



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

CENTRO DE TECNOLOGIA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MATEUS TEIXEIRA CRIPPA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS
REFORÇADOS COM FIBRA DE POLIETILENO TEREFALATO (PET)**

Londrina
2024

MATEUS TEIXEIRA CRIPPA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS
REFORÇADOS COM FIBRA DE POLIETILENO TEREFALATO (PET)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Raquel Souza Teixeira

Coorientador: Prof. Dr. José Wilson dos Santos Ferreira

Londrina
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Crippa, Mateus Teixeira.

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS REFORÇADOS COM FIBRA DE POLIETILENO TEREFALATO (PET) / Mateus Teixeira Crippa. - Londrina, 2024.
115 f.

Orientador: Raquel Souza Teixeira.

Coorientador: José Wilson dos Santos Ferreira.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

Inclui bibliografia.

1. Geotecnia - Tese. 2. Geotecnia Ambiental - Tese. 3. Reforço de solos - Tese. 4. Solos tropicais - Tese. I. Teixeira, Raquel Souza. II. Ferreira, José Wilson dos Santos. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU 62

MATEUS TEIXEIRA CRIPPA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS
REFORÇADOS COM FIBRA DE POLIETILENO TEREF TALATO (PET)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Raquel Souza Teixeira
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. José Wilson dos Santos Ferreira
Universidade de Brasília - UnB

Prof.^a Dr.^a Nelci Helena Maia Gutierrez
Universidade Estadual de Maringá - UEM

Prof.^a Dr.^a Michéle Dal Toé Casagrande
Universidade de Brasília - UnB

Londrina, 17 de Maio de 2024.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família. Meus pais, Ederson e Silvia, pelo amor e encorajamento que sempre me deram de nunca desistir dos meus sonhos. Ao meu irmão, Bruno, meu parceiro e amigo. À Julia, meu amor, por sempre estar ao meu lado.

À minha orientadora, Professora Raquel, pela confiança e por todos os ensinamentos transmitidos durante essa jornada, sempre disposta a resolver qualquer problema, sanar qualquer dúvida e apoiar nos momentos difíceis. Muito obrigado, professora!

Ao meu coorientador, Professor José Wilson, pela amizade e por todos os ensinamentos que, indubitavelmente, foram essenciais para a conclusão deste trabalho. Muito obrigado, professor!

Aos membros da banca, pelos comentários e apontamentos feitos, os quais trouxeram importantes contribuições para o trabalho final.

À Professora Nelci, por disponibilizar o uso do equipamento triaxial no Laboratório de Solos da UEM, sempre ajudando no que era possível para que eu finalizasse meus ensaios.

Aos meus parceiros de laboratório, Daniel e Humberto, ambos indispensáveis para a conclusão deste trabalho. Obrigado por toda ajuda, amizade, risadas e desabafos.

A todo pessoal do Laboratório de Solos da UEL e da UEM, pela amizade e ajuda, seja na realização de algum ensaio ou resolução de alguma dúvida.

Aos Professores Urbano, Paulo e Avacir, do departamento de Física da UEL, e Professores Luiz e Tarley, do departamento de Química da UEL, pela prontidão de realizar meus ensaios, pelas conversas e amizade.

Ao Professor Pedro, do departamento de Geologia da UEL, pela amizade e ajuda ao longo desta pesquisa.

Ao Laboratório de Geotecnia de São Carlos, pelos ensaios realizados sem custo.

À CAPES pela bolsa de estudos que permitiu a realização este trabalho.

Finalizo agradecendo a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta conquista.

“O sábio não é o homem que fornece as verdadeiras respostas; é quem faz as verdadeiras perguntas”.

- *Claude Lévi-Strauss*

RESUMO

CRIPPA, Mateus Teixeira. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS REFORÇADOS COM FIBRA DE POLIETILENO TEREFALATO (PET)**. 2024. 115 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2024.

Com a crescente preocupação ambiental em relação à geração excessiva de resíduos plásticos, que excede 300 milhões de toneladas anualmente no mundo, materiais alternativos vêm sendo estudados como elementos de reforço de solo, como as fibras de polietileno tereftalato (PET) reciclado. Assim, esta pesquisa tem por objetivo avaliar o efeito da inserção das fibras PET no comportamento mecânico de dois solos tropicais arenosos por meio de ensaios triaxiais. Além da caracterização química (pH, CTC, MO, etc.) e geotécnica, foram realizados ensaios de superfície específica por adsorção de gás N₂, extração de elementos amorfos, fluorescência de raios-X e difração de raios-X em ambos os solos. A partir de corpos de prova compactados, utilizando a Energia Normal de Proctor, considerando o solo sem e com reforço de 0,3% de fibras PET de 1,4 dtex e 32mm de comprimento, dispostas de maneira aleatória, foram realizados ensaios triaxiais consolidados não drenados para tensões confinantes de 50, 100 e 200kPa, além da avaliação da microestrutura por meio de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados mostraram efeito positivo da inserção das fibras PET em ambos os solos, melhorando a estrutura interna dos compósitos e promovendo ganhos expressivos em seus parâmetros de resistência, principalmente de intercepto coesivo. Devido aos diferentes graus de evolução pedogenética dos solos, as interações entre fibra-matriz produziram diferentes tendências. O solo de Mandaguaçu apresentou comportamento elasto-plástico de endurecimento com e sem a inserção das fibras. Já o solo de Santa Maria apresentou inicialmente comportamento dúctil, respondendo como material elasto-plástico com a inclusão das fibras. A porosimetria mostrou que a inserção das fibras PET no solo de Mandaguaçu reduziu a quantidade de macroporos do compósito, enquanto que no solo de Santa Maria houve processo contrário, evidenciando a influência da pedogênese do solo na interação fibra-solo e, conseqüentemente, na microestrutura do compósito. Além disso, observou-se na PIM que apenas os macroporos participam da resposta mecânica. Além do efeito de ancoragem, acredita-se que os ganhos de resistência estejam associados às interações das fibras PET com as cargas elétricas provenientes da matriz dos solos tropicais ácidos, resultando em ligações elétricas e atração entre os materiais, conforme confirmado nas imagens de MEV. Tais descobertas realçam a importância de se investigar as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos tropicais e suas interações com materiais alternativos, a fim de compreender o comportamento mecânicos dos compósitos. Espera-se que este trabalho contribua com o desenvolvimento do reforço de solos com fibras PET, cuja aplicação em obras geotécnica, como reforço de aterros, taludes e camadas de base de pavimentos, pode agregar maior valor ao resíduo, impulsionando práticas sustentáveis na engenharia geotécnica.

Palavras-chave: Reforço de solo; PET; Solos tropicais; Química dos solos; Ensaio triaxial; Microestrutura.

ABSTRACT

CRIPPA, Mateus Teixeira. **MECHANICAL BEHAVIOR OF TROPICAL SOILS REINFORCED WITH POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) FIBER**. 2024. 115 pages. Dissertation (Master's in Civil Engineering), State University of Londrina, Londrina, 2024.

With increasing environmental concern regarding the excessive generation of plastic waste, which already exceeds 300 million tons annually worldwide, alternative materials have been studied as soil reinforcement elements, such as recycled polyethylene terephthalate (PET) fibers. This research aims to evaluate the effect of PET fibers insertion on the mechanical behavior of two tropical sandy soils through triaxial tests. Specific surface area tests by N_2 gas adsorption, extraction of amorphous elements, X-ray fluorescence, and X-ray diffraction tests were conducted for both soils, in addition to chemical and geotechnical characterization. Consolidated undrained triaxial tests were performed on compacted specimens using Proctor Normal Energy, considering soil with and without reinforcement of 0.3% of 1.4 dtex PET fibers with 32mm of length, randomly arranged, for confining stresses of 50, 100, and 200kPa, along with microstructure evaluation through Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) and Scanning Electron Microscopy (SEM). The results showed a positive effect of PET fiber insertion in both soils, improving the internal structure of the composites and promoting significant gains in their strength parameters, mainly in cohesive intercept. Due to the different degrees of pedogenetic evolution of the soils, the interactions between fiber-matrix produced different trends. The Mandaguaçu soil exhibited strain-hardening behavior with and without fiber insertion. Santa Maria soil initially exhibited ductile behavior, responding as an elastoplastic material with the inclusion of fibers. Porosimetry showed that the insertion of PET fibers in Mandaguaçu soil reduced the amount of macropores in the composite, while in Santa Maria soil the opposite process occurred, evidencing the influence of soil pedogenesis on fiber-soil interaction, and consequently, on the composite microstructure. Additionally, it was observed in MIP that only macropores participate in mechanical behaviour. Besides the anchoring effect, it is believed that strength gains are associated with the interactions of PET fibers with the electrical charges from the matrices of acidic tropical soils, resulting in electrical bonds and attraction between materials, as confirmed in SEM images. These findings highlight the importance of investigating the physical, chemical, and mineralogical characteristics of tropical soils and their interactions with alternative materials in order to understand the mechanical behavior of composites. It is hoped that this work will contribute to the development of soil reinforcement with PET fibers whose application in geotechnical projects, such as reinforcing embankments, slopes and base layers of pavements, can add greater value to the waste, promoting sustainable practices in geotechnical engineering.

Key-words: Soil reinforcement; PET; Tropical soils; Soil chemistry; Triaxial test; Microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferentes formas de distribuição de fibras em uma matriz	19
Figura 2 - Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra	25
Figura 3 - Estrutura química do PET	28
Figura 4 - Simbologia para plásticos recicláveis.....	29
Figura 5 - Composição relativa da produção nacional de polímeros termoplásticos e geração no RSU brasileiro em 2005	30
Figura 6 – Volume de PET pós-consumo reciclado no Brasil	32
Figura 7 - Localização geográfica de Mandaguaçu e local de coleta das amostras..	39
Figura 8 - Solo de Mandaguaçu	40
Figura 9 - Localização geográfica do Arroio Sarandi.....	41
Figura 10 - Perfil das camadas da voçoroca Buraco Fundo.....	42
Figura 11 - Solo de Santa Maria.....	43
Figura 12 - Fibra de PET	43
Figura 13 - Fluxograma das etapas da pesquisa	45
Figura 14 - Etapas de preparação do solo	45
Figura 15 - Ensaio de sedimentação nos solos: a) Mandaguaçu; b) Santa Maria.....	46
Figura 16 - Ensaio de limite de consistência	47
Figura 17 – Equipamento utilizado no ensaio de ASE	48
Figura 18 – Provetas com solo defloculado antes da pipetagem da fração argila.....	51
Figura 19 - Tubos de ensaio antes e após filtragem	52
Figura 20 – Equipamento utilizado para quantificação de amorfos	53
Figura 21 - Etapas de ensaio para classificação pela metodologia MCT	54
Figura 22 - Etapas do ensaio de compactação	55
Figura 23 - Fibras de PET antes e após serem soltas	56
Figura 24 - Etapas da preparação dos compósitos de solo-fibras PET.....	57
Figura 25 - Etapas de compactação dos corpos de prova em miniatura.....	58
Figura 26 - Fluxograma das etapas do ensaio de compressão triaxial	59
Figura 27 - Equipamento AUTOTRIAX 2	60
Figura 28 - Itens utilizados na montagem do ensaio de compressão triaxial	61
Figura 29 – Sequência de montagem do corpo de prova.....	62
Figura 30 - Sistema montado e preparado para a fase de saturação	63
Figura 31 – Porosímetro AutoPore 9500.....	67

Figura 32 - Microscópio Eletrônico de Varredura FEI, Quantum 200	68
Figura 33 - Amostras preparadas para o recobrimento por ouro.....	69
Figura 34 - Curva granulométrica dos solos de Mandaguaçu e Santa Maria.....	71
Figura 35 - Ábaco de classificação MCT com resultados dos ensaios plotados	74
Figura 36 - Difratoograma dos solos de Mandaguaçu (a) e Santa Maria (b).....	76
Figura 37 - Difratoograma das frações argila do solo de Mandaguaçu (a) e Santa Maria (b).....	78
Figura 38 - Curva de compactação do solo de Mandaguaçu e Santa Maria.....	80
Figura 39 - Curvas tensão desviadora versus deformação axial e variação da poropressão versus deformação axial dos solos sem reforço.....	82
Figura 40 - Corpos de prova após ruptura na câmara triaxial	83
Figura 41 - Trajetória de tensões totais e efetivas dos solos não reforçados.....	84
Figura 42 - Envoltórias de resistência efetiva para os solos não reforçados.....	85
Figura 43 - Curvas tensão desviadora versus deformação axial e variação da poropressão versus deformação axial dos solos reforçados.....	87
Figura 44 - Corpos de prova reforçados após ruptura na câmara triaxial	88
Figura 45 - Trajetória de tensões totais e efetivas dos solos reforçados.....	89
Figura 46 - Envoltórias de resistência efetiva para os solos reforçados e saturados	90
Figura 47 - Envoltórias de resistência efetiva dos solos com e sem fibras PET.....	92
Figura 48 – $E_{def 16\%}$ dos solos com e sem fibras	94
Figura 49 – Porosimetria antes e após ruptura: a) Mandaguaçu; b) Santa Maria	95
Figura 50 - Superfície dos solos sem fibras no MEV	98
Figura 51 – Imagens da interação solo-fibra no MEV	99
Figura 52 – Imagem da fibra PET pós-solicitação no MEV	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Densidade e propriedades mecânicas das fibras poliméricas.....	22
Tabela 2 - Tempos de sedimentação das partículas de 2, 5 e 20 μm em água para profundidade de 10 cm.....	50
Tabela 3 - Dados dos corpos de prova submetidos aos ensaios triaxiais	59
Tabela 4 – Fatores de correção para determinação do tempo de ruptura (t_f).....	65
Tabela 5 - Caracterização física dos solos de Mandaguaçu e Santa Maria	70
Tabela 6 - Análise granulométrica dos solos.....	72
Tabela 7 - Classificação do solo de Mandaguaçu e Santa Maria.....	73
Tabela 8 - Características químicas dos solos	75
Tabela 9 - Resultados do ensaio de Fluorescência de Raios-X.....	77
Tabela 10 - Quantificação de Si, Al e Fe amorfo de cada solo	77
Tabela 11 - Parâmetros de compactação dos solos	81
Tabela 12 - Corpos de prova dos ensaios triaxiais nos solos sem reforço.....	81
Tabela 13 - Resumo de resultados de ambos os solos à deformação de 16%.....	85
Tabela 14 - Parâmetros de resistência efetiva dos solos não reforçados	86
Tabela 15 - Corpos de prova dos ensaios triaxiais nos solos reforçados com fibras PET	86
Tabela 16 - Resumo de resultados dos solos reforçados	90
Tabela 17 - Parâmetros de resistência efetiva dos solos reforçados	91
Tabela 18 - Equações Mohr-Coulomb dos solos puro e reforçados.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Anvisa	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CP	Corpo de Prova
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DRX	Difração de Raios-X
FX	Fluorescência de Raios-X
IAC	Instituto Agrônômico
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná
ISWA	<i>International Solid Waste Association</i>
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
LMEM	Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MD	Mandaguaçu
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Matéria Orgânica
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PET	Polietileno Tereftalato
pH	Potencial Hidrogeniônico
PIM	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de Vinila
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SM	Santa Maria
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UEM	Universidade Estadual de Maringá

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 ESTABILIZAÇÃO E REFORÇO DE SOLOS	16
2.1.1 Materiais Compósitos	17
2.2 SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS	18
2.2.1 Tipos de Fibras Utilizados como Reforço de Solos	20
2.2.2 Classificação das Fibras Quanto ao Comprimento	23
2.2.3 Mecanismos de Interação Solo-Fibra	24
2.3 POLIETILENO TEREFALATO (PET)	27
2.3.1 Legislação Brasileira sobre o Uso do PET Reciclado	28
2.3.2 Reciclagem e Impactos Ambientais do PET	30
2.4 SOLOS TROPICAIS	33
2.5 SOLO REFORÇADO COM FIBRAS PET	36
3 METODOLOGIA	39
3.1 MATERIAIS	39
3.1.1 Solo de Mandaguaçu-PR	39
3.1.2 Solo de Santa Maria-RS	40
3.1.3 Fibras de PET	43
3.1.4 Compósitos Solo-Fibras PET	44
3.1.5 Água	44
3.2 MÉTODOS	44
3.2.1 Preparação do Solo	45
3.2.2 Caracterização Física	46
3.2.3 Caracterização Química	48
3.2.4 Caracterização Mineralógica	48
3.2.5 Classificação dos Solos	54
3.2.6 Ensaio de Compactação	54
3.2.7 Preparação dos Compósitos Solo-Fibra PET	56

3.2.8 Moldagem dos Corpos de Prova	57
3.2.9 Ensaio de Compressão Triaxial.....	58
3.2.10 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM).....	66
3.2.11 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	68
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	70
4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	72
4.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	74
4.4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA	75
4.5 CURVAS DE COMPACTAÇÃO DOS SOLOS.....	79
4.6 COMPORTAMENTO MECÂNICO	81
4.6.1 Solos sem Reforço	81
4.6.2 Solos Reforçados com Fibras PET.....	86
4.6.3 Comparação de Resultados	91
4.7 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (PIM)	95
4.8 IMAGENS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	97
5 CONCLUSÕES	100
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101

1 INTRODUÇÃO

Pauta de diversas conferências ambientais, nacionais e internacionais, a gestão de resíduos sólidos nos centros urbanos é um dos grandes desafios deste século para a ciência. De acordo com Dalhat *et al.* (2019), a geração de resíduos plásticos anualmente no mundo passou de 300 milhões de toneladas e continua a crescer a uma taxa de 4% por ano. Sendo assim, a busca por maneiras de se reutilizar estes materiais que apresentam elevado tempo de degradação, ao invés de simplesmente descartá-los, pode contribuir significativamente com o meio ambiente e a vida nas cidades.

Nas últimas décadas, devido ao baixo custo de produção, diversos produtos e embalagens com resina de polietileno tereftalato (PET) foram produzidos, todavia, o polietileno tereftalato leva cerca de 400 anos para ser completamente degradado pelo ambiente. Em 2023, a demanda por PET no mundo foi de 30 milhões de toneladas, com crescimento previsto de 6,8% até 2029. Muito deste crescimento relacionado ao setor de bebidas, como refrigerantes, energéticos e, principalmente, água potável. De acordo com o relatório anual da *British Soft Drink Association*, em 2021 o consumo de água engarrafada no Reino Unido foi de 2.542 milhões de litros (Mordor Intelligence, 2024).

De acordo com o último censo da reciclagem do PET no Brasil, desenvolvido pela Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET) em 2021, 359 mil toneladas de PET pós-consumo foram recicladas, o que corresponde a 56,4% do total de embalagens PET vendidas no mercado. Apesar da consolidação da indústria de reciclagem de PET no Brasil, a quantidade de PET reciclado ainda não pode ser considerada ideal, já que grande parte das embalagens acaba sendo depositada em aterros sanitários ou descartadas de forma inadequada diretamente na natureza.

A inserção de PET reciclado para fins geotécnicos tem-se demonstrado promissora, aliando redução do impacto socioambiental causado pelo resíduo ao mesmo tempo que contribui para as propriedades geotécnicas (Montardo *et al.*, 1998; Prietto *et al.*, 1999; Silva, 2007; Botero *et al.*, 2015; Louzada, 2015; Rocha & Novo, 2015; Santos & Silva, 2015; Sousa *et al.*, 2016; Senez, 2016; Louzada *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2021).

No entanto, a eficiência da solução proposta demanda de investigação acerca da interação entre a matriz de solo e as fibras PET. Nesse sentido, o grau de evolução

pedogenética dos solos tropicais brasileiros, suas características físicas, químicas, mineralógicas e estruturais são fatores que irão intervir no comportamento mecânico (Martínez, 2003; Carvalho *et al.*, 2015; Queiroz, 2015).

Assim, este trabalho busca avaliar o efeito da inserção de fibras PET em dois solos tropicais arenosos granulometricamente semelhantes, porém, com composições químicas e estágios de evolução pedogenética diferentes, a fim de contribuir para uma melhor compreensão da interação entre os materiais e do comportamento geotécnico dos compósitos de solo-fibra PET.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é estudar o comportamento mecânico de dois solos tropicais reforçados com fibras de Polietileno Tereftalato (PET) distribuídas aleatoriamente na massa de solo.

1.1.2 Objetivos Específicos

Considerando o foco principal do estudo, têm-se como objetivos específicos:

- i. Estudar as características físicas, químicas e mineralógicas de ambos os solos;
- ii. Avaliar a inserção das fibras PET no comportamento mecânico dos solos, a partir de ensaios de compressão triaxial adensados não drenados;
- iii. Investigar o efeito do reforço na microestrutura dos solos por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste estudo foi subdividida em três partes. A primeira parte trata da técnica de estabilização e reforço de solos, em especial o reforço com fibras, apresentando alguns estudos envolvendo estes materiais no meio geotécnico. A segunda parte é relativa aos materiais utilizados na pesquisa, portanto são apresentados conceitos importantes sobre o PET, além de tópicos de âmbito ambiental e legal. Em sequência, é feita uma breve conceituação do processo de laterização dos solos e dos efeitos gerados por este processo. Por fim, a terceira parte é focada na apresentação de estudos envolvendo geocompósitos com materiais alternativos e sustentáveis, particularmente, os estudos com fibras de PET reciclado.

2.1 ESTABILIZAÇÃO E REFORÇO DE SOLOS

De acordo com Casagrande (2005), em muitas situações na engenharia geotécnica, o solo não atende totalmente ou parcialmente os requisitos de projeto. Como alternativa para viabilizar técnica e economicamente a obra, o engenheiro geotécnico pode remover o solo e substituí-lo por outro com melhores propriedades ou modificar e melhorar suas propriedades, criando um novo material com características de resistência e deformabilidade adequadas ao projeto da obra.

As propriedades de um solo podem ser alteradas por diferentes processos, como a compactação mecânica, estabilização por processos físico-químicos e o reforço de solos com a inclusão de elementos resistentes, como o geotêxteis, fibras, grelhas e tiras, por exemplo (Casagrande, 2005).

O conceito de reforço de solo foi primeiramente introduzido na década de 60 pelo engenheiro francês Henri Vidal que observou ganho significativo de resistência ao cisalhamento ao acrescentar um elemento de reforço na matriz do solo. Vidal patenteou uma de suas descobertas denominando de terra armada (Senez, 2016).

Com os avanços tecnológicos, diversas técnicas de reforço de solo foram desenvolvidas e são amplamente utilizadas atualmente, como o uso de geossintéticos, por exemplo. Também, existem técnicas de injeção de argamassa de baixa viscosidade (*Permeation Grouting* e *Compensation Grouting*), injeção de calda de cimento sob altas pressões (*Jet Grouting*), vibrocompactação, introdução de fibras, entre outras (Nogueira, 2010).

O processo de estabilização ou reforço de um solo também pode ser classificado, de acordo com Van Impe (1989), como:

- Estabilização temporária: limitada a um curto espaço de tempo, como congelamento de solos ou rebaixamento de nível d'água para execução de determinada fase da obra;
- Estabilização permanente sem adição: consiste em processos de compactação e/ou tratamento térmico, como compactação superficial ou profunda e a vibrocompactação;
- Estabilização permanente com adição de novos materiais: combina a compactação do solo junto com a introdução de um novo elemento, como misturas de solo-cimento, solo-cal, geossintéticos, materiais fibrosos, tiras metálicas, etc.

2.1.1 Materiais Compósitos

Segundo Andrade (2017), materiais compósitos são formados pela combinação de dois ou mais materiais, sendo estes de propriedades químicas e físicas diferentes que, ao serem misturados, formam um composto com propriedades particulares daquelas apresentadas com apenas um dos materiais.

Os materiais compósitos, no geral, são subdivididos em duas fases: a matriz e os elementos de reforço. A matriz é o constituinte contínuo, responsável por oferecer o meio de transferência do esforço externo aos elementos de reforço, que compõem a parte descontínua do compósito (Thomas, 2019).

Higgins (1994) classifica os materiais compósitos em dois grandes grupos: os particulados, nos quais se adiciona algum material à matriz em forma de partícula, e os fibrosos, objeto de estudo deste trabalho, no qual a inserção de fibras na matriz atua controlando a abertura e espaçamento de fissuras, distribuindo as tensões uniformemente na matriz.

Atualmente, o uso de fibras nos materiais compósitos é uma técnica amplamente utilizada e de grande importância tecnológica. Dentre suas vantagens, destacam-se o aumento da resistência mecânica e do módulo de elasticidade do compósito quando comparado com outros materiais de mesma densidade (Andrade, 2017).

No meio geotécnico, os materiais compósitos fibrosos são objetos de diversas pesquisas. Aliado à problemática da gestão de resíduos sólidos das cidades, diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos no campo da Geotecnia ambiental, estudando e avaliando o efeito de misturas de solos com materiais alternativos e sustentáveis, como resíduos de borracha de pneus (Silva Araújo *et al.*, 2021), fibras poliméricas e fibras de vidro recicladas (Valipour *et al.*, 2021), fibras de coco naturais (Gomes & Motta, 2022), entre outros.

2.2 SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS

O reforço de solo com fibras é uma técnica desenvolvida e empregada pela humanidade há muito tempo. A intercalação de solo e mantas de raízes foi uma técnica utilizada pelos mesopotâmios (1.400 a.C.) na construção da Pirâmide de Ziggurat e da Torre de Agar Quf, ambas existentes até hoje. Há indícios do uso desta técnica também em parte da Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas, no Peru, com uso de lã de lhama como reforço (Palmeira, 1992).

Em um contexto mais recente, Correia *et al.* (2015) citam diversos exemplos do uso de solos reforçados com fibras na engenharia geotécnica, como estabilização de subleito e sub-bases de pavimentos, melhoria na capacidade de suporte de solos, estabilidade de taludes, aterros sobre solos moles, controle da condutividade hidráulica do solo, melhoria da erosão, prevenção de *piping* e mitigação de rachaduras de retração.

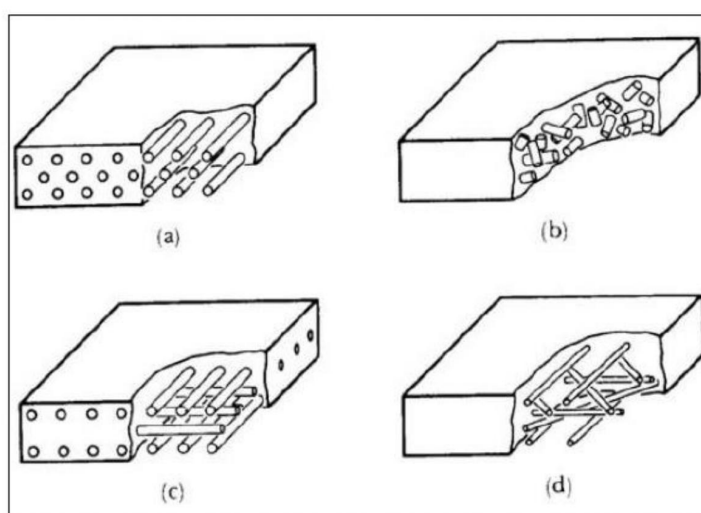
Com o avanço tecnológico, os materiais sintéticos substituíram as fibras vegetais degradáveis, dando origem a compósitos geotécnicos mais resistentes e duráveis. Estes materiais são conhecidos com geossintéticos e são classificados em geotêxteis, geogrelhas, geomalhas, geomembranas, tiras, fibras e geocompostos (Palmeira, 1992). Shukla (2017) explica que as fibras utilizadas em misturas de solo ou materiais similares (e.g. cinzas de carvão, resíduos de mineração, etc.) são usualmente denominadas de geofibras, podendo ser categorizada de diferentes formas.

As misturas de solo com fibras, foco deste trabalho, são denominadas, de acordo com Casagrande (2005), de fibrossolos e podem ser aplicadas em pavimentos, aterros sobre solos moles, estabilidade de taludes e em fundações superficiais.

Segundo Senez (2016), é comum de se associar o termo compósito no meio geotécnico aos estudos de reforço de solos com fibras, principalmente fibras oriundas de materiais recicláveis que tem por objetivo a redução dos impactos ambientais gerados pela produção de resíduos sólidos no meio urbano.

Os compósitos formados pela inclusão de fibras podem apresentar em sua estrutura fibras de características diferentes e tamanhos variados, podendo estar dispostas na matriz de forma aleatória ou ordenada (Bento, 2006). A Figura 1 ilustra diferentes formas de distribuição de fibras em uma matriz de um compósito.

Figura 1 - Diferentes formas de distribuição de fibras em uma matriz



Legenda: **a)** fibras contínuas e unidirecionais; **b)** fibras descontínuas de inserção aleatória; **c)** fibras contínuas ortogonais; **d)** fibras contínuas de inserção aleatória.

Fonte: Bento (2006).

Ao analisar a fissuração de um compósito fibroso, Bento (2006) explica que as diferentes características de cada tipo de fibra provocam diferentes interações fibra-matriz, diminuindo ou aumentando a energia global da fratura. No caso das fibras contínuas e unidirecionais, a fratura acontece por deslizamento (*debonding*) onde ocorre a deformação e escorregamento das fibras na matriz. Já nas fibras descontínuas, há a dissipação de energia no processo de arraste e destacamento dessas fibras, chamado de arrancamento (*pull-out*).

As fibras não impedem a formação de fissuras no compósito, no entanto, controlam sua propagação, aumentando a resistência à tração por consequência (Taylor, 1994). Para Bernardi (2003) e Hannant (1994), nos compósitos fibrosos as pontes constituídas pelas fibras mantêm as interfaces das fissuras juntas, melhorando

as propriedades mecânicas do compósito no estado de pós-fissuração, ou seja, aumentando sua resistência, deformação e tenacidade.

Assim, o desempenho dos compósitos reforçados com fibras, no geral, é controlado principalmente pelo teor e comprimento da fibra, pelas propriedades físicas da fibra e da matriz e pela aderência entre ambas.

2.2.1 Tipos de Fibras Utilizados como Reforço de Solos

As características de comportamento, as propriedades físicas, químicas e mecânicas de cada tipo de fibra, bem como seu processo de fabricação, estão diretamente ligadas ao comportamento do compósito. Além disso, a definição do tipo de fibra empregada depende fundamentalmente da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito final (Casagrande, 2005).

Tratando-se de fibras para reforço de materiais, além das características físicas e mecânicas desejadas, é importante que a fibra escolhida seja quimicamente neutra e não deteriorável, não esteja sujeita ao ataque de fungos, bactérias ou álcalis e não seja prejudicial à saúde humana (Casagrande, 2005).

Casagrande (2005) classifica as fibras utilizadas em reforço de solos (geofibras) em quatro categorias: fibras naturais, fibras minerais, fibras metálicas e fibras de poliméricas.

a) Fibras naturais

Como citado anteriormente, indícios históricos apontam que as fibras naturais foram as primeiras fibras empregadas como reforço pela humanidade. As fibras naturais podem ter origem vegetal ou animal, como por exemplo as fibras de coco, juta, bambu, sisal, bananeira, algodão, talos de milho, lascas de madeira, pelos de animais, etc. (Shukla, 2017).

