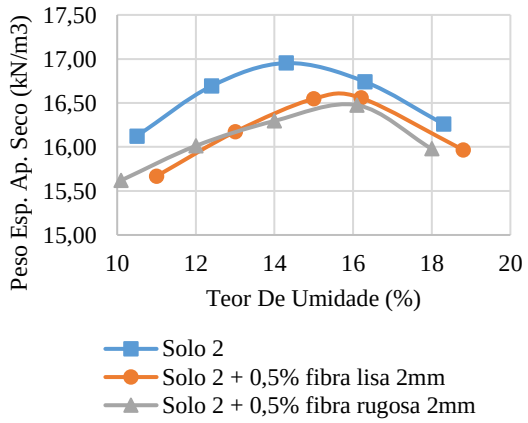
c)



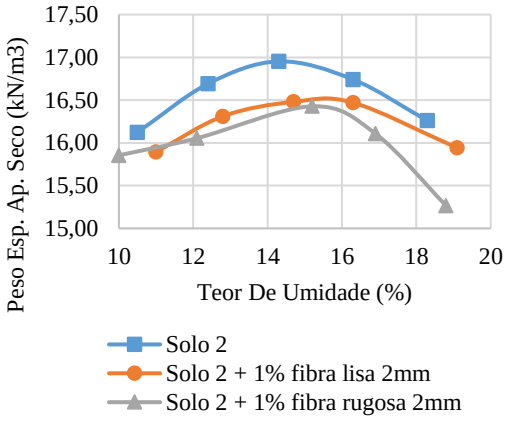
d)

Fonte: Elaborada pela autora.

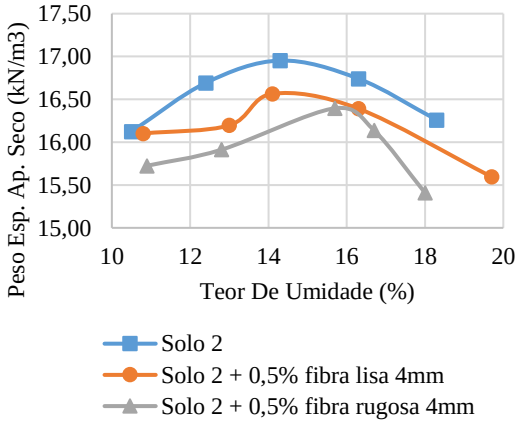
Figura 16: Solo 2 - Análise do efeito da rugosidade das fibras no comportamento à compactação do compósito solo-fibras em relação ao solo: a) misturas com 0,5% de fibras de 2mm; b) misturas com 1% de fibras de 2mm; c) misturas com 0,5% de fibras de 4mm; d) misturas com 1% de fibras de 4mm.



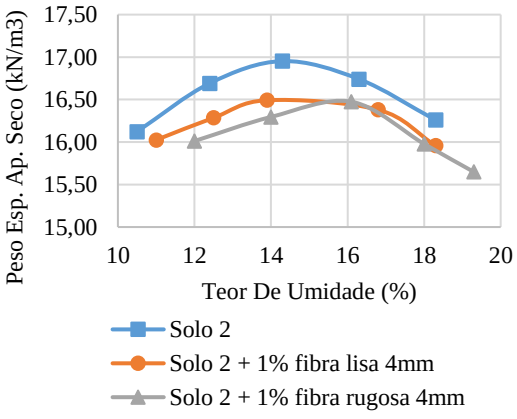
a)



b)



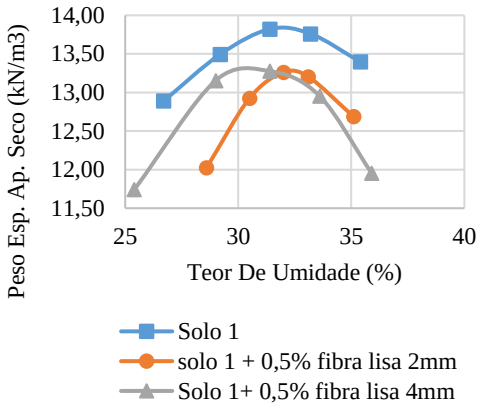
c)



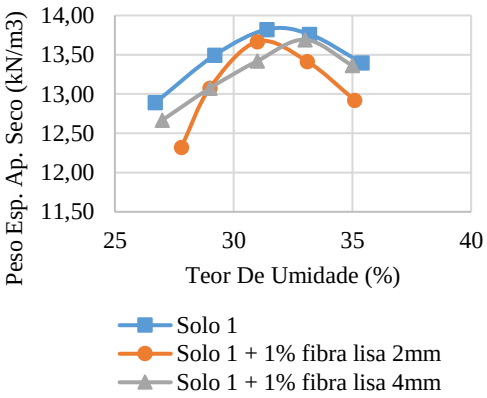
d)

Fonte: Elaborada pela autora.

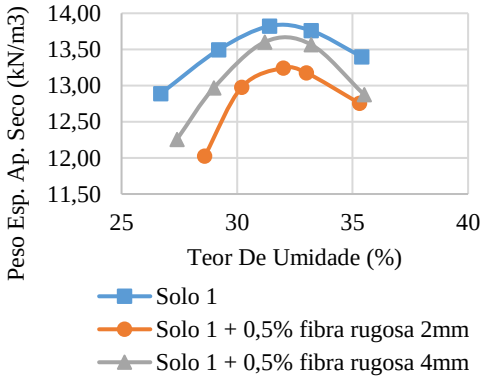
Figura 17: Solo 1 - Análise do efeito da largura das fibras no comportamento à compactação do compósito solo-fibras frente ao solo: a) misturas com 0,5% de fibras lisas; b) misturas com 1% de fibras lisas; c) misturas com 0,5% de fibras rugosas; d) misturas com 1% de fibras rugosas.



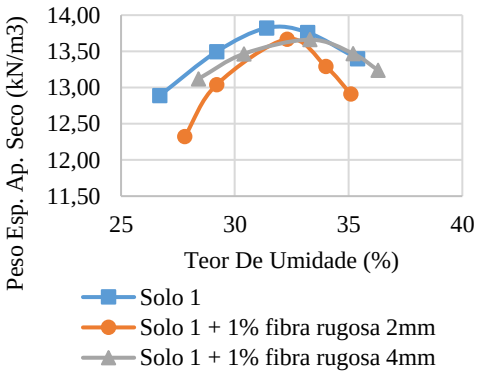
a)



b)



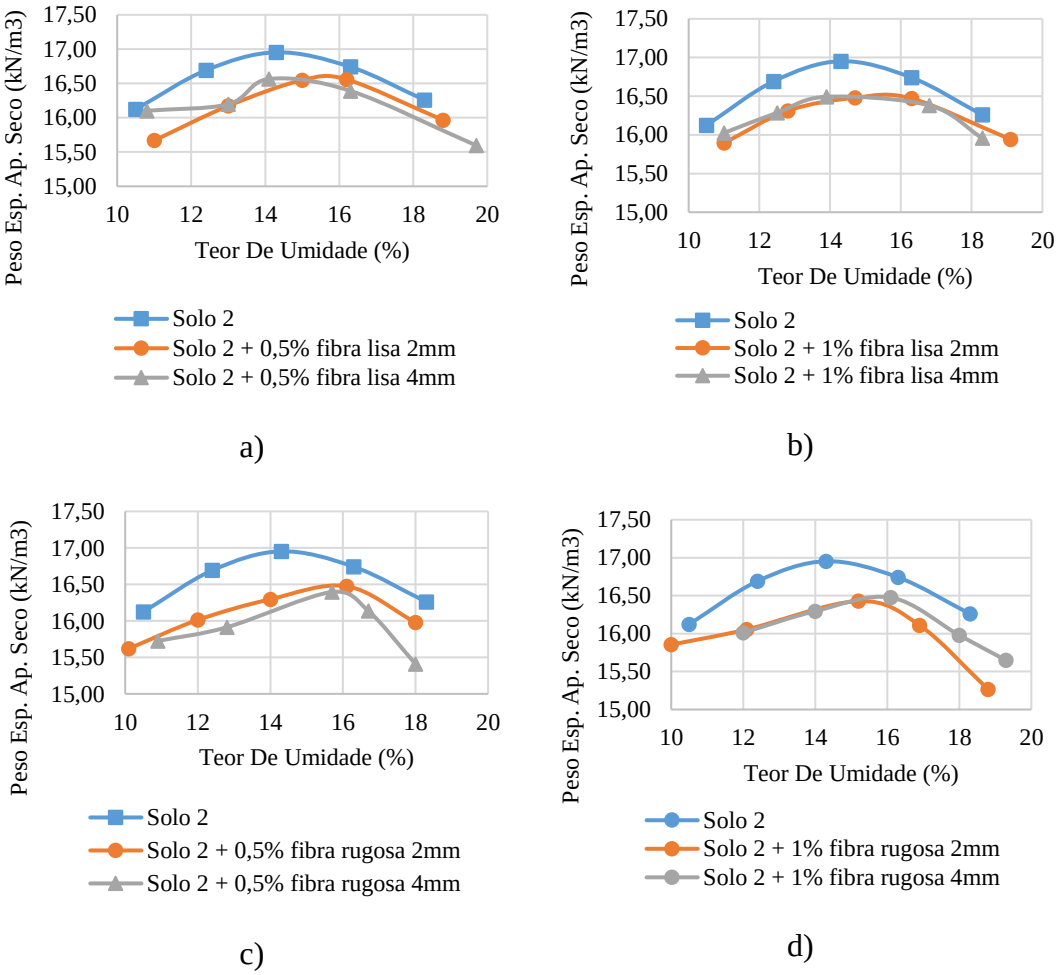
c)



d)

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 18: Solo 2 - Análise do efeito da largura das fibras no comportamento à compactação do compósito solo-fibras frente ao solo: a) misturas com 0,5% de fibras lisas; b) misturas com 1% de fibras lisas; c) misturas com 0,5% de fibras rugosas; d) misturas com 1% de fibras rugosas.



Fonte: Elaborada pela autora.

Salienta-se que não foi possível estabelecer uma relação direta entre a variação do teor de fibra, a variação da largura e a diminuição da densidade dos sistemas solo-fibra compactados, para as particularidades da pesquisa. O mesmo ocorre quando se considera a textura superficial da fibra, sendo que uma amostra com fibra rugosa não é necessariamente menos densa que uma amostra com fibra lisa e vice-versa.

No que corresponde à umidade de compactação, não foi possível estabelecer uma relação direta entre as características das fibras e o valor da umidade ótima. Porém, constata-se, experimentalmente, uma leve tendência de incremento da demanda de água dos sistemas solo-fibras em relação aos solos puros compactados,

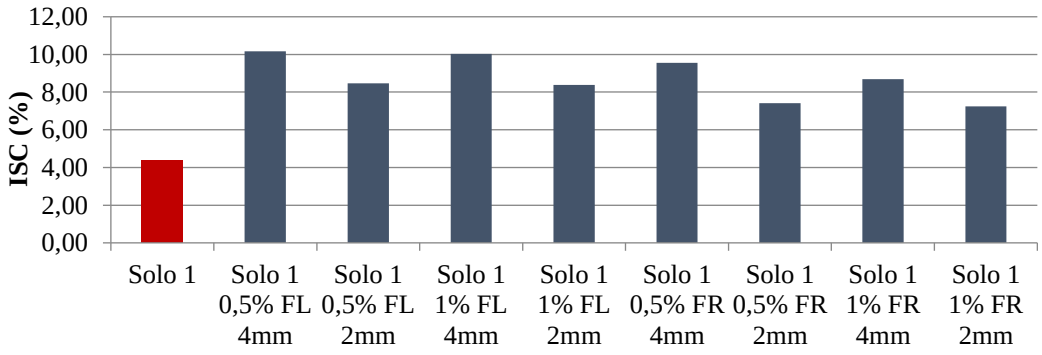
identificada pelo deslocamento à direita das curvas de compactação dos solos reforçados em relação às respectivas curvas dos solos puros. Isto se deve ao fato da fibra absorver um pouco da água adicionada ao solo, gerando um maior acúmulo hídrico no contato fibras - grãos de solo. Este acúmulo é responsável por acarretar um consequente incremento na demanda hídrica do compósito no ensaio de compactação, em comparação ao solo puro.

Essa tendência é mais nítida para o Solo 2, predominantemente arenoso e, consequentemente, menos dependente, em sua condição original, da umidade de compactação para sua densificação, permitindo inferir que, para o sistema solo-fibras correspondente a esse solo, as restrições que a presença da fibra impõe à maior eficiência do processo de compactação são provavelmente reduzidas pelo aumento da demanda hídrica do solo, disponibilizando a umidade adicional necessária para reduzir os atritos entre os grãos sólidos e entre estes e as fibras, favorecendo um melhor arranjo dos componentes do sistema. Para o Solo 1, predominantemente argiloso, essa demanda hídrica é menor, dada a aptidão natural intrinsecamente superior desse solo por água.

3.4.3. Ensaios CBR

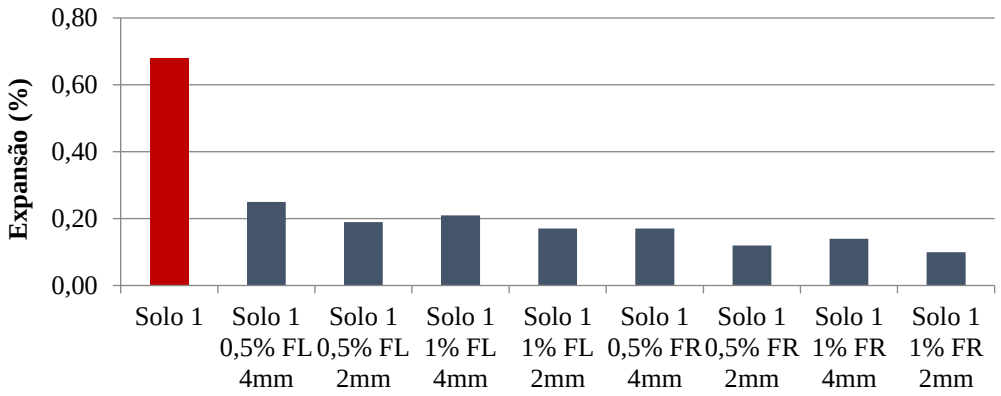
Os ensaios CBR foram realizados a fim de se conhecer os resultados de capacidade de suporte (ISC) e Expansão dos solos e suas respectivas misturas com os diferentes teores, larguras e tipos de fibras PET. Os resultados encontrados para os materiais investigados encontram-se nas Figuras 19 a 22.

Figura 19: Solo 1 - Resultados de Índice de Suporte Califórnia (ISC) do solo puro e das misturas solo-fibras (FL: Fibra Lisa; FR: Fibra Rugosa).



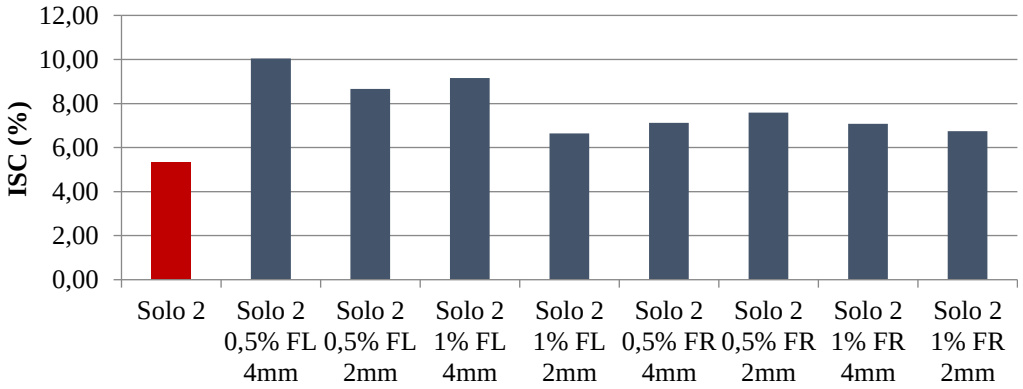
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 20: Solo 1 - Resultados de Expansão do solo puro e das misturas solo-fibras (FL: Fibra Lisa; FR: Fibra Rugosa).



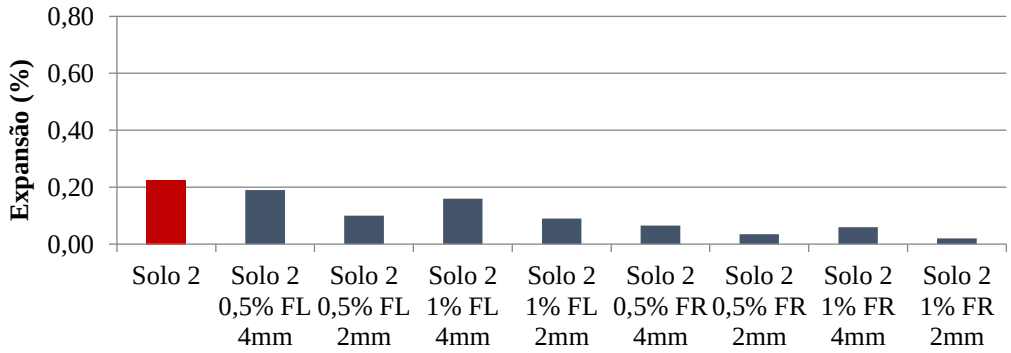
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 21: Solo 2 - Resultados de Índice de Suporte Califórnia (ISC) do solo puro e das misturas solo-fibras (FL: Fibra Lisa; FR: Fibra Rugosa).



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 22: Solo 2- Resultados de Expansão do solo puro e das misturas solo-fibras (FL: Fibra Lisa; FR: Fibra Rugosa).



Fonte: Elaborada pela autora.

Pode-se perceber que, para ambos os solos, a inclusão das fibras aumentou o ISC e diminuiu a Expansão, com respeito ao solo puro. Estima-se que a queda da Expansão pode estar ligada ao fato de que, ao preencherem os vazios, as fibras atuam favorecendo a estruturação do solo, pelo seu entrelaçamento com os grãos do mesmo, o que gera um impedimento ao aumento do volume do corpo de prova, reduzindo, conseqüentemente, a expansibilidade do sistema solo-fibras.

Este preenchimento dos espaços que seriam ocupados por solo e a interação das fibras com os grãos do material também podem justificar o aumento do ISC, pois o puncionamento dos solos, durante a penetração neste ensaio, submete as fibras, que estão ligadas aos grãos do material, a uma fricção e gera o alongamento das mesmas. Com isso, desenvolve-se uma maior tensão nas fibras à medida que o solo é deformado, gerando assim uma maior capacidade de suporte do sistema solo-fibras comparativamente ao solo puro.

Verificou-se também que, para um mesmo tipo de fibra no mesmo tipo de solo, o resultado do ISC para o teor de 0,5% de fibra foi sempre maior que para o teor de 1%, enquanto o resultado de Expansão foi maior para aquele do que para este. Este fato pode estar associado aos efeitos da interação fibra-matriz com o aumento considerável de fibras que, apesar de atuar favorecendo à estruturação do solo e reduzindo a expansibilidade do mesmo, devido à maior ancoragem, gera uma menor mobilização das fibras, induzindo a uma perda na capacidade de suporte do material.

Comparando os resultados obtidos para a fibra lisa com os obtidos para a fibra rugosa, para o mesmo teor e mesma largura, verifica-se que os resultados de ISC foram maiores para os solos com fibras lisas, assim como os resultados de Expansão. Ou seja, apesar de apresentarem uma menor capacidade de suporte, os solos com fibras rugosas se expandem menos do que com fibras lisas.

Esta redução da Expansão nos solos com fibras rugosas pode estar ligada ao maior atrito gerado entre os grãos e as fibras, devido à rugosidade destas, o que acarreta um aumento na ligação fibras-grãos de solo e uma conseqüente maior estruturação do compósito, gerando assim um maior impedimento ao aumento do volume do corpo de prova, comparativamente às misturas com fibras lisas.

Em conjunto, este atrito é o responsável por gerar uma menor mobilização das fibras durante a penetração, gerando nas mesmas uma menor tensão à medida que

o solo é deformado, comparativamente aos resultados obtidos com fibra lisa, o que justifica os menores resultados de ISC encontrados para esses materiais.

A norma DNIT 138/2010 - ES (DNIT, 2010) especifica que os materiais que podem ser utilizados em reforço de subleito são solos ou mistura de solos de qualidade superior à do subleito, com o Índice de Grupo (IG) no máximo igual ao do subleito indicado no projeto, com ISC igual ou maior aos indicados também em projeto e Expansão ≤ 1%. Considerando-se estas exigências, pode-se afirmar que, no presente caso, para subleitos compostos pelos solos 1 e 2, é possível o emprego de todas misturas estudadas como reforço.

3.5. Conclusões

A partir dos resultados apresentados nessa pesquisa, foi possível verificar o efeito da adição das fibras PET na compactação, na capacidade de suporte e na expansão dos dois solos estudados. Com base nos resultados dos ensaios de compactação, foi possível verificar, para ambos os solos, a ocorrência de uma redução do peso específico aparente seco das misturas solo-fibras comparativamente aos solos puros justificada pela menor densidade das fibras, pela restrição que estas impõem ao rearranjo dos grãos sólidos dos solos e pela absorção parcial, por parte destas, da energia de compactação imposta ao sistema solo-fibras. Para as particularidades da pesquisa, não foi possível estabelecer uma relação direta entre as características das fibras (textura superficial, largura) e o valor da umidade ótima, porém constata-se, experimentalmente, uma tendência de aumento da demanda hídrica do sistema solo-fibras sob a ação do esforço de compactação, a qual se mostrou mais acentuada para o solo arenoso.

Em relação aos resultados do ensaio CBR, constatou-se um aumento da capacidade de suporte de ambos os solos com a inclusão das fibras e uma diminuição da expansão dos mesmos, com relação aos solos puros. Verificou-se também que as misturas de solos com fibras rugosas, comparativamente às misturas com fibras lisas, apresentaram capacidade de suporte menor, ao mesmo tempo em que se expandiram menos.

Comparando os resultados de compactação com os obtidos no ensaio CBR, verificou-se que, mesmo havendo uma perda de densificação das misturas solo-fibras

comparativamente aos solos puros compactados, os parâmetros de resistência e de estabilidade volumétrica derivados dos ensaios CBR indicaram uma melhoria na resposta de engenharia para os sistemas reforçados, permitindo concluir que, para tais sistemas e para as particularidades da pesquisa, a densificação traduzida pela curva de compactação e pelos parâmetros de ótimo não é a propriedade física mais indicada para estimar possíveis melhorias nos índices resultantes dessa modalidade particular de ensaio.

Visando o emprego em camadas de reforço de subleito, para subleitos compostos pelos solos analisados e considerando-se as exigências técnicas contidas em DNIT (2010), verificou-se que todas as misturas solo-fibras ensaiadas possuem possibilidade de emprego neste tipo de camada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRALATAS. **BRASIL: Índices de reciclagem de embalagens – 1997 a 2016 (em %)**, 2018. Disponível em: < http://www.abralatas.org.br/grafico/mundo-indices-de-reciclagem-da-lata-de-aluminio-para-bebidas-1991-a-2012/>. Acesso em: 15 de abril de 2018.

ABIPET. **Resina PET - Fabricação**, 2018. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=65>. Acesso em: 08 de abril de 2018.

ASSIS, S. R. H.; MELO, R. A. Viabilidade técnica do uso de misturas de solo e pet granulado em camadas de pavimentos. In: 18ª RPU – REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 2012, São Luis. **Anais 18ª RPU,** São Luis, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016e.

BATISTA, I. M. **Comportamento mecânico de dois solos típicos da região de Viçosa-MG, para fins de utilização em camadas de pavimentos flexíveis**. 2001. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/Geotecnia), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2001.

BENTO, P. F. B. **Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para a utilização em estruturas de pavimentos**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2010a.

BRASIL. **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010**. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Brasília, DF, 2010b.

CENSO DA RECICLAGEM DO PET NO BRASIL. **10º Censo da reciclagem do PET no Brasil**. São Paulo, 2016.

CHOUDHARY, A. K.; JHA, J. N.; GILL, K. S. Utilization of plastic wastes for improving the sub-grades in flexible pavements. In: GEOSHANGHAI INTERNATIONAL CONFERENCE, 2010, Shangai. **Proceedings Geoshanghai,** Shangai, 2010.

COELHO, A. P. C.; PEIXOTO, A. M. C. L.; MURTA, A. L. S.; RODRIGUEZ, M. V. R.; CASTRO JR, J. L. P. Logística reversa de garrafas PET para construção de casas populares. **Sustainable Business International Journal.** P. 01 – 23, Novembro 2016.

CONSOLI, N. C.; MONTARDO, J. P.; PRIETTO, P. D. M.; PASA, G. S. Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.** P. 462 - 472, June 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 049/94: Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas.** Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 138/2010 – ES:** Pavimentação – reforço do subleito - especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

ECYCLE. **Garrafas PET: da produção ao descarte**, 2014. Disponivel em: <http://www.ecycle.com.br/component/content/article/57-plastico/231-reciclagem-garrafas-pet.html>. Acesso em: 15 de Abril 2018.

GHAZI, Y. Estudo experimental de bentonita reforçada com resíduo de PET triturado. In: XXIII SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA PUC-RIO, 2015, Rio de Janeiro. **Relatórios Anuais CTC – Engenharia Civil**, Rio de Janeiro, 2015.

GOOGLE. **Google Earth website**. Disponivel em: <http://earth.google.com/>. Acesso em: 20 Dezembro de 2017.

LEOCÁDIO, G.A.S. **Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais. 2005.

LOUZADA, N. S. L. **Experimental study of soils seinforced with srushed polyethylene terephthalate (PET) residue**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2015.

LOUZADA, N. S. L.; CASAGRANDE, M. D. T. Behavior of a Clayey Soil Mixture with Fine Crushed Polyethylene Terephthalate. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais COBRAMSEG,** Belo Horizonte, 2016.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2004. 118 p.

MONTARDO, J. P., VENDRUSCOLO, M. A., CONSOLI, N. C., PRIETTO, P. D. M. Características de Resistências e Deformação de um Solo Cimentado Reforçado com Fibras

PET: Estudo Preliminar. In: **Anais Associação Brasileira de Mecânica do Solos e Engenharia Geotécnica**, p. 1163-1167, 1998.

OLIVEIRA, T. G.; PEREIRA, E. L.; MENDES, G. C.; DUARTE, A. P.; SOARES, C. C. Avaliação do uso de fibras de garrafas PET como reforço de solos compactados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais COBRAMSEG,** Belo Horizonte, 2016.

ORTIZ, J. A. L. **Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET)**. 2013. 90 f. Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado. 2013.

PINTO, L. E. M.; MELO, R. A.; ASSIS, S. R. H. Estudo de viabilidade do uso de resíduo pet em obra rodoviária. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2010, Bauru. **Anais-congresso brasileiro de gestão ambiental**, Bauru, 2010, p.1-6.

PRIETTO, P.D.; MONTARDO, J. P.; CONSOLI, N.C. Comportamento Mecânico de uma Areia Cimentada Reforçada com Fibras PET. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 3., 1999, Rio de Janeiro. **Anais Geossintéticos 99**, Rio de Janeiro, 1999, p.199-206.

REVISTA GALILEU. **Ilha de lixo no Oceano Pacífico é 16 vezes maior do que se imaginava**, 2018. Disponivel em: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/Meio-Ambiente/noticia/2018/03/ilha-de-lixo-no-oceano-pacifico-e-16-vezes-maior-do-que-se-imaginava.html>. Acesso em: 21 de Abril de 2018.

ROCHA, L. V.; NOVO, B. F. Estudo experimental do solo argiloso reforçado com pó de PET. In: XXIII SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA PUC-RIO, 2015, Rio de Janeiro. **Relatórios Anuais CTC – Engenharia Civil**, Rio de Janeiro, 2015.

SANTOS, J. R.; SILVA, T. J. L. **Análise de viabilidade de utilização de solo tropical com a adição de fibras PET em sistemas de cobertura de aterros sanitários**. Monografia de projeto final em Engenharia Civil - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal. 2015.

SENEZ, P. C. **Comportamento de uma areia reforçada com fibras de polietileno tereftalato (PET)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2016.

SILVA, C. C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânico**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2007.

SOTOMAYOR, J. M. G. **Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibras de coco submetidos a ensaios de placa em verdadeira grandeza**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro. 2014.

SOUSA, A. A. C.; GURJÃO, C. M. C.; RIBEIRO, L. F. M; COSTA, C. M. C. Avaliação do Comportamento hidromecânico de liners executados com misturas de solo e fibras de PET. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais COBRAMSEG,** Belo Horizonte, 2016.

TRINDADE, T. P. **Caracterização tecnológica de três solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em geotecnia rodoviária e ambiental.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2006.

4. APROVEITAMENTO DE FIBRAS DE GARRAFAS PET VISANDO AO MELHORAMENTO GEOTÉCNICO DE SOLOS TROPICAIS.

Resumo – O solo é um dos materiais mais abundantes no planeta terra e um dos mais antigos utilizados pelo homem na construção civil, sendo o reforço de solos uma técnica eficaz para melhorar suas propriedades de engenharia. Neste cenário, diversos tipos de materiais têm sido estudados com este objetivo. Dentre estes, destaca-se o reforço de solos com o uso de fibras de garrafas PET, como uma alternativa de aproveitamento sustentável deste tipo de resíduo, o qual é produzido em escala industrial e, quando descartado inadequadamente, acarreta impactos negativos na natureza. Neste contexto, o presente trabalho busca avaliar o comportamento de misturas solo-fibras PET, analisando a influência da quantidade, rugosidade e largura das fibras nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, na condição compactada, de dois solos residuais tropicais com características granulométricas diferentes, amostrados no município de Viçosa - MG. As fibras utilizadas neste estudo são de Polietileno Tereftalato (PET), geradas a partir de garrafas de refrigerante, e adicionadas aos solos em diferentes larguras (2 mm e 4 mm), texturas (lisa e rugosa) e teores (0,50% e 1,00%). Através da análise dos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento, ao verificar a influência das fibras, independente das características das mesmas, observou-se que, para ambos os solos, todos os sistemas solo-fibras apresentaram desempenho superior ao do solo puro no que concerne à resistência ao cisalhamento, sendo que a adição das fibras se mostrou mais eficiente para o solo 1 (argiloso) do que para o solo 2 (arenoso). Ao se comparar o efeito de rugosidade das fibras, foi possível verificar que os sistemas com fibras rugosas, para o solo 1, foram os que apresentaram melhores desempenhos, enquanto os com fibras lisas foram os que obtiveram melhor comportamento para o solo 2. Para ambos os solos, verificou-se que as coesões foram maiores nas misturas com adição de 0,5% de fibras em relação às obtidas com 1% e que os solo-fibras apresentaram uma maior magnitude de deformação na ruptura comparativamente aos solos puros. Devido à melhoria das propriedades mecânicas obtidas nos solos-fibras estudados, considera-se promissora a possibilidade de uso deste tipo de fibra em obras geotécnicas.

Palavras-Chave: Solos tropicais. Reforço. Solo-fibra. Cisalhamento direto. Fibras PET.

4.1. Introdução

Por ser um dos materiais mais abundantes no planeta Terra e por estar presente, desde a antiguidade, em todas as obras civis, de forma direta ou indireta, pode-se afirmar que o solo é um dos materiais mais remotos utilizados pelo homem na construção.

A ideia de reforço de solo também é antiga e surgiu com a necessidade de se melhorar as características construtivas deste material, para o desempenho de diferentes funções. Segundo Senez (2016), a humanidade percebeu a possibilidade de se melhorar as propriedades de um solo ao se adicionar diferentes materiais ao mesmo, obtendo um novo produto com maior resistência e durabilidade.

A técnica de reforço de solos é baseada na melhoria das características geotécnicas do solo e consiste na inserção de um determinado material ao mesmo, de preferência com alta resistência à tração, a fim de primordialmente incrementar as suas propriedades mecânicas. Para Aguilar (2015), o intuito de se adicionar o material de reforço ao solo é, em geral, promover a melhoria da resistência, da tenacidade, da coesão e da resistência à tração do solo e, consequentemente, a diminuição da sua suscetibilidade à propagação de fissuras, a melhoria de sua trabalhabilidade, de suas características de impermeabilização, dentre outros.

Neste contexto, diferentes tipos de materiais têm sido estudados com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas de alguns solos. Dentre estes materiais, destaca-se, para esta pesquisa, o reforço de solos com uso de fibras.

