

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**MAURÍCIO THOMAS**

**ESTUDO DE UM SOLO ARGILOSO LATERÍTICO COM ADIÇÕES DE RESÍDUOS  
DE PET EM PÓ E EM FLOCOS**

**Alegrete**

**2019**

**MAURÍCIO THOMAS**

**ESTUDO DE UM SOLO ARGILOSO LATERÍTICO COM ADIÇÕES DE RESÍDUOS  
DE PET EM PÓ E EM FLOCOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Luis Eduardo Kostascki

Co-orientador: Prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann

**Alegrete**

**2019**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

T459e Thomas, Maurício

Estudo de um solo argiloso laterítico com adições de resíduos de PET em pó e em flocos / Maurício Thomas.

97 p.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa, MESTRADO EM ENGENHARIAS, 2019.

"Orientação: Luis Eduardo Kostaschi".

1. Reforço de solo. 2. Flocos de PET. 3. Pó de PET. I. Título.

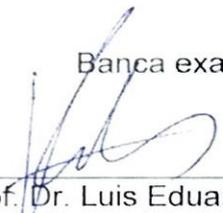
**MAURÍCIO THOMAS**

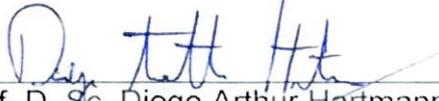
**ESTUDO DE UM SOLO ARGILOSO LATERÍTICO COM ADIÇÕES DE  
RESÍDUOS DE PET EM PÓ E EM FLOCOS**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação *Stricto  
Sensu* em Engenharia da  
Universidade Federal do Pampa,  
como requisito parcial para a  
obtenção do Título de Mestre em  
Engenharia, na área de concentração  
de Tecnologia dos Materiais

Defesa de Dissertação defendida e aprovada em: 27 de junho de 2019

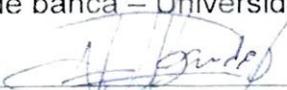
Banca examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luis Eduardo Kostas  
Orientador – Universidade Federal do Pampa

  
\_\_\_\_\_  
Prof. D. Sc. Diego Arthur Hartmann  
Co-orientador – Universidade Federal do Pampa

  
\_\_\_\_\_  
Prof. D. Sc. Jaelson Budny  
Membro de banca – Universidade Federal do Pampa

  
\_\_\_\_\_  
Prof. D. Sc. Ederli Marangon  
Membro de banca – Universidade Federal do Pampa

  
\_\_\_\_\_  
Prof. D. Sc. Diego de Freitas Fagundes  
Membro de banca – Universidade Federal do Rio Grande

## **AGRADECIMENTO**

À Deus, por ter me concedido saúde, foco e persistência, sempre colocando pessoas boas no meu caminho, para que pudesse concluir mais esta etapa.

Aos meus pais, Teresa e Pedro, e aos meus irmãos, Vinícius e Carmine, pelo incentivo, compreensão, amor, apoio e por estar ao meu lado em todos os momentos durante toda esta caminhada.

Ao meu orientador e coorientador, Luis Kostascki e Diego Hartmann, pela amizade, confiança e inúmeras orientações, sempre se mostrando disponíveis e atenciosos durante todo o período da pesquisa. Agradeço também à banca, professores Diego Fagundes, Jaelson Budny e Ederli Marangon, por terem aceito o convite e contribuído para a melhoria deste trabalho.

Aos técnicos dos Laboratórios de Mecânica e de Solos e Pavimentação da UNIPAMPA, pela ajuda e dicas durante todo o processo de ensaios deste trabalho.

A todos os meus amigos, que de uma forma ou outra, perto ou longe, sempre me apoiaram, torceram e me ajudaram durante o período da graduação e pós-graduação, em especial ao Pedro Jucá, pela grande ajuda nos ensaios realizados nesta pesquisa.

## RESUMO

Devido ao consumo e a produção em massa, o sistema econômico brasileiro enfrenta enormes problemas por conta da disposição final dos resíduos gerados pela população. Neste contexto, há um enorme desafio com relação à deposição das garrafas PET junto ao meio ambiente. Buscando novas finalidades para resíduos de garrafas PET, o principal objetivo deste trabalho foi realizar uma análise sobre o uso de resíduos de PET atuando como reforço de um solo argiloso laterítico, em duas formas de adição: em pó e em flocos. Para isso, foram realizadas misturas de solo do tipo argiloso laterítico com adição de diferentes porcentagens de flocos e pó de PET. Os flocos de PET também foram submetidos a tratamento químico com diferentes concentrações de NaOH e diferentes intervalos de tempo. As modificações morfológicas foram analisadas e avaliadas por microscopia eletrônica de varredura. Com relação ao tratamento químico realizado no flocos de PET, foi observado que a amostra com 8% de concentração de NaOH e tempo de imersão de 2h foi a amostra que, após inspeção visual, teve sua superfície atacada com maior intensidade, aparentando apresentar maior rugosidade quando comparada ao flocos de PET sem tratamento químico. Com relação aos resultados das misturas após o ensaio de compactação, foi constatada uma pequena diminuição da massa específica de todas as misturas, um aumento da umidade ótima das misturas que continham pó de PET e diminuição da umidade ótima das misturas que continham flocos de PET junto ao solo. No ensaio de resistência à compressão simples, as amostras contendo flocos de PET apresentaram resultados satisfatórios quando comparadas ao solo puro. No ensaio de cisalhamento direto, houve redução dos parâmetros de coesão de todas as amostras quando comparadas ao solo puro. Percebeu-se que as amostras de flocos de PET tratados obtiveram resultados satisfatórios quando comparadas às amostras sem tratamento químico dos flocos. Da mesma maneira, o ensaio de cisalhamento direto entre as interfaces solo-PET e o ensaio de arrancamento apresentaram resultados eficazes para as amostras que continham PET tratado quimicamente.

**Palavras-chave:** reforço de solo, flocos de PET, pó de PET, compressão simples, cisalhamento direto.

## ABSTRACT

Due to consumption and mass production, the Brazilian economic system faces enormous problems due to the final disposition of the residues generated by the population. In this context, there is a huge challenge regarding the disposal of PET bottles in the environment. The main objective of this work was to perform an analysis on the use of PET residues, acting as reinforcement of a lateritic clay soil, in two forms of addition: powder and flake. For this purpose, lateritic clayey soil mixtures were added with different percentages of flakes and PET powder. The PET flakes were also subjected to chemical treatment with different concentrations of NaOH and different time intervals. The morphological modifications were analyzed and evaluated by scanning electron microscopy. Regarding the chemical treatment of the PET flake, it was observed that the sample with 8% of NaOH concentration and immersion time of 2h was the sample that, after visual inspection, had its surface attacked with greater intensity, appearing to have a higher roughness when compared to PET flake without chemical treatment. Regarding the results of the mixtures after the compaction test, a small decrease in the specific mass of all the blends, an increase in the optimum moisture content of the blends containing PET powder and a decrease in the optimum moisture of blends containing PET flakes were observed to the ground. In the simple compression strength test, samples containing PET flakes presented satisfactory results when compared to pure soil. In the direct shear test, there was a reduction of the cohesion parameters of all the samples when compared to the pure soil. It was found that the samples of treated PET flakes obtained satisfactory results when compared to the samples without chemical treatment of the flakes. Likewise, the direct shear test between the PET-soil interfaces and the tear-off test showed effective results for samples containing chemically treated PET.

**Key words:** soil reinforcement, PET flakes, PET powder, simple compression, direct shear.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Reações de formação do PET .....	19
Figura 2: Composição Gravimétrica da Coleta Seletiva .....	21
Figura 3: Perfil dos Plásticos .....	21
Figura 4: Números da Reciclagem de PET no Brasil .....	22
Figura 5: Linha de moagem e lavagem do PET .....	23
Figura 6: Aquisição de PET para reciclagem .....	24
Figura 7: Formas variadas de distribuição de fibras em uma matriz: a) fibras contínuas e unidirecionais; b) fibras descontínuas de inserção aleatória; c) fibras contínuas ortogonais; d) fibras contínuas de inserção aleatória .....	28
Figura 8: Fluxograma dos procedimentos adotados na pesquisa .....	47
Figura 9: Localização da jazida do solo utilizado na pesquisa .....	48
Figura 10: Mapa da distribuição dos Latossolos no Brasil .....	49
Figura 11: Jazida de captação do solo utilizado na pesquisa .....	50
Figura 12: Curva granulométrica do solo .....	51
Figura 13: Classificação do solo pela metodologia MCT .....	52
Figura 14: Pó de PET utilizado na pesquisa.....	54
Figura 15: Layout da Palmann PKM.....	54
Figura 16: Curva granulométrica do pó de PET .....	55
Figura 17: Flocos de PET utilizados na pesquisa.....	56
Figura 18: Moinho Radial LaFrance .....	56
Figura 19: Procedimentos do tratamento químico.....	58
Figura 20: Misturas de solo com pó de PET (a) e flocos de PET (b).....	59
Figura 21: Aparelhagem do compactador miniatura.....	61
Figura 22: Corpos de prova embalados em plástico filme e parafina.....	62
Figura 23: Equipamento utilizado no Ensaio de Compressão Simples .....	63
Figura 24: Esquema da caixa Bipartida.....	64
Figura 25: Peças do aparato utilizado no ensaio de cisalhamento direto.....	65
Figura 26: Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento direto.....	66
Figura 27: Interface solo-PET.....	67
Figura 28: Corpos de prova para o ensaio de arrancamento .....	68
Figura 29: Configuração do ensaio de arrancamento .....	69
Figura 30: Equipamento de metalização e amostras de flocos de PET .....	70

Figura 31: Floco de PET sem tratamento químico .....	71
Figura 32: Floco de PET tratado durante 2 horas com 8% de NaOH.....	71
Figura 33: Curvas de compactação do solo com adição de pó e flocos de PET .....	73
Figura 34: Comparação direta da MEASmáx e umidade ótima.....	74
Figura 35: Tensão média das misturas no ensaio de resistência à compressão simples .....	76
Figura 36: Tensão x deformação do solo no estado puro .....	77
Figura 37: Envoltória de ruptura do solo no estado puro.....	78
Figura 38: Curvas tensão x deformação das condições S, SP3 e SP5.....	78
Figura 39: Envoltórias de ruptura das condições S, SP3 e SP5.....	79
Figura 40: Curvas tensão x deformação das condições S, SF3 e SF5 .....	80
Figura 41: Envoltórias de ruptura das condições S, SF3 e SF5.....	81
Figura 42: Curvas tensão x deformação das condições SF3, SF5, SFT3 e SFT5 ....	82
Figura 43: Envoltória de ruptura da mistura SF3.....	83
Figura 44: Envoltórias do ensaio de cisalhamento direto .....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físicas das principais fibras poliméricas .....	32
Tabela 2: Condições de tratamento químico das amostras .....	57
Tabela 3: Tipos de misturas e abreviações utilizadas na pesquisa .....	60
Tabela 4: Parâmetros de resistência das misturas do ensaio de cisalhamento direto .....	84
Tabela 5: Tensão normal e cisalhante do ensaio de cisalhamento direto entre as interfaces solo-PET .....	85
Tabela 6: Valores médios da força de tração, deslocamento e tensão cisalhante da fibra de PET no ensaio de arrancamento .....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
CBR – *California Bearing Ratio*  
CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente  
CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento  
CPs – Corpos de Prova  
EPS – Poliestireno Expandido  
HRB – *Highway Research Board*  
IP – Índice de Plasticidade  
ISC – Índice de Suporte Califórnia  
LA – Areias Lateríticas  
LA' – Solos Arenosos Lateríticos  
LG' – Solos Argilosos Lateríticos  
LL – Limite de Liquidez  
LP – Limite de Plasticidade  
LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*  
MCT – Miniatura Compactado Tropical  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura  
NA – Areias Não-Lateríticas  
NA' – Solos Arenosos Não-Lateríticos  
NaOH – Hidróxido de Sódio  
NG' – Solos Argilosos Não-Lateríticos  
NS' – Solos Siltosos Não-Lateríticos  
PEAD – Polietileno de Alta Densidade  
PEBD – Polietileno de Baixa Densidade  
PET – Politereftalato de Etileno  
PP – Polipropileno  
PS – Poliestireno  
PVC – Policloreto de Vinila  
RCS – Resistência à Compressão Simples  
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos  
SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos  
TRB – *Transportation Research Board*

UCS – *Unconfined Compressive Strength*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	Relevância e Justificativa da Pesquisa.....	14
1.2	Objetivos .....	16
1.2.1	Objetivo geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos .....	16
1.3	Estrutura do trabalho .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	Politereftalato de Etileno (PET).....	18
2.1.1	Definição e Estrutura Molecular do PET .....	18
2.1.2	Utilização do Plástico PET .....	19
2.1.3	Impacto Ambiental e Reciclagem do PET.....	20
2.1.4	Legislação Brasileira Sobre a Utilização do PET .....	24
2.2	Solos Tropicais .....	25
2.3	Estabilização e Reforço de Solos.....	25
2.4	Solos Reforçados com Elementos Fibrosos .....	26
2.4.1	Tecnologia dos Materiais Compósitos .....	27
2.4.2	Tipos de Fibras Utilizadas como Reforço de Solos.....	29
2.4.2.1	Fibras Naturais.....	30
2.4.2.2	Fibras Poliméricas.....	30
2.5	Alterações das Principais Propriedades dos Solos Devido a Inclusão das Fibras .....	32
2.5.1	Compactação .....	32
2.5.2	Deformabilidade.....	33
2.5.3	Resistência à Compressão e ao Cisalhamento de Pico .....	33
2.5.3.1	Solo Argiloso.....	33
2.5.3.2	Solo Granular.....	34
2.5.4	Resistência ao Cisalhamento Pós-Pico .....	36
2.5.5	Variação Volumétrica .....	36
2.5.6	Modo de Ruptura .....	37
2.5.7	Rigidez Inicial.....	37
2.5.8	Condutividade Hidráulica.....	38
2.6	Estudos Experimentais .....	38
2.7	Estudos Experimentais com Resíduos de PET .....	42

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>47</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais Utilizados .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Solo .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Politereftalato de Etileno (PET).....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.2.1</b>	<b>Pó de PET.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.2.2</b>	<b>Flocos de PET.....</b>	<b>55</b>
<b>3.1.2.3</b>	<b>Flocos de PET Tratados Quimicamente.....</b>	<b>57</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Misturas Solo-PET .....</b>	<b>58</b>
<b>3.2</b>	<b>Métodos e Procedimentos de Ensaio .....</b>	<b>60</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Ensaio de Compactação .....</b>	<b>60</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....</b>	<b>62</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Ensaio de Cisalhamento Direto .....</b>	<b>63</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Resistência entre as Interfaces Solo-PET Utilizando o Equipamento de Cisalhamento Direto .....</b>	<b>66</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Ensaio de Arrancamento.....</b>	<b>67</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....</b>	<b>69</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>73</b>
<b>4.1</b>	<b>Ensaio de Compactação .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....</b>	<b>75</b>
<b>4.3</b>	<b>Ensaio de Cisalhamento Direto .....</b>	<b>76</b>
<b>4.4</b>	<b>Resistência entre as Interfaces Solo-PET Utilizando o Equipamento de Cisalhamento Direto .....</b>	<b>84</b>
<b>4.5</b>	<b>Ensaio de Arrancamento.....</b>	<b>85</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>87</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para Trabalhos Futuros.....</b>	<b>88</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>89</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Relevância e Justificativa da Pesquisa

Com o intenso avanço da tecnologia aliado ao crescimento populacional, novos produtos têm sido criados com uma intensidade cada vez maior. Inseridos neste contexto, os plásticos têm servido de subsídio para a produção de artigos inovadores que têm facilitado a vida dos seres humanos.

Empregando tradicionalmente uma grande quantidade de produtos naturais, a engenharia geotécnica tem utilizado plásticos de uma maneira cada vez mais frequente em seus projetos. Essa inserção não só proporciona a utilização dos plásticos para fins geotécnicos específicos, mas também contribui com a utilização de plásticos recicláveis.

A utilização dos plásticos pós-consumo faz com que haja uma diminuição dos resíduos sólidos alocados em aterros sanitários, e existindo viabilidade técnica e econômica, esses materiais podem ser aplicados na substituição de materiais tradicionais da engenharia. Com a aplicação de materiais recicláveis, do ponto de vista ambiental, haverá uma redução na exploração das jazidas de materiais de construção, minimizando os problemas ambientais que são causados devido a esta exploração. Ainda, tendo em vista a reciclagem dos materiais, no Brasil, muitas cidades já possuem uma legislação para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Incluindo materiais alternativos em obras geotécnicas, consegue-se muitas vezes diminuir os custos das obras e melhorar seu desempenho mecânico, estimulando dessa maneira, novas pesquisas e investimentos nestes materiais.

Nas últimas décadas houve uma intensa disseminação na utilização de embalagens descartáveis em forma de garrafas, que foram produzidas com resina de Politereftalato de Etileno (PET) e que serviram de alternativa às tradicionais garrafas de vidro, até então utilizadas inúmeras vezes no envase do mesmo produto a que eram destinadas durante sua vida útil. Acontece que assim que for depositado em aterros sanitários, o PET pode levar em média 400 anos para se decompor, fazendo com que se reduza a capacidade física dos aterros, provocando inclusive, uma diminuição da capacidade de percolação de gases e líquidos, gerando um acréscimo no tempo necessário de estabilização da matéria orgânica presente nos aterros.

Considerando que seus produtos de degradação são inofensivos ao corpo humano, o PET apresenta alta resistência a agentes atmosféricos e biológicos. Mesmo indevidamente descartadas, as garrafas de PET são totalmente inertes, ou seja, além de não gerarem gases tóxicos, não causam nenhum tipo de contaminação ao solo ou ao lençol freático.

Por outro lado, por apresentarem comportamentos distintos e serem considerados materiais complexos, geralmente os solos não possuem uma capacidade mecânica adequada às necessidades iniciais dos projetos geotécnicos. Busca-se então, melhorias nos parâmetros de resistência do solo, com o intuito de atender as exigências e garantir a segurança dos projetos.

Além disso, devido ao constante crescimento populacional, solos que possuam boas propriedades mecânicas, baixo potencial de riscos naturais, entre outras qualidades importantes para obras geotécnicas, são cada vez mais escassos e difíceis de serem encontrados. Como consequência, modificações das principais propriedades do solo com métodos de drenagens de areia, técnicas de compensação parcial e técnicas de reforço estão se tornando cada vez mais comuns.

Buscando uma alternativa para potencializar o uso do resíduo de PET reciclado em obras geotécnicas, é de extrema importância que o comportamento mecânico, as características físicas, químicas e ambientais das misturas de solo e PET sejam minuciosamente analisadas. Com a mistura de dois materiais de propriedades distintas (solo e PET), cria-se um compósito, que tem como finalidade melhorar a resistência mecânica, a tenacidade, a coesão do solo e diminuir a propagação de fissuras, entre outros. O conhecimento adequado do mecanismo de reforço auxiliará no entendimento do comportamento mecânico da mistura solo-PET, podendo servir como reforço de solo, aplicado em obras geotécnicas de estabilização de taludes, aterros sobre solos moles e fundações superficiais, por exemplo.

Neste contexto, este trabalho objetiva analisar o comportamento de um solo argiloso laterítico reforçado com resíduos de PET, buscando avaliar a viabilidade do material de inclusão como reforço de solo, por meio de um estudo experimental através da caracterização física e mecânica dos novos compósitos. Também se espera que a utilização deste resíduo como material alternativo possa diminuir problemas atuais de disposição de resíduos em aterros sanitários, acrescentando um maior valor ao material.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Analisar a influência da inserção de resíduos de PET atuando como reforço de um solo argiloso laterítico, visando a melhoria do material em relação às suas propriedades mecânicas.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Realizar a caracterização física do solo através de ensaios laboratoriais e das misturas utilizadas na pesquisa;
- Avaliar o comportamento mecânico do solo puro e das misturas de solo com diferentes teores de flocos de PET e pó de PET, através de ensaios de compressão simples, cisalhamento direto e arrancamento;
- Avaliar o comportamento mecânico de misturas de solo com diferentes teores de flocos de PET tratados quimicamente com hidróxido de sódio (NaOH).

## **1.3 Estrutura do trabalho**

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos, sendo eles, além da Introdução, a Revisão Bibliográfica, Materiais e Métodos, Análise dos Resultados e Conclusões.

O Capítulo 2 é constituído pela revisão bibliográfica, a qual aborda os principais temas relacionados à estabilização de solos utilizando resíduos de PET, bem como a apresentação de resultados obtidos em outros trabalhos e que abordam o tema desta pesquisa.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia adotada e descreve a parte experimental, abordando condições dos materiais utilizados e suas características, métodos de dosagem e mistura utilizados, além do procedimento técnico e das normas utilizadas para a condução dos ensaios realizados.

O Capítulo 4 é constituído pelos resultados e análises dos resultados de todos os ensaios que foram executados durante o período da pesquisa, e que buscam contribuir com o processo de estabilização do solo.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões estabelecidas no decorrer desta pesquisa.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nesta seção serão abordadas definições importantes com relação ao plástico PET, além de ser apresentado um cenário da reciclagem nacional. Também serão destacadas algumas pesquisas que fazem a utilização de materiais alternativos para a melhoria de solos, em especial àquelas em que são utilizados resíduos de PET.

### **2.1 Politereftalato de Etileno (PET)**

#### **2.1.1 Definição e Estrutura Molecular do PET**

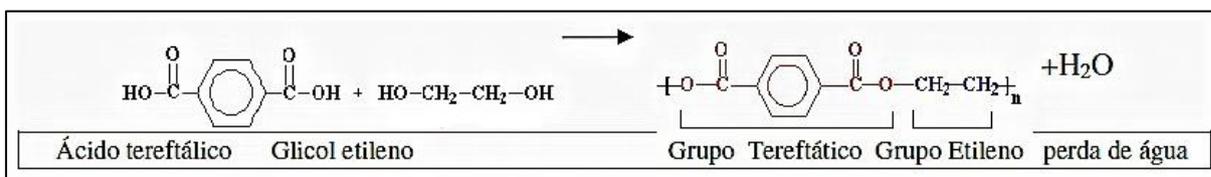
Segundo Romão *et al.* (2009), o PET é considerado um polímero termoplástico da família dos poliésteres. Atualmente, seu conhecimento se dá principalmente devido às garrafas plásticas, porém sua trajetória teve início na indústria têxtil. Os ingleses Whinfield e Dickson desenvolveram, em 1941, a primeira amostra da resina e após a Segunda Grande Guerra, iniciaram-se as pesquisas que levaram à produção em larga escala do poliéster. A ideia inicial era criar alternativas que fossem viáveis para as fibras usadas até o momento. O PET apresentou-se como uma alternativa eficiente na substituição do algodão e teve sua resistência mecânica comprovada quando o poliéster passou a ser utilizado na indústria de pneus.

A fabricação de garrafas PET só teve início na década de 1970, após ser realizada uma minuciosa revisão dos aspectos de segurança e meio ambiente. Na década seguinte, EUA e Canadá deram início à coleta dessas garrafas, realizando a reciclagem para, inicialmente, servirem de enchimento de almofadas. Com o passar dos anos e a melhora nos processos de reciclagem do PET, importantes aplicações surgiram, tais como tecidos, lâminas e garrafas para produtos não alimentícios. Na década de 1990, o governo americano autorizou o uso do material reciclado também para embalagens de alimentos. No Brasil, o PET chegou no ano de 1988, seguindo uma trajetória parecida com o restante do mundo, sendo utilizado de maneira primordial na indústria têxtil (CEMPRE, 2012).

Melo (2004) apresenta a estrutura molecular do PET como sendo o resultado de uma reação de dois monômeros: etileno glicol, considerado um álcool, líquido à

temperatura ambiente e com ponto de ebulição de 197 °C e ácido tereftalático, considerado um monômero sólido com ponto de fusão de 140°C, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Reações de formação do PET



Fonte: Melo (2004, p.12)

Melo (2004) ainda afirma que o PET pode ser apresentado como um homopolímero, que tem por característica ter a repetição de um só mero, e que é pouco utilizado pelo fato de se cristalizar facilmente, ou é apresentado como um copolímero, que se caracteriza pela repetição de dois meros.

### 2.1.2 Utilização do Plástico PET

O PET ingressou no Brasil por volta do ano de 1988, mas somente começou a ser utilizado como embalagem de refrigerante por volta do ano de 1993. Essa utilização foi possível por conta das inúmeras vantagens que as embalagens de PET possuem frente aos outros tipos de materiais e que são destacadas pela ABIBET (2016), tais como:

- Excelentes propriedades de barreira;
- Estabilidade química;
- Baixo custo compatível com os demais termoplásticos de finalidades semelhantes;
- Evita interrupções na linha de montagem de envase por quebra de embalagens;
- Apresenta segurança e praticidade.

Apesar de seus diversos usos e aplicações, o PET concentra sua utilização nas indústrias têxteis, automotivas e de construção civil. A ABIPET (2016) relata que cerca de 90% de sua aplicação é voltada para a fabricação de embalagens.