As fibras de coco, por exemplo, possuem boa resistência à tração e são capazes de manter essa propriedade mesmo em condições úmidas. Além disso, por possuírem alto teor de lignina (~40%), que é um polímero de hidrocarboneto complexo, as fibras de coco se degradam lentamente mesmo em ambiente salino (Shukla, 2017). Gomes & Motta (2022) estudaram a adição de fibras de coco no comportamento mecânico e hidráulico de um solo típico do Vale do Paraíba, no estado

de São Paulo. Foi observado que a adição das fibras aumentou a capacidade do solo de absorver deformações, alterando seu comportamento de frágil para dúctil, sendo assim uma ótima forma de destinar os resíduos da produção de coco na estabilização de taludes, por exemplo, evitando rupturas súbitas que geralmente envolvem grandes danos.

Thomas (2019) afirma que o grande ponto negativo da utilização de fibras naturais se dá pelo fato de possuírem pequena durabilidade e alta absorção de água, que colabora para a ocorrência de fissurações por retração diferencial.

Quando inseridas no solo, as fibras naturais tendem a perder suas características de resistência progressivamente, sendo a taxa de perda condicionada ao tipo de fibra utilizada. No entanto, é possível minimizar o problema da biodegradação das fibras naturais por meio de tratamentos adequados e a um custo relativamente baixo, tornando-as bons aditivos para melhorar o comportamento de solos fracos, principalmente nos casos onde a durabilidade da resistência da fibra não é um problema, como no controle de erosão e obras temporários (Shukla, 2017).

b) Fibras minerais

As fibras minerais são originárias das rochas e são basicamente compostas por silicatos. Entre elas, as mais conhecidas são as fibras de carbono, de vidro e de amianto (Senez, 2016).

As fibras de carbono são fibras leves e, por possuírem forte ligação entre os átomos de carbono, atingem uma resistência à tração em torno de 5.500 MPa e módulo de elasticidade próximo de 420 GPa, características que garantem grande aderência com a matriz do compósito. As fibras de vidro possuem resistência à tração que varia de 1.500 a 4.500 MPa e módulo de elasticidade na ordem de 87 GPa, porém são altamente susceptíveis ao ataque de álcalis. Já as fibras de amianto, apesar de também possuírem alta resistência à tração e elevado módulo de elasticidade (1.000 MPa e 160 GPa, respectivamente), quando cortadas, liberam micropartículas que atacam os alvéolos pulmonares, causando problemas respiratórios ao homem, ocasionando sua proibição em muitos países (Casagrande, 2005; Senez, 2016).

c) Fibras metálicas

No grupo das fibras metálicas, destacam-se as fibras de aço, objeto de diversas pesquisas que buscaram melhorar as propriedades mecânicas dos materiais de construção.

Podem ser produzidas de diferentes formatos a fim de se aumentar a aderência com a matriz e possuem resistência à tração na ordem de 1.100 MPa e módulo de elasticidade de 200 GPa. Geralmente, a ruptura dos compósitos com este tipo de fibra é associada ao arrancamento da fibra e não à sua ruptura.

A principal desvantagem das fibras de aço é que podem apresentar problemas de corrosão se não forem devidamente tratadas (Taylor, 1994).

d) Fibras poliméricas

As fibras poliméricas são sintetizadas a partir de polímeros e, de acordo com Casagrande (2005), é a família de fibras mais promissora no emprego de reforço de solos. Por diferenças em suas estruturas químicas, os polímeros possuem diferentes comportamentos e dão origem a diferentes tipos de fibras, entre elas destacam-se as fibras de polipropileno, de polietileno, de poliéster e de poliamida.

A Tabela 1 apresenta algumas propriedades das fibras poliméricas citadas anteriormente, todas constituídas por polímeros termoplásticos e, portanto, recicláveis. Também, importante ressaltar que estas fibras são quimicamente inertes e não prejudicam à saúde humana.

Tabela 1 - Densidade e propriedades mecânicas das fibras poliméricas

Fibra polimérica	Densidade (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Polipropileno (PP)	0,87 – 1,01	400	8,0
Polietileno (PE)	0,89 – 0,97	240	1,1
Poliéster (PET)	1,38 – 1,41	130 – 880	4,0 – 15,0
Poliamida (PA)	1,03 – 1,15	3.500	128,0

Fonte: German *et al.* (2006); Senez (2016).

As fibras de polipropileno (PP) possuem grande flexibilidade e tenacidade em função de sua constituição e elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis. Essas características somadas às suas propriedades mecânicas, apresentadas na Tabela 1, conferes aos compósitos incorporados com as fibras de polipropileno elevada resistência ao impacto (Taylor, 1994).

As fibras de polietileno (PE) possuem baixo módulo de elasticidade, alta resistência aos álcalis e elevada durabilidade, porém apresentam maiores deformações de fluência. Assim, no caso de serem utilizadas para suportar altas tensões permanentes em compósitos fissurados, ocorrerão elongações e deflexões consideráveis ao longo do tempo (Hannant, 1994).

As fibras de poliéster possuem aspecto similar às fibras de polipropileno e possuem aplicações similares. Porém, por serem constituídas de poliéster, isto é, um polímero de outras características químicas, possuem maior densidade, rigidez e resistência quando comparadas às fibras de polipropileno. O poliéster mais conhecido atualmente é o polietileno tereftalato (PET), foco de estudo deste trabalho (Casagrande, 2005).

As fibras de poliamida (PA) apresentam altas resistências e elevados módulos de elasticidade, alcançados durante o processo produtivo onde as moléculas dos polímeros são esticadas e reforçadas. A fibra poliamida aromática de maior sucesso no mercado é o Kevlar (Taylor, 1994).

2.2.2 Classificação das Fibras Quanto ao Comprimento

Na área dos compósitos fibrosos, as fibras também são classificadas, de acordo com seu comprimento, em fibras curtas e longas/contínuas. Fibras com comprimentos menores que 76,2 mm são usualmente denominadas como fibras curtas, enquanto que fibras maiores que 76,2 mm de comprimento são classificadas como longas ou contínuas, pois quando inseridas na matriz (e.g. solo) se estendem por toda sua massa (Shukla, 2017).

O mecanismo de transferência de tensões é diferente em compósitos reforçados com fibras curtas e contínuas. Nos compósitos reforçados com fibras curtas, as tensões aplicadas são transferidas primeiramente à matriz e depois às fibras, começando pelas extremidades e indo em direção ao centro. Já nos compósitos reforçados com fibras contínuas, o esforço aplicado é transferido à matriz e às fibras

ao mesmo tempo (Shukla, 2017).

Na indústria, as fibras também são descritas em termos de densidade de massa linear (kg/m), que geralmente é expressa em denier (gramas por 9 km de fibra) ou tex (gramas por 1 km de fibra). Assim, 1 denier equivale a 1 g/9 km, 1 tex a 1 g/km e 1 tex é referente a 9 denier (Shukla, 2017).

Denier é uma medida indireta do diâmetro da fibra. Por exemplo, se 9 km de filamentos de PET pesam 120 g, são classificados como filamentos de 120 deniers. Shukla (2017) explica que o denier da fibra influencia diretamente nas propriedades da fibra, como resistência à tração, módulo de elasticidade, alongamento/deformação na ruptura, tenacidade, etc.

2.2.3 Mecanismos de Interação Solo-Fibra

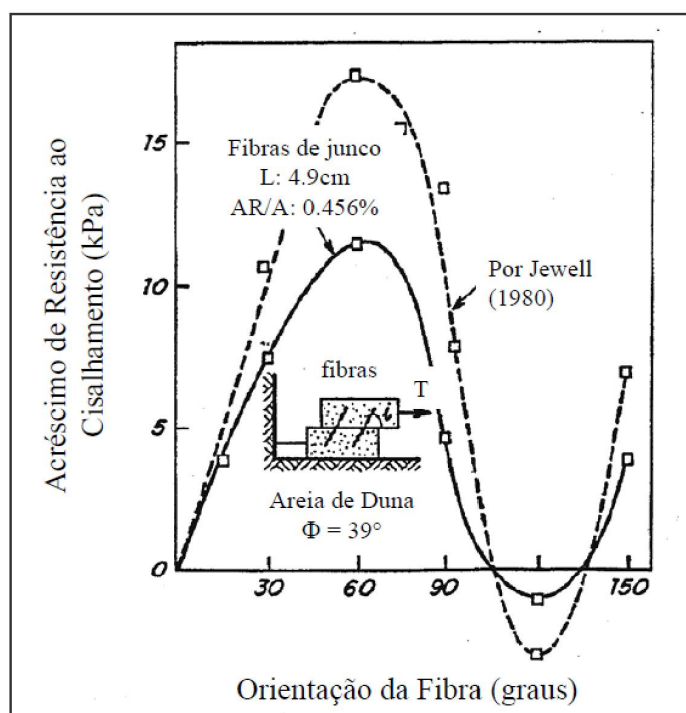
São diversas as combinações de variáveis que alteram significativamente os mecanismos de interações do compósitos solo-fibra, tornando o estudo do comportamento destes compósitos bastante complexo.

Nesse sentido, é comum que as pesquisas envolvendo os compósitos solo-fibra foquem em comparar o comportamento dos compósitos com os solos não reforçados, por meio de seus respectivos parâmetros de resistência. No entanto, Casagrande (2005) ressalta que também é preciso identificar as mudanças geradas na estrutura do solo com a inserção das fibras, pois assim é possível avaliar até que ponto o comportamento mecânico dos solos reforçados pode ser explicado pelas mudanças nos parâmetros usualmente empregados para solos não reforçados.

Gray & Ohashi (1983) desenvolveram um modelo teórico para prever o comportamento de uma areia reforçada com fibras. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto com areia, nos estados fofo e denso, reforçada com fibras naturais, sintéticas e metálicas. Os resultados mostraram aumento na resistência ao cisalhamento de pico e redução da queda pós-pico nos compósitos com fibras. Também, foi possível observar a existência de uma tensão de confinamento crítica onde, abaixo desta, as fibras eram arrancadas e, acima desta, as fibras eram alongadas. Quanto ao comprimento das fibras, os resultados mostraram ganho de resistência com o aumento do comprimento das fibras, porém até certo limite, a partir do qual, este efeito não foi mais observado.

O modelo desenvolvido por Gray & Ohashi (1983) também considera a orientação das fibras com relação à superfície de cisalhamento. A Figura 2 traz os resultados dos ensaios realizados pelos autores, onde observa-se maior contribuição de resistência para inclinação de 60° em relação ao plano de ruptura e redução de resistência ao cisalhamento para a inclinação de 120°.

Figura 2 - Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra



Fonte: Adaptado de Gray & Ohashi (1983).

De acordo com Maher & Gray (1990), é de maior interesse científico e tendência de trabalhos futuros, estudar a técnica de reforço empregando as fibras aleatoriamente distribuídas na matriz. Desta maneira, minimiza-se o surgimento de qualquer tipo de anisotropia e não há indução de planos preferenciais de fraqueza, que podem ser desenvolvidos em sistemas de reforço orientados. A massa de solo reforçada com fibras distribuídas aleatoriamente utiliza processos tradicionais de misturas de solo estabilizado com cimento, cal ou outro aditivo e o mesmo também serve para o processo de compactação.

Freitag (1986) estudou os efeitos da inclusão de fibras na resistência à compressão simples de um solo residual de calcário compactado em diferentes teores de umidade. Inicialmente a proposta era trabalhar com três tipos de fibras, no entanto,

uma teve de ser descartada pela dificuldade de misturá-la com o solo. Assim, foram avaliadas misturas com fibras de polipropileno de 0,20 mm e 0,10 mm de diâmetro, a última conhecida como *Fibermesh*. As fibras tinham 20 mm de comprimento e o teor adicionado foi de 1% em volume. Os resultados indicaram aumento da resistência à compressão não confinada, principalmente para teores de umidade próximos à ótima e no ramo úmido da curva de compactação. As curvas tensão x deformação mostraram que o solo reforçado rompe em uma deformação bem superior à do solo não reforçado, sendo capaz de absorver maior energia de deformação.

Nataraj *et al.* (1996) realizaram uma série de ensaios em um solo arenoso e outro argiloso reforçados com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente. A adição das fibras não alterou significativamente os parâmetros de compactação do solo, no entanto observou-se aumento da resistência ao cisalhamento das areias, condicionado ao aumento no teor de fibra do compósito. Independente do solo estudado, foi observado aumento na resistência à compressão não confinada e nos valores de CBR (*California Bearing Ratio*) com a inclusão das fibras.

Heineck (2002) estudou o comportamento hidráulico e mecânico de materiais compósitos geotécnicos para utilização em barreiras hidráulicas. As amostras eram compactadas de solo, cinza, areia e caulim junto com fibras de polipropileno de 24 mm de comprimento e bentonita. A análise feita pela autora indicou a utilização do compósito (caulim e fibras) como *liners* de cobertura ou de fundo em aterros sanitários, até mesmo para resíduos considerados perigosos.

O estudo realizado por Vendruscolo (2003) buscou verificar a influência da adição de fibras no comportamento de um solo arenoso cimentado e não cimentado por meio de ensaios triaxiais. Os resultados levaram o autor a concluir que as propriedades mecânicas do compósito estão condicionadas às propriedades da matriz, observando efeito mais evidente de ganho de resistência para maiores comprimentos e maiores teores de fibras. O autor também constatou a influência do diâmetro das fibras e da granulometria do solo na resistência de pico e última do material compósito.

Consoli *et al.* (2004) avaliaram o comportamento de uma areia cimentada e não cimentada reforçada com fibras de vidro, poliéster e de polipropileno. As fibras de poliéster e de vidro geraram redução na rigidez, aumento no ângulo de atrito interno de ambas matrizes (cimentada e não cimentada) e redução do intercepto coesivo, sendo esta mais acentuada para a matriz cimentada. Já as fibras de polipropileno

reduziram drasticamente o índice de fragilidade da areia cimentada, a ponto de alterar o modo de ruptura de frágil para dúctil, para o maior comprimento de fibra estudado (36 mm).

Os resultados obtidos por Consoli *et al.* (2004) vão de encontro aos estudos conduzidos por Ulbrich (1997) e Consoli *et al.* (1998), em que os resultados mostraram que as fibras relativamente rígidas (vidro e PET) exerceram efeito mais pronunciado na resistência de pico, enquanto as fibras relativamente flexíveis (polipropileno) exerceram maior efeito no modo de ruptura e comportamento último.

Consoli *et al.* (2009) realizaram uma série de testes triaxiais drenados em amostras de areia reforçadas com fibras de polipropileno aleatoriamente distribuídas, variando o comprimento (12, 24, 36 e 50 mm) e o diâmetro (0,023 e 0,1 mm) das fibras. Os resultados mostraram que fibras de maiores comprimentos produziram compósitos de maior resistência e com maior capacidade de absorver deformações, apresentando viabilidade desse geomaterial para aterros sobre solos moles. No entanto, fibras muito finas (como 0,023 mm de diâmetro) e maiores que 24 mm de comprimento, emaranham-se durante a mistura, reduzindo significativamente a contribuição das fibras no comportamento do solo.

Os resultados dos estudos comprovam a dificuldade de se estabelecer regras de comportamento, sem o conhecimento prévio dos materiais envolvidos. Os principais fatores a serem analisados nos compósitos geotécnicos com fibras, segundo Casagrande (2005), são: teor de fibra, comprimento das fibras, a orientação das fibras, rugosidade, módulo de elasticidade, tensão confinante aplicada e modo de carregamento.

2.3 POLIETILENO TEREFALATO (PET)

O Polietileno Tereftalato, comumente conhecido como PET, é um polímero termoplástico da classe dos poliésteres. Nesta classe, a ligação característica é a ligação éster (-CO-O-) que, dependendo do material empregado, pode gerar cadeias saturadas, formando os termoplásticos, ou insaturadas, dando origem aos termofixos (Canevarolo Júnior, 2006).

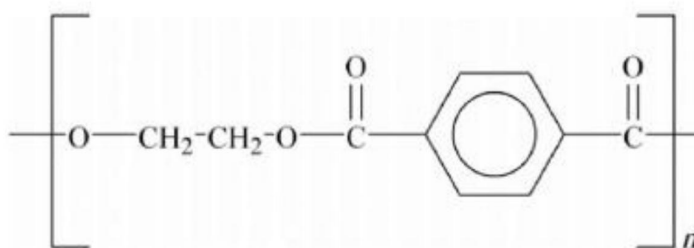
A diferença entre um polímero termoplástico e um polímero termofixo é a capacidade de ser reciclado. Sob o aumento da temperatura e pressão, ambos amolecem e fluem, podendo ser moldados nestas condições. No entanto, os

termoplásticos podem ser liquefeitos e solidificados novamente inúmeras vezes sem perder suas propriedades físicas, já os termofixos formam ligações cruzadas entre as cadeias e, após se solidificarem, não podem ser remodelados, logo, não podem ser reciclados (Canevarolo Júnior, 2006).

O PET foi desenvolvido em 1941 através da reação entre dois monômeros (ácido tereftálico e etilenoglicol), apresentando alta temperatura de fusão (~265 °C) e alta estabilidade hidrolítica por conta dos anéis aromáticos na cadeia principal (Romão *et al.*, 2009).

Na época, devido a seu alto peso molecular, o PET foi reconhecido como tendo grande potencial para aplicações como fibra e, somente na década de 60, com o filme de PET biorientado, passou a ter aceitação para acondicionamento de alimentos (Mano & Mendes, 1999). A Figura 3 apresenta a estrutura química do PET.

Figura 3 - Estrutura química do PET



Fonte: Singh *et al.* (2021).

Segundo Romão *et al.* (2009), por possuir um baixo custo de produção e excelente relação entre suas propriedades mecânicas e térmicas, o PET é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo. Suas principais aplicações são: fibras têxteis (67%), embalagens processadas por injeção-sopro (24%), filmes biorientados (5%) e polímeros de engenharia (4%). No Brasil, sua principal aplicação é na indústria de embalagens (71%), onde 32% do mercado brasileiro de polímeros envolve diretamente o uso do PET para embalagens de bebidas carbonatadas.

2.3.1 Legislação Brasileira sobre o Uso do PET Reciclado

No Brasil, as embalagens pós-consumo de PET são classificadas como resíduos sólidos, sendo sua disposição final e/ou reciclagem objetos da Lei nº 12.305 de Agosto de 2010, intitulada Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Conforme Romão *et al.* (2009), desde 1998 com a publicação da portaria nº 987 da Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde, é possível a utilização da resina de PET pós-consumo na fabricação de embalagens multicamadas para bebidas carbonatadas não alcoólicas. Ainda assim, há uma discussão em relação ao uso de polímeros reciclados pós-consumo para embalar alimentos, bebidas e fármacos, devido à possibilidade de contaminação dos produtos.

Em 26 de março de 2008, a RDC (Resolução da Diretoria Colegiada) nº 20 regulamentou o uso do PET-PCR grau alimentício (PET pós-consumo reciclado de grau alimentício) na fabricação de embalagens que entrarão em contato direto com alimentos, desde que validado pelo *challenge test*. Esse teste analisa a eficiência de limpeza do PET durante o processo de reciclagem e deve ser devidamente registrado perante a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) para liberação do uso do PET-PCR.

Portanto, sem o procedimento de descontaminação adequado, a legislação brasileira limita o uso do PET reciclado, não podendo ser utilizado para a fabricação de embalagens que estarão em contato direto com bebidas, alimentos, medicamentos e material hospitalar, devido ao risco de contaminação (Spinacé & De Paoli, 2005).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sob NBR 13230 (2008), estabelece símbolos para a identificação dos termoplásticos utilizados na utilização de embalagens e recipientes, tarefa fundamental para a viabilização econômica e industrial da reciclagem. Esses símbolos padronizados, apresentados na Figura 4, são normalmente aplicados em alto relevo na parte inferior das embalagens.

Figura 4 - Simbologia para plásticos recicláveis



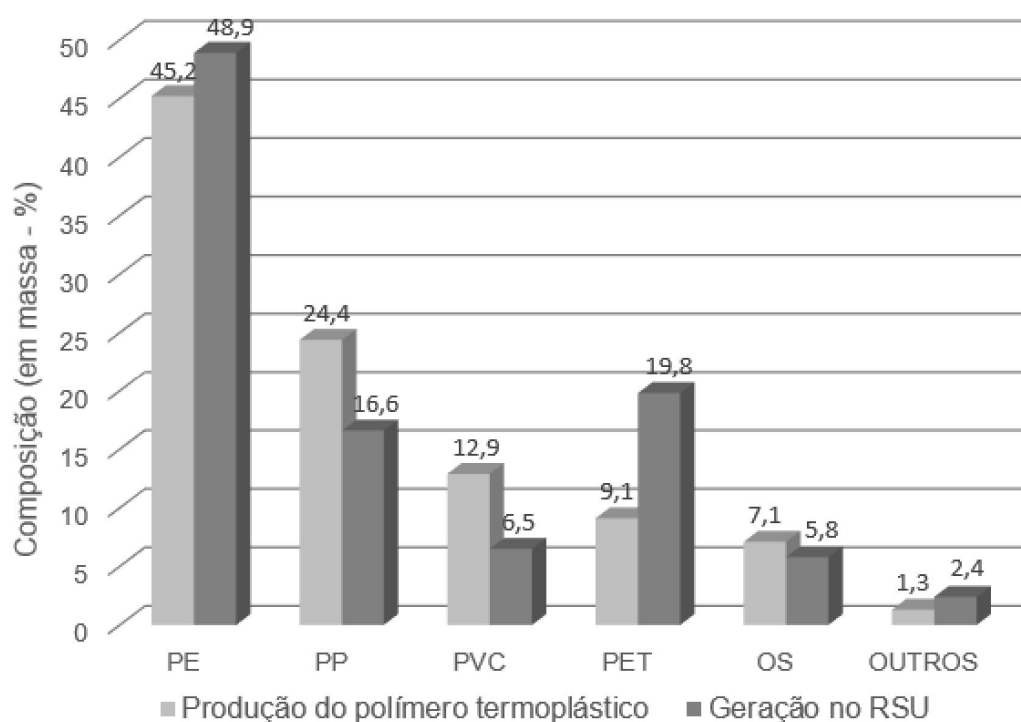
Legenda: PET – Polietileno Tereftalato; PEAD – Polietileno de Alta Densidade; PVC – Policloreto de Vinila; PEBD – Polietileno de Baixa Densidade; PP – Polipropileno; PS – Poliestireno.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 13230, 2008.

2.3.2 Reciclagem e Impactos Ambientais do PET

Segundo Romão *et al.* (2009), a participação dos polímeros na composição do resíduo sólido urbano (RSU) cresceu significativamente nas últimas décadas. Em 2005, os polímeros representavam cerca de 20% (em massa) dos RSU coletados no Brasil e, apesar da produção de PET no Brasil corresponder a 9,1% da produção total de polímeros no Brasil, a fração de PET no RSU correspondente aos polímeros era de aproximadamente 20%, como demonstrado na Figura 5.

Figura 5 - Composição relativa da produção nacional de polímeros termoplásticos e geração no RSU brasileiro em 2005



Fonte: Adaptado de Romão *et al.*, 2009.

Diferentemente do Polipropileno (PP) e do Policloreto de Vinila (PVC), ambos polímeros termoplásticos utilizados na fabricação de produtos que possuem maior tempo de vida, o PET e o Polietileno (PE) são utilizados em produtos descartáveis. Isto faz com que eles representem uma porcentagem muito maior nos aterros sanitários quando comparado a outros polímeros termoplásticos, como observa-se na Figura 5.

No geral, devido à variedade de aplicações e longo tempo de degradação, os polímeros são considerados grandes passivos ambientais. No entanto, os problemas ambientais não são causados pelos polímeros e sim pelo seu descarte inadequado. Assim, a solução ideal para minimizar os impactos ambientais dos polímeros é fazer a reciclagem sistemática destes materiais (Romão *et al.*, 2009).

Segundo Romão *et al.* (2009), a reciclagem de polímeros é classificada em quatro categorias: primária e secundária, conhecidas como reciclagem mecânica; terciária, também chamada de reciclagem química; e quaternária, ou reciclagem energética. A diferença entre a reciclagem primária e secundária é que na primeira são utilizados polímeros pré-consumo, enquanto a segunda utiliza polímeros pós-consumo.

No Brasil, a principal categoria de reciclagem é a secundária, devido principalmente ao baixo investimento necessário para instalação da planta de reciclagem, mão-de-obra barata, bem como ao grande volume de polímeros pós-consumo produzido no país (Spinacé & De Paoli, 2005).

O processo mecânico de reciclagem do PET, de acordo com Melo (2004), é composto por três etapas: coleta e separação, revalorização e transformação. Após a coleta das embalagens PET, elas são separadas por cor e prensadas, reduzindo seu volume e facilitando o transporte. A separação por cor garante uniformidade nos produtos do processo de reciclagem, facilitando sua aplicação no mercado. A fase de revalorização ocorre quando as garrafas são moídas, ganhando valor no mercado. O produto final desta etapa é o floco (ou *flake*) de PET, o qual pode ser utilizado diretamente na fabricação de resina reciclada. A transformação é a fase na qual os flocos são transformados em um novo produto, fechando o ciclo.

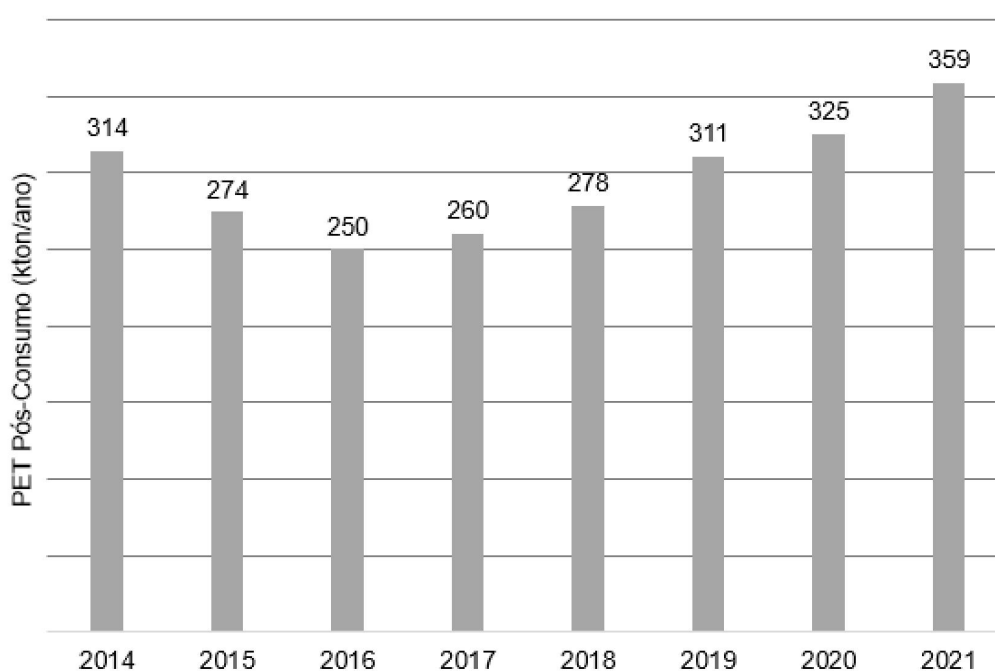
Na indústria têxtil, os flocos são utilizados para a produção de fios, tecidos e diversas confecções, pela sua similaridade com o poliéster. Já o pó de PET não possui uma abordagem explícita quanto aos processos de produção. É definido como um resíduo do processo de reciclagem das garradas PET, sendo um material reduzido a tamanhos micrométricos, abrangendo faixas abaixo 0,592 mm (Melo, 2004).

De acordo com o 12º Censo da Reciclagem do PET no Brasil, desenvolvido pela ABIPET em 2021, 359 mil toneladas de PET pós-consumo foram recicladas (Figura 6), o que corresponde a 56,4% do total de embalagens PET descartadas pelos consumidores. Desse total, 69% das embalagens recicladas vêm de comerciantes de recicláveis, 15% das cooperativas, 4% da coleta seletiva das prefeituras municipais,

2% de catadores independentes e 10% de outros meios.

Fagundes *et al.* (2019) e Romão *et al.* (2009) ressaltam que apesar do Brasil se destacar na reciclagem mundial de PET, é preciso resolver pontos essenciais que ainda impedem o crescimento da reciclagem no país. O maior problema está relacionado à alta carga tributária sob a matéria-prima reciclada, onde o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) reciclados de 12% supera o cobrado sobre a resina virgem, de 10%.

Figura 6 – Volume de PET pós-consumo reciclado no Brasil



Fonte: Adaptado de ABIPET, 2021.

Para Coelho (2010), uma das principais barreiras ainda para o bom funcionamento do sistema de reciclagem do PET é o consumidor, que por falta de conhecimento das vantagens e do valor econômico que traz o reaproveitamento do material, descarta as embalagens junto ao resíduo normal.

Assim, as embalagens de PET não-recicladas vão para os aterros sanitários, comprometendo a capacidade do aterro e reduzindo sua vida útil. Quando descartadas incorretamente, provocam entupimento de bueiros e alagamento de cidades nos dias de chuvas intensas, além de serem as são grandes responsáveis pela contaminação e redução da biodiversidade dos oceanos.

Singh *et al.* (2021) citam os benefícios da reciclagem do PET, destacando, além

de diversas questões ambientais, a geração de renda e empregos, a menor exploração de recursos naturais e a grande economia energética, que pode chegar em até 60% quando comparado a produção de materiais com plástico virgem.

2.4 SOLOS TROPICAIS

Solos tropicais são solos residuais e/ou transportados de regiões de clima tropical ou subtropical cujo processo de formação envolve, além da simples decomposição da rocha, transformações químicas-mineralógicas e estruturais (Carvalho *et al.*, 2015). Em outras palavras, estes solos estão sujeitos a intenso intemperismo químico relacionado ao clima da região.

O principal agente do intemperismo químico é a água da chuva. Considerada neste contexto como uma solução de alteração, essa água, rica em O_2 , interage com o CO_2 da atmosfera, tornando-se acidificada. Em contato com essa água, os minerais da rocha são submetidos a diversas reações químicas, que dependem da composição química dos minerais da rocha e das condições onde elas se processam, considerando efeitos do clima, relevo, presença de organismos e tempo (Toledo *et al.*, 2009).

O resultado destas reações dá origem aos minerais secundários que constituem as formações superficiais. Na reação, os minerais primários são aqueles presentes na rocha mãe, como o quartzo, feldspato, mica, piroxênio, etc. Já os minerais secundários são aqueles formados pela recombinação de íons durante a reação de intemperismo nos minerais primários, os quais podem ser classificados como neoformados ou transformados.

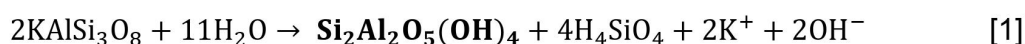
Conforme Toledo *et al.* (2009), os minerais neoformados resultam da precipitação de substâncias dissolvidas nas águas que percolam o perfil, como os óxi-hidróxidos de ferro e alumínio. Já os minerais transformados são formados pela interação entre as soluções de percolação e os minerais primários, modificando sua composição química, porém, preservando parcialmente sua estrutura, como no caso das micas (filossilicatos primários) que alteram-se em argilominerais (filossilicatos secundários).

A solução de lixiviação é a água da chuva cuja composição foi modificada pelas reações de intemperismo. As principais reações químicas que ocorrem no intemperismo químico são de hidratação, hidrólise, oxidação, carbonatação e

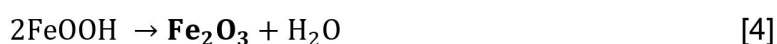
complexação. Dentre elas, a reação mais importante nos climas tropicais é a hidrólise (Toledo *et al.*, 2009).