Paralelamente, é importante considerar as questões ambientais que ocorrem atualmente, como, por exemplo, o grande crescimento da produção mundial de plásticos e o seu consequente acúmulo na natureza. Para Botero et al. (2015), as mudanças culturais nos hábitos de consumo, em conjunto com o crescimento da população mundial e o aumento da demanda por produtos industrializados feitos de compostos plásticos, resultaram em um aumento contínuo na geração de resíduos não degradáveis nas mesmas proporções, sendo o Polietileno Tereftalato (PET) um dos resíduos plásticos mais comuns por ser frequentemente utilizado na produção de garrafas de refrigerante.

Em busca de uma melhoria para este cenário, Botero et al. (2015) afirmam ser importante a procura por novos usos destes materiais, gerando, assim, uma redução

nos impactos ambientais em obras de engenharia, especialmente aquelas geradas pela construção em larga escala.

Nesse contexto, é relevante o desenvolvimento de pesquisas no campo da Engenharia Civil Geotécnica, que busquem estudar a viabilidade do uso de resíduos de PET como reforço de solos, pela possível melhoria gerada em algumas das características geotécnicas do material e por ser uma solução sustentável, ao possibilitar um novo destino a estes resíduos e, em consequência, ajudar a conter a poluição causada pelo acúmulo dos mesmos no meio ambiente. Sendo assim, o estudo do reforço de solos com fibras PET é de suma importância, por contribuir tanto para a melhoria de questões técnicas, quanto ambientais envolvidas no problema.

Dentro deste panorama, o presente trabalho busca avaliar o comportamento de misturas solo-fibras PET, analisando a influência da quantidade, rugosidade e largura das fibras nos parâmetros de resistência ao cisalhamento de dois solos residuais tropicais com características granulométricas diferentes, amostrados no município de Viçosa-MG.

4.2. Fundamentação Teórica

4.2.1. Reforço de solos com fibras

A técnica de inclusão de fibras no solo é parte integrante da tecnologia dos materiais compósitos, descritos por Bento (2006) como aqueles compostos pela combinação de dois ou mais materiais, constituindo um conjunto polifásico com duas fases básicas, as fibras e a matriz em que as mesmas estão incluídas, sendo as propriedades do conjunto superiores às do solo em separado. Neste tipo de material, as fibras funcionam oferecendo resistência ao esforço externo e a matriz oferecendo um meio de transferência para esse esforço.

Para reforçar solos, vários são os tipos de fibras utilizadas, desde as naturais às fabricadas pelo homem, além das recicladas, como as fibras PET e as de pneus. Para Ferreira (2010), as características dessas fibras estão intimamente ligadas à sua composição e ao seu processo de fabricação, além de afetar diretamente a matriz a que se misturam. Portanto, é de suma importância o conhecimento do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada um dos componentes,

para que se possa definir o tipo de fibra a ser utilizada e manter um bom desempenho do conjunto.

As fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência do solo no estado pós-fissuração, aumentando a capacidade do compósito no que diz respeito à absorção de energia. Isso se deve ao fato da deformação necessária para gerar fissuras na matriz ser muito inferior à elongação das fibras, nas quais pouco ou nenhum aumento de tensão de fissuração é esperado (TAYLOR, 1994). Ou seja, elas não evitam a formação de fissuras, mas, ao acrescentar resistência ao solo, principalmente resistência à tração, a propagação de fissuras é reduzida. Isso ocorre porque as mesmas mantêm unidas as interfaces das fissuras, o que gera uma melhora nas propriedades mecânicas no estado pós-fissuração e na ductilidade (TAYLOR, 1994)

Bento (2006) afirma que, em materiais sem a adição de fibras, ao surgir a primeira fissura, o colapso da matriz se dá por sua abertura progressiva. No entanto, em compósitos com fibras em sua composição, essa fratura é retardada e a ruptura torna-se um processo progressivo, pois as fibras formam pontes de transferências que absorvem parte das solicitações e originam uma fissuração mais distribuída.

Para a utilização de fibras como reforço na construção civil, segundo Silva (2007), a escolha do tipo de fibra é de fundamental importância, tendo em vista as várias opções existentes no mercado. Assim, por exemplo, é importante se levar em conta que as fibras naturais sofrem decomposição, tendo uma vida útil menor em relação às fibras sintéticas.

4.2.2. Aspectos gerais sobre o Polietileno Tereftalato (PET)

O Polietileno Tereftalato (PET) é um polímero termoplástico da família do poliéster, utilizado na fabricação de diversos produtos, como fibras têxteis, recipientes para bebidas carbonatadas, filmes para fotografia, embalagens, entre outros.

Senez (2016) afirma que o PET só chegou ao Brasil em 1988, sendo sua principal utilização na indústria têxtil. Somente começou a ser utilizado no mercado de embalagens na década de 90, principalmente nas de bebidas gaseificadas, crescendo muito este tipo de aplicação nos anos seguintes, sendo verificado por Romão et al. (2009) que a principal aplicação do PET no Brasil em 2009 foi na indústria de embalagens (71%). Nesta época, o segmento do mercado nacional das indústrias

alimentícia e de embalagens correspondia a 32% do mercado brasileiro de polímeros, envolvendo diretamente o uso do PET para embalagens de bebidas carbonatadas.

O Polietileno Tereftalato é produzido industrialmente por esterificação direta do ácido tereftálico purificado (PTA) com monoetileno glicol (MEG), ou seja, esses dois elementos (PTA e MEG) são misturados, formando uma pasta que, durante o processo de fabricação, permite a reação desses elementos entre si, passando por cristalização e formando o PET como é conhecido (ABIPET, 2018).

Como consequência da alta utilização desse material e da difícil e vagarosa decomposição do mesmo na natureza, tem-se como conseqüência o aumento considerável na geração deste tipo de resíduo. Dessa forma, uma das alternativas cabíveis a essa situação diz respeito à reciclagem dos materiais à base de PET (SILVA, 2007).

4.2.3. Pesquisas sobre reforço de solos com PET

A grande maioria de estudos realizados em materiais compósitos tem a finalidade de comparar o comportamento de solos reforçados com o de solos não reforçados através dos respectivos parâmetros de resistência ou deformabilidade, analisando, principalmente, as consequências em detrimento das causas (SOTOMAYOR, 2014).

Com o intuito de se encontrar alternativas para os resíduos de garrafas PET, alguns estudos têm sido realizados com o objetivo de analisar a inclusão do resíduo de PET no solo e os efeitos causados pelo mesmo, visando à aplicação em diversas áreas da Geotecnia. Dentre as pesquisas mais relevantes, podem ser citadas as desenvolvidas por Montardo et al.(1998), Prietto et al. (1999), Consoli et al. (2002), Bento (2006), Choudhary et al.(2010), Pinto et al. (2010), Tang et al. (2010), Assis e Melo (2012), Ortiz (2013), Changizi e Haddad (2014), Botero et al. (2015), Rocha e Novo (2015), Louzada (2015), Luwalaga (2015), Santos e Silva (2015), Louzada e Casagrande (2016), Mishra (2016), Oliveira et al. (2016), Sousa et al. (2016), Senez (2016) e Naeini e Rahmani (2017).

Em geral, estas pesquisas têm avaliado a viabilidade técnica dos sistemas solo-fibras PET compactados através dos seguintes ensaios: triaxial estático, cisalhamento direto, perda de massa por imersão, permeabilidade, Índice de Suporte

Califórnia, mini-CBR, cone adaptado, compressão simples, tração por compressão diametral, ciclos de umedecimento-secagem e ensaios de prova de carga em placa. Nestas pesquisas, têm sido consideradas variáveis, como tipo de solo (sedimentares, residuais), granulometria da fibra (em pó, cortada, triturada), presença de aditivos na mistura solo-fibra (cal, cimento, bentonita), textura superficial da fibra (lisa, frisada), dimensões da fibra (comprimento, largura, espessura) e porcentagem de fibra.

Consoli et al. (2002), por exemplo, verificaram por meio de ensaios triaxiais, para uma areia, que a inclusão de fibras PET aumentou a resistência de pico, a resistência residual e a capacidade de absorção de energia. Em conjunto, observaram que o intercepto coesivo não se alterou, enquanto o ângulo de atrito aumentou com a inclusão de fibras e com o aumento do comprimento das mesmas.

Changizi e Haddad (2014) constataram que a inclusão de fibras de poliéster reciclada a partir de garrafas PET, em um solo argiloso, levou ao aumento da resistência ao cisalhamento, encontrando como porcentagem ótima a inclusão de 0,5% de fibras em relação ao peso seco do solo.

Luwalaga (2015) estudou, através do ensaio de cisalhamento direto, a influência da inclusão de resíduos de plástico PET misturados aleatoriamente em um solo arenoso, constatando que o acréscimo de 22,5% destes resíduos gerou um aumento percentual máximo no ângulo de atrito de 15,32% em relação ao solo puro, obtendo, portanto, uma maior resistência ao cisalhamento. Além disso, o autor verificou que o reforço de areia com acréscimo desta porcentagem de resíduos de PET reduziu a largura de uma fundação em 3%, o que, consequentemente, a tornou mais econômica em comparação com a areia não reforçada.

Louzada (2015) concluiu, através de ensaios triaxiais e de cisalhamento direto em três diferentes solos reforçados com PET em pó e triturado, que o teor de PET e o nível de confinamento têm influência sobre o comportamento mecânico final das misturas. Além disso, com ambos os resíduos de PET, as misturas apresentaram um comportamento satisfatório, aumentando ou mantendo os parâmetros de resistência ao cisalhamento semelhantes aos do solo puro.

Mishra (2016) verificou o efeito da adição de fibras recicladas de Polietileno Tereftalato (PET) nas propriedades de resistência ao cisalhamento de um solo argiloso, observando incrementos tanto nos valores de ângulo de atrito obtidos quanto nos de coesão com o aumento do teor de fibras PET.

Louzada e Casagrande (2016) apresentaram um estudo experimental para avaliar o comportamento mecânico do solo puro e de misturas com diferentes teores de resíduos de PET, através da realização de ensaios triaxiais, com o intuito de se obter os parâmetros de resistência das misturas de solo-PET. Os ensaios foram realizados tanto em um solo argiloso puro quanto nas misturas deste com 10% e 20% em peso seco de PET moído fino. Pelos resultados, observou-se que, em ambas as misturas, quando o material foi submetido a uma tensão confinante baixa, a inserção de finos de PET não melhorou os parâmetros de resistência do solo. No entanto, com um maior confinamento, essas melhorias foram evidentes. Conforme os autores, isso ocorreu porque o PET moído, em uma maior tensão de confinamento e quando a consolidação é aplicada, preenche os espaços vazios que ficam no solo, deixando menos lacunas entre as partículas do mesmo.

Senez (2016) buscou demonstrar em seus estudos a aplicabilidade de fibras derivadas da reciclagem de garrafas PET, confeccionadas com 100% do resíduo obtido da indústria têxtil, como reforço de solos, quando submetidos a diferentes níveis de cargas. Para isto, foram executados ensaios de compressão triaxial drenados em laboratório, para a determinação do comportamento mecânico de uma areia e do compósito areia-fibras. Os resultados mostraram que a adição de fibras PET altera o comportamento da areia pura, melhorando os parâmetros de resistência, como o intercepto coesivo e o ângulo de atrito, definidos pelo critério de Mohr-Coulomb. O compósito reforçado com as fibras PET de menor diâmetro e menor comprimento apresentou um maior ganho na resistência ao cisalhamento, mas ambos os compósitos, em comparação ao solo não reforçado, apresentaram uma maior resistência.

Naeini e Rahmani (2017) realizaram ensaios triaxiais consolidados não-drenados, para estudar o comportamento de um solo siltoso reforçado com resíduos de garrafa plástica, distribuídos aleatoriamente, variando o comprimento e a porcentagem adicionada em peso seco do solo, porém mantendo sempre constantes a largura e a espessura. Os autores concluíram com a pesquisa que a quantidade e o tamanho dos resíduos possuem um papel importante no aumento dos parâmetros de resistência do solo reforçado comparado ao solo puro, considerando este método de melhoria uma possível solução para muitos problemas de engenharia.

4.3. Materiais e métodos

4.3.1. Área de estudo

Para a presente pesquisa, foram escolhidos dois solos provenientes do município de Viçosa, que está geograficamente localizado entre as latitudes de 20º41’20" S a 20º49’35" S e entre as longitudes de 42º49’36" W a 42º54’27" W, a uma altitude média de 650 metros, e se encontra no norte da região conhecida como Zona da Mata Mineira, no estado de Minas Gerais (MG), Brasil. As áreas de coleta das amostras estão representadas na Figura 23 e referidas neste estudo da seguinte maneira:

- “Cavalos”: área de coleta do Solo 1, localizada em um trecho de acesso interno ao Campus Viçosa da Universidade Federal de Viçosa (UFV), na latitude de 20°45'8.75"S e longitude de 42°51'29.65"W, conhecido como Alto dos Barbados;
- “Vila Secundino”: área de coleta do Solo 2, localizada na latitude de 20°45'48.25"S e longitude de 42°51'29.44"W, em um talude existente próximo à Vila Secundino, entre o Departamento de Medicina e Enfermagem e o Departamento de Zootecnia, no Campus Viçosa da UFV.

Figura 23: Localização das áreas de coleta das amostras dos solos pesquisados.

Fonte: (GOOGLE EARTH, 2018).

4.3.2. Materiais utilizados

4.3.2.1. Solos

Neste estudo, foram utilizados dois tipos de solos granulometricamente distintos: um residual maduro, com horizonte B latossólico de tonalidade avermelhada, blocos bem individualizados e aspecto bem poroso, denominado aqui neste trabalho de Solo 1; e um residual jovem, oriundo de um perfil de intemperismo desenvolvido de gnaisse, que apresenta coloração acinzentada e é essencialmente quartzoso, com horizonte C profundo, aqui denominado de Solo 2 (Figura 24).

Figura 24: Solos utilizados na pesquisa: a) Solo 1; b) Solo 2.

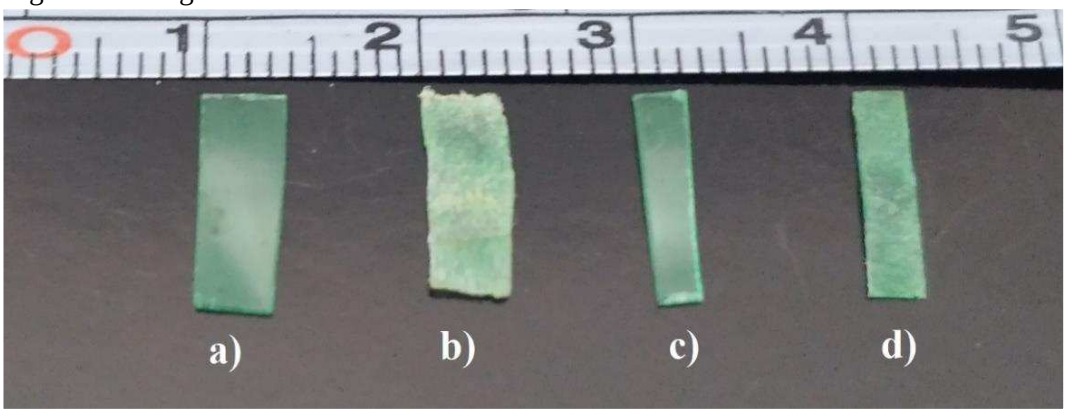
a) b)

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.2.2. Fibras

As fibras utilizadas no desenvolvimento deste estudo (Figura 25) foram de Polietileno Tereftalato (PET), geradas a partir de garrafas de refrigerante, obtidas com larguras de 2mm e 4mm, utilizando-se, para isso, um filetador de garrafas PET, e comprimento de 1 cm, sendo as mesmas adicionadas aos solos nos teores de 0,50% e 1,00% em relação ao peso seco do solo. Com relação à textura superficial, elas foram divididas em lisas e rugosas, obtendo-se a rugosidade através do lixamento das garrafas com lixa de parede, anteriormente à sua transformação em fibras.

Figura 25: Fibras utilizadas no programa experimental da pesquisa: a) Fibra lisa com largura de 4 mm; b) Fibra rugosa com largura de 4 mm; c) Fibra lisa com largura de 2 mm; d) Fibra rugosa com largura de 2 mm.



Fonte: Elaborada pela autora

4.3.3. Métodos

4.3.3.1. Coleta e Preparação do Solo

Após a seleção das áreas, foram coletadas amostras deformadas representativas dos solos em questão, que foram ensacadas, identificadas, transportadas e posteriormente armazenadas no Laboratório de Mecânica dos Solos do Instituto Militar de Engenharia (IME), no Rio de Janeiro. As amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas na peneira de abertura nominal de 2 mm e guardadas para uso nos procedimentos experimentais descritos a seguir, em obediência à NBR 6457 (ABNT, 2016a).

4.3.3.2. Ensaios de Caracterização Geotécnica

Para a caracterização tradicional das amostras de solo, foram realizados os seguintes ensaios geotécnicos: granulometria conjunta (ABNT, 2016b), limites de *Atterberg* (ABNT, 2016c; ABNT, 2016d) e peso específico dos grãos sólidos do solo (ABNT, 1984).

4.3.3.3. Ensaios de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 2016e), tanto para amostras de solos no estado natural, quanto para amostras

de solos com fibras, nas diferentes espessuras, rugosidades e teores, na energia do Proctor Normal, sem reuso de material, utilizando cilindro grande (CBR).

4.3.3.4. Ensaios de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto, tanto para os solos puros quanto para os solos com fibras nas diferentes espessuras, rugosidades e teores, foram realizados tendo como base a norma ASTM D-3080 (ASTM, 2004). A moldagem dos corpos de prova, na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, obtidos na energia Proctor Normal, foi realizada, de forma estática, diretamente em um anel cilíndrico, com raio de 10,15 cm e altura de 2,00 cm, sendo os corpos de prova posteriormente transferidos para a caixa de cisalhamento.

Foram ensaiados, para cada nível de tensão normal, dois corpos de prova para os solos puros e para cada compósito estudado, sendo em seguida determinada a média dos resultados de tensão cisalhante de pico e a variação volumétrica de pico. Após a obtenção destes resultados, foram determinadas as envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico para cada material, obtendo-se, a partir das mesmas, os respectivos parâmetros de resistência (intercepto de coesão e ângulo de atrito interno) dos solos e dos compósitos estudados.

Antes da etapa de cisalhamento do ensaio, cada corpo de prova foi inundado com água, seguido de seu adensamento sob a tensão normal prevista para o ensaio. Foram adotadas as tensões normais de 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa, e a velocidade de deslocamento horizontal, na etapa de ruptura, foi de 1,2 mm/min.

4.4. Resultados e Discussões

4.4.1. Considerações iniciais

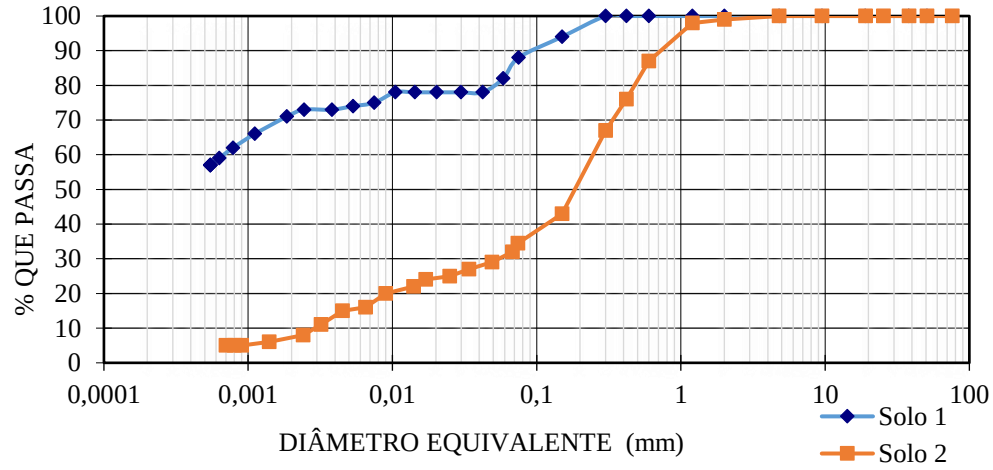
Na Tabela 7, encontram-se os resultados das análises granulométricas, dos ensaios de limites de consistência, bem como os pesos específicos dos grãos sólidos dos solos estudados. As curvas granulométricas dos solos são apresentadas na Figura 26.

Tabela 7: Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica dos solos estudados.

Amostra	Análise Granulométrica (%)					Limites de Consistência (%)			Peso Específico dos Grãos sólidos (kN/m³)
	Areia[1]			Silte[1]	Argila[1]	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)	
	Grossa[1]	Média[1]	Fina[1]						
Solo 1	0	4	14	11	71	82	44	38	27,39
Solo 2	13	41	15	24	7	28	18	10	26,29

[1] Classificação segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 26: Curvas Granulométricas dos Solos



Fonte: Elaborada pela autora.

Segundo o sistema de classificação geotécnica TRB (*Transportation Research Board)* e o USCS (*Unified Soil Classification System*), os solos estudados foram classificados conforme apresentado na Tabela 8. Nesta, também são apresentadas as classificações obtidas pela metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), encontradas por Batista (2001) e Trindade (2006), respectivamente, para os solos 1 e 2.

Tabela 8: Classificação geotécnica dos solos segundo os sistemas TRB, USCS e MCT.

Solos	Classificação TRB	Classificação USCS	Classificação MCT
Solo 1 (Cavalos)	A-7-5 (20)	MH	LG' (Laterítico Argiloso) [1]
Solo 2 (Vila Secundino)	A-2-4 (0)	SC	NA' (Não-Laterítico Arenoso) [2]

Fonte: [1] (BATISTA, 2001); [2] (TRINDADE, 2006).

Os resultados obtidos nos ensaios de compactação dos solos puros e das misturas solo-fibras, na energia do Proctor Normal, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados obtidos nos ensaios de compactação Proctor Normal dos solos puros e das misturas solo-fibras.

Misturas	Solo 1		Solo 2	
	Teor de Umidade ótimo (%)	Peso Específico Aparente Seco Máximo (kN/m³)	Teor de Umidade ótimo (%)	Peso Específico Aparente Seco Máximo (kN/m³)
Solo Puro	32,0	13,8	14,2	16,9
Solo + 0,5% de fibra lisa de 2mm	32,5	13,3	15,9	16,6
Solo + 0,5% de fibra lisa de 4mm	31,4	13,3	14,0	16,6
Solo + 1,0% de fibra lisa de 2mm	31,0	13,7	15,9	16,5
Solo + 1,0% de fibra lisa de 4mm	33,0	13,7	12,9	16,5
Solo + 0,5% de fibra rugosa de 2mm	32,0	13,2	16,0	16,5
Solo + 0,5% de fibra rugosa de 4mm	32,0	13,7	15,9	16,4
Solo + 1,0% de fibra rugosa de 2mm	32,5	13,7	15,2	16,4
Solo + 1,0% de fibra rugosa de 4mm	33,0	13,7	16,0	16,5

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4.2. Ensaio de Cisalhamento Direto

Os resultados de tensão cisalhante de pico e de variação volumétrica de pico obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, para os solos 1 e 2 e suas respectivas misturas, estão representados na Tabela 10 e na Tabela 12, respectivamente.

Os resultados obtidos para os parâmetros de resistência ao cisalhamento (intercepto de coesão e ângulo de atrito interno) de ambos os solos e seus compósitos com fibras são apresentados nas Tabela 11 e Tabela 13, enquanto as envoltórias médias de resistência ao cisalhamento de pico são apresentadas nas Figura 27 e Figura 28, respectivamente para os solos 1 e 2.

Tabela 10: Solo 1 - Resultados de tensão cisalhante de pico e variação volumétrica de pico do ensaio de cisalhamento direto para o solo e suas misturas com fibras PET.

Mistura	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)			Variação Volumétrica de Pico (%)		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Média	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
Solo Puro	100	94	93	94	-0,08	-0,06	-0,07
	200	125	125	125	-0,19	-0,19	-0,19
	300	228	229	229	-0,41	-0,32	-0,37
Solo + 0,5% Fibra Lisa 4mm	100	85	82	84	-0,14	-0,28	-0,21
	200	175	172	173	-0,38	-0,31	-0,35
	300	233	233	233	-0,48	-0,45	-0,47
Solo + 1% Fibra Lisa 4mm	100	81	77	79	-0,27	-0,29	-0,28
	200	185	185	185	-0,37	-0,40	-0,39
	300	234	234	234	-0,46	-0,50	-0,48
Solo + 0,5% Fibra Lisa 2mm	100	100	100	100	-0,07	-0,05	-0,06
	200	181	182	182	-0,30	-0,34	-0,32
	300	247	248	247	-0,51	-0,52	-0,52
Solo +1% Fibra Lisa 2mm	100	92	92	92	-0,06	-0,06	-0,06
	200	187	188	188	-0,29	-0,35	-0,32
	300	237	237	237	-0,51	-0,55	-0,53
Solo + 0,5% Fibra Rugosa 4mm	100	91	95	93	-0,17	-0,17	-0,17
	200	173	170	172	-0,43	-0,39	-0,41
	300	247	252	250	-0,49	-0,47	-0,48
Solo + 1% Fibra Rugosa 4mm	100	81	80	81	-0,27	-0,29	-0,28
	200	191	190	191	-0,41	-0,42	-0,42
	300	239	238	238	-0,51	-0,53	-0,52
Solo + 0,5% Fibra Rugosa 2mm	100	106	100	103	-0,08	-0,08	-0,08
	200	176	176	176	-0,32	-0,32	-0,32
	300	250	254	252	-0,53	-0,52	-0,53
Solo + 1% Fibra Rugosa 2mm	100	97	91	94	-0,16	-0,11	-0,14
	200	193	197	195	-0,35	-0,37	-0,36
	300	247	246	246	-0,59	-0,55	-0,57

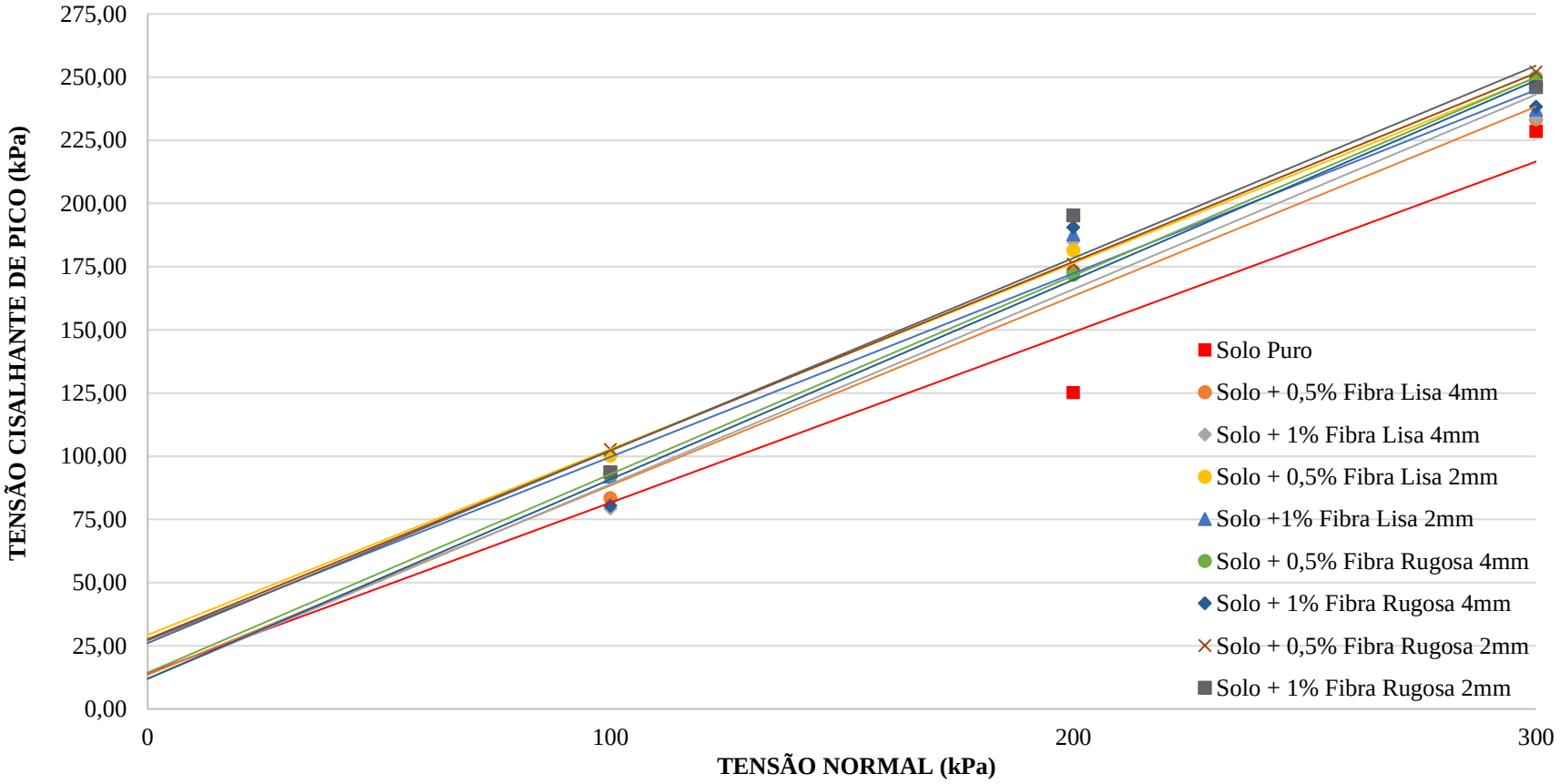
Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 11: Solo 1 – Parâmetros de resistência de pico obtidos nos ensaios de cisalhamento direto do solo e suas misturas com fibras PET.

Misturas	Envoltória Média		
	Intercepto de Coesão c (KPa)	Ângulo de atrito interno ϕ (°)	R^2
Solo Puro	14	34	0,9137
Solo+0,5% Fibra Lisa 4mm	14	37	0,9868
Solo+1% Fibra Lisa 4mm	12	38	0,9560
Solo+0,5% Fibra Lisa 2mm	29	36	0,9963
Solo+1% Fibra Lisa 2mm	27	36	0,9669
Solo+0,5% Fibra Rugosa 4mm	14	38	0,9990
Solo+1% Fibra Rugosa 4mm	12	38	0,9505
Solo+0,5% Fibra Rugosa 2mm	28	37	0,9986
Solo+1% Fibra Rugosa 2mm	27	37	0,9629

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 27: Solo 1- Envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico do solo e suas misturas com fibras PET.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 12: Solo 2 -Resultados de tensão cisalhante de pico e variação volumétrica de pico do ensaio de cisalhamento direto para o solo e suas misturas com fibras PET.