### 2.1.3 Impacto Ambiental e Reciclagem do PET

Com o aumento da população ao longo dos anos, juntamente com a ampliação do seu poder aquisitivo, uma brusca mudança na geração de resíduos produzidos pela sociedade pode ser observada. A industrialização trouxe um volume maior de descartes junto aos aterros sanitários, além de novos materiais, que acabaram culminando em uma elevação do grau de poluição ambiental (MENESES, 2011).

Responsáveis diretos pela reindustrialização dos resíduos recicláveis, as indústrias de reciclagem realizam a transformação do resíduo, considerado lixo, em um produto que possa ser novamente consumido. Leal *et al.* (2003) enfatiza que essa ação benéfica faz com que haja uma redução dos danos ambientais e permite que se reaproveite uma parcela de resíduos sólidos, colaborando para uma solução de um dos mais graves problemas urbanos da atualidade, a produção de lixo, além de se tornar uma alternativa para o desenvolvimento economicamente sustentável.

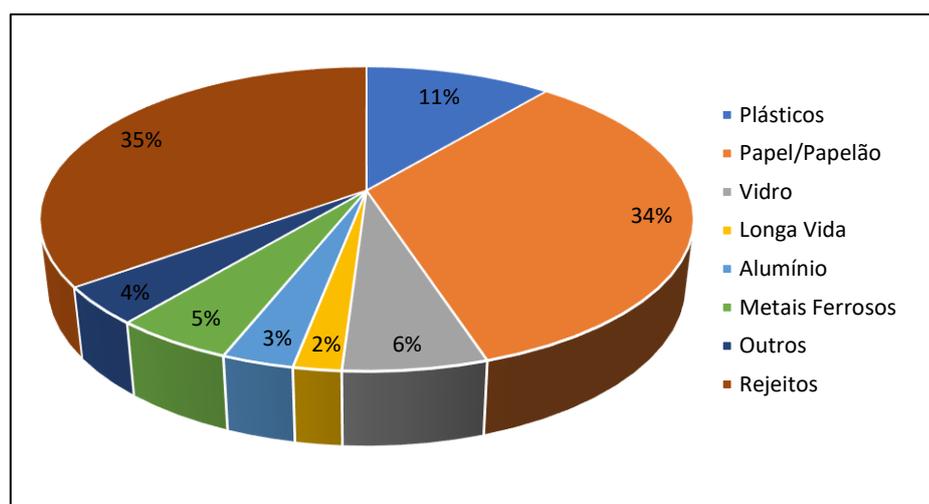
Para se ter uma ideia, no Brasil, de acordo com a ABRELPE (2017), a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) revelaram um total de 78,4 milhões de toneladas no ano de 2017, demonstrando um aumento de cerca de 1% em relação ao ano de 2016. Com relação ao montante de RSU coletado no ano de 2017, 71,6 milhões de toneladas tiveram um correto destino, obtendo um índice de cobertura de coleta de 91,3% no país. No que diz respeito à disposição final dos RSU, 42,3 milhões de toneladas, ou 59,1% do coletado, seguiu para a disposição final em aterros sanitários. O restante dos resíduos coletados, cerca de 29 milhões de toneladas, foi despejado em locais inadequados que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessárias para a proteção do meio ambiente contra danos à saúde de milhões de pessoas.

Ainda de acordo com a ABRELPE (2017), a geração *per capita* de RSU no Brasil apresentou um crescimento 0,48% entre 2016 e 2017, atingindo a marca de 214.868 toneladas diárias de RSU no país, cerca de 1% maior que o ano anterior.

Outro dado interessante revelado pela CEMPRE (2017) diz respeito aos materiais recicláveis mais coletados no Brasil no ano de 2016, por meio de sistemas municipais de coleta seletiva. O papel/papelão aparece como o material de maior destaque dentre os RSU, seguido pelos plásticos, de acordo com a Figura 2. Com relação aos componentes dos plásticos, o PET ganha destaque, pois representa cerca

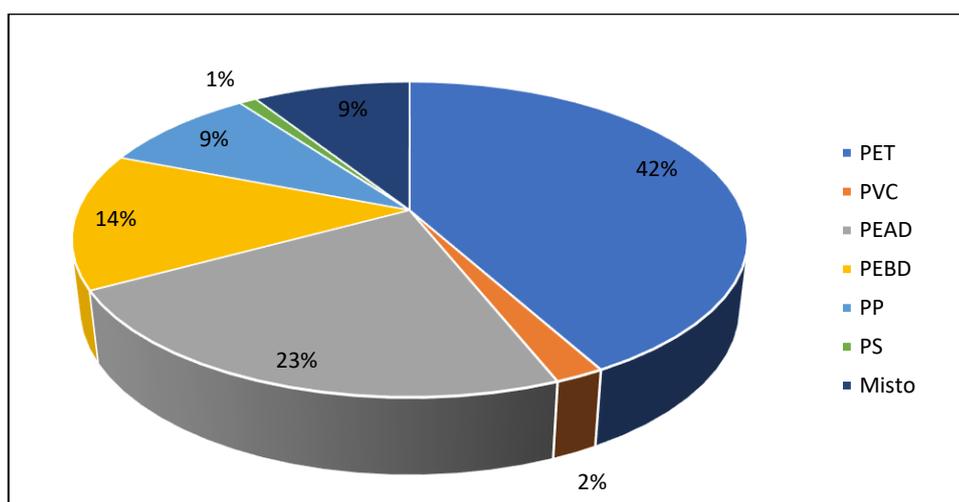
de 42% dos plásticos coletados, como mostra a Figura 3. Além dos resíduos recicláveis, a coleta seletiva apresenta uma alta porcentagem de rejeitos, cerca de 35%, oriunda devido à falta de informações e bons costumes da população, que muitas vezes acaba por misturar materiais recicláveis com materiais orgânicos.

Figura 2 - Composição Gravimétrica da Coleta Seletiva



Fonte: Adaptado de CEMPRE (2017)

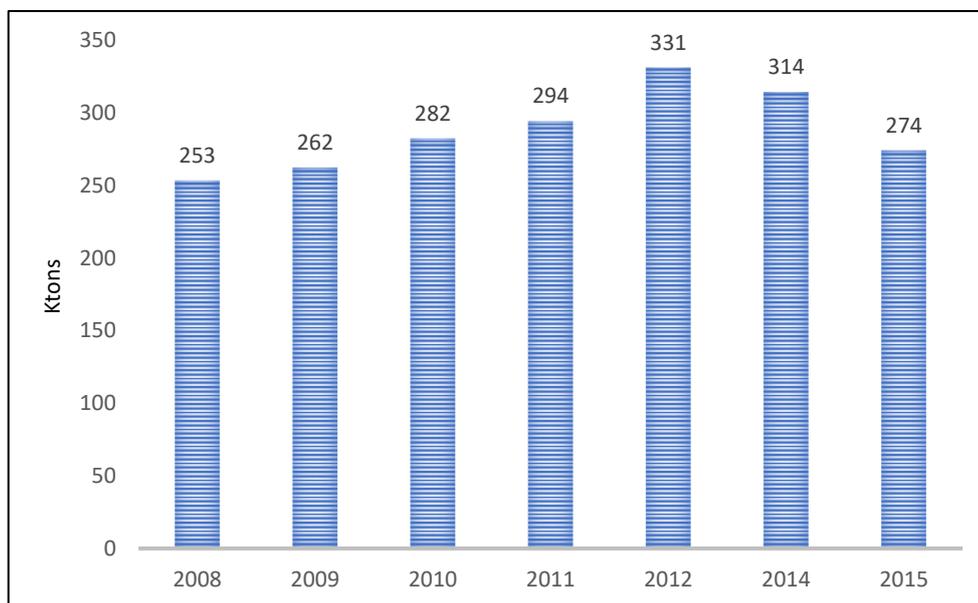
Figura 3 - Perfil dos Plásticos



Fonte: Adaptado de CEMPRE (2017)

No que diz respeito à reciclagem de PET, a ABIPET (2016), de acordo com dados do 10º censo de Reciclagem de PET no Brasil realizado no ano de 2015, informou que foram recicladas 274 mil toneladas do material, de acordo com a Figura 4, correspondente a 51% de todas as unidades consumidas no país.

Figura 4 - Números da Reciclagem de PET no Brasil



Fonte: Adaptado de ABIPET (2016)

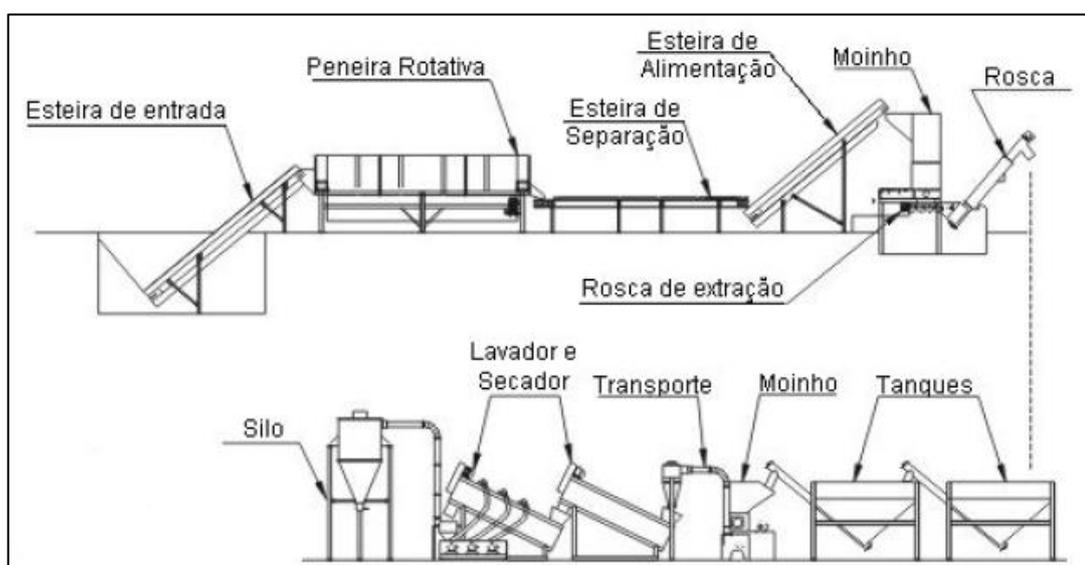
Melo (2004) afirma que a reciclagem do PET pode ser dividida em três diferentes processos:

- Químico: consiste na separação dos componentes que constituem o PET fornecendo matéria-prima para solventes e resinas. Os principais processos que envolvem esse tipo de reciclagem são a hidrogenação, a gaseificação, a quimólise e a pirólise;
- Energético: utiliza processos de queima do PET a fim de se obter geração de calor e geração de energia elétrica;
- Mecânico: faz uso de máquinas e equipamentos para moer e triturar o PET. O processo pode ser dividido em: coleta, separação, revalorização e transformação.

A ABIPET (2013) destaca que praticamente todo o PET reciclado no Brasil é oriundo do processo mecânico. Na fase de recuperação do PET é realizada a coleta seletiva das garrafas, evitando o seu descarte em aterros sanitários. Em seguida, no processo de triagem, há a separação das embalagens por cor, bem como separação de rótulos e tampas. Por fim, realiza-se a prensagem dos fardos das garrafas que foram separadas e organizadas.

Após a fase de recuperação, há o encaminhamento dos fardos, com auxílio de esteiras, para a realização do processo de lavagem. Em seguida, realiza-se a moagem e trituração das garrafas de PET com auxílio de moinhos. No processo final de moagem o material é novamente submetido a uma lavagem e passa por um processo de peneiramento para a classificação da sua granulometria. A Figura 5 apresenta uma linha de lavagem e moagem de garrafas PET, comumente encontrada em indústrias de reciclagem do país (ABIPET, 2013).

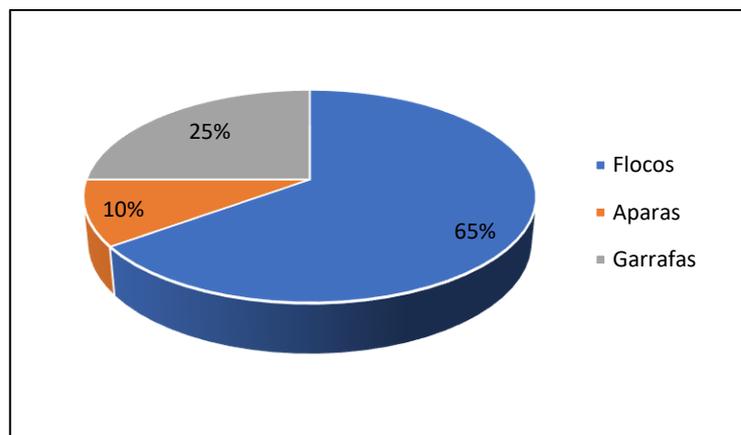
Figura 5 - Linha de moagem e lavagem do PET



Fonte: ABIPET (2013)

De acordo com a ABIPET (2013), a matéria-prima que resulta do processo de moagem é conhecido como floco ou *flake*. Em torno de 65% das indústrias brasileiras de reciclagem mecânica de PET costumam realizar as operações com matéria-prima reciclável em forma de flocos, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Aquisição de PET para reciclagem



Fonte: ABIPET (2013)

Ainda, a última etapa que fecha o ciclo de processo de reciclagem mecânica do PET é chamada de transformação, onde o subproduto, flocos, são transformados em novos produtos. Em torno de 46% da reciclagem do PET é destinado para a produção de novas garrafas PET. O segundo segmento de maior utilização diz respeito à indústria têxtil, que faz uso do material reciclado para a produção de fios e tecidos (ABIPET, 2013).

#### 2.1.4 Legislação Brasileira Sobre a Utilização do PET

No Brasil, as embalagens de PET pós-consumo são consideradas resíduos sólidos e a sua disposição final e/ou reciclagem é regida pela Lei nº 12.305, que aborda a Política Nacional de Resíduos Sólidos, criada no ano de 2010. O Ministério da Saúde, através da Secretaria de Vigilância em Saúde, também criou, em 1998, a portaria nº 987, que trata do regulamento técnico para embalagens descartáveis de PET multicamada destinadas ao acondicionamento de bebidas alcoólicas carbonatadas.

Spinacé e De Paoli (2005) alertam que objetos feitos a partir de polímeros reciclados possuem sua aplicação limitada. Ou seja, esse tipo de material não pode ser utilizado em contato com bebidas, medicamentos, alimentos, brinquedos e material hospitalar, pois dependendo do uso prévio, pode estar contaminado.

## 2.2 Solos Tropicais

Nogami e Villibor (2009) definem em seus estudos que solos tropicais são aqueles que ocorrem em localidade em que haja predominância de clima tropical e úmido. De uma maneira geral, os solos tropicais são divididos em solos lateríticos e solos saprolíticos:

- Solos lateríticos: costumam ocorrer em regiões tropicais úmidas e bem drenadas, decorrentes de uma transformação que ocorre na parte superior do subsolo, denominada de intemperismo. São caracterizados por sua cor, uma vez que predominam os matizes amarelo e vermelho em sua composição. Por conta do processo de laterização, a parte argilosa dos solos lateríticos é rica em mineirais do grupo das caulinitas e composto de hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e alumínio. Esse tipo de solo possui ainda uma tendência de conter uma alta parcela da sua granulometria menor que 2 mm de diâmetro (MARANGON, 2004)
- Solos saprolíticos: são genuinamente residuais, uma vez que derivam de uma rocha matriz e suas partículas tendem a permanecer no mesmo lugar em que se encontravam no estado pétreo. Esse tipo de solo compõem a parte subjacente à camada de solo superficial laterítico, costuma possuir uma maior heterogeneidade e uma mineralogia mais complexa, contendo minerais em fase de decomposição (MARANGON, 2004).

## 2.3 Estabilização e Reforço de Solos

Estabilizar ou reforçar um solo nada mais é do que fazer a utilização de um meio físico ou químico buscando o melhoramento das propriedades do solo. Basicamente, o reforço de solo consiste na inclusão de elementos de reforço no interior da massa do solo, tais como geotêxteis, fibras, grelhas. A estabilização busca o melhoramento das propriedades de uma massa de solo modificando sua própria estrutura, através de métodos mecânicos ou químico. De tal modo, ambas as técnicas possuem o mesmo objetivo, que consiste no melhoramento do comportamento dos solos aplicados em obras geotécnicas (PALMEIRA, 1990).

Guimarães (2002) recomenda que se deve necessariamente, quando utilizada a técnica de estabilização de solos, levar em consideração o fator econômico, as características do solo, os materiais utilizados e as finalidades do solo estabilizado.

A estabilização dos solos, de acordo com o relato de Bento (2006), pode ser obtida com a utilização de várias técnicas, as quais são divididas em dois grupos:

- Estabilização mecânica: utiliza métodos como a correção granulométrica, que é obtida através da subtração ou adição de frações constituintes do solo;
- Estabilização química: faz uso de aditivos orgânicos ou inorgânicos no solo, tais como cal, cimento, resinas, etc.

Já Van Impe (1989), afirma que o processo de estabilização de um solo pode ser classificado como:

- Estabilização temporária do solo: é aquela limitada a um curto espaço de tempo, como por exemplo um congelamento de solos ou o rebaixamento do nível do lençol freático por drenos na execução de certa fase de uma obra;
- Estabilização permanente do solo sem adição: é aquela em que há processos de compactação e/ou tratamento térmico, tais como a compactação superficial ou profunda;
- Estabilização permanente do solo com adição de novos materiais: é aquela que combina a compactação do solo com adição de um novo material, como por exemplo cimento, cal, colunas de brita ou areia, reforço com tiras metálicas ou geossintéticos, etc., e é o caso em que a presente pesquisa está inserida.

## **2.4 Solos Reforçados com Elementos Fibrosos**

Há indícios de que a técnica de reforçar o solo tenha sido aplicada em partes da Muralha da China, bem como em estradas construídas por Incas, no Peru, onde se empregava lã de vicunha como material de possível reforço. Também há indícios de utilização de fibras na antiga Roma e Egito, sendo que apenas no século passado foram realizadas tentativas de produção racional deste tipo de material, tendo como base misturas de pastas diluídas de cimento com fibras naturais, principalmente as de composição vegetal. A técnica de reforçar o solo com fibras, de acordo com Palmeira (1992), teve amplo destaque a partir de 1926, quando o Departamento de Estradas

da Carolina do Sul fez uso de mantas de algodão com o intuito de reforçar camadas asfálticas de pavimentos.

A primeira indústria que começou a desenvolver, produzir e utilizar os materiais fibrosos foi a construção civil. Todavia, Kern (1999) relata que a partir da Segunda Guerra Mundial, houve um grande desenvolvimento nas áreas de engenharia mecânica, aeroespacial e aeronáutica, ocasionando que a maior parte das pesquisas utilizando materiais fibrosos fossem realizadas com bases em matrizes poliméricas e metálicas. De início, a inclusão das fibras ao solo era realizada de maneira discreta e orientada, porém hoje, na maioria dos estudos, sua inclusão se dá de maneira aleatória na massa de solo.

Casagrande (2001) destaca que há um elevado número de novos materiais sendo desenvolvidos atualmente que buscam incorporar de alguma forma elementos de reforço. Dessa maneira, existe a necessidade do conhecimento das propriedades mecânicas, físicas e químicas desses novos materiais, conhecidos como materiais compósitos. Para que a técnica de reforço de solos utilizando inclusão de fibras possa ser realizado, é necessário ter um conhecimento acerca dos materiais compósitos, a fim de determinar o melhor mecanismo de interação da fibra com o solo utilizado.

#### **2.4.1 Tecnologia dos Materiais Compósitos**

Formados pela combinação de dois ou mais materiais, os materiais compósitos, segundo Bento (2006), caracterizam um conjunto polifásico formado pela matriz e pelas fibras que são adicionadas a ela, tornando as propriedades do novo material superior à de seus componentes em separado. Como se consiste de um material heterogêneo, as fibras, que são a parte descontínua, oferecem resistência ao esforço externo, e a matriz, que é o constituinte contínuo, é responsável por oferecer o meio de transferência para esse esforço.

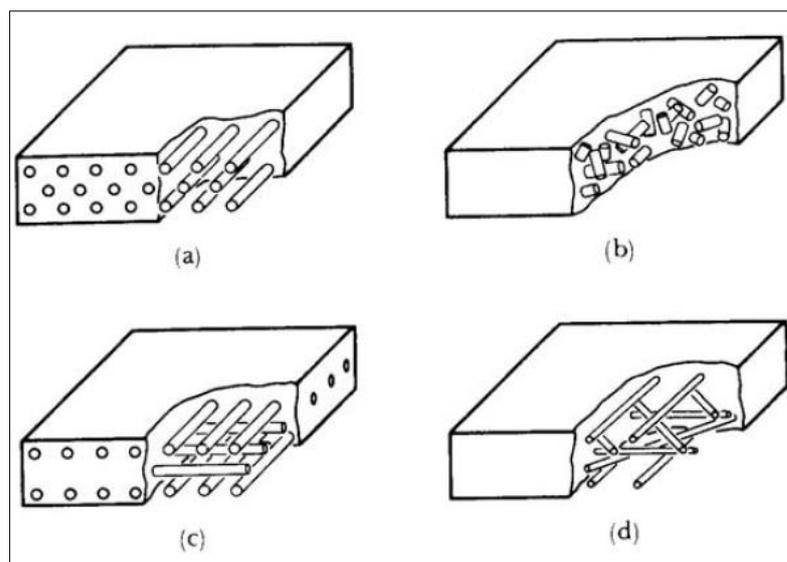
Higgins (1982) destaca que a matriz é basicamente responsável por três funções:

- Realizar a proteção da superfície da fibra quanto à fratura, causada geralmente por danos de abrasão;

- Aderir à fibra de forma eficiente, a fim de que a força aplicada seja transferida a mesma;
- Fazer a separação das fibras entre si, evitando que trincas transversais se propaguem de uma fibra para outra.

Ainda de acordo com Bento (2006), os compósitos podem apresentar em sua estrutura, fibras de características e tamanhos variados, podendo estar dispostas na matriz de forma aleatória ou ordenada. Com relação aos tipos de fibras utilizados atualmente, destacam-se os materiais orgânicos ou inorgânicos, que possuem formas regulares ou irregulares, podendo ainda ser fibrosos com fragmentos achatados ou fibras muito curtas, como mostra a Figura 3, mas que devem apresentar necessariamente características de resistência, rigidez ou maleabilidade. As fibras buscam oferecer reforço mecânico à matriz, principalmente porque a maioria dos materiais de construção são considerados frágeis, e costumam apresentar uma ruptura brusca e sem deformação plástica, como por exemplo as argamassas e concretos de cimento Portland.

Figura 7 - Formas variadas de distribuição de fibras em uma matriz: a) fibras contínuas e unidirecionais; b) fibras descontínuas de inserção aleatória; c) fibras contínuas ortogonais; d) fibras contínuas de inserção aleatória



Fonte: Askeland (1990) *apud* Bento (2006, p. 20)

Bento (2006) explica que, por apresentarem características distintas, há uma diferença de interação com relação ao tipo de fibra, diminuindo ou aumentando a energia global da fratura. No caso das fibras contínuas, a fratura acontece por deslizamento (*debonding*), onde ocorre a deformação e escorregamento das fibras na matriz. Nas fibras descontínuas, há a dissipação de energia no processo de arraste e destacamento dessas fibras, que é chamado de arrancamento (*pull-out*).

Bernardi (2003) destaca que quando há o surgimento da primeira fissura em materiais que não contam com a inclusão de fibras, há uma abertura progressiva e constante desta fissura, dando origem ao colapso da matriz. Já em matrizes que contam com a presença de fibras, essa fratura é retardada. Acontece que a ruptura costuma ser caracterizada por um processo progressivo, onde as pontes de transferência constituídas pelas fibras absorvem uma parte das solicitações, originando uma fissuração mais distribuída.

#### **2.4.2 Tipos de Fibras Utilizadas como Reforço de Solos**

Feuerharmel (2000) destaca que atualmente há um grande número de tipos de fibras que vem sendo utilizados no reforço de solos. As características de cada fibra, bem como as propriedades físicas, químicas e mecânicas afetam o comportamento do material compósito e estão intimamente relacionadas ao material de sua composição, juntamente com o seu processo de fabricação.

Além disso, há a necessidade da compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e qual a contribuição de cada uma das fases do material compósito, pois a partir dessas análises faz-se a escolha do tipo de fibra a ser empregada. Isto dependerá basicamente das características da matriz que será reforçada e das propriedades que o material compósito deverá apresentar (CASAGRANDE, 2005b).

Taylor (1994) lembra que várias pesquisas têm demonstrado que o uso de fibras que possuem uma maior capacidade de alongação tem apresentado melhores resultados quando comparados à materiais que possuem um módulo muito elevado, como por exemplo as fibras de aço. O autor acrescenta que devem ser consideradas algumas características na escolha das fibras para utilização de reforço de materiais: devem ser quimicamente neutras e não deterioráveis; não sofrer ataques de fungos, bactérias ou álcalis; não prejudicar a saúde humana.