Neste sentido, a hidrólise se dá com a quebra das ligações químicas entre os elementos que constituem o mineral e os libera na água em forma de cátions e ânions, possibilitando que esses elementos sejam removidos pela drenagem ou recombinados, formando novos minerais.

Assim, além da presença de quartzo na camada superior de solos tropicais evoluídos pedologicamente, com uma drenagem eficiente, parte dos cátions presentes nos minerais primários são removidos para a solução de lixiviação, em que o silício se recombina com o alumínio, formando a caulinita ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), um argilomineral do tipo 1:1, junção de uma folha tetraédrica de silício com uma folha octaédrica de alumínio. A Equação 1 demonstra o exposto considerando a transformação do feldspato ortoclásio em caulinita.



Haverá ainda a presença de minerais secundários formados pelos elementos químicos menos móveis (Fe e Al), originando os óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, os quais apresentam efeitos cimentantes nos grãos e partículas do solo. Produtos comuns gerados desse processo são a gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), goethita (FeOOH) e hematita (Fe_2O_3), a partir das reações de hidrólise total do feldspato (Equação 2), piroxênio (Equação 3) e desidratação da goethita (Equação 4).



Estas reações têm papel determinante em várias das propriedades dos solos que, mais tarde, serão formados pela reorganização dos minerais secundários. Em seu estado natural, os solos tropicais encontram-se geralmente não saturados e com elevado índice de vazios, portanto, possuem baixa capacidade de suporte quando não compactados (Carvalho *et al.*, 2015).

Neste sentido, a compactação tem efeito positivo nos solos tropicais, uma vez que o processo aumenta a densidade do solo, reduzindo seu índice de vazios, melhora a estabilidade do solo, evitando movimentos indesejados, e aumenta sua capacidade de carga.

Dada as particularidades dos solos tropicais quando comparados a solos formados em regiões de climas temperados, tem-se a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) para classificação dos solos tropicais, desenvolvida no Brasil, uma vez que as classificações tradicionalmente utilizadas da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), ambas desenvolvidas em regiões de clima temperado, se mostraram incompatíveis para alguns solos brasileiros (Prass *et al.*, 2019).

Os procedimentos tradicionais adotados para caracterização e classificação dos solos baseiam-se no uso do gráfico de plasticidade, o qual utiliza como características básicas o limite de liquidez (LL), o limite de plasticidade (LP) e a granulometria. Nogami e Villibor (1994) tratam de algumas limitações do uso da carta de plasticidade para classificação dos solos tropicais:

- i. Os valores das propriedades nos solos tropicais variam com a destruição dos torrões ou agregados, e não se fixou qual o critério mais apropriado: se a destruição total dos agregados ou apenas parcial. Sendo assim, um solo laterítico, como o latossolo roxo, por exemplo, pode variar significativamente os valores das propriedades índices conforme o grau de destruição dos agregados, comprometendo a classificação deste solo que depende dos valores de LL e LP;
- ii. O gráfico de plasticidade não consegue distinguir os solos de comportamento laterítico e não laterítico. Portanto os mesmos valores de LL e LP podem reunir solos de propriedades e comportamentos diferentes;
- iii. As classificações tradicionais hierarquizam os solos com valores pequenos de LL e LP, baixa porcentagem de finos e baixo índice de grupo (IG) como superiores aos demais solos com maiores valores de índice de grupo na avaliação de desempenho. Assim, de acordo com esta classificação, solos arenosos, areno-siltosos e arenoargilosos, apresentam desempenho superior como matéria-prima em obras de

pavimentação, já os solos siltosos e argilosos (com alto IG) são considerados inferiores quando comparados aos demais solos;

- iv. A presença de mica e de macrocristais de caulinita e/ou haloisita, frequente em solo saprolíticos, modifica os valores de LL, indeferindo na classificação do solo.

De acordo com Carvalho *et al.* (2015), o estudo do comportamento dos solos tropicais é de grande importância na área de pavimentação. Em alguns casos, as interações solo-atmosfera podem deteriorar o pavimento devido a expansão do solo durante o período de chuvas intensas e contração em períodos de seca. Ainda conforme os autores, para resolver problemas como este, é preciso conhecer os efeitos da sucção nestes solos ou tentar técnicas de reforço com fibras, como mostra o estudo de Sales (2011) com fibras naturais. Técnicas tradicionais de estabilização química com cimento e/ou cal podem não ser eficazes nestes solos dependendo das condições de contorno.

2.5 SOLO REFORÇADO COM FIBRAS PET

Como previamente discutido, atualmente há um grande número de pesquisas no campo da Geotecnia Ambiental buscando formas de se inserir resíduos no solo, buscando melhorar suas propriedades mecânicas e evitando que o resíduo seja simplesmente descartado nos aterros sanitários. No entanto, nota-se a grande maioria dos trabalhos estão focados apenas no comportamento mecânico, deixando de avaliar como as características da matriz do compósito podem influenciar na interação com o resíduo.

Soncim *et al.* (2004) sugeriu a utilização do material vindo da reciclagem do PET como material alternativo nas obras de reforço de sub-base de pavimentos. Ao adicionar 30% em peso do material a um solo considerado inapropriado para utilização em base e sub-base de pavimento, este modificou sua classificação e passou a ser considerado apropriado, segundo a *American Association of State Highway and Transportation Officials*, que controla e classifica os solos para pavimentação.

Silva (2007) realizou ensaios de CBR em amostras de solo siltoso reforçado com fibras de PET e relatou que a utilização das fibras melhorou a capacidade de suporte do material. O autor também concluiu que houve variação do peso aparente do solo compactado dependendo do teor e tipo de fibra utilizado. Nas envoltórias de

cisalhamento, foi observado que a adição das fibras gerou redução da tensão máxima cisalhante obtida para baixos níveis de tensão, entretanto com o aumento da tensão de confinamento, a resistência do compósito solo-fibra de PET tendeu a aumentar.

Botero *et al.* (2015) estudaram o comportamento mecânico de solo siltoso reforçado com fibras de PET distribuídas aleatoriamente no solo e variado o teor de fibra em 0,0% (solo puro), 0,1%, 0,3%, 0,6% e 1,0%. Por meio de ensaios triaxiais UU (não consolidado e não drenado), os autores concluíram que as amostras reforçadas apresentaram comportamento dúctil, além de um aumento no parâmetro do intercepto coesivo (c), quando comparado às amostras não reforçadas.

Os autores citados acima, baseando-se nos resultados de seus ensaios, validaram o uso das fibras de PET como elemento de reforço, especialmente para casos em que o solo precise suportar grandes deformações sem a formação de rachaduras, como em obras de aterros sanitários, depósitos de tratamento de esgoto, barragens, etc., prevenindo o vazamento de água ou algum contaminante.

Louzada (2015) avaliou o comportamento mecânico de três solos (solo argiloso, arenoso e bentonita) reforçados com PET em pó e em *flakes*, por meio de ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados e ensaios de cisalhamento direto. Os ensaios triaxiais foram realizados nas amostras de solo argiloso compactado com teores de adição de pó de PET de 0, 10, 20 e 30% e de flakes de PET de 3,0 e 5,0%, por peso de solo seco, enquanto as amostras de areia foram feitas a uma densidade relativa de 50% e de teor de umidade de 10%, adicionadas com 0, 10 e 20% de pó de PET, também em relação ao peso seco do solo. As tensões confinantes avaliadas para ambas as amostras foram de 50 kPa, 150 kPa e 300 kPa. Para a bentonita foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras com adição de 0 e 30% de pó de PET e 3,0 e 5,0% de PET em flocos, por peso seco de solo. A autora concluiu que os resíduos utilizados nas misturas apresentaram comportamento satisfatório, aumentando ou mantendo os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Além disso, observou-se que o teor de adição de PET e o nível de confinamento têm influência sobre o comportamento mecânico das misturas.

Ferreira *et al.* (2021) avaliaram a influência das fibras de PET no comportamento mecânico de um solo arenoso por meio de ensaios triaxiais consolidados e drenados (CD) e ensaios de placa em escala reduzida. No estudo, foram avaliadas fibras de dois títulos diferentes (1,4 dtex e 3,3 dtex), com teor de fibra da mistura fixo em 0,5%, em relação a massa seca. Os resultados mostraram melhora

no comportamento tensão-deformação, aumento de resistência do solo e redução das deformações tanto na direção vertical como horizontal, aumentando a capacidade de suporte da areia ensaiada em aproximadamente 4 vezes. Resultados mais satisfatórios foram obtidos para a fibra de 1,4 dtex com aumento significativo do ângulo de atrito interno ($31,9^\circ$ para $44,3^\circ$). Também, os autores constataram redução de recalques gerados com a inclusão das fibras, observando decréscimo de 80% no recalque para uma tensão de 400 kPa.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para desenvolver esta pesquisa.

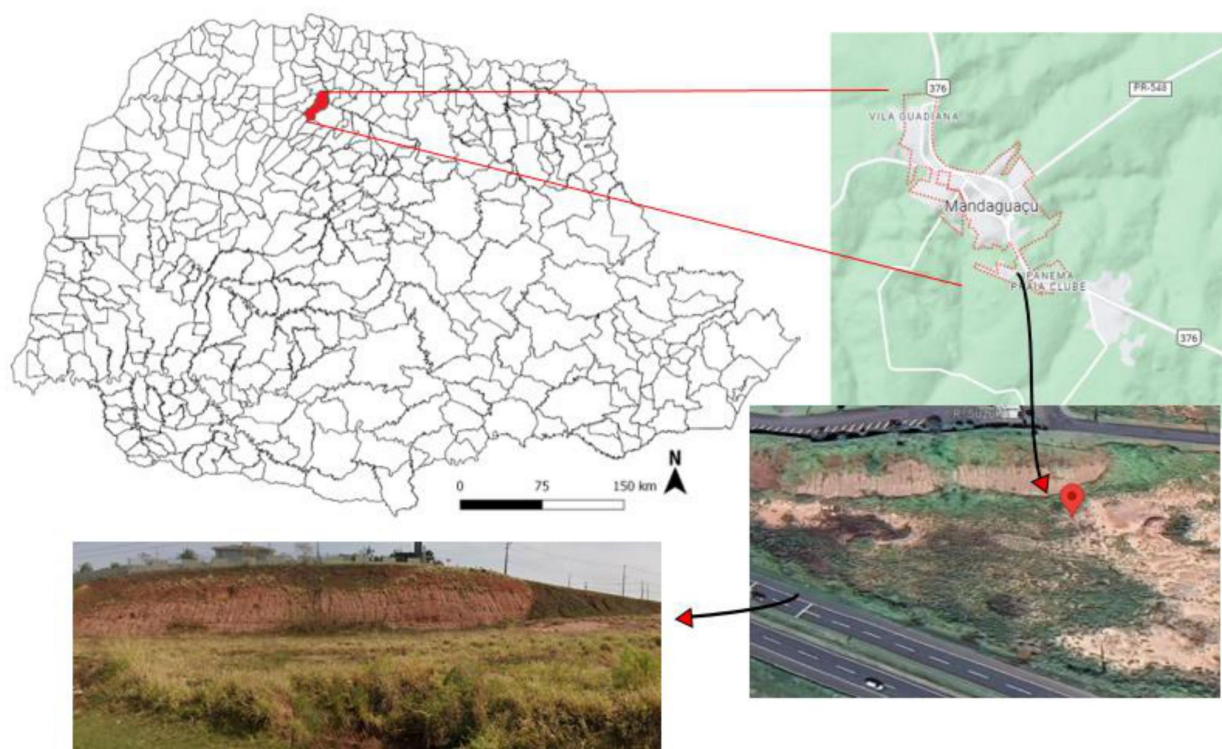
3.1 MATERIAIS

3.1.1 Solo de Mandaguçu-PR

O solo do município de Mandaguçu, situado no estado do Paraná e utilizado neste trabalho, foi coletado a um metro de profundidade às margens da rodovia federal BR-376, de coordenadas geográficas $23^{\circ}21'44,4''\text{S}$ e $52^{\circ}05'11,7''\text{W}$. Possui embasamento rochoso da Formação Caiuá constituída principalmente por arenito finos e muito finos (Gonçalves *et al.*, 2018).

A Figura 7 apresenta a localização geográfica da cidade de Mandaguçu, além da imagem de satélite do local de coleta das amostras.

Figura 7 - Localização geográfica de Mandaguçu e local de coleta das amostras



Fonte: Adaptado do Google Earth (2024).

De acordo com Gonçalves *et al.* (2018), o solo de Mandaguaçu, que apresenta formação caracterizada fortemente pela presença de quartzo, possui a areia como principal fração granulométrica e, portanto, é classificado como areia siltosa. Ainda, é classificado como solo laterítico segundo a classificação MCT, devido ao elevado grau de intemperismo causado, principalmente, pelo relevo e clima subtropical da região, definido por invernos secos e verões chuvosos.

A Figura 8 apresenta a amostra deformada do solo de Mandaguaçu antes (a) e após (b) o destorroamento.

Figura 8 - Solo de Mandaguaçu



Fonte: Autor.

3.1.2 Solo de Santa Maria-RS

As amostras do solo de Santa Maria, cidade localizada no estado do Rio Grande do Sul, foram coletadas no distrito de São Valentim em uma área de estudo conhecida como Voçoroca Buraco Fundo, com aproximadamente 300 m de extensão e 180 m de largura. A voçoroca está localizada na comunidade Alto das Palmeiras, na microbacia do arroio Sarandi.

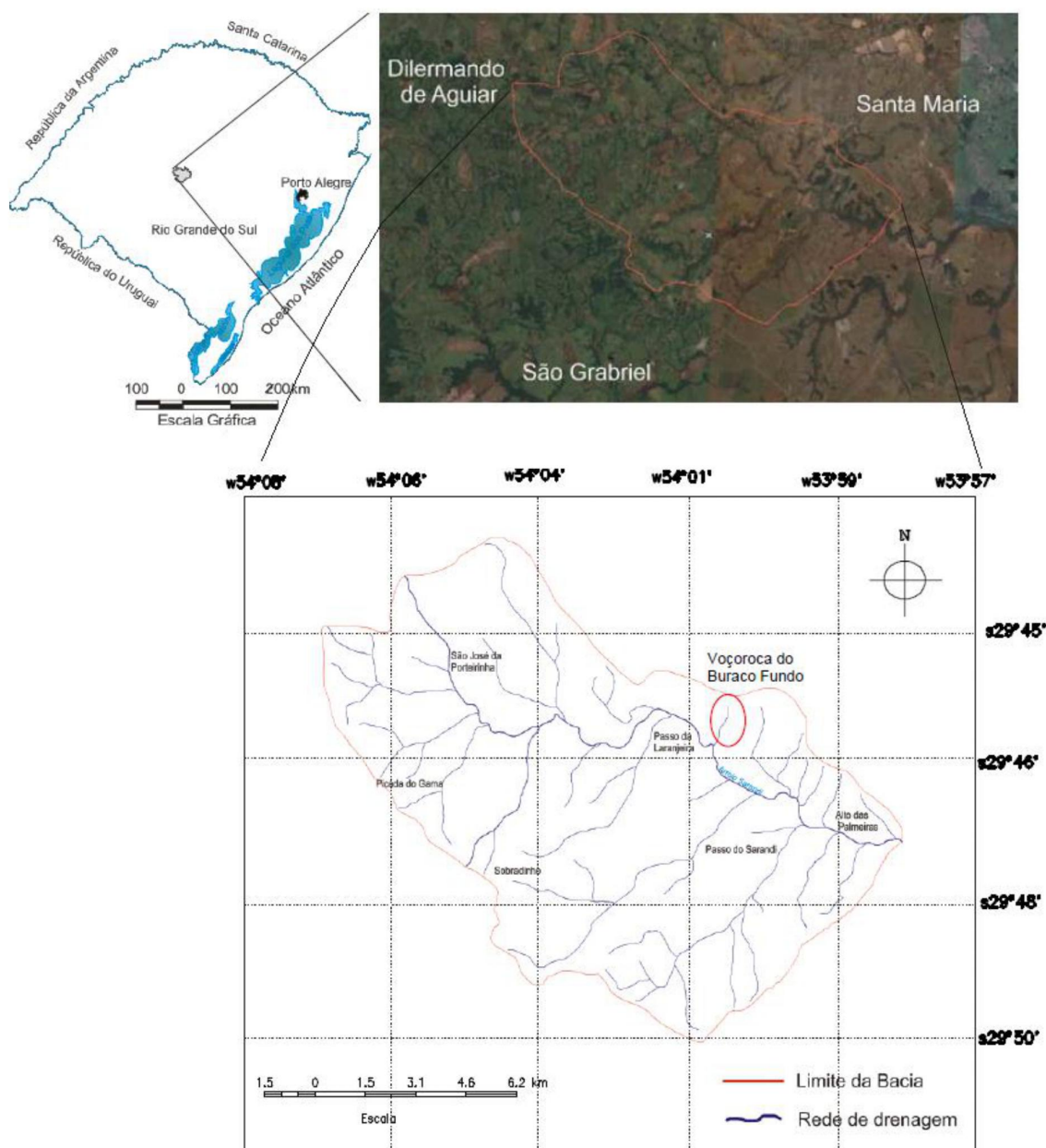
De acordo com estudo feito por Fernandes (2011), a jazida de coleta das amostras encontra-se em uma feição erosiva entre as coordenadas 29° 45' 57" S e 29° 46' 02" latitude sul; 54° 00' 35" e 54° O e 54° 00' 27" longitude oeste, na margem direita do arroio Sarandi, como mostra a Figura 9.

A região onde está inserida a voçoroca faz parte da província geomorfológica denominada Depressão Periférica Sul-Riograndense que, de acordo com Werlang

(2004), apresenta em determinadas áreas colinas e encostas onde podem ocorrer processos erosivos de ordem natural ou acelerada.

Essa região também apresenta clima subtropical, onde as temperaturas médias anuais são em torno de 22 °C, ocorrendo grandes oscilações térmicas ao longo do ano, pela presença das estações. O clima é classificado como mesotérmico brando (Fernandes, 2011).

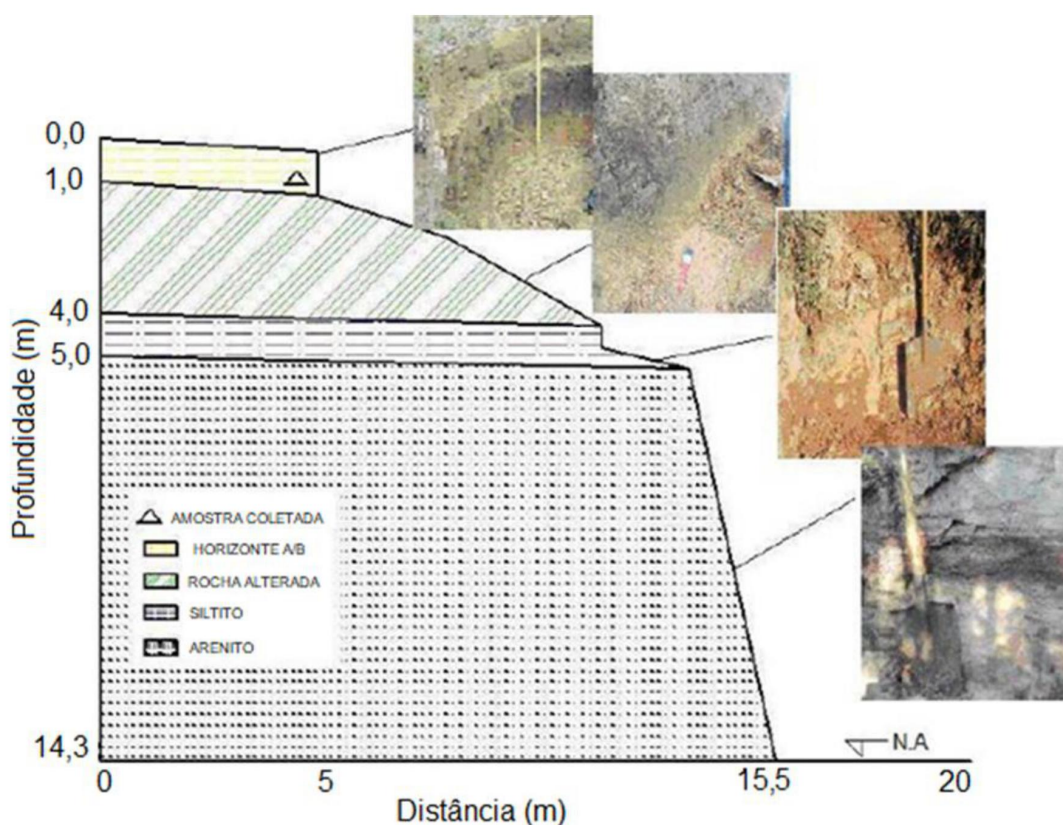
Figura 9 - Localização geográfica do Arroio Sarandi



Fonte: Adaptado de Ávila, 2009.

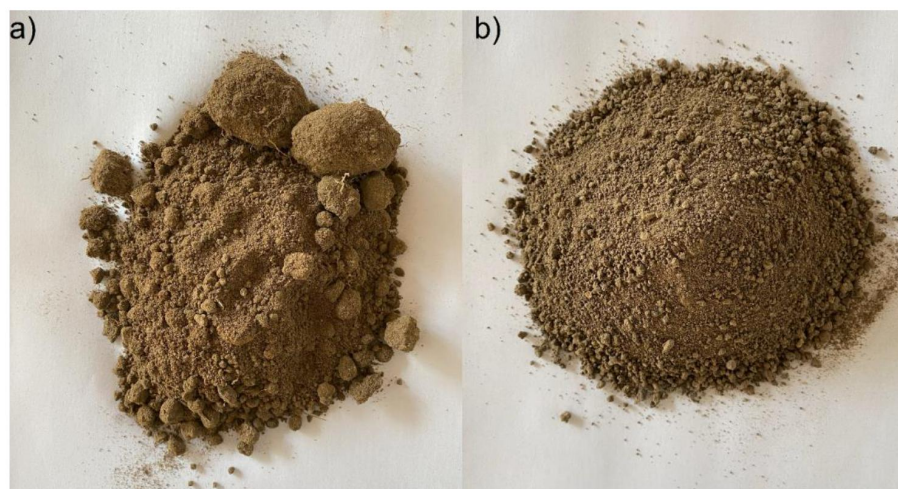
A Figura 10 apresenta o perfil das camadas que compõe a voçoroca Buraco Fundo. As amostras analisadas neste estudo foram coletadas a cerca de 30 cm de profundidade, no Horizonte A/B. O substrato é constituído por rochas sedimentares argilosas e arenosas da Formação Santa Maria, Membro Passo das Tropas (Maciel Filho, 1997).

Figura 10 - Perfil das camadas da voçoroca Buraco Fundo



Fonte: Adaptado de Fernandes, 2011.

A Figura 11 apresenta a amostra deformada do solo de Santa Maria antes (a) e após (b) o destorroamento.

Figura 11 - Solo de Santa Maria

Fonte: Autor.

3.1.3 Fibras de PET

As fibras de PET utilizadas na pesquisa foram cedidas pela empresa Ecofabril, localizada em Jundiaí-SP, e são produto direto da reciclagem de garrafas PET.

A Figura 12 apresenta um grama (1 g) da fibra utilizada, que possui título de 1,4 dtex e 32 mm de comprimento. O peso específico da fibra, determinada por picnômetro automático a gás, é de 1,21 g/cm³, apresentando resistência à tração de 81 MPa, módulo de elasticidade de 2.800 MPa e alongamento na ruptura de 70% (Ferreira *et al.*, 2021).

Figura 12 - Fibra de PET

Fonte: Autor.

3.1.4 Compósitos Solo-Fibras PET

Inicialmente, considerando condições experimentais prévias de trabalhos da literatura e a baixa densidade das fibras, foi testado o teor de adição de fibra, em relação à massa seca de solo, em 0,5%. Quantidades acima de 0,5% resultam em um meio visualmente não homogêneo, uma vez que o grande volume das fibras gera o contato fibra-fibra, que afeta diretamente o mecanismo de reforço grão-fibra (Cristelo *et al.*, 2014; Diambra *et al.*, 2010; Ferreira *et al.*, 2021).

No entanto, ao realizar alguns testes preliminares com os solos em estudo, notou-se que valores de adição de fibra superiores a 0,3% dificultavam a trabalhabilidade e não se conseguia obter uma boa homogeneização das misturas. Assim, foi fixado o teor de adição de fibras para as misturas em 0,3% em relação à massa seca de solo para ambos os solos.

3.1.5 Água

A água utilizada na preparação dos compósitos compactados foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Londrina-PR. Já para os ensaios de caracterização físico-químico e mineralógica dos solos foi utilizado água destilada, conforme especificado em suas respectivas normas técnicas.

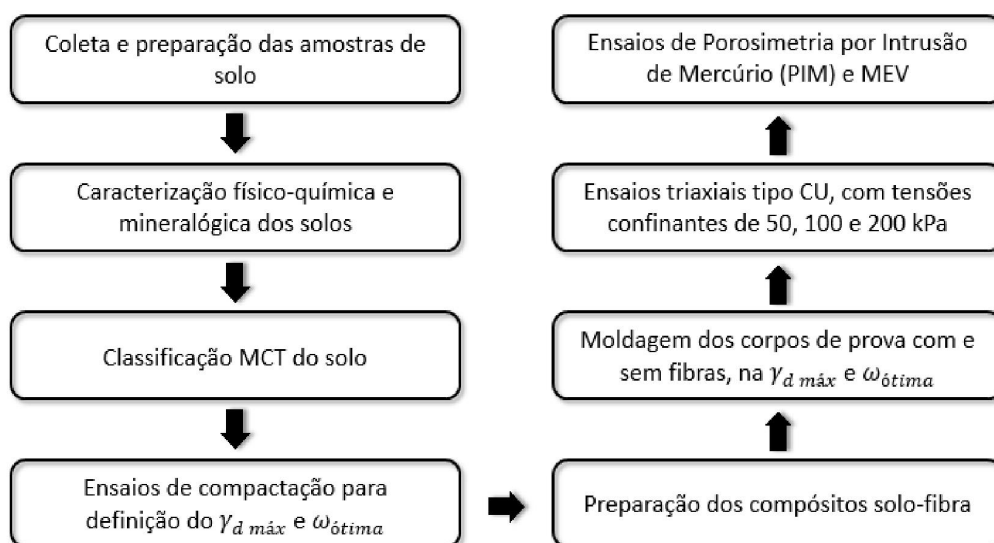
3.2 MÉTODOS

O programa de ensaios deste estudo tem como objetivo principal avaliar o uso das fibras PET no reforço dos solos de Mandaguaçu e Santa Maria por meio da avaliação do comportamento mecânico dos compósitos.

Para isto, primeiramente foi feita a caracterização completa de ambos os solos utilizados na pesquisa, uma vez que as propriedades mecânicas dos compósitos estão diretamente ligadas às características físicas, químicas e mineralógicas da matriz de solo.

O fluxograma apresentado na Figura 13 apresenta, de maneira resumida, as etapas adotadas na pesquisa, que serão descritas com detalhes a seguir.

Figura 13 - Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Autor.

3.2.1 Preparação do Solo

Para ambos os solos, foram seguidos os preceitos da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 6457 (ABNT, 2016). Na Figura 14 são apresentadas as etapas realizadas para o solo de Mandaguaçu após a coleta, que consistem na secagem ao ar (Figura 14a), destorroamento (Figura 14b), homogeneização e quarteamento (Figura 14c) e armazenamento das amostras (Figura 14d).

Figura 14 - Etapas de preparação do solo



Fonte: Autor.

Antes de ensacar as amostras, foram coletadas três cápsulas para definição do teor de umidade higroscópica. Os mesmos procedimentos foram adotados para as amostras do solo de Santa Maria.

3.2.2 Caracterização Física

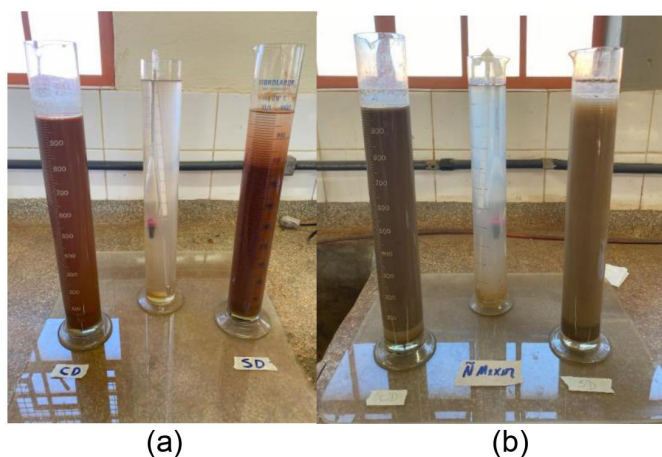
Para a determinação das propriedades físicas dos solos foram executados ensaios de análise granulométrica por sedimentação e peneiramento (NBR 7181/2016), massa específica real dos grãos (NBR 6458/2016), área superficial (Método BET), limite de liquidez (NBR 6459/2016) e limite de plasticidade (NBR 7180/2016).

O solo de Mandaguaçu já foi estudado por diversos autores da Universidade Estadual de Londrina – UEL, sendo as amostras sempre coletadas na mesma jazida. Portanto, algumas de suas características físicas foram tomadas a partir dos trabalhos realizados por Gonçalves *et al.* (2018), Ferreira (2019) e Oliveira *et al.* (2022).

O ensaio de sedimentação, para análise da fração granulométrica de partículas menores que 0,075 mm, foi realizado com e sem defloculante hexametáfosfato de sódio, com o objetivo de avaliar a influência da agregação na classificação granulométrica dos solos.

As Figura 15 apresenta a realização do ensaio no solo de Mandaguaçu e Santa Maria. Também, a proveta à esquerda nas imagens refere-se ao ensaio com defloculante e, à direita, sem defloculante.

Figura 15 - Ensaio de sedimentação nos solos: a) Mandaguaçu; b) Santa Maria.



Fonte: Autor.

Os ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade e de massa específica real dos grãos por meio do picnômetro foram realizados apenas no solo de Santa Maria, pois não se conheciam estes dados. O ensaio de massa específica real dos grãos foi realizado pelo Laboratório de Mecânica dos Solos da USP, em São Carlos-SP.

A Figura 16 apresenta a execução do ensaio de limite de liquidez (Figura 16a) e do ensaio de limite de plasticidade (Figura 16b), realizados na amostra de solo de Santa Maria.

Figura 16 - Ensaio de limite de consistência



Fonte: Autor.

Os ensaios de área superficial específica (ASE) ensaios foram realizados no Laboratório de Química da UEL. Este ensaio tem como finalidade principal fornecer informações sobre a quantidade de sítios ativos ou superfície disponível para reações químicas em um determinado material. Quanto maior for a área superficial, maior a probabilidade de interações químicas ocorrerem na superfície do material, o que pode influenciar diretamente na interação dos compósitos com as fibras PET.

Neste ensaio, são obtidas isotermas de adsorção e dessorção do nitrogênio em instrumento automático de adsorção de gás N_2 da marca Quantachrome Instruments modelo Nova 1200e, apresentado na Figura 17.