Mistura	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)			Variação Volumétrica de Pico (%)		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Média	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
Solo Puro	100	84	89	86	-0,12	-0,14	-0,13
	200	132	127	130	-0,18	-0,20	-0,19
	300	229	234	231	-0,28	-0,29	-0,29
Solo + 0,5% Fibra Lisa 4mm	100	91	96	93	-0,12	-0,16	-0,14
	200	145	152	148	-0,23	-0,27	-0,25
	300	242	242	242	-0,27	-0,37	-0,32
Solo + 1% Fibra Lisa 4mm	100	82	87	85	-0,18	-0,24	-0,21
	200	177	172	175	-0,24	-0,26	-0,25
	300	242	248	245	-0,31	-0,36	-0,34
Solo + 0,5% Fibra Lisa 2mm	100	90	95	93	-0,20	-0,23	-0,22
	200	146	145	145	-0,23	-0,28	-0,26
	300	232	238	235	-0,31	-0,31	-0,31
Solo +1% Fibra Lisa 2mm	100	86	90	88	-0,28	-0,26	-0,27
	200	134	136	135	-0,32	-0,32	-0,32
	300	225	234	229	-0,37	-0,35	-0,36
Solo + 0,5% Fibra Rugosa 4mm	100	95	96	96	-0,17	-0,20	-0,19
	200	143	150	147	-0,27	-0,29	-0,28
	300	249	247	248	-0,31	-0,28	-0,30
Solo + 1% Fibra Rugosa 4mm	100	85	84	85	-0,26	-0,20	-0,23
	200	140	137	138	-0,20	-0,23	-0,22
	300	232	230	231	-0,33	-0,35	-0,34
Solo + 0,5% Fibra Rugosa 2mm	100	90	88	89	-0,18	-0,18	-0,18
	200	145	137	141	-0,27	-0,22	-0,25
	300	228	226	227	-0,34	-0,36	-0,35
Solo + 1% Fibra Rugosa 2mm	100	82	81	82	-0,20	-0,16	-0,18
	200	150	147	148	-0,25	-0,22	-0,24
	300	230	227	229	-0,36	-0,35	-0,36

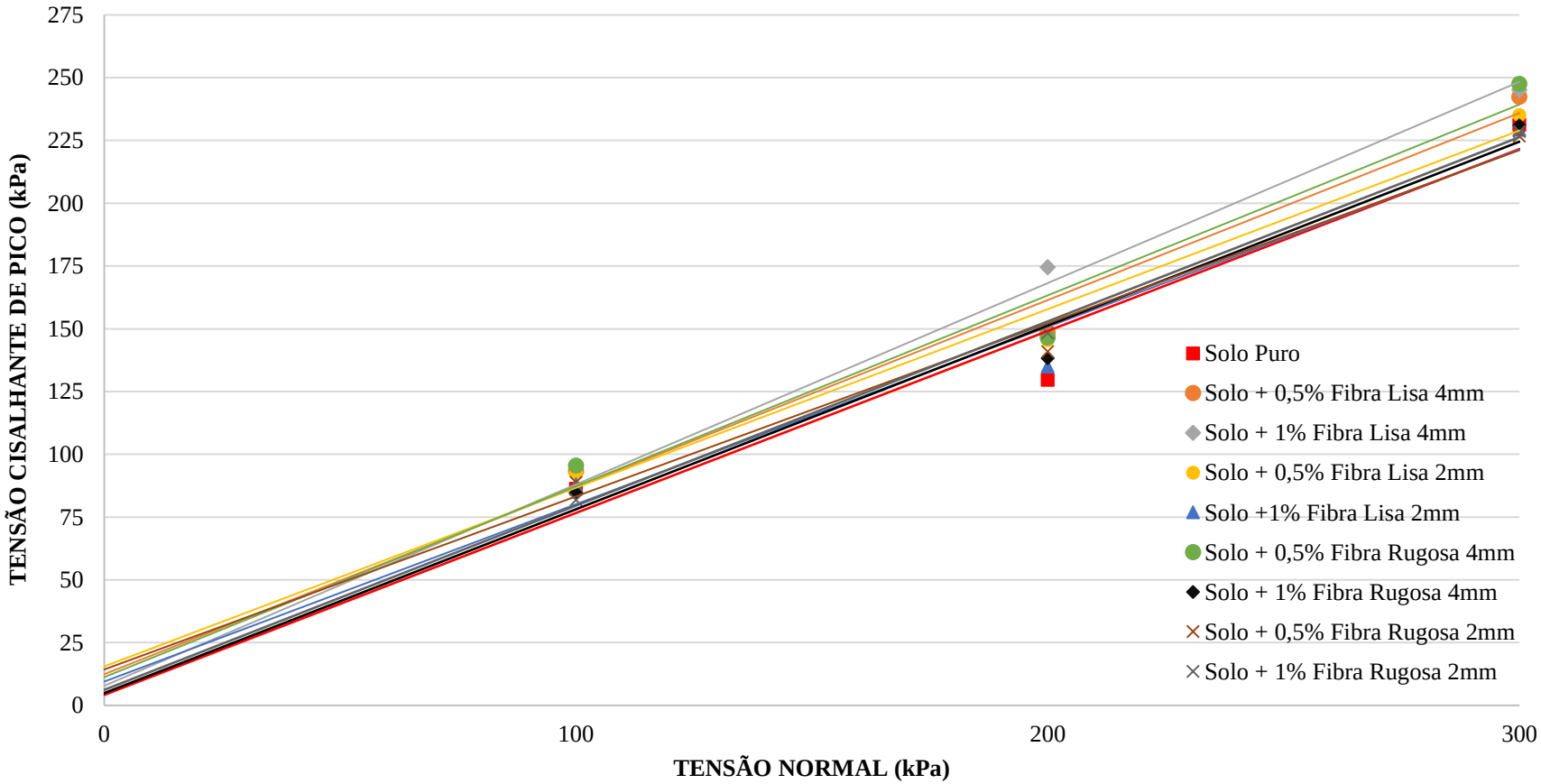
Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 13: Solo 2 - Parâmetros de resistência de pico obtidos nos ensaios de cisalhamento direto do solo e suas misturas com fibras PET.

Misturas	Envoltória Média		
	Intercepto de Coesão *c* (KPa)	Ângulo de atrito interno ϕ (°)	R^2
Solo Puro	4	36	0,9475
Solo+0,5% Fibra Lisa 4mm	12	37	0,9761
Solo+1% Fibra Lisa 4mm	8	39	0,9934
Solo+0,5% Fibra Lisa 2mm	16	35	0,9766
Solo+1% Fibra Lisa 2mm	9	35	0,9617
Solo+0,5% Fibra Rugosa 4mm	11	37	0,9643
Solo+1% Fibra Rugosa 4mm	5	36	0,9768
Solo+0,5% Fibra Rugosa 2mm	14	35	0,9789
Solo+1% Fibra Rugosa 2mm	6	36	0,9966

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 28: Solo 2 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico do solo e suas misturas com fibras PET.



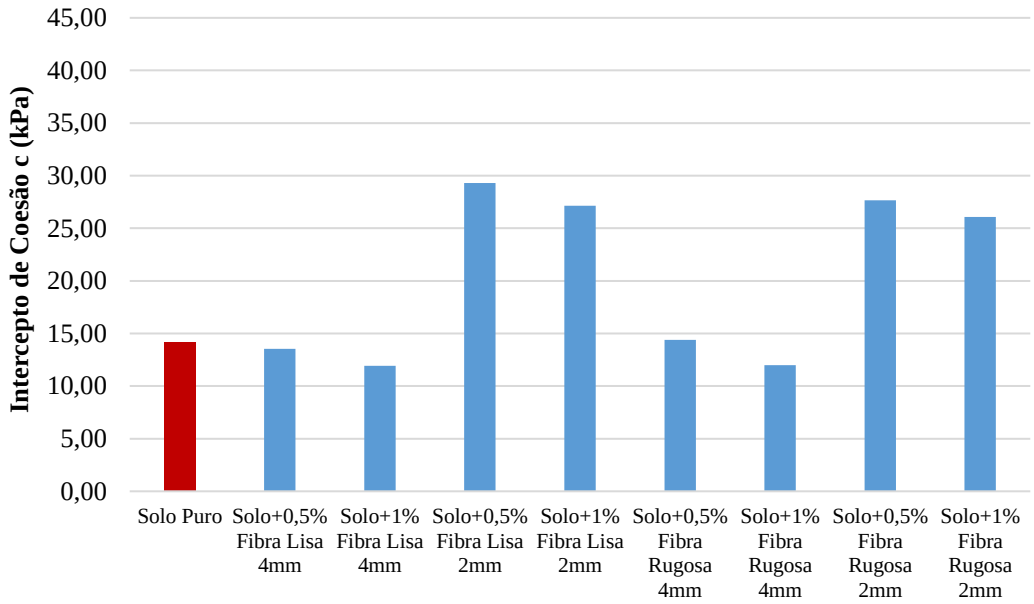
Fonte: Elaborada pela autora.

Para o solo 1, a análise dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico revela um aumento do intercepto de coesão nas misturas com fibras de 2 mm de largura, tanto lisas quanto rugosas, e em ambos os teores estudados, em comparação ao solo puro. Nos compósitos com fibras de 4 mm de largura, nas diferentes rugosidades e teores de fibra, o intercepto de coesão tendeu a diminuir, porém sempre mantendo valores próximos ao intercepto de coesão do solo puro (Figura 29).

A obtenção de maiores valores de intercepto de coesão para as misturas com fibras de 2 mm, tanto lisas quanto rugosas, em comparação com os sistemas solo-fibras de 4 mm, também é identificado para os compósitos estudados com o solo 2 (Figura 31).

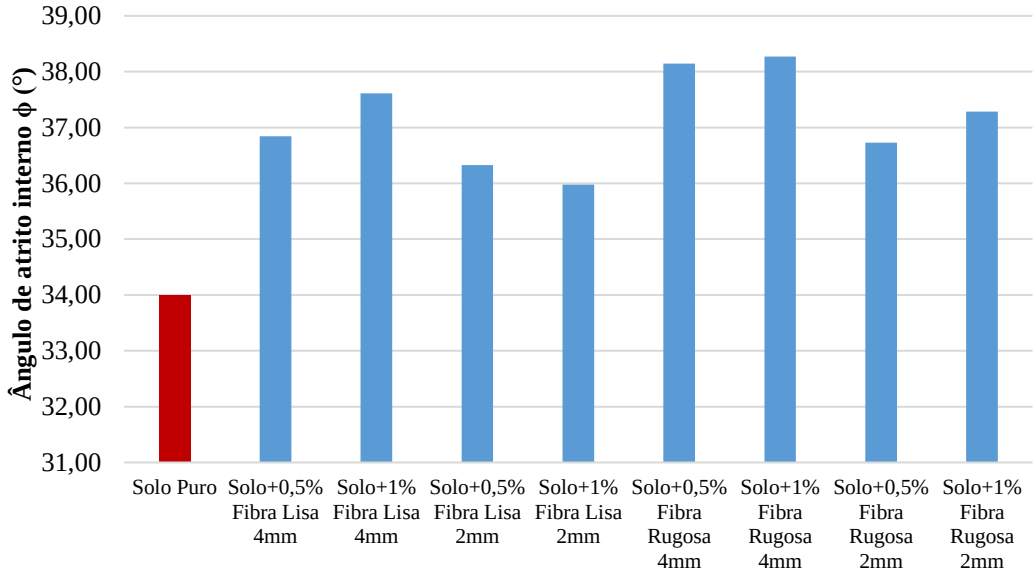
Além disso, para ambos os solos, foi possível verificar que o parâmetro de intercepto de coesão reduz com o aumento do teor de fibra, possuindo, para todas as larguras e rugosidades, maiores valores nas misturas com 0,5% de fibras em comparação às misturas com 1% de fibras. Isto também pode ser percebido nas Figura 29 e Figura 31.

Figura 29: Resultados de intercepto de coesão do solo 1 e suas misturas solo-fibras obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.



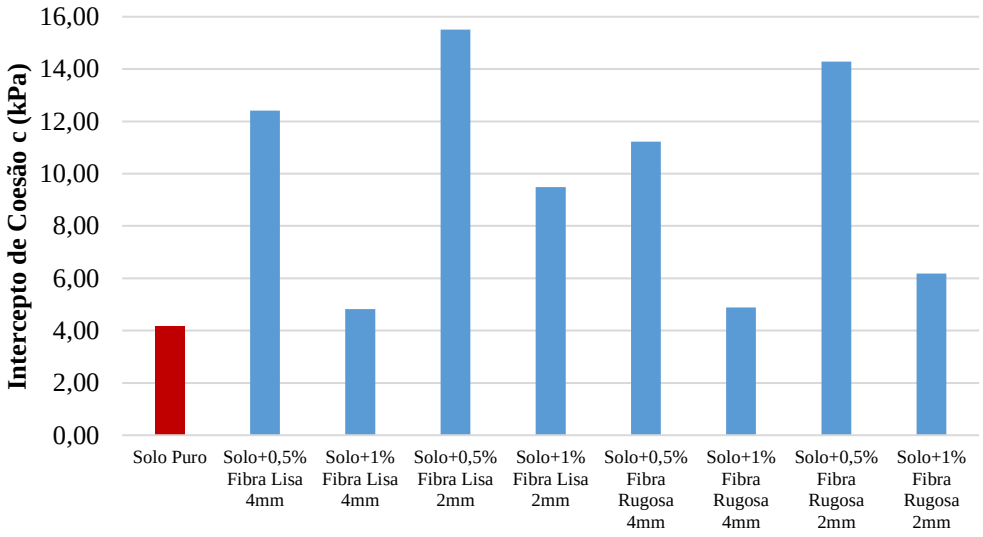
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 30: Resultados de ângulo de atrito interno do solo 1 e suas misturas solo-fibras obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.



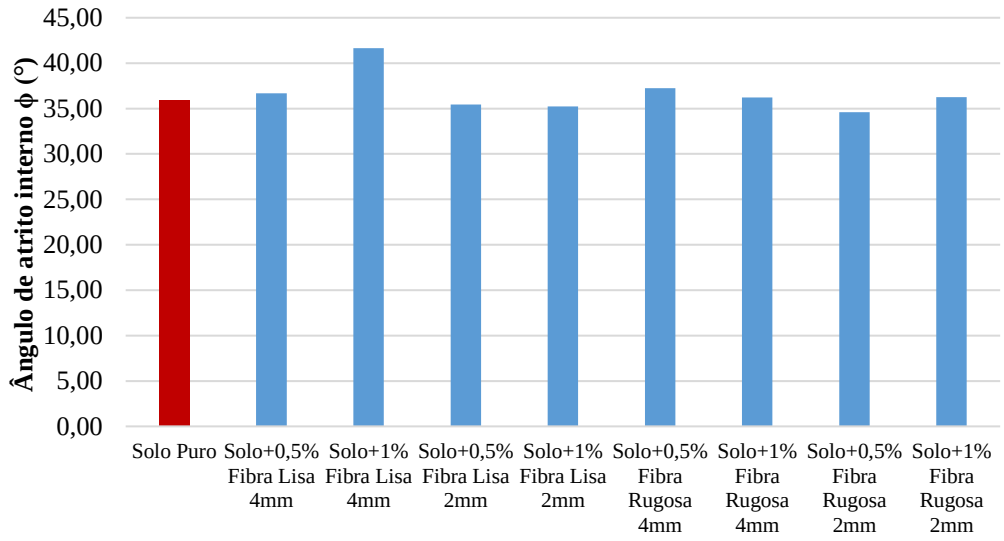
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 31: Resultados de intercepto de coesão do solo 2 e suas misturas solo-fibras obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 32: Resultados de ângulo de atrito interno do solo 2 e suas misturas solo-fibras obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.



Fonte: Elaborada pela autora.

A ocorrência de redução de intercepto de coesão com o aumento da largura e do teor de fibra pode estar relacionada ao fato das fibras com maiores larguras e em teores mais elevados tenderem a ocupar maiores espaços no corpo de prova, reduzindo a união dos grãos do solo e, consequentemente, gerando maiores vazios e menores contatos entre as partículas do mesmo, o que reduz a disponibilidade da matriz do solo para conter a fibra e prejudica o desenvolvimento de uma ligação suficientemente forte entre as fibras e o solo, para que seja possível a ocorrência de um incremento de coesão.

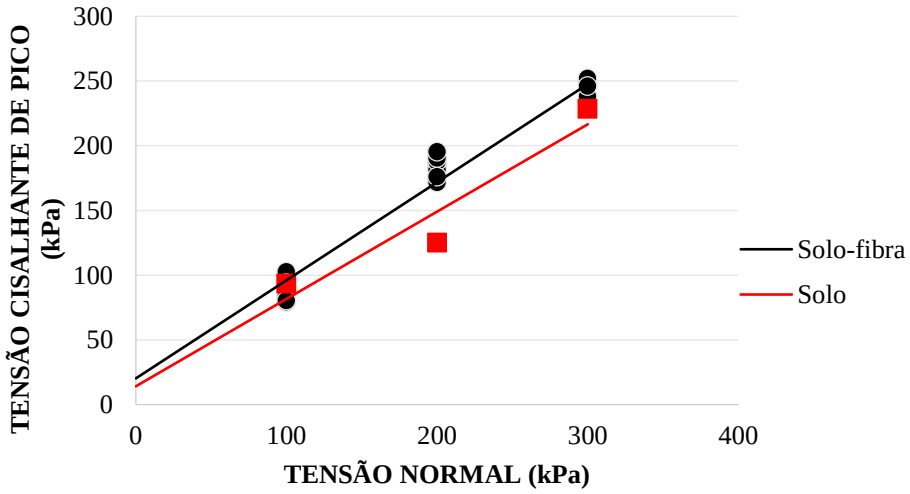
Neste sentido, Anagnostopoulos et al. (2013) afirmam que a percentagem de fibras desempenha um papel importante no desenvolvimento da resistência ao cisalhamento dos solos, que tende a aumentar com a inclusão das mesmas até uma percentagem ideal, a partir da qual os parâmetros de cisalhamento tendem a diminuir ou se manter inalterados. Isso, segundo os autores, ocorre devido ao alto teor de fibras resultar em misturas com menor contato entre as partículas do solo, reduzindo a disponibilidade de matriz deste para conter a fibra e o desenvolvimento de uma ligação satisfatória entre as fibras e o solo.

Em conjunto, ao analisar as figuras de Figura 29 à Figura 32, também foi possível observar que, para ambos os solos, houve uma maior influência das fibras nos

valores de intercepto de coesão do que nos obtidos para ângulo de atrito interno. Isso se deve ao fato das mesmas atuarem, principalmente, gerando ancoragem às partículas de solo, o que afeta majoritariamente o parâmetro de intercepto de coesão, principalmente em solos granulares.

Nas Figuras 33 e 34, apresentam-se, respectivamente, as envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico dos solos 1 e 2, com e sem fibras PET, o que permite analisar a influência das fibras, independente das características das mesmas (percentagem, largura, textura superficial). Para o solo 1 (Figura 34), é possível verificar que todos os sistemas solo-fibra apresentaram desempenho superior ao do solo puro no que concerne à resistência ao cisalhamento, havendo incremento tanto do ângulo de atrito como da parcela coesiva.

Figura 33: Solo 1 - Análise da influência das fibras no solo, independente das suas características.



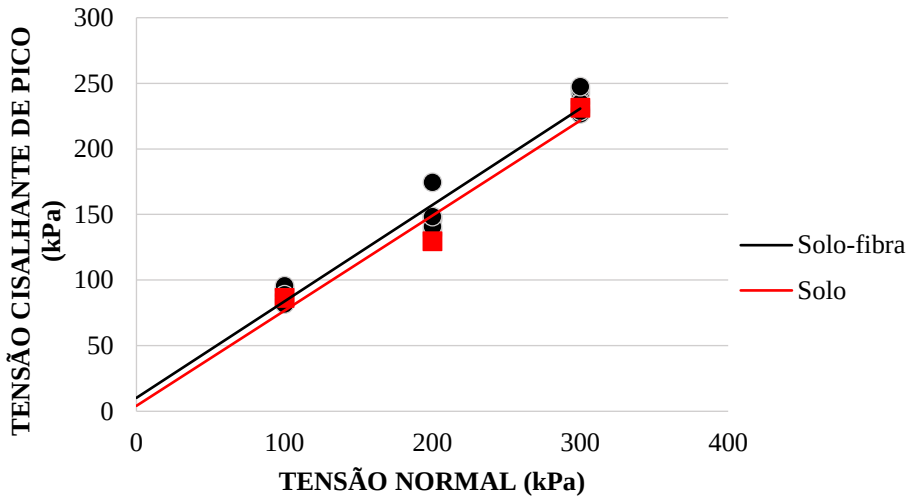
Material	Solo-Fibra	Solo
Intercepto de coesão (kPa)	20	14
Ângulo de atrito interno (°)	37	34
R²	0,9700	0,9138

Fonte: Elaborada pela autora.

Ao se realizar esta análise para o solo 2 (Figura 34), também se observa que todos os sistemas solo-fibra apresentaram desempenho superior ao do solo puro, constatando-se, porém, apenas o incremento da parcela coesiva. Isso leva a concluir que esta parcela, para este solo, corresponde à principal contribuição das fibras aos

sistemas solo-fibra, sendo, consequentemente, o principal responsável pelo desempenho superior destes, comparativamente ao solo puro.

Figura 34: Solo 2 - Análise da influência das fibras no solo, independente das suas características.



Material	Solo-Fibra	Solo
Intercepto de coesão (kPa)	10	4
Ângulo de atrito interno (°)	36	36
R²	0,9679	0,948

Fonte: Elaborada pela autora.

Ao comparar o incremento de desempenho com a adição de fibras obtido para o solo 1, predominantemente argiloso, em relação ao obtido para o solo 2, predominantemente arenoso, é possível verificar que a adição das mesmas é mais eficiente no caso do primeiro solo.

Esta ocorrência se deve, provavelmente, ao tamanho relativo existente entre as fibras e grãos do solo, sendo que, segundo Anagnostopoulos et al. (2013), um material composto por grãos mais finos resulta em um número muito maior de pontos de contato grãos-fibras. Neste sentido, Tang et al. (2010) afirmam que a área de contato efetiva entre grãos e fibras influencia diretamente a magnitude do atrito e da aderência interfacial, considerando a eficácia do reforço dependente do número de pontos de contato.

Logo, por apresentar uma granulometria mais fina, pode-se afirmar que o solo 1 possui uma área de contato efetiva entre grãos e fibras maior do que o solo 2 (mais

arenoso), o que justifica a maior eficácia do reforço apresentada para o primeiro solo, com o acréscimo de fibras, em comparação ao segundo solo.

Essa maior área de contato, que influencia diretamente a magnitude do atrito e da aderência interfacial, também pode justificar o incremento gerado tanto da parcela de atrito quanto de coesão para o solo 1, o que não ocorreu no solo 2, no qual só houve incremento de coesão.

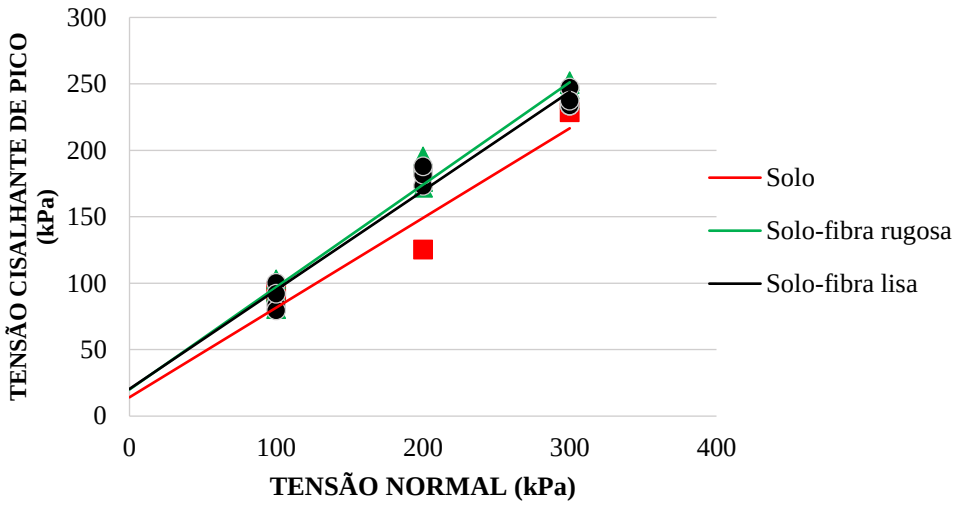
Neste sentido, Darvishi e Erken (2018) afirmam que, em geral, para solos arenosos, fibras discretas distribuídas aleatoriamente podem atuar como uma estrutura tridimensional, gerando um intertravamento das partículas, o que contribui para a formação de uma unidade coerente dos grãos, restringindo, consequentemente, o deslocamento na interface solo-fibras e fazendo com que a areia se comporte como solos coesivos. Ademais, as partículas duras do solo contribuem impactando e desgastando a superfície da fibra, gerando sulcos que podem constituir um intertravamento e melhorar a interação entre a matriz do solo e a superfície da fibra, melhorando a resistência ao cisalhamento da mistura, principalmente com relação ao parâmetro de coesão.

Já ao realizar uma análise comparativa entre o efeito de adição de fibras lisas e fibras rugosas aos solos (Figura 35 e Figura 36), é possível verificar que os sistemas com fibras rugosas apresentaram os melhores desempenhos para o solo 1, enquanto os com fibras lisas foram os que obtiveram melhor comportamento para o solo 2.

Além disso, para o primeiro solo, o acréscimo de resistência ao cisalhamento de pico, tanto pelo incremento de fibras lisas quanto pelo de fibras rugosas, foi devido a aumentos nas parcelas de atrito e de coesão, comparativamente ao solo. Já para segundo solo, no caso de adição de fibras rugosas, foram obtidos incrementos exclusivamente na parcela de coesão, enquanto que, para o acréscimo de fibras lisas, ambos os parâmetros foram incrementados em comparação ao solo, porém sendo o incremento de coesão o mais efetivo.

As ocorrências presentes no solo 2 podem ser justificadas pelo fato de que o mesmo, que possui uma granulometria mais aberta e, consequentemente, tende a gerar um menor número de pontos de contato grãos-fibras, ao tocar as saliências e reentrâncias das fibras rugosas, tende a obter uma área de contato ainda menor, reduzindo a interação solo-fibra e obtendo resultados menos eficientes de resistência ao cisalhamento em comparação aos obtidos para os sistemas solo-fibras lisas.

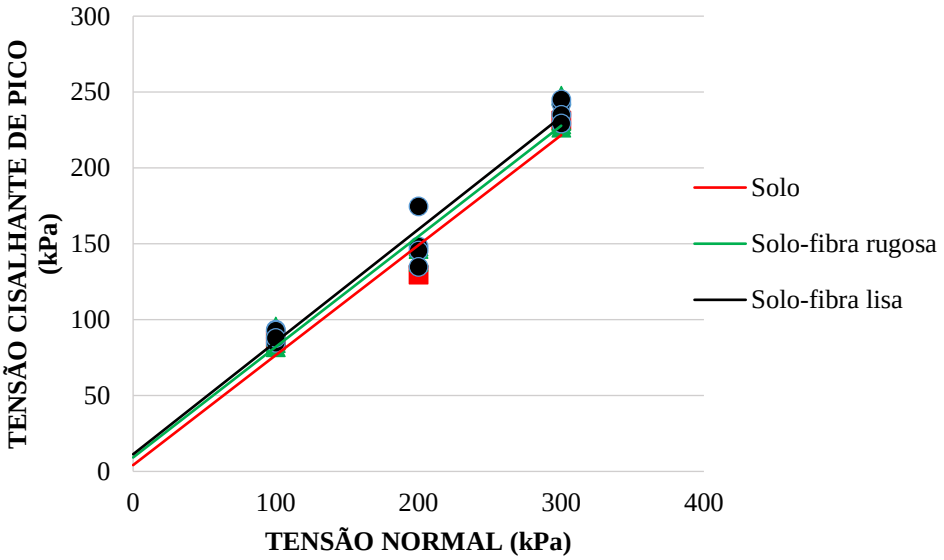
Figura 35: Solo 1 - Análise comparativa entre as envoltórias do solo, do solo-fibras lisas e do solo-fibras rugosas.



Material	Solo-Fibra lisa	Solo-Fibra rugosa	Solo
Intercepto de coesão (kPa)	20	20	14
Ângulo de atrito interno (°)	37	38	34
R²	0,9689	0,9742	0,9318

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 36: Solo 2 - Análise comparativa entre as envoltórias do solo, do solo-fibras lisas e do solo-fibras rugosas.



Material	Solo-Fibra lisa	Solo-Fibra rugosa	Solo
Intercepto de coesão (kPa)	11	9	4
Ângulo de atrito interno (°)	37	36	36
R²	0,903	0,972	0,948

Fonte: Elaborada pela autora.

Já o solo 1, com uma granulometria mais fina, tende a possuir maior facilidade de encaixe e penetração nas reentrâncias e saliências das fibras rugosas, o que gera um maior número de pontos de contato grãos-fibras e, consequentemente, uma maior interação solo-fibra, além de aumento na força de intertravamento e no coeficiente de atrito, restringindo o rearranjo das mesmas na interface de cisalhamento. Neste sentido, Tang et al. (2010) afirmam que uma menor probabilidade de se reorganizar e uma boa interligação das partículas do solo são fatores importantes para se obter maiores valores nos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Logo, é justificável o fato das fibras rugosas, para este solo, não gerarem menores valores de resistência ao cisalhamento de pico em comparação ao sistemas solo-fibras lisas.

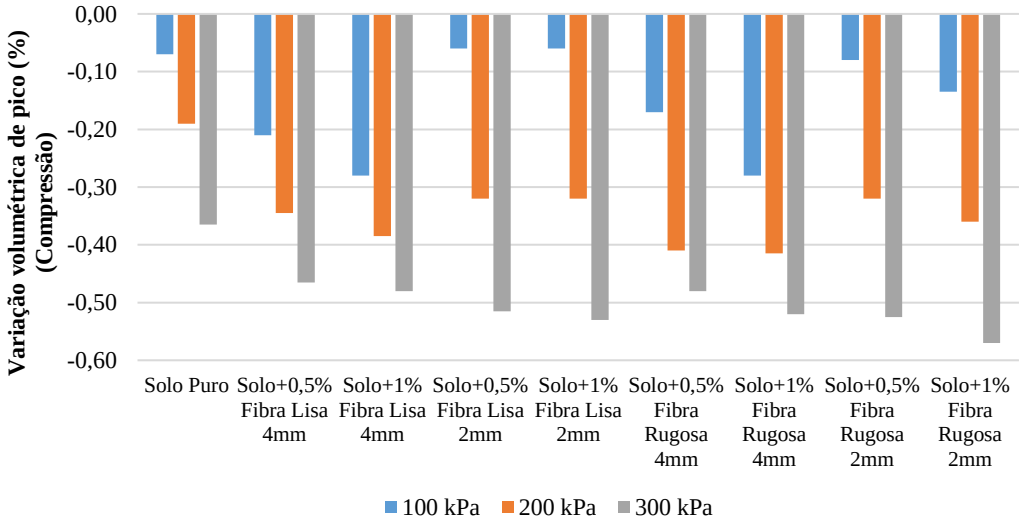
Com relação às variações volumétricas de pico, verifica-se, na Figura 37, que, para ambos os solos, o material reforçado com fibras apresentou maior deformabilidade na ruptura em comparação aos solos puros. Além disso, é possível constatar que a variação volumétrica de compressão, com a tendência de redução do volume dos materiais investigados durante o cisalhamento, aumentou conforme se aumentou a porcentagem de fibras no compósito, para ambos os solos estudados, em todas as tensões normais aplicadas.

O fato do material reforçado com fibras apresentar maiores variações volumétricas de pico de compressão pode ser justificado pela menor densidade apresentada pelos solos-fibras em relação aos solos puros, conforme pode ser observado na Tabela 9 referente aos resultados do ensaio de compactação, apresentando, assim, maiores vazios pré-ensaios de cisalhamento. Por isso, quando a tensão normal é aplicada, o solo com fibras tende a se comprimir mais do que o sem fibras, reduzindo assim o seu volume e aumentando a sua densidade. Este mesmo efeito pode ser verificado ao se comparar os compósitos do solo 1 com os do solo 2, onde este, que obteve maior densidade máxima no ensaio de compactação, apresentou menor variação volumétrica de compressão em relação àquele.

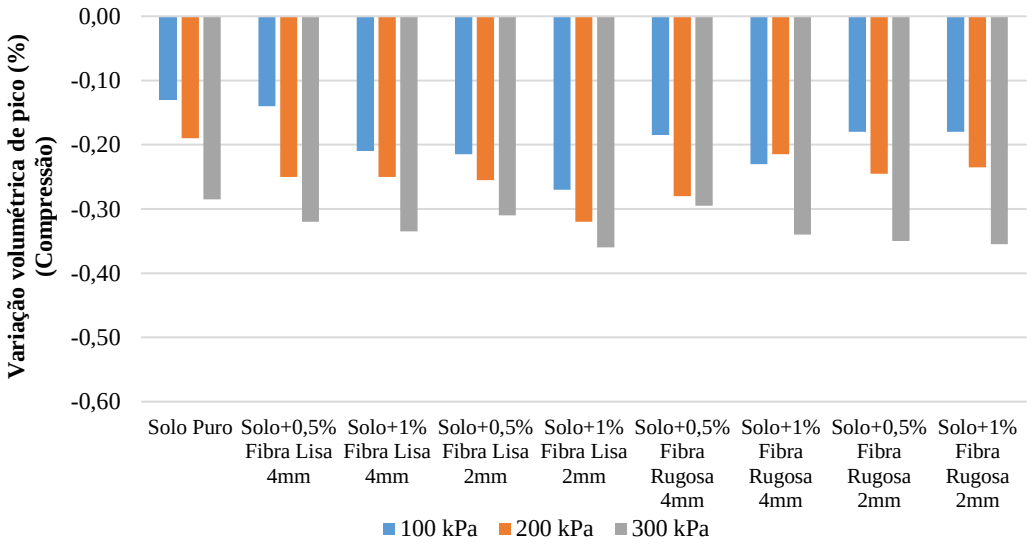
Essas maiores variações volumétricas máximas de pico apresentadas pelos materiais reforçados com fibras em relação aos solos puros, devidas à reorientação dos sólidos e gerando uma configuração mais densa, representam uma perda gradual da rigidez do material e podem representar uma vantagem geotécnica adquirida pelo mesmo, pois uma maior deformabilidade tende a reduzir o risco de formação de trincas

em determinadas soluções geotécnicas e a ocorrência de rupturas bruscas, característica de materiais mais rígidos.