### **2.4.2.1 Fibras Naturais**

Sales (2011) indica que as fibras naturais foram as primeiras empregues como reforço na história da humanidade. A maioria das fibras naturais é de origem vegetal, com destaque para o bambu, juta, coco e sisal, sendo a última amplamente utilizada devido à ótimas propriedades de resistência e tenacidade, onde o material possui capacidade de absorver energia até atingir a ruptura, sendo considerado oposto ao material frágil, onde se observa a fratura com pequena absorção de energia. O ponto negativo da utilização das fibras naturais se dá pelo fato de possuírem pequena durabilidade e alta absorção de água, o que acaba colaborando para a ocorrência de fissurações por conta da retração diferencial.

Nos últimos anos, houve um aumento no número de pesquisas relacionados com compósitos utilizando fibras vegetais. Aguilar (2015) destaca que a maioria das pesquisas ditam para o reaproveitamento das fibras vegetais na construção civil, principalmente em concretos e argamassas. Formados por aglomerados minerais, ambos utilizam suas matrizes com base no cimento Portland, cal e gesso. Ao adicionar as fibras na matriz, há uma melhora nas propriedades mecânicas e no comportamento pós fissuração, ocasionando uma diminuição dos efeitos de uma ruptura brusca da matriz cimentícia.

### **2.4.2.2 Fibras Poliméricas**

Atualmente, há um grande número de tipos de fibras poliméricas que vem sendo empregadas no reforço de solos. Aguilar (2015) comenta que existem as do tipo fibriladas, que são fibras que apresentam um formato trançado quando esticadas transversalmente. Outro formato que se diferencia das fibras tradicionais são as malhas, que proporcionam um melhor intertravamento com as partículas de solo.

Basicamente, as fibras poliméricas são subdivididas em quatro grandes grupos, listados a seguir: fibras de polipropileno, fibras de polietileno, fibras de poliéster e fibras de poliamida.

- Fibras de polipropileno: são constituídas de um tipo de material que, com o aumento da temperatura, acaba adquirindo uma consistência plástica, conhecida como termoplástico. Hollaway (1994) define os termoplásticos como sendo constituídos por uma série de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas de forma que possa haver o deslizamento de uma sobre as outras. Além disso, possuem grande flexibilidade e tenacidade, possuindo um módulo de elasticidade de aproximadamente 8 GPa e uma resistência à tração em torno de 400 MPa.
- Fibras de polietileno: de acordo com Hannant (1994), esse tipo de fibra apresenta um baixo módulo de elasticidade, possui baixa aderência à matriz cimentícia e apresenta uma alta resistência aos álcalis. Ainda, essa fibra costuma não sofrer variação volumétrica com a presença de água, possui alta durabilidade, mas apresenta altas deformações de fluência quando comparadas às fibras de polipropileno.
- Fibras de poliéster: Taylor (1994) diz que essas fibras têm como principais características a alta rigidez, densidade e resistência, além de serem similares às fibras de polipropileno e utilizadas para as mesmas aplicações. Atualmente, o poliéster de maior conhecimento é o polietileno tereftalato (PET), material constituinte das garrafas plásticas de refrigerantes, águas minerais, etc.
- Fibras de poliamida: é um polímero que tem como principal característica conter longas cadeias de moléculas, com baixa resistência e rigidez, devido suas moléculas serem espiraladas e dobradas. Porém, caso estas moléculas sejam esticadas e reforçadas durante o processo de manufatura, se tem a possibilidade de se alcançar altas resistências e módulos de elasticidade, como é o caso do Kevlar, a principal fibra de poliamida conhecida nos dias de hoje (TAYLOR, 1994).

A seguir, a Tabela 1 apresenta as principais propriedades físicas dos quatro tipos de fibras citados anteriormente:

Tabela 1 - Propriedades físicas das principais fibras poliméricas

Fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Polipropileno	400	8
Polietileno	24	1,1
Poliéster	130 - 880	4 - 15
Poliamida	3000	128

Fonte: Adaptado de Hollaway (1994)

## 2.5 Alterações das Principais Propriedades dos Solos Devido a Inclusão das Fibras

Este tópico trará diferentes conclusões de pesquisas que abordaram as mudanças das propriedades dos solos devido ao reforço dos mesmos com diferentes tipos de fibras. As principais mudanças citadas pelos autores estão relacionadas à compactação, deformabilidade, resistência ao cisalhamento de pico e pós-pico, variação volumétrica, modo de ruptura, rigidez inicial e condutividade térmica.

### 2.5.1 Compactação

Al Wahab e Al Qurna (1995) realizaram um estudo que analisou os efeitos da inclusão de vários teores de fibras geossintéticas na curva de compactação de um solo argiloso. As porcentagens de fibras utilizadas foram de 0,5%, 1% e 2% em relação ao peso seco do solo. Os autores observaram que houve um decréscimo na densidade e um aumento da umidade ótima para a adição de 2% de fibra, valores que foram considerados não muito significativos.

Bueno *et al.* (1996), Ulbrich (1997), Consoli *et al.* (1999) e Heineck (2002) avaliaram o mesmo comportamento com relação à umidade, porém em um solo arenoso, e não constataram alteração na umidade ótima das amostras. Os autores também ressaltaram que a densidade máxima não sofreu alterações com a inclusão das fibras.

### **2.5.2 Deformabilidade**

Maher e Ho (1994) e Nataraj *et al.* (1996) observaram em suas pesquisas, para um solo argiloso, um aumento no módulo de deformação tanto quanto maior o teor de fibras utilizados nas misturas. Contrário a este resultado, Ulbrich (1997) e Consoli *et al.* (1999) obtiveram uma redução no módulo de deformação, porém para solos arenosos cimentados e não cimentados.

Stauffer e Holtz (1996) perceberam que a adição de fibras causou um aumento das deformações volumétricas de compressão na ruptura, sendo que esse aumento foi mais perceptível em uma areia mal graduada, em comparação com uma areia bem graduada (ambas com o mesmo diâmetro  $D_{50}$  dos grãos).

Sotomayor (2014) também analisou o comportamento de uma areia reforçada com fibras de coco distribuídas em duas maneiras: a primeira, em forma de manta, diminuiu os recalques e deformações em corpos de grandes magnitudes em relação ao aumento de carga, além de atuar como uma membrana que absorve deformações; e a segunda, de maneira aleatória, não evitou as deformações, porém, contribuiu na absorção da propagação de fissuras.

### **2.5.3 Resistência à Compressão e ao Cisalhamento de Pico**

De uma maneira geral, as fibras utilizadas como reforço ajudam a inibir a amplitude da fissuração associadas à ruptura do compósito. Isto acaba gerando um aumento nas áreas sob a curva do gráfico tensão x deformação, conhecido como tenacidade, e representa o trabalho ou a capacidade de absorção de energia do compósito. Este tópico descreve o comportamento da resistência ao cisalhamento de pico para solos argilosos e granulares, com o intuito de compreender melhor o comportamento dos compósitos.

#### **2.5.3.1 Solo Argiloso**

Maher e Ho (1994) concluíram que a inclusão de fibras possui uma influência significativa nas propriedades mecânicas de argilas cauliníticas. Os autores

realizaram ensaios de compressão não confinada e diametral e constataram um aumento na ductilidade do material, bem como uma elevação do pico de resistência à compressão e à tração. Também verificaram que o aumento da quantidade de fibras aumenta a resistência à tração e à compressão, todavia, à medida que se aumenta o comprimento da fibra, há uma diminuição de ambas as resistências.

Al Wahab e Al-Qurna (1995) analisaram uma argila siltosa e estabeleceram uma quantidade ótima de fibra que correspondeu a maior taxa de acréscimo de resistência à compressão não confinada com adição de fibras. Os autores chegaram à conclusão de que o teor ótimo de fibras para esse tipo de solo é de 1%. Quando há uma alta quantidade de argila presente no solo ou se tratar de um solo expansivo, o teor ótimo de fibras gira em torno de 0,2%.

Bueno *et al.* (1996) realizaram um estudo comparativo entre um solo coesivo e granular, mostrando que solos coesivos tendem a ser menos sensíveis com relação ao aumento do comprimento das fibras. Ensaio triaxiais mostraram que houve um acréscimo no ângulo de atrito após a adição do reforço.

Lima *et al.* (1996) também observaram, através de ensaios triaxiais, um aumento no ângulo de atrito após a inclusão de fibras em um solo silto-argiloso estabilizado com cal, todavia, sem haver uma tendência definida com relação ao aumento da quantidade de fibras. Os autores ainda indicaram um aumento da relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão com a adição de fibras.

Teodoro (1999) e Heineck (2002) chegaram a um consenso de que a coesão é acrescida pela inclusão de fibras. Observaram ainda uma grande taxa de acréscimo de resistência ao cisalhamento com a deformação. Ensaio triaxiais também mostraram um acréscimo no ângulo de atrito após a adição das fibras de reforço.

### **2.5.3.2 Solo Granular**

Ranjan e Charan (1996) verificaram que a curva tensão x deformação de uma areia fina reforçada apresentou crescimento mesmo havendo deformações axiais da ordem de 20%. Teodoro (1999) também constatou um aumento na resistência ao cisalhamento de uma areia siltosa utilizando fibras de polipropileno de 30 mm, diferentemente do solo argiloso, que apresentou sua máxima resistência utilizando fibras de 15 mm.

Consoli, Casagrande e Coop (2007) realizaram uma análise do desempenho de uma areia reforçada com fibras de polipropileno de diferentes comprimentos. As amostras foram submetidas a grandes deformações cisalhantes e os autores perceberam que quanto maior o comprimento das fibras utilizadas como reforço, maior o incremento da resistência cisalhante do solo. Também se observou que quanto maior a deformação cisalhante, maior a quantidade de fibras rompidas, levando a concluir que as fibras, que sofrem deformações plásticas antes de romper, alongam até o momento em que as deformações do ensaio superem a deformação de ruptura das fibras.

Vendrusculo (2003) percebeu que as fibras possuem uma característica de conferir um intercepto coesivo ao solo arenoso, aumentando também seu ângulo de atrito. O autor também constatou que no caso de ser um solo cimentado, as fibras possuem uma influência maior sobre a coesão última e o ângulo de atrito último.

Consoli *et al.* (2002) verificaram que houve um aumento no ângulo de atrito de uma areia cimentada e não cimentada reforçada com diferentes tipos de fibra. Houve ainda um acréscimo da coesão somente para a areia não cimentada reforçada com fibras. Specht *et al.* (2002) lembram que uma alteração nos valores de resistência ao cisalhamento depende das características do reforço. Em seus estudos, constataram que não houve alteração nos parâmetros de resistência para uma areia siltosa cimentada e reforçada com fibras extensíveis, cuja deformação de ruptura do elemento de reforço é maior que a máxima deformação de tração no solo sem reforço. Porém, verificaram um leve aumento da coesão e do ângulo de atrito da areia siltosa cimentada quando reforçada com fibras inextensíveis, consideradas mais rígidas e que possuem deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem reforço.

Vários autores, tais como Stauffer e Holtz (1996), Morel e Gourc (1997), Kaniraj e Havanagi (2001) observaram em um solo granular reforçado, em termos de resistência ao cisalhamento, a bi-linearidade das envoltórias de resistência. Os autores também concluíram que quanto menor foi a rugosidade ou aderência da interface solo-fibra, maior tende a ser a tensão de confinamento crítica. Fibras que possuem características mais rugosas costumam apresentar acréscimos nos valores de resistência cisalhante.

Stauffer e Holtz (1996) também realizaram ensaios triaxiais em duas areias reforçadas com distribuições granulométricas distintas (uma bem graduada e uma uniforme), porém, com diâmetro médio ( $D_{50}$ ) dos grãos de solo, que mostraram que houve um acréscimo na resistência da areia bem graduada com adição de fibras. Os autores ainda concluíram que a forma das partículas influencia diretamente na resistência do solo reforçado com fibras e que a contribuição das fibras na resistência é menor à medida que se tem um aumento do índice de esfericidade das partículas do solo.

#### **2.5.4 Resistência ao Cisalhamento Pós-Pico**

Autores como Fatani *et al.* (1991), Ranjan e Charan (1996), Consoli *et al.* (2002) e Donato *et al.* (2004) realizaram criteriosas análises de resistências em solos reforçados com fibras e concluíram que a adição das mesmas reduz a queda de resistência pós-pico.

#### **2.5.5 Variação Volumétrica**

Stauffer e Holtz (1996) relataram um aumento das deformações volumétricas de compressão na ruptura com adições de fibras, de modo mais acentuado em areias uniformes, quando comparado a areias bem graduadas, com o mesmo diâmetro médio ( $D_{50}$ ). Também houve um aumento de compressibilidade do solo com a inclusão de fibras no trabalho de Bueno *et al.* (1996), concluindo que a deformação volumétrica tende a aumentar com o acréscimo da quantidade de material de reforço.

Por meio de ensaios de compressão isotrópica, Consoli *et al.* (2005) observaram que existe uma alteração significativa no comportamento compressivo de uma areia após a adição de fibras, causando uma mudança da localização da linha isotrópica de compressão do material. Toda vez que o material reforçado é submetido à compressão isotrópica, há um movimento dos grãos capaz de conduzir as fibras a sofrerem deformações plásticas de tração, se alongando em primeira instância, podendo atingir a ruptura logo em seguida.

### 2.5.6 Modo de Ruptura

Specht (2000) estudou os efeitos que a inclusão de dois tipos de fibras poliméricas (em filamentos e fibrilada – tipo *mesh*) causava em um solo cimentado. O autor avaliou que a inclusão de fibras em filamentos, que possuem características mais alongáveis, alterou o comportamento do material, de frágil para dúctil. Para as fibras *mesh*, que possuem características mais rígidas, não houve uma alteração no modo de ruptura do material analisado.

A inclusão de fibras de polipropileno no compósito de matriz cimentada, proposta por Montardo (1999), alterou de maneira significativa o modo de ruptura do material. A inserção das fibras alterou o comportamento do material de frágil para dúctil. O autor ainda constatou que a inclusão de fibras de PET e fibras de vidro reduziram sensivelmente o índice de fragilidade da matriz cimentada, porém não foram suficientes para determinar uma modificação no modo de ruptura da matriz cimentada.

Donato *et al.* (2004) observaram uma significativa mudança no modo de ruptura em amostras cimentadas reforçadas com fibras de polipropileno. Amostras que não foram reforçadas apresentaram um comportamento frágil no modo de ruptura, enquanto amostras reforçadas com 0,5% de fibras proporcionaram uma fragilidade menos pronunciada, dando à amostra uma característica dúctil quanto ao modo de ruptura.

### 2.5.7 Rigidez Inicial

Maher e Ho (1994) e Nataraj *et al.* (1996) observaram um aumento no módulo de deformação em argilas, tanto quanto se aumentava o teor de fibras de polipropileno. Porém, Ulbrich (1997) e Consoli *et al.* (1999) constataram uma redução no mesmo módulo com a inclusão de fibras. Ainda, Montardo (1999) detectou uma queda acentuada da rigidez inicial de uma areia cimentada que havia sido reforçada com fibras de polipropileno e constatou que não houve alteração no mesmo módulo quando utilizadas fibras de PET e de vidro.

Michalowski e Cermák (2003) analisaram um solo arenoso e chegaram à conclusão de que a adição de uma fibra sintética causou uma redução na rigidez inicial

e que a adição de fibras de aço, por outro lado, aumentou a mesma propriedade. Heineck (2002) também analisou um solo arenoso com inclusão de fibras e chegou à conclusão de que não houve alteração no  $G_0$  (módulo de cisalhamento inicial ou elástico). Heineck *et al.* (2005) também constataram que os módulos de deformação cisalhante de uma areia siltosa, areia fina uniforme e cinza de fundo sofreram poucas deformações e segundo os autores, não sofreram influência da introdução das fibras de polipropileno.

### **2.5.8 Condutividade Hidráulica**

Vários autores que utilizaram em suas pesquisas solo argiloso relataram um aumento da condutividade hidráulica devido à inclusão de fibras. É o caso de Maher e Ho (1994), que detectaram um aumento da permeabilidade, sendo que esse acréscimo se dava pela maior quantidade de fibras de polipropileno e vidro utilizadas. Al Wahab e El-Kedrah (1995), da mesma maneira, constataram um aumento da condutividade hidráulica para uma adição de 2% de fibra de polipropileno.

Feuerharmel (2000), também relatou elevados valores de condutividade hidráulica a partir da inserção de fibras e cimento a um solo argiloso, ocasionado pela floculação das partículas de argila que, antes de aderirem às fibras, se aglomeram em torno das partículas de cimento, ocasionando a segregação das fibras.

## **2.6 Estudos Experimentais**

Tendo em vista que a utilização de resíduos de PET (Politereftalato de Etileno) na melhoria e reforço de solos é uma técnica relativamente nova e que há poucas pesquisas sobre o assunto na literatura, o objetivo principal deste tópico é abordar as principais alternativas de materiais que podem funcionar de maneira similar ao PET quando incluídos junto ao solo, buscando dessa maneira, realizar uma correlação entre o comportamento do solo com esses resíduos alternativos e com os resíduos de PET.

Louzada (2015) lembra que as técnicas utilizadas para melhoramento do solo são amplamente desenvolvidas. Isso se deve às inúmeras pesquisas que têm sido realizadas com adições de diferentes materiais, tais como fibras naturais (coco, sisal),

fibras sintéticas (PET, polipropileno), poliestireno expandido (EPS), resíduos de borrachas, entre outros, utilizadas com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte do solo.

Nesta linha, Bolaños (2013) realizou um estudo sobre o comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com fibras de coco moídas em diferentes teores (0,5% e 1%) e com fibras de coco cortadas, com um comprimento aproximado de 2 cm, em diferentes teores (0,5%, 0,75%, 1,0%, 1,25%, e 1,5%) em relação ao peso seco do solo. O autor constatou que houve um maior aumento na resistência ao cisalhamento das misturas de solo-fibra para uma adição de 0,5% de fibras de coco moídas e de 1,5% de fibras de coco cortadas, além de um pequeno acréscimo no ângulo de atrito e um significativo aumento na coesão das misturas, quando comparadas aos resultados obtidos para o solo puro.

Singh e Arif (2014) realizaram um estudo experimental em uma areia siltosa, adicionando ao solo porcentagens variadas de cinza de carvão e fibra de coco. Nesta pesquisa, os autores realizaram ensaios de resistência à compressão simples não confinada (RCS), em inglês, *Unconfined Compressive Strength* (UCS) e de Índice de Suporte Califórnia (ISC), em inglês, *California Bearing Ratio* (CBR). A porcentagem de cinza de carvão adicionada ao solo foi de 20%, 30%, 40% e 50% em relação ao peso seco do solo. Percebeu-se, nesta avaliação, que houve um aumento significativo no valor do UCS e do CBR para a adição de 20% de cinza de carvão no solo. Com relação à fibra de coco, a mesma foi adicionada de forma aleatória na mistura ideal de solo-cinza de carvão (80% de solo e 20% de cinza de carvão), variando suas porcentagens entre 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,0%. Nos resultados, concluiu-se que a inclusão de 0,25% de fibra de coco em relação ao peso seco do solo na mistura ideal de solo-cinza de carvão, é a porcentagem ideal de adição de materiais para haver um aumento considerável no UCS e no CBR, que girou em torno de 30%. Essa proporção pode ser utilizada economicamente para que haja um aumento de resistência do solo e conseqüentemente, por exemplo, uma menor espessura em pavimentos.

Outra fibra natural que vem sendo amplamente utilizada em estudos envolvendo a estabilização de solos é a fibra de sisal. Segundo Mishra *et al.* (2004), o sisal é uma planta originária do México, é uma das fibras mais utilizadas no planeta e faz parte de quase metade da produção total de fibras têxteis.

Indo de encontro às pesquisas realizadas com sisal, Leocádio (2005) avaliou através de ensaios de laboratório, o efeito causado pela adição de fibras de sisal em um solo com características lateríticas, com intenção de estabelecer o comportamento mecânico das misturas. O autor realizou testes de Proctor Normal, de CBR e de cisalhamento direto. As fibras de sisal foram distribuídas aleatoriamente no solo, com teores de 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,0% em relação ao peso seco do solo e também em dois comprimentos diferentes, 10 mm e 25 mm. O autor pôde observar que a adição de fibras de sisal melhorou as propriedades mecânicas do solo laterítico com as adições de 0,75% e 1,0%, principalmente o pico de resistência e todos os níveis de tensão normal, quando comparado ao solo natural.

Manjunath *et al.* (2013) analisaram o efeito da adição de fibra de sisal e de cal sobre as características de compactação, CBR e UCS de um solo expansivo, localizado ao sul da Índia, também conhecido como solo negro de algodão. As fibras foram produzidas em pedaços de 10 mm de comprimento e misturadas aleatoriamente ao solo em porcentagens variadas de 0,25%, 0,5%, 0,75% e 1,0% em relação ao peso seco do solo. A porcentagem de cal adicionada ao solo foi de 3% em relação ao seu peso seco. Os autores concluíram que uma adição de 3% de cal e 0,75% de fibra de sisal pode ser considerada como as porcentagens ótimas para este tipo de solo residual, aumentando de maneira considerável o valor do CBR e UCS.

Além das inúmeras aplicações com fibras naturais, o uso de fibras sintéticas para reforço de solos tem sido aplicado em diversas pesquisas. Por exemplo, Casagrande *et al.* (2005a) analisaram o comportamento de um solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno com relação à compressão isotrópica. Neste estudo, as fibras foram distribuídas de forma aleatória, misturando-se um teor de 0,5% ao solo, com um comprimento de 24 mm e uma espessura de 0,023 mm. Após os ensaios, os autores observaram duas linhas de compressão normais paralelas no solo analisado. Após os testes, foi realizada a exumação das fibras e constatado que as mesmas foram estendidas e quebradas, indicando que as fibras tendem a sofrer grandes deformações plásticas antes de se romperem.

Cai *et al.* (2006) também investigaram os efeitos de fibras curtas de polipropileno no comportamento mecânico e na resistência de um solo argiloso cimentado e não-cimentado. No estudo, os autores prepararam amostras de solo com três porcentagens diferentes de fibras (0,05%, 0,15% e 0,25%) em relação ao peso

seco do solo e duas porcentagens de teor de cimento (5% e 8%) também relacionado ao peso seco do solo. Os ensaios de compressão não confinada e cisalhamento direto foram realizados após 7, 14 e 28 dias de cura. Os resultados dos experimentos indicaram que a inclusão das fibras de polipropileno no solo cimentado e não-cimentado causou um aumento na resistência à compressão não confinada, resistência ao cisalhamento e tensão axial de ruptura, diminuindo a rigidez e aumentando a ductilidade do solo cimentado.

Ainda, Consoli *et al.* (2002) e Montardo *et al.* (2000) realizaram um estudo cujo objetivo era investigar o efeito de fibras sintéticas de diferentes propriedades mecânicas quando adicionadas e distribuídas aleatoriamente em diferentes porcentagens de um solo arenoso cimentado e não-cimentado. As principais conclusões retiradas das pesquisas foram as seguintes: as fibras que possuíam características rígidas, tais como fibras de vidro e PET, produziram um aumento de resistência à compressão e de resistência à tração da matriz cimentada, ao passo que as fibras consideradas mais flexíveis, como as fibras de polipropileno, proporcionaram uma alteração de comportamento do material na ruptura, passando-o de material frágil a dúctil; observou-se também que a inclusão de qualquer tipo de fibra proporcionou um aumento na capacidade de absorção de energia de deformação, principalmente nos casos em que as fibras possuíam um comprimento maior; a rigidez inicial foi drasticamente reduzida com a inclusão das fibras de polipropileno, mas não foi afetada quando da inclusão das fibras de vidro e PET.

Após vários estudos concretizados, Morel e Gourc (1997) se propuseram a analisar as características de solos reforçados com fibras de polipropileno de estudos que foram realizados por Gray e Ohashi (1983), Gray e Al-Refeai (1986) e Maher e Gray (1990). Os autores puderam concluir que, de fato, as fibras aumentam a resistência e a ductilidade das misturas. Além disso, destacaram que o comportamento do compósito se dá pelo teor e pelas propriedades mecânicas e geométricas das fibras utilizadas. Ainda, qualquer alteração das propriedades mecânicas do solo conquistadas através da adição de fibras de polipropileno depende muito do grau de cimentação do solo, tamanho, granulometria das partículas, tensão de confinamento, etc.

Outro resíduo utilizado nos últimos anos como alternativa para reforço de solos é a borracha de pneus. Ghavazi (2004) estudou a implementação de diferentes

porcentagens de borracha com tamanho médio de 4,0 mm em um solo arenoso. O autor observou que embora não tenha havido um aumento significativo na resistência ao cisalhamento, houve um aumento da força axial necessária para que se chegasse ao pico de resistência das misturas, quando comparadas ao solo puro. Também se notou um aumento do ângulo de atrito em misturas que utilizaram 10% e 20% de borracha de pneu adicionada ao solo.

Ramírez (2012) e Ramírez *et al.* (2014) também realizaram testes com diferentes teores de borracha adicionados em solo argiloso e arenoso. Através do ensaio triaxial perceberam que o teor de borracha e o nível de pressão de confinamento possuem influência direta no comportamento mecânico das misturas. Concluíram ainda que as misturas de solo argiloso e borracha é mais efetiva para tensões de confinamento de até 200 kPa, e que o teor ótimo de borracha se encontra entre 10% e 20%. Já para as misturas com solo arenoso, as inclusões de borracha foram mais eficientes com tensões de confinamento entre 100 kPa e 200 kPa, com o teor ótimo de borracha variando entre 0% e 5%.