Previamente às análises, as amostras de solo foram aquecidas, sob vácuo, a $350\text{ }^\circ\text{C}$ por 4h. Os valores de área superficial específica dos solos foram obtidos a partir das isotermas de adsorção aplicando o método de Brunauer, Emmett e Teller (BET) (1938) na faixa de pressão relativa (P/P_0) de 0,05 a 0,30 e utilizando uma molécula de seção transversal de $0,162\text{ nm}^2$ (Thommes *et al.*, 2015).

Figura 17 – Equipamento utilizado no ensaio de ASE



Fonte: Autor.

3.2.3 Caracterização Química

A caracterização química dos solos consistiu em obter os elementos químicos e matéria orgânica (MO), além de determinar o pH em H₂O e KCl, o Δ pH e a capacidade de troca catiônica (CTC).

Estes ensaios foram realizados pelo Laboratório de Solos do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IDR/Paraná, de Londrina. Os métodos utilizados para as análises foram os preconizados no Manual de Análise Química de Solo – IAPAR (1991).

As amostras coletadas para estes ensaios foram secas, destorroadas e passadas em peneira #10 (2 mm de abertura) para a remoção de torrões, gravetos e outras impurezas presentes na amostra.

3.2.4 Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica de ambos os solos foi realizada por meio dos ensaios de difração de raio-X, fluorescência de raio-X e extração de amorfos.

Os ensaios de difração de raios-X (DRX) foram feitos nas amostras denominadas de “solo total” (material seco, destorroado e passado na peneira #10 (2 mm)) e, depois, apenas em amostras da fração argila de cada solo para melhor identificação dos argilominerais.

As medidas de DRX foram realizadas no Laboratório de Difração de Raios-X do LARX (Laboratório Multiusuário da Pró Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação) da UEL, em um difratômetro da marca PANalytical modelo X'Pert PRO MPD, com radiação $\text{CuK}\alpha$, na técnica conhecida como θ - 2θ , geometria Bragg Brentano. A tensão e a corrente utilizadas nos ensaios das amostras de solo total foram, respectivamente, 40 KV e 30 mA. O intervalo de varredura 2θ utilizado foi de 5 a 70° com passo angular de $0,05^\circ$. O tempo de contagem por ponto foi de 1,0 s. Para poder desprezar possíveis orientações preferenciais no processo de preparação das amostras e homogeneizar suas medidas na superfície, estas foram giradas ciclicamente durante o processo de medida com um período de 1 segundo.

Para as medidas na fração argila de cada solo, foi utilizado o mesmo difratômetro e técnica, no entanto, o intervalo de varredura 2θ utilizado foi de 3 a 80° com passo angular de $0,04^\circ$ e o tempo de contagem por ponto foi de 6,0 s.

A coleta da fração argila de cada solo foi realizada pelo método da pipeta, desenvolvida simultaneamente em três países (Jennings *et al.*, 1922; Krauss, 1923; Robinson, 1922) e baseada no fato de que a sedimentação retira da profundidade h em um tempo t todas as partículas com velocidades de sedimentação maior que o atingido, mantendo nessa profundidade a concentração original de partículas com velocidades de sedimentação menores que as atingidas.

Assim, a tomada de um volume com a pipeta a uma profundidade h em um tempo t fornece uma amostra da qual todas as partículas mais grossas que x foram sedimentadas (Black & Day, 1965).

Para a execução do método, as amostras de solo foram inicialmente colocadas em solução com hexametáfosfato de sódio (defloculante) e misturadas em agitador mecânico por 8 horas. Ao término da agitação, as amostras foram colocadas em provetas de 1000 mL e completadas com água destilada. Com um dispersor manual, a amostra foi colocada em suspensão e, imediatamente após agitação, iniciou-se a cronometragem do tempo. Os tempos necessários para que partículas de 2, 5 e 20 μm de diâmetro em água estivessem sedimentadas a uma profundidade de 10 cm estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Tempos de sedimentação das partículas de 2, 5 e 20 μm em água para profundidade de 10 cm

Temperatura (°C)	Tempo de sedimentação da partícula								
	2 μm		5 μm		20 μm				
	hr.	min.	hr.	min.	min.	sec.			
20	8	:	0	1	:	17	4	:	48
21	7	:	49	1	:	15	4	:	41
22	7	:	38	1	:	13	4	:	35
23	7	:	27	1	:	11	4	:	28
24	7	:	17	1	:	10	4	:	22
25	7	:	7	1	:	8	4	:	16
26	6	:	57	1	:	7	4	:	10
27	6	:	48	1	:	5	4	:	4
28	6	:	39	1	:	4	4	:	0
29	6	:	31	1	:	3	3	:	55
30	6	:	22	1	:	1	3	:	49
31	6	:	14	1	:	0	3	:	44

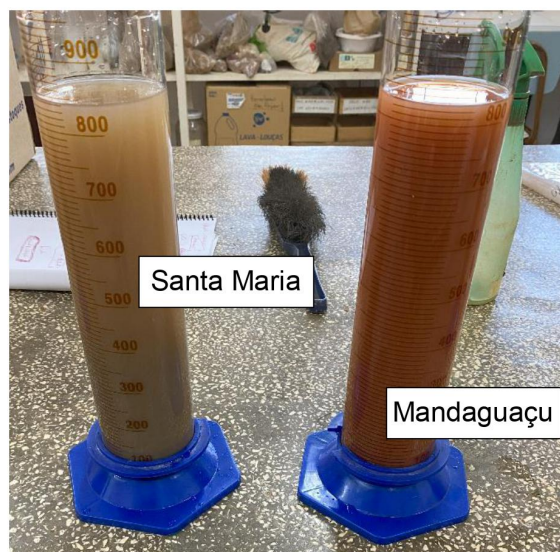
Fonte: Adaptado de Black & Day, 1965.

A Tabela 2 mostra que para a pipetagem da fração argila ($d = 0,002 \text{ mm}$ ou $2 \mu m$) a 10 cm de profundidade, são necessárias 8 horas, à 20 °C, de tempo de sedimentação. Assim, controlando-se a temperatura do laboratório e completado o período de 8 horas, foi feita a coleta da amostra, posicionando a pipeta de maneira fixa a 10 cm abaixo do nível da marca de 1000 mL da proveta.

Ao fim, amostra coletada foi transferida para recipientes de vidro que foram, então, levados a estufa ($100 \pm 2 \text{ °C}$) por 24 horas. Após evaporação da solução, foi feita a raspagem da argila contida nos recipientes.

Importante ressaltar que os valores apresentados na Tabela 1 foram calculados a partir da Equação de Stokes assumindo $\rho_s = 2,60 \text{ g/cm}^3$, a fim de se satisfazer, simultaneamente, as duas definições da fração argila: partículas tendo um diâmetro efetivo de $2 \mu m$ e velocidade de sedimentação de 10 cm/8h à 20 °C (*International Society of Science*, 1929). A Figura 18 apresenta os solos nas provetas após período de agitação e antes de serem completos com água até a marca de 1000 mL para início da sedimentação.

Figura 18 – Provetas com solo defloculado antes da pipetagem da fração argila



Fonte: Autor.

Os ensaios de fluorescência de raios-X (FRX) foram realizados no Laboratório de Fluorescência de Raios-X (Lab FRX) em um espectrômetro de modelo EDX 720, da marca Shimadzu Co. A técnica aplicada faz a determinação qualitativa e quantitativa dos teores totais dos elementos químicos de número atômico maiores que o sódio (Na), através da identificação e medida dos raios-X característicos emitidos pela amostra. O software Quali-Quant, que acompanha o espectrômetro, utiliza a metodologia dos parâmetros fundamentais para as análises.

A fim de se complementar as análises de caracterização mineralógica, foi realizado o ensaio de análise química por extração de amorfos com o objetivo de identificar e quantificar os elementos formadores dos produtos amorfos e/ou minerais de baixa cristalinidade, considerados agregadores dos solos. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Química da UEL, aplicando a metodologia de Schwertmann de 1964 (Cardoso, 1995).

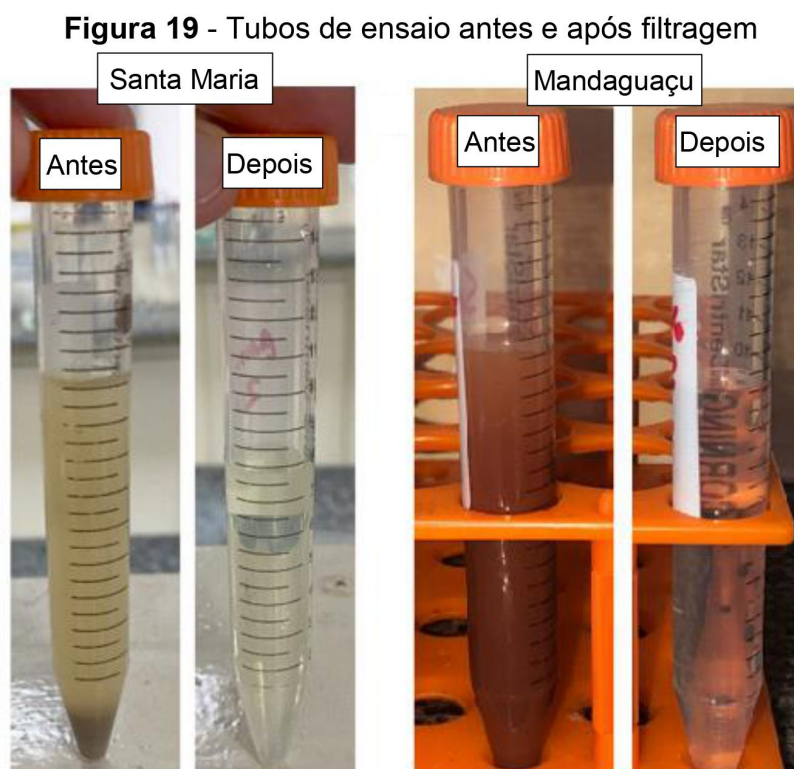
A escolha de se realizar este ensaio e, ainda, por esta metodologia se deu por três principais fatores:

- i) Os elementos existentes nos minerais amorfos e de baixa cristalinidade são importantes no estudo da cimentação do solo, que afeta diretamente na resistência do mesmo;
- ii) A extração de amorfo é feita via complexação em vez de dissolução, sendo que esta última pode dissolver além dos amorfos e minerais de baixa cristalinidade, outros minerais (Cardoso, 1995);

iii) Simplicidade do método em relação a outros encontrados na bibliografia.

Apesar da possibilidade de existência dos amorfos em todas as frações granulométricas, as análises realizadas neste estudo foram feitas em amostras passantes na peneira #200 (0,075 mm). Tratando-se de dois solos arenosos, ao trabalhar com todas as frações do solo, a quantidade de Si nas amostras pode acabar afetando a quantificação do Fe e Al, elementos mais ligados a minerais amorfos que o Si. Também, é muito provável que os minerais amorfos que se busca quantificar pelo ensaio estejam presentes nas frações finas dos solos, uma vez que a areia é formada, em sua essência, por quartzo (mineral cristalino).

Sendo assim, as amostras de solo para este ensaio foram previamente secas em estufa, destorroadas e então passadas na peneira #200 (0,075 mm). Os ensaios foram feitos em triplicatas, logo cada amostra de solo (0,2 g) foi tratada com 10 mL de 0,2 M de oxalato de amônio a pH 3 e acondicionada em tubo de ensaio tipo *falcon* coberto por folhas de alumínio, visto que o complexo de oxalato de ferro é fotossensível. Os tubos foram colocados em agitador mecânico por 8 horas e, ao fim deste período, foram filtrados para se adequar a amostra às condições do equipamento (Figura 19).



Fonte: Autor.

Em sequência foi feita a quantificação de Si, Al e Fe amorfo por meio de um espectrômetro de emissão atômica com plasma induzido por micro-ondas (MP-AES, Agilent Technologies 4200, Santa Clara, EUA). O MP-AES 4200 utiliza um gerador de nitrogênio. O fluxo de gás plasma foi fixado em 20 L/min e o fluxo de gás auxiliar foi fixado em 1,5 L/min. Os comprimentos de ondas utilizados para a quantificação dos elementos foram: 254,611 nm para o Si; 396,152nm para o Al; e 371,993 nm para o Fe. A vazão do nebulizador foi de 0,7 mL/min, tempo de captação de 15 s, tempo de estabilização do plasma com aspiração da amostra de 15 s, tempo de leitura de 3 s (lido em triplicata) e tempo de lavagem de 20 s.

Para construção das curvas analíticas em oxalato, foram empregadas soluções mono elementares de referência (Specsol®, Jacareí, SP, Brasil), através de diluições sucessivas das soluções estoque de 1000 mg/L de Fe, Si e Al, nas seguintes concentrações: 50 a 500 ug/L (Fe), 50 a 1000 ug/L (Si), 100 a 1000 ug/L (Al). A Figura 20 apresenta o equipamento utilizado nas análises de quantificação dos elementos amorfos.

Figura 20 – Equipamento utilizado para quantificação de amorfos



Fonte: Autor.

3.2.5 Classificação dos Solos

Foi feita a classificação do solo segundo a NBR 6502/2022, pelo Sistema Unificado de Classificações de Solos – SUCS (ASTM D2487-17) e pela metodologia MCT (DNER-ME 258/94).

A classificação MCT considera que os solos tropicais se encontram separados em 2 grandes grupos: os de comportamento laterítico (L) e os de comportamento não-laterítico (N). A segunda letra, que define o tipo de solo, está relacionada à fração granulométrica predominante, ou seja, A (Areia), A' (Arenoso), S' (Siltoso) ou G' (Argiloso) (Moura *et al.*, 2006).

A definição dos subgrupos é baseada nos coeficientes obtidos nos ensaios de compactação por equipamento miniatura – mini-MCV (c' e d') e Perda de Massa por Imersão (Pi). Com o valor do coeficiente do coeficiente angular da reta (d') e Pi , obtém-se o índice de classificação (e') por meio de ábaco.

A classificação dos solos pela metodologia MCT foi realizada pelo Laboratório de Geotecnia do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, localizado em São José dos Campos-SP. A Figura 21 mostra as etapas de preparação do ensaio e os corpos de prova durante o ensaio de Perda de Massa por Imersão.

Figura 21 - Etapas de ensaio para classificação pela metodologia MCT



Fonte: Autor.

3.2.6 Ensaios de Compactação

A fim de se obter os parâmetros de massa específica seca máxima ($\rho_{d \text{ máx}}$) e umidade ótima ($\omega_{ót}$) para moldagem dos compósitos solo-fibra de PET, foi necessário determinar a curva de compactação de cada solo.

Não foram realizados ensaios de compactação para o solo de Mandaguaçu,

pois, como dito anteriormente, já se tinha conhecimento dos parâmetros de compactação obtidos por estudo de Ferreira (2019).

Para o solo de Santa Maria foi construída a curva de compactação seguindo a NBR 7182/2020, sem reuso de material e com as amostras secas previamente até a umidade higroscópica. O solo foi compactado na Energia Normal (soquete pequeno e altura de queda de 30,5 cm) utilizando o cilindro Proctor. Após a correção da umidade, a massa de solo foi dividida em três camadas ao longo de 12,7 cm de altura e 10,0 cm de diâmetro, aplicando 26 golpes distribuídos uniformemente sobre cada camada. Entre cada camada, foram feitas escarificações a fim de garantir boa aderência entre elas.

Ao final do processo, antes de rasar a superfície do cilindro, verificou-se a altura sobressalente do corpo de prova, admitindo valor máximo de 1 cm em relação ao topo do cilindro Proctor. Caso o corpo de prova não atendesse a este critério, ele era descartado.

Após rasar a superfície do molde, pesou-se o cilindro contendo o solo úmido compactado. Com auxílio de um extrator, retirou-se o corpo de prova do molde, partindo-o em três partes para determinação do teor de umidade. A Figura 22 apresenta as etapas dos ensaios realizados no solo de Santa Maria.

Figura 22 - Etapas do ensaio de compactação



Legenda: a) solo destorroado e úmido; b) compactação da primeira camada e escarificação; c) corpo de prova no extrusor; d) corpo de prova compactado; e) retirada do teor de umidade.

Fonte: Autor.

Não foi necessário obter as curvas de compactação dos compósitos, visto que a baixa densidade e baixo teor de adição das fibras não afetam os parâmetros de compactação do solo puro, conforme observado por Shukla (2017).

3.2.7 Preparação dos Compósitos Solo-Fibra PET

As fibras foram dispostas aleatoriamente na matriz, a fim de minimizar o surgimento de qualquer tipo de anisotropia e não induzir planos preferenciais de fraqueza, que podem ser desenvolvidos em sistemas de reforço orientados (Maher & Gray, 1990).

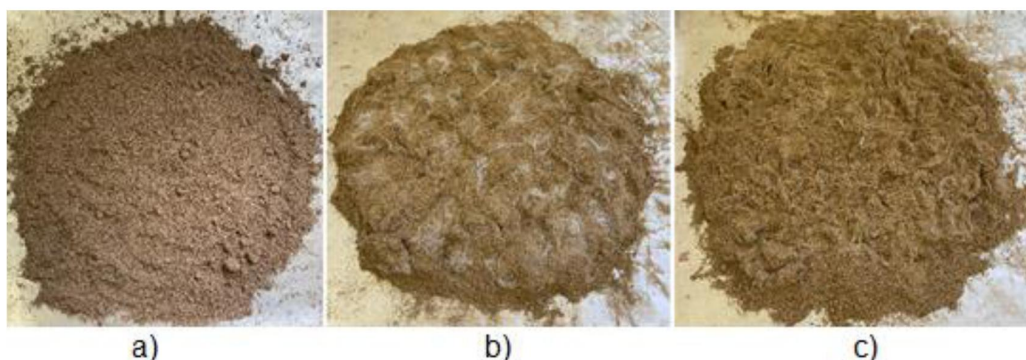
Durante a homogeneização, foi preciso primeiramente soltar as fibras manualmente, sem rasgar os fios, garantindo que não houvesse alteração em seus comprimentos. A melhor maneira de executar este processo é utilizando uma placa de vidro, pois o baixo atrito do vidro permite desenrolar os fios das fibras de maneira mais rápida e eficaz. A Figura 23 mostra, à esquerda, as fibras ainda com os fios concentrados e, à direita, após os fios serem soltos.

Figura 23 - Fibras de PET antes e após serem soltas



Fonte: Autor.

Em sequência, as fibras de PET são inseridas e homogeneizadas na matriz em etapas: 1) Umedecimento do solo (Figura 24a); 2) Adição das fibras soltas (Figura 24b); 3) Homogeneização da mistura revolvendo as fibras com solo (Figura 24c) evitando o emaranhamento das fibras em contato com os grãos de solo.

Figura 24 - Etapas da preparação dos compósitos de solo-fibras PET

Fonte: Autor.

Como o objetivo da pesquisa é avaliar o comportamento mecânico dos compósitos no estado compactado na máxima densidade, acrescentou-se a água necessária para atingir a umidade ótima, no entanto, este acréscimo ocorreu de maneira gradual. Isto é, conforme as fibras eram inseridas e homogeneizadas com o solo, a água era acrescentada aos poucos, garantindo que o solo estivesse sempre úmido durante o processo. A água ajudou na adesão solo-fibra, reduzindo consideravelmente o emaranhamento das fibras durante o processo de mistura.

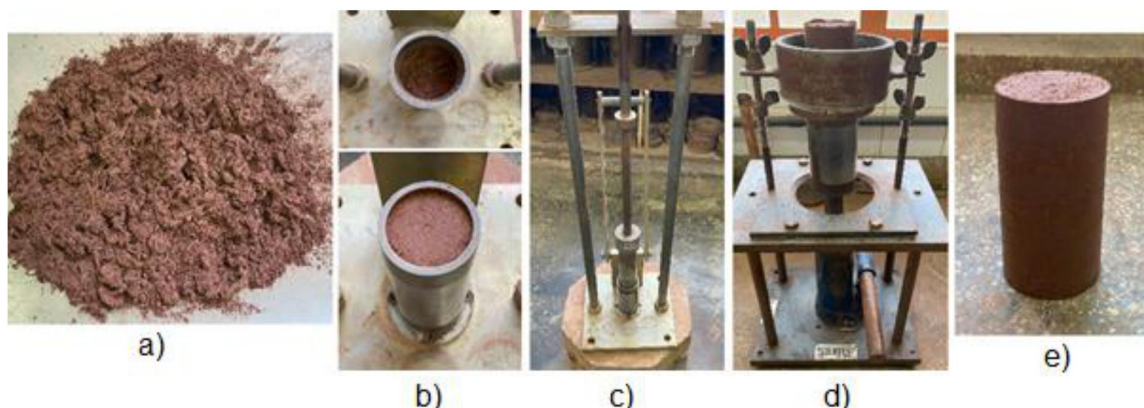
3.2.8 Moldagem dos Corpos de Prova

Os corpos de prova avaliados nos ensaios de compressão triaxial foram moldados utilizando o equipamento em miniatura (Figura 25c). O cilindro de compactação em miniatura permite a moldagem de corpos de prova com 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, conforme normativa britânica BS 1377-7/1990 utilizada nos ensaios e análises triaxiais, que prescreve que os corpos de prova devem ter altura equivalente, ou muito próxima, ao dobro do diâmetro (relação $h/d = 2$).

Com as amostras devidamente preparadas, foi feita a compactação dos corpos de prova em três camadas de aproximadamente 3,33 cm cada. O número de golpes do soquete é condicionado pela altura da camada, isto é, é dado o número de golpes necessário para que a massa de solo compactada no molde fique com espessura correspondente a 1/3 da altura do cilindro.

Antes de se iniciar a próxima camada, foram feitas escarificações no solo a fim de melhorar a aderência com a camada seguinte a ser compactada. A Figura 25 mostra as etapas realizadas na compactação dos corpos de prova em miniatura.

Figura 25 - Etapas de compactação dos corpos de prova em miniatura



Legenda: a) amostra preparada; b) compactação do solo no molde; c) compactador miniatura; d) corpo de prova no extrusor; e) corpo de prova compactado miniatura.

Fonte: Autor.

Ao fim da compactação, os corpos de prova foram armazenados em sacos plásticos e estocados na câmara úmida, em elevada umidade relativa do ar para assegurar a constância do teor de umidade da moldagem.

O controle de compactação adotado foi de grau de compactação (GC) de $100 \pm 2\%$ e variação de umidade ($\Delta\omega$) de 0,5%, conforme sugestão da NBR 7182/2020.

3.2.9 Ensaio de Compressão Triaxial

Os ensaios de Compressão Triaxial foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Estadual de Maringá, em Maringá-PR. No total, foram feitos 12 ensaios, três para cada tipo de solo e compósito com fibras PET. A realização dos ensaios se deu conforme a norma britânica BS 1377-7:1990. Para a determinação das envoltórias de ruptura, os ensaios foram conduzidos sob três níveis diferentes de tensões confinante (50, 100 e 200 kPa), mantidas constantes durante o cisalhamento do corpo de prova. A Tabela 3 resume as condições dos ensaios, quantidades de corpos de prova e tensões confinantes utilizadas.

Diferentemente do ensaio de cisalhamento direto, o ensaio triaxial permite saturação mais efetiva do corpo de prova e possibilita avaliar a ruptura no plano de maior fraqueza do solo, uma vez que não se impõe um plano de ruptura. No caso das misturas de solo-fibra, esta característica do ensaio é essencial, pois assim ocorre a verdadeira ativação das fibras e analisa-se o comportamento mecânico do compósito e não apenas da matriz.

Tabela 3 - Dados dos corpos de prova submetidos aos ensaios triaxiais

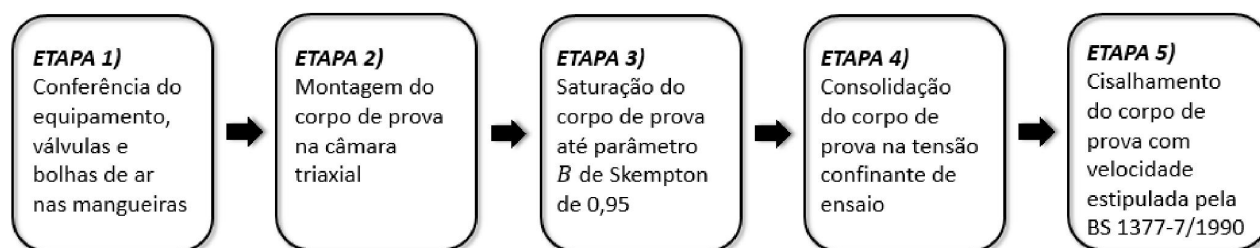
Solo	Condição	Quantidade de CPs	Tensão Confinante (kPa)	ID do CP
Mandaguaçu (PR)	Compactado sem fibras de PET	3	50	MD01
			100	MD02
			200	MD03
	Compactado com fibras de PET	3	50	MD01-F
			100	MD02-F
			200	MD03-F
Santa Maria (RS)	Compactado sem fibras de PET	3	50	SM01
			100	SM02
			200	SM03
	Compactado com fibras de PET	3	50	SM01-F
			100	SM02-F
			200	SM03-F

Fonte: Autor.

Pela limitação do tempo da pesquisa, optou-se por realizar ensaios triaxiais saturados do tipo CU (consolidado não-drenado). Durante a fase de cisalhamento foram feitas leituras constantes das poropressões, possibilitando as análises em termos de tensões totais e efetivas.

No início das análises, a fim de se averiguar a veracidade das leituras de poropressão, foram feitos alguns ensaios do tipo CD (consolidado drenado) nas amostras. Ao comparar com os resultados dos ensaios do tipo CU, observou-se proximidade nos valores de resistência obtidos, indicando, portanto, que as leituras de poropressão estavam calibradas.

O fluxograma da Figura 26 resume as etapas de execução dos ensaios de compressão triaxial, que serão discutidas com mais detalhes nos itens a seguir.

Figura 26 - Fluxograma das etapas do ensaio de compressão triaxial

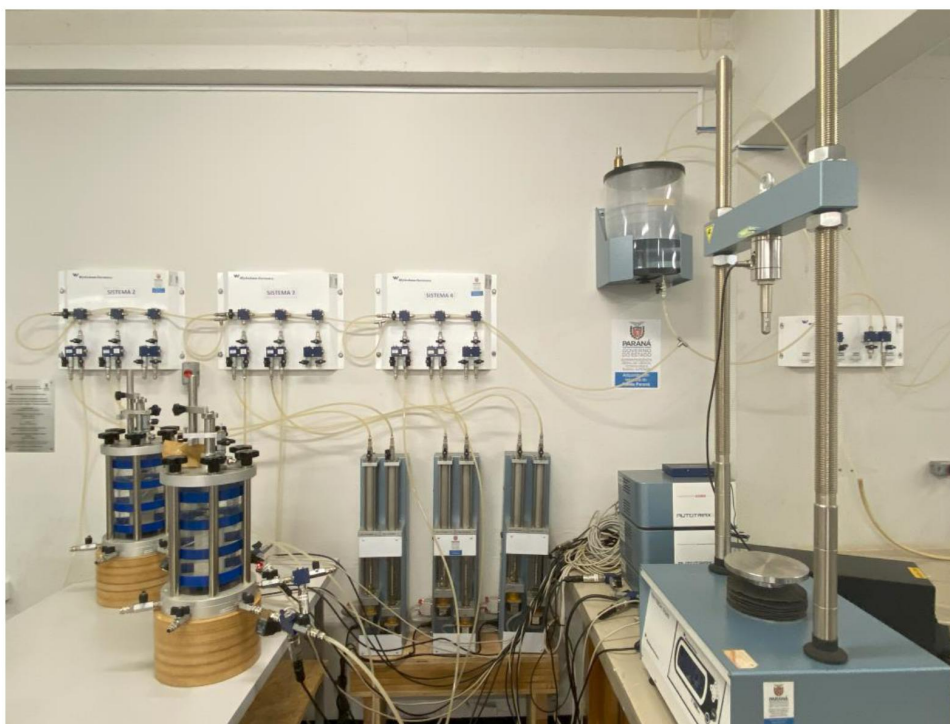
Fonte: Autor.

a) Equipamento do Ensaio – AUTOTRIAX 2

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de compressão triaxial foi o AUTOTRIAX 2, da marca Wykeham Farrance, apresentado na Figura 27. O equipamento possui sistema servocontrolado, que garante maior desempenho e estabilidade durante os ensaios. A prensa tem capacidade de 50 kN de compressão, sistemas de aquisição de dados e unidades de controle e controladores de pressão.

O sistema possui três câmaras triaxiais possibilitando, assim, a saturação simultânea de três corpos de prova. Todo o sistema é ligado a um computador com software de interface gráfica e exibição em tempo real de todos os transdutores, dados calculados e gráficos dos ensaios.

Figura 27 - Equipamento *AUTOTRIAX 2*

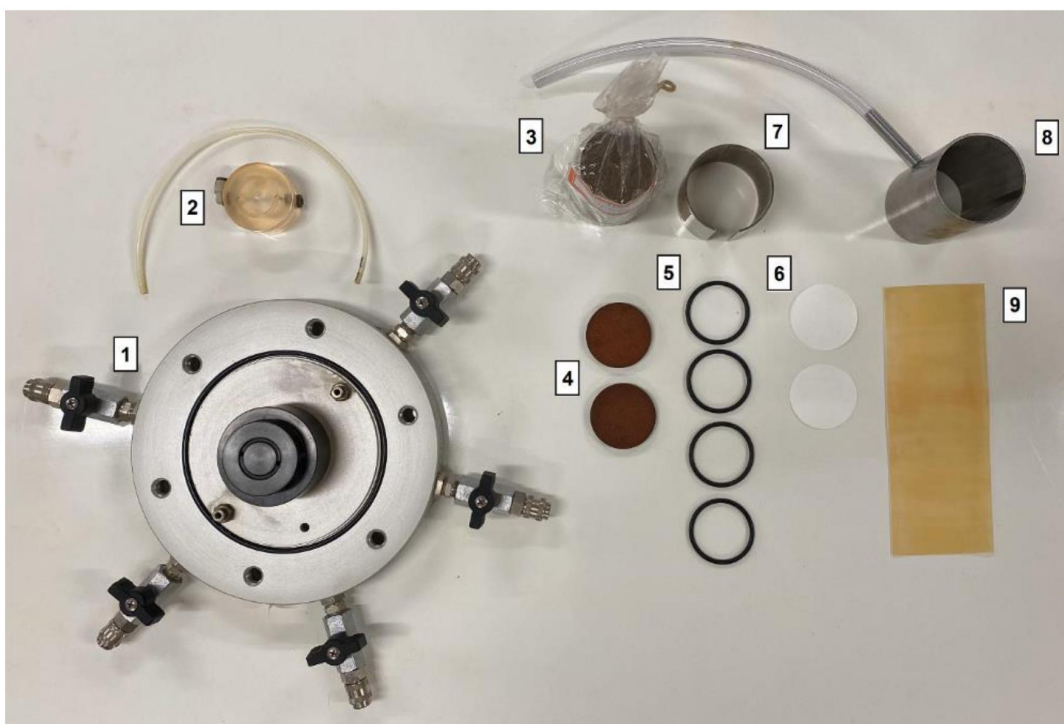


Fonte: Autor.

b) Montagem do Corpo de Prova na Câmara Triaxial

Os itens e instrumentos utilizados na montagem do corpo de prova na câmara triaxial estão apresentados na Figura 28 e identificados na legenda.