Figura 37: Variações volumétricas de pico apresentadas nas curvas Variação volumétrica x Deslocamento horizontal nos ensaios de cisalhamento direto: a) solo 1 e suas misturas solo-fibras; b) solo 2 e suas misturas solo-fibras.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pela autora.

4.5. Conclusões

A partir dos resultados obtidos nessa pesquisa, foi possível verificar a influência da quantidade, rugosidade e largura de fibras PET no comportamento de misturas solo-fibras, com relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento de dois solos residuais tropicais com características granulométricas diferentes, amostrados no município de Viçosa, na região da Zona da Mata Norte do estado de Minas Gerais.

No ensaio de cisalhamento direto, foi possível verificar, ao analisar a influência das fibras, independente das características das mesmas (percentagem, largura, textura superficial), que, para ambos os solos, todos os sistemas solo-fibras apresentaram desempenho superior ao do solo puro no que concerne à resistência ao cisalhamento de pico. No caso do solo 1, houve incremento tanto do ângulo de atrito interno como da parcela coesiva, enquanto que, para o solo 2, houve apenas o incremento da parcela coesiva. Também foi possível verificar que a adição das fibras se mostrou mais eficiente para o solo 1, por ser este um material de granulometria mais fina, do que para o solo 2.

Em conjunto, ao realizar uma análise comparativa entre o efeito da adição de fibras lisas e rugosas aos solos, foi possível verificar que os sistemas com fibras rugosas, para o solo 1, foram os que apresentaram melhores desempenhos, enquanto os com fibras lisas foram os que obtiveram melhor comportamento para o solo 2. Além disso, foi possível verificar que, para o primeiro solo, o acréscimo de resistência ao cisalhamento de pico, pela adição de ambos os tipos de fibras, se deve a aumentos nas parcelas de atrito e coesão, enquanto que, para o segundo solo, a adição de fibras rugosas tende a gerar incrementos exclusivamente na parcela de coesão, e o acréscimo de fibras lisas tende a aumentar ambos os parâmetros, em comparação ao solo.

Já com relação às variações volumétricas de pico obtidas para as misturas estudadas, verificou-se que o material reforçado com fibras tende a apresentar maior deformabilidade em comparação aos solos puros. Este efeito foi verificado com a obtenção de um aumento na variação volumétrica de compressão na condição de pico, apresentando uma tendência de redução do volume durante o cisalhamento com o acréscimo da porcentagem de fibras no compósito, para ambos os solos estudados, em todas as tensões normais aplicadas.

Com estas constatações, é possível concluir que a adição de fibras PET tende a fornecer melhorias na resposta de engenharia para os sistemas reforçados, indicada pelos incrementos nos parâmetros de resistência oriundos do ensaio de cisalhamento direto, podendo a técnica de adição de fibras PET ao solo ser considerada um eficiente método de melhoria dos solos investigados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPET. **Resina PET - Fabricação**, 2018. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=65>. Acesso em: 08 de abril de 2018.

AGUILAR, J. R. T. **Análise do comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras de coco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2015.

ANAGNOSTOPOULOS, C. A.; TZETZIS, D.; BERKETIS, K. Shear strength behavior of polypropylene fibre reinforced cohesive soil, **Geomechanics and Geoengineering: An International Journal,** 2013.

ASSIS, S. R. H.; MELO, R. A. Viabilidade técnica do uso de misturas de solo e pet granulado em camadas de pavimentos. In: 18ª RPU – REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 2012, São Luis. **Anais 18ª RPU,** São Luis, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3080**: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. Philadelphia, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016e.

BATISTA, I. M. **Comportamento mecânico de dois solos típicos da região de Viçosa-MG, para fins de utilização em camadas de pavimentos flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2001.

BENTO, P. F. B. **Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para a utilização em estruturas de pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BOTERO, E.; OSSA,A.; SHERWELL, G.; OVANDO-SHELLEY, E. Stress-estrain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). **Geotextiles and Geomembranes.** V. 43, p. 363 – 369, 2015.

CHANGIZI, F.; HADDAD, A. Stabilization of Subgrade Soil for Highway by Recycled Polyester Fiber. **Journal of Rehabilitation in Civil Engineering**. V.2, p. 93-105, 2014.

CHOUDHARY, A. K.; JHA, J. N.; GILL, K. S. Utilization of plastic wastes for improving the sub-grades in flexible pavements. In: GEOSHANGHAI INTERNATIONAL CONFERENCE, 2010, Shangai. **Proceedings Geoshanghai,** Shangai, 2010.

CONSOLI, N. C.; MONTARDO, J. P.; PRIETTO, P. D. M.; PASA, G. S. Engineering Behavior of a Sand Reinforced with Plastic Waste. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.** P. 462 - 472, June 2002.

DARVISHI, A.; ERKEN, A. Effect of Polypropylene Fiber on Shear Strength Parameters of Sand. In: 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL RESEARCH AND ENGINEERING, 2018, Hungary. In: **Proceedings of the 3rd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'18),** 2018, Hungary.

FERREIRA, C. A. **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Reforçados com Fibras através do Método de Elementos Discretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

GOOGLE. **Google Earth website**. Disponivel em: <http://earth.google.com/>.Acesso em: 20 Junho de 2018.

LOUZADA, N. S. L. **Experimental study of soils seinforced with srushed polyethylene terephthalate (PET) residue**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

LOUZADA, N. S. L.; CASAGRANDE, M. D. T. Behavior of a Clayey Soil Mixture with Fine Crushed Polyethylene Terephthalate. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais COBRAMSEG,** Belo Horizonte, 2016.

LUWALAGA, J. G. **Analysing the Behaviour of Soil Reinforced with Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Waste.** Thesis (Master of Engineering), Stellenbosch University, Stellenbosch, 2015.

MISHRA, B. A. Study on Use of Polyethylene Terephathalate (PET) Fiber for Stabilization of Subgrade Soil of Road Pavement. **Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology.** V. 5, i. 2, p. 1497 – 1504, 2016.

MONTARDO, J. P., VENDRUSCOLO, M. A., CONSOLI, N. C., PRIETTO, P. D. M. Características de Resistências e Deformação de um Solo Cimentado Reforçado com Fibras PET: Estudo Preliminar. In:**Anais Associação Brasileira de Mecânica do Solos e Engenharia Geotécnica**, p. 1163-1167, 1998.

NAEINI, S. A.; RAHMANI, H. Effect of Waste Bottle Chips on Strength Parameters of Silty Soil. **International Journal of Civil and Environmental Engineering**. V. 11, n. 1, p. 06-10, 2017.

OLIVEIRA, T. G.; PEREIRA, E. L.; MENDES, G. C.; DUARTE, A. P.; SOARES, C. C. Avaliação do Uso de Fibras de Garrafas PET como Reforço de Solos Compactados.In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais COBRAMSEG,** Belo Horizonte, 2016.

ORTIZ, J. A. L. **Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET)**. 2013. 90 f. Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado. 2013.

PINTO, L. E. M.; MELO, R. A.; ASSIS, S. R. H. Estudo de viabilidade do uso de resíduo pet em obra rodoviária. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2010, Bauru. **Anais-congresso brasileiro de gestão ambiental**, Bauru, 2010, p.1-6.

PRIETTO, P.D.; MONTARDO, J. P.; CONSOLI, N.C. Comportamento Mecânico de uma Areia Cimentada Reforçada com Fibras PET. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 3.,1999, Rio de Janeiro. **Anais Geossintéticos 99**, Rio de Janeiro, 1999, p.199-206.

ROCHA, L. V.; NOVO, B. F. **Estudo experimental do solo argiloso reforçado com pó de PET**. Pontíficia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015.

ROMÃO,W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. Poli(Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. V. 19, n. 2, p. 121 - 132, 2009.

SANTOS, J. R.; SILVA, T. J. L. **Análise de viabilidade de utilização de solo tropical com a adição de fibras PET em sistemas de cobertura de aterros sanitários**. Monografia de projeto final em Engenharia Civil - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal. 2015.

SENEZ, P. C. **Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2016.

SILVA, C. C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânico**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2007.

SOTOMAYOR, J. M. G. **Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibras de coco submetidos a ensaios de placa em verdadeira grandeza**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 132. 2014.

SOUSA, A. A. C.; GURJÃO, C. M. C.; RIBEIRO, L. F. M; COSTA, C. M. C. Avaliação do Comportamento Hidromecânico de Liners Executados com Misturas de Solo e Fibras de PET. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais COBRAMSEG,** Belo Horizonte, 2016.

TANG, C. S.; SHI, B.; ZHAO, L. Z. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, p. 54-62, 2010.

TAYLOR, G. D. **Materials in construction**. 2ª. ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994.

TRINDADE, T. P. **Caracterização tecnológica de três solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em geotecnia rodoviária e ambiental.** Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2006.

5. ESTUDO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE SOLO-CIMENTO REFORÇADO COM FIBRAS DE GARRAFA PET

Resumo – O melhoramento de solos constitui uma das mais antigas e intrigantes técnicas utilizadas na Engenharia Civil. Um exemplo amplamente empregado é o uso de cimento para a melhoria dos solos. Porém, este tipo de melhoramento resulta, em geral, em um comportamento frágil do compósito, o que pode ser reduzido e controlado pela aplicação de fibras. Em conjunto, considera-se o uso de aditivos melhoradores, com o intuito de gerar melhorias nas características de resistência ao cisalhamento e nos parâmetros ótimos de compactação das misturas solo-cimento-fibras. Neste contexto, o presente trabalho buscou estudar o efeito da adição fibras de polietileno tereftalato (PET) a misturas solo-cimento e as possíveis melhorias geradas pelo acréscimo de um conjunto de dois tipos de aditivos, a saber, um melhorador de impermeabilização e um melhorador de aderência, nos parâmetros de compactabilidade e de resistência ao cisalhamento de misturas solo-cimento-fibras PET, considerando-se um solo residual tropical de textura areno-silto-argilosa, típico da região de Viçosa-MG. No desenvolvimento desta pesquisa, foram utilizados teores de 3% e 5% de cimento *Portland* do tipo CP II E 32, em relação à massa seca do solo, fibras de garrafa PET com larguras de 2 mm e comprimento de 1 cm, no teor de 1% em relação à massa seca do solo, e dois aditivos, sendo o aditivo 1 (melhorador de impermeabilização) utilizado na proporção de 0,25 kg/m³ de solo seco e o aditivo 2 (melhorador de aderência) na proporção de 0,60 kg/m³ de solo seco, avaliando-se o eventual efeito dessas variáveis sobre os parâmetros de comportamento de engenharia investigados. Quanto à compactabilidade, verificou-se que a inclusão das fibras PET nas misturas de solo-cimento tende realmente a diminuir o peso específico máximo comparativamente às misturas sem fibras. Em conjunto, o acréscimo dos aditivos aos compósitos solo-cimento-fibras gera maiores valores de peso específico seco máximo e menores valores de umidade ótima, em comparação às misturas de solo-cimento-fibras, porém ainda mantendo valores menores que o obtido para o solo puro compactado. Em relação aos resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto, observaram-se melhorias na resistência ao cisalhamento com a adição de fibras ao solo-cimento, tanto para a parcela correspondente à coesão, quanto àquela correspondente ao atrito interno do material, em comparação aos compósitos sem

fibras. Além disso, verificou-se uma contribuição do acréscimo fibras na redução da rigidez gerada pelo cimento e pelos aditivos, nos compósitos estudados. Em conjunto, observou-se pouca eficiência dos aditivos no processo de estabilização dos solos, no que diz respeito aos parâmetros de resistência ao cisalhamento, sendo apenas verificado um aumento da rigidez da mistura, em comparação aos compósitos sem aditivos.
Palavras-Chave: Reforço, Melhoramento dos solos. Solo-cimento-fibra. Aditivos. Fibras PET.

5.1. Introdução

Desde os tempos mais remotos, o solo é um material muito empregado em diversos tipos de obras de engenharia. Porém, no seu estado natural, dependendo de suas condições, pode ser um material complexo, variável e que não oferece um comportamento satisfatório para a utilização em determinado tipo de aplicação.

Neste contexto, Consoli et al. (2009) afirmam que as técnicas de estabilização e reforço de solos são frequentemente empregadas com o intuito de se obter melhorias geotécnicas para estes materiais, seja pela adição de agentes cimentícios ou através da inclusão de elementos discretos orientados ou distribuídos aleatoriamente, como as fibras.

Para Montardo et al. (1998), o reforço de solos é uma técnica eficaz e segura para aumentar a resistência e a estabilidade do material e é utilizada em uma variedade de aplicações, como estruturas de contenção, aterros rodoviários, estabilização do subleito de pavimentos e fundações superficiais. Neste cenário, pode-se citar a técnica de reforço de solos com fibras, que, segundo Uddin et al. (2011), oferece uma maneira interessante, inovadora e econômica de melhoria do solo para várias estruturas geotécnicas.

Já a estabilização de solos, segundo Silva (2007), consiste em modificar as características do sistema solo - água - ar com o intuito de se obter propriedades necessárias para a aplicação de engenharia desejada. Vários são os materiais que agem como estabilizadores de solos, como, por exemplo, cimento, cal, aditivos, etc.

Caproni Junior et al. (1999) afirmam que a estabilização química do solo com cimento é uma técnica consagrada e tem sido utilizada com sucesso em muitas obras

de engenharia, especialmente em pavimentos e na confecção de alvenaria em paredes monolíticas.

Para Specht (2000), o solo, quando tratado com cimento, tem demonstrado grande aumento de resistência e rigidez em comparação ao solo natural. Por outro lado, a adição de cimento gera aumento da fragilidade e fissuração excessiva. Neste sentido, Fernandes (2009) considera que a incorporação aleatória de fibras neste tipo de mistura pode contribuir para o controle da fissuração e para o aumento da durabilidade e ductilidade do material cimentado. Specht (2000) complementa que este tipo de inclusão torna a camada reforçada capaz de suportar as cargas mesmo depois de rompida a cimentação, quando as fibras continuam atuando como elementos de reforço.

Além disso, é de suma importância levar em consideração as questões ambientais que ocorrem atualmente, como o crescimento da produção mundial de plástico, que gera, como consequência, um aumento na quantidade de resíduos plásticos. Como exemplo, pode-se citar o polietileno tereftalato (PET), originado de garrafas de refrigerante, que é um dos resíduos plásticos mais comuns nos dias atuais.

Para combater este sério problema ambiental, Montardo et al. (1998) afirmam ser de suma importância o desenvolvimento de técnicas que permitam a reutilização racional destes resíduos plásticos, fornecendo meios eficazes para a sua disposição e contribuindo para a resolução de questões econômicas e ambientais envolvidas no problema.

Em conjunto, pode-se citar o uso de aditivos melhoradores, como por exemplo, o acréscimo de uma combinação de dois aditivos, sendo um melhorador de impermeabilização e outro melhorador de aderência, com o intuito de gerar melhorias nas características de resistência ao cisalhamento e nos parâmetros ótimos de compactação.

Neste sentido, o primeiro aditivo, segundo Sharma (2016), pode acrescer uma característica hidrofóbica às misturas, contribuindo com a diminuição da quantidade necessária de água para que o compósito obtenha o seu comportamento ótimo, reduzindo assim a sua umidade ótima em comparação às misturas sem os aditivos. Esta redução gera uma expectativa de incremento na componente de sucção das misturas de solo-cimento-fibras, com um consequente aumento da resistência ao cisalhamento, rigidez e uma redução da condutividade hidráulica.

O segundo aditivo poderia contribuir com o aumento dos valores de peso específico aparente seco máximo, ao realizar, segundo o fabricante, uma conglomeração entre as partículas do solo, aumentando a dureza e durabilidade do mesmo, o que implicaria em desempenho mecânico superior ao apresentado pelo material sem aditivação.

Dentro deste panorama, o presente trabalho busca estudar o efeito da adição de fibras de polietileno tereftalato (PET) ao solo-cimento e as possíveis melhorias geradas pelo acréscimo de um conjunto de dois tipos de aditivos (um melhorador de impermeabilização e um melhorador de aderência) na mistura solo-cimento-fibras PET, particularmente nas propriedades de compactação e de resistência ao cisalhamento, considerando-se um solo residual tropical típico da região de Viçosa-MG.

5.2. Fundamentação Teórica

5.2.1. Influência do cimento *Portland* no comportamento dos solos

A adição de cimento aos solos pode produzir efeitos de duas formas distintas, caso se refira aos solos granulares ou aos solos coesivos. Nos primeiros, Portelinha (2008) afirma que o cimento se destina, sobretudo, a criar ligações nos contatos intergranulares, garantindo ao material uma resistência mecânica mais eficaz às solicitações externas, devido ao aumento da parcela resistente relativa à coesão. Já no segundo caso, o autor descreve que os grãos de cimento atuam como núcleos, aos quais aderem pequeníssimas partículas que os rodeiam, desenvolvendo regiões de materiais floculados que apresentam ligações procedentes dos fenômenos de cimentação.

Neste sentido, Oliveira (2013) afirma que a mistura de solo com cimento é mais eficiente em solos granulares, uma vez que a ação cimentante ocorre através de produtos da hidratação pelo mecanismo de cimentação dos grãos entre si em pontos de contato. Ou seja, estes solos reagem melhor com o cimento por exibirem menor área de superfície específica, o que não ocorre com os solos finos que, por apresentarem maior área de superfície específica, necessitam de grandes quantidades de cimento para que ocorra a cimentação dos pontos de contato.

5.2.2. Comportamento dos Solos Melhorados com Cimento Reforçados com Fibras

Segundo Cristelo (2001), as técnicas de melhoramento de solos baseadas na mistura desses com outros materiais são de crucial importância para a resolução de problemas geotécnicos cada vez mais complicados, relacionados, principalmente, com os solos de fundação. Para Hamidi e Hooresfand (2013), técnicas de cimentação são amplamente utilizadas com a intenção de aumentar a capacidade de suporte das fundações e para melhoria do solo, porém a adição de cimento ao solo resulta em um comportamento frágil que pode ser reduzido e controlado pela aplicação de fibras.

Dentro deste contexto, alguns estudos têm sido realizados com o objetivo de analisar a inclusão de diversos tipos de fibras, como, por exemplo, fibras de vidro, de polipropileno, de espiga de milho, de polietileno tereftalato (PET), em solos melhorados com cimento e os efeitos causados pelas mesmas, visando à aplicação em diversas áreas da Geotecnia. Dentre as pesquisas mais relevantes, podem ser citadas as desenvolvidas por Consoli et al. (1998), Montardo et al.(1998), Machado et al. (1998), Caproni Júnior et al. (1999), Specht (2000), Tang et al. (2007), Consoli et al. (2009), Tang et al. (2010), Uddin et al. (2011), Hamidi e Hooresfand (2013), Marri et al. (2014), Nguyen et al. (2016), Azevedo e Fetusgato (2017) e Tran et al. (2018).

Consoli et al. (1998), por exemplo, realizaram testes de compressão triaxial para avaliar o efeito da inclusão de cimento e fibras de vidro distribuídas aleatoriamente na resposta à carga de um solo arenoso, com uma cura de sete dias. Os resultados encontrados indicaram que a adição de cimento ao solo aumentou a rigidez, a fragilidade e a resistência máxima de cisalhamento, enquanto o reforço de fibra aumentou tanto a resistência de pico como a resistência residual, além de diminuir a rigidez e alterar o comportamento frágil do solo cimentado para um mais dúctil. Em conjunto, os autores verificaram que o intercepto coesivo foi afetado levemente pela adição de fibra, sendo basicamente uma função da cimentação.

Da mesma forma, Montardo et al. (1998) constataram em ensaios triaxiais que, para um solo artificialmente cimentado reforçado com monofilamentos de 0,2 mm de diâmetro obtidos a partir de resíduos plásticos de polietileno tereftalato (PET), a inclusão destes provocou aumentos da resistência de pico e da rigidez inicial, bem

como a diminuição da queda de resistência após a ruptura, com um sensível aumento da resistência última do solo cimentado.

Já Caproni Júnior et al. (1999) verificaram que a adição de fibras ao solo-cimento provocou, em geral, um aumento do ângulo de atrito e uma redução da coesão, ao estudarem o comportamento de uma areia argilo-siltosa estabilizada com cimento e reforçada com fibras de polipropileno.

Segundo Tang et al. (2007), a força de adesão e o atrito na interface parecem ser os mecanismos dominantes que controlam o benefício do reforço no ensaio de cisalhamento direto. Em sua pesquisa, eles identificaram que, para fibras curtas de polipropileno, as propriedades micromecânicas da interface fibra / matriz solo-cimento foram influenciadas por vários fatores, como, por exemplo, os materiais de ligação existentes no solo, a tensão normal gerada em torno do corpo da fibra, a área de contato efetiva da interface, a aspereza da superfície da fibra, dentre outros.

Tang et al. (2010) estudaram a resistência ao cisalhamento interfacial entre um reforço de fibras de polipropileno e a matriz de um solo argiloso oriundo de Nanjing, China, com adição de cimento. Os autores verificaram, através do teste de rasgo projetado, que a inclusão do cimento pode melhorar significativamente a resistência ao cisalhamento da interface fibra / solo, sendo que, em comparação ao solo não cimentado, o solo com cimento obteve um aumento da força de pico interfacial (IPS) e da resistência residual de interface fibra/solo (IRS). Estes fatores (IPS e IRS) também aumentaram com o aumento do teor de cimento e com o tempo de cura.

Com relação ao comportamento volumétrico, Uddin et al. (2011) verificaram que o mesmo é afetado com a adição de fibra. Segundo os autores, uma areia reforçada com fibras de polipropileno apresenta um comportamento mais dilatante em comparação com a mesma areia sem fibras. Por outro lado, ao se comparar a areia cimentada reforçada com fibras com a mesma não cimentada, porém também reforçada com fibras, constataram que aquela apresentou um comportamento mais dilatante em comparação a esta.

Neste sentido, Hamidi e Hooresfand (2013) verificaram que, ao manter constante a quantidade de cimento adicionada a uma areia, a variação volumétrica compressiva aumenta e a dilatação residual diminui quando o conteúdo de fibra é aumentado. Além disso, constataram que a adição de fibras de polipropileno ao solo

cimentado aumentou as resistências ao cisalhamento de pico e residual e reduziu o índice inicial de rigidez e a fragilidade.

Tran et al. (2018), ao estudarem o efeito, no ensaio de compactação, da adição de fibras de espiga de milho em um solo majoritariamente siltoso, melhorado com cimento, verificaram que, para todas as porcentagens de cimento estudadas, a adição de fibras provocou uma diminuição na massa específica seca máxima e um aumento no teor ótimo de umidade. Os autores justificam a primeira verificação por conta da menor densidade específica das fibras de milho em comparação com o solo-cimento, o que gerou a diminuição da densidade do sólido na matriz solo-fibrocimento. Por outro lado, para eles, a umidade ótima aumenta com a inclusão das fibras devido à possível ocorrência de absorção de água pelas mesmas.

5.3. Materiais e Métodos

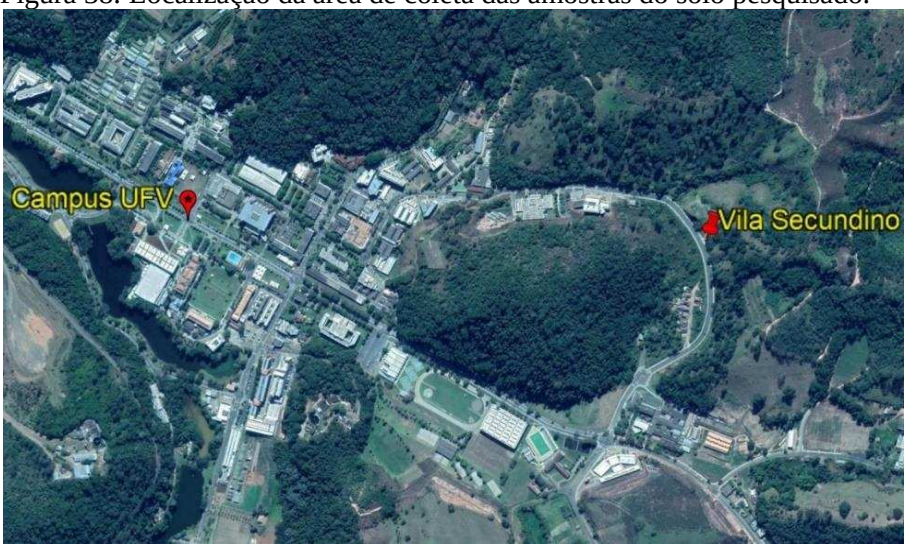
5.3.1. Materiais

5.3.1.1. Solo

Trabalhou-se, nessa pesquisa, com um solo de textura predominantemente arenosa, com horizonte C profundo, saprolítico, de coloração acinzentada, oriundo de um perfil de intemperismo desenvolvido de gnaisse, basicamente quartzoso. Este solo é classificado como arenoso não laterítico (NA') pela metodologia MCT, segundo Trindade (2006).

As amostras utilizadas foram coletadas em um talude situado próximo à Vila Secundino, entre o Departamento de Medicina e Enfermagem e o Departamento de Zootecnia, no *campus* da Universidade Federal de Viçosa, no município de Viçosa-MG (Figura 38).

Figura 38: Localização da área de coleta das amostras do solo pesquisado.



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2018).

5.3.1.2. Fibras

As fibras utilizadas no desenvolvimento deste estudo (Figura 39) foram de Polietileno Tereftalato (PET), geradas a partir de garrafas de refrigerante, obtidas com larguras de 2 mm, utilizando-se, para isso, um filetador de garrafas PET, e comprimento de 1 cm, sendo as mesmas adicionadas ao solo no teor de 1,00% em relação ao peso seco da mistura solo-fibra.

Figura 39: Fibras de garrafa PET utilizadas no programa experimental da pesquisa.

Fonte: Elaborada pela autora.

5.3.1.3. Cimento

O cimento *Portland* utilizado foi do tipo CP II E 32, nos teores de 3% e 5% em relação à massa seca do solo. O mesmo foi escolhido para este trabalho por conferir

à mistura uma maior rigidez, condição apropriada para a investigação do efeito da inclusão das fibras.

5.3.1.4. Aditivos

Foram utilizados nesta pesquisa, sempre em conjunto, dois aditivos (Figura 40), sendo o primeiro um aditivo melhorador de impermeabilização (aditivo 1), utilizado na proporção de 0,25 kg/m³ de solo seco, e o segundo um aditivo melhorador de aderência (aditivo 2), acrescido na proporção de 0,60 kg/m³ de solo seco.

Figura 40: Aditivos utilizados na pesquisa: a) aditivo 1; b) aditivo 2.

a) b)

Fonte: Elaborada pela autora.

O aditivo 1 é um material melhorador de impermeabilização, composto 100% por organosilanos, capaz de reagir com solos a nível molecular, formando, segundo Calderón (2015), ligações Si-O-Si com as moléculas da superfície, aportando uma eficácia prolongada no comportamento hidrófobo da mistura com o tempo, impedindo o ingresso de água. Além disso, Gayathri et al. (2016) afirmam que este aditivo é também relatado por aumentar o valor de atrito do solo e diminuir a sua permeabilidade.

Já o aditivo 2 é uma emulsão de copolímero acrílico submicrônico, conhecido por melhorar a aderência das partículas de solos, sendo utilizado para colagem das frações destes. Para TECMAT (2018), os solos tratados com este aditivo adquirem melhores características de coesão das suas partículas, melhorando a sua estabilidade. Além disso, ao aumentar a coesão das frações finas superficiais, estas passam a pesar

mais, o que contribui para evitar os problemas derivados da geração de pó em estradas. As principais características de cada aditivo estão descritas na Tabela 14.

Tabela 14: Propriedades dos aditivos utilizados.

Aditivo 1		**Aditivo 2**	
Aparência	Líquido amarelo pálido	Aparência	Leite Branco
Teor de sólidos	68 + 2%	Odor	não
Viscosidade a 25°C	20 - 100 cps	Perigo de explosão	não
Densidade	1,01 g/ml	Temperatura de ignição	200°C
Solubilidade	Forma solução clara	Solubilidade	Dispersível
Ponto de fulgor	12°C	Ponto de fulgor	100°C

Adaptado de: (ROHIT et al., 2018).

5.3.2. Métodos

5.3.2.1. Coleta e Preparação do Solo

Após a coleta de amostras deformadas representativas do solo em questão, as mesmas foram ensacadas, identificadas, transportadas e posteriormente armazenadas no Laboratório de Mecânica dos Solos do Instituto Militar de Engenharia (IME), no Rio de Janeiro. As amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas na peneira de abertura nominal de 2 mm e guardadas para uso nos procedimentos experimentais descritos a seguir, em obediência à NBR 6457 (ABNT, 2016a).

5.3.2.2. Ensaios de Caracterização Geotécnica

Para a caracterização tradicional das amostras de solo, foram realizados os seguintes ensaios geotécnicos: granulometria conjunta (ABNT, 2016b), limites de *Atterberg* (ABNT, 2016c; ABNT, 2016d) e peso específico dos grãos sólidos do solo (ABNT, 1984).

5.3.2.3. Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 2016e), tanto para amostras de solo no estado natural quanto para todas as amostras de solo com cimento, fibras e aditivos, na energia do Proctor Normal, sem reuso de material, utilizando cilindro grande (cilindro CBR).

5.3.2.4. Preparação dos Corpos de Prova para o Ensaio de Cisalhamento Direto

A preparação dos corpos de prova em laboratório para o ensaio de cisalhamento direto foi realizada em três fases (mistura, moldagem e cura de sete dias), nos casos de misturas com cimento, e em duas fases (mistura e moldagem), nos casos de misturas sem cimento. Já no caso das misturas com cimento e aditivos, foram realizadas cinco fases, a saber:

- Primeira fase: executou-se a mistura do aditivo 1, água e solo. O primeiro passo para a realização desta etapa foi o acréscimo do aditivo 1 à quantidade necessária de água para se obter a umidade ótima do solo (Figura 41a). Em seguida, foram adicionados 66% desta solução ao solo seco, realizando a homogeneização da mistura, seguindo com o acréscimo do resto da solução e nova homogeneização (Figura 41b), gerando a mistura 1 (Figura 41c).

Figura 41: Primeira fase da preparação dos corpos de prova em misturas com cimento e aditivos: a) Solução de aditivo 1 e água; b) Homogeneização do solo com a solução de aditivo 1 e água; c) Mistura após homogeneização.

a) b) c)

Fonte: Elaborada pela autora.

- Segunda fase: realizou-se a secagem da mistura 1 à temperatura ambiente, até se obter um teor de umidade inferior a 4%.

- Terceira fase: realizou-se a mistura do aditivo 2, água e mistura 1. O primeiro passo para a realização desta etapa foi o acréscimo do aditivo 2 à quantidade necessária de água para se obter a umidade ótima do solo. Em seguida, adicionou-se cimento ao solo tratado com o aditivo 1 (Figura 42a) e acrescentou-se a esta mistura a solução com aditivo 2, realizando a homogeneização da mesma (Figura 42c). Quando em compósitos com fibras, estas foram adicionadas após esta etapa, sendo realizada uma nova homogeneização.

Figura 42: Terceira fase da preparação dos corpos de prova em misturas com cimento e aditivos: a) Adição de cimento à mistura 1; b) Acréscimo da solução de aditivo 2 e água à mistura 1 com cimento.

a) b)

Fonte: Elaborada pela autora.

- Na quarta fase realizou-se a moldagem dos corpos de prova e na quinta, a cura de sete dias dos mesmos.

A moldagem dos corpos de prova (Figura 43) foi feita diretamente em anel cilíndrico, com raio de 10,15 cm e altura de 2,00 cm, na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo obtidos na energia do Proctor Normal. A compactação das misturas foi do tipo estática, sendo os corpos de prova moldados em três camadas de mesma altura e transferidos para a caixa de cisalhamento,

posteriormente à cura. Esta foi feita durante um período de sete dias, com os corpos de prova enrolados em um plástico, para evitar a perda de umidade (Figura 43c).

Figura 43: Etapas de moldagem dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento direto: a) moldagem estática do corpo de prova; b) corpo de prova moldado no anel; c) cura dos corpos de prova; d) corpo de prova transferido à caixa de cisalhamento pós cura de 7 dias.

a)

b)

c)

d)

Fonte: Elaborada pela autora.