## **2.7 Estudos Experimentais com Resíduos de PET**

Modro *et al.* (2009) realizaram em seus estudos uma avaliação em um concreto de cimento Portland que continha resíduos de PET, em substituição aos agregados minerais. Foi observado pelos autores que em todos os traços de todas as idades houve uma diminuição da resistência mecânica à compressão com o aumento do volume de PET. Esta diminuição de resistência à compressão, segundo os próprios autores, se deve principalmente à menor interação química que há entre o polímero e a matriz de cimento, que se dá devido à menor resistência mecânica dos polímeros quando comparados aos agregados minerais. Diante dos resultados apresentados, concluiu-se que a substituição de agregados minerais por resíduos de PET pode ser utilizada apenas quando seu destino for obras ou artefatos de caráter não estrutural, tais como fechamentos internos de tijolos, coberturas de lajes pré-moldadas, etc.

Albano *et al.* (2009) avaliaram a influência que o teor e o tamanho de partículas de resíduos de PET causavam na substituição do agregado miúdo (areia) em concretos com diferentes relações de água/cimento. Os teores de resíduos de PET utilizados na substituição da areia foram de 10% e 20%, os tamanhos das partículas

de PET foram de 0,26 cm e 1,14 cm e os teores de água/cimento foram de 0,50 e 0,60. Os resultados mostraram que à medida que aumenta o volume e o tamanho das partículas de PET, tem-se uma diminuição da resistência à tração, compressão e módulo de elasticidade, porém tem-se uma maior absorção de água. Os autores concluíram que apesar da substituição da areia pelo resíduo de PET diminuir as propriedades mecânicas, o polímero pode ser utilizado na produção de concretos ecologicamente corretos, em bases e sub-bases de pavimentos rodoviários e em estruturas cuja a alta resistência não seja considerada um fator primordial. Outra aplicação, devido ao fato de ter havido um aumento de absorção de água, seria em concreto de quadras esportivas e de passeios, pois estas necessitam possuir características de boa drenagem de água.

Fibras de PET recicladas também foram utilizadas por Meneses (2011), onde as mesmas foram inseridas em um concreto de  $f_{ck} = 30$  MPa e relação água/cimento de 0,46 a fim de se verificar a resistência mecânica desta mistura sob influência de altas temperaturas. As fibras possuíam 15 mm de comprimento e 2 mm de largura. Os corpos de prova com as fibras de PET foram testados à 30°C (temperatura ambiente), 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 600°C e 900°C. Foi verificado que o concreto perde resistência mecânica de forma significativa sempre que exposto a temperaturas maiores que 300°C, porém o uso da fibra de PET pode retardar o colapso das estruturas, devido ao fato de haver uma formação de uma rede de canais que facilitam a fuga do vapor d'água, reduzindo, dessa maneira, a poro pressão no interior do elemento estrutural.

Com o intuito de buscar possíveis vantagens na utilização de agregados plásticos reciclados, Rodrigues *et al.* (2008) analisaram a viabilidade do emprego de flocos de PET na substituição da areia de sílica, que é uma matéria-prima não renovável na natureza. Após os ensaios, verificaram que os valores de resistência à compressão na substituição de areia de sílica por resíduos de PET podem ser considerados aceitáveis em aplicações de obras de engenharia. Assim, um material que outrora fora considerado lixo, pode agora ser utilizado como uma alternativa ecológica e econômica, diminuindo riscos à saúde e ao meio ambiente.

Arao (2016) estudou o comportamento de várias misturas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) adicionadas com garrafas de PET trituradas em diferentes tamanhos e teores. O autor utilizou material triturado de 2 mm

e 10 mm, nos teores de 0,5% e 1,0% adicionados ao CBUQ, substituindo também em 2,5% o pó de pedra por pó de PET, juntamente com adição de 0,5% de PET triturado no diâmetro de 10 mm. Concluiu-se do trabalho que a inserção de PET triturado às misturas de CBUQ foi satisfatória, havendo a dependência dos teores e das granulometrias das partículas de PET para os resultados. O aumento nos parâmetros de resistência e vida útil das misturas foi mais eficaz para o CBUQ de 0,5% de PET triturado em 10 mm e com a substituição de 2,5% do pó de pedra por pó de PET.

Soncim *et al.* (2004) estudou o comportamento de solos misturados com resíduos de garrafas PET no reforço de subleitos de pavimentos rodoviários. Os autores realizaram correção granulométrica, utilizando pó de PET, em solos não recomendados para utilização deste tipo de obra. Verificou-se que para acréscimos de 30% em peso de pó de PET o solo classificou-se como bom para a execução de subleitos rodoviários, segundo classificação do HRB (*Highway Research Board*), instituto que classifica os solos para utilização ou não em obras rodoviárias.

Silva *et al.* (2013) apresentou um estudo sobre a utilização de PET na composição de misturas asfálticas. Os ensaios foram realizados variando-se as porcentagens de pó de PET (2,5%, 5,0%, 7,5%, 10% e 12,5%) utilizados como agregado fino. Os autores observaram que todas as misturas com adições acima de 10% de pó de PET proporcionava misturas asfálticas com alto teor de vazios e baixa resistência mecânica. Foi concluído que o uso de PET como agregado miúdo em misturas asfálticas deve ser limitado a 5%, a fim de atender aos parâmetros volumétricos e mecânicos que são recomendados pelas normativas. Porém, com base nos resultados obtidos de módulo de resiliência, a utilização do PET em misturas asfálticas tende a tornar o revestimento menos suscetível a deformações permanentes, aumentando conseqüentemente a vida de fadiga do pavimento.

Consoli *et al.* (2000) efetuaram um estudo sobre o comportamento mecânico de um solo arenoso cimentado e reforçado com resíduos de PET, e avaliaram os efeitos da inclusão das fibras distribuídas de forma aleatória, formando um compósito solo-cimento-fibra. No estudo, foram avaliados os efeitos das diferentes porcentagens de fibras e cimento adicionadas ao solo, bem como as pressões confinantes nas misturas. Os autores concluíram que a inclusão de fibras de PET aumenta o pico e a resistência à tração da matriz cimentada e não-cimentada, diminui o caráter frágil da amostra e não altera a rigidez das misturas.

Curcio (2008) analisou os comportamentos mecânico e hidromecânico de uma areia argilosa reforçada com fibras de PET reciclado. O autor observou que as fibras reduziram a magnitude das fissuras de tração das amostras. Também constatou que, aparentemente, a resistência à tração inicial do compósito é controlada unicamente pela matriz de solo. A partir do momento em que há um aumento de deformação do material, tem-se um controle da matriz e da fibra. Com a adição de 1% de fibras de PET, houve um acréscimo de tensão de tração máxima do solo, redução e retardamento de abertura de fissuras sem que tivesse havido alteração nas propriedades de compactação e sem influenciar de forma negativa na condutividade hidráulica, quando da utilização do solo sob tensões confinantes.

Louzada (2015) avaliou o comportamento mecânico de três solos diferentes que foram reforçados com resíduos de PET, em pó e em flocos. O autor realizou ensaios triaxiais não drenados, com diferentes tensões confinantes (50 kPa, 150 kPa e 300 kPa) para o solo argiloso e para a areia. Ao solo argiloso foram moldadas, além das misturas de referência (sem adição de resíduo de PET), misturas com 10%, 20% e 30% de pó de PET e 3,0% e 5% de PET triturado, ambas por peso de solo seco. Já para a areia, foram moldadas misturas com 10% e 20% de pó de PET, apenas. Já para a bentonita, o autor realizou ensaios de cisalhamento direto com uma tensão vertical aplicada de 50 kPa e 100 kPa, com adição de 30% de pó de PET e de 3% e 5% de PET triturado, também em relação ao peso de solo seco. Os resultados mostraram que o teor de PET e o nível de confinamento possuem influência direta no comportamento final das misturas. Para as misturas com solo argiloso, as misturas contendo 30% de pó de PET e 5% de PET triturado apresentaram os melhores resultados, principalmente com relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Nas misturas com areia, observou-se uma maior eficiência com a inclusão de 10% de pó de PET submetidas a baixas tensões confinantes. E para as misturas com bentonita, houve uma melhor eficácia quando da utilização de 5% de PET triturado.

Babu e Chouksey (2010) utilizaram resíduos de PET como material de reforço na ordem de 0,5%, 0,75% e 1% em relação ao peso de um solo argiloso. A mistura de solo contendo 1% de resíduo de PET apresentou notórios resultado em ensaios de CBR e compressão simples. O autor realizou simulações em espessuras de pavimentos, e verificou que essa mesma adição (1% de resíduo plástico) permitiu que

a espessura do pavimento pudesse ser reduzida de 400 mm para 250 mm, resultando em uma relevante economia global nos custos dos materiais.

Choudhary *et al.* (2010) analisaram os efeitos que adições de pequenas tiras de PET (0,25% a 4% em relação ao peso do solo) causavam em um solo arenoso. Os autores constataram que houve um significativo aumento no módulo de secante e CBR para os materiais que continham adições de 2% e 4% de tiras de PET, podendo o solo reforçado ser utilizado em aterros de baixo custo, construção de estradas, entre outros.

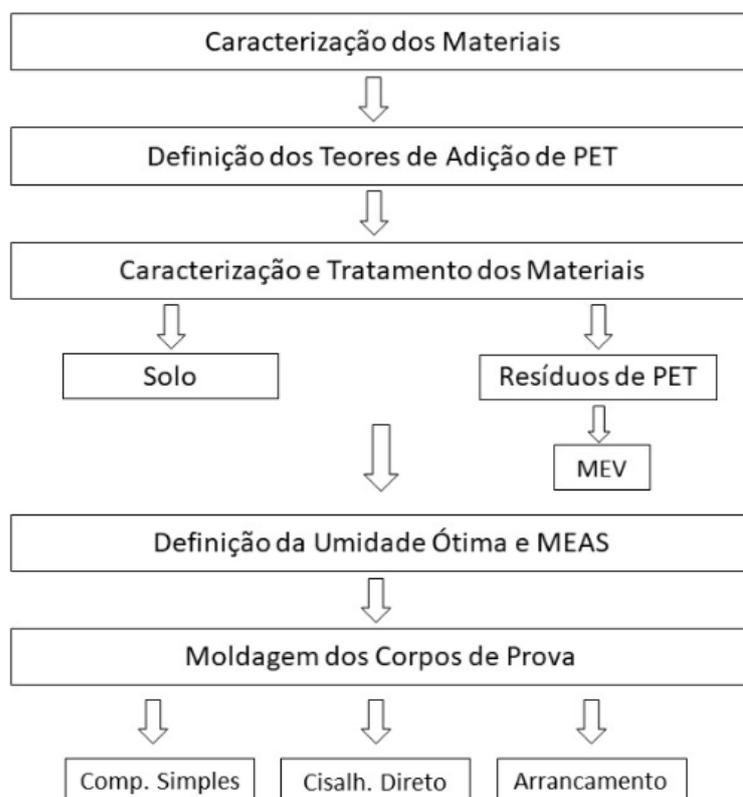
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O programa experimental estabelecido na pesquisa tem como principal objetivo analisar o efeito da adição de diferentes proporções de resíduos de PET nas propriedades mecânicas de um solo argiloso laterítico. Para isso, foram realizadas misturas de solo puro, e com adição de diferentes teores de pó de PET, flocos de PET não tratados e previamente tratados quimicamente com NaOH. Para obtenção dos índices físicos do solo puro e das misturas envolvidos na pesquisa, foram realizados testes de caracterização física, a fim de destacar os parâmetros que possam ser correlacionados com o desempenho mecânico dos materiais utilizados.

Neste capítulo estão descritas todas as etapas propostas do programa experimental, assim como os materiais utilizados, métodos de testes, normatização de ensaios e equipamentos envolvidos.

Os procedimentos adotados e ensaios realizados estão apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma dos procedimentos adotados na pesquisa



Fonte: Elaboração Própria

### 3.1 Materiais Utilizados

Para esta pesquisa foram utilizados três materiais principais: Solo (S), flocos de PET (F) e pó de PET (P). Foram utilizados diferentes teores de adição de flocos de PET e de pó de PET junto ao solo.

#### 3.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa provém do município de Cândido Godói, situado na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul. A coleta do solo foi realizada em uma jazida localizada próxima à BR 307 km 28, de acordo com a Figura 9.

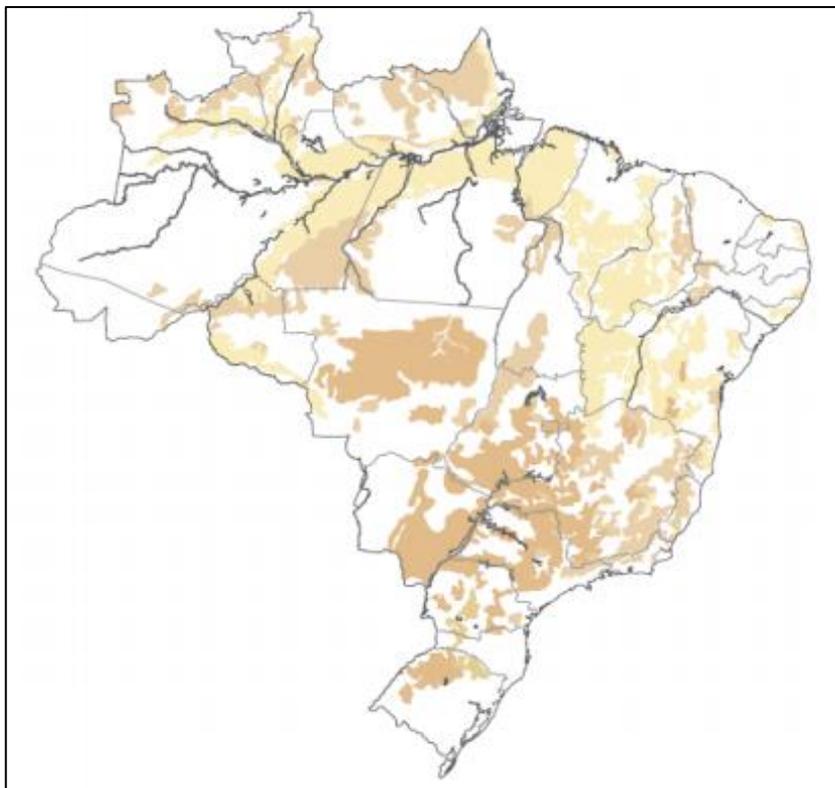
Figura 9 - Localização da jazida do solo utilizado na pesquisa



Fonte: Google Maps (2018)

De acordo com Camargo *et al.* (1987), solos com coloração avermelhada e textura argilosa se enquadram no grupo Latossolo Roxo, e são classificados como argilosos lateríticos. A escolha do solo se deve ao fato de o mesmo estar presente em cerca de 20% do estado do Rio Grande do Sul, de acordo com dados do IBGE (2007), abrangendo uma área de aproximadamente 20.000 km<sup>2</sup>, além de compreender cerca de um terço da parcela dos solos do restante do país, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Mapa da distribuição dos Latossolos no Brasil



Fonte: IBGE (2007)

Este tipo de solo, de acordo com Carvalho (1981), teve origem após o derramamento de basalto, que corresponde a um magma homogêneo e resulta em pequenas mudanças de solos gerados pelo intemperismo. Essas mudanças decorrem devido ao clima em que os solos estão expostos. A Figura 11 apresenta a jazida de solo utilizado na pesquisa.

Figura 11 - Jazida de captação do solo utilizado na pesquisa

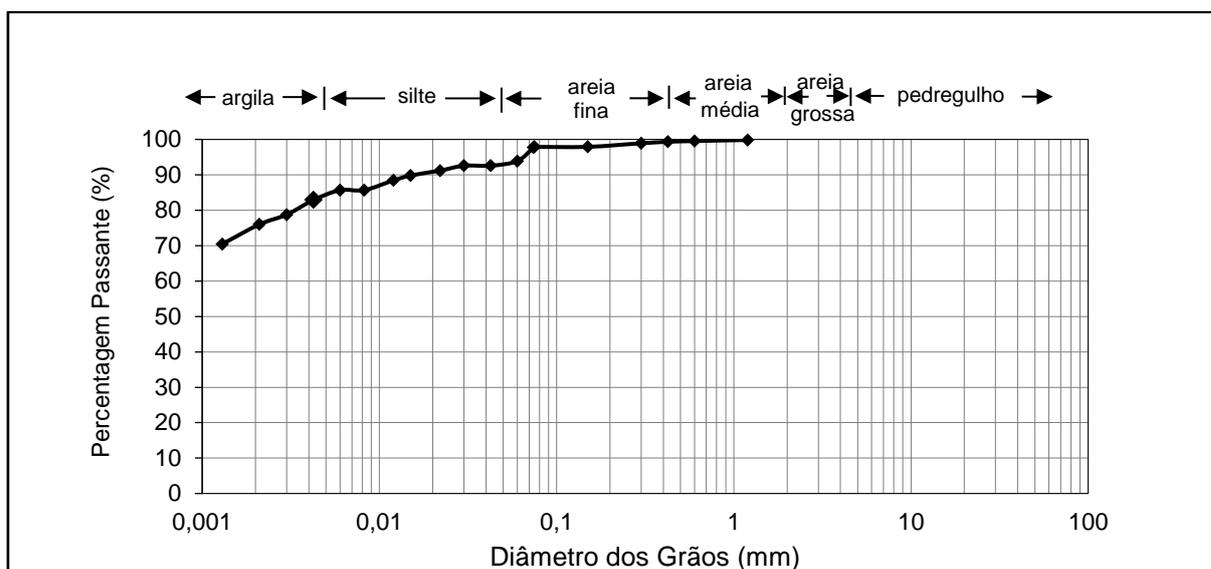


Fonte: Elaboração Própria

Obedecendo as especificações da ABNT NBR 9604 (2016), fez-se a coleta do solo com auxílio de pá e enxada. Antes da escavação, foi realizada a limpeza superficial do terreno, com o intuito de retirar a vegetação presente. Após, o material foi armazenado em bolsas de transporte, conduzido ao laboratório e destorroado para sua utilização em ensaios laboratoriais.

O solo também foi classificado de acordo com a sua granulometria, através de ensaios de granulometria por peneiramento e granulometria por sedimentação, conforme procedimentos descritos na ABNT NBR 7181 (2017). A Figura 12 apresenta a curva granulométrica do solo.

Figura 12 - Curva granulométrica do solo



Fonte: Elaboração própria

Com a análise da Figura 12, é possível observar que o solo possui uma composição fina, apresentando aproximadamente 98% passante na peneira #200 (0,075 mm). O teor de argila presente no solo foi de 86%, sendo que o restante da composição é de silte, em torno de 10%, areia fina, 3,5% e areia média, cerca de 0,5%.

De acordo com ABNT NBR 6459 (2017), realizou-se a determinação dos Limites de Atterberg do solo:

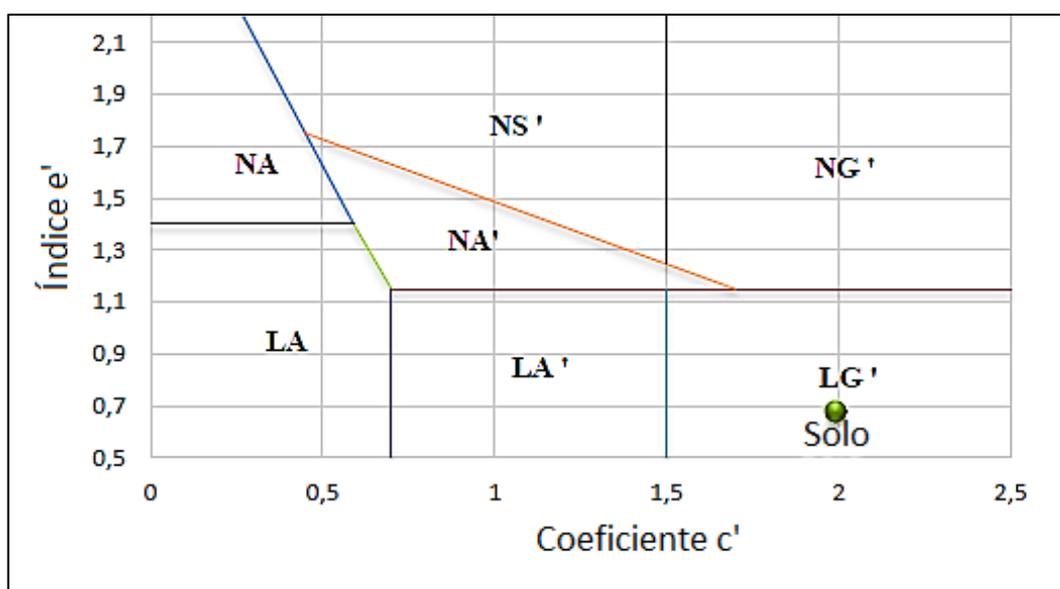
- O Limite de Liquidez (LL), correspondente a 25 golpes, foi de 61%;
- O Limite de Plasticidade (LP) foi de 42%;
- Através dos resultados obtidos pelos ensaios de LL e LP, é possível determinar o Índice de Plasticidade (IP) do solo, que resulta da diferença do LL e do LP. Dessa maneira, o IP calculado foi de 19%;
- Com o resultado do IP, permitiu-se calcular o Índice de Atividade (IA), que determina a condição de atividade da argila e é obtido através da divisão do valor de IP pela porcentagem de argila contida no solo. Dessa forma, obteve-se um valor de IA de 0,25, que caracteriza este tipo de argila como inativa.

Conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), que classifica o solo utilizando dados de classificação granulométrica, o solo pode ser

classificado como um silte de Alta Compressibilidade (MH), que corresponde ao grupo A 7-5 da Classificação Rodoviária TRB (*Transportation Research Board*).

Através da metodologia de classificação Miniatura Compactado Tropical (MCT), permitiu-se classificar o solo através dos coeficientes  $c'$  e  $e'$ , como mostra a Figura 13. O coeficiente  $c'$ , denominado de coeficiente de deformabilidade, pode ser correlacionado com a granulometria do material, mostrando se o solo tende a ser mais argiloso ou arenoso. O índice  $e'$  foi concebido para indicar o comportamento laterítico ou não laterítico do solo. O solo deste trabalho foi classificado como argiloso laterítico conforme a metodologia MCT.

Figura 13 - Classificação do solo pela metodologia MCT



Fonte: Elaboração própria

### 3.1.2 Politereftalato de Etileno (PET)

#### 3.1.2.1 Pó de PET

O pó de PET utilizado nesta pesquisa é proveniente da empresa PETCEU, da cidade de Céu Azul – PR. O produto é resultado de um método específico de esmagamento, utilizado pela maioria das empresas de reciclagem, realizado normalmente em seis etapas. Melo (2004) faz uma breve descrição das etapas relacionadas à produção do pó de PET:

- O primeiro passo consiste em reunir as garrafas PET e realizar a retirada dos rótulos e tampas das mesmas. Após, as garrafas passam por um processo de lavagem com água;
- O passo seguinte é efetuar a moagem das garrafas através de um processo de esmagamento em um moinho, resultando nos flocos de PET;
- O terceiro passo consiste no processo de aglomeração, onde devido à sua baixa densidade, os flocos recebem um tratamento térmico com o objetivo de diminuir seu volume e conseqüentemente aumentar a sua densidade, tornando o material mais adequado para o processo de rotomoldagem;
- A próxima etapa é a da rotomoldagem, onde o material é preparado para o estágio da moagem final;
- O quinto passo consiste no processo de moagem, onde o material é finalizado em forma de pequenas pastilhas;
- O sexto e último passo consiste na micronização, que é processo responsável por reduzir o material em um pó, com tamanho de partícula médio de 0,42 mm.

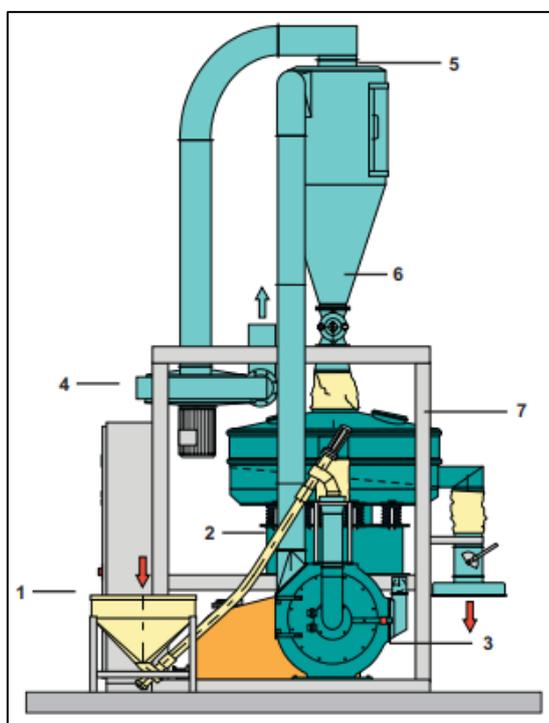
Como exemplo do processo micronização, a empresa alemã Pallmann fornece a máquina PKM para várias indústrias de reciclagem no Brasil. A Figura 14 apresenta o pó de PET e o método de operação da Pallmann PKM, ilustrado na Figura 15, consiste: em um recipiente de armazenamento (1), unidade de dosagem (2), alimentação do material ao moinho (3), pulverização do material e transporte para fora do moinho por meio de um ventilador (4) e posterior transporte por meio de um separador de ciclone (5) com auxílio de uma câmara rotativa a jusante (6) para uma unidade de peneiramento especial (7). Caso haja um material grosso preso à tela, o mesmo é reintroduzido no moinho para uma nova redução de tamanho.