Figura 28 - Itens utilizados na montagem do ensaio de compressão triaxial



Legenda: 1) Base da câmara triaxial; 2) cabeçote (*Top Cap*); 3) corpo de prova; 4) pedra porosa saturada; 5) anéis de borracha (*O-rings*); 6) papel filtro; 7) gabarito de fixação dos *O-rings*; 8) gabarito de fixação da membrana; 9) membrana de látex.

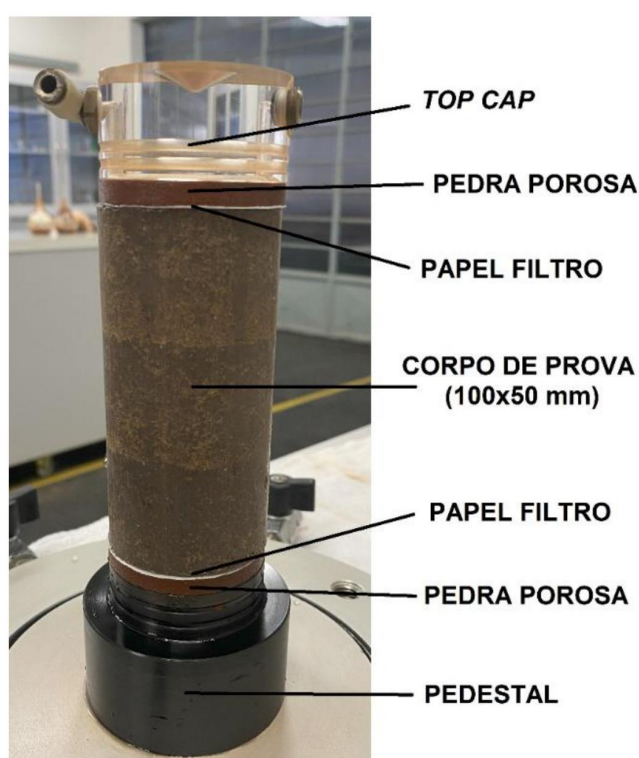
Fonte: Autor.

As etapas da montagem do corpo de prova até antes do início da fase de saturação seguiram a seguinte ordem cronológica:

- a) Iniciou-se o processo de montagem do ensaio enchendo o reservatório com água destilada para então aplicação de vácuo e retirada do ar dissolvido (água deaerada);
- b) Foi feita a conferência das mangueiras e conexões do equipamento, garantindo que não houvesse presença de bolhas de ar no sistema;
- c) Com o sistema conferido, o corpo de prova foi posicionado no pedestal da base conforme sequência apresentada na Figura 29, utilizando a pedra porosa já saturada e o papel filtro molhado;
- d) Utilizando o gabarito de fixação da membrana (Figura 28.8), foi feito o envolvimento do corpo de prova com a membrana de látex da base do pedestal até acima do cabeçote (*Top Cap*);
- e) Para melhor vedação do sistema, foi feito o acoplamento do corpo de prova com dois anéis de borracha (*O-rings*) tanto no pedestal quanto no

- Top Cap*. Assim, garantiu-se que não ocorresse fuga da contrapressão e da pressão confinante durante o ensaio;
- f) Então foi feita a conexão do *Top Cap* à base da câmara, identificando as válvulas da contrapressão, poropressão e pressão confinante;
 - g) Por fim, posicionou-se a câmara na base apertando as manoplas dos parafusos, ajustou-se o pistão e as mangueiras correspondentes a cada pressão e se encheu a câmara com água deaerada.

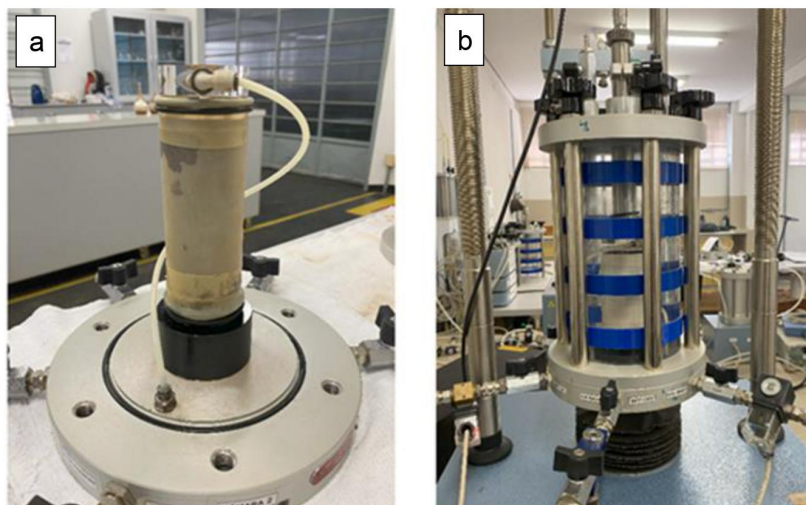
Figura 29 – Sequência de montagem do corpo de prova



Fonte: Autor.

A Figura 30a apresenta o sistema montado na base da câmara, já a Figura 30b mostra a câmara posicionada sob a base e preenchida com água deaerada, etapa prévia ao processo de saturação.

Figura 30 - Sistema montado e preparado para a fase de saturação



Fonte: Autor.

c) Fase de Saturação

A saturação dos corpos de prova foi feita por contrapressão dentro da câmara triaxial, onde eleva-se a contrapressão a um nível suficiente para que o ar presente nos vazios seja dissolvido. Durante o processo elevou-se, ao mesmo tempo, a pressão confinante e a contrapressão, sempre mantendo uma diferença entre elas menor que a tensão de confinamento efetiva.

Nos ensaios, a diferença entre estas pressões foi mantida sempre em 10 kPa. As pressões foram elevadas em incrementos de 40 kPa com duração de 2 minutos, porém eventualmente era feito um incremento de 10 kPa com duração de 1 minuto para conferência do parâmetro B de Skempton do corpo de prova.

O parâmetro B de Skempton foi calculado pela razão entre a variação da poropressão (u) e a variação da pressão confinante (σ_3), conforme mostra a Equação 5.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} = \frac{u_1 - u_0}{\Delta \sigma_3} \quad [5]$$

O parâmetro B mede o quanto do incremento de confinante é transferido para a água presente no corpo de prova. Isto é, se todo o acréscimo é transferido para a poropressão, o parâmetro B é igual a 1, representando que o corpo de prova está saturado, condição desejada para as análises. No entanto, ao atingir um B de 0,95, considera-se que o corpo de prova já está na condição saturada e é permitida a

finalização da etapa de saturação. Caso o parâmetro B se encontre abaixo de 0,95, é preciso continuar incrementando a pressão até elevar o parâmetro B até o critério de ensaio.

O tempo para atingir a saturação, considerando o estado compactado dos corpos de prova e o tempo de estabilização das pressões em cada incremento, foi de 2 a 3 dias, em média. Os corpos de prova de solo de Mandaguaçu saturavam mais rápido do que os de Santa Maria, mesmo quando colocados sob as mesmas pressões.

d) Fase de Consolidação

Ao término da saturação, iniciou-se a fase de consolidação do corpo de prova que, usualmente, estava submetido a uma tensão efetiva menor que a tensão confinante efetiva adotada para o ensaio. No caso deste trabalho, as tensões confinantes ensaiadas foram de 50, 100 e 200 kPa.

A consolidação ou adensamento do corpo de prova foi realizada isotropicamente, impondo as tensões confinantes e mantendo a válvula da contrapressão aberta. A imposição pode ser feita pelo aumento da confinante ou redução da contrapressão, ou pela combinação de ambas, permitindo que ocorra a dissipação do excesso de pressão nos poros.

Nos ensaios realizados, optou-se por elevar a tensão confinante ao invés de reduzir a contrapressão a fim de se evitar a formação de bolas de ar no sistema. Em todos os ensaios, a contrapressão aplicada no último estágio de saturação foi mantida, elevando-se apenas a pressão confinante até que a diferença entre elas fosse a tensão confinante efetiva do ensaio.

Durante o adensamento, a válvula da contrapressão permaneceu aberta enquanto o sistema aplicava pressões no corpo de prova e registrava as deformações volumétricas em função do tempo. O *software* indicou o grau de consolidação do corpo de prova durante todo processo. Quando o corpo de prova atingia o intervalo de 95-99% de grau de consolidação, o estágio de consolidação era encerrado, indicando a estabilização das variações de volume do corpo de prova.

Ao fim desta etapa, o *software* gera automaticamente o gráfico da variação volumétrica pela raiz quadrada do tempo ($\Delta V \times \sqrt{t}$). Por este gráfico determinou-se o t_{100} , utilizado na determinação da taxa de deformação axial da prensa durante a fase de cisalhamento, conforme a BS 1377-7/1990.

e) Fase de Cisalhamento

A última etapa do ensaio consiste no cisalhamento do corpo de prova, saturado e consolidado. Nesta fase foi imposta uma velocidade de deformação vertical constante, determinada pelo tipo de ensaio a ser conduzido e dados da etapa de consolidação.

De acordo com a BS 1377-7/1990, a taxa de deformação máxima ($\varepsilon_f/t_f\%$) para os ensaios triaxiais do tipo CU, realizados nesta pesquisa, deve ser determinada conforme Equação 6.

$$\frac{\varepsilon_f}{t_f} \% = \frac{\varepsilon_f \cdot L}{100 \cdot t_f} \text{ mm/min} \quad [6]$$

Onde, t_f é o tempo de ruptura, em minutos, e L é a altura do corpo de prova, em mm. Determinou-se t_f ao multiplicar t_{100} por um fator de correção, conforme equação apresentada na Tabela 4, considerando ensaio CU e sem presença de drenos laterais.

Tabela 4 – Fatores de correção para determinação do tempo de ruptura (t_f)

Tipo de ensaio	Sem drenos laterais	Com drenos laterais
Não drenado (CU)	$0,53 \times t_{100}$	$1,8 \times t_{100}$
Drenado (CD)	$8,5 \times t_{100}$	$14 \times t_{100}$

Fonte: Adaptado de BS 1377-7/1990.

Importante ressaltar que nos casos em que $t_f < 120 \text{ min}$, a norma prescreve que se utilize $t_f = 120 \text{ min}$. Também ficou definido que para uma mesma bateria de ensaios (que compreende os ensaios de 50, 100 e 200 kPa), ao se determinar a taxa de deformação para o primeiro ensaio, esta era mantida a mesma para os demais.

Com os dados coletados e tratados, foi possível plotar as curvas de tensão desviadora ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) versus deformação axial (ε) e variação da poropressão (Δu) versus deformação axial (ε), além dos gráficos de trajetória de tensões totais (q/p) e efetivas (q'/p'). Para as análises comparativas entre o solo puro e o solo reforçado com fibras PET, foram plotados também gráficos de energia de deformação absorvida (E_d) versus tensão confinante efetiva (σ'_c), que corresponde à área sobre a curva

tensão desviadora *versus* deformação axial.

A envoltória de resistência foi obtida a partir dos pontos da trajetória de tensões efetivas correspondentes à deformação axial de 16%. Esta escolha se deu, primeiramente, por uma questão de padronização para as análises, e também para se observar o efeito da inserção das fibras PET, as quais absorvem e transferem mais energia quanto maior o nível de deformação sofrido pelo corpo de prova.

Para conversão dos parâmetros obtidos pelo gráfico de trajetória de tensões efetivas (d' e β'), cuja reta é expressa pela Equação 7, fez-se uso das Equações 8 e 9, as quais correlacionam os valores de d' e β' com c' e ϕ' .

$$q' = p' \cdot \text{tg}\beta' + d' \quad [7]$$

$$\text{sen}\phi' = \text{tg}\beta' \therefore \phi' = \text{arc sen}(\text{tg}\beta') \quad [8]$$

$$c' = \frac{d'}{\text{cos}\phi'} \quad [9]$$

Nos estudos envolvendo a inserção de fibras no solo, também é possível analisar a contribuição das fibras por meio da Energia de Deformação Absorvida (E_{def}), determinada graficamente pela área sob a curva tensão-deformação.

A Energia de Deformação Absorvida também pode ser definida como a tenacidade do material, ou seja, o quanto um material absorve de energia até sua ruptura. Para as análises realizadas neste estudo, considerou-se a área da curva até a deformação de 16% - E_{def} , relacionada às tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa.

3.2.10 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)

Os ensaios de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio foram realizados no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Estadual de Londrina, utilizando o porosímetro AutoPore 9500 da empresa Micromeritics, apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Porosímetro AutoPore 9500

Fonte: Nagata, 2015.

As medidas foram realizadas com baixa pressão (pressões variando de 1 psi a 30 psi) e com alta pressão (pressões variando de 30 psi até 35000 psi) em subamostras de formato cúbico, com aproximadamente 1 cm de aresta.

A fim de se verificar variações na distribuição de poros causadas pela inserção de fibras na matriz bem como distribuição pós-ruptura, foram feitos ensaios a partir de amostras compactadas e não ensaiadas assim como amostras coletadas após a ruptura dos corpos de prova na câmara triaxial.

Quanto às amostras dos corpos de prova rompidos, foram avaliadas apenas aquelas referentes ao ensaio triaxial realizado com tensão confinante de 200 kPa, devido a tendência de comportamento ficar mais evidente para níveis de tensões mais elevados.

No total, foram feitos oito ensaios, quatro em amostras não rompidas e quatro em amostras rompidas, para ambos os solos, com e sem fibras. Para cada amostra foram medidos 60 pontos de pressão, sendo o tempo de estabilização de cada ponto de 300 s. Cada amostra foi medida em triplicata e os resultados de porosidade têm, estatisticamente, 95% de confiança.

3.2.11 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens obtidas por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise (LMEM) da Universidade Estadual de Londrina. O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico da marca americana FEI, modelo Quantum 200, apresentado na Figura 32.

Figura 32 - Microscópio Eletrônico de Varredura FEI, Quantum 200



Fonte: Autor.

O equipamento MEV utiliza um feixe de elétrons de alta energia e pequeno diâmetro para a geração de sinais na superfície de amostras sólidas, analisando a amostra ponto a ponto, por linhas sucessivas. Os sinais gerados são coletados por detectores e revelam informações de interesse como a morfologia externa e composição química da amostra. Os dados são coletados de uma área selecionada e uma imagem bidimensional é formada.

Para que amostras não condutoras de eletricidade possam ser analisadas no MEV, como é o caso do solo, é necessário recobri-las com algum metal ou carbono, tornando sua superfície condutora. Além disso, o recobrimento das amostras reduz o carregamento de elétrons, melhora a emissão de elétrons secundários, protege amostras sensíveis ao feixe e reduz possíveis danos que o feixe possa causar na amostra.

As amostras ensaiadas neste trabalho foram retiradas dos corpos de prova, com e sem fibras, rompidos nos ensaios triaxiais com tensões confinantes de 100 e 200 kPa. As amostras foram recobertas com ouro utilizando o metalizador da marca BAL-TEC, modelo SCD 050 *Sputter Coater*, e as imagens foram feitas utilizando o detector de elétrons secundários (SE), que formam imagens com alta resolução. A Figura 33 mostra as amostras preparadas, antes da etapa de recobrimento por ouro.

Figura 33 - Amostras preparadas para o recobrimento por ouro



Fonte: Autor.

Os ensaios de MEV são de grande importância no estudo de materiais compósitos, pois muito do comportamento mecânico destes materiais é explicado por fenômenos na microestrutura. Sendo assim, por meio das imagens de microscopia foi possível visualizar a interação solo-fibra e as alterações geradas na superfície de ambos solos reforçados com as fibras PET, confirmando hipóteses estabelecidas durante a fase experimental da pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, inicialmente são apresentados e discutidos os resultados de caracterização física, química e mineralógica dos dois solos estudados, assim como suas classificações, de acordo com os sistemas SUCS e MCT, e curvas de compactação. Na sequência, enfoque é dado aos resultados de comportamento mecânico dos compósitos solo-fibra PET obtidos por ensaios de compressão triaxial CU. Por fim, é demonstrado os efeitos estruturais da inserção de fibra nas matrizes de solo a partir dos resultados de porosimetria e microscopia eletrônica de varredura.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os resultados de massa específica dos sólidos (ρ_s), limites de Atterberg e área superficial estão apresentados na Tabela 5. Importante ressaltar que estes ensaios foram realizados apenas no solo de Santa Maria, enquanto os parâmetros referentes ao solo de Mandaguaçu foram tomados a partir do trabalho de Ferreira (2019), uma vez que as amostras utilizadas foram as mesmas.

Tabela 5 - Caracterização física dos solos de Mandaguaçu e Santa Maria

Parâmetro	Valor
Mandaguaçu	
Massa Específica dos Sólidos - ρ_s (g/cm ³)	2,69
Limite de Liquidez - LL (%)	27,0
Limite de Plasticidade - LP (%)	17,0
Índice de Plasticidade - IP (%)	10,0
Área Superficial - BET (m ² /g)	2,70
Santa Maria	
Massa Específica dos Sólidos - ρ_s (g/cm ³)	2,59
Limite de Liquidez - LL (%)	41,0
Limite de Plasticidade - LP (%)	29,0
Índice de Plasticidade - IP (%)	12,0
Área Superficial - BET (m ² /g)	12,03

Fonte: Ferreira (2019) & Autor.

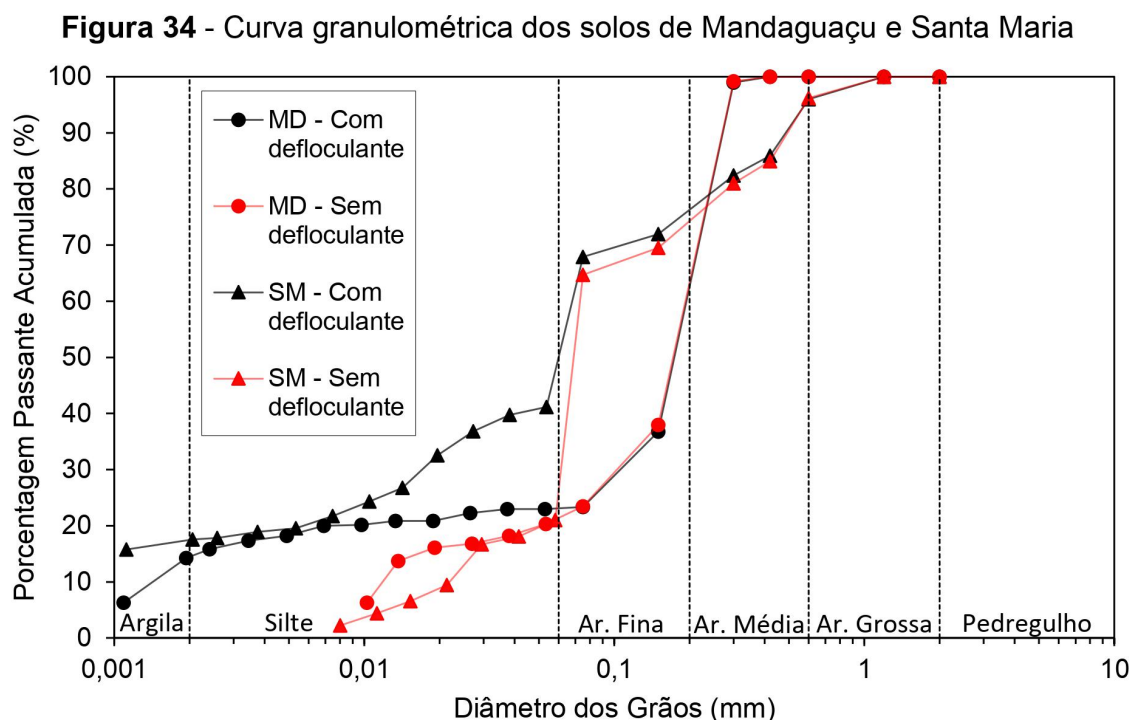
Os resultados obtidos para a massa específica dos sólidos (ρ_s) e limites de consistência na amostra de solo de Santa Maria estão condizentes com os resultados obtidos por Fernandes (2015), que realizou a caracterização física de todas as

camadas de solo da Voçoroca Buraco Fundo, local de coleta das amostras. Os valores obtidos pela autora foram de $\rho_s = 2,64 \text{ g/cm}^3$, LL = 37%, LP = 25% e IP = 12%. Ambos os solos apresentam índice de plasticidade (IP) entre 7%-15%, sendo classificados como medianamente plásticos.

A área superficial específica ou superfície específica é definida como a razão da área superficial absoluta de um sólido para sua massa, expressa em m^2/g . Isto inclui as superfícies externas das partículas sólidas, bem como todas as porções das superfícies internas acessíveis ao adsorvato (Cessa *et al.*, 2009).

Assim, quanto maior for o teor de finos do material, maior será sua área superficial específica. A diferença dos resultados encontrados entre os solos de Mandaguaçu ($A_s = 2,70 \text{ m}^2/\text{g}$) e Santa Maria ($A_s = 12,026 \text{ m}^2/\text{g}$) pode ser comprovada ao observar os maiores de LL e LP apresentados pelo solo de Santa Maria, indicando que esse solo requiere maiores quantidade de água para atingir esses estados.

Na Figura 34 são apresentadas as curvas de distribuição granulométricas para ambos os solos. Ao analisar as curvas em seu estado natural, isto é, sem o uso do defloculante, observa-se similaridade entre elas, sendo ponto de partida na comparação do efeito do reforço com fibras PET em solos granulometricamente semelhantes, porém, com diferentes graus de evolução pedogenética.



Fonte: Autor.

Observa-se que as curvas obtidas com uso do defloculante (cor preta) e sem (cor vermelha) apresentaram semelhança nas porcentagens associadas à fração grossa, comprovando a homogeneidade das amostras de solo ensaiadas. Quanto às frações fina (silte e argila), o uso do defloculante, que neutraliza as cargas elétricas dos argilominerais e desfaz agregações, resultou em uma parcela de argila não identificada sem o uso do reagente, para ambos os solos ensaiados. Além disso, no solo de Santa Maria, o uso do defloculante indicou uma parcela de silte bastante superior à parcela obtida pelo ensaio sem o hexametáfosfato de sódio.

A Tabela 6 apresenta, a composição discretizada de ambos os solos, além de parâmetros obtidos a partir de suas curvas granulométricas, como o diâmetro efetivo (D_{10}), coeficiente de não uniformidade (C_{NU}) e coeficiente de curvatura (C_c).

Tabela 6 - Análise granulométrica dos solos

Composição e parâmetros	Mandaguaçu		Santa Maria	
	Sem defloculante	Com defloculante	Sem defloculante	Com defloculante
% Passante #4,8 mm	100,0	100,0	100,0	100,0
% Passante #2,0 mm	100,0	100,0	100,0	100,0
% Passante #0,42 mm	99,99	99,99	84,93	85,91
% Passante #0,075 mm	23,47	23,35	64,71	67,91
Pedregulho - %	0,0	0,0	0,0	0,0
Areia grossa - %	0,0	0,0	4,0	4,0
Areia média - %	37,0	37,0	22,0	20,0
Areia fina - %	42,0	40,0	49,0	26,0
Silte - %	21,0	9,0	25,0	33,0
Argila - %	0,0	14,0	0,0	17,0
D_{10}	0,002	0,014	0,025	-
C_{NU}	95	13,5	2,88	-
C_c	3,76	26,3	2,00	-

Fonte: Autor.

4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Com base nos valores apresentados na Tabela 6, ambos os solos em seu estado bruto (sem defloculante) são classificados, de acordo com a NBR 6502/2022, como areias siltosas. Com o defloculante, o solo de Mandaguaçu passa a ser classificado como areia argilosa, enquanto o solo de Santa Maria permanece como areia siltosa.

A classificação dos solos de acordo com as classificações SUCS (ASTM D2487-17) e MCT (Nogami & Villabor, 1980) é apresentada na Tabela 7 para ambos os solos. Vale ressaltar que os valores utilizados para a classificação SUCS dos solos foram tomados a partir das análises granulométricas realizadas nas amostras com uso de defloculante.

Tabela 7 - Classificação do solo de Mandaguaçu e Santa Maria

Solo	Mandaguaçu		Santa Maria	
Parâmetros de Classificação	Valor	Critério	Valor	Critério
% Retida #0,075 mm	76,65	% Retida > 50	32,09	% Retida < 50
% Passante #0,075 mm	23,35	% Passante > 12	67,91	% Passante > 12
Índices de Consistência	CL	-	ML	-
Classificação SUCS		SC		CL com areia
Perda por imersão - Pi (%)	70	-	30	-
Coeficiente c'	0,97	-	1,6	-
Coeficiente d' (kg/m ³)	26	-	34,13	-
Índice de classificação - e'	1,14	-	0,978	-
Classificação MCT		LA'		LG'

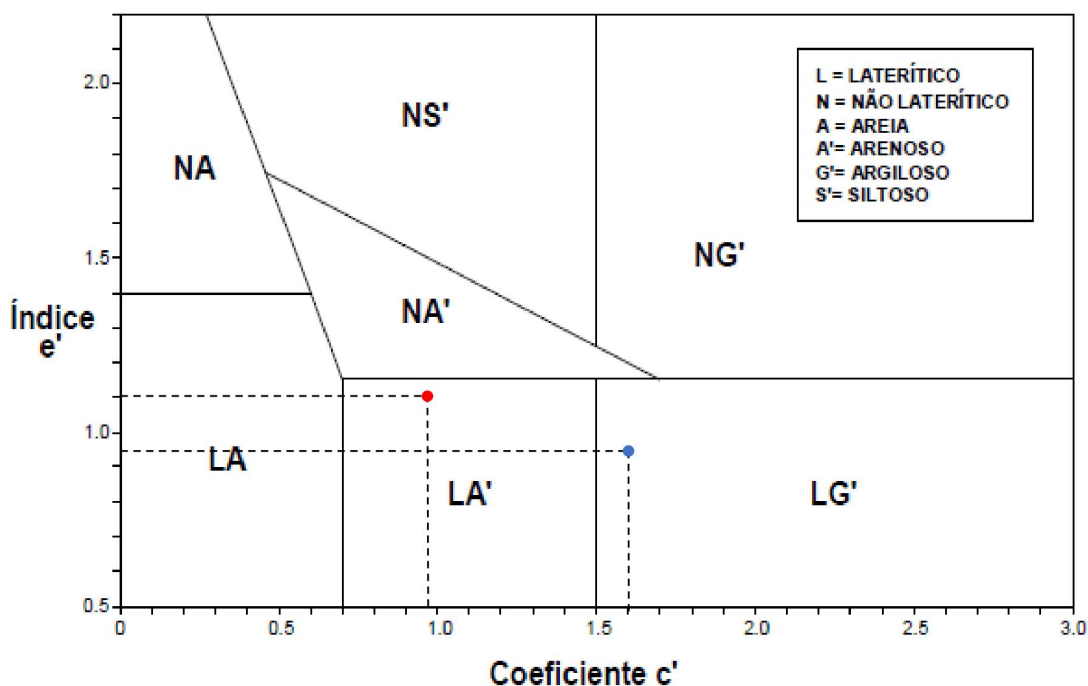
Fonte: Autor.

O solo de Mandaguaçu foi classificado como uma areia argilosa (SC - “*clayey sand*”) pelo sistema SUCS e como um solo arenoso laterítico (LA') pelo método MCT. Já o solo de Santa Maria foi classificado granulometricamente como uma argila arenosa (CL com areia - “*sandy lean clay*”) pelo sistema SUCS e como um solo argiloso laterítico (LG') pelo método MCT.

As divergências entre a classificação textural e SUCS do solo de Santa Maria se devem, primeiramente, por se tratar de um solo de clima subtropical, onde, dependendo do nível de alteração do solo, pode dificultar a utilização de classificações tradicionais como a SUCS. Além disso, o solo de Santa Maria encontra-se em uma camada de transição, fator que influencia diretamente na classificação.

Sobre a classificação MCT do solo de Santa Maria, definida como argiloso laterítico (LG'), também foi observada a influência do material fino nos resultados dos ensaios e, conseqüentemente, na classificação deste solo. A Figura 35 apresenta os resultados das classificações MCT de ambos os solos plotados no ábaco, onde fica evidente a proximidade do solo de Santa Maria com a região do ábaco de solos arenosos lateríticos (LA').

Figura 35 - Ábaco de classificação MCT com resultados dos ensaios plotados



Legenda: Em vermelho, classificação MCT do solo de Mandaguaçu, em azul, do solo de Santa Maria.

Fonte: Autor.

4.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Os resultados de pH, CTC e de composição química de ambos os solos estão apresentados na Tabela 8. Os resultados de pH em H₂O foram semelhantes, indicando em ambos os casos solos ácidos. Tratando-se de solos tropicais, os resultados vão de acordo com Ernani (2008) que afirma que os solos brasileiros, em geral, são naturalmente ácidos em razão do alto grau de intemperização e intensa lixiviação de bases. Além disso, os valores de pH obtidos servem, indiretamente, como indicativos de se tratarem de solos lateríticos.

Quanto aos valores de CTC, os resultados foram bem diferentes entre os solos. A amostra de solo de Santa Maria possui CTC quase 8 vezes maior que o solo de Mandaguaçu, indicando maior desbalanceamento de cargas elétricas e, conseqüentemente, maior capacidade de retenção de cátions e, também, de moléculas de água (Souza *et al.*, 2009).

Em relação aos teores de matéria orgânica, o solo de Santa Maria apresentou valor bastante superior ao de Mandaguaçu. De acordo com o Instituto Agrônômico (IAC), o teor de matéria orgânica é útil para dar ideia da textura do solo,

com valores até de 15 g. dm^{-3} para solos arenosos, entre 16 e 30 g. dm^{-3} para solos de textura média e de 31 a 60 g. dm^{-3} para solos argilosos. Assim, os resultados se enquadram na classificação do IAC, pois o solo de Santa Maria, que apresenta maior teor de silte, possui textura bastante diferente do solo de Mandaguçu.

Outro ponto que merece destaque é a quantidade de cátions de cálcio, magnésio e potássio presentes no solo de Santa Maria em comparação ao solo de Mandaguçu. No processo de intemperismo químico, as bases são progressivamente eliminadas na solução de lixiviação, logo, a presença desses elementos revela que o solo de Santa Maria é menos evoluído pedologicamente.