5.3.2.5. Ensaio de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto sobre os materiais investigados foram realizados tendo como base a norma ASTM D-3080 (ASTM, 2004). Antes da etapa de cisalhamento do ensaio, cada corpo de prova foi submerso em água, visando sua inundação, seguido de seu adensamento sob a tensão normal prevista para o ensaio. Foram adotadas as tensões normais de 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa, e a velocidade de deslocamento horizontal, na etapa de ruptura, foi de 1,2 mm/minuto.

Foram ensaiados, para cada nível de tensão, dois corpos de prova para o solo puro e para cada compósito estudado, sendo em seguida determinada a média dos resultados de tensão cisalhante de pico e a variação volumétrica de pico. Após a obtenção destes resultados, foram determinadas as envoltórias de resistência de pico para cada material, obtendo-se, a partir das mesmas, os respectivos parâmetros de resistência (intercepto de coesão e ângulo de atrito interno) do solo e dos compósitos estudados. A Figura 44 apresenta o equipamento utilizado no ensaio e um corpo de prova após o cisalhamento.

Figura 44:Ensaio de cisalhamento direto: a) equipamento utilizado; b) corpo de prova após ensaio.

a) b)

Fonte: Elaborada pela autora.

5.4. Resultados e Discussões

5.4.1. Considerações iniciais

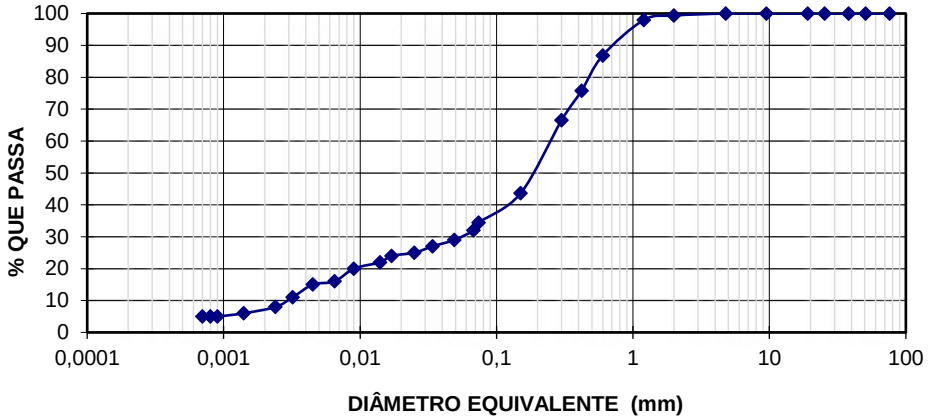
Na Tabela 15, encontram-se os resultados da análise granulométrica, dos ensaios de limites de consistência, bem como o peso específico dos grãos sólidos do solo estudado. Na Figura 45, é apresentada a curva granulométrica do solo.

Tabela 15: Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do solo estudado.

Análise Granulométrica (%)					Limites de Consistência (%)			Peso Específico dos Grãos sólidos (kN/m³)
Areia[1]			Silte[1]	Argila[1]	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)	
Grossa[1]	Média[1]	Fina[1]						
13	41	15	24	07	28	18	10	26,29

[1] Classificação segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995).

Figura 45: Curva Granulométrica do Solo estudado.



Fonte: Elaborada pela autora.

Segundo os sistemas de classificação geotécnica TRB (*Transportation Research Board)* e USCS (*Unified Soil Classification System*), o solo estudado é classificado conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16: Classificação geotécnica do solo segundo os sistemas tradicionais TRB e USCS.

Classificação TRB	Classificação USCS
A-2-4 (0)	SC (areias argilosas)

Fonte: Elaborada pela autora.

5.4.2. Ensaio de Compactação

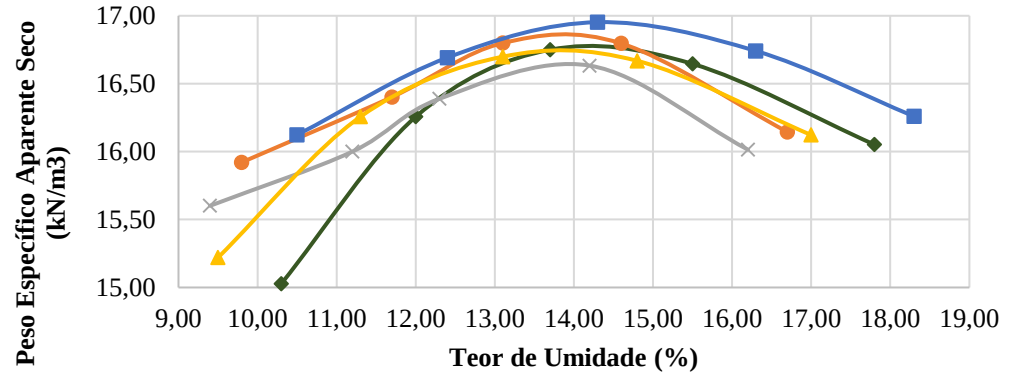
Os resultados obtidos nos ensaios de compactação Proctor Normal do solo puro e das misturas solo-cimento, solo-cimento-aditivos, solo-cimento-fibras e solo-cimento-aditivos-fibras são apresentados na Figura 46.

Através dos resultados e análises das respectivas curvas de compactação, verifica-se que a inclusão das fibras gera uma diminuição no peso específico aparente

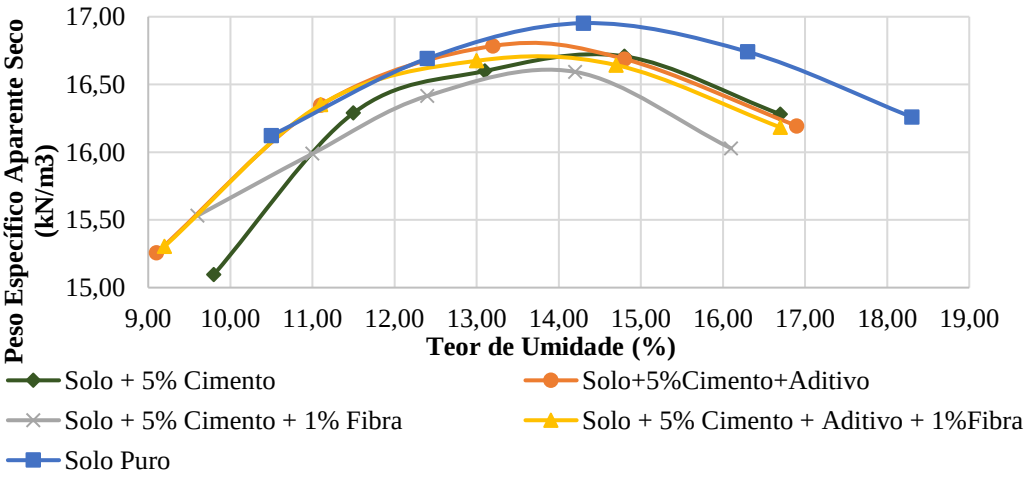
seco máximo da mistura em relação ao solo puro, ao solo-cimento e ao solo-cimento-aditivos.

Este resultado pode ser justificado em razão da ocupação, pelas fibras, dos vazios que seriam preenchidos pelos grãos dos compósitos na compactação, sendo aquelas mais leves (menos densas) que as partículas destes. Como o peso específico aparente seco máximo sofre influência do peso de todos os componentes do compósito, o fato das fibras serem mais leves que os grãos dos materiais presentes na mistura, leva à redução deste parâmetro, acarretando assim a redução da densidade das misturas com fibras em relação àquelas sem fibras.

Figura 46: Resultados obtidos nos ensaios de compactação Proctor Normal dos solos: a) Curva de compactação do Solo puro e misturas com 3% de cimento; b) Curva de compactação do Solo puro e misturas com 5% de cimento.



a)



b)

Fonte: Elaborada pela autora.

É possível também inferir que as fibras formam um obstáculo físico ao rearranjo dos grãos sólidos sob a ação do esforço de compactação, impedindo que estas se concentrem em volumes menores da estrutura interna do compósito e, consequentemente, restringindo a possibilidade de incremento da massa de grãos sólidos por volume unitário do sistema. Ao se apoiarem nos grãos sólidos dos compósitos, tais fibras também são capazes de absorver parte da energia de compactação que deveria ser transmitida a estes, reduzindo a eficiência da compactação da fase sólida dos sistemas solo-fibras, solo-cimento-fibras e solo-cimento-aditivos-fibras.

No que corresponde à umidade de compactação, não foi possível estabelecer uma relação direta entre a adição de fibras e o valor da umidade ótima.

Ao verificar o efeito gerado pela inclusão dos aditivos às misturas solo-cimento-fibras, observa-se um incremento nos valores de peso específico aparente seco máximo e uma redução na umidade ótima em comparação aos compósitos sem aditivos. Esta redução pode ser justificada pela ação do aditivo 1, que acresce uma característica hidrofóbica às misturas, o que pode ocasionar a diminuição da quantidade necessária de água para que o compósito obtenha o seu comportamento ótimo, reduzindo assim a sua umidade ótima em comparação às misturas sem os aditivos.

Já o incremento nos valores de peso específico aparente seco máximo pode ser explicado pela ação do aditivo 2, que atua, segundo Rohit et al. (2018), realizando a colagem das partículas de solo, o que acarreta a redução dos vazios existentes entre os grãos presentes na mistura e, consequentemente, gera um acréscimo nos valores de densidade específica seca máxima, em comparação aos compósitos sem a presença dos aditivos.

5.4.3. Ensaio de Cisalhamento Direto

Nas Tabela 17 e Tabela 18, são apresentados os resultados de tensão cisalhante de pico e dos parâmetros de resistência obtidos para o solo puro e todas as suas misturas com cimento, aditivos e fibras, enquanto as suas envoltórias de resistência são exibidas na Figura 47.

Tabela 17: Resultados de tensão cisalhante de pico obtidos dos ensaios de cisalhamento direto para o solo puro e suas misturas com cimento, aditivos e fibras PET

Mistura	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante de Pico (kPa)			Variação Volumétrica de Pico (%)		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Média	Ensaio 1	Ensaio 2	Média
Solo Puro	100	84	89	86	-0,08	-0,06	-0,07
	200	132	127	130	-0,19	-0,19	-0,19
	300	229	233	231	-0,41	-0,32	-0,37
Solo + 3 % Cimento	100	147	131	139	0,01	0,08	0,05
	200	238	246	242	-0,02	-0,03	-0,03
	300	327	315	321	-0,17	-0,21	-0,19
Solo + 3% cimento + fibra	100	152	149	151	-0,02	-0,03	-0,03
	200	258	255	256	-0,17	-0,14	-0,16
	300	340	335	338	-0,17	-0,25	-0,21
Solo + 3% cimento + aditivos	100	148	143	145	0,1	0,05	0,08
	200	230	255	243	-0,03	-0,05	-0,04
	300	317	346	331	-0,09	-0,09	-0,09
Solo + 3% cimento + aditivos + fibra	100	168	155	161	0,02	0,11	0,07
	200	258	253	255	-0,09	-0,01	-0,05
	300	361	355	358	-0,22	-0,15	-0,19
Solo + 5% cimento	100	160	159	160	0,16	0,16	0,16
	200	269	273	271	0,04	-0,01	0,02
	300	357	353	355	-0,08	-0,07	-0,08
Solo + 5% cimento + fibra	100	180	178	179	0,08	0,05	0,07
	200	323	333	328	-0,09	-0,04	-0,07
	300	410	413	412	-0,08	-0,13	-0,11
Solo + 5% cimento + aditivos	100	179	175	177	0,11	0,10	0,11
	200	234	275	254	-0,05	-0,05	-0,05
	300	379	384	382	-0,08	-0,13	-0,11
Solo + 5% cimento + aditivos + fibra	100	188	188	188	0,11	0,07	0,09
	200	312	281	296	-0,08	-0,02	-0,05
	300	417	407	412	-0,11	-0,14	-0,13

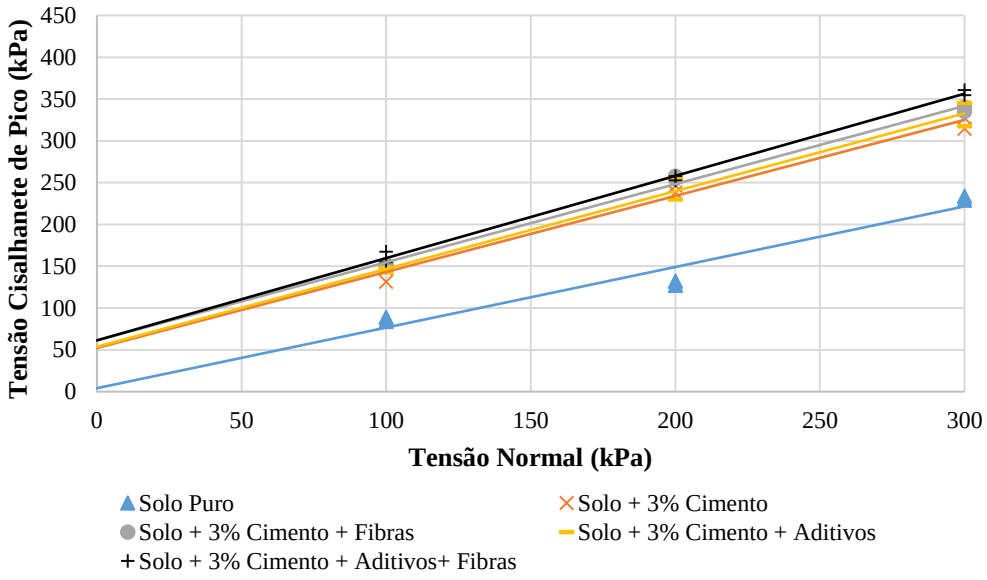
Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 18: Parâmetros de resistência de pico obtidos nos ensaios de cisalhamento direto do solo puro e suas misturas com cimento, aditivos e fibras PET.

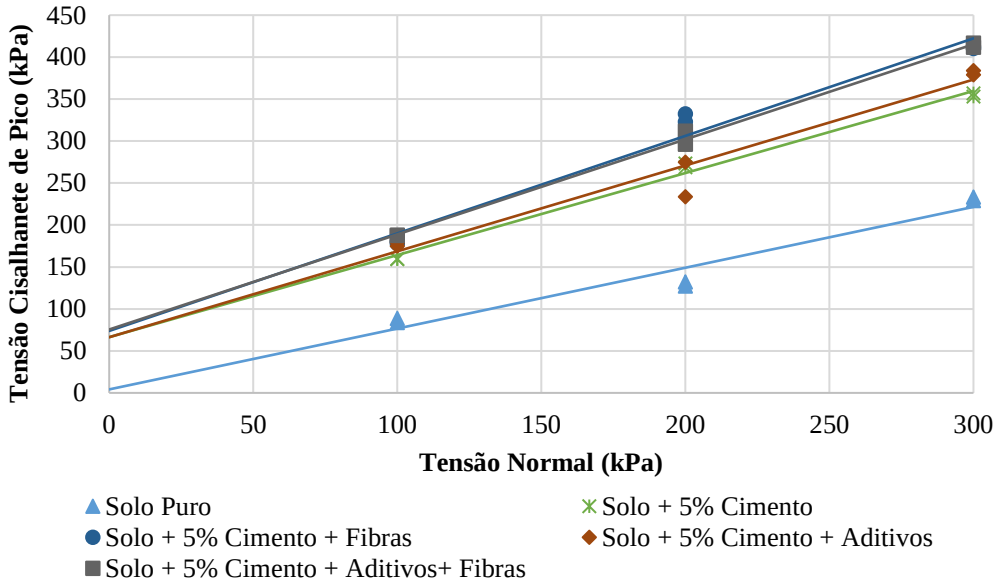
Misturas	Envoltória Média		
	Intercepto de Coesão c (KPa)	Ângulo de atrito interno ϕ (°)	R^2
Solo Puro	4	36	0,9137
Solo + 3 % Cimento	52	42	0,9869
Solo + 3% Cimento+ Fibras	61	43	0,9939
Solo + 3% Cimento + Aditivos	54	44	0,9788
Solo + 3% Cimento + Aditivos+ Fibras	61	45	0,9964
Solo + 5% Cimento	66	44	0,9931
Solo + 5% Cimento+ Fibras	74	49	0,9737
Solo + 5% Cimento + Aditivos	66	46	0,9608
Solo + 5% Cimento + Aditivos+ Fibras	75	48	0,9892

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 47: Envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico do solo puro e suas misturas com cimento, aditivos e fibras PET: a) Misturas com 3% de cimento; b) Misturas com 5% de cimento.



a)



b)

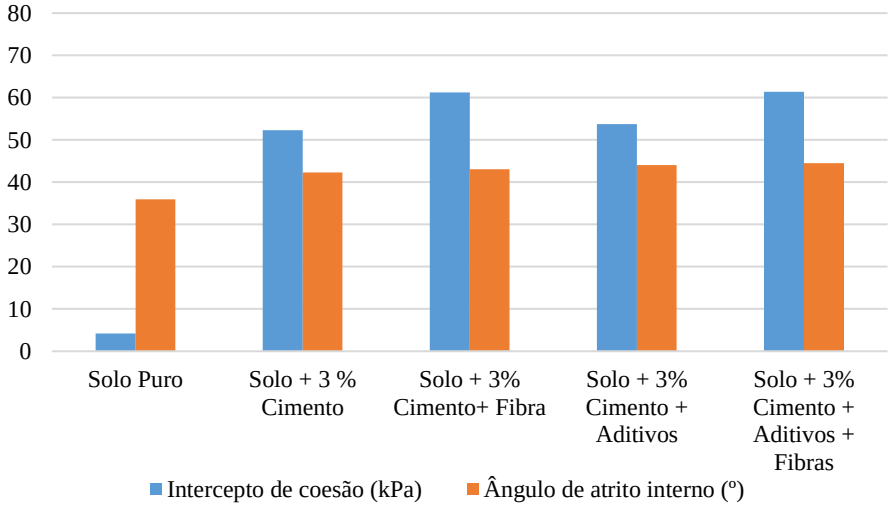
Fonte: Elaborada pela autora.

Ao analisar os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos, observa-se que os valores de intercepto de coesão e de ângulo de atrito de todos os compósitos estudados são maiores que os obtidos para o solo puro.

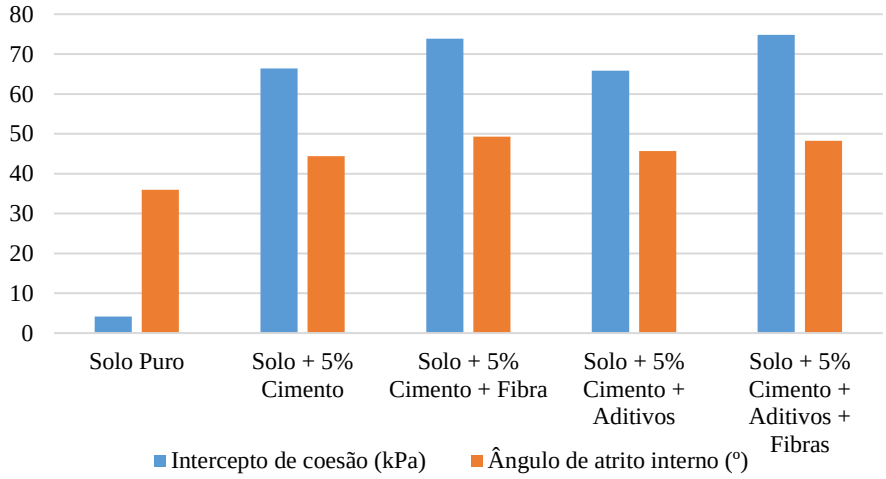
Com relação ao efeito da adição de fibras ao solo cimento e ao solo cimento aditivo, verifica-se que há incremento da resistência ao cisalhamento de

pico, tanto com relação à parcela correspondente à coesão, quanto àquela correspondente ao atrito interno do material, em comparação aos compósitos sem fibras (Figura 48). Ademais, para as misturas estudadas, este incremento foi mais perceptível nos valores de intercepto de coesão do que nos valores de ângulo de atrito interno. Isso se deve ao fato das fibras atuarem, principalmente, gerando ancoragem às partículas de solo, o que afeta majoritariamente o parâmetro de intercepto de coesão, principalmente em solos granulares.

Figura 48: Análise do efeito da adição de fibras e aditivos ao solo melhorado com cimento: a) solo com 3% de cimento; b) solo com 5% de cimento.



a)



b)

Fonte: Elaborada pela autora.

Neste sentido, Darvishi e Erken (2018) afirmam que as fibras discretas distribuídas aleatoriamente podem atuar como uma estrutura tridimensional para intertravar as partículas do solo, formando com os grãos uma matriz unitária coerente que ajuda a restringir o deslocamento. Ademais, as partículas duras do solo (como as areias) contribuem impactando e desgastando a superfície da fibra, gerando sulcos que podem constituir um intertravamento e melhorar a interação entre a matriz do solo-cimento e a superfície da fibra, melhorando a resistência ao cisalhamento da mistura com relação ao parâmetro de intercepto de coesão.

Em conjunto, as partículas do cimento agem unindo os grãos do solo, gerando cristais oriundos das reações de hidratação, que atuam cobrindo a superfície da fibra, o que melhora as características da ligação na interface solo/fibra, aumentando a força de intertravamento e o coeficiente de atrito, restringindo o rearranjo das mesmas na interface de cisalhamento. Segundo Tang et al. (2010), uma menor probabilidade de reorganizar-se e/ou uma boa interligação das partículas do solo são fatores importantes para se obter maiores valores nos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Com relação ao aumento do ângulo de atrito interno, Tang et al. (2007) afirma que, ao contrário das partículas do solo, os cristais hidratados de cimento são mais duros do que o material fibroso, o que facilita a sua penetração no corpo fibroso e, provavelmente, gera um efeito de desgaste interfacial durante o processo de cisalhamento, o que resulta em uma maior força de atrito de interface em comparação à que ocorre com a adição da fibra em solo puro.

Além disso, para as misturas do solo com cimento e fibras, nas duas porcentagens de cimento estudadas, verificou-se que o acréscimo dos aditivos gerou pouca ou nenhuma variação nos resultados obtidos com relação à resistência ao cisalhamento, o que demonstrou pouca eficiência dos mesmos no processo de estabilização dos solos, no que diz respeito a estes parâmetros. Sendo assim, é possível afirmar que as melhorias obtidas nos compósitos com fibras e aditivos foram acarretadas apenas pela adição das fibras, não tendo os aditivos efeito significativo nos parâmetros de cisalhamento dos compósitos analisados.

Com relação às variações volumétricas de pico obtidas no ensaio de cisalhamento (Figura 49), verifica-se que para o solo puro houve variação

volumétrica de compressão nas três tensões aplicadas, indicando uma redução na altura dos corpos de prova, o que é típico de areias menos rígidas e fofas.

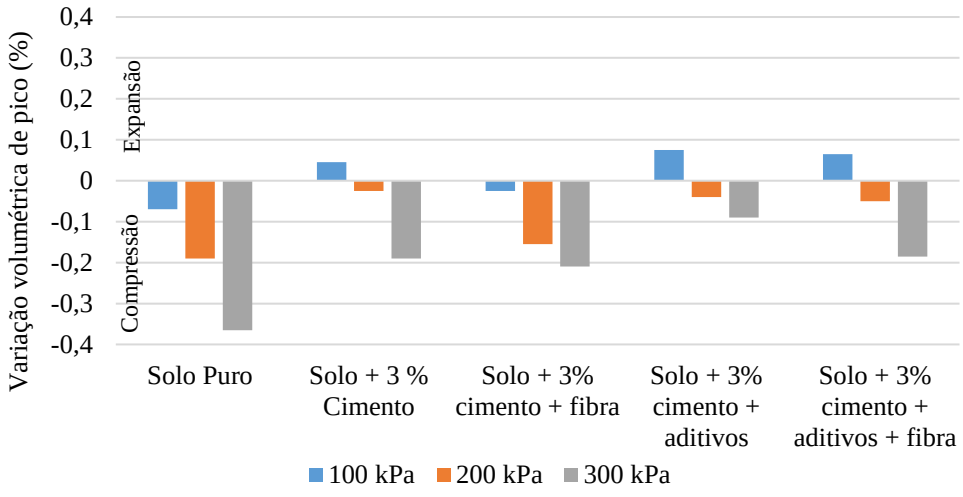
Já com acréscimo de cimento no teor de 3% em relação ao peso seco do solo, observou-se uma variação volumétrica de pico expansiva para a tensão de 100kPa e uma variação volumétrica de compressão para as demais tensões, enquanto para o acréscimo de cimento no teor de 5%, a variação de compressão foi verificada apenas para a tensão normal de 300kPa. Também é possível observar que as variações volumétricas de pico de compressão obtidas para os dois teores de cimento estudados foram menores do que a apresentada pelo solo puro, o que significa uma menor redução do volume do corpo de prova durante o ensaio de cisalhamento, em comparação ao solo puro e indica um ganho de rigidez gerado pelo acréscimo de cimento ao solo.

Ao analisar o acréscimo de aditivo nas misturas de solo-cimento, verifica-se que para o teor de 3% de cimento em relação ao peso seco do solo, houve a obtenção de maiores valores de variação volumétrica de pico expansiva para a tensão de 100kPa e menores valores de variação volumétrica de pico de compressão para as tensões de 200kPa e 300kPa, em comparação com a mistura sem os aditivos. Já para o teor de 5% de cimento em relação ao peso seco do solo, verificou-se maiores valores de variação volumétrica de pico expansiva para a tensão de 100kPa em comparação com solo-cimento sem aditivos e pouco ou nenhum efeito para as tensões de 200kPa e 300kPa. Isso indica que o acréscimo dos aditivos gerou um ganho de rigidez nas misturas com cimento, sendo este ganho menos expressivo para o teor de 5% de cimento em relação ao peso seco do solo.

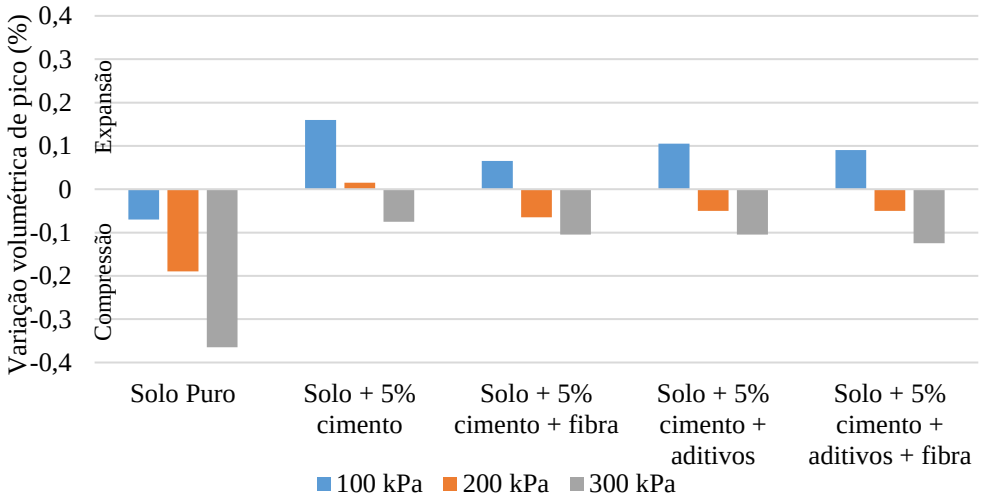
Já ao verificar o efeito do acréscimo de fibras, observou-se uma tendência de obtenção de menores valores de variação volumétrica de pico expansiva para a tensão de 100kPa e de maiores valores de variação volumétrica de pico compressiva para as tensões de 200kPa e 300kPa, em comparação às obtidas para as misturas de solo-cimento e solo-cimento-fibras. Logo, é possível inferir que as fibras tendem a reduzir o efeito da força de expansão contrária à tensão normal gerada nas misturas com cimento e aditivos para tensões mais baixas, ao mesmo tempo que aumenta a deformabilidade na ruptura para tensões normais maiores, em comparação os compósitos sem fibras.

Essas maiores variações volumétricas máximas de pico de compressão para maiores tensões, apresentadas pelos materiais reforçados com fibras em relação às misturas sem fibras, representam uma perda gradual da rigidez dos compósitos e podem representar uma vantagem geotécnica adquirida por estes, uma vez que uma maior deformabilidade tende a reduzir o risco de formação de trincas em determinadas soluções geotécnicas e a ocorrência de rupturas bruscas, característica de materiais mais rígidos.

Figura 49: Variações volumétricas de pico apresentadas nas curvas Variação volumétrica x Deslocamento horizontal nos ensaios de cisalhamento direto: a) solo com 3% de cimento; b) solo com 5% de cimento.



a)



b)

Fonte: Elaborada pela autora.

5.5. Conclusões

A partir dos resultados apresentados nessa pesquisa, foi possível verificar os efeitos, na compactabilidade e na resistência ao cisalhamento, ocasionados pela adição de fibras de polietileno tereftalato (PET), com largura de 2 mm e comprimento de 1 cm, em misturas de solo-cimento. Foi possível avaliar também a ação de um conjunto de dois tipos de aditivos, sendo um melhorador de impermeabilização e outro melhorador de aderência, na mistura solo-cimento-fibras PET, em um solo residual tropical de textura areno-silto-argilosa, típico da região de Viçosa-MG.

Com relação à compactabilidade, foi possível verificar que a inclusão das fibras gera uma diminuição no peso específico aparente seco máximo da mistura relativamente ao solo puro, ao solo-cimento e ao solo-cimento-aditivos. Já a inclusão dos aditivos às misturas solo-cimento-fibras acarretou um incremento nos valores de densidade específica seca máxima e uma redução na umidade ótima em comparação aos compósitos sem aditivos, porém ainda mantendo valores menores que o obtido para o solo puro compactado.

Em relação à resistência ao cisalhamento direto, observou-se que os valores de intercepto de coesão e de ângulo de atrito de todos os compósitos estudados são maiores que os obtidos para o solo puro. Além disso, obtiveram-se melhorias nos parâmetros de resistência ao cisalhamento com a adição de fibras ao solo-cimento e ao solo-cimento-aditivos, em comparação aos compósitos sem fibras, o que demonstra a potencialidade de aplicação destes compósitos em obras geotécnicas. Em conjunto, observou-se pouca ou nenhuma eficiência do acréscimo dos aditivos no processo de estabilização dos solos em todas as misturas estudadas, com relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Com relação às variações volumétricas de pico obtidas para as misturas estudadas, verificou-se que a adição de fibras aos compósitos solo-cimento e solo-cimento-aditivos tendeu a reduzir, para tensões mais baixas, o efeito da força de expansão gerada nestes compósitos contrária à tensão normal, ao mesmo tempo que apresentou maior deformabilidade nas tensões normais mais elevadas, o que indica uma perda de rigidez dos compósitos com o acréscimo de fibras.

Comparando as tendências observadas nos ensaios de compactação com aquelas obtidas no ensaio de cisalhamento direto, verificou-se que, mesmo havendo uma redução na densidade aparente seca máxima nas misturas solo-cimento-fibras e solo-cimento-aditivo-fibras comparativamente ao solo puro compactado, isso não implicou em restrições à trabalhabilidade e não houve uma redução nas propriedades de engenharia dessas misturas, retratadas pelos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Este fato permite concluir que, para tais sistemas e para as particularidades da pesquisa, a densificação expressa pela curva de compactação e pelos parâmetros de ótimo não é a propriedade física mais recomendada para estimar prováveis melhorias nos índices resultantes dessa modalidade particular de ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3080**: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. Philadelphia, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016e.

AZEVEDO, M. B.; FETUSGATO, L. Estabilização de um solo residual de arenito botucatu com cimento e fibra: obtenção de parâmetros preliminares de projeto de maneira simplificada. In: IX SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTECNIA DO RIO GRANDE DO SUL, 2017, Caxias do Sul. In: **Anais GEORS 2017**, 2017, Caxias do Sul.

CALDERÓN, M. A. C. **Estabilización iónica de suelos con terrasil en los contratos de mantenimiento y conservación vial**. Trabajo fin de grado (Grado en Ingeniería Civil), Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, 2015.

CAPRONI JUNIOR, N.; PALOCCI, A.; BUENO, B. S. Estudo de solo-cimento reforçado com fibras de polipropileno. In: 1º Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos, 1999, Rio de Janeiro. In: **Anais 1º Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos**, p. 183-188, Rio de Janeiro, 1999.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; ULBRICH, L. A. Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,** v. 124 (12), p.1211-1214, 1998.