Figura 14 - Pó de PET utilizado na pesquisa



Fonte: Elaboração Própria

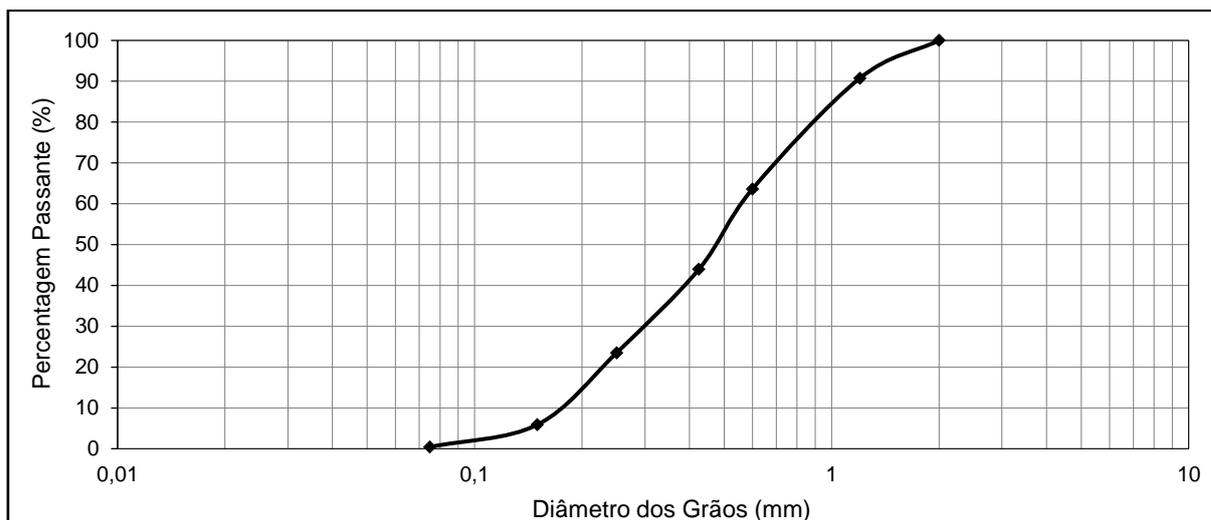
Figura 15 - Layout da Palmann PKM



Fonte: Pallmann (2018)

Foi realizada a granulometria do pó de PET, através do ensaio de peneiramento, conforme estabelecido na norma ABNT NBR 7181 (2017). A Figura 16 apresenta a curva granulométrica do material.

Figura 16 - Curva granulométrica do pó de PET



Fonte: Elaboração própria

### 3.1.2.2 Flocos de PET

Os flocos de PET utilizados nesta pesquisa são provenientes da empresa PETCEU, da cidade de Céu Azul – PR. Os flocos são obtidos através de um processo de moagem dividido em algumas etapas, de acordo com a empresa fornecedora do material, e estão expostos na Figura 17. Inicialmente as garrafas PET passam por um processo de limpeza, retirando-se as partes superior, inferior e rótulos das embalagens. Após, o material é encaminhado para esmagamento em um moinho de lâminas afiadas e de alta velocidade da Radial LaFrance, modelo SG-500F, como mostra a Figura 18.

Figura 17 - Flocos de PET utilizados na pesquisa



Fonte: Elaboração Própria

Figura 18 - Moinho Radial LaFrance



Fonte: Mecalux (2018)

No moinho, as garrafas PET são introduzidas na parte superior da máquina, as lâminas efetuam o corte do material até o mesmo passar pela peneira desejável, coletando em seguida o material triturado em uma caixa. Os flocos de PET utilizados na pesquisa possuem uma granulometria média de 10 mm.

### 3.1.2.3 Flocos de PET Tratados Quimicamente

Com a finalidade de se observar o comportamento e eventuais mudanças na morfologia do PET, bem como verificar se há um aumento da aderência do solo com PET tratado quimicamente, algumas amostras de flocos de PET foram submetidas a um tratamento químico com hidróxido de sódio (NaOH). A Tabela 2 apresenta as condições de tratamento as quais as amostras foram submetidas.

Tabela 2 - Condições de tratamento químico das amostras

Agente do tratamento	Concentração em massa (%)	Tempo de banho (min)	Temperatura do banho (°C)	Temperatura de secagem (°C)	Tempo de secagem (h)
NaOH	2	30	50	25°C	24
		60			
		120			
	4	30	50	25°C	24
		60			
		120			
	8	30	50	25°C	24
		60			
		120			

Fonte: Elaboração Própria

Na realização do tratamento químico utilizou-se um béquer de 1000 ml, uma chapa de aquecimento e agitação da marca DiagTech, modelo DT3120H, uma barra agitadora de 7x30 mm e um termômetro. Após serem submetidas ao banho, as amostras foram enxaguadas em água com pH de aproximadamente 7. A Figura 19 apresenta os procedimentos realizados durante o tratamento.

Figura 19 - Procedimentos do tratamento químico



Fonte: Elaboração Própria

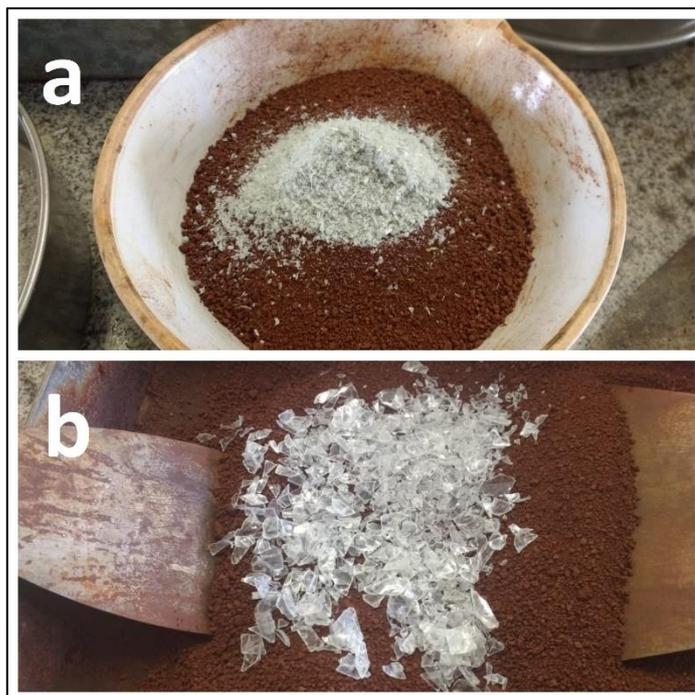
De início, realizou-se a pesagem de uma quantidade em torno de 5 g de flocos de PET para ser adicionado à concentração química (1). Em seguida, dissolveu-se uma determinada concentração de NaOH em água, para ser adicionado aos 500 ml de água junto ao béquer (2). Na sequência, ligou-se a chapa de aquecimento e com auxílio de um termômetro fixou-se a temperatura da concentração em 50°C durante o banho (3, 4 e 5). Após o término do ensaio, as amostras foram lavadas em água deionizada (6), submetidas à secagem em temperatura ambiente durante 24 horas e armazenadas em embalagens plásticas devidamente lacradas.

### 3.1.3 Misturas Solo-PET

Para o solo estudado, foram preparadas misturas com diferentes teores de pó de PET e flocos de PET, como mostra a Figura 20, com a finalidade de determinar o nível ótimo de inserção destes materiais. As misturas do solo argiloso foram preparadas com 3% e 5% de pó de PET e 3% e 5% de flocos de PET. As inserções

de resíduos de PET foram relativas ao peso seco do solo puro em massa. A escolha das proporções de adições foi baseada em pesquisas anteriores que também utilizaram resíduos para melhoria do solo, tais como Louzada (2015), Babu e Chouksey (2010) e Choudhary *et al.* (2010).

Figura 20 - Misturas de solo com pó de PET (a) e flocos de PET (b)



Fonte: Elaboração Própria

A água foi adicionada ao solo de acordo com os resultados de umidade ótima obtidos no ensaio de compactação mini-proctor de cada mistura. O processo de mistura do solo e dos resíduos foi realizado manualmente com auxílio de espátulas. A Tabela 3 apresenta os tipos de misturas que foram realizados bem como as abreviações de cada uma.

Tabela 3 - Tipos de misturas e abreviações utilizadas na pesquisa

Material/Mistura	Solo (%)	Pó de PET (%)	Flocos de PET (%)	Flocos de PET Tratados (%)	Abreviação
Solo	100	0	0	0	<b>S</b>
Mistura 1	97	3	-	-	<b>SP3</b>
Mistura 2	95	5	-	-	<b>SP5</b>
Mistura 3	97	-	3	-	<b>SF3</b>
Mistura 4	95	-	5	-	<b>SF5</b>
Mistura 5	97	-	-	3	<b>SFT3</b>
Mistura 6	95	-	-	5	<b>SFT5</b>

Fonte: Elaboração Própria

### 3.2 Métodos e Procedimentos de Ensaio

A seguir, serão descritos os procedimentos experimentais adotados no decorrer da pesquisa, bem como alguns resultados de caracterização dos materiais.

#### 3.2.1 Ensaio de Compactação

Com o intuito de determinar a umidade ótima de cada mistura, realizou-se o ensaio de compactação Mini-Proctor proposto por Nogami no ano de 1972. O ensaio obedece ao mesmo procedimento geral do Proctor tradicional, que dita a compactação de solos em laboratório e fornece a curva de compactação que corresponde a uma determinada energia aplicada por meio de soquete. A curva permite determinar a Umidade Ótima ( $w_{ot}$ ) e a Massa Específica Aparente Seca Máxima ( $\rho_{dmáx}$ ) para determinada energia de compactação.

O ensaio Mini-Proctor difere do Proctor Tradicional pelo tipo e peso de soquete, pelo diâmetro interno do molde de compactação (50 mm), pelo volume de solo compactado e por utilizar somente os solos que passam integralmente na peneira de 2,00 mm (#10) e aqueles que possuem uma porcentagem muito baixa de fração retida (<10%). De acordo com Nogami e Villibor (2009), as principais vantagens que o procedimento Mini-Proctor apresenta são as seguintes:

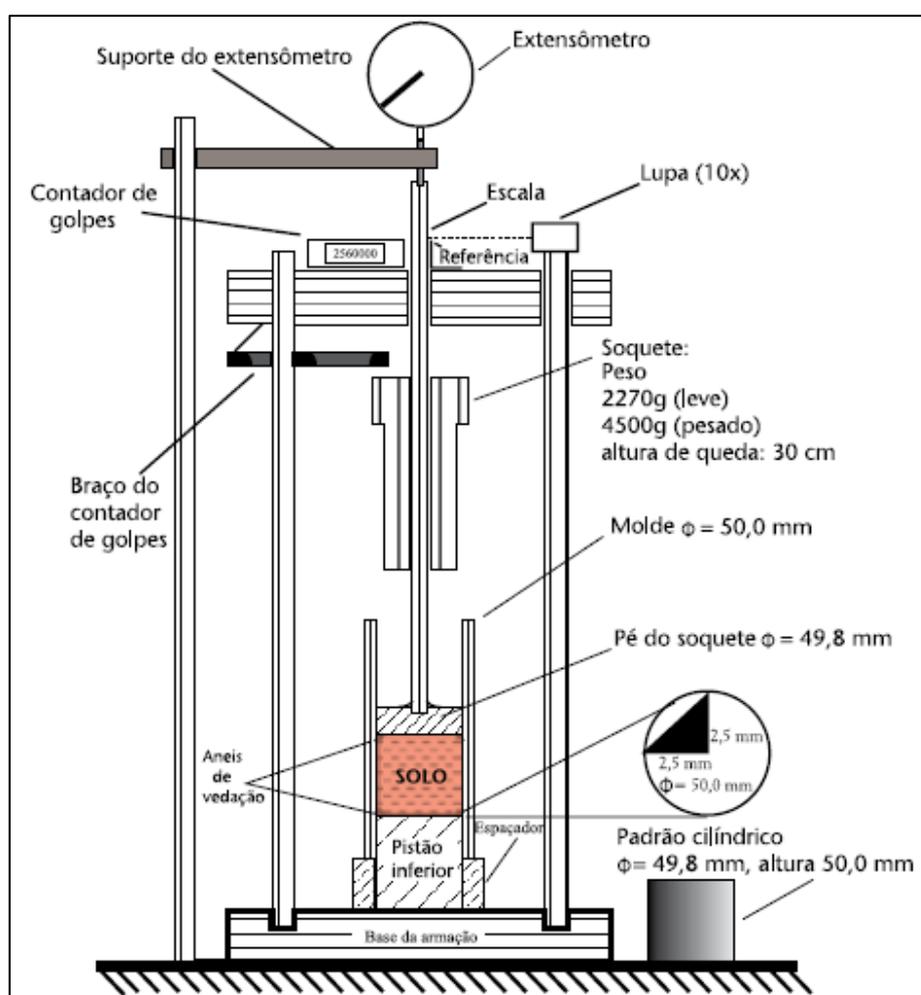
- Drástica diminuição da quantidade de amostra utilizada e de esforço na aplicação dos golpes;
- Possibilidade de medição exata da altura do corpo de prova após a aplicação dos golpes com o soquete;

- Melhoria da uniformidade dos corpos de prova compactados.

É importante destacar que no ensaio há uma limitação para solos que possuam uma elevada porcentagem de fração retida na peneira de 2,00 mm, bem como para areias e solos micáceos, que se assimilam aos resultados encontrados no Proctor Tradicional.

A Figura 21 apresenta o esquema do aparato utilizado na compactação Mini-Proctor, que foi realizado no Laboratório de Solos e de Pavimentos da UNIPAMPA.

Figura 21 - Aparelhagem do compactador miniatura



Fonte: Nogami e Villibor (2009, p.251)

### 3.2.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Foram moldados corpos de prova (CPs) com dimensões fixadas em 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os CPs foram embalados em plástico filme e envoltos com parafina, a fim de evitar a perda de umidade para o ambiente, conforme mostrado na Figura 22. As misturas foram moldadas de forma estática, em um sistema de duplo êmbolo, com auxílio de um macaco hidráulico e de acordo com a umidade ótima e a massa específica aparente seca (MEAS) de cada dosagem determinados pelo procedimento de compactação Mini-Proctor. Permaneceram em cura com temperatura controlada até a execução do ensaio de Compressão Simples. Para cada tipo de mistura foram moldados 3 corpos de prova.

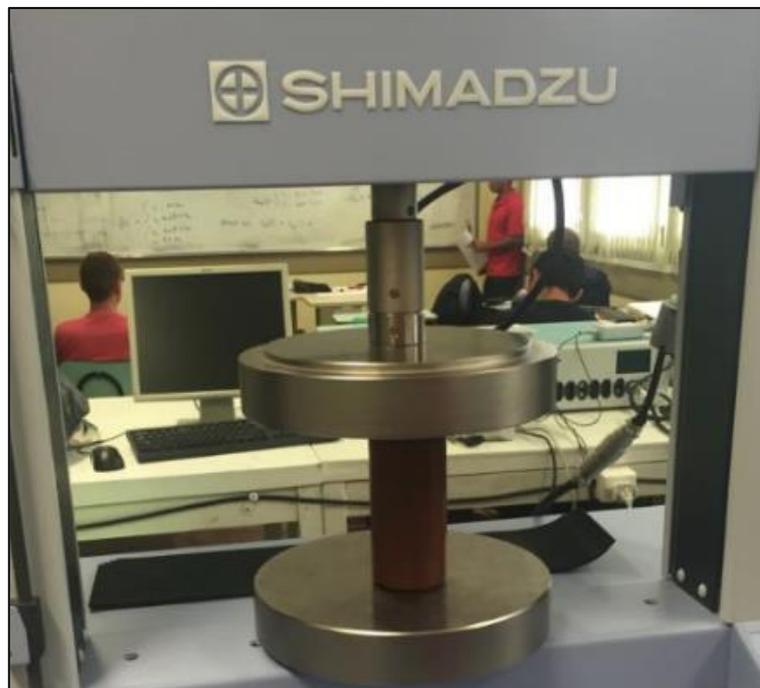
Figura 22 - Corpos de prova embalados em plástico filme e parafina



Fonte: Elaboração Própria

O Ensaio de Compressão Simples foi executado conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 12025 (2012), como ilustrado na Figura 23. O ensaio foi realizado na máquina de ensaios mecânicos da marca Shimadzu AGS-X 5 kN e o carregamento foi aplicado a uma velocidade de deformação de 1mm/min, havendo o registro da carga máxima suportada pelo corpo de prova.

Figura 23 - Equipamento utilizado no Ensaio de Compressão Simples



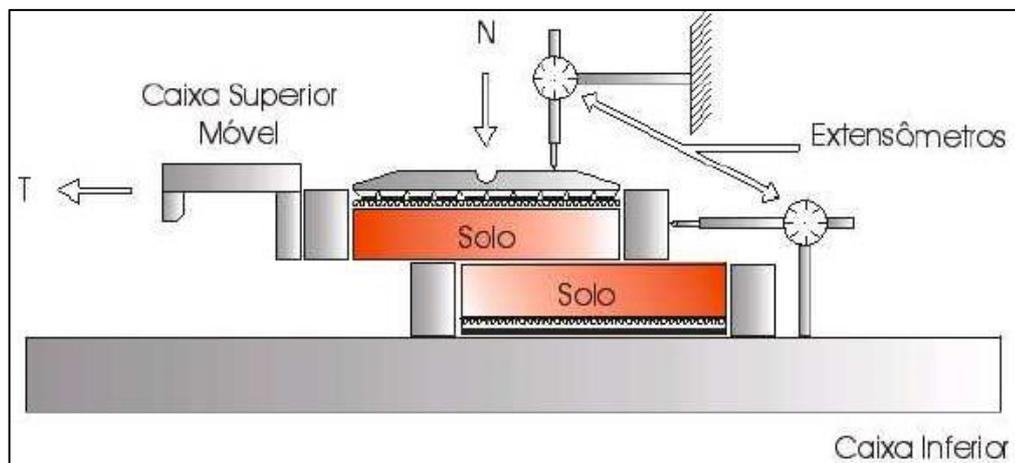
Fonte: Elaboração Própria

### 3.2.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado nas misturas com o intuito de determinar a resistência ao cisalhamento do solo, seguindo os métodos prescritos na norma ASTM D 3080/2004. A resistência é obtida através dos parâmetros de intercepto coesivo ( $c$ ) e do ângulo de atrito ( $\phi$ ).

Na realização do ensaio, a amostra é acondicionada dentro de uma caixa metálica de cisalhamento. A caixa é dividida horizontalmente em duas partes e uma força normal é aplicada no topo da amostra na caixa de cisalhamento. Há também uma força de cisalhamento aplicada na lateral da caixa, movendo horizontalmente uma metade da caixa em relação à outra, a fim de causar uma falha, como mostra a Figura 24. As caixas superior e inferior são separadas em 1,0 mm antes de iniciar o ensaio de cisalhamento, com o objetivo de haver o deslocamento entre elas.

Figura 24 - Esquema da caixa Bipartida



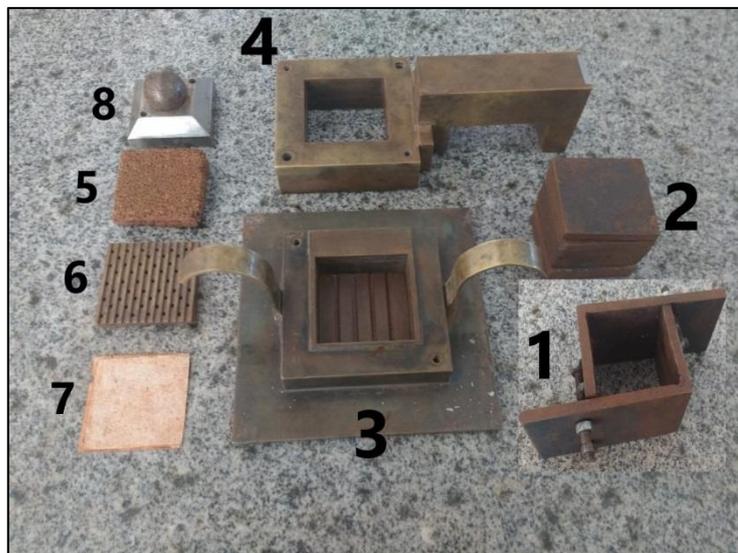
Fonte: Santos (2005)

O ensaio de cisalhamento direto consiste em determinar, em uma caixa composta por duas partes deslocáveis entre si, a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) que é capaz de provocar uma ruptura na amostra de solo submetida a uma tensão normal ( $\sigma$ ). Para se obter a tensão normal e a tensão cisalhante, há a necessidade de conhecimento das forças T e N, e com isso, realiza-se a divisão das forças pela área da seção transversal do corpo de prova.

Os corpos de prova moldados para utilização no ensaio de cisalhamento direto das misturas de solo puro e solo+pó de PET possuem dimensões de 5 x 5 x 2 cm (lado x lado x altura). As amostras de solo+flocos de PET possuem dimensões de 10x10x2 (lado x lado x altura). A moldagem dos corpos de prova foi realizada com auxílio de um macaco hidráulico através de compactação estática e com um molde com as dimensões desejadas desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia Mecânica do Campus Alegrete.

A Figura 25 exemplifica todo o processo: após a moldagem realizado com o auxílio do molde (1) e de chapas de aço (2), a amostra é encaixada na caixa bipartida (3) e (4). A ordem de colocação das peças na caixa bipartida se dá pela colocação de uma das pedras porosas (5), seguida do papel filtro (7), chapa furada com os frisos no sentido de deslocamento do carro (6), corpo de prova, e novamente na mesma sequência a chapa furada, filtro, pedra porosa e por fim a esfera sobre o aparato (8).

Figura 25 - Peças do aparato utilizado no ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Elaboração Própria

A Figura 26 apresenta o equipamento que foi utilizado no ensaio, bem como a aplicação de uma carga no sentido vertical, realizada por uma alavanca, onde são postos os pesos e os LVDTs que são responsáveis pela marcação dos deslocamentos verticais e horizontais da amostra. Baseado em estudos anteriores, tais como Louzada (2015) e Santos (2005), a velocidade de ensaio adotada foi de 0,2 mm/min.

Figura 26 - Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Elaboração Própria

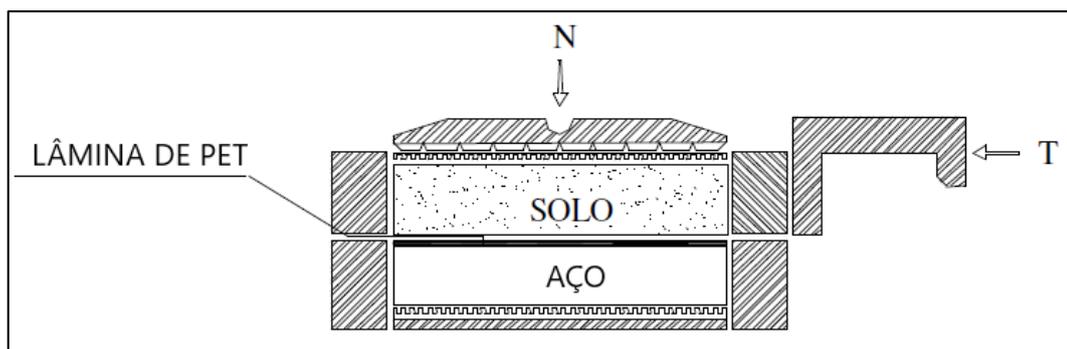
O ensaio foi realizado para 5 carregamentos diferentes (25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa), para que houvesse uma maior confiabilidade na obtenção da envoltória das misturas ensaiadas. Com os resultados, foi possível realizar o cálculo dos parâmetros de ângulo de atrito e coesão.

#### **3.2.4 Resistência entre as Interfaces Solo-PET Utilizando o Equipamento de Cisalhamento Direto**

Além do ensaio de cisalhamento direto utilizando misturas de solo e resíduos de PET, foi realizado um ensaio onde se buscou o cálculo da resistência entre as interfaces solo-PET. Santos (2005) lembra que, quando confinado, o solo apresenta alta resistência à compressão e o PET uma elevada resistência à tração. O autor salienta que a interação solo-PET não depende apenas do tipo e das características do material sintético utilizado, mas também das propriedades e características do solo, bem como dos níveis de tensão envolvidos. Assim, a determinação dessa interação se dá através da determinação do coeficiente de atrito e da interação solo-PET.

Para a realização do ensaio, foi necessário suprimir a conformação plástica característica das garrafas de PET. Assim, as lâminas de PET foram cortadas e dobradas durante alguns minutos no sentido contrário à sua conformação. Dessa maneira, eliminou-se a curvatura da amostra para que fosse possível colá-la sobre a peça de aço. O procedimento do ensaio é apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Interface solo-PET



Fonte: Adaptado de Santos (2005)

As lâminas de PET utilizadas no ensaio foram cortadas com dimensões de 5 x 5 cm, e fixadas no bloco de aço com auxílio de uma cola epóxi da marca Poxipol.