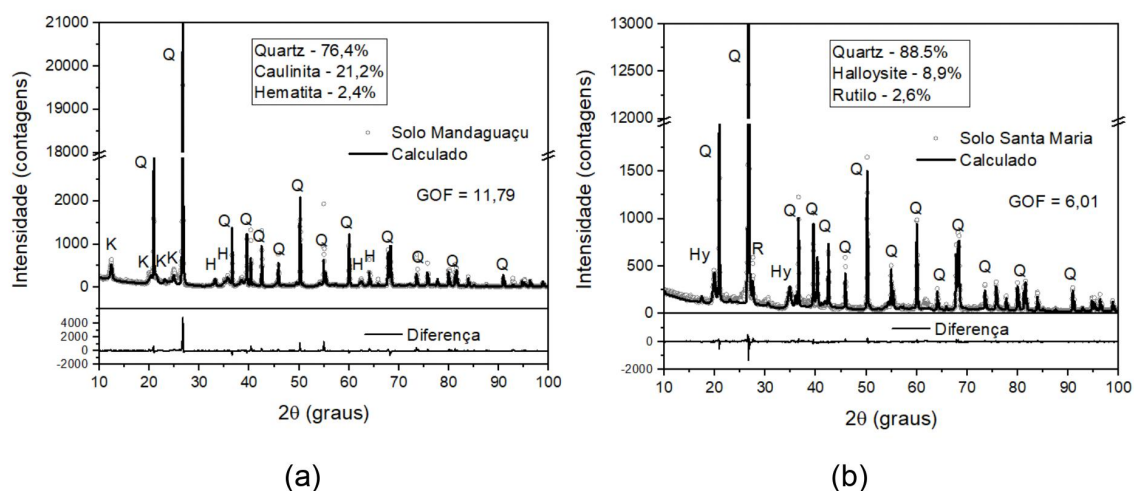
Tabela 8 - Características químicas dos solos

Característica química	Mandaguçu	Santa Maria
pH em H_2O	4,3	4
pH em KCl	3,6	3,7
ΔpH	-0,7	-0,3
Ca^{+2} (cmol. dm^{-3})	0	1,72
Mg^{+2} (cmol. dm^{-3})	0	1,89
Al^{+3} (cmol. dm^{-3})	0,69	0,27
$\text{H}^{+2}\text{Al}^{+3}$ (cmol. dm^{-3})	2,73	18,95
K^{+} (cmol. dm^{-3})	0,03	0,27
CTC (cmol. dm^{-3})	2,76	22,83
P (mg. dm^{-3})	1,3	5,3
C (g. dm^{-3})	0,11	11,84
MO (g. dm^{-3})	0,19	20,36

Fonte: Autor.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A Figura 36 apresenta, respectivamente, os difratogramas dos solos de Mandaguçu (a) e Santa Maria (b). Observa-se pela Figura 37a a presença de quartzo (76,4%) no solo de Mandaguçu-PR, uma vez que sua principal fração granulométrica é a areia, além da presença de caulinita (21,2%), um argilomineral comumente encontrado em solos tropicais bem evoluídos do Sul do Brasil, e hematita (2,4%), um óxido de ferro comum que dá a coloração avermelhada deste solo.

Figura 36 - Difratoograma dos solos de Mandaguaçu (a) e Santa Maria (b)

Legenda: GOF = *Goodness of Fit* (Qualidade do Ajuste, termo estatístico)

Fonte: Autor.

Para o solo de Santa Maria (Figura 37b), nota-se a majoritária presença de quartzo (88,5%), associada mais uma vez à principal fração granulométrica deste solo que é a areia. Também foi constatada a presença de haloisita (8,9%), um argilomineral do grupo da caulinita que apresenta morfologia tubular e que passou por menor processo de evolução pedogênica e de rutilo (2,6%), um mineral composto de dióxido de titânio (TiO_2) e frequentemente encontrado incrustado no quartzo.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de Fluorescência de Raios-X, identificando a composição e concentração de cada elemento presente nas amostras dos solos.

Os valores corroboram com os dados do ensaio de DRX e com as características físicas de cada solo, detectando como principais elementos o Si e Al, elementos que fazem parte do quartzo [SiO_2], da caulinita [$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$] e haloisita [$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8nH_2O$], sendo esses os minerais em maior abundância em ambos os solos. A presença de Ti é maior no solo de Santa Maria pela presença do polimorfo rutilo (TiO_2). Destaca-se novamente a presença de potássio no solo de Santa Maria, a qual não está associada a nenhum dos minerais identificados anteriormente.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de Fluorescência de Raios-X

Solo	Mandaguaçu	Santa Maria
Elemento	(%)	(%)
Si	61,67	62,22
Al	22,83	15,29
Fe	11,59	11,89
Ti	2,10	6,69
K	-	1,72

Fonte: Autor.

Ainda sobre os resultados da Tabela 9, os espectros de energia apresentaram nitidamente a presença do elemento Fe através dos fotópicos Fe-Ka e Fe-Kb para ambas amostras ensaiadas. Para o solo de Mandaguaçu, este ferro está associado à presença da hematita (Fe_2O_3), porém, foi observada uma quantidade de ferro (Fe) na amostra de Santa Maria cuja fase cristalina não se conseguiu identificar, indicando presença de mineral com baixo grau de cristalinidade.

Com o intuito de investigar a cristalinidade dos elementos químicos que compõe os solos, realizou-se o ensaio de extração de amorfo, que buscou quantificar o Si, Al e Fe amorfo presente em cada solo. A Tabela 10 resume os valores encontrados para cada análise, junto com o desvio padrão. A unidade de medida refere-se à quantidade do elemento em micrograma (μg) por grama (g) de solo.

Tabela 10 - Quantificação de Si, Al e Fe amorfo de cada solo

Solo	Quantificação do elemento ($\mu g/g$)		
	Si	Al	Fe
Mandaguaçu	372.97 \pm 5.03	1727.70 \pm 41.56	192.75 \pm 15.71
Santa Maria	515.26 \pm 22.34	7591.21 \pm 491.60	2321.09 \pm 77.71

Fonte: Autor.

A análise conjunta das Tabelas 9 e 10 torna evidente as diferenças mineralógicas entre os solos de Mandaguaçu e Santa Maria. Ao comparar as porcentagens totais de Si, Al e Fe, obtidas no ensaio de fluorescência de raios-X, não é possível observar diferenças significativas entre ambos os solos. No entanto, ao analisar a quantificação dos elementos amorfos em cada solo nota-se que a quantidade de Al amorfo no solo de Santa Maria é quatro vezes maior que no solo de Mandaguaçu, enquanto que para o Fe amorfo, essa quantidade é aproximadamente

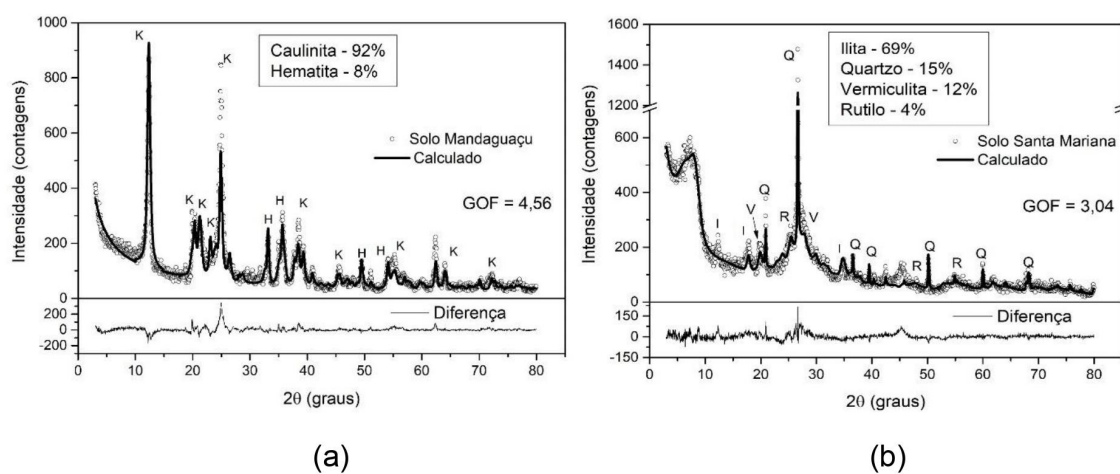
doze vezes maior. Acredita-se que a maior sensibilidade desses elementos (Al e Fe) no solo de Santa Maria esteja associada as substituições isomórficas das folhas estruturais dos argilominerais presentes nesse solo.

Estes dados indicam que, mesmo tratando-se de solos arenosos, o grau de intemperismo químico que cada solo está sujeito é bastante diferente. A presença do potássio K no solo de Santa Maria (Tabela 9), elemento facilmente lixiviado durante o intemperismo químico, também indica que este solo está sujeito a um menor grau de intemperismo do que o solo de Mandaguaçu, dando a ele um caráter de camada de transição.

Diferentemente dos minerais cristalinos que possuem estrutura interna organizada em padrões repetitivos e bem definidos, os minerais com baixo grau de cristalinidade e amorfos não apresentam organização regular, logo, suas moléculas estão dispostas de forma desordenada, sem estrutura de rede cristalina bem definida. Assim, é esperado que a presença bastante elevada destes minerais no solo de Santa Maria, quando comparado ao solo de Mandaguaçu, resulte em dois solos de comportamento mecânico distintos.

A Figura 37 apresenta, respectivamente, os difratogramas realizados nas frações de argila dos solos de Mandaguaçu (a) e Santa Maria (b), extraídas pelo método da pipeta.

Figura 37 - Difratograma das frações argila do solo de Mandaguaçu (a) e Santa Maria (b)



Fonte: Autor.

A realização do ensaio de DRX na fração argila buscou identificar com melhor precisão os argilominerais de cada solo, eliminando o quartzo da amostra (associado à fração areia de cada solo).

Analisando o solo de Mandaguaçu (Figura 38a), confirmou-se a presença da caulinita (92%) e da hematita (8%), que haviam sido identificadas na fração total deste solo. Para o solo de Santa Maria (Figura 38b), além de rutilo (4%), já identificado na fração total do solo, observou-se a provável presença de illita (69%) $[(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]]$ e 12% de vermiculita $[(Mg, Fe)_3[(Si, Al)_4O_{10}][OH]_2nH_2O]$.

A illita é um argilomineral do tipo 2:1, não expansivo, em que a neutralização das cargas elétricas ocorre pela presença de potássio intercamadas, o que explica a presença de potássio na fluorescência de raios-X. Já a vermiculita é um silicato hidratado de formato lamelar e características físicas semelhantes às micas (estrutura 2:1), possui alta capacidade de troca catiônica e potencial expansivo, porém limitado (Ugarte *et al.*, 2004). Durante o manuseio do solo de Santa Maria, observou-se que este solo apresentava comportamento expansivo, sendo assim, a identificação da vermiculita confirmou o fenômeno físico observado durante os ensaios de caracterização deste solo.

A presença de quartzo (15%) identificado na fração argila do solo de Santa Maria indica contaminação da amostra, provavelmente associada ao método de extração em si. Com isso, denota-se que a separação total do quartzo ligado às partículas finas do solo requer uso de um defloculante mais forte e/ou maior tempo de agitação da amostra.

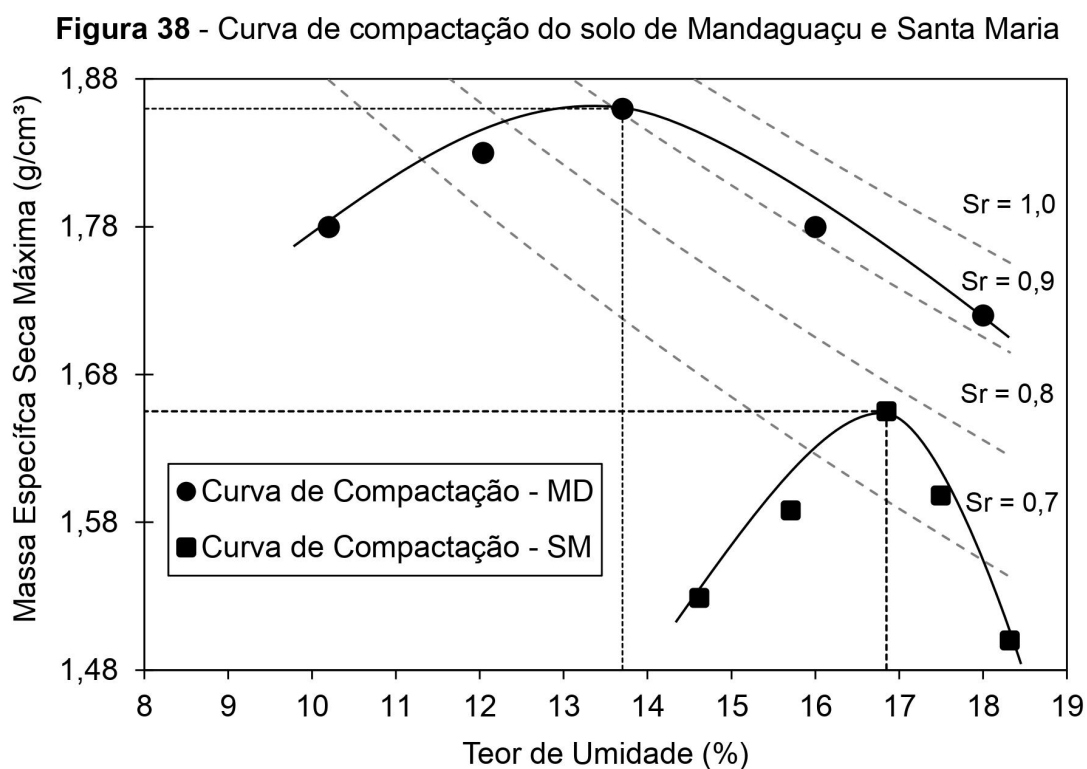
4.5 CURVAS DE COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

Os parâmetros de compactação utilizados para o solo de Mandaguaçu foram tomados a partir da curva de compactação construída por Ferreira (2019), uma vez que as amostras utilizadas neste estudo foram as mesmas do autor.

Para o solo de Santa Maria, cujos parâmetros de compactação eram desconhecidos, realizou-se o ensaio de Compactação Proctor Normal variando a umidade em aproximadamente 1%, diferentemente da variação de 2% constada na norma. Esta ação foi necessária devido à elevada sensibilidade do solo à adição de água.

Em teores de umidade de 20% ou mais, era observada uma expansão da massa de solo dentro do molde, comprovada durante a extrusão do corpo de prova que era retirado sem integridade.

A Figura 38 apresenta as curvas de compactação do solo de Mandaguaçu e Santa Maria, designadas conforme legenda, além das curvas de saturação ($S_r = 100\%$, 90% , 80% e 70%).



Fonte: Ferreira (2019) & Autor.

Comparando as curvas de Figura 38, nota-se que a curva do solo de Santa Maria é bem mais fechada que a curva de Mandaguaçu, tal fato explicou a dificuldade de se manter o controle de compactação durante moldagem dos corpos de prova deste solo para o ensaio triaxial. Além disso, durante os ensaios triaxiais, observou-se que os corpos de prova do solo de Mandaguaçu levavam menor tempo de saturação para atingir o parâmetro B de Skempton de 0,95. Isto se deve ao fato de, como indicado pelas curvas de saturação, na umidade ótima, o solo de Mandaguaçu já apresenta grau de saturação (S_r) de 90%, enquanto que o solo de Santa Maria, apresenta S_r de 78%, aproximadamente.

Os parâmetros de massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e umidade ótica ($\omega_{\acute{o}t}$) definidos ambos os solos estão resumidos na Tabela 11. Ressalta-se que a adição das fibras de PET no solo não afeta os parâmetros de compactação do solo (Shukla, 2017), logo, foram empregados os mesmos parâmetros.

Tabela 11 - Parâmetros de compactação dos solos

Solo	Massa Específica Seca Máxima (g. cm^{-3})	Teor de Umidade Ótima (%)
Mandaguaçu	1,87	13,7
Santa Maria	1,66	16,8

Fonte: Ferreira (2019) & Autor.

4.6 COMPORTAMENTO MECÂNICO

4.6.1 Solos sem Reforço

A Tabela 12 apresenta os dados dos corpos de provas ensaiados sem inclusão de fibras, identificados conforme a Tabela 3.

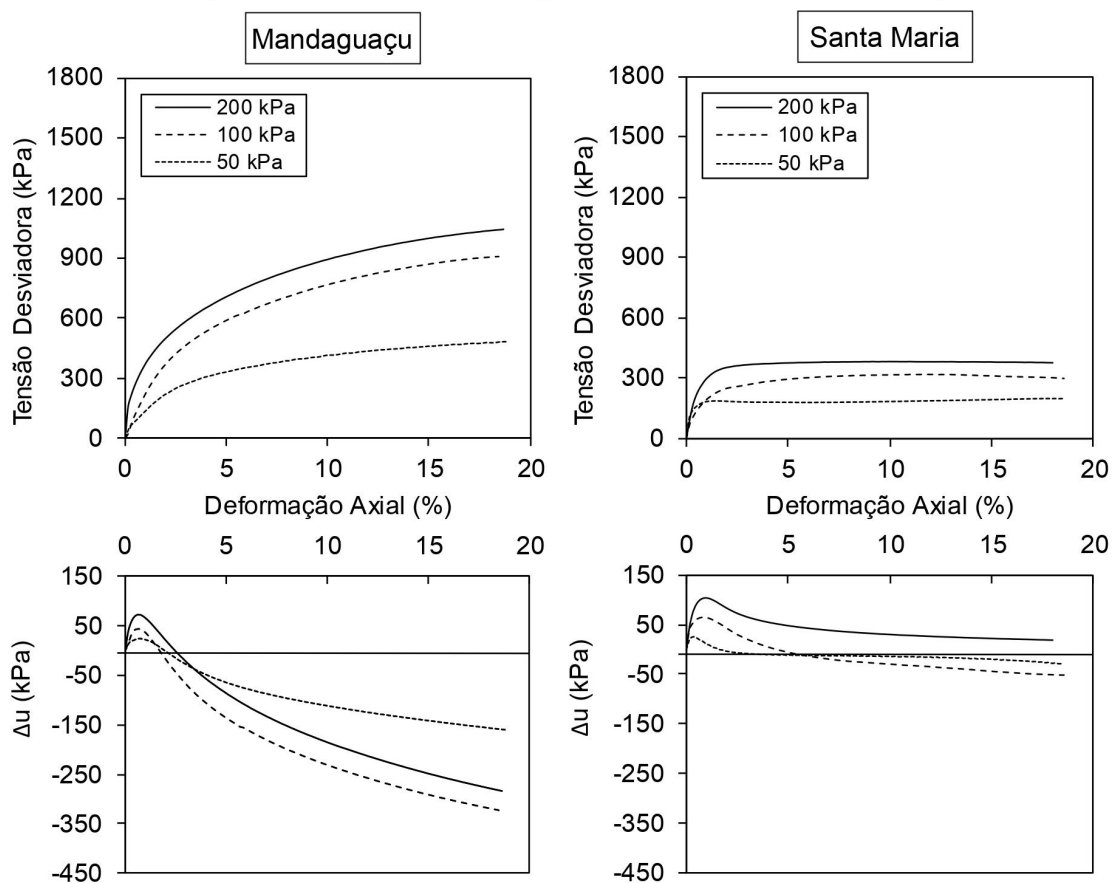
Tabela 12 - Corpos de prova dos ensaios triaxiais nos solos sem reforço

Dados do CP	Mandaguaçu			Santa Maria		
Identificação	MD01	MD02	MD03	SM01	SM02	SM03
Altura - h (mm)	100	100	100	100	100	100
Diâmetro - ϕ (mm)	50	50	50	50	50	50
Volume - V (cm^3)	197,9	197,9	197,9	197,9	197,9	197,9
Massa - M (g)	416,8	425,6	426,0	375,7	379,5	379,4
Massa Esp. Seca - ρ_d (g/cm^3)	1,86	1,89	1,89	1,63	1,64	1,64
Teor de Umidade - w (%)	13,4	13,9	14,1	16,5	16,8	17,2
Índice de Vazios - e	0,45	0,43	0,43	0,59	0,58	0,58
Grau de Saturação - S_r (%)	80,3	88,1	89,0	72,6	75,5	76,5
Grau de Compactação - (%)	99,3	100,9	100,9	98,4	99,2	98,8
Desvio de Umidade - (%)	-0,3	+0,2	+0,4	-0,3	0	+0,4

Fonte: Autor.

A Figura 39 apresenta as curvas tensão desviadora *versus* deformação axial e variação da poropressão *versus* deformação axial para os solos de Mandaguaçu e Santa Maria.

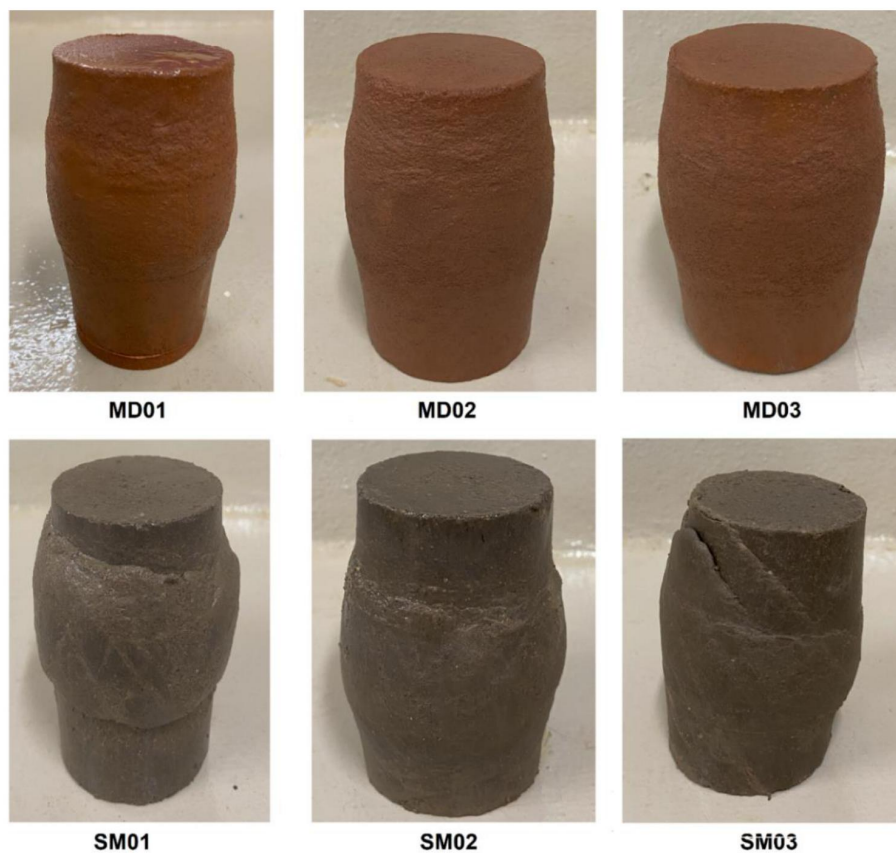
Figura 39 - Curvas tensão desviadora *versus* deformação axial e variação da poropressão *versus* deformação axial dos solos sem reforço



Fonte: Autor.

Importante ressaltar que durante a fase de cisalhamento nos ensaios triaxiais do tipo CU (consolidado não-drenado), a válvula referente à contrapressão permanece fechada, impossibilitando a saída da água e, conseqüentemente, a medição da variação volumétrica. Por esta razão, são realizadas medidas da variação da poropressão.

A partir das curvas tensão desviadora *versus* deformação axial, observa-se que ambas não apresentam pronunciamento de pico, indicando ruptura por deformação excessiva. Em outras palavras, os corpos de prova não apresentaram plano de ruptura nítido (ruptura física), evidenciado na Figura 40.

Figura 40 - Corpos de prova após ruptura na câmara triaxial

Fonte: Autor.

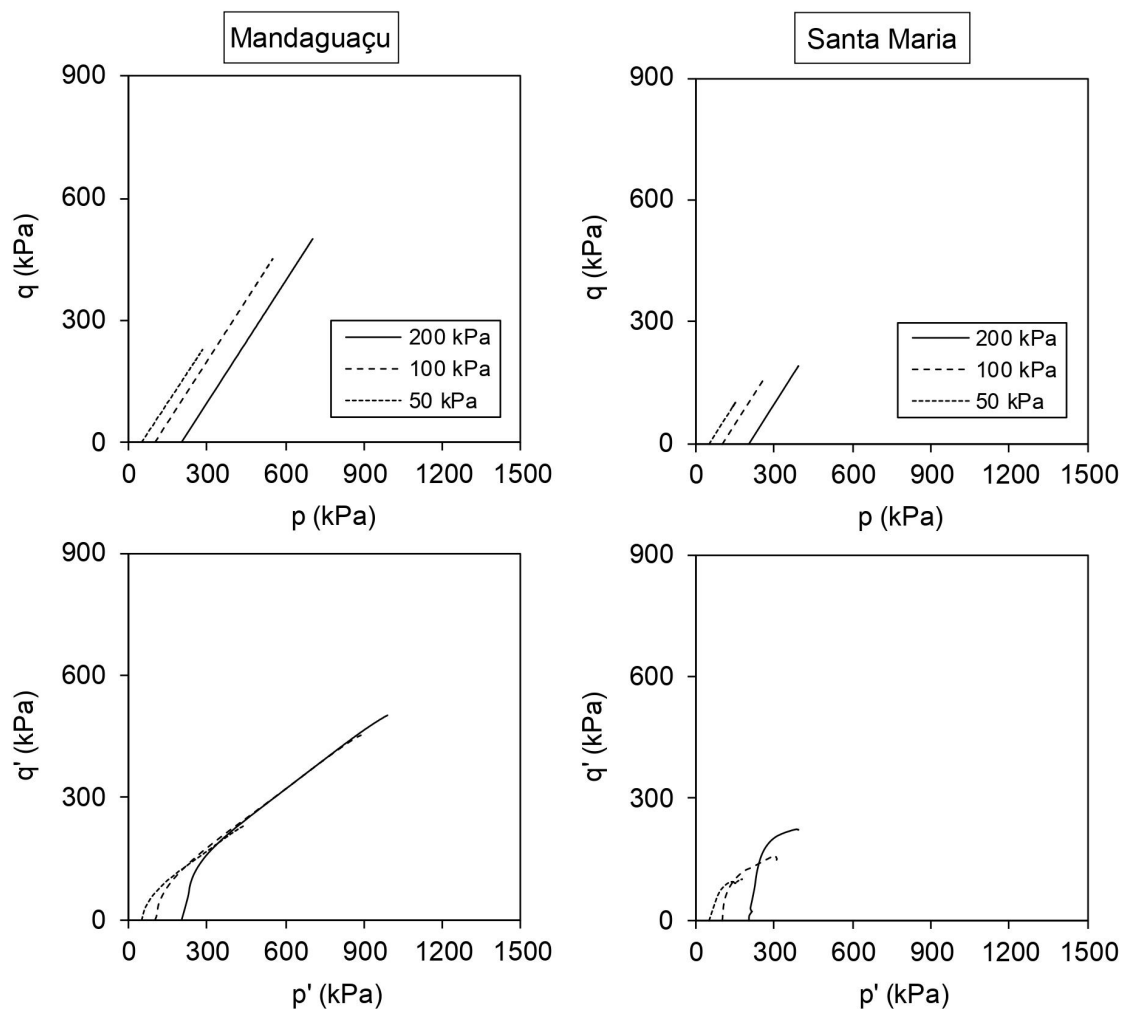
As curvas tensão desviadora de 50 e 200 kPa do solo de Santa Maria revelam um comportamento que sugere constância no valor de tensão desvio ao alcançar uma deformação de cerca de 4%. A curva de 100 kPa mostra uma leve tendência de crescimento do valor da tensão desvio até a deformação de 10%, porém em seguida, a tensão desvio passa a apresentar tendência decrescente.

Para o solo de Mandaguçu, as três curvas (50, 100 e 200 kPa) indicam comportamento elasto-plástico de endurecimento (*strain-hardening*), isto é, aumento da resistência com o aumento da deformação axial, enquanto que o solo de Santa Maria apresentou comportamento dúctil, sem presença de pico definido, tendência de areias (Ferreira *et al.*, 2021).

Sobre as curvas de variação da poropressão *versus* deformação axial, observou-se em todos os casos uma variação inicial positiva da poropressão e, logo após pequenas deformações, esta variação passa a ser negativa. Este comportamento contrativo inicial, seguido de comportamento expansivo, é usualmente observado em solos compactados (Souza Júnior, 2019).

A Figura 41 mostra os gráficos de trajetória de tensões totais e efetivas para os solos de Mandaguçu e Santa Maria.

Figura 41 - Trajetória de tensões totais e efetivas dos solos não reforçados



Fonte: Autor.

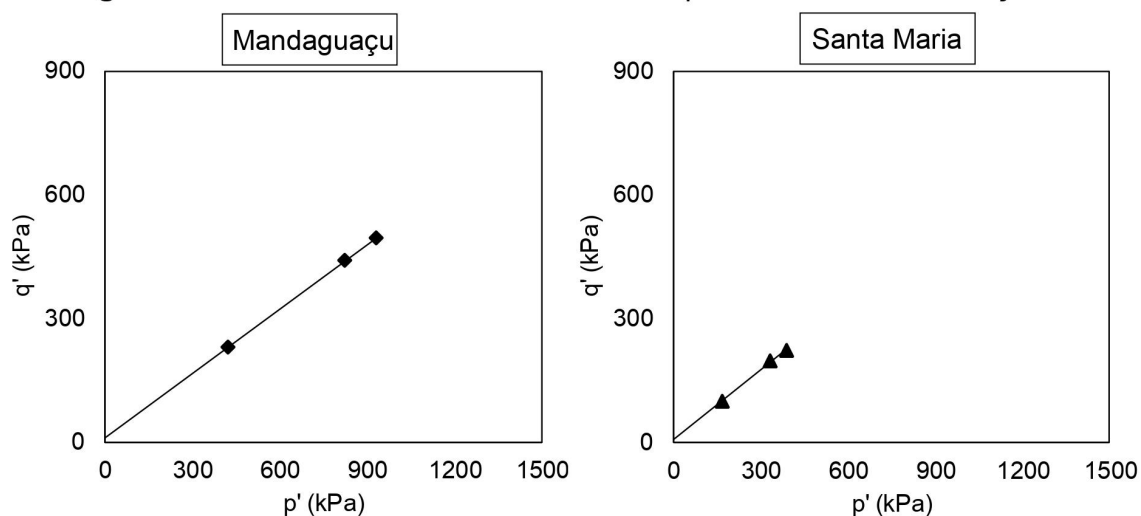
Na Tabela 13 são resumidos os valores de tensões totais (axial, confinante e desviadora), tensões efetivas e pressões neutras de cada ensaio realizado nos solos de Mandaguçu e Santa Maria, considerando a deformação limite de 16%.

Tabela 13 - Resumo de resultados de ambos os solos à deformação de 16%

Identificação do Ensaio	MD01	MD02	MD03	SM01	SM02	SM03
Tensão axial (kPa)	999,1	1675,6	1770,3	1150,1	1255,9	1276,6
Tensão confinante (kPa)	549,5	799,1	799,5	950	950	900
Tensão desviadora (kPa)	449,6	876,5	970,8	200,1	305,9	376,6
Var. da poropressão (kPa)	-146,5	-298,9	-258,1	-22,2	-45,7	20,4
Tensão axial efetiva (kPa)	650,7	1289,1	1434,1	267,0	461,4	610,5
Tensão confinante efetiva (kPa)	200,9	410,4	463,4	67,1	155,8	166,5

Fonte: Autor.

A Figura 42 traz as envoltórias de ruptura dos solos, em termos de tensões efetivas. As equações das envoltórias, bem como os parâmetros de resistência encontrados para cada solo, estão resumidas e apresentadas na Tabela 14.

Figura 42 - Envoltórias de resistência efetiva para os solos não reforçados

Fonte: Autor.

Nota-se que o solo de Santa Maria apresentou ângulo de atrito mais elevado, possivelmente por apresentar maior teor de quartzo e, conseqüentemente, maior efeito de intertravamento das partículas. Já o solo de Mandaguçu, mais evoluído, apresentou maior valor de intercepto coesivo, associado ao efeito de cimentação dos grãos de solo, devido à presença do óxido de ferro (hematita) em sua composição.