CONSOLI, N. C.; VENDRUSCOLO, M. A.; FONINI, A; ROSA, F. D. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. **Geotextiles and Geomembranes**, v.27, P. 196 – 203, 2009.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil -Estruturas, Geotecnia e Fundações), Universidade do Minho, Guimarães, 2001.

DARVISHI, A.; ERKEN, A. Effect of polypropylene fiber on shear strength parameters of sand. In: 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL RESEARCH AND ENGINEERING, 2018, Hungary. In: **Proceedings of the 3rd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'18),** 2018, Hungary.

FERNANDES, M. G. M. **Análise do comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. Projeto Fim de Curso (Graduação em Engenharia de Fortificação e Construção), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GAYATHRI, M.; SINGH, P. N.; PRASHANTH, M. G. Soil stabilization using terrasil, cement and flyash. **i-Manager's Journal on Civil Engineering**, v. 6, ed. 4, p. 31-36, 2016.

GOOGLE. **Google Earth website**. Disponivel em: <http://earth.google.com/>.Acesso em: 05 de Outubro de 2018.

HAMIDI, A.; HOORESFAND, M. Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 36, p. 1-9, 2013.

MACHADO, C. C.; LIMA, D. C.; ALMEIDA, R. M. Estudo do comportamento da mistura solo-cimento reforçado com fibra sintética para uso em estradas florestais. **CERNE**, v. 4, p. 123-128, 1998.

MARRI, A.; UDDIN, S.; WANATOWSKIC, D. Sample preparation technique for fiber reinforced cemented soils. **Procedia Engineering,** v. 77, p. 140-147, 2014.

MONTARDO, J. P.; VENDRUSCOLO, M. A.; CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M. Características de resistências e deformação de um solo cimentado reforçado com fibras PET: Estudo Preliminar. In:**Anais Associação Brasileira de Mecânica do Solos e Engenharia Geotécnica**, p. 1163-1167, 1998.

NGUYEN, L.; FATAHI, B.; KHABBAZ, H. Predicting the behaviour of fibre reinforced cement treated clay. **Procedia Engineering**, v. 143, p. 153-169, 2016.

OLIVEIRA, T. M. **Caracterização de misturas de rejeitos de minério de ferro melhoradas com adição de cimento com vistas à aplicação em estradas e aterros.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2013.

PORTELINHA, F. H. M. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2008.

ROHIT, M. S. R.; KUMAR, R. S.; PAUL, W.; SWAMY, N. K. A Study on the effect of stabilizers (zycobond&terrasil) on strength of subgrade on bc soil. **Indian Journal of Scientific Research.** V. 17(2), p. 86 – 92, 2018.

SILVA, C. C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânico**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2007.

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2000.

SHARMA, V. **Stabilization of black cotton soil using terrasil**. Dissertation (Master of Technology in Civil Engineering), National Institute of Technology Kurukshetra, Kurukshetra. 2016.

TANG, C. S.; SHI, B.; GAO, W.; CHEN, F.; CAI, W. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 25, p. 194 - 202, 2007.

TANG, C. S.; SHI, B.; ZHAO, L. Z. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, p. 54-62, 2010.

TECMAT. **Tecnología y materiales especiales para la construcción vial y civil**. Disponivel em: < https://www.tecmat.com.uy/estabilizantes-para-suelos/>. Acesso em: 23 de Outubro de 2018.

TRAN, K. Q.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 204 – 210, 2018.

TRINDADE, T. P. **Caracterização tecnológica de três solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em geotecnia rodoviária e ambiental.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2006.

UDDIN, S.; MARRI, A.; WANATOWSKI, D.; REDDISH, D. J. Behaviour of cemented sand reinforced with polypropylene fibres. In: 14TH ASIAN REGIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 2011, Hong Kong. In: **Proceedings Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering,** 2011, Hong Kong.

6. CONCLUSÕES GERAIS

O objetivo principal desta pesquisa foi estudar o comportamento mecânico de solos residuais tropicais reforçados com fibras de polietileno tereftalato (PET) de distribuição aleatória, utilizando para isso dois solos com características granulométricas diferentes, amostrados na região de Viçosa - MG.

Este estudo teve como base a caracterização geotécnica dos solos puros, complementada com o auxílio de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) e Fluorescência de Raios-X (XRF), e a realização de ensaios de compactação, CBR e cisalhamento direto, envolvendo os solos mencionados e suas misturas com fibras PET nas diferentes quantidades, rugosidades e larguras. Por fim, foi feita uma análise do comportamento geotécnico de solo-cimento reforçado com fibras PET e melhorado com acréscimo de dois aditivos, um melhorador de impermeabilização e outro de aderência. A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas:

- O solo 1 foi classificado como um silte de alta compressibilidade (MH) pelo USCS e avaliado como uma argila plástica (A-7-5 (20)) pelo TRB, sendo considerado impróprio para uso em camadas de pavimentos por estas classificações tradicionais. Porém, pela classificação MCT, o mesmo foi classificado como LG', tendo o seu uso previsto até em camadas de sub-base de pavimentos.
- O solo 2 foi classificado pelo USCS como uma areia argilosa (SC) e pelo TRB como pertencente ao grupo A-2-4, sendo considerado por ambos um material com possível aplicação em camadas de pavimentos. Porém, pela metodologia MCT, ele foi considerado um NA', que, segundo Nogami e Villibor (1995), são solos que possuem utilização recomendada em camadas de pavimentos rodoviários, mas não em caráter prioritário em frente a outras classes de solos tropicais.
- Para o solo 1, devido ao seu comportamento laterítico definido pelo ensaio MCT e pela presença predominante de Fe, seguido por Al e Si, e pela cimentação observada no MEV, pode-se inferir que o

mesmo é composto pelo argilomineral caulinita recoberto por óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio. Isso confere a sua coloração avermelhada e leva a um bom prognóstico com relação ao seu comportamento de engenharia geotécnica, podendo ser um solo que possui uma tendência de formação de agregações estáveis em presença de água e que, consequentemente, possui uma resistência mecânica pouco sensível às mudanças de umidade no solo.

- O solo 2, por ser desenvolvido de gnaisse basicamente quartzoso e ter apresentado nos ensaios de Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) e Fluorescência de Raios-X (XRF), grande quantidade de Si, é possível que haja a presença de argilominerais do grupo Caulinita. Além disso, também foi possível deduzir a presença de argilominerais do grupo Illita, o que leva a inferir um comportamento, provavelmente, pouco expansivo e com pouca variação de resistência com a alteração de umidade, para este solo.
- Estas características de engenharia, inferidas pelas análises químicas, mineralógicas e microestruturais dos solos estudados favorecem a confirmação da possibilidade de aplicação destes solos em camadas de pavimentos rodoviários e estão de acordo com os resultados obtidos pelo MCT. Esta aplicação em camadas de pavimentos é restrita a obtenção de determinados parâmetros de engenharia, sendo, em certos casos, necessário o uso de técnicas de reforço e/ou melhoramento dos solos, para que estes possam ser obtidos e os solos estudados possam ser utilizados.
- Com base nos resultados dos ensaios de compactação dos compósitos solo-fibras, foi possível verificar, para ambos os solos, a ocorrência de uma redução do peso específico aparente seco das misturas solo-fibras comparativamente aos solos puros, justificada pela menor densidade das fibras, restrição que estas impõem ao

rearranjo dos grãos sólidos dos solos e absorção parcial, por parte destas, da energia de compactação imposta ao sistema solo-fibras;

- Não foi possível, estabelecer uma relação direta entre as características das fibras (textura superficial e largura) e o valor da umidade ótima na compactação, porém constatou-se, experimentalmente, uma tendência de aumento da demanda hídrica do sistema solo-fibras sob a ação do esforço de compactação, a qual se mostrou mais acentuada para o solo arenoso;
- Em relação aos resultados do ensaio CBR, constatou-se um aumento da capacidade de suporte de ambos os solos com a inclusão das fibras e uma diminuição da expansão dos mesmos com relação aos solos puros. Verificou-se também que as misturas de solos com fibras rugosas, comparativamente às misturas com fibras lisas, apresentaram capacidade de suporte menor, ao mesmo tempo em que se expandiram menos;
- Comparando a tendência observada nos ensaios de compactação com as obtidas no ensaio CBR, verificou-se que, mesmo havendo uma perda de densificação das misturas solo-fibras comparativamente aos solos puros compactados, os parâmetros de resistência e de estabilidade volumétrica derivados dos ensaios CBR indicaram uma melhoria na resposta de engenharia para os sistemas reforçados, permitindo concluir que, para tais sistemas e para as particularidades da pesquisa, a densificação traduzida pela curva de compactação e pelos parâmetros de ótimo não é a propriedade física mais indicada para estimar possíveis melhorias nos índices resultantes dessa modalidade particular de ensaio;
- Visando o emprego em camadas de reforço de subleito, para subleitos compostos pelos solos analisados e considerando-se as exigências técnicas contidas em DNIT (2010), verificou-se que todas as misturas solo-fibras ensaiadas possuem possibilidade de emprego neste tipo de camada.

- Ao realizar o ensaio de cisalhamento direto, foi possível verificar, para ambos os solos e para todas as características de fibras estudadas, um aumento na variação volumétrica de compressão das misturas solo-fibras, apresentando uma tendência de redução do volume dos corpos de prova durante o cisalhamento com o acréscimo da porcentagem de fibras no compósito, em todas as tensões normais aplicadas;
- Ao analisar a influência das fibras, independente das características das mesmas, verificou-se que, para ambos os solos, todos os sistemas solo-fibras apresentaram desempenho superior ao do solo puro no que concerne à resistência ao cisalhamento. Também foi possível verificar que a adição das fibras se mostrou mais eficiente para o solo 1, por ser este um material de granulometria mais fina, do que para o solo 2;
- Ao realizar uma comparação entre o efeito de adição de fibras lisas e rugosas aos solos, foi possível verificar que os compósitos com fibras rugosas para o solo 1 foram os que apresentaram melhores desempenhos, enquanto os com fibras lisas foram os que obtiveram melhor comportamento para o solo 2;
- Ao verificar os efeitos, na compactabilidade, da adição de fibras de polietileno tereftalato (PET), com largura de 2 mm e comprimento de 1 cm, ao solo-cimento e do acréscimo de um conjunto de dois tipos de aditivos, sendo um melhorador de impermeabilização e outro melhorador de aderência, na mistura solo-cimento-fibras PET, em um solo residual tropical de textura areno-silto-argilosa, foi possível verificar que a inclusão das fibras gerou uma diminuição no peso específico aparente seco máximo da mistura relativamente ao solo puro, ao solo-cimento e ao solo-cimento-aditivos. Já a inclusão dos aditivos às misturas solo-cimento-fibras acarretou um incremento nos valores de densidade específica seca máxima e uma redução na umidade ótima em comparação aos

compósitos sem aditivos, porém ainda mantendo valores menores que o obtido para o solo puro compactado;

- Em relação à resistência ao cisalhamento direto, observou-se que os valores de coesão e de ângulo de atrito obtidos para todos os compósitos estudados foram maiores que os encontrados para o solo puro. Além disso, obtiveram-se melhorias nos parâmetros de resistência ao cisalhamento com a adição de fibras ao solo-cimento em comparação aos compósitos sem fibras. Em conjunto, observou-se pouca ou nenhuma eficácia do acréscimo dos aditivos no processo de estabilização dos solos, em todas as misturas estudadas, com relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento;
- Com relação às variações volumétricas de pico obtidas para as misturas estudadas, verificou-se que a adição de fibras aos compósitos solo-cimento e solo-cimento-aditivos tendeu a reduzir, para tensões mais baixas, o efeito da força de expansão gerada nestes compósitos contrária à tensão normal, ao mesmo tempo que apresentou maior deformabilidade nas tensões normais mais elevadas, o que indica uma perda de rigidez dos compósitos com o acréscimo de fibras.
- Ao comparar os resultados de compactação com os obtidos no ensaio de cisalhamento direto, verificou-se que, mesmo havendo uma redução na densidade aparente seca máxima nas misturas solo-cimento-fibras e solo-cimento-aditivo-fibras, em comparação ao solo puro compactado, isso não implicou em restrições à trabalhabilidade e não houve uma redução nas propriedades de engenharia dessas misturas, retratadas pelos parâmetros de resistência ao cisalhamento, permitindo concluir que, para tais sistemas e para as particularidades da pesquisa, a densificação expressa pela curva de compactação e pelos parâmetros de ótimo não é a propriedade física mais recomendada para estimar

prováveis melhorias nos índices resultantes dessa modalidade particular de ensaio;

- Com estas constatações, é possível concluir que a adição de fibra tende a fornecer melhorias nas respostas de engenharia para os sistemas reforçados estudados, conforme indicado pelos incrementos nos parâmetros de resistência oriundos dos ensaios de CBR e de cisalhamento direto, podendo a técnica de adição de fibras PET ao solo ser considerada um eficiente método de melhoria dos solos.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugerem-se:

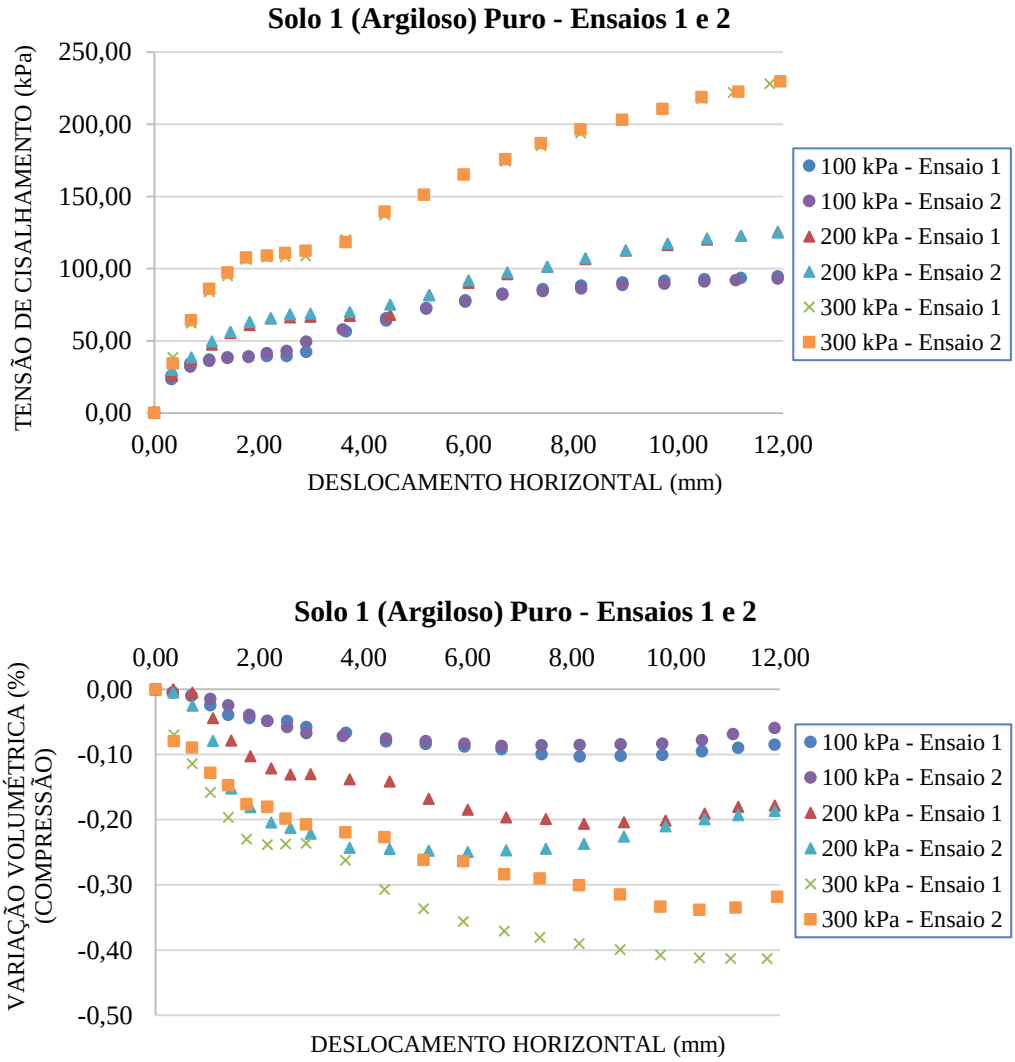
- Realizar ensaios triaxiais estáticos em todas as misturas estudadas e comparar os resultados obtidos com os dos ensaios de cisalhamento direto obtidos nesta pesquisa;
- Realizar ensaios triaxiais de cargas repetidas em todas as misturas estudadas, avaliando a influência das fibras e dos aditivos nos parâmetros de Módulo de Resiliência e de deformação permanente dos materiais estudados;
- Realizar um estudo do comportamento geotécnico de solo-cimento reforçado com fibras de garrafa PET e melhorado com aditivos, através da realização de ensaios CBR, avaliando a influência dos aditivos e das fibras nos parâmetros de capacidade de suporte e expansão dos compósitos estudados.

APÊNDICE

Capítulo 4

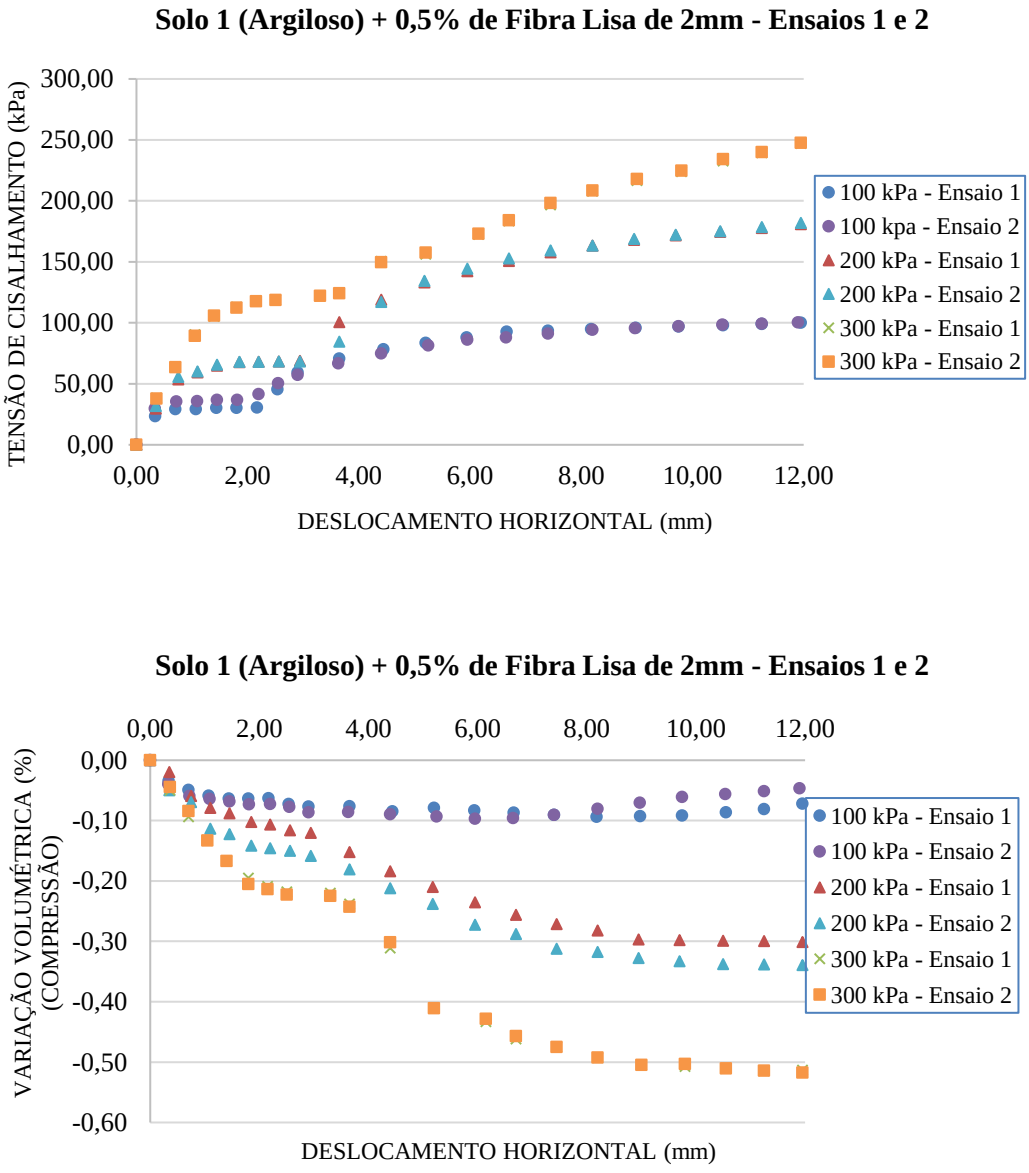
Solo 1: Argiloso

Figura 1: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 1 (Argiloso) Puro: ensaios 1 e 2.



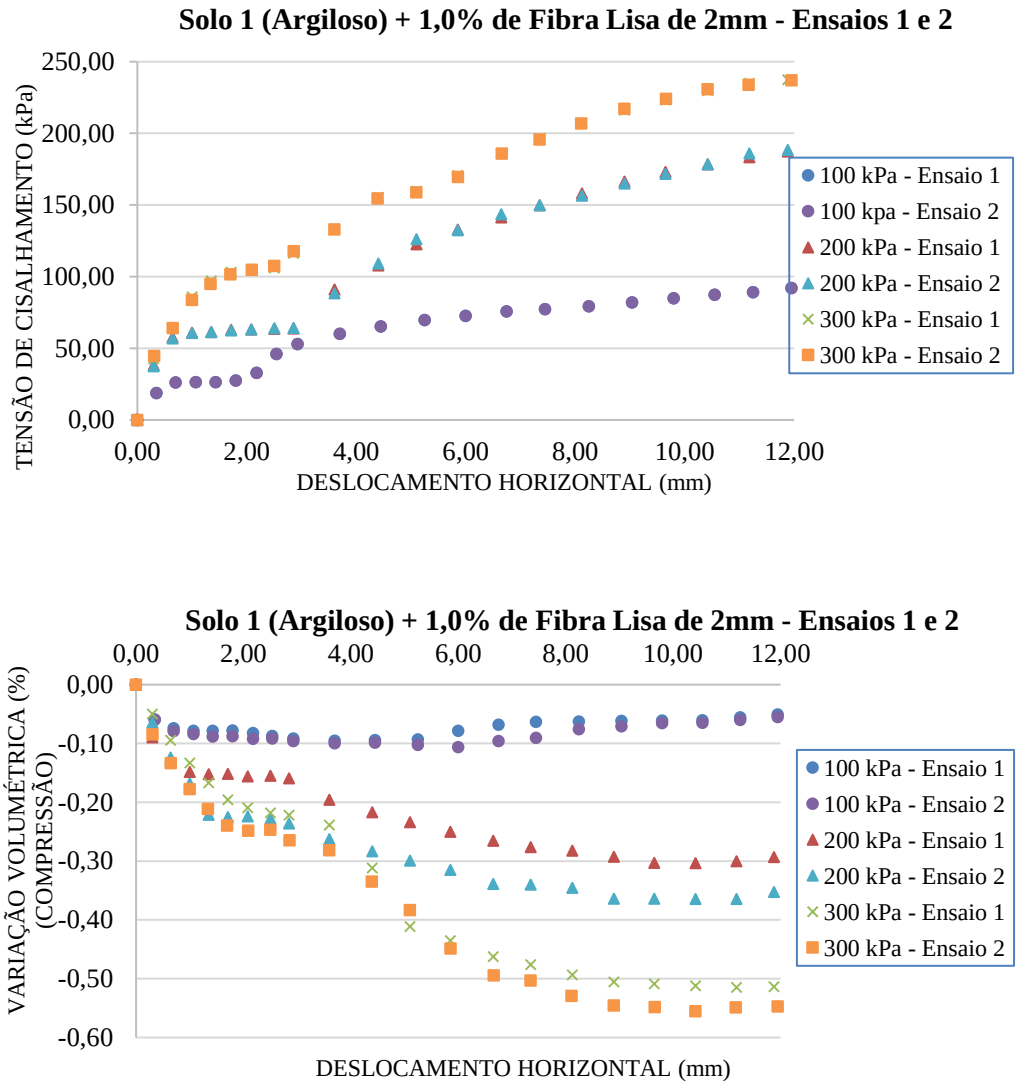
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 2: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 1 (Argiloso) + 0,5% de Fibra Lisa de 2 mm: ensaios 1 e 2.



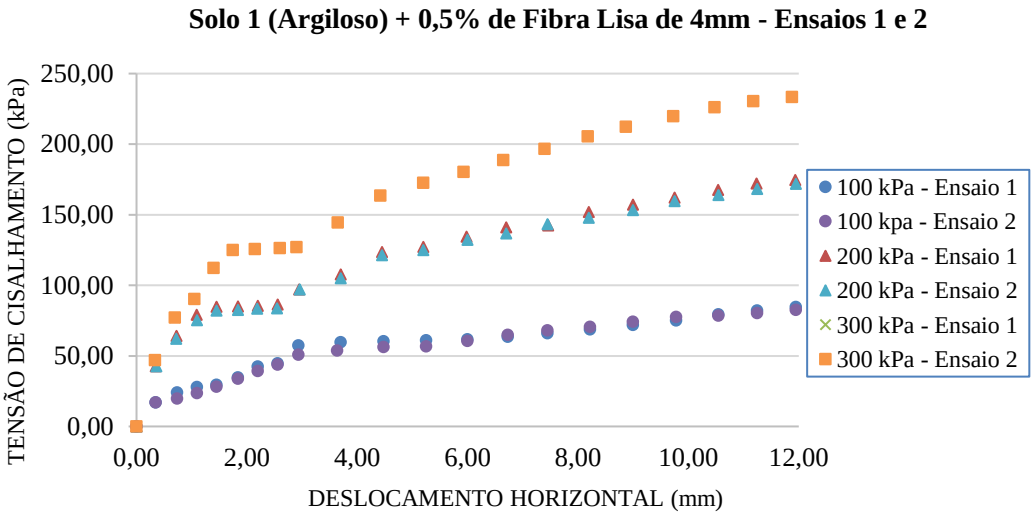
Fonte: Elaborada pela autora.

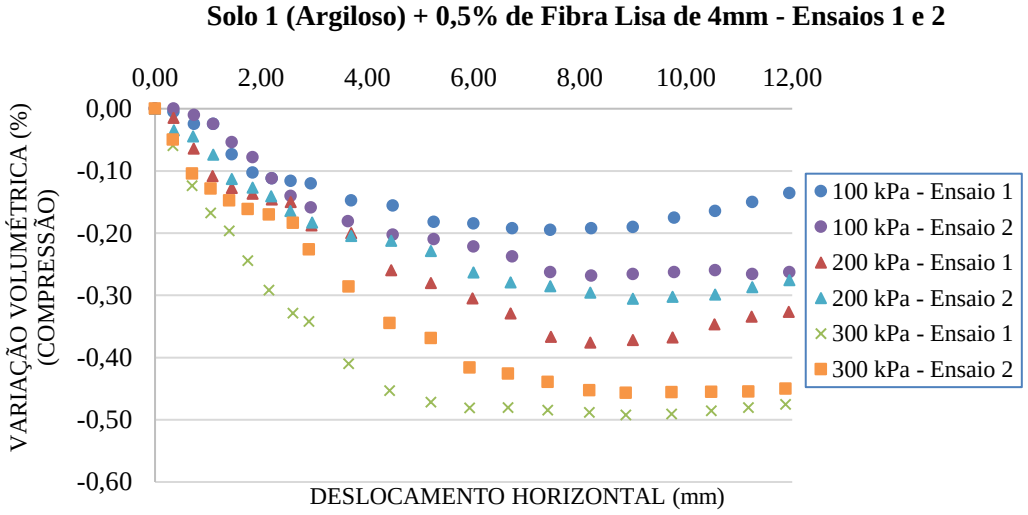
Figura 3: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 1 (Argiloso) + 1,0% de Fibra Lisa de 2 mm: ensaios 1 e 2.



Fonte: Elaborada pela autora.

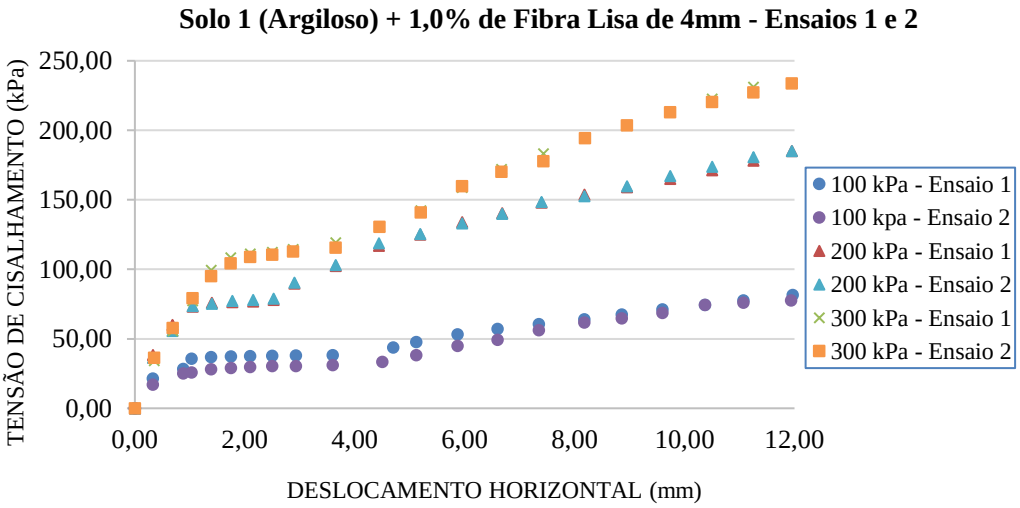
Figura 4: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 1 (Argiloso) + 0,5% de Fibra Lisa de 4 mm: ensaios 1 e 2.

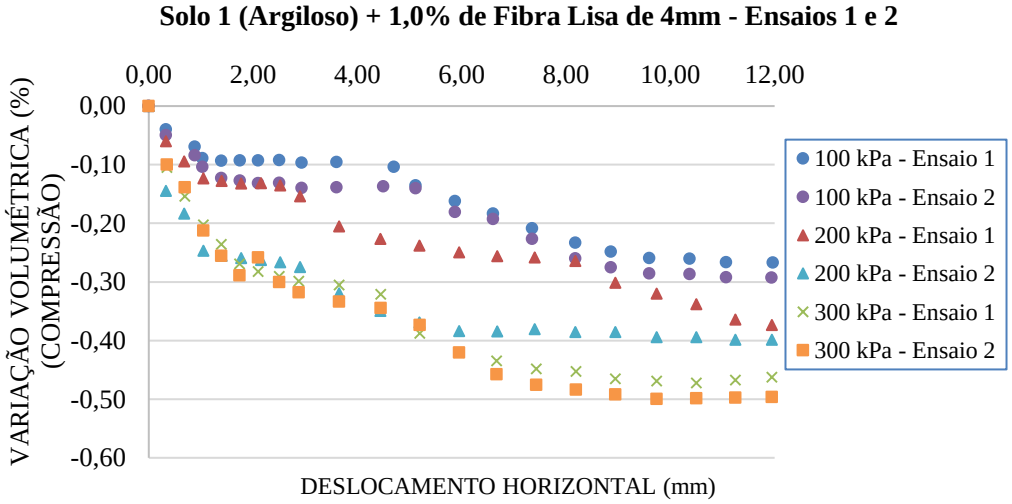




Fonte: Elaborada pela autora.