As amostras de solo puro utilizadas no ensaio foram moldadas nos mesmos procedimentos do ensaio de cisalhamento direto. Utilizou-se também os mesmos carregamentos no decorrer do experimento.

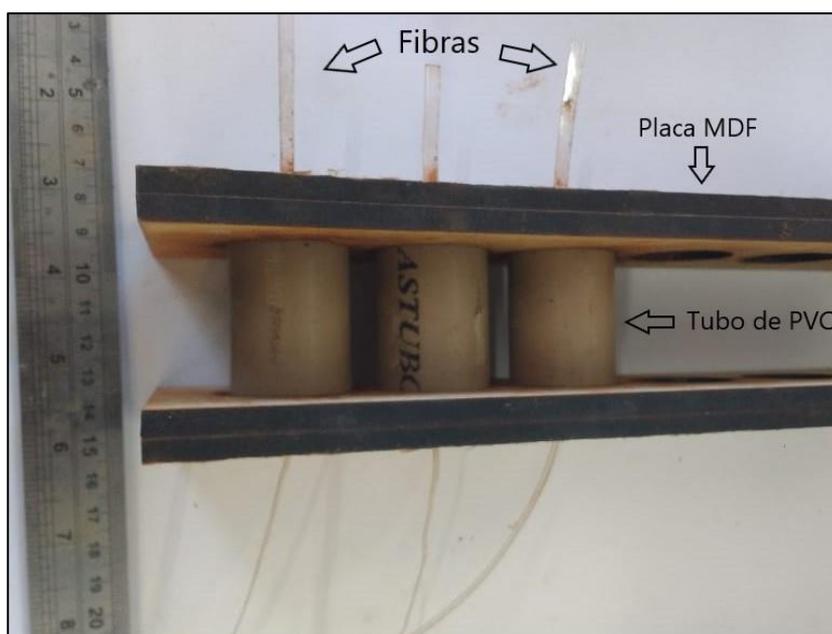
### 3.2.5 Ensaio de Arrancamento

O ensaio de arrancamento foi realizado com o intuito de se obter uma estimativa da interação do material de reforço com o solo ao qual o mesmo está aplicado, buscando uma quantificação da interação entre os dois materiais. Dessa maneira, almeja-se mensurar a resistência da interface fibra-solo, através da quantificação que é resultante da força necessária para deslocar no sentido da força a fibra que está embebida no solo.

Os corpos de prova para o ensaio de arrancamento foram moldados em tubos de PVC, com diâmetro de 32 mm e altura de 5 cm, encaixados sobre placas de MDF. As placas continham um furo central, para que fosse possível realizar a passagem das fibras de PET. As fibras foram cortadas com dimensões de 4,0 mm de largura,

possuindo 0,25 mm de espessura. Os tubos de PVC foram encaixados na placa inferior e as fibras centralizadas dentro do molde, com um comprimento de inclusão de 50 mm. Após, preencheu-se o tubo com solo puro, realizando a compactação do mesmo dentro do molde. Em seguida, encaixou-se outra placa de MDF na parte superior do tubo, tal e qual a placa da parte inferior, como mostra a Figura 28.

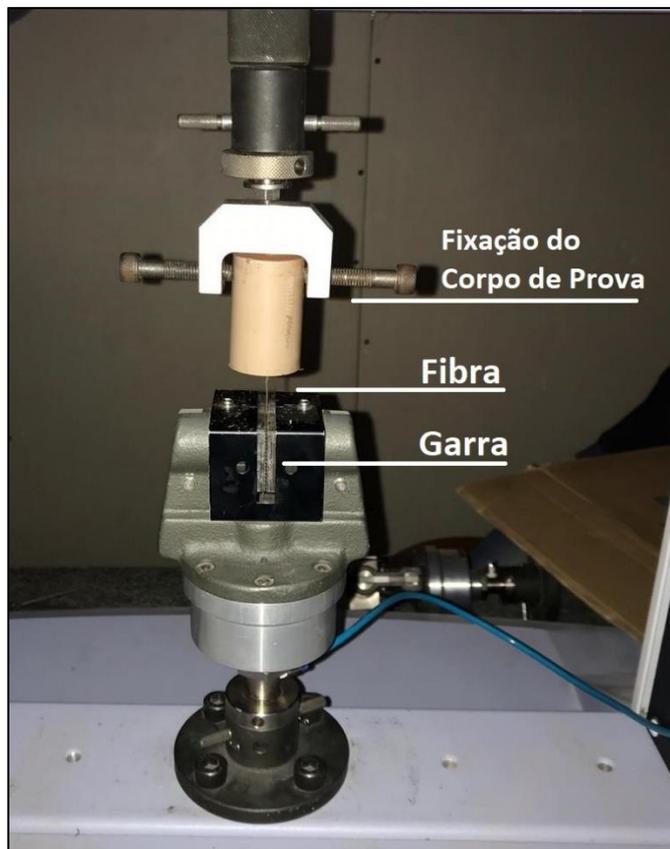
Figura 28 - Corpos de prova para o ensaio de arrancamento



Fonte: Elaboração Própria

Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de arrancamento, utilizando a máquina de ensaios mecânicos da marca Shimadzu AGS-X 5 kN, como mostra a Figura 29, a uma velocidade de deformação de 0,1 mm/min.

Figura 29 - Configuração do ensaio de arrancamento

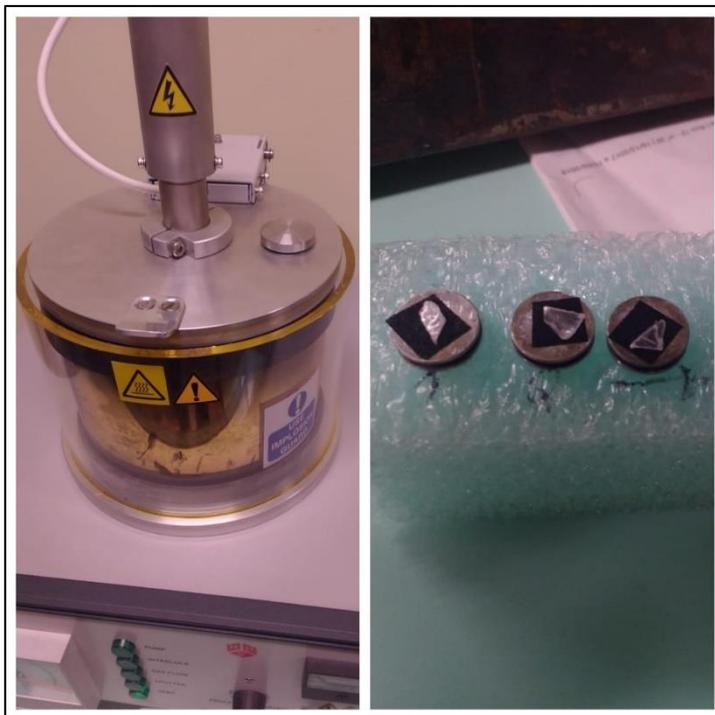


Fonte: Elaboração Própria

### 3.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O MEV foi utilizado com a finalidade de verificar as modificações superficiais causadas pelo tratamento químico com NaOH realizado nos flocos de PET. O equipamento utilizado é o modelo EVO MA10, da marca ZEISS, que realiza a leitura das amostras através da emissão de elétrons. Antes de serem analisadas, todas as amostras necessitam passar por um processo de metalização com ouro, realizado em uma metalizadora da marca SCANCOAT SIX. A Figura 30 apresenta o equipamento de metalização juntamente com as amostras levadas ao MEV para análise.

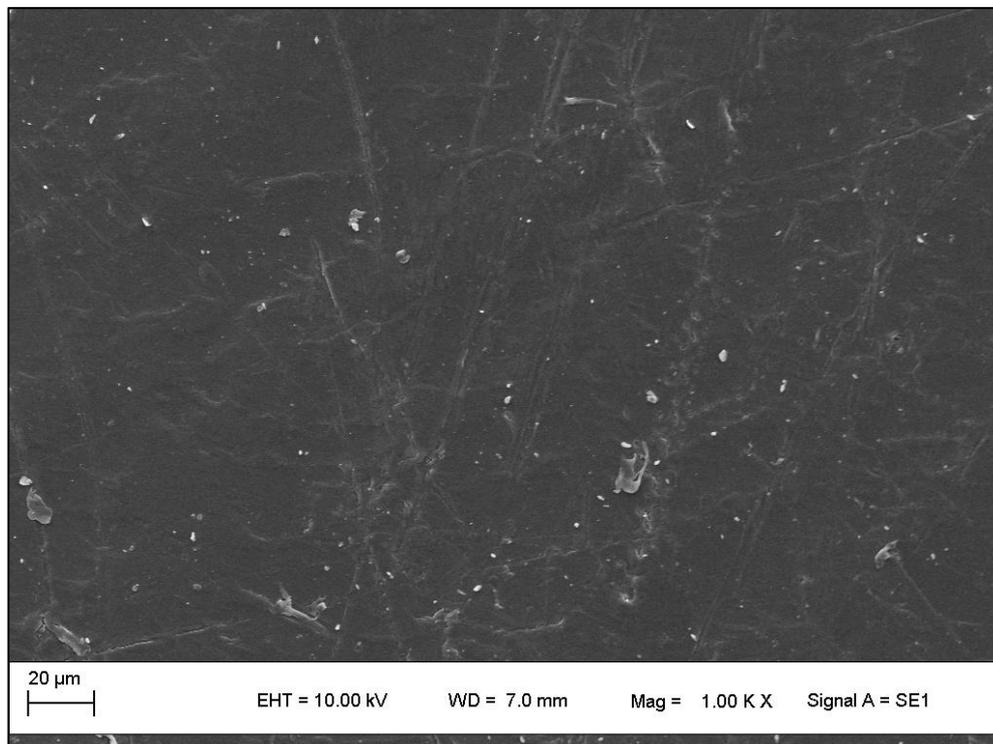
Figura 30 - Equipamento de metalização e amostras de flocos de PET



Fonte: Elaboração Própria

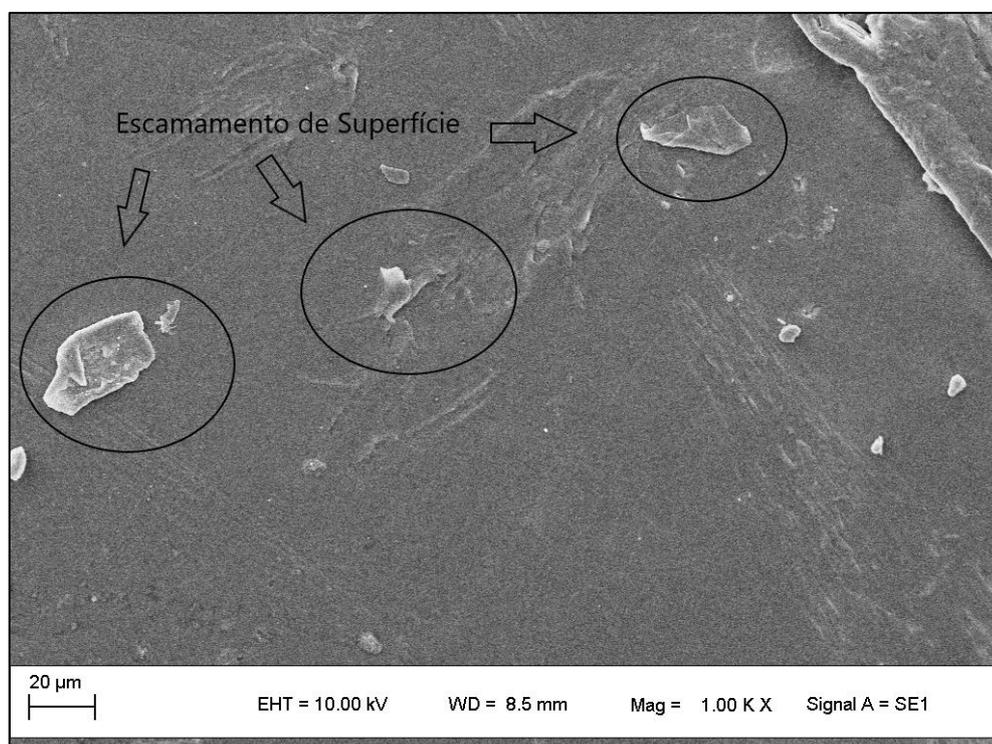
A Figura 31 apresenta a imagem analisada pelo MEV de uma amostra de floco de PET sem tratamento e a Figura 32 exibe uma amostra de PET tratada com concentração de 8% de NaOH submetido a um banho de 120 min.

Figura 31 - Floco de PET sem tratamento químico



Fonte: Elaboração Própria

Figura 32 - Floco de PET tratado durante 2 horas com 8% de NaOH



Fonte: Elaboração Própria

Realizando uma comparação entre as Figuras 31 e 32, percebe-se visualmente que há uma modificação na superfície do floco de PET tratado quimicamente com 8% de NaOH durante 120 min. A amostra apresenta um certo escamamento em vários pontos da superfície. Analisando as imagens obtidas através do MEV, essa foi a amostra que teve visualmente uma maior modificação superficial dentre todas as amostras analisadas, quando comparadas com o floco de PET sem tratamento.

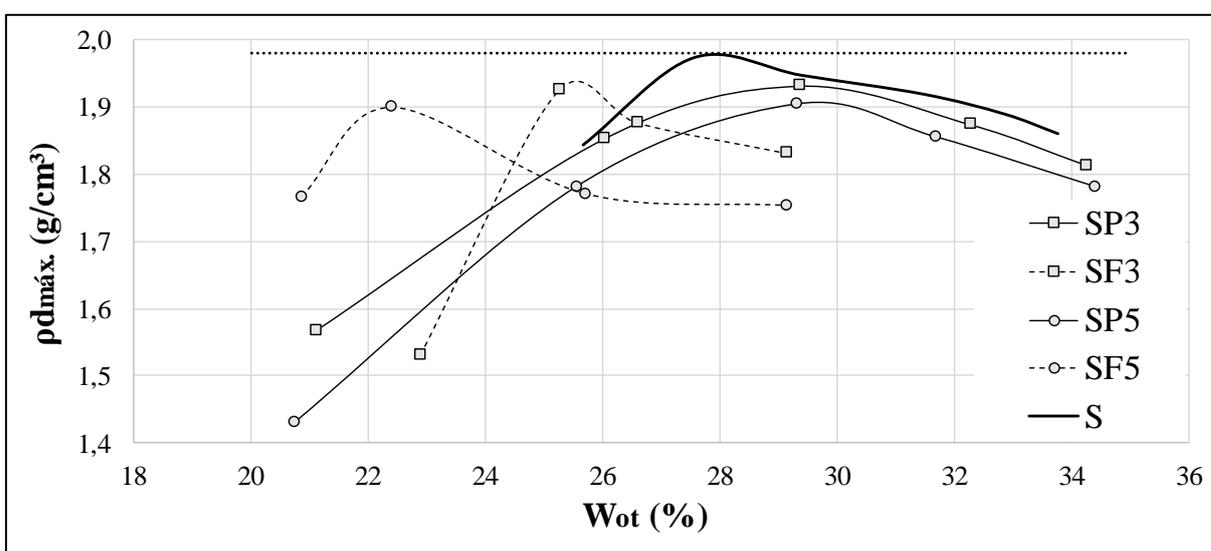
## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados e análises dos ensaios realizados buscando avaliar o comportamento de um solo laterítico com adição de resíduos de PET.

### 4.1 Ensaio de Compactação

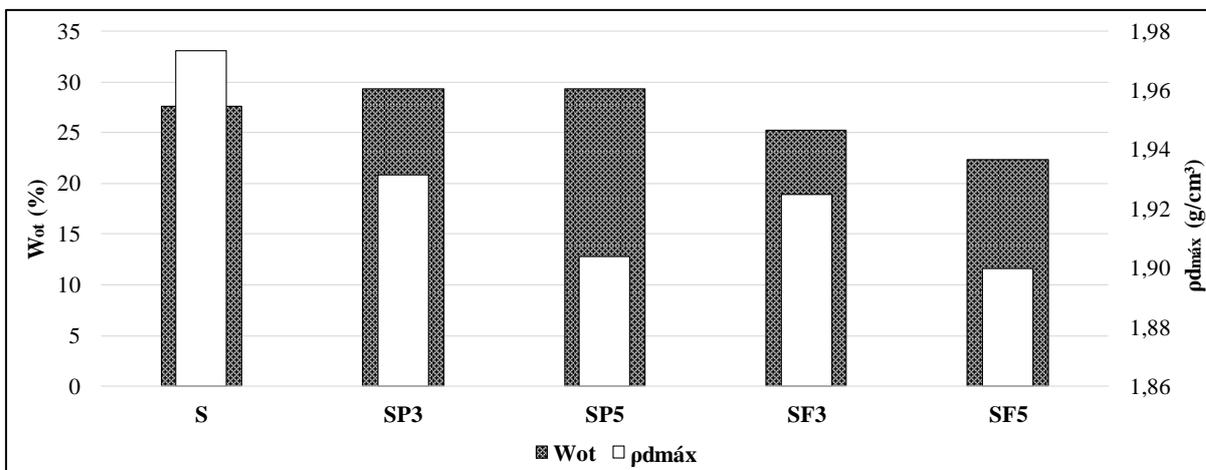
Utilizando o método de compactação Mini-Proctor, em que 100% do solo analisado deve necessariamente ser passante na peneira 2 mm, as Figuras 33 e 34 apresentam as curvas de compactação do solo laterítico e a comparação direta da MEAS<sub>máx</sub> ( $\rho_{dmáx}$ ) e umidade ótima ( $W_{ot}$ ), respectivamente com a adição de 3% e 5% de pó de PET e 3% e 5% de flocos de PET.

Figura 33 - Curvas de compactação do solo com adição de pó e flocos de PET



Fonte: Elaboração Própria

Figura 34 - Comparação direta da MEASmáx e umidade ótima



Fonte: Elaboração Própria

De acordo com as Figuras 33 e 34, percebe-se que o solo natural atingiu uma massa específica de  $1,97 \text{ g/cm}^3$  e uma umidade ótima em torno de 28%. Esta massa específica está de acordo com a magnitude exposta por Pinto (2006), que sugere que solos lateríticos costumam apresentar valores de massa específica em torno de  $2 \text{ g/cm}^3$  e umidade ótima entre 25% e 30%. Foi observada uma queda de aproximadamente 2% da massa específica para teores de pó de PET de 3%, e um pequeno aumento na umidade ótima de cerca de 6,5%. Percebe-se que a diminuição da massa específica se dá a medida em que se aumentam os teores de material adicionado, ocorrendo o inverso com a umidade ótima, na qual há a influência dos tamanhos das partículas, pois a mistura requer uma maior quantidade de água para realizar a hidratação dos materiais. O mesmo resultado foi observado quando adicionado 5% de pó de PET, levando a uma massa específica de cerca de  $1,90 \text{ g/cm}^3$ , queda de 3,5%, e mantendo a umidade ótima em 29%.

Para a adição de flocos de PET de 3% houve uma redução da massa específica, de 2,5% comparada ao solo puro ( $1,92 \text{ g/cm}^3$ ) e da umidade ótima, que decresceu a 25,25% (queda de 8,5%). Quando o teor de flocos de PET adicionado foi de 5%, a massa específica decresceu 3,5%, ficando em  $1,9 \text{ g/cm}^3$  e a umidade ótima ficou em torno de 22,3%, mantendo a tendência de queda desses parâmetros à medida em que o teor de flocos adicionado foi aumentando.

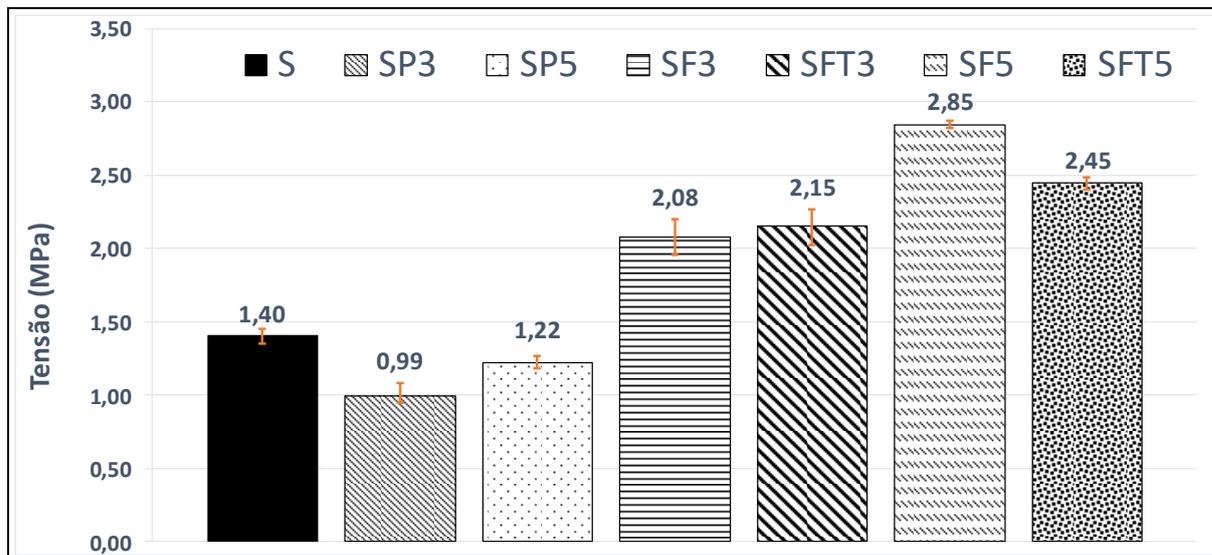
O resultado de massa específica das misturas com flocos de PET manteve o mesmo comportamento das curvas com pó de PET, onde à medida que se aumentam os teores de adição, tem-se uma queda da massa específica. Este fator pode ser

explicado devido à ocupação, dos flocos de PET, dos vazios que seriam necessariamente preenchidos com partículas de solo durante a compactação, sendo os flocos de PET menos densos que os grãos de solo. Neste sentido, sabe-se que a massa específica sofre a influência do peso de ambos os materiais (solo e flocos de PET), e o fato dos flocos de PET serem mais leves que os grãos de solo acaba gerando uma redução deste parâmetro, fazendo com que haja uma diminuição da massa específica das misturas quando comparadas ao solo puro. Outro fator que pode ser considerado, é que ao se assentarem nos grãos de solo, os flocos acabam absorvendo parte da energia de compactação, que seria transmitida às partículas de solo, diminuindo a eficiência da compactação desta mistura. Já a umidade ótima teve um decréscimo com as adições, que se deve ao fato dos flocos de PET não absorverem água e apresentarem uma granulometria muito superior ao pó de PET. Estudos de Louzada (2015) e Ramírez (2012) também encontraram comportamentos similares nos testes de compactação aos desta pesquisa.

#### **4.2 Ensaio de Resistência à Compressão Simples**

O ensaio de resistência à compressão simples do solo natural e das misturas, realizado de acordo com os procedimentos descritos no item 3.2.2, pode ser analisado na Figura 35. Os valores de tensão registrados são oriundos da média do rompimento de 3 corpos de prova para cada mistura, e apresentam também o erro padrão gerado em cada média de tensão.

Figura 35 - Tensão média das misturas no ensaio de resistência à compressão simples



Fonte: Elaboração Própria

Fazendo uma análise da Figura 35, percebe-se que houve uma queda na ordem de 30% da tensão da mistura de SP3 quando comparado ao solo puro. Quando acrescentado 5% de pó ao solo, esse percentual de queda ficou em 12%. Na mistura SF3, percebe-se um aumento na resistência à compressão na ordem de 48%, valor que se eleva ainda mais na mistura SF5, chegando a um aumento de tensão de 103% quando comparado ao solo puro. Também se observou um aumento na tensão em relação ao solo puro para os casos de SFT3 e SFT5, de 53% e 75%, respectivamente.

É possível verificar que em todas as misturas moldadas com flocos de PET houve um aumento na resistência à compressão simples em relação ao valor obtido sem a adição dos mesmos. Meneses (2011) salienta que esse ganho de resistência pode ser atribuído à geometria plana dos flocos, diminuindo o acréscimo de água da mistura.