Tabela 14 - Parâmetros de resistência efetiva dos solos não reforçados

Solo - ID	d' (kPa)	β' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	Equação
Mandaguaçu - MD	12,2	28,7	14,6	33,1	$\tau = 14,6 + \sigma'.tg 33,1^\circ$
Santa Maria - SM	5,5	30,4	6,8	35,9	$\tau = 6,8 + \sigma'.tg 35,9^\circ$

Fonte: Autor.

4.6.2 Solos Reforçados com Fibras PET

A Tabela 15 apresenta os dados dos corpos de provas ensaiados com inserção de fibras, identificados conforme a Tabela 3.

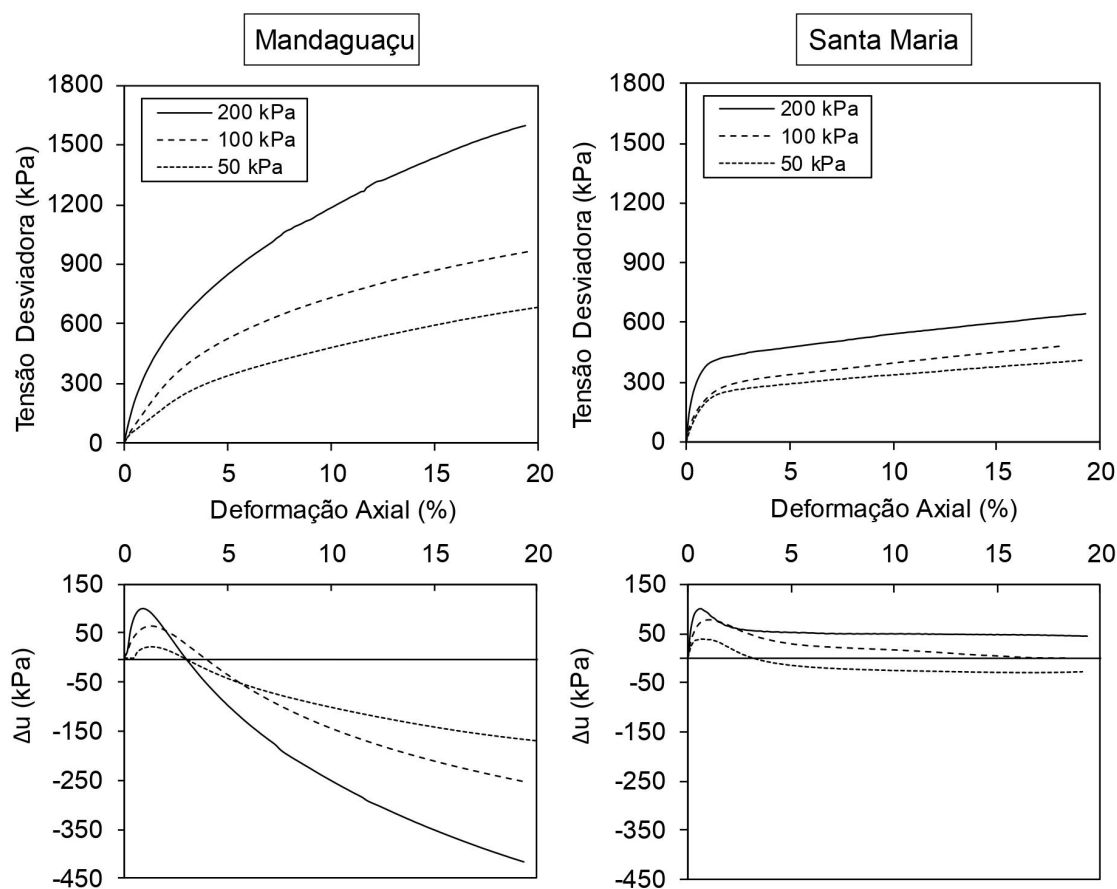
Tabela 15 - Corpos de prova dos ensaios triaxiais nos solos reforçados com fibras PET

Dados do CP	Mandaguaçu			Santa Maria		
Identificação	MDF01	MDF02	MDF03	SMF01	SMF02	SMF03
Altura - h (mm)	100	100	100	100	100	100
Diâmetro - ϕ (mm)	50	50	50	50	50	50
Volume - V (cm ³)	197,9	197,9	197,9	197,9	197,9	197,9
Massa - M (g)	419,9	434,2	422,5	386,1	388,8	379,4
Massa Esp. Seca - ρ_d (g/cm ³)	1,88	1,89	1,88	1,69	1,69	1,68
Teor de Umidade - w (%)	13,2	13,6	13,4	16,8	16,4	16,3
Índice de Vazios - e	0,43	0,42	0,43	0,54	0,54	0,54
Grau de Saturação - Sr (%)	81,1	86,8	83,8	81,4	79,5	78,2
Grau de Compactação - (%)	100,3	101,2	100,7	101,6	101,6	101,3
Desvio de Umidade - (%)	-0,5	-0,1	-0,3	0	-0,4	-0,5

Fonte: Autor.

A Figura 43 apresenta as curvas tensão desviadora *versus* deformação axial e variação da poropressão *versus* deformação axial para os solos reforçados com fibras PET de Mandaguaçu e Santa Maria, também saturados por contrapressão.

Figura 43 - Curvas tensão desviadora *versus* deformação axial e variação da poropressão *versus* deformação axial dos solos reforçados



Fonte: Autor.

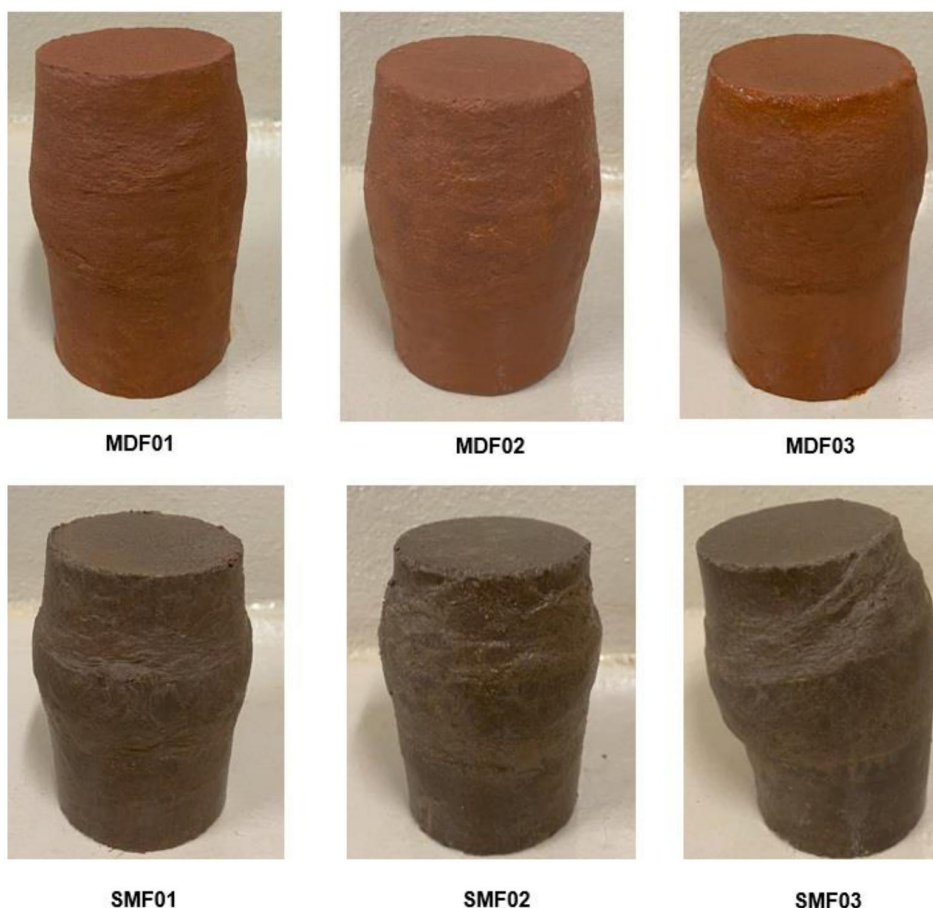
Sobre as curvas tensão desviadora *versus* deformação axial dos solos reforçados com fibras, nota-se, novamente, o não pronunciamento de pico e, portanto, indicativo de ruptura por deformação excessiva. Os corpos de prova rompidos, mostrados na Figura 44, também não apresentaram plano de ruptura nítido.

Com a inserção das fibras PET no solo de Mandaguçu, este continuou a apresentar comportamento elasto-plástico, isto é, ele continuou a ganhar resistência com aumento da deformação. No entanto, este ganho, em módulo, foi bastante superior quando comparado com o solo puro, evidenciando, portanto, a contribuição positiva das fibras nos parâmetros de resistência do solo.

Considerando o solo de Santa Maria, a inserção das fibras alterou significativamente o comportamento deste solo, para todas as tensões confinantes avaliadas. Sem a presença do reforço, este solo apresentou comportamento dúctil com constância no valor de tensão desvio após pequenas deformações. Ao adicionar

0,3% de fibras PET, observou-se aumento da resistência com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de endurecimento (*strain-hardening*), similar ao comportamento observado para o solo de Mandaguáçu puro.

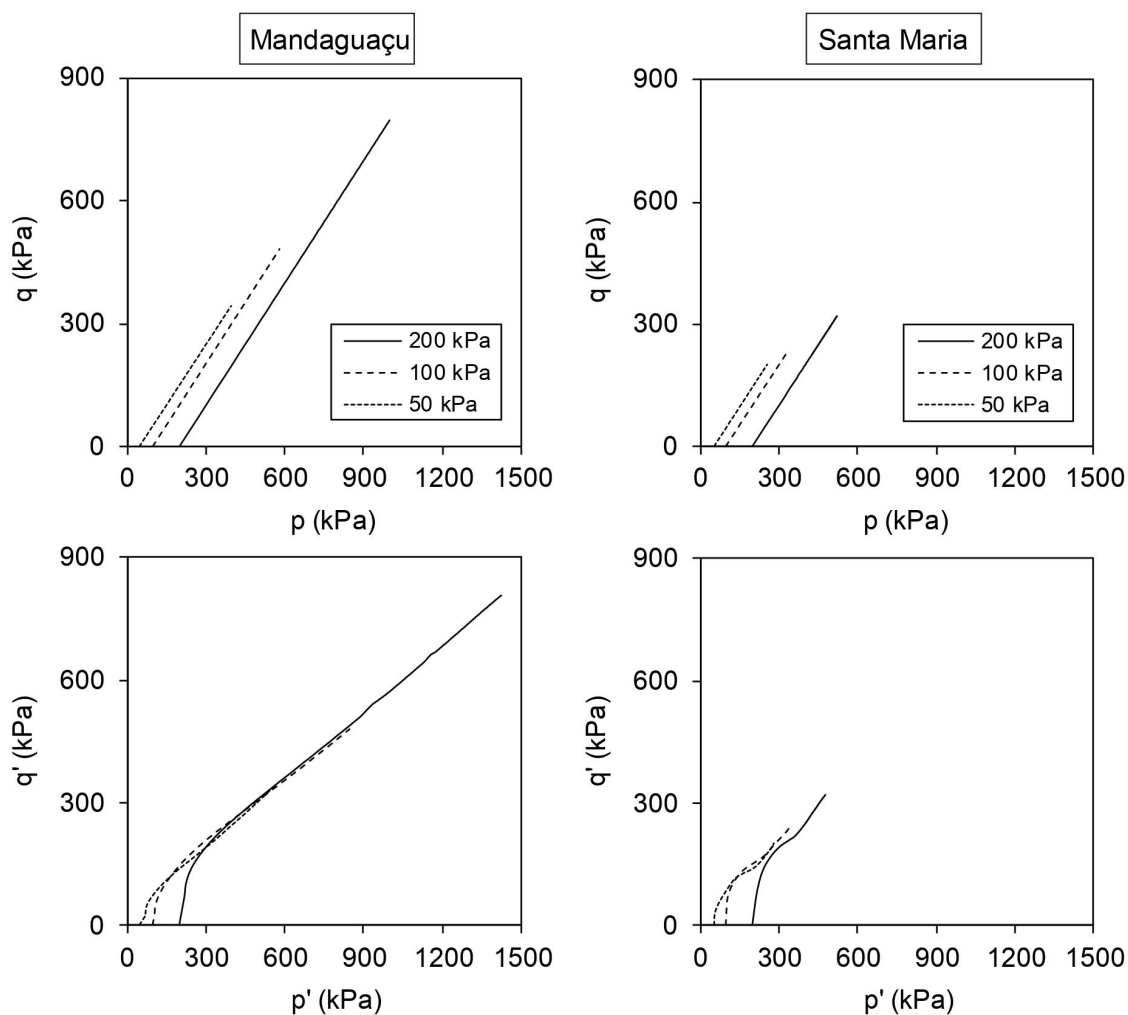
Figura 44 - Corpos de prova reforçados após ruptura na câmara triaxial



Fonte: Autor.

Acerca das curvas de variação da poropressão *versus* deformação axial, a inserção das fibras não produziu mudanças significativas quando comparadas as apresentadas pelos solos sem reforço (Figuras 39). Novamente, houve uma variação inicial positiva da poropressão e, logo após pequenas deformações, esta variação passa a ser negativa, característica da estrutura compactada (Souza Júnior, 2019).

A Figura 45 mostra as trajetórias de tensões totais e efetivas para os solos reforçados com fibras PET de Mandaguáçu e Santa Maria.

Figura 45 - Trajetória de tensões totais e efetivas dos solos reforçados

Fonte: Autor.

Analisando conjuntamente as trajetórias de tensões totais e efetivas dos solos sem fibras (Figura 41) e dos reforçados (Figura 45), nota-se que, para o solo de Mandaguçu, a inserção do reforço não altera o formato das trajetórias, apenas o valor máximo alcançado em cada tensão confinante ensaiada.

Para o solo de Santa Maria, no entanto, é possível observar que as trajetórias dos ensaios nos corpos de prova reforçados com as fibras PET apresentaram formato bastante diferente dos corpos de prova de solo puro. A inclinação positiva das trajetórias obtida nos ensaios com as fibras está associada a mudança de comportamento mecânico do solo de Santa Maria, resultado do ganho de resistência gerado pela inserção dos elementos de reforço.

Na Tabela 16 são resumidos os valores de tensões totais (axial, confinante e desviadora), tensões efetivas e pressões neutras de cada ensaio realizado nos solos reforçados com fibras PET para a deformação limite de 16%.

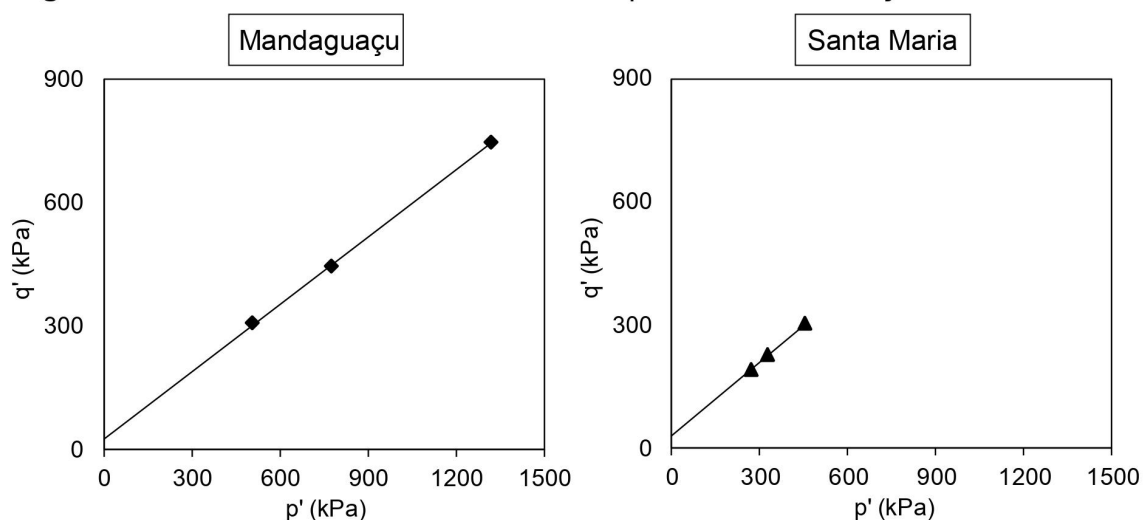
Tabela 16 - Resumo de resultados dos solos reforçados

Identificação do Ensaio	MDF01	MDF02	MDF03	SMF01	SMF02	SMF03
Tensão axial (kPa)	1376,6	1593,2	2582,0	931,9	1558,5	1705,3
Tensão confinante (kPa)	759,8	700,1	1100,2	549,8	1099,8	1099,0
Tensão desviadora (kPa)	616,8	893,1	1481,8	382,1	458,7	606,3
Var. da poropressão (kPa)	-149,0	-222,9	-366,4	-30,1	2,4	46,9
Tensão axial efetiva (kPa)	815,6	1222,5	2068,0	462,0	556,2	758,4
Tensão confinante efetiva (kPa)	198,8	334,2	570,3	79,4	97,9	152,1

Fonte: Autor.

A Figura 46 traz as envoltórias de ruptura, em termos efetivos, para os solos de Mandaguaçu e Santa Maria reforçados. As equações das envoltórias, bem como os parâmetros de resistência encontrados para cada solo, estão resumidas e apresentadas na Tabela 17.

Figura 46 - Envoltórias de resistência efetiva para os solos reforçados e saturados



Fonte: Autor.

Tabela 17 - Parâmetros de resistência efetiva dos solos reforçados

Solo - ID	d' (kPa)	β' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	Equação
Mandaguaçu - MDF	26,9	31,3	33,8	37,4	$\tau = 33,8 + \sigma'.tg 37,4^\circ$
Santa Maria - SMF	30,3	34,4	41,6	43,2	$\tau = 41,6 + \sigma'.tg 43,2^\circ$

Fonte: Autor.

Constatou-se atuação positiva das fibras PET nos solos avaliados, aumentando ambos parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo). Nota-se que, proporcionalmente, o aumento dos parâmetros de resistência foi maior no solo de Santa Maria do que no solo de Mandaguaçu, devido a diferentes interações fibra-matriz na resistência mecânica de cada compósito.

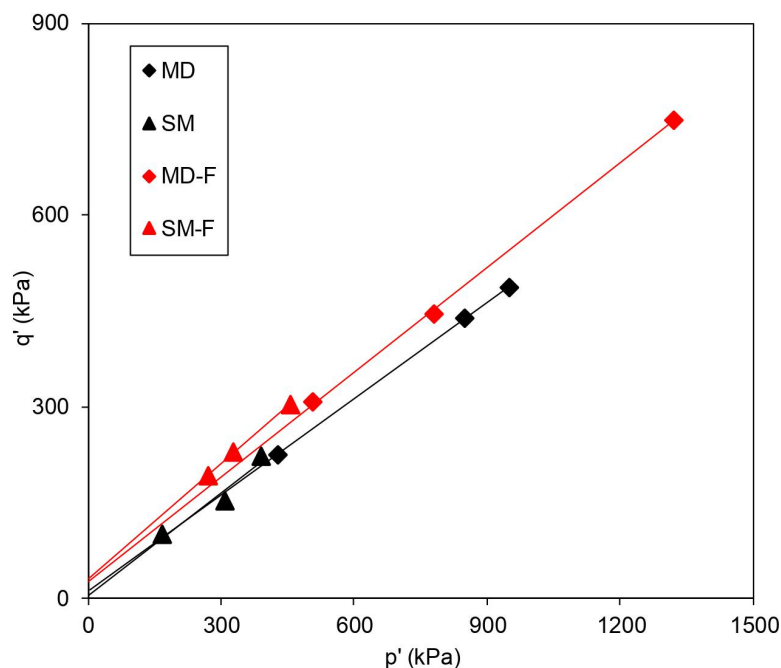
4.6.3 Comparação de Resultados

A Tabela 18 e a Figura 47 apresentam as equações Mohr-Coulomb e envoltórias de resistência efetiva dos solos sem reforço e reforçados com fibras de forma conjunta para fins comparativos.

Tabela 18 - Equações Mohr-Coulomb dos solos puro e reforçados

Condição	Mandaguaçu (kPa)	Santa Maria (kPa)
Solo sem reforço	$\tau = 14,6 + \sigma'.tg 33,1^\circ$	$\tau = 6,8 + \sigma'.tg 35,9^\circ$
Solo reforçado com fibras de PET	$\tau = 33,8 + \sigma'.tg 37,4^\circ$	$\tau = 41,6 + \sigma'.tg 43,2^\circ$

Fonte: Autor.

Figura 47 - Envoltórias de resistência efetiva dos solos com e sem fibras PET

Fonte: Autor.

Observando as retas da Figura 47 fica evidente a contribuição positiva das fibras na resistência dos corpos de prova ensaiados, onde as retas em vermelho (condição reforçada) se encontram acima das retas em preto (solo puro). As informações destas retas são traduzidas em números pelas equações Mohr-Coulomb da Tabela 17.

Para o solo de Mandaguaçu, a inserção de 0,3% de fibras PET aumentou o valor do intercepto coesivo c' em mais de 130%, além de um aumento de quase 13% para o ângulo de atrito (ϕ'). Já para o solo de Santa Maria, o ganho nos parâmetros de resistência foi ainda mais significativo, com aumento do valor do intercepto coesivo c' em mais de 510% e 20% para o ângulo de atrito (ϕ').

Em ambos os casos, a inserção das fibras de PET aumentou tanto o valor do ângulo de atrito (ϕ') quanto do intercepto coesivo (c'), sendo este segundo bem mais expressivo. De acordo com Senez (2016), isto se dá pela adição aleatória das fibras na matriz de solo que promove um efeito de ancoragem, observado como aumento do intercepto coesivo.

Além do efeito de ancoragem, acredita-se que a composição das fibras promoveu ligações elétricas entre a matriz e o elemento de reforço, resultado do pH ácido do solo, argilominerais presentes e cargas desbalanceadas nos amorfos. Tal

fato explica a grande diferença proporcional entre os interceptos coesivos dos solos estudados.

Rodrigues (2022) avaliou o potencial zeta, medida da magnitude da repulsão ou atração eletrostática das cargas entre partículas, de diferentes resíduos plásticos. O autor mostra que o potencial zeta do PET possui tendência positiva com a redução do pH do meio em que ele está inserido. Sendo assim, como ambos os solos avaliados são ácidos (ambos com pH próximo de 4), é possível que a inserção das fibras PET nestes solos leve ao surgimento de forças de ligação entre os grãos e partículas dos solos com as fibras. As cargas positivas geradas nas fibras interagem com as cargas, geralmente negativas, dos argilominerais de cada solo.

Machado & Zuquette (2004) afirmam que a fonte mais comum de carga superficial no solo é derivada de imperfeições no retículo cristalino dos minerais. Estas imperfeições estruturais formadas pela substituição de íons ou vazios locais geram cargas permanentes nas partículas de solo. Sendo assim, quanto maior o percentual de carga permanente, mais variável é o material. Além disso, quanto menor o grau de cristalinidade do mineral, maior é seu desbalanceamento de cargas.

Ao comparar os dois solos reforçados, fica evidente que o ganho de coesão foi mais expressivo no solo de Santa Maria. Os dados obtidos a partir do ensaio de extração de amorfos mostrou que o solo de Santa Maria possui uma quantidade de elementos amorfos (principalmente *Al* e *Fe*) bastante superior ao solo de Mandaguaçu. Estes elementos amorfos estão associados a minerais de baixa cristalinidade, isto é, minerais menos estáveis.

Neste sentido, o ganho de coesão proporcional mais elevado para o solo de Santa Maria reforçado com as fibras PET pode ser explicado por seu grau de evolução pedogenética que, por possui maior quantidade de cargas elétricas negativas oriundas dos minerais de baixa cristalinidade, interagem com as cargas positivas das fibras PET.

O mesmo ocorre no solo de Mandaguaçu, que também é um solo laterítico ácido, no entanto, por se tratar de um solo mais evoluído, em que o argilomineral é a caulinita, este aumento é menos expressivo quando comparado à Santa Maria.

Uma outra maneira de observar o efeito do reforço com fibras no solo é por meio da tenacidade. A tenacidade é a propriedade do material que expressa a energia absorvida por ele quando deformado. Sendo assim, avaliou-se a tenacidade por meio da capacidade de absorção de energia de deformação (E_{def}), que corresponde

numericamente à área sob a curva tensão desvio *versus* deformação axial de cada ensaio.

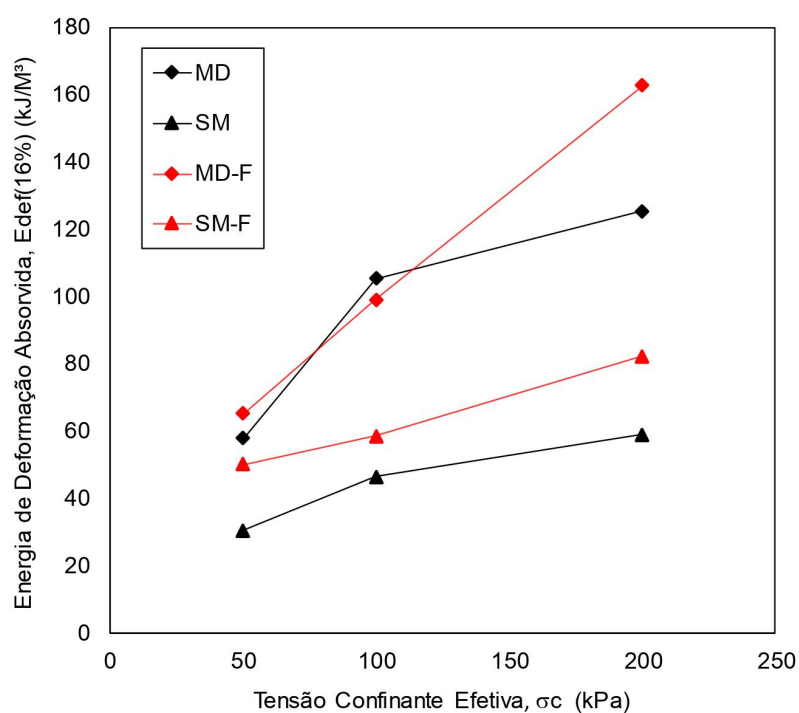
A Figura 48 apresenta a energia de deformação absorvida para a deformação limite de 16% ($E_{def(16\%)}$), medida em kJ/m³. Foram plotados no gráfico os valores de energia obtidos referentes às tensões confinantes dos ensaios de compressão triaxial (50, 100 e 200 kPa), para ambos os solos, com e sem fibras.

Nota-se que quanto maior a tensão confinante, maior é a resposta de resistência apresentada pelo corpo de prova reforçado com as fibras PET, indo de acordo com o estudo de Ferreira *et al.* (2021).

Com o aumento da tensão confinante, as fibras ficam mais próximas da matriz (solo), dando ao material caráter mais rígido e, conseqüentemente, uma melhor resposta mecânica, uma vez que as fibras são solicitadas assim que se inicia a deformação do corpo de prova (Ferreira *et al.*, 2021; Consoli *et al.*, 2003).

Além disso, a inserção das fibras PET de maneira aleatória, em ambos solos avaliados, melhorou a estrutura interna do compósito, evidenciado pelo aumento praticamente linear de energia de deformação absorvida em função das tensões confinantes ensaiadas.

Figura 48 – $E_{def(16\%)}$ dos solos com e sem fibras



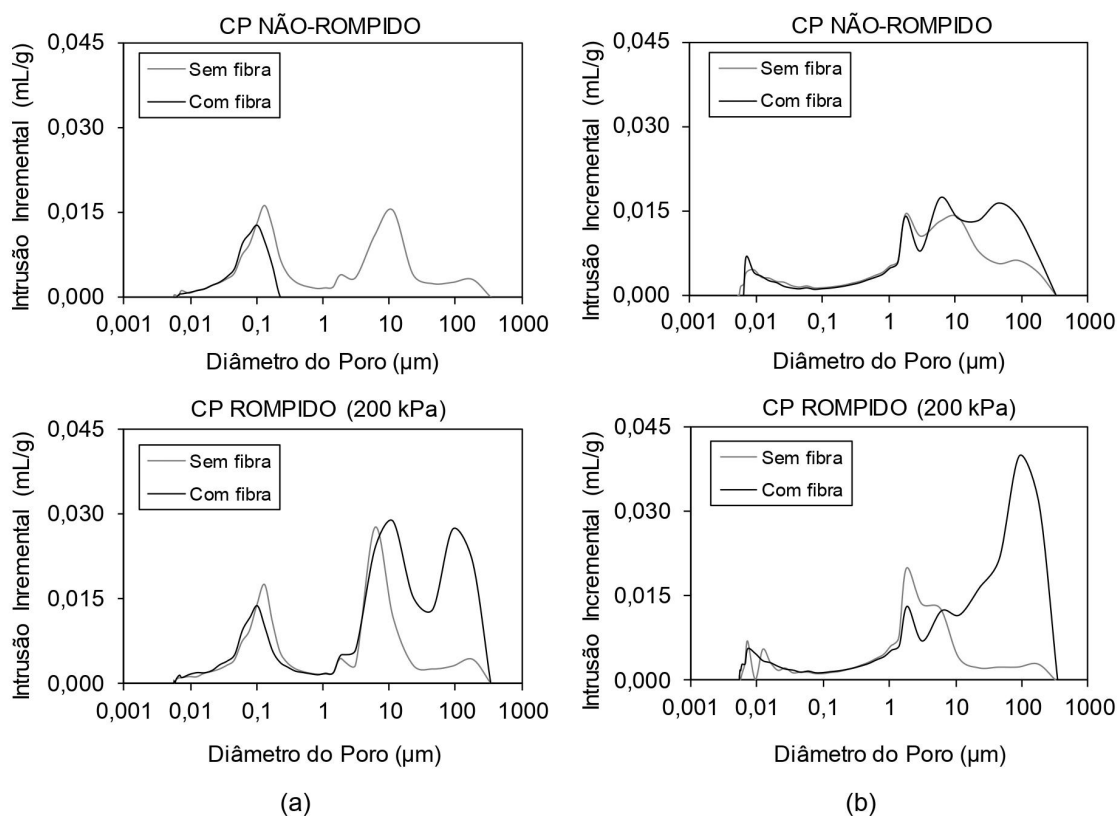
Fonte: Autor.

Ferreira *et al.* (2021), a partir de ensaios triaxiais realizados em amostras reforçadas com as mesmas fibras PET em areias puras, observaram um aumento não linear da energia de deformação absorvida para as tensões ensaiadas (50, 100 e 150 kPa). Mais uma vez ressalta-se a influência da questão pedogenética dos solos nas interações solo-fibra PET, pois ambos solos deste estudo, apesar de possuírem a areia como fração granulométrica principal, estão sujeitos a diferentes processos de intemperismo químico, fazendo com que se comportem diferente de areias puras.

4.7 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (PIM)

A Figura 49 apresenta as curvas de distribuição dos macroporos e microporos dos solos de Mandaguaçu (Fig. 49a) e Santa Maria (Fig. 49b), com e sem fibras, antes e após ruptura no ensaio de compressão triaxial com tensão confinante de 200 kPa.

Figura 49 – Porosimetria antes e após ruptura: a) Mandaguaçu; b) Santa Maria



Fonte: Autor.