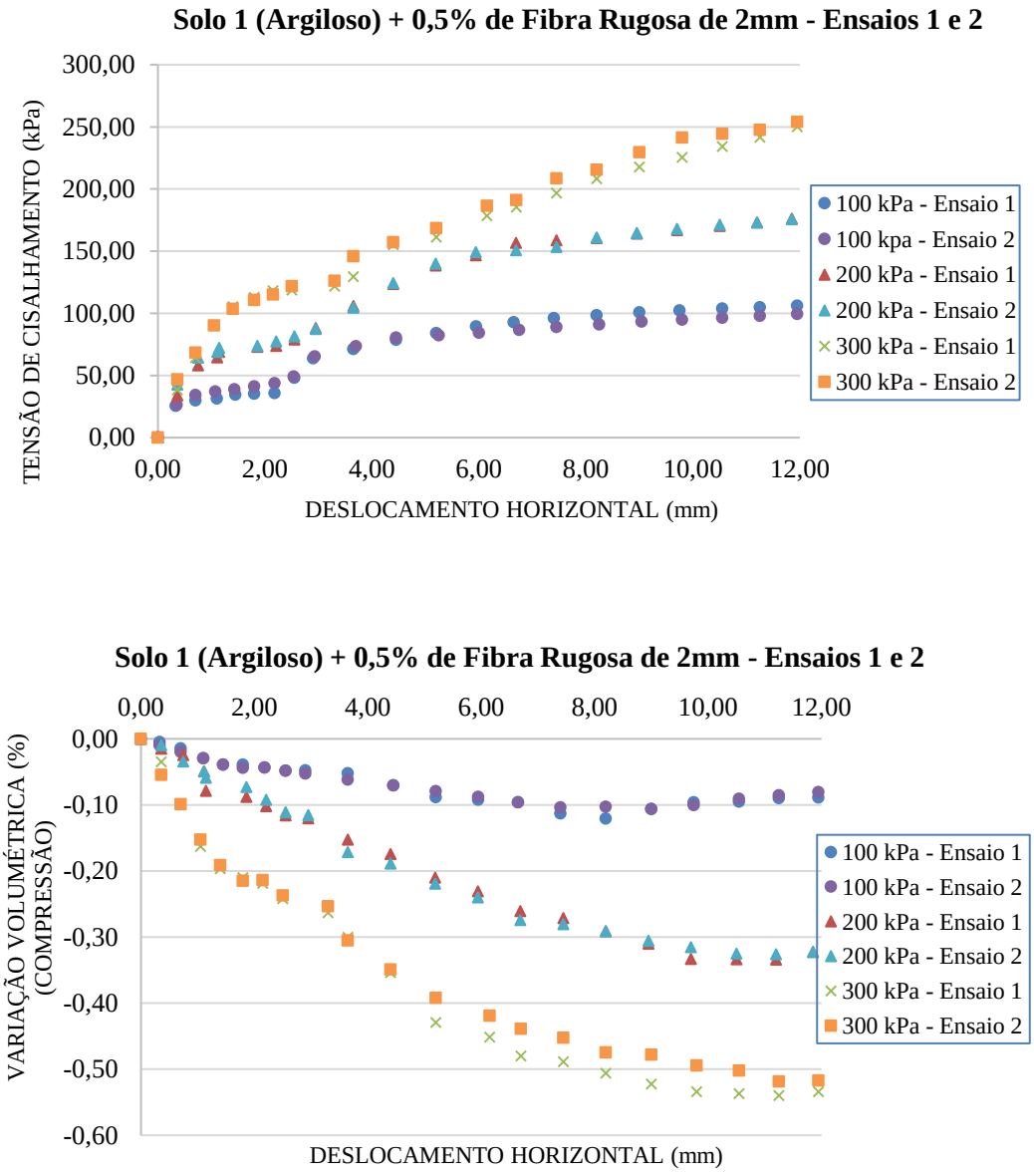
Figura 5: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 1 (Argiloso) + 1,0% de Fibra Lisa de 4 mm: ensaios 1 e 2.





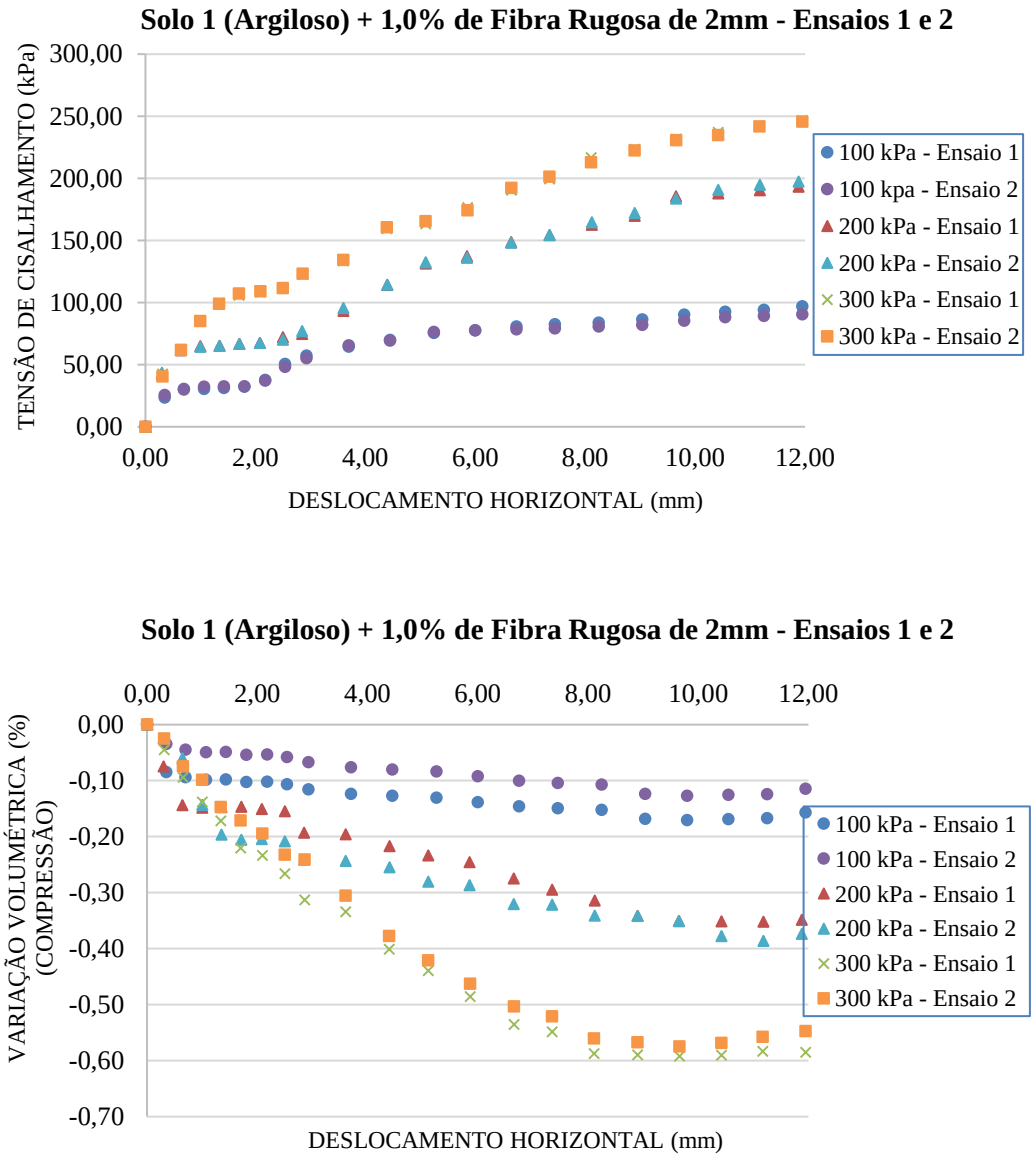
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 6: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 1 (Argiloso) + 0,5% de Fibra Rugosa de 2 mm: ensaios 1 e 2.



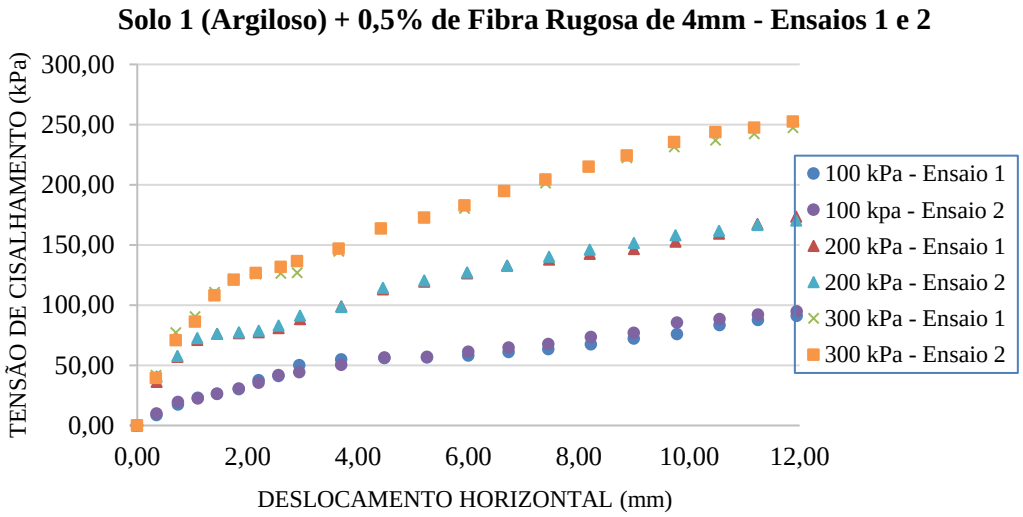
Fonte: Elaborada pela autora.

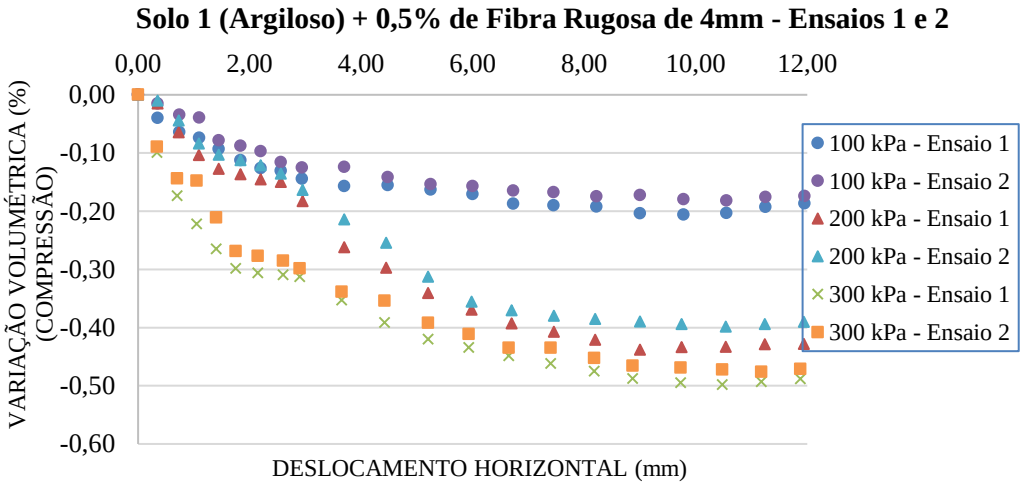
Figura 7: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para Solo 1 (Argiloso) + 1,0% de Fibra Rugosa de 2 mm: ensaios 1 e 2.



Fonte: Elaborada pela autora.

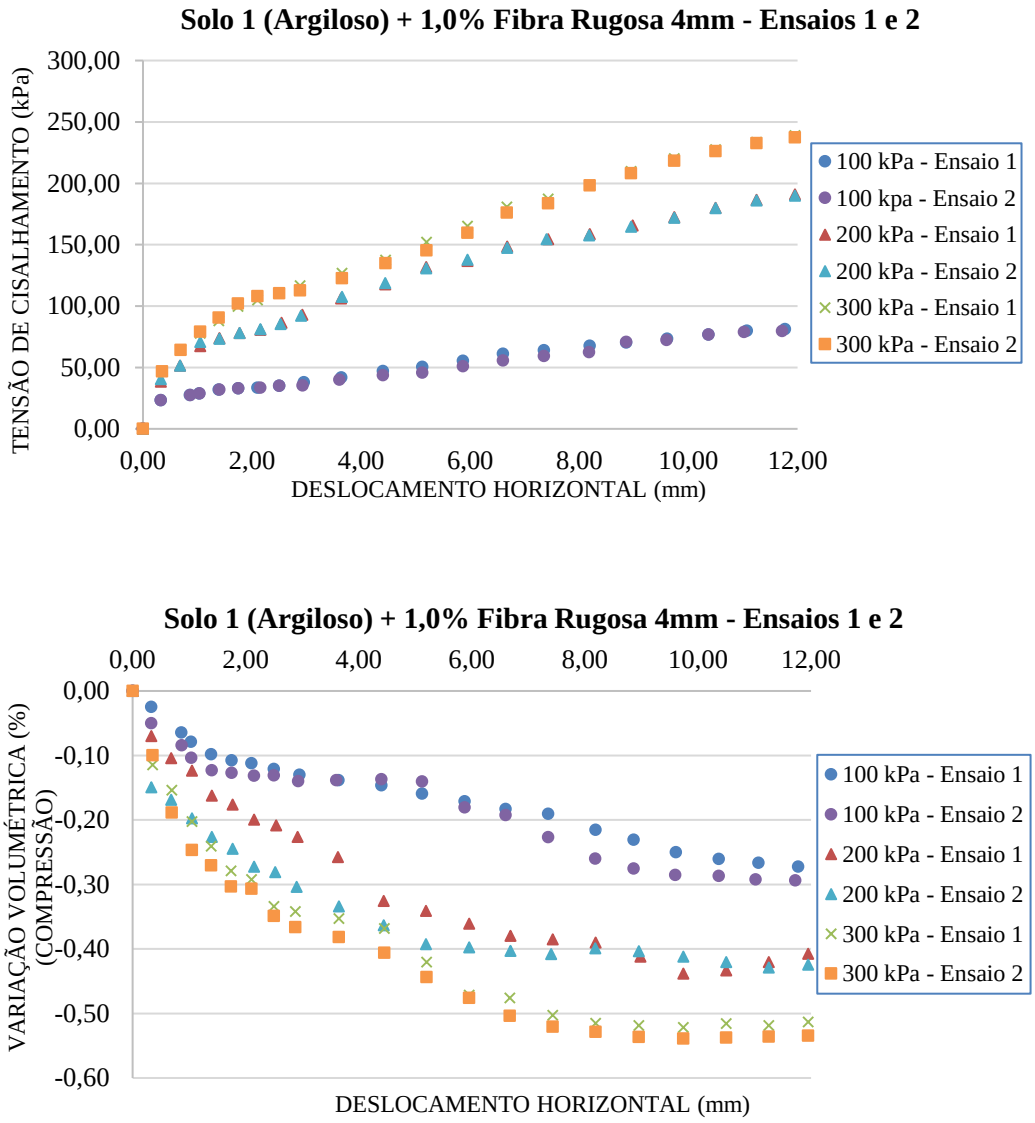
Figura 8: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 1 (Argiloso) + 0,5% de Fibra Rugosa de 4 mm: ensaios 1 e 2.





Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 9: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 1 (Argiloso) + 1,0% de Fibra Rugosa de 4 mm: ensaios 1 e 2.

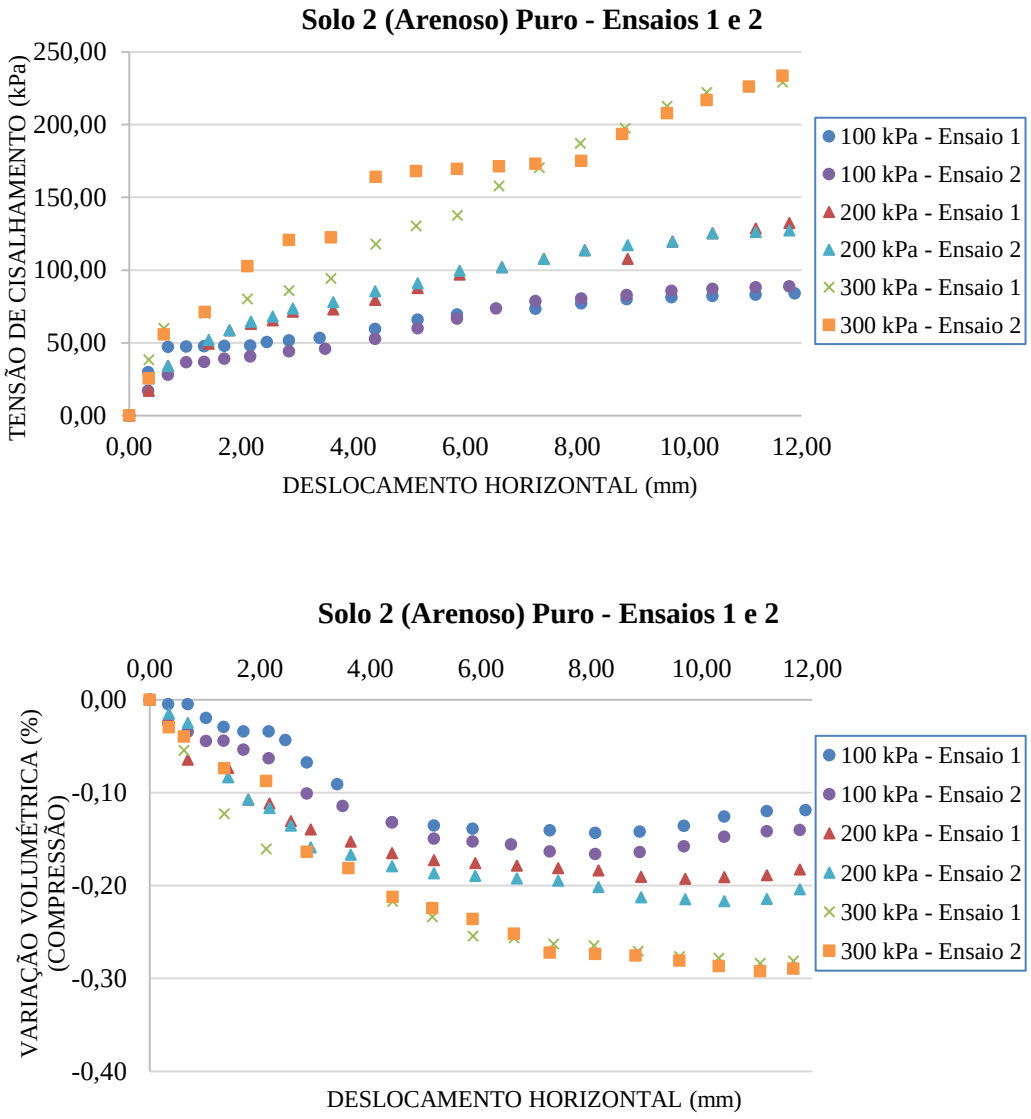


Fonte: Elaborada pela autora.

.

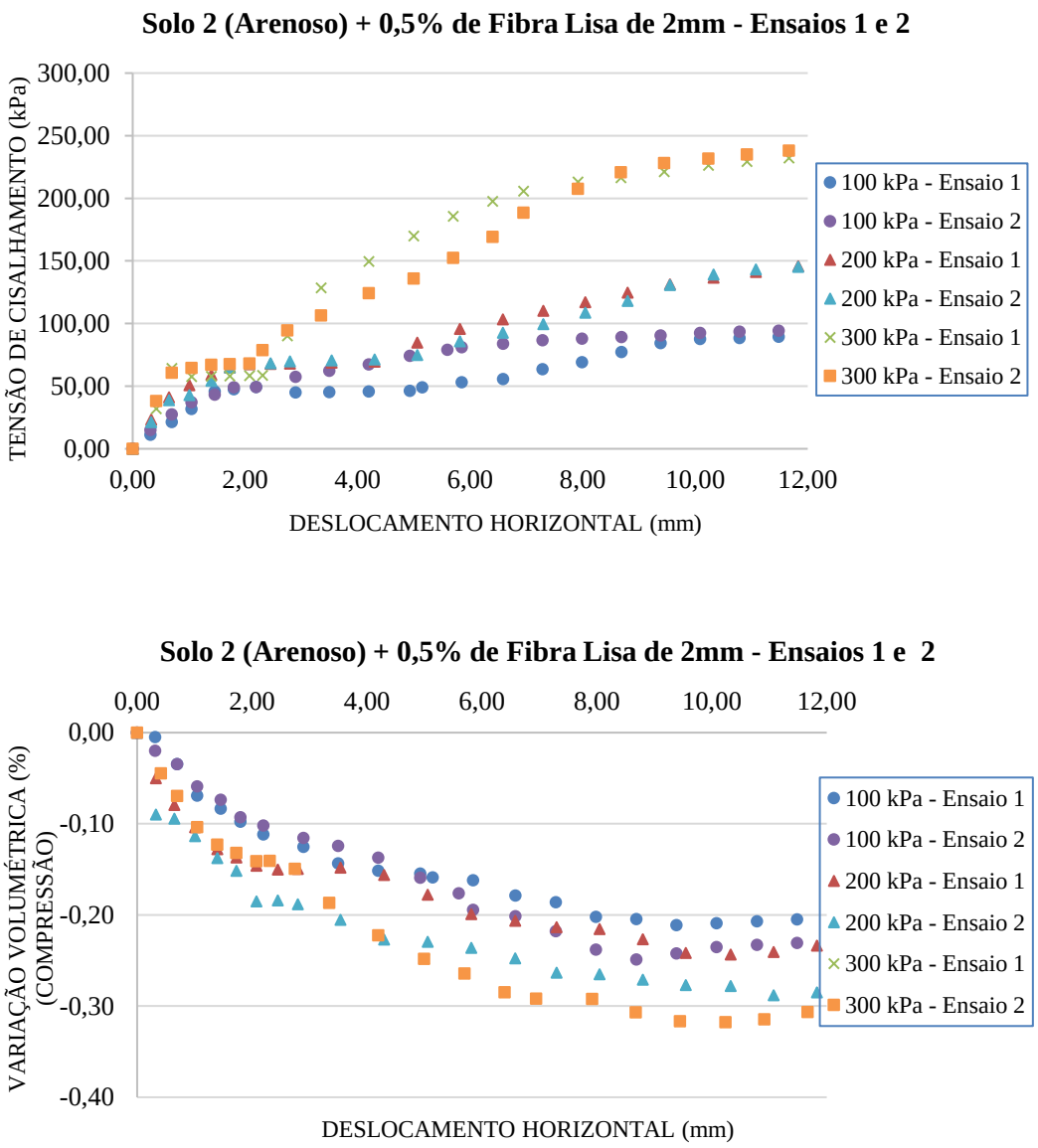
Solo 2: Arenoso

Figura 10: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 2 (Arenoso) Puro: ensaios 1 e 2.



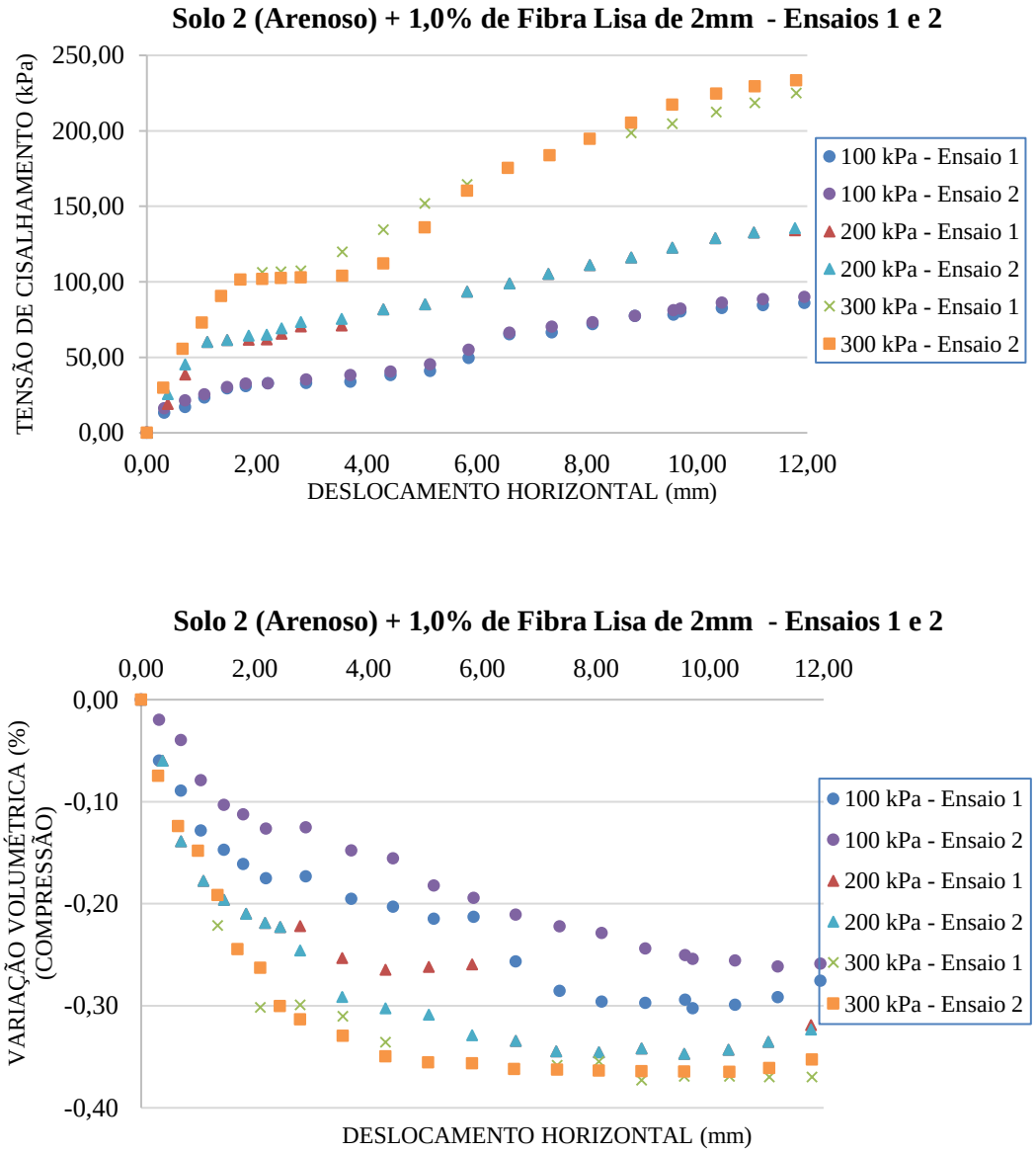
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 11: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 2 (Arenoso) + 0,5% de Fibra Lisa de 2mm: ensaios 1 e 2.



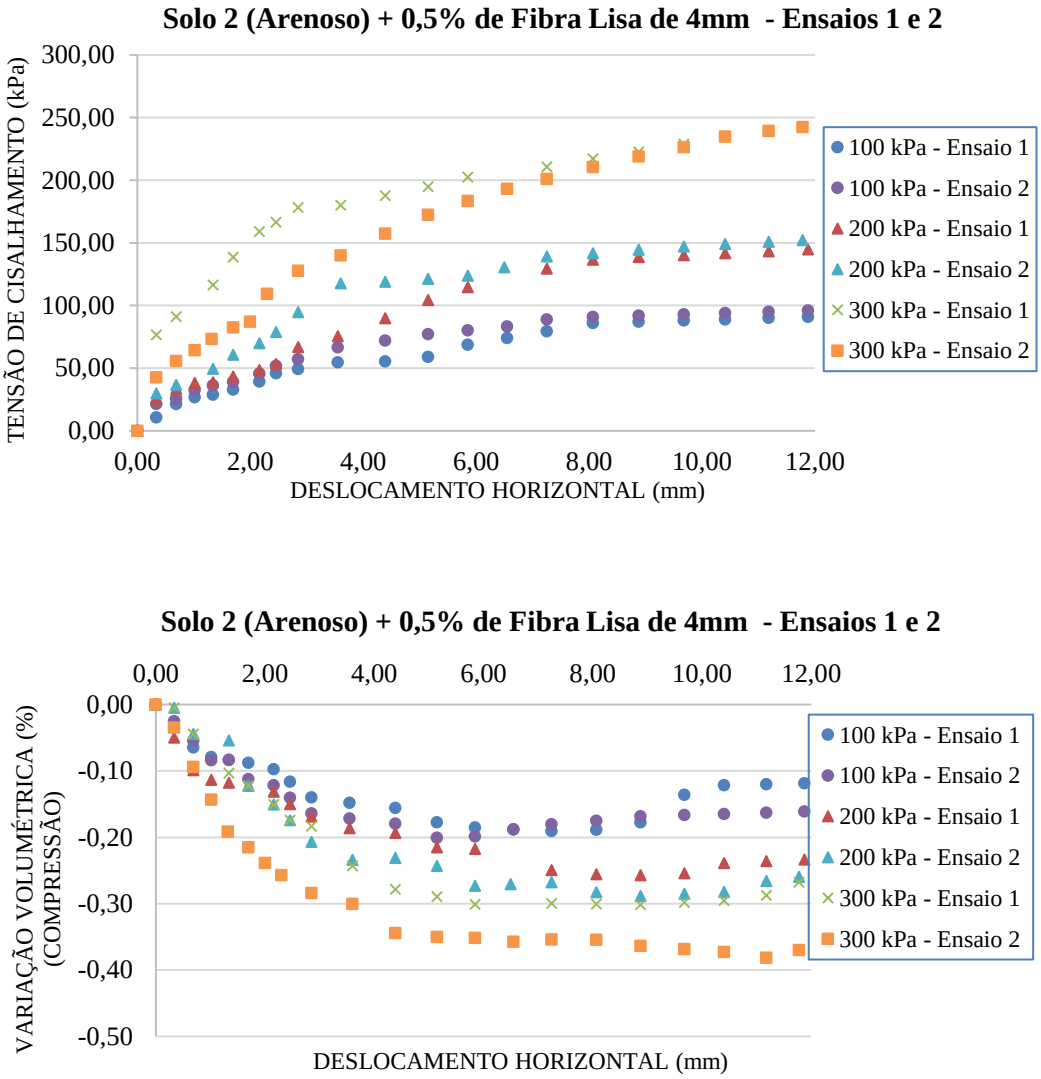
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 12: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 2 (Arenoso) + 1,0% de Fibra Lisa de 2mm: ensaios 1 e 2.



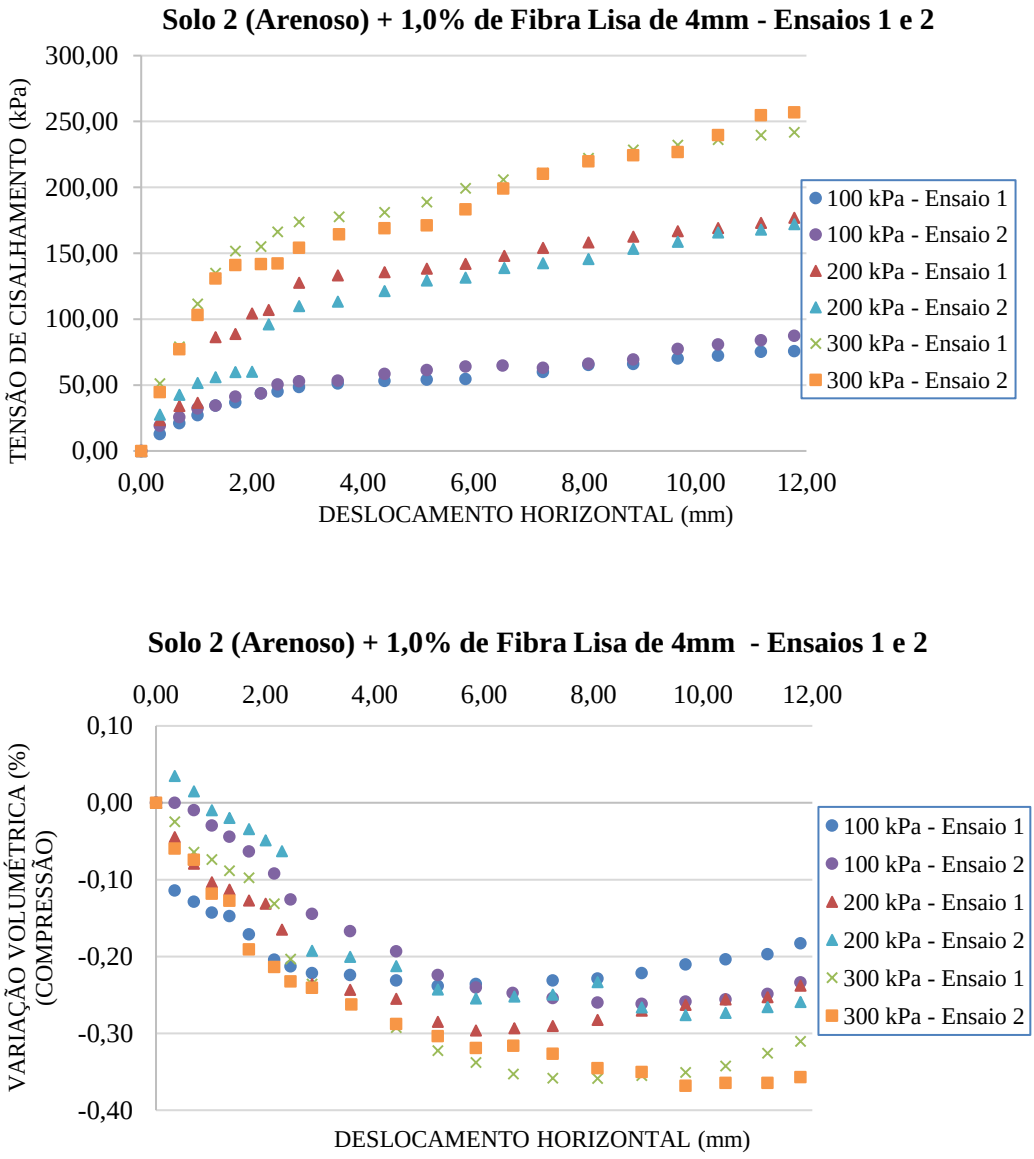
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 13: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 2 (Arenoso) + 0,5% de Fibra Lisa de 4mm: ensaios 1 e 2.