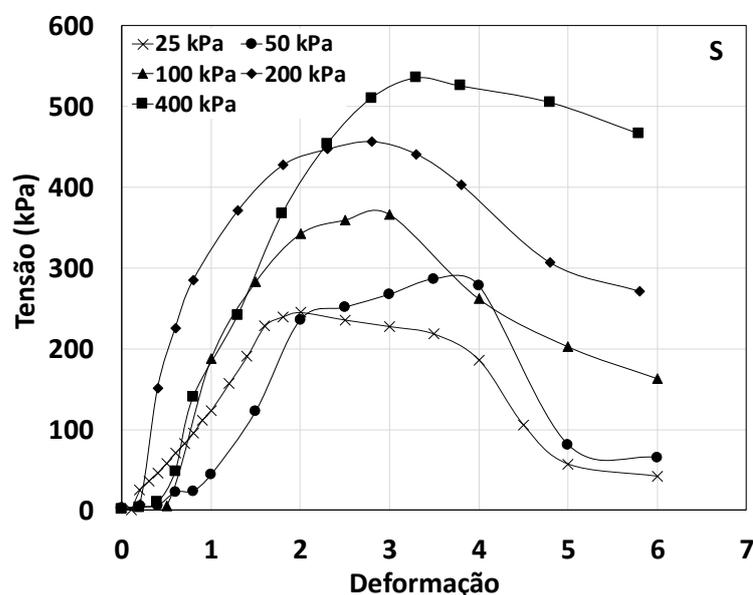
### 4.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

Descrito no item 3.2.3, o ensaio de cisalhamento direto sem submersão da amostra e nas umidades ótimas foi realizado no solo puro e nas misturas, aplicando carregamentos normais de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. Para a análise e apresentação dos ensaios de cisalhamento, a seguinte sequência foi adotada: primeiramente serão ilustrados as curvas tensão *versus* deformação e

envoltória de ruptura para os ensaios realizados com a amostra de solo puro, a qual é referência para as análises seguintes; na sequência serão comparados com a amostra de referência os casos com adição de 3% e 5% de pó e de floco; por fim será comparado o tratamento do floco de PET para 3% e 5% com seus respectivos resultados sem tratamento.

Na Figura 36 estão apresentadas as curvas de tensão *versus* deformação do solo puro para as 5 tensões normais utilizadas no ensaio.

Figura 36 - Tensão x deformação do solo no estado puro

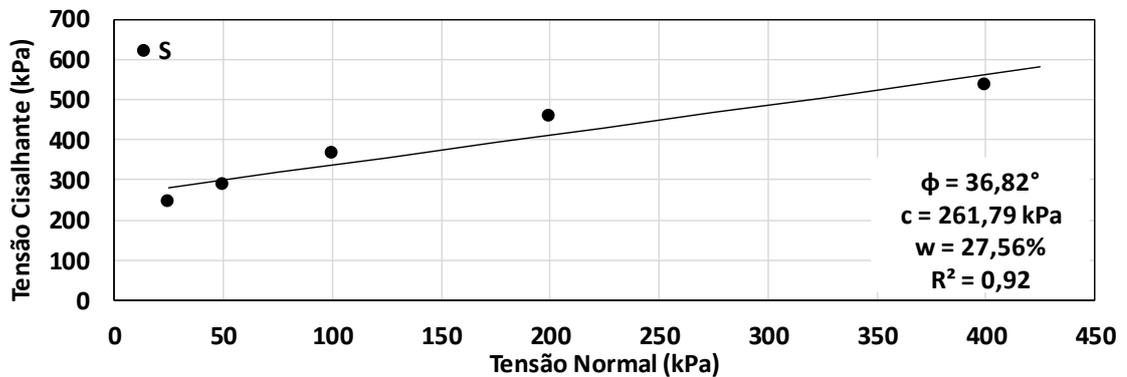


Fonte: Elaboração Própria

Percebe-se através da Figura 36 que as curvas tensão *versus* deformação do solo puro apresentaram um pico de ruptura para todas as tensões confinantes ensaiadas, característica de uma ruptura frágil e que de acordo com Marangon (2004), ocorre tipicamente em solos argilosos rijos e duros. Também se observa que à medida que se aumentam as tensões confinantes, maior é a tensão de ruptura apresentada, seguindo um padrão já esperado.

Através dos picos de tensão das curvas ilustradas na Figura 36, foi gerada a envoltória de ruptura apresentada na Figura 37.

Figura 37 - Envoltória de ruptura do solo no estado puro

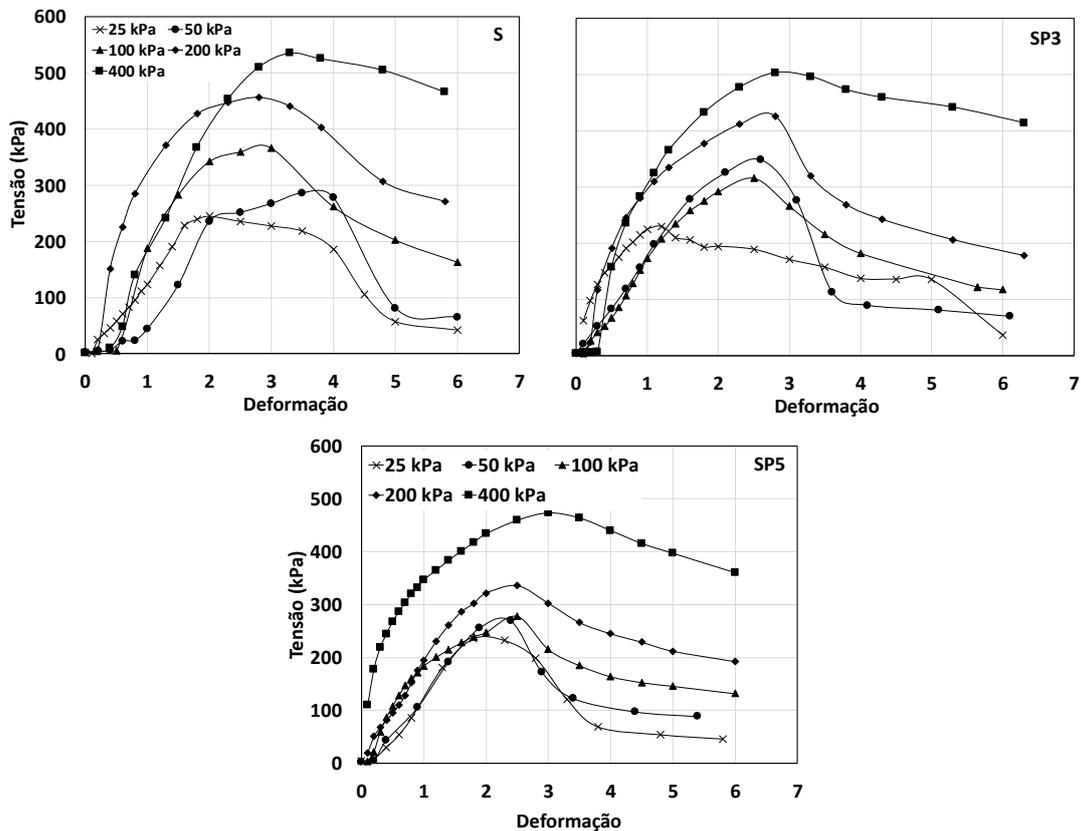


Fonte: Elaboração Própria

Na Figura 37 é possível observar que o solo apresenta um ângulo de atrito de  $36,82^\circ$  e um intercepto coesivo de  $261,79 \text{ kPa}$ . O ajuste do modelo estatístico, determinado através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), foi de  $92\%$ , indicando um ótimo ajuste dos dados da amostra analisada.

Na Figura 38 estão apresentadas as curvas tensão *versus* deformação para as condições de solo puro e solo com adição de  $3\%$  e  $5\%$  de pó de PET.

Figura 38 - Curvas tensão x deformação das condições S, SP3 e SP5

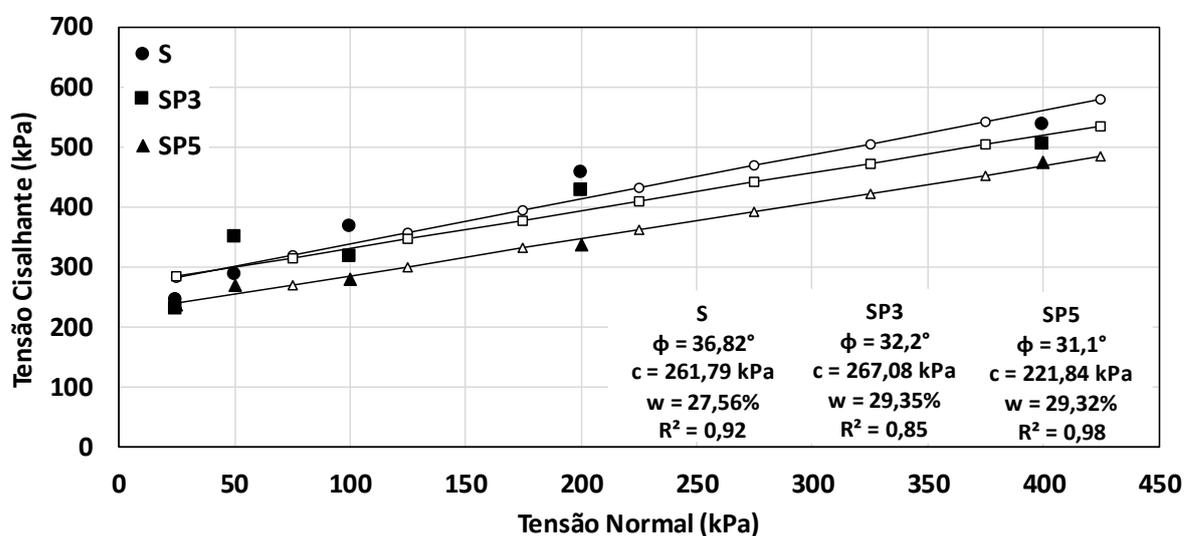


Fonte: Elaboração Própria

Da mesma forma que as curvas de tensão *versus* deformação do solo puro, as das misturas SP3 e SP5 apresentaram picos de ruptura para todas as tensões confinantes utilizadas. De modo geral, a adição de PET em forma de pó não influenciou consideravelmente o comportamento do solo.

Através dos picos de tensão das curvas ilustradas na Figura 38, foram geradas as envoltórias de ruptura apresentadas na Figura 39.

Figura 39 - Envoltórias de ruptura das condições S, SP3 e SP5



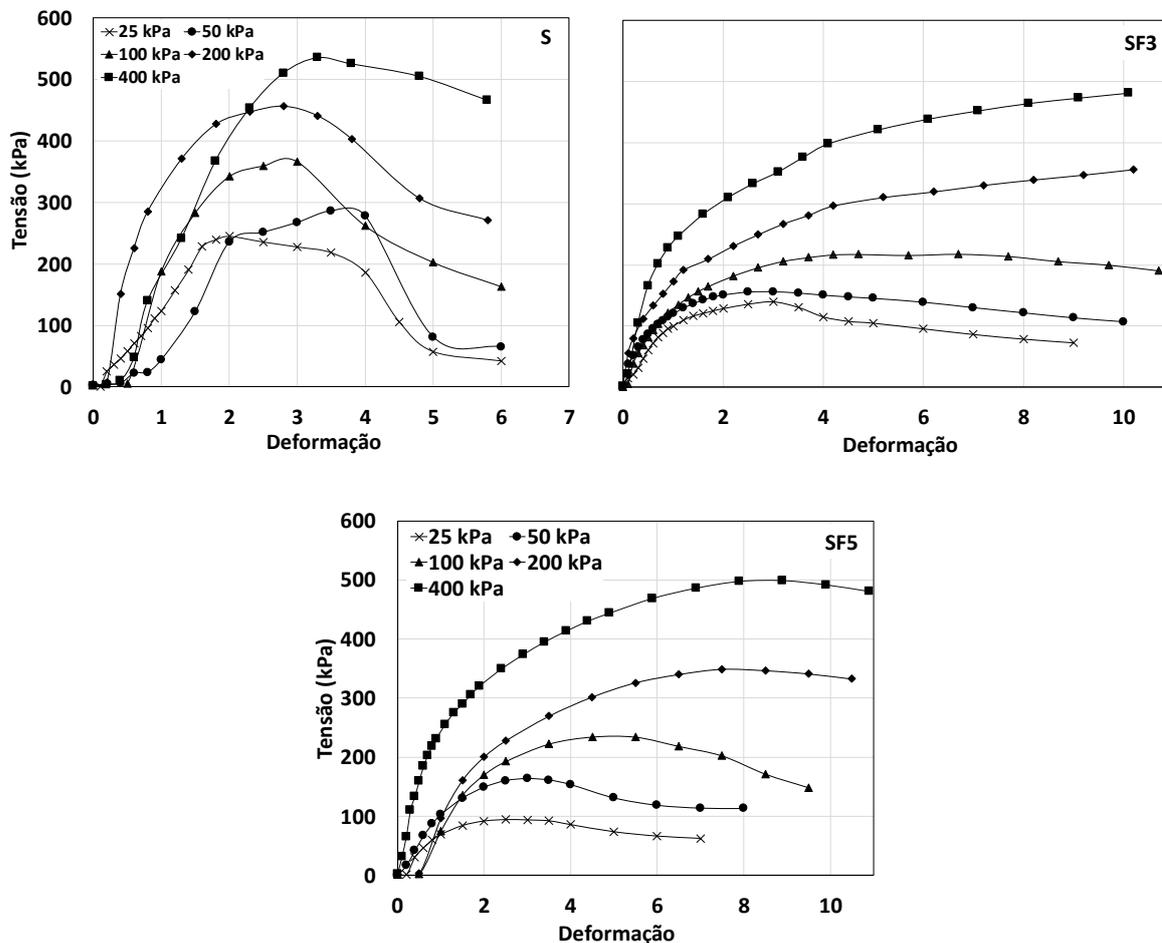
Fonte: Elaboração Própria

Na envoltória de ruptura da mistura SP3, o ângulo de atrito foi de 32,2° e o intercepto coesivo de 267,08 kPa para um coeficiente de determinação que chegou a 85%. Já para a envoltória da mistura SP5, foi obtido um ajuste de dados de 98%, o ângulo de atrito da mistura SP5 foi de 31,1°, e o intercepto coesivo de 221,84 kPa.

Analisando as envoltórias da Figura 39, percebe-se que as amostras que continham adições reduziram consideravelmente o ângulo de atrito quando comparadas ao solo puro. Com relação ao intercepto coesivo, a mistura SP3 manteve o valor praticamente inalterado, e a mistura SP5 obteve uma queda na ordem de 15% deste parâmetro.

Na Figura 40 estão apresentadas as curvas tensão *versus* deformação para as condições de solo puro e solo com adição de 3% e 5% de floco de PET.

Figura 40 - Curvas tensão x deformação das condições S, SF3 e SF5



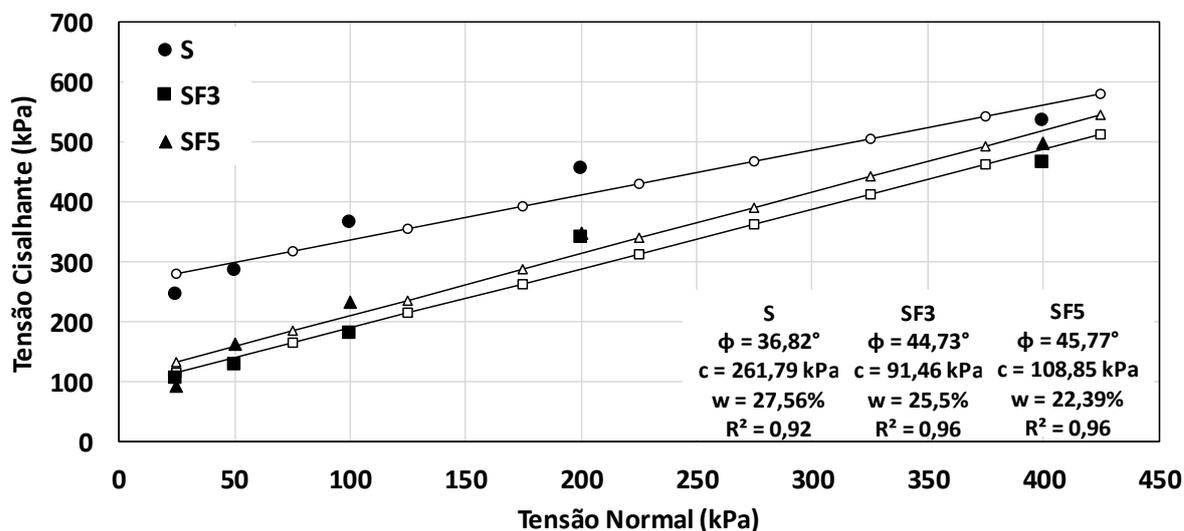
Fonte: Elaboração Própria

A partir da análise das curvas tensão *versus* deformação das misturas SF3 e SF5 é possível observar que, para todas as cargas confinantes, as curvas não apresentaram picos definidos ou proeminentes, especialmente para cargas confinantes maiores. A adição de flocos de PET fez com que os valores de tensão cisalhante máximos atingidos, se comparados ao solo natural, ocorressem para deformações maiores, ou seja, a amostra se deformou mais antes de atingir a ruptura. Porém, a magnitude das tensões cisalhantes máximas atingidas foi sempre inferior à do caso de referência, independente do teor de PET em floco adicionado.

Vale destacar que para as tensões normais de 200 e 400 kPa da curva SF3, a curva tensão *versus* deformação não atingiu um valor de pico. Isso indica que possivelmente a tensão continuaria a crescer, resultando em um provável aumento do ângulo de atrito da envoltória gerada pela mistura.

Através dos picos de tensão das curvas ilustradas na Figura 40, foram geradas as envoltórias de ruptura apresentadas na Figura 41.

Figura 41 - Envoltórias de ruptura das condições S, SF3 e SF5



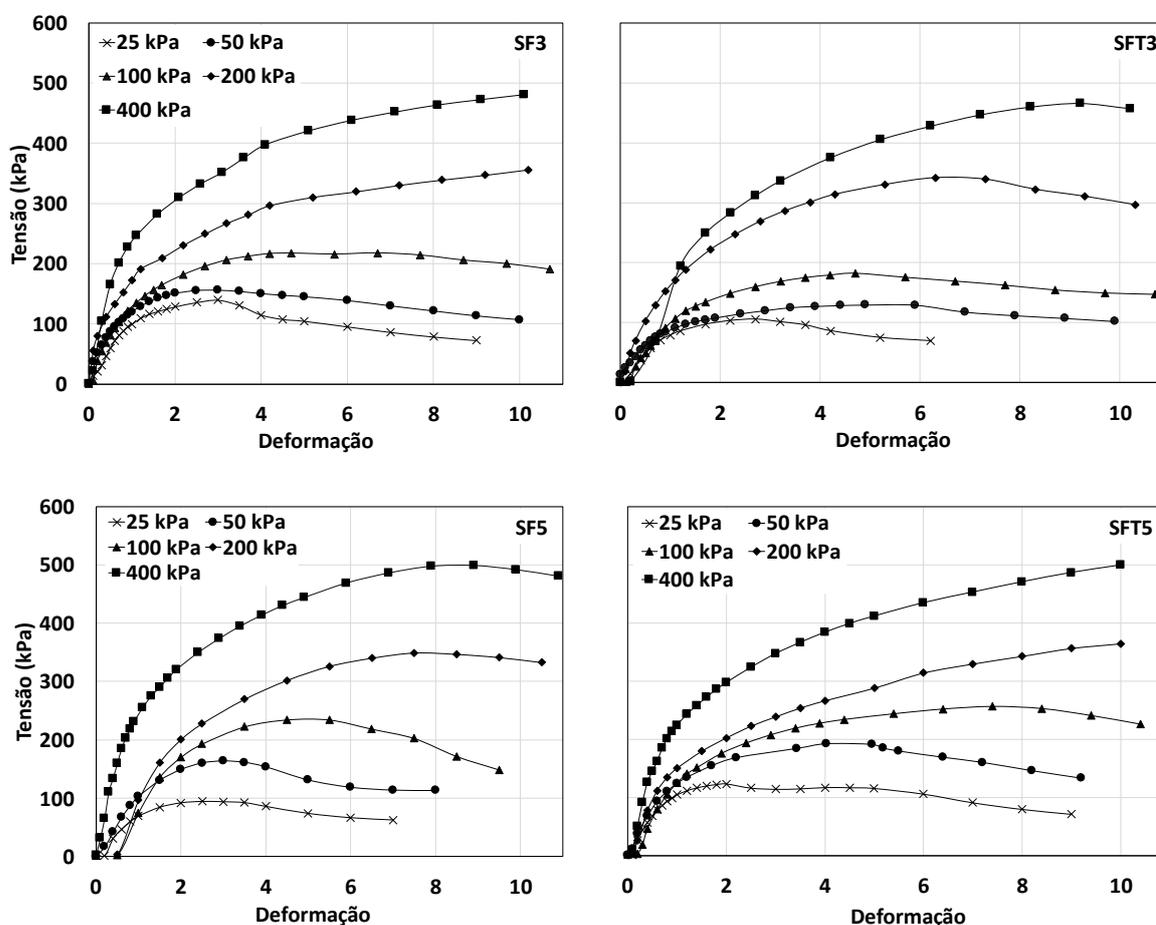
Fonte: Elaboração Própria

A envoltória de ruptura da mistura SF3 obteve um grau de confiança de dados de 96%, apresentando um ângulo de atrito de 44,73° e um intercepto coesivo de 91,46 kPa. Para a mistura SF5, obteve-se um intercepto coesivo de 108,85 kPa e um ângulo de atrito de 45,77°, com um coeficiente de determinação de 96%.

Percebe-se que há uma considerável redução no intercepto coesivo das amostras que continham adições de flocos de PET. Isto pode ser explicado pela área muito superior dos flocos com relação aos grãos de solo, ocupando um maior espaço na amostra e fazendo com que a ligação entre as partículas de solo acabe sendo menos coesa. Esta redução está provavelmente ligada também à redução da superfície de contato direto entre partículas argilosas, consequentemente reduzindo o potencial coesivo do material. Dessa forma, quando se tem a redução de partículas de argila na massa total do solo, há consequentemente, uma redução na coesão da mistura.

Na Figura 42 estão apresentadas as curvas tensão *versus* deformação para as condições de solo com adição de 3% de floco tratado e natural, e solo com adição de 5% de floco tratado e natural.

Figura 42 - Curvas tensão x deformação das condições SF3, SF5, SFT3 e SFT5



Fonte: Elaboração Própria

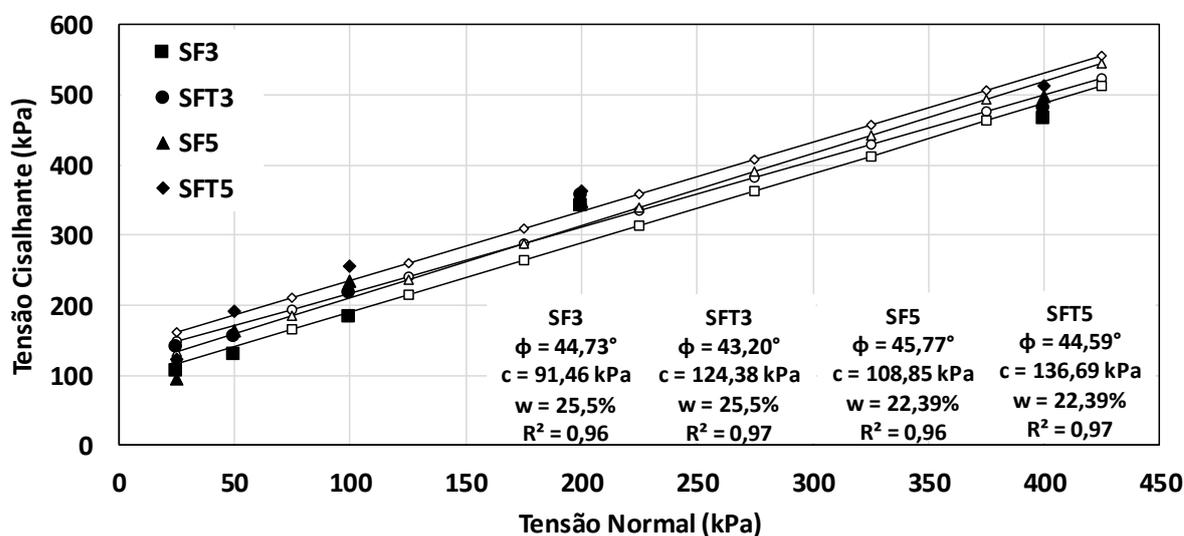
O tratamento dos flocos de PET fez com que os valores de tensão cisalhante máximos atingidos, se comparados ao caso com floco sem tratamento, ocorressem em deformações maiores, ou seja, a amostra se deformou mais antes de atingir a ruptura. Este comportamento havia sido ressaltado anteriormente, na Figura 40 (S x SF3 e SF5), ou seja, o tratamento do PET tornou a ruptura da amostra ainda mais dúctil.

Quando realizada uma comparação com as amostras que continham flocos de PET tratados e não tratados, percebe-se que, em todos os casos, para todas as tensões confinantes, houve um aumento da tensão cisalhante máxima nas amostras que continham flocos de PET tratados. Isso pode ser explicado devido ao escamamento da superfície oriundo do tratamento com NaOH. Como o solo possui uma granulometria fina, o mesmo tende a possuir uma maior facilidade de encaixe nas saliências dos flocos tratados, que possuem uma maior rugosidade superficial,

gerando um maior número de pontos em que existe o contato grão-floco, aumentando o intertravamento e a interação matriz-reforço. Por conta disso, justifica-se o fato das misturas contendo flocos tratados quimicamente com NaOH apresentarem valores de resistência ao cisalhamento e coesão maiores que àquelas misturas em que não houve tratamento algum nos flocos de PET.