Analisando as curvas de distribuição dos poros dos solos puros e reforçados não submetidos ao ensaio de compressão triaxial, é possível observar que a inclusão

das fibras PET nos solos ensaiados, para o teor de 0,3% de adição de fibra, apresentou mudanças na distribuição dos poros dos compósitos.

Para o solo de Santa Maria (Figura 49b), observou-se tendência bimodal de distribuição do tamanho dos poros, concentradas aproximadamente em 0,01 e 10 μm , para ambas condições ensaiadas (com e sem fibras). Além disso, a inclusão das fibras aumentou tanto a quantidade de microporos quanto de macroporos, sendo esta última bem mais significativa. Os dados obtidos vão de acordo com diversos trabalhos publicados na literatura (Hoare, 1979; Maher & Ho, 1994; Bueno *et al.*, 1996; Miller & Rifai, 2004) que também observaram que a inserção de fibras em solos menos evoluídos pedologicamente tende a aumentar a porosidade da mistura, mesmo compactada.

O solo de Mandaguaçu (Figura 49a) também apresentou tendência de distribuição bimodal, com poros concentrados em 0,1 e 10 μm , considerando a condição experimental sem fibras. Ao contrário do que se observou com a inclusão das fibras no solo de Santa Maria, a inserção dos agentes de reforço neste solo diminuiu a quantidade de microporos, além de reduzir a zero a quantidade de macroporos da mistura.

Considerando que os dois solos são arenosos, acredita-se que a diferença de comportamento demonstrado na porosimetria a partir da inserção de fibras PET esteja associada ao grau de evolução pedogenética de cada solo. O solo de Mandaguaçu sofreu elevado grau de intemperismo químico, resultando em satisfatória interação entre a matriz e o reforço utilizado. Para o solo de Santa Maria, por ser uma camada de solo transicional, apresenta características mais próximas aos solos de países de clima temperado, fazendo com que o comportamento experienciado, isto é, o aumento dos poros, se aproxime da tendência observada pela literatura tradicional oriunda de solos do hemisfério norte.

Comparando as curvas de distribuição dos poros dos corpos de prova rompidos com as curvas dos que não foram submetidas à ruptura, é possível observar que não houve alterações significativas em relação a distribuição dos microporos para ambos os solos, com e sem as fibras PET. Isto indica que os microporos não participam do comportamento mecânico, como observado por Carvalho *et al.*, (2015) e Carvalho & Gitirana Jr (2021).

Por outro lado, notou-se um aumento dos macroporos dos corpos de prova após processo de ruptura. Isto se deu em razão da extração da parte central das

subamostras coletadas nos corpos de prova rompidos e ensaiadas no porosímetro, onde observou-se efeito de embarrigamento, como mostram as Figuras 42 (sem fibras) e 48 (com fibras). Sendo assim, o aumento dos macroporos constatado está associado ao aumento de volume do corpo de prova nesta região.

Finalmente, é possível observar que este aumento dos macroporos é maior nos corpos de prova com fibras, tanto para o solo de Mandaguaçu quanto de Santa Maria, que apresentaram novo pico de distribuição de poros concentrado em 100 μm . Este aumento representa a solitação das fibras durante a ruptura, confirmando sua participação no comportamento mecânico dos compósitos.

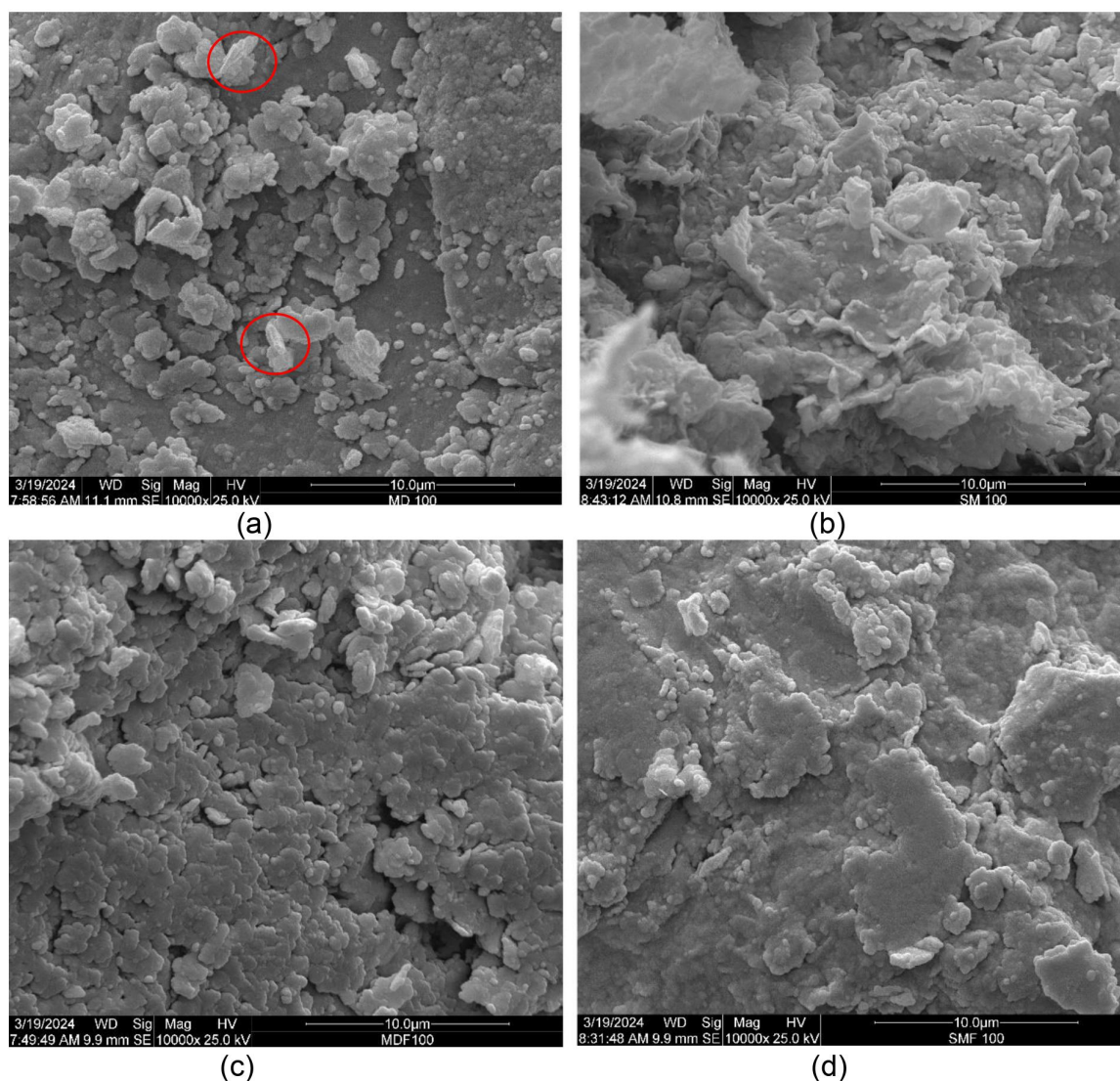
As análises de porosimetria por intrusão de mercúrio foram feitas sob olhar qualitativo, buscando entender as variações de rearranjo dos compósitos, antes e após a ruptura, uma vez que o índice de vazios global dos corpos de prova na etapa de moldagem não sofre alterações com a inclusão das fibras.

4.8 IMAGENS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A Figura 50 apresenta as imagens de microscopia eletrônica de varredura dos solos com e sem o reforço. As Figuras 50a e 50b são dos solos de Mandaguaçu e Santa Maria sem adição de fibras PET, ao passo que as Figuras 50c e 50d são desses solos reforçados, respectivamente. Pontua-se que o aumento de todas as imagens foi de 10.000x.

Sobre a superfície do solo de Mandaguaçu obtida na microscopia (Figura 50a), foi possível observar a presença da caulinita, apresentada na forma de lamelas e identificada nos ensaios de caracterização mineralógica. Já no solo de Santa Maria (Figura 50b), é observada grande quantidade de vazios e elementos de formatos irregulares bastante dispersos.

Figura 50 - Superfície dos solos sem fibras no MEV



Fonte: Autor.

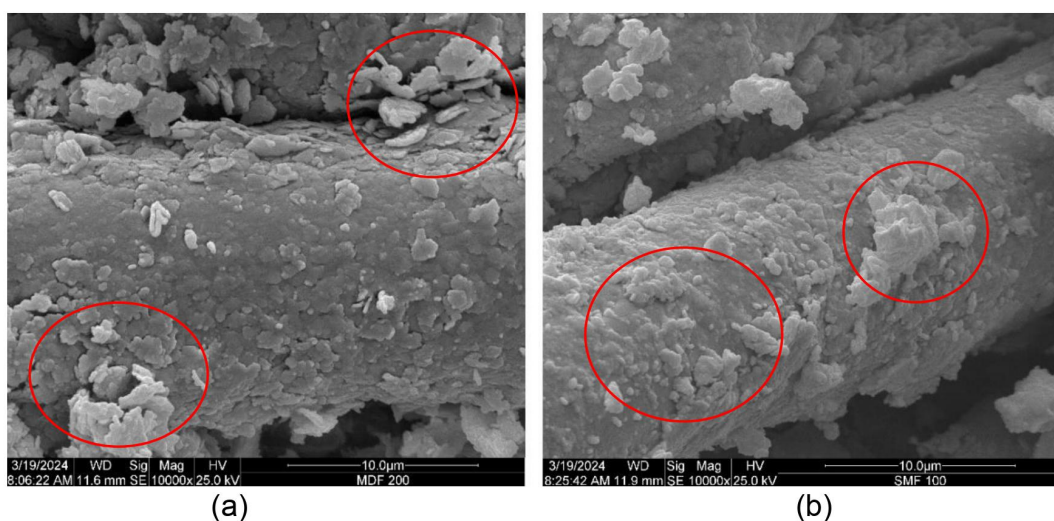
Comparando a Figura 50b e 50d, observa-se grande diferença entre as superfícies do solo de Santa Maria com e sem fibra PET. Na Figura 50d fica evidente o efeito de agregação gerado pela inclusão das fibras neste solo, em que já não é possível observar elevada presença de vazios. Por apresentar maior desbalanceamento nas cargas elétricas devido aos elementos que o compõe, o solo de Santa Maria torna-se mais favorável para a aderência das fibras PET, aproximando os elementos da matriz e, conseqüentemente, aumentando a coesão do solo, como constatado nos ensaios triaxiais.

No solo de Mandaguáçu as fibras atuam da mesma forma, no entanto, este efeito não é tão acentuado quanto no solo de Santa Maria, como pode-se observar

nas Figuras 50a e 50c, corroborando com as hipóteses feitas anteriormente.

A Figura 51 demonstra as fibras inseridas nos solos de Mandaguaçu (a) e Santa Maria (b), com aumento de 10.000x. Em ambas é possível identificar a atração dos elementos às fibras, indicada pelos círculos em vermelho nas imagens, explicando a possível atração elétrica entre os minerais dos solos e as fibras PET.

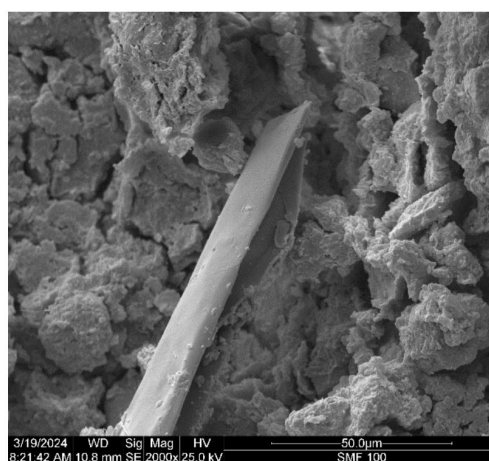
Figura 51 – Imagens da interação solo-fibra no MEV



Fonte: Autor.

A Figura 52 apresenta uma imagem obtida de uma fibra PET pós-solicitação, com aumento de 2.000x. Na imagem é possível observar a fibra achatada, devido ao alongamento provocado pela solicitação, e sua superfície lisa, indicando o desprendimento dos grãos de solo da fibra.

Figura 52 – Imagem da fibra PET pós-solicitação no MEV



5 CONCLUSÕES

Com o propósito de avaliar o comportamento mecânico de dois solos tropicais reforçados com adição de 0,3% de fibras PET distribuídas aleatoriamente, observou-se que:

- Apesar de ambos os solos serem solos arenosos e lateríticos, o comportamento mecânico destes solos puros em estado compactado são distintos, apresentando comportamento elasto-plástico de endurecimento para o solo de Mandaguaçu e dúctil para o solo de Santa Maria;
- Quando reforçado com as fibras PET, ambos os compósitos apresentaram melhora em sua estrutura interna. O solo de Mandaguaçu continuou apresentando comportamento elasto-plástico de endurecimento, já o solo de Santa Maria mudou de comportamento dúctil para elasto-plástico;
- A inclusão das fibras promoveu incrementos significativos nos parâmetros de resistência de ambos solos. Para o solo de Mandaguaçu, a inserção das fibras aumentou o valor do intercepto coesivo c' em mais de 130%, além de um aumento de quase 13% para o ângulo de atrito (ϕ'). Para o solo de Santa Maria, o aumento de resistência foi ainda mais significativo, a adição das fibras neste solo aumentou o valor do intercepto coesivo em mais de 510% e 20% para o ângulo de atrito;
- Além do efeito de ancoragem gerado pela distribuição aleatória das fibras na matriz de solo, a formação de ligações elétricas e atração entre as fibras e os minerais e argilominerais dos solos, conforme identificado nas imagens MEV, contribuíram para os aumentos expressivos de intercepto coesivo, principalmente no solo de Santa Maria, que apresentou maior ASE, CTC, quantidade de amorfos e, conseqüentemente, maior quantidade de cargas desbalanceadas;
- Quanto a distribuição dos macros e microporos dos compósitos, a adição das fibras PET no solo de Santa Maria aumentou tanto a quantidade de microporos quanto de macroporos, sendo esta última bem mais significativa. Para o solo de Mandaguaçu, observou-se o efeito contrário. Por sofrer intemperismo químico mais intenso, o solo de Mandaguaçu

apresenta interação matriz-reforço diferente do solo de Santa Maria, que por ser uma camada de solo transicional, apresenta características mais próximas aos solos de países de clima temperado;

- A adição das fibras PET mostrou-se como uma boa alternativa de reforço de solos tropicais lateríticos com fibras, uma vez que foi observada contribuição positiva das fibras no comportamento mecânico de ambos os solos avaliados. Ainda assim, os resultados demonstraram que a magnitude de ganhos se deve a interação das fibras com o solo, a qual está intimamente ligada, além das características das fibras, às suas características física, químicas, mineralógicas e ambientais, tornando-se fundamental o conhecimento completo da matriz na resposta de reforço do compósito.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros que queiram dar continuidade aos estudos de reforço de solos com fibras derivadas de resíduos plásticos, como as fibras PET avaliadas neste trabalho, pontua-se:

- Avaliar outros teores de adição das fibras, outros diâmetros e comprimentos, bem como outros parâmetros de compactação para os mesmos solos;
- Avaliar o comportamento mecânico das fibras PET nestes solos por meio de ensaios triaxiais do tipo CD (adensados drenados), a fim de se conhecer mais a fundo a deformação volumétrica dos compósitos;
- Avaliar a inserção das fibras PET em dois solos argilosos lateríticos com diferentes graus de evolução pedogenética, verificando se os efeitos observados nos solos arenosos lateríticos também se aplicam aos argilosos e como se dá a interação solo-fibra nestes solos;
- Estudar o efeito de fibras derivadas de outros resíduos plásticos recicláveis para estes solos, como fibras de polipropileno, avaliando as diferenças de interação e resistência geradas pela alteração do material da fibra com as matrizes dos compósitos.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Solos e rochas – Terminologia.** Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13230: Embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis – Identificação e simbologia.** Rio de Janeiro, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).** 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução de Diretoria Colegiada RDC n. 20, de 26 de março de 2008. **Dispõe sobre o Regulamento Técnico sobre embalagens de polietileno tereftalato (PET) pós-consumo reciclado grau alimentício (PET-PCR grau alimentício) destinados a entrar em contato com alimentos.** Diário Oficial da União n. 59, Poder Executivo, de 27 de março de 2008.

AKBARIMEHR, D.; ESLAMI, A.; AFLAKI, E. ***Geotechnical behavior of clay soil mixed with rubber waste.*** *Journal of Cleaner Production*, v. 271, 2020.

ANDRADE, P. V. Q. **Estudo do comportamento mecânico de microestruturas de materiais compósitos com matriz metálica.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (EEC) da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

ARAÚJO, G. L. S.; MORENO, J. A. S.; ZORNBERG, J. G. ***Shear behavior of mixtures involving tropical soils and tire shreds.*** *Construction and Buildings Materials*, v. 276, p.122601-122075, 2021.

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. Anais 18ª RPU, São Luis, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET (ABIPET). **12º Censo da Reciclagem do PET no Brasil de 2021.** São Paulo: ABIPET, 2021.

ÁVILA, L. O. **Erosão na Microbacia do Arroio Sarandi: Voçoroca do Buraco Fundo, Santa Maria/RS.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009. 103p.

BENTO, P. F. B. **Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para a utilização em estruturas de pavimentos.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do Comportamento de Materiais Compósitos de Matrizes Cimentícias reforçadas com Fibras de Aramida Kevlar**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BLACK, C. A.; DAY, P.R. **Particle fractionation and particle-size analysis**. In: *Methods of soil analysis: Part 1 – Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*. Agronomy Monographs, 1965.

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

BUENO, B.S., LIMA, D.C., TEIXEIRA, S.H.C., RIBEIRO, N.J. **Soil fiber reinforcement: basic understanding**. In: *International Symposium on Environmental Geotechnology*, San Diego, v.1, p. 878-884, 1996.

CARVALHO, J. C.; REZENDE, L. R.; CARDOSO, F. B. F.; LUCENA, L. C. F.; GUIMARÃES, R. C.; VALENCIA, Y. G. **Tropical soils highway construction: Peculiarities and considerations**. *Transportation Geotechnics*, vol. 5, 2015.

CARVALHO, J. C.; GITIRANA, G. F. N. **Unsaturated soils in the context of tropical soils**. *Soils and Rocks*, v.44, n.03, 2021.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidas a grandes deformações**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CASTILHO, T. W.; RODRIGUES, R. A.; LODI, P. C. **Use of Recycled Polyethylene Terephthalate Strips in Soil Improvement**. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 39, p. 5943-5955, 2021.

CESSA, R.M.A.; CELI, L.; VITORINO, A.C.T.; NOVELINO, J.O.; Barbeis, E. **Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois latossolos vermelhos**. Rev. Bras. Ciênc. Solo, 33(5):1153-1162, 2009.

CHEN, R.; CONGRESS, S. S. C.; CAI, G.; DUAN, W.; LIU, S. **Sustainable utilization of biomass waste-rice husk ash as a new solidified material of soil in geotechnical engineering: A review**. Construction and Building Materials, v. 292, 2021.

CHRUSCIAK, M. R. **Análise da Melhoria de Solos Utilizando Fragmentos de Borracha**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

COELHO, T. M. **Logística reversa no Brasil: proposta de um sistema de retorno de embalagens PET**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2010.

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, New York, v.124, n.12, p. 1211-1214, 1998.

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, v. 128, p. 462 - 472, 2002.

CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; THOMÉ, A. **Plate load test on fiber-reinforced soil**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 129, p, 951-955, 2003.

CONSOLI, N. C.; MOTARDO, J. P.; DONATO, M.; PRIETTO, P. D. M. **Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fibre composites**. Ground Improvement, ISSMGE, v.8, n.2, p. 77-90, 2004.

CONSOLI, N. C.; CAICEDO, A. M. L.; SALDANHA, R. B.; FILHO, H. C. S.; ACOSTA, C. J. M. **Eggshell Produced Limes: Innovative Materials for Soil Stabilization**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, 2020.

CORREIA, A. A. S.; VENDA OLIVEIRA, P. J.; CUSTÓDIO, D. G. (2015). **Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders**. *Geotextiles and Geomembranes*, 43, nº 2, pp. 97-106.

CRISTELO, N.; CUNHA, V. M. C. F.; DIAS, M.; GOMES, A. T.; MIRANDA, T.; ARAÚJO, N. **Influence of discrete fibre reinforcement on the uniaxial compression response and seismic wave velocity of a cement-stabilised sandy-clay**. *Geotextiles and Geomembranes*, v.43, p. 1-13, 2015.

DALHAT, M. A.; AL-ABDUL WAHHAB, H. I.; AL-ADHAM, K. **Recycled Plastic Waste Asphalt Concrete via Mineral Aggregate Substitution and Binder Modification**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.31, nº8, 2019.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E.; WOOD, M. D.; RUSSEL, A. R. **Fibre reinforced sands: Experiments and modelling**. *Geotextiles and Geomembranes*, v.28, p. 238-250, 2010.

ERNANI, P.R. **Química de solo e disponibilidade de nutrientes**. Lages, Paulo Ernani, 2008. 230p.

FERNANDES, J. A. **Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma voçoroca em São Valentim, RS**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011. 129p.

FERREIRA, J. W. S.; SENEZ, P. C.; CASAGRANDE, M. D. T. **Pet fiber reinforced sand performance under triaxial and plate load tests**. *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, 2021.

FERREIRA, J. W. S. **Comportamento mecânico de misturas solo-cimento para aplicação em pavimentos**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019. 150p.

FORMIGONI, A.; CAMPOS, I. P. A. **Reciclagem do PET no Brasil**. 2007. In: Anais Eletrônicos...IV SEGET. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos07/1200_1200_ARTIGO%20-%20RECICLAGEM%20DE%20PET%20NO%20BRASIL.pdf>. Acesso em 16 ago. 2022.

FREITAG, D. R. **Soil randomly reinforced with fibers**. *Journal of Geotechnical Engineering, New York*, v.112, n.8, p. 823-826, 1986.

GERMAN, K.; KULESZA, K.; FLORACK, M. **Influence of poly(bisphenol A carbonate) and poly(ethylene terephthalate) on poly(vinyl chloride) dehydrochlorination**. *Journal of Mater Cycles and Waste Management*, v. 8, p. 116-121, 2006.

GOMES, F. S.; MOTTA, M. F. B. **Influência de adição de fibras de coco na resistência à tração de um solo compactado não saturado**. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Campinas, São Paulo, 2022.

GONÇALVES, F.; ZANIN, R. F. B.; SOMERA, L. F.; OLIVEIRA, A. D.; FERREIRA, J. W. S.; COSTA BRANCO, C. J. M.; TEIXEIRA, R. S. **Caracterização Físico-Química e Mineralógica de Três Solos do Estado do Paraná**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, Bahia, 2018.

GRAY, D. H.; OHASHI, H. **Mechanics of fiber reinforcement in sand**. *Journal of Geotechnical Engineering, New York*, v.109, n.3, p. 335-353, 1983.

HANNANT, L. **Polymers and polymers composities**. In: J.M. ILLSTON. *Construction materials: their nature and behavior*. 2ed. London: J.M Illston/E & FN Spon, p.359-403, 1994.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de material geotécnicos para barreiras horizontais**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 2002.

HIGGINS, R. A. **Properties of engineering materials**. London: E. Arnold. 2ed., 495p., 1994.

HOARE, D.J. **Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibres**. In: *International Conference on Soil Reinforcement*, Paris, v.1, p. 47-52, 1979.

LOUZADA, N. S. L. **Experimental Study of Soils Reinforced with Crushed Polyethylene Terephthalate (PET) Residue**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

LOUZADA, N. S. L.; MALKO, J. A. C.; CASAGRANDE, M. D. T. **Behaviour of Clayey Soil Reinforced with Polyethylene Terephthalate**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 31, 2019.

LUCARELLI, D. C. **Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras de polietileno tereftalato (PET) de distribuição aleatória**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2018.

MACHADO, S. L.; ZUQUETTE, L. V. **Transporte de massa e mecanismos de retenção em solos não saturados**. In: 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos, São Paulo, 2004.

MAHER, M. H.; GRAY, D. H. **Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers**. *Journal of Geotechnical Engineering, New York*, v.116, n.11, p. 1661-1677, 1990.

MAHER, M.H., HO, Y.C. **Mechanical properties of kaolinite fiber soil composite**. *Journal of Geotechnical Engineering*, v.120, n°8, 1994.

MARSON, M. **Análise crítica da classificação MCT para solos tropicais**. Tese de Mestrado - Curso de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica, Área de Infraestrutura de Transporte, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, São Paulo, 2004.

MARTÍNEZ, G. S. S. **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Lateríticos da Formação Barreiras**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

MASCARENHA, M. M. A.; NETO, M. P. C.; NETO, P. M. S.; MORALES, E. R. **Utilização da Porosimetria por Injeção de Mercúrio (MIP) na determinação de curvas características em solos deformáveis**. XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Rio de Janeiro, 2008.

MELO, J. W. **Produção e caracterização de pó de PET – Poli (Tereftalato de etileno), obtido a partir de garrafas pós-consumo**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Belo Horizonte, 2004.

MILLER, C. J., RIFAI, S.M. **Fiber Reinforcement for Waste Containment Soil Liners**. *Journal of Environmental Engineering*, v. 130, p. 891-895, 2004.

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.

MONTEIRO, S. N.; PERISSÉ, F. D. L.; COSTA, L. L.; BEVITORI, A. B.; SILVA, I. A. S.; BARBOSA, A. P. **Natural Lignocellulosic Fibers as Engineering Materials – An overview**. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, v. 42A, 2011.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do mercado de garrafas PET e análise de participação – Tendências e previsões de crescimento (2024-2029)**. 2024. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/pet-bottles-market>> Acesso em: 18 de abr. 2024.

MOURA, M.; SANT'ANA, W. C.; BERNUCCI, L. B. **M-MCV simplificado – cálculo do coeficiente c' – uma abordagem didática**. 37^a Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), 11^o Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR), Goiânia, 2006.

NAGATA, R. **Composição multiescalar da rede porosa de rochas carbonáticas**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

NATARAJ, M.S.; ADDULA, H. R.; MCMANIS, K.L. **Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils**. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY*, 3., San Diego, 1996. *Proceedings... Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc*, v.1, p. 826-835, 1996.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Caracterização e classificação gerais de solos para pavimentação: limitação do método tradicional, apresentação de uma nova sistemática**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 15. Belo Horizonte, 1980.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Ampliação do uso da metodologia MCT no estudo de solos tropicais para pavimentação**. 28^a Reunião Anual de Pavimentação. Belo Horizonte, p.184-209, 1994.

NOGUEIRA, E. G. **Estudo de algumas soluções de tratamento de solos moles para construção de aterros no trecho Sul do Rodoanel-SP**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

OLIVEIRA, A. D.; GOLÇALVES, F. G. P.; ZANIN, R. F. B.; MELO, T. R.; FILHO, J.T.; ANDRELLO, A. C.; TEIXEIRA, R. S. **The Structure of tropical lateritic soils as na impacting fator in the shape of soil-water characteristic curves.** *Soils and Rocks*, v.45, n.02, 2022.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos.** Seminário Sobre Aplicações De Geossintéticos Em Geotecnia. Geossintéticos 92, Brasília, p.1-20, 1992.

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. 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, A. C. G. **Estudo do comportamento mecânico microestrutural de solos tropicais compactados.** Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2015.

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

RODRIGUES, D. P. **Avaliação da existência de microplásticos nos efluentes de estações de tratamento de águas residuais: caracterização dos microplásticos e abordagens verdes para sua remoção.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra, 92 f., 2022.

SALDANHA, R. B.; DA ROCHA, C. G.; CAICEDO, A. M. L.; CONSOLI, N. C. **Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization.** *Construction and Building Materials*, v. 298, 2021.

SALES, K. C. S. **Uso de fibras naturais na melhoria do comportamento mecânico dos solos**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Nacional de Brasília, Brasília, 2007.

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 de Mestrado – Programa de Pós-Graduação da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SHUKLA, S. K. **Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering**. Singapore: Springer Singapore, 181p., 2017.

SILVA, C. C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SILVA ARAÚJO, G. L.; MORENO, J. A. S.; ZOMBERG, J. G. **Shear behavior os mixtures involving tropical soils and tire shreds**. *Construction and Building Materials*, v. 276, 2021.

SINGH, A. K.; BEDI, R.; KAITH, B. S. **Composite materials based on recycled polyethylene terephthalate and their properties – A comprehensive review**. *Composites Part B: Engineering*, vol. 219, 2021.

SONCIM, S.P.; JUNIOR, G. B.A.; ALMEIDA M.O.; JUNIOR, M.J.F.; ALMEIDA, S.G.; VIDAL, F. X. R. **Resíduo da reciclagem de PET (Polietileno Tereftalato) como material alternativo na construção de reforço de subleitos de rodovias**. Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia e Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, São Paulo, 2004.

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

SOUZA JÚNIOR, P. L. **Comportamento drenado e não drenado de uma areia eólica de Natal/RN**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SOUZA, T. T.; LIMA, A. B.; TEIXEIRA, W. G. **O Aumento Da Capacidade De Troca De Cátions (CTC) Do Solo Através Da Aplicação De Carvão Vegetal Em Um Latossolo Amarelo Na Amazonia Central**. 61° Reunião Anual da SBPC, 2009. Disponível em: < <http://www.sbpcnet.org.br/livro/61ra/resumos/resumos/5950.htm> >. Acesso em: 31/10/2023.

SPINACÉ, M.A.S.; DE PAOLI, M.A. **A tecnologia de reciclagem de polímeros**. Revista Quim. Nova, v.28, n.1, p.65-72, 2005.

TAYLOR, G. D. **Materials in construction**. 2ed. London: Longman Scientific & Technical, 284p., 1994.

THOMAS, M. **Estudo de um solo argiloso laterítico com adições de resíduos de PET em pó e em flocos**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Rio Grande do Sul, 2019.

THOMMES, M. **Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)**. Pure and applied chemistry, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2015.

TOLEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, S.M.B. de; MELFI, A.J. Cap 8, p.128-239. **Da rocha ao Solo – Intemperismo e pedogênese**. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.M.; TAIOLI, F. Decifrando a Terra. 2ª ed. São Paulo: IBEP Editora Nacional-Conrad, 2009. 620p.

UGARTE, J. F. O., MONTE, M. B. M., FRANÇA, S. C. A. e GRACIANO, F. P. R. **Comparação estatística do fator de expansão de concentrados de vermiculita.** In: XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. vol. 1, Florianópolis, 2004, p. 201-208.

VALIPOUR, M.; SHOURIJEH, P. T.; MOHAMMADINIA, A. ***Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement.*** *Transportation Geotechnics*, v. 27, 2021.

VAN IMPE, W. F. V. ***Soil improvement techniques and their evolution.*** Rotterdam: A.A. Balkema, 125p., 1989.

VENDRUSCOLO, M. A. **Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno.** Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 2003.

VERTAMATTI, E. **Contribuição ao Conhecimento Geotécnico de Solos da Amazônia com Base na investigação de Aeroportos e nas Metodologias MCT e Resiliente.** Tese de Doutorado – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 276 p., 1988.

WERLANG, M. K. **Configuração da rede de drenagem e modelado do relevo: conformação da paisagem na zona de transição da Bacia do Paraná na Depressão Central do Rio Grande do Sul.** Tese de Doutorado em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 191f., 2004.