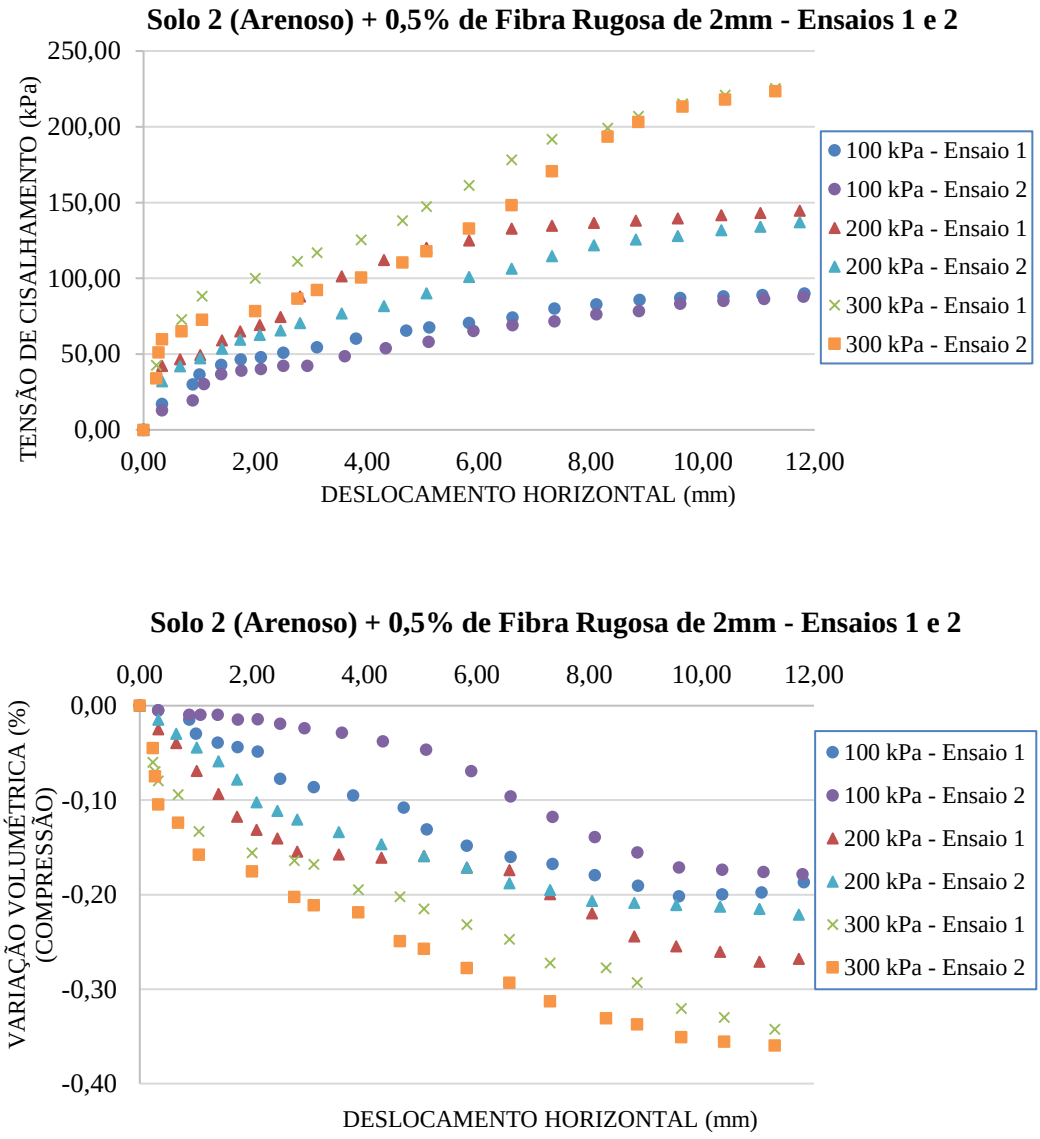
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 14: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para Solo 2 (Arenoso) + 1,0% de Fibra Lisa de 4mm: ensaios 1 e 2.



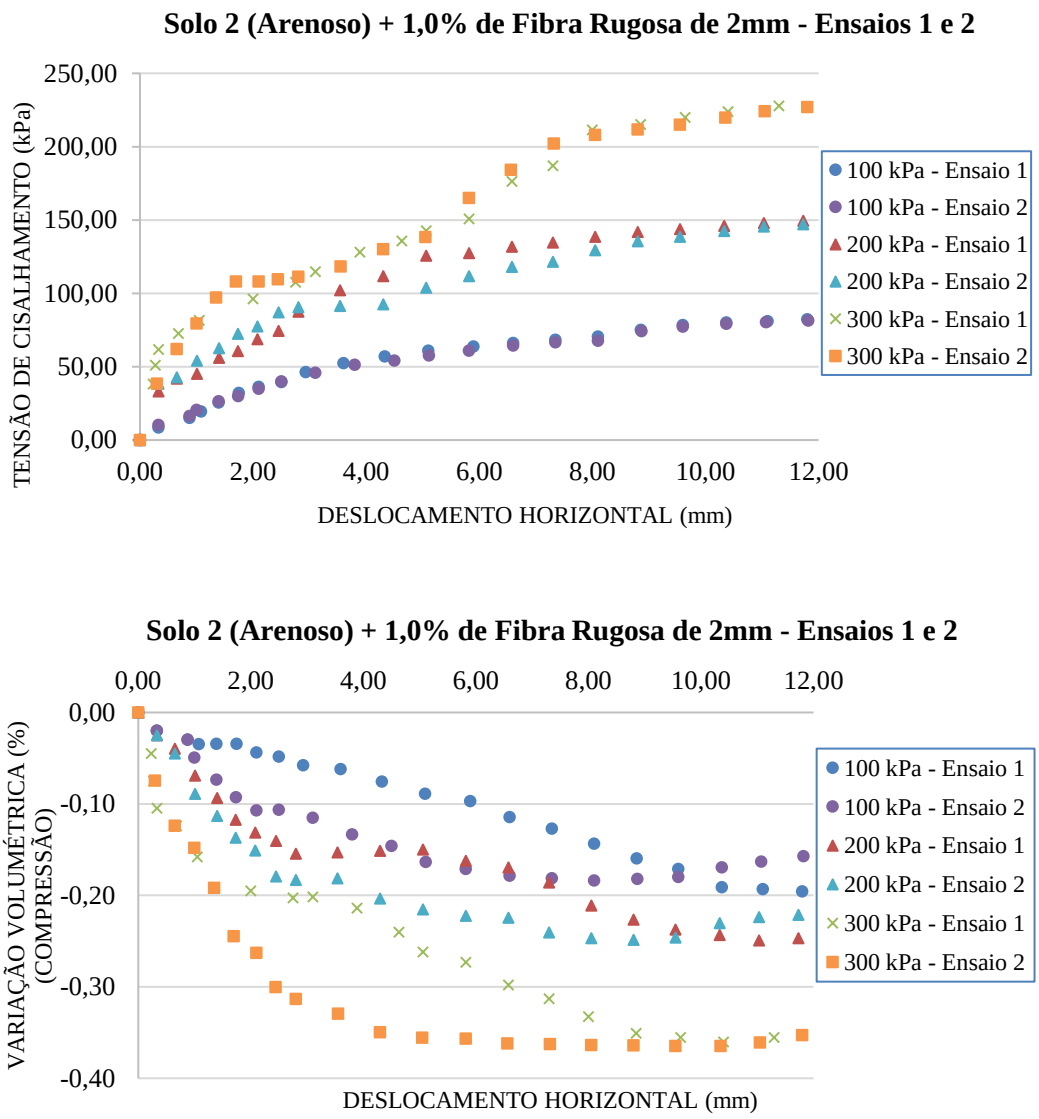
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 15: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 2 (Arenoso) + 0,5% de Fibra Rugosa de 2mm: ensaios 1 e 2.



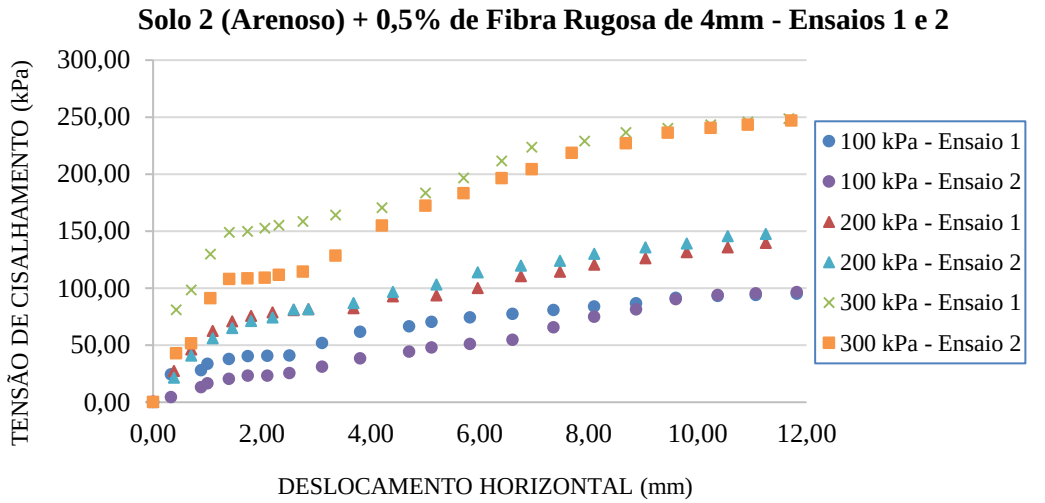
Fonte: Elaborada pela autora.

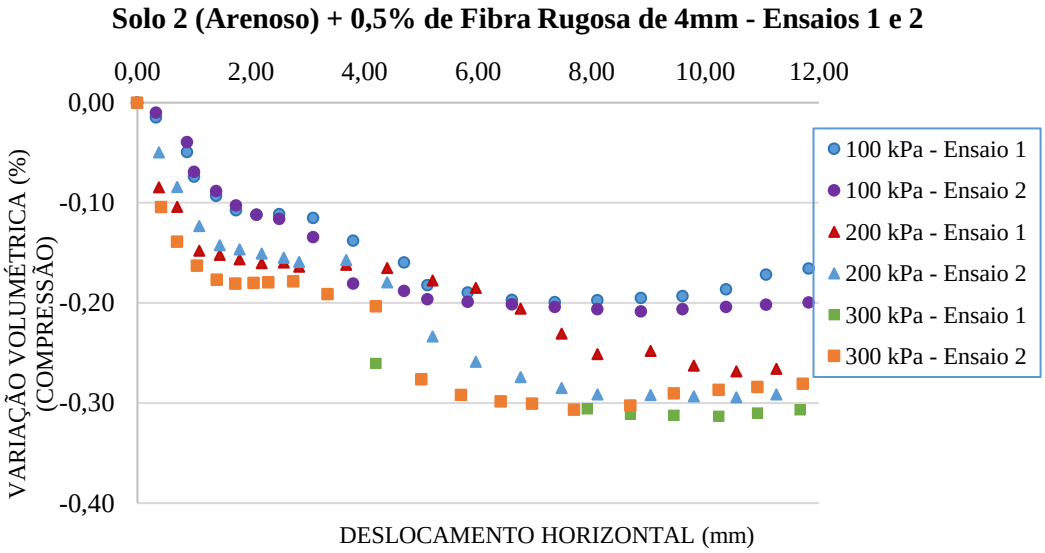
Figura 16: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 2 (Arenoso) + 1,0% de Fibra Rugosa de 2mm: ensaios 1 e 2.



Fonte: Elaborada pela autora.

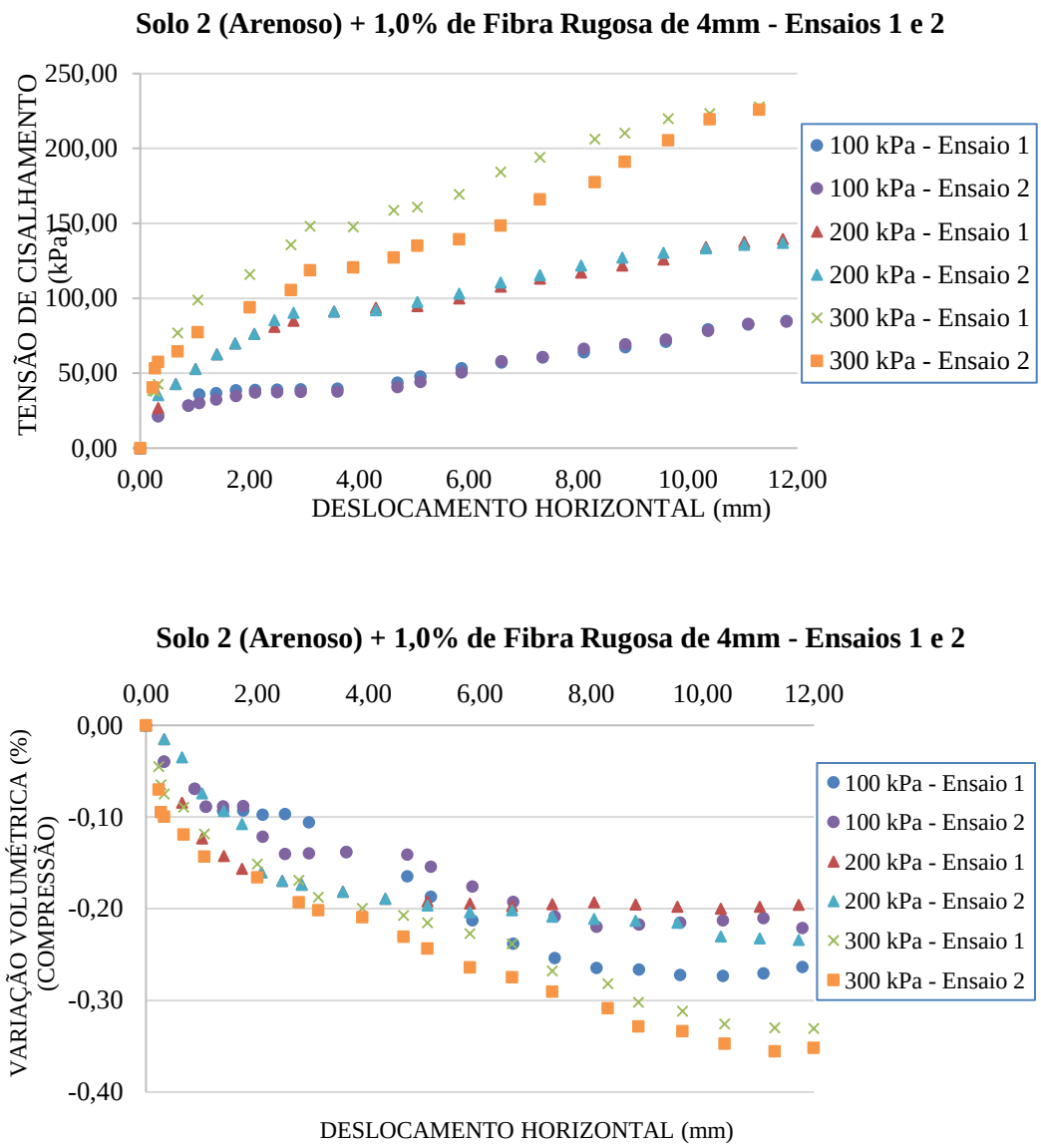
Figura 17: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 2 (Arenoso) + 0,5% de Fibra Rugosa de 4mm: ensaios 1 e 2.





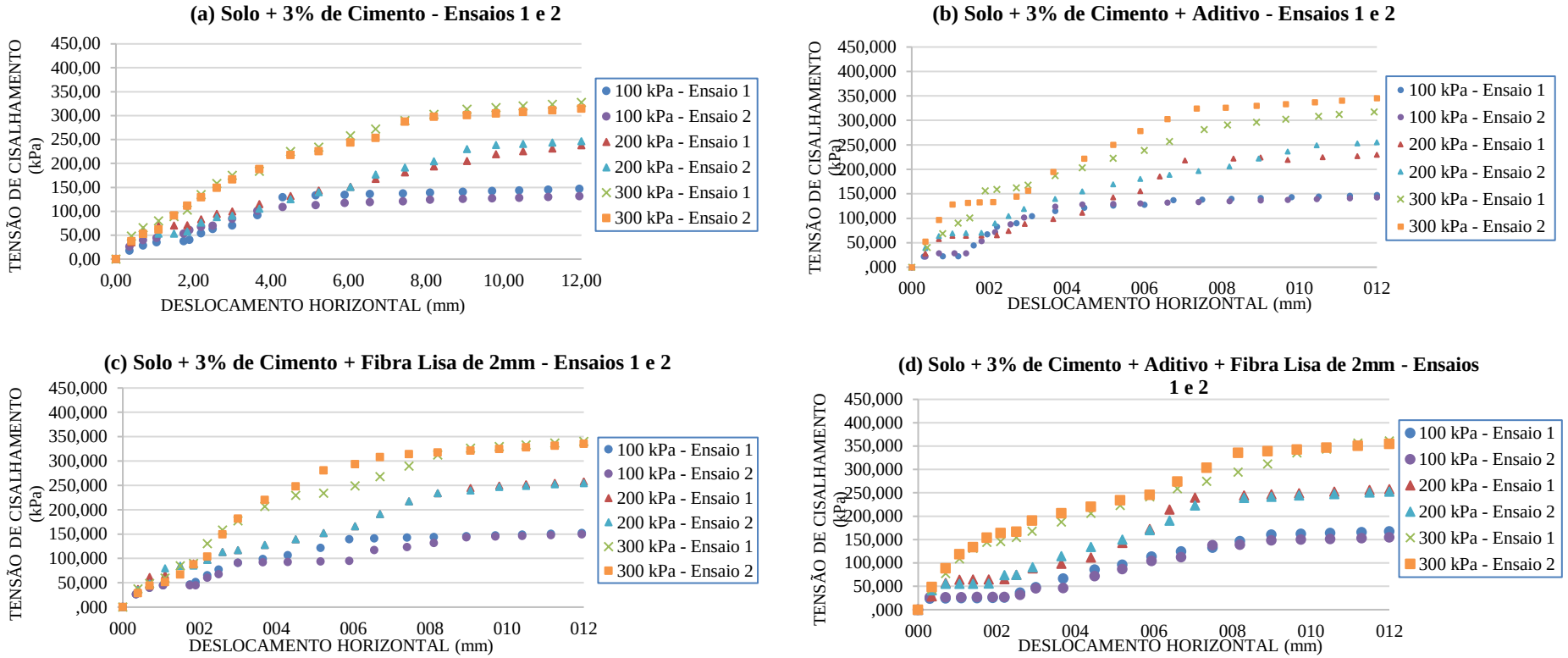
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 18: Gráficos de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para o Solo 2 (Arenoso) + 1,0% de Fibra Rugosa de 4mm: ensaios 1 e 2.



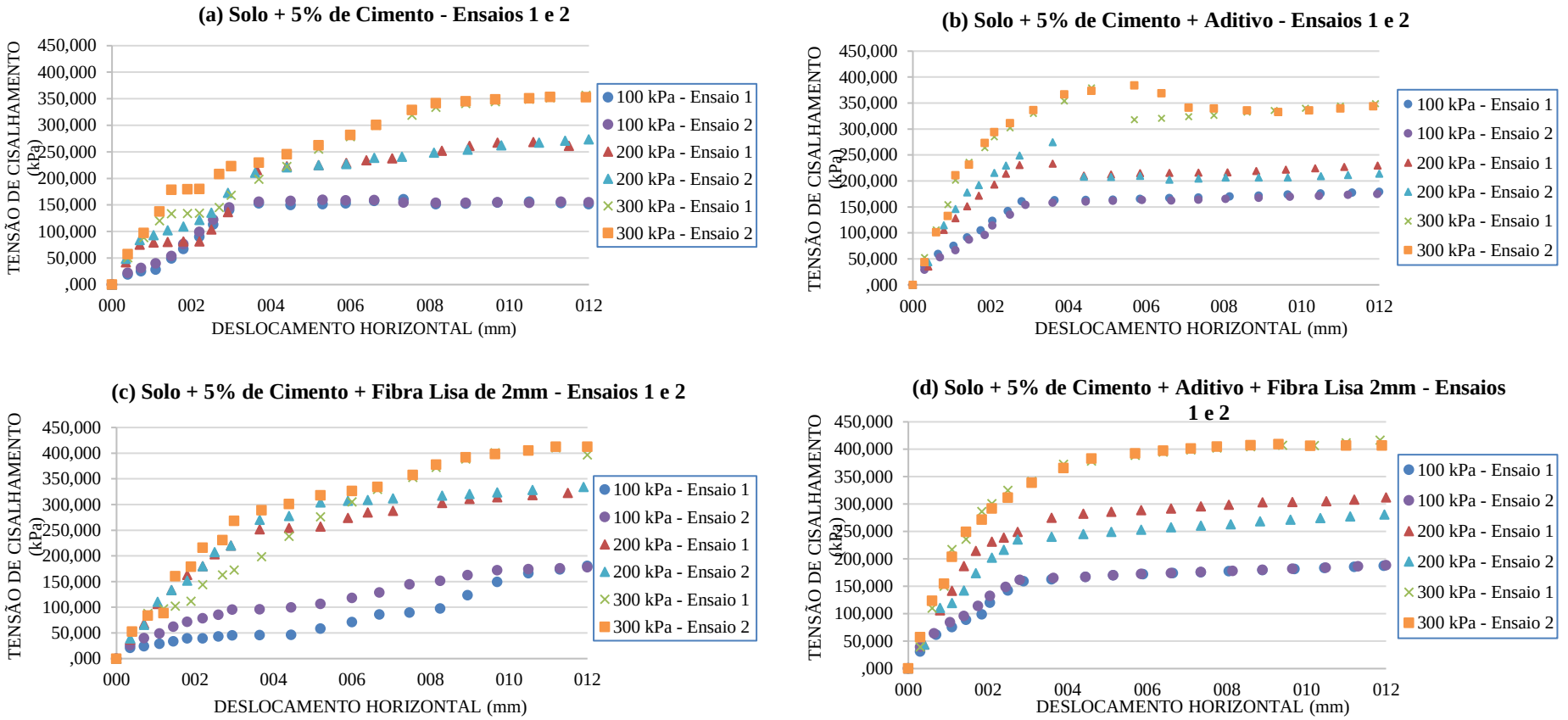
Fonte: Elaborada pela autora

Figura 19: Gráficos de tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal dos ensaios 1 e 2 para (**a**) Solo + 3% Cimento, (**b**) Solo + 3% Cimento + Aditivo, (**c**) Solo + 3% Cimento + Fibra Lisa de 2mm e (**d**) Solo + 3% Cimento + Aditivo + Fibra Lisa de 2mm.



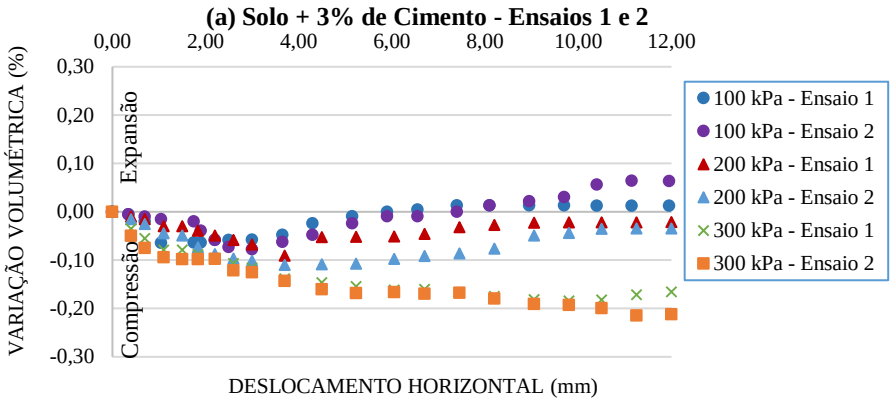
Fonte: Elaborada pela autora.

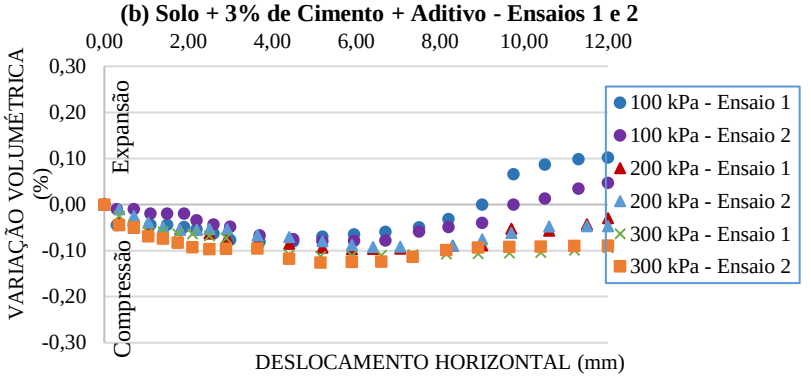
Figura 20: Gráficos de tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal dos ensaios 1 e 2 para (**a**) Solo + 5% Cimento, (**b**) Solo + 5% Cimento + Aditivo, (**c**) Solo + 5% Cimento + Fibra Lisa de 2mm e (**d**) Solo + 5% Cimento + Aditivo + Fibra Lisa de 2mm.

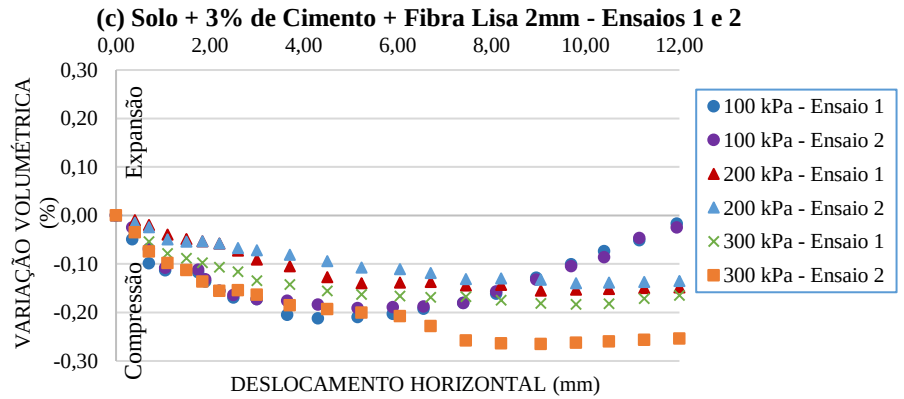


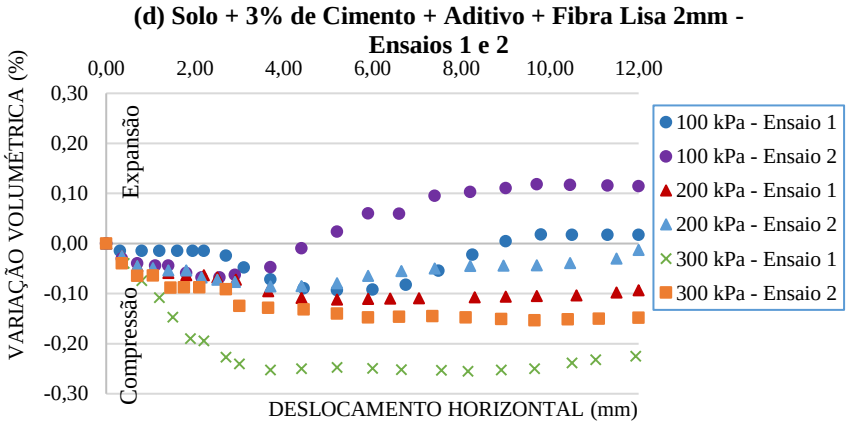
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 21: Gráficos de variação volumétrica x deslocamento horizontal dos ensaios 1 e 2 para (**a**) Solo + 3% Cimento, (**b**) Solo + 3% Cimento + Aditivo, (**c**) Solo + 3% Cimento + Fibra Lisa de 2mm e (**d**) Solo + 3% Cimento + Aditivo + Fibra Lisa de 2mm.



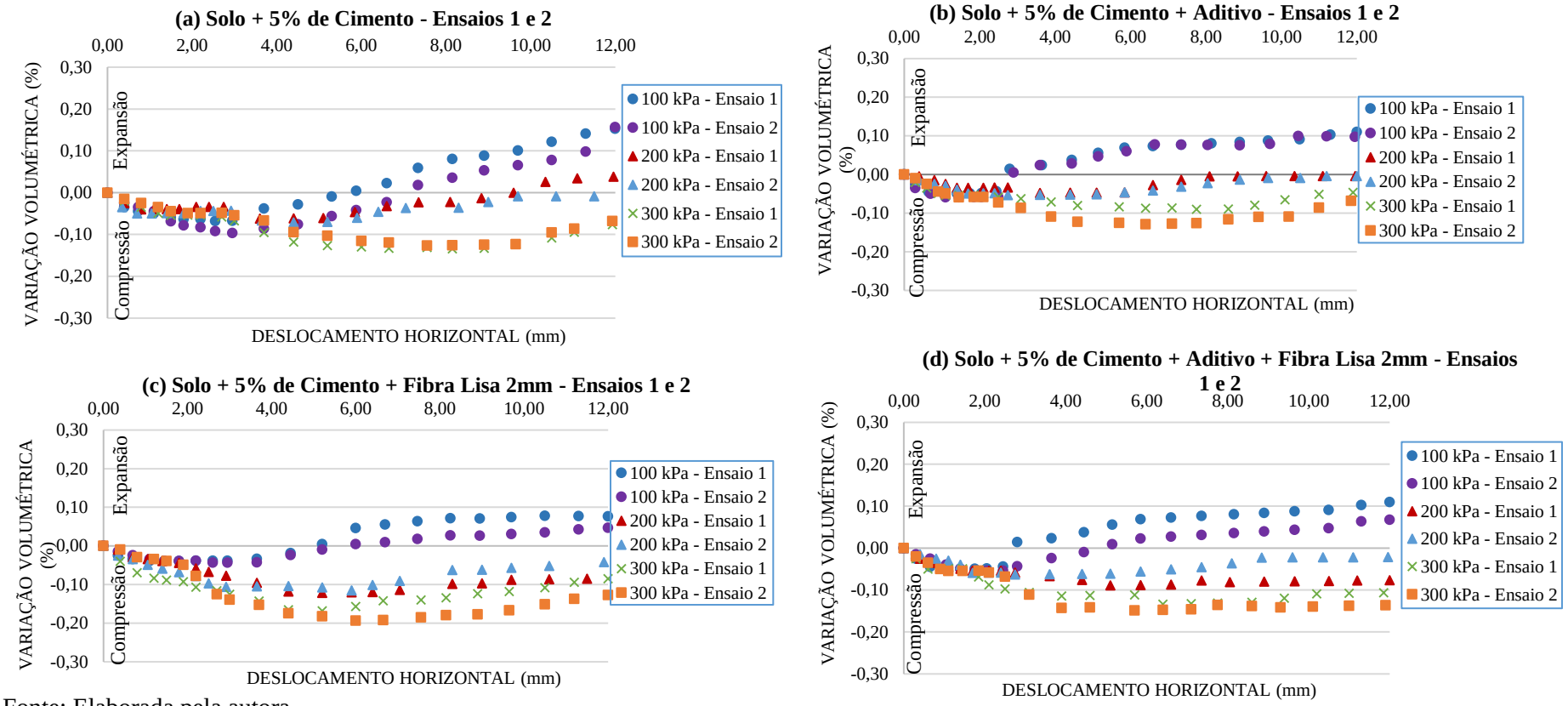






Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 22: Gráficos de variação volumétrica x deslocamento horizontal dos ensaios 1 e 2 para (**a**) Solo + 5% Cimento, (**b**) Solo + 5% Cimento + Aditivo, (**c**) Solo + 5% Cimento + Fibra Lisa de 2mm e (**d**) Solo + 5% Cimento + Aditivo + Fibra Lisa de 2mm.



Fonte: Elaborada pela autora.