Através dos picos de tensão das curvas ilustradas na Figura 42, foram geradas as envoltórias de ruptura apresentadas na Figura 43.

Figura 43 - Envoltória de ruptura da mistura SF3



Fonte: Elaboração Própria

SFT3= ângulo de atrito de  $43,20^\circ$ , a curva apresentou uma coesão de 124,38 kPa, com 97% de confiança no modelo.

SFT5= A mistura apresentou uma confiança de dados de 97%, um ângulo de atrito de  $44,59^\circ$  e um intercepto coesivo de 136,69 kPa.

De acordo com as Figuras 36 a 43, percebe-se que todas as misturas com adição de PET, seja em pó ou seja em floco, para todas as tensões confinantes, em comparação com o solo puro, tiveram uma queda no valor da tensão cisalhante máxima.

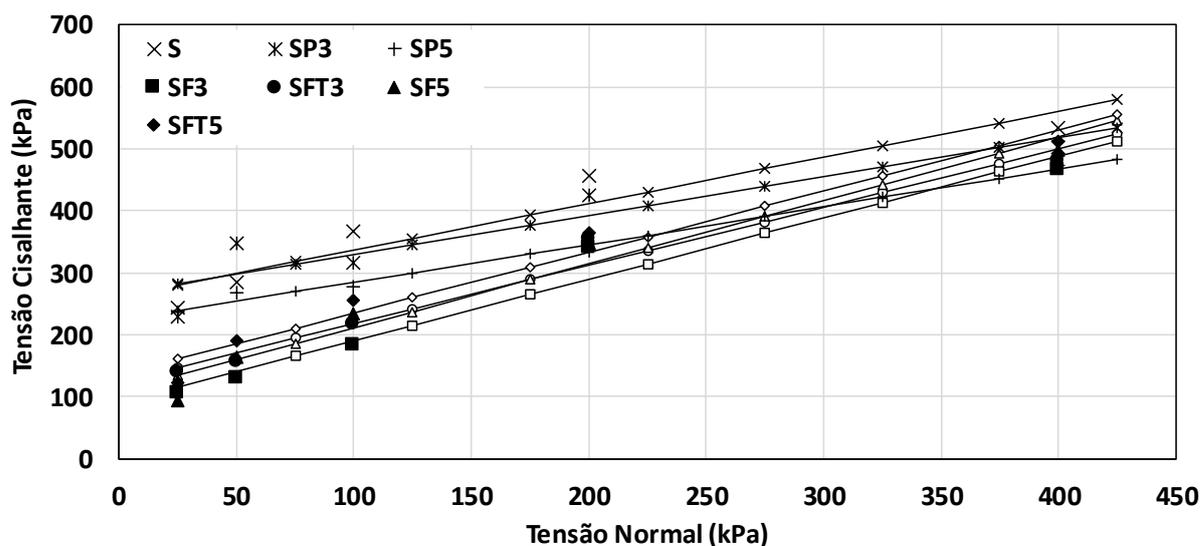
Quanto as envoltórias de ruptura, a Tabela 4 apresenta os valores de coesão e ângulo de atrito para cada mistura em análise e a Figura 44 apresenta todas as envoltórias plotadas em um mesmo gráfico.

Tabela 4 - Parâmetros de resistência das misturas do ensaio de cisalhamento direto

Resultados	S	SP3	SP5	SF3	SFT3	SF5	SFT5
<b>Coesão (kPa)</b>	261,79	267,08	221,84	91,46	124,38	108,85	136,69
<b>Ângulo de Atrito</b>	36,82	32,2°	31,1°	44,73°	43,20°	45,77°	44,59°

Fonte: Elaboração Própria

Figura 44 - Envoltórias do ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Elaboração Própria

Pode-se verificar que as envoltórias das misturas com floco ficaram com ângulos de atrito entre 7 e 10 graus maiores que a da amostra de solo natural, obtendo também valores superiores quando comparados às misturas com pó.

Com relação ao intercepto coesivo, as misturas também apresentaram um decréscimo, exceto a mistura SP3, que se manteve na mesma ordem de grandeza do solo puro. O fato de haver redução do intercepto coesivo está provavelmente relacionado ao fato dos flocos, com uma área muito maior que os grãos de solo, ocuparem maiores espaços no corpo de prova, diminuindo a união das partículas de solo.

#### 4.4 Resistência entre as Interfaces Solo-PET Utilizando o Equipamento de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto entre as interfaces solo-PET, descrito no item 3.2.4, foi proposto com o objetivo de avaliar a influência do solo na resistência ao

cisalhamento da interface de PET. Os resultados do ensaio compreendem as tensões confinantes de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa.

A Tabela 5 apresenta a tensão cisalhante máxima adquirida em cada tensão confinante, para amostras de solo puro em contato com a interface de PET sem tratamento e com tratamento.

Tabela 5 - Tensão normal e cisalhante do ensaio de cisalhamento direto entre as interfaces solo-PET

Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante Máxima (kPa)	
	Interface Solo-PET	Interface Solo-PET Tratado
<b>25</b>	18,0	21,6
<b>50</b>	41,2	49,7
<b>100</b>	61,8	68,5
<b>200</b>	99,1	110,0
<b>400</b>	187,6	197,1

Fonte: Elaboração Própria

É possível observar na Tabela 6, que em todas tensões confinantes, as amostras de solo puro em contato com a superfície de PET tratado apresentaram tensões cisalhantes máximas maiores que as amostras de solo puro em contato com a superfície de PET sem tratamento. Assim como ocorreu no ensaio de cisalhamento direto utilizando flocos de PET tratados e não tratados com NaOH, a explicação pode ser dada devido ao desgaste superficial que o tratamento químico provoca na superfície do PET.

#### 4.5 Ensaio de Arrancamento

De acordo com o disposto no item 3.2.5, o ensaio de arrancamento foi realizado em amostras de solo puro com fibras de PET tratadas e não tratadas com NaOH. A Tabela 6 apresenta os valores médios da força de tração, deslocamento e tensão de cisalhamento na fibra, que é calculada a partir da razão entre a força de tração e a área de contato da fibra com a matriz.

Tabela 6 - Valores médios da força de tração, deslocamento e tensão cisalhante da fibra de PET no ensaio de arrancamento

	<b>Solo-Fibra PET</b>	<b>Solo-Fibra PET Tratado</b>
<b>Força Máxima (N)</b>	80,95	105
<b>Deslocamento (mm)</b>	2,21	2,91
<b>Tensão de Cisalhamento (MPa)</b>	0,19	0,247

Fonte: Elaboração Própria

Percebe-se mais uma vez, através da Tabela 6, que o tratamento químico com NaOH realizado nas fibras de PET aumentou a resistência da interface fibra-matriz. No caso do ensaio de arrancamento, houve um acréscimo de tensão cisalhante da ordem de 23%, comparando a fibra de PET tratada com a fibra de PET não tratada. Novamente, esse aumento de tensão, de acordo com Bentur e Mindess (2007), pode ser atribuído ao desgaste superficial ocasionado nas fibras tratadas, garantindo uma maior ligação microestrutural entre o elemento de reforço e a matriz.

## 5 CONCLUSÕES

Com o término da presente pesquisa, que avaliou o desempenho de um solo argiloso com adição de resíduos de PET, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Com relação ao ensaio de compactação, os resultados mostram que a inserção de pó e flocos de PET atuam diretamente nos valores de massa específica e umidade ótima do material. A inserção de porcentagens de pó de PET diminuiu a massa específica e aumentou a umidade ótima das misturas. Com relação à inserção de flocos de PET, as misturas apresentaram reduções em ambos os parâmetros: massa específica e umidade ótima. A redução da massa específica nas misturas com adição de ambos os resíduos pode ser explicada pelo baixo peso específico do PET, acarretando na redução deste indicador.
- No que diz respeito ao ensaio de compressão simples, houve uma redução na tensão das misturas que continham adições de pó de PET quando comparadas à amostra referência de solo puro. Com relação às misturas contendo flocos de PET, houve um aumento da resistência, principalmente para adições de 5%, que obtiveram um ganho na ordem de 100% da resistência em relação ao solo puro.
- No ensaio de cisalhamento direto, amostras que continham adições de pó de PET apresentaram uma queda no ângulo de atrito, que pode estar ligado ao fato do pó não reagir quimicamente com as partículas de solo e sim como um estabilizador granulométrico da mistura. Com relação à coesão, as misturas que continham pó mantiveram seus valores praticamente inalterados em relação à amostra de referência. Para os flocos de PET, também houve decréscimo nos parâmetros de coesão e ângulo de atrito. Vale destacar que para o caso dos flocos, a tensão cisalhante máxima ocorreu para deformações maiores, quando comparados ao caso sem adição de flocos, tendo uma maior deformação até atingir a ruptura. Ao comparar as amostras de flocos tratados com NaOH com àquelas sem tratamento, percebeu-se um aumento nas tensões cisalhantes máximas em todos os casos que

continham flocos tratados. Esse fato está possivelmente ligado ao escamamento da superfície dos flocos, ocasionado pelo tratamento químico.

- No ensaio de cisalhamento direto realizado entre as interface solo-PET, verificou-se que em todas as tensões confinantes houve um aumento das tensões cisalhantes máximas das amostras que continham a superfície de PET tratada em relação àquelas que não foram submetidas ao tratamento químico.
- Da mesma forma, o ensaio de arrancamento apresentou uma tensão cisalhante máxima na ordem de 30% maior para o caso das amostras que continham fibras de PET tratadas com relação às amostras que continham fibras de PET sem tratamento, demonstrando mais uma vez a eficácia que o tratamento químico gera no PET quando submetido à esforços cisalhantes junto ao solo.

### **5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

- Realizar misturas com resíduos de PET utilizando solos de comportamento arenoso;
- Estudar misturas que contenham diferentes tamanhos de grãos de PET, afim de compreender a influência dos mesmos nos parâmetros de resistência do solo;
- Realizar tratamento químico nos flocos de PET com maiores concentrações de NaOH, afim de se observar o desgaste causado na superfície do PET;
- Estudar este mesmo solo utilizando fibras alongadas de PET, afim de se observar o comportamento da mistura.

## REFERÊNCIAS

ABIPET, 2013. Associação Brasileira da Indústria De PET. **9° censo da reciclagem de PET – Brasil O Ano 2012**. Disponível em <http://abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>>. Acesso em 15 de setembro de 2018.

ABIPET, 2016. Associação Brasileira da Indústria do PET. **10° Censo da Reciclagem de PET**. Disponível em <http://abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>>. Acesso em 15 de setembro de 2018.

ABRELPE, 2017. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil no ano de 2017**. Disponível em: [http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama\\_abrelpe\\_2017.pdf](http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf)> Acesso em 16 de setembro de 2018.

AGUILAR, J. R. T. **Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Reforçado com Fibras de Coco**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ, 2015.

ALBANO, C.; CAMACHO, N.; HERNÁNDEZ, M.; MATHEUS, A.; GUTIÉRREZ, A. **Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios**. Waste Management, v. 29, n. 10, p. 2707-2716, 2009.

AL WAHAB, R. M.; AL-QURNA, H. H. **Fiber Reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures**. GEOSYNTHETICS'95 CONFERENCE. Nashville. Proceedings. v.2, p.433-466, 1995.

ARAO, M. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a inserção de Polietileno Tereftalato (PET) triturado**. Dissertação de Mestrado, DEC, PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2016.

ASKELAND, D. R. **The Science and Engineering of Materials**. Chapman & Hall. 2ª edição. 880p. 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET (**ABIPET**). Disponível em: <http://abipet.org.br/index.html>> Acesso em: 15 de setembro de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio**. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2012.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro – RJ: ABNT, 2017.

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

ASTM D3080 - **Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. American Society for Testing and Materials, 1998.

BABU, G. L. S., CHOUKSEY, S. K. **Stress–strain response of plastic waste mixed soil**. Waste Management, 2010.

BENTO, P. F. **Uso de Cal e Fibras na Melhoria de Materiais para Utilização em Estruturas de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado. 120 p. Publicação G. DM–144/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. 2ed., New York, NY, 2007.

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, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 179p. 2003.

BOLAÑOS, R. Z. **Comportamento Mecânico de um solo argiloso reforçado com fibras de coco**. Dissertação de Mestrado, DEC, PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2013.

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

CAI, Y.; TANG, C.; SHI, B.; GAO, W.; CHEN, F. **Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil**. Journal of Geotextiles and Geomembranes v.25, p.194–202, 2006.

CAMARGO, M. N.; KLAMP, E.; J. H. KAUFFMAN. **Classificação de Solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil**. Bol. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo, Campinas, 197712 (1): 11 – 33, 1987.

CARVALHO, A. *et al.* **Caracterização mineralógica, morfológica e geotécnica de alguns solos lateríticos desenvolvidos sobre basaltos na Bacia do Paraná**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, Rio de Janeiro. Anais..., Rio de Janeiro: [s.n.], 1981. p. 340-381, 1981.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do Comportamento de um Solo Reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**.

Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS, Porto Alegre – RS, 2001.

CASAGRANDE, M. D. T.; CONSOLI, N. C.; COOP, M. R. **Effect of Fiber Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand.** Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, v.131, p.1434-1436, 2005a.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Porto Alegre - RS, 2005b.

CEMPRE. 2012. **Compromisso empresarial para reciclagem.** Disponível em: <<http://ww.cempre.org.br>>. Acesso em 2 de outubro de 2018.

CEMPRE, 2017. Compromisso Empresarial para Reciclagem. **Pesquisa Ciclosoft 2016.** Disponível em: <<http://cempre.org.br/ciclosoft/id/8>>. Acesso em 19 de setembro de 2018.

CHOUDHARY, A. K.; JHA, J. N.; GILL, K. S. **Utilization of Plastic Wastes for Improving the Sub-Grades in Flexible Pavements.** Proceedings of the GeoShanghai International Conference. pp 320-326, 2010.

CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; COOP, M. R. **Performance of a fibereinforced sand at large shear strains.** Geotechnique 57, No. 00, 1-6, 2007.

CONSOLI, N. C., CASAGRANDE, M. D. T., COOP, M. R. **The Effect of Fiber-Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,, New York, v.131, 2005.

CONSOLI N. C.; MONTARDO J. P.; PRIETTO, P. D. M. **Comportamento mecânico de uma areia cimentícia reforçada com resíduos plásticos.** Seminário Nacional sobre reuso/reciclagem de resíduos sólidos industriais SMA/ São Paulo. 2000.

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 Environmental Engineering. Reston, ASCE, v.128, n. 6, p. 462-472, 2002.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; ULBRICH, L. A. **The behavior of a fiber-reinforced cemented soil.** Ground Improvement, ISSMGE, v.3 n.3, p.21-30, 1999.

CURCIO, D. S. **Comportamento hidromecânico de compósito solo-fibra.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRJ. Rio de Janeiro - RJ, 2008.

DNIT-ME. Pavimentação - Solos - Determinação do Módulo de Resiliência – Método de ensaio. DNIT 134/2010 – ME, 2010.

DONATO, M.; FOPPA, D.; CERATTI, J. A. P.; CONSOLI, N. C. **Fibras de polipropileno como reforço para materiais geotécnicos**. Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, v.27, n.2, p. 161-179, 2004.

FATANI, M. N.; BAUER, G. E.; AL-JOULANI, N. **Reinforcing soil with aligned and randomly oriented metallic**. Geotechnical Testing Journal, Philadelphia, v.14, n.1, p. 78-87, 1991.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. Porto Alegre, 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. 2000.

GHAZAVI, M. **Shear strength characteristics of sand – mixed with granular rubber**. Journal Geotechnical and Geological Engineering, n.22, p.401-416, 2004.

GRAY, D.; AL-REFEAI, T. **Behavior of Fabric vs Fiber-Reinforced Sand**. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.112, n. 8, p. 804-820, 1986.

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

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2ª Edição, Pini, São Paulo, 2002.

HANNANT, L. **Fibre-reinforced Cements and Concretes**. In: J.M. Illston. Construction Materials; their nature and behavior. 2ed. London: J.M. Illston/E e FN e Spon. p. 359-403, 1994.

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

HEINECK, K. S.; COOP, M. R.; CONSOLI, N. C. **Effect of micro-reinforcement of soils from very small to large shear strains**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. New York, v.131, 2005.

HIGGINS, Raymond A. **Propriedades e Estruturas dos Materiais em Engenharia**. São Paulo: Editora DIFEL, 1982.

HOLLAWAY, L. **Polymers and polymer composites**. In: Construction Materials; their nature and behavior. London: J. M. Illston/E. & F.N. Spon, 2ed., p.321-358, 1994.

IBGE. **Manual Técnico de Pedologia**. 2.ed. Rio de Janeiro. Manuais Técnicos em Geociências. 2007.

KANIRAJ, S. R.; HAVANAGI, V. G. **Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.127, n.7, p.574-584, 2001.

KERN, A. P. **Estudo da Viabilidade da Incorporação de Resíduos de Contrafortes de Calçados em Matrizes de Gesso para Uso como Material de Construção Civil.** Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia-Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 1999.

LEAL, A. C.; GONÇALVES, M. A.; THOMAZ Jr., A. **A reinserção do lixo na sociedade do capital: uma contribuição ao entendimento do trabalho na catação e na reciclagem.** Terra Livre, v. 18, n. 19, p. 177-190, 2003.

LEI Nº 12.305. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 02 ago, 2010.

LEOCADIO, G. A. S. **Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto - MG, 2005.

LIMA, D. C.; BUENO, B.S.; THOMASI, L. **The mechanical response of soil-lime mixtures reinforced with short synthetic fiber.** International Symposium On Environmental Geotechnology, 3., 1996, San Diego. Proceedings... v.1, p.868- 877, 1996.

LOUZADA, N. S. L. **Experimental Study of Soils Reinforced with Crushed Polyethylene Terephthalate (PET) Residue.** Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

MAHER, M. H.; GRAY, D. **Static Response of Sands Reinforced With Randomly Distributed Fibers.** Journal of Geotechnical Engineering, v.116, n. 11, p. 1661-1677, 1990.

MAHER, M. H.; HO, Y. C. **Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads.** Geotechnical Testing Journal, Philadelphia, v.16, n.3, p.330-338, 1994.

MANJUNATH, K. R.; VENUGOPAL, G.; RUDRESH, A. N. **Effect of Random Inclusion of Sisal Fibre on Strength Behavior of Black Cotton Soil.** International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), v.2, p.2227-2232, 2013.

MARANGON, M. **Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos de Região de Minas Gerais Utilizando Solos Locais a partir da Pedologia, Metodologia MCT e Resiliência.** Tese de Doutorado COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ, 2004.

MECALUX. **Mecalux do Brasil – Logismarket**. Disponível em: <<https://www.logismarket.ind.br/>>. Acesso: 10 de Outubro de 2018.

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

MENESES, I. A. **Avaliação de concreto com adição de fibras de PET submetido a altas temperaturas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, Natal, 2011.

MICHALOWSKI, R.L.; CERMÁK, J. **Triaxial compression of sand reinforced with fibers**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.129, n.2, p.125-136, 2003.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. PORTARIA N° 987. **Regulamento Técnico para embalagens descartáveis de polietileno tereftalato - PET - multicamada destinadas ao acondicionamento de bebidas não alcólicas carbonatadas**. Diário Oficial da União. Poder Executivo. 09 de dezembro de 1998.

MISHRA, S.; MOHANTY, A. K.; DRZAL, L. T.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. **A Review on Pineapple Leaf Fibers, Sisal Fibers and Their Biocomposites**. Journal of Macromolecular Material and Engineering, 289, p.995-974, 2004.

MODRO, N. L. R. **Desenvolvimento e Caracterização de Concreto de Cimento Portland Contendo Resíduos Poliméricos de PET**. Dissertação de M.Sc., UNIVILLE, Joinville - SC, Brasil, 2008.

MODRO, N. L. R.; MODRO, N. R.; OLIVEIRA. A. P. N. **Avaliação de concreto Portland contendo resíduos de PET**. Revista Matéria, V.14, n. 1, PP. 725-736, 2009.

MONTARDO, J. P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Porto Alegre - RS, 1999.

MONTARDO, J. P.; PRIETTO, P. D. M.; CONSOLI, N. C. **Comportamento de um Solo Reforçado com Resíduos Fibrosos**. In: II Simpósio de Prática da Engenharia Geotécnica da Região Sul – GEOSUL'2000, Porto Alegre. Anais. ABMS/ABNT/PPGEC – UFRGS, p.213-225, 2000.

MOREL, J. C.; GOURC, J. P. **Mechanical Behavior of Sand Reinforced With Mesh Elements**. Geosynthetics International, Minnesota, v.4, n.5, p. 481-508. 1997.

NATARAJ, M. S.; ADDULA, H. R.; MCMANIS, K. L. **Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils**. International Symposium On Environment

AI Geotechnology, 3., San Diego, Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc, v.1, p.826-835, 1996.

NOGAMI, J. S. VILLIBOR, D. F.; **Pavimentos Econômicos: Tecnologia do Uso dos Solos Finos Lateríticos.** São Paulo: Arte & Ciência, 289 p, 2009.

NOGAMI, J. S. **Determinação do índice de suporte Califórnia com equipamentos de dimensões reduzidas - Ensaio mini-CBR.** II Reunião das Administrações Rodoviárias, Brasília - DF, 1972.

OCHI, T., OKUBO, S., FUKUI, K. **Development of recycled PET fiber and its application as concrete reinforced fiber.** Cement and Concrete Composites, v. 29, n. 6, pp. 448-455, February 2007.

PALLMANN. **Alta Performance em Trituração.** Disponível em <<http://www.pallmann.com.br/index.html>>. Acesso em 20 de outubro de 2018.

PALMEIRA, E. M. **Melhoria de Solos.** Publicação GA 001A/90, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 225p. 1990.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos: Tipos e Evolução nos Últimos Anos.** Seminários sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia. Geossintéticos 92. Brasília-DF, p. 1-20. 1992.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 3ª edição. Oficina de Textos: São Paulo, 2006.

RAMIREZ, G. G. D. **Estudo experimental de solos reforçados com borracha moída de pneus inservíveis.** Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-RJ, Rio de Janeiro - RJ, 2012.

RAMIREZ, G. G. D.; CASAGRANDE, M. D. T. **Exiperimental study of granular rubber waste tire reinforced soil for geotechnical application.** Journal Key Enginneering Material, v.600, p. 585-596, 2014.

RANJAN, G. R.; CHARAN, H. D. **Probabilistic analysis of randomly distributed fiberreinforced soil.** Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.122, n.6, p.419-426, 1996.

RODRIGUES, L. S.; SÁ DA COSTA, K. J.; VASCONCELOS, R. P.; VIEIRA, R. K.; SÁ, R. J. **Utilização do resíduo sólido pet (polietileno tereftalato) na fabricação de blocos de concreto estrutural para pavimentos rígidos.** In: 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto de Galinhas - PE. Anais do 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2008.

ROMÃO, W.; SPIANCE, M. A. S.; PAOLI, M. A. **Poli (Tereftalato de Etileno), PET: Uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem.** Revista Ciência e Tecnologia, vol. 19, nº2, p. 121-132, 2009.

SALES, K. C. S. **Melhoria de Solos Por Inclusão de Fibras Naturais**. Dissertação de Mestrado, Publicação GDM-203/2011, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2011.

SANTOS, D. B. **Utilização de Garrafas PET em Obras Geotécnicas**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil - UFOP, Ouro Preto – MG, 2005.

SILVA, J. A. A.; RODRIGUES, J. K. G.; LUCENA, L. C.; LUCENA, A. E.; PATRICIO, J. D. **Estudo da utilização do poli tereftalato de etileno (PET) para compor as misturas asfálticas dos revestimentos rodoviários**. 42ª Reunião Anual de Pavimentação e 16º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Gramado - RS, 2013.

SINGH S. K.; ARIF S. M. **Inclusion of Coconut Coir Fiber in Soil Mixed with Coal Ash**. International Journal of Research in Engineering and Technology, v.3, p.209-213, 2014.

SONCIM, S. P.; ATHAYDE JÚNIOR, G. B.; FERRARI JÚNIOR, M. J.; ALMEIDA, M. O., ALMEIDA, S. G.; VIDAL, F. X. R. **O emprego do Resíduo de Reciclagem de garrafas PET (Polietileno Tereftalato) como agregado em reforço de subleitos de rodovias**. In: Simpósio Internacional De Qualidade Ambiental, Porto Alegre – RS, 2004.

SOTOMAYOR, J. M. G. **Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibra de coco submetida a ensaios de placa em verdadeira grandeza**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC - RIO. Rio de Janeiro - RJ, 2014.

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidos a carregamentos estáticos visando à pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Porto Alegre - RS, 2000.

SPECHT, L. P.; HEINECK, K. S.; CERATTI, J. A. P.; CONSOLI, N. C. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos**. Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, v.25, n.1, p.15-34, 2002.

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.

STAUFFER, S. D.; HOLTZ, R. D. **Stress-strain and strength behavior of staple fiber and continuous filament-reinforced sand**. Transportation Research Record, Washington, D.C., n.1474, p.82-95, 1996.

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

TEODORO, J. M. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de São Carlos - USP, São Paulo – SP, 1999.

ULBRICH, L. A. **Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS. Porto Alegre – RS. 1997.

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 (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Porto Alegre - RS, 2003.