

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**SAED HASSAN HUSEIN KANAAN**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DE UM SOLO ARENOSO COM A  
ADIÇÃO DE FIBRAS PROVENIENTES DE GARRAFA PET**

**Alegrete  
2018**

**SAED HASSAN HUSEIN KANAAN**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DE UM SOLO ARENOSO COM A  
ADIÇÃO DE FIBRAS PROVENIENTES DE GARRAFA PET**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann

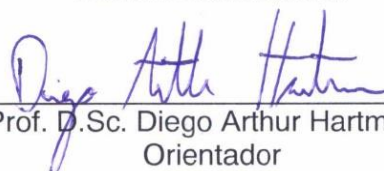
**Alegrete  
2018**

**SAED HASSAN HUSEIN KANAAN**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

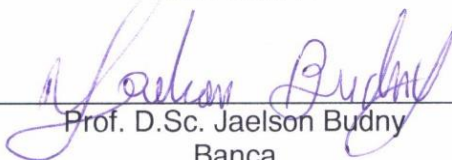
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em:

Banca examinadora:



---

Prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann  
Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof. D.Sc. Jaelson Budny  
Banca  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco  
Banca  
UNIPAMPA

*Dedico este trabalho...*

*... Primeiramente aos meus pais, Hassan e Mabel, pelas batalhas que conquistaram para tornar meu sonho em realidade.*

*...Aos meus irmãos Ghalie, Samia, Fade e Faed, por sempre fornecerem apoio para as minhas conquistas. Agradecer ao meu amor Micheli pelo grande apoio e incentivo.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar do meu lado em todas as dificuldades encontradas, sempre mostrando o caminho correto, mesmo que com obstáculos, sabendo que eu poderia vencer.

A minha família, ao meu Pai Hassan e mãe Mabel, por trabalhar duro todos os dias, para que este sonho seja realizado. Aos meus irmãos, Ghalie, Faed, Samia e Fade, por sempre orarem, transmitindo força e por ser meu incentivo de cada dia. Ao meu amor, Micheli me ajudando ser mais forte como pessoa, sendo fundamental para essa construção, mostrando sempre que o resultado de todo o esforço, valeria a pena no final.

Agradecimento especial, ao Professor Diego Hartmann, primeiramente pelo excelente profissionalismo. Sempre mostrou interesse, dedicação e apoio para a pesquisa, para as dificuldades encontradas com resultados, e busca de alternativas. Obrigado também, por disponibilizar os finais de semana, para auxílio nos compromissos laboratoriais.

Agradeço a todos amigos que participaram desta caminhada, em especial, Vitor Escobar por sempre estar à disposição para soluções de problemas, Leonardo Richter por dar apoio na produção de fibras, Mateus Montadon por estar à disposição quando necessário.

Obrigado a todos que estiveram do meu lado!

## RESUMO

A utilização de fibras como reforço de solo gera um compósito denominando fibrossolo. Solos acrescidos por determinados tipos de fibras, podem apresentar melhorias em muitos parâmetros de engenharia, como a resistência a compressão, onde a inclusão de fibras eleva a capacidade mecânica do material compósito. O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de solos reforçados com fibras provenientes de garrafas PET, submetidos a ensaios de compressão simples. O programa experimental constituiu na realização de ensaios com a caracterização do solo para jazida estudada. Para os ensaios de compactação foram ensaiados, os teores de 1,0 e 2,0 % de fibras de 20 mm de comprimento, onde foram registradas, modificações significativas para umidade ótima, com a adição de 2% de fibra. Foram realizados os ensaios de compressão simples para os teores de 1,0% e 1,5 % de fibras, para os comprimentos de 10 e 20 mm de fibra lisa, e 20 mm de fibra escarificada. Nesta pesquisa, busca-se comparar e avaliar o comportamento do solo natural e com adições de fibras. Comparar-se-ão os efeitos de diferentes comprimentos e teores de fibras nas propriedades mecânicas das amostras através da curva tensão deformação. A partir da análise dos resultados, foi possível observar alterações na resistência provocadas pela adição de fibras PET na matriz do solo estudado. A adição de fibras, em geral, proporcionou um aumento de resistência à compressão de pico e pós-pico, onde as amostras com adição de fibras, apresentaram maiores deformações até atingirem a ruptura, ou seja, proporcionaram maior ductilidade para mistura com adição de fibras. A influência da adição de fibras para o solo, registrou melhor resultado para as fibras de maior comprimento, e não necessariamente para as maiores porcentagens. A mistura ótima alcançada nesta pesquisa foi com a adição de 1% de fibra escarificada com 20 mm de comprimento.

Palavras-chave: solo reforçado, garrafas PET, fibras de PET, reciclagem, ensaio de compressão simples.

## **ABSTRACT**

The use of fibers as soil reinforcement generates a composite called fibrosoil. Soils added by certain types of fibers may show improvements in many engineering parameters, such as compressive strength, where the inclusion of fibers increases the mechanical capacity of the composite material. The present work aims to analyze the behavior of soils reinforced with fibers from PET bottles, submitted to simple compression tests. The experimental program consisted in carrying out tests with the characterization of the soil for the studied field. For the compaction tests, the contents of 1.0 and 2.0% of fibers of 20 mm in length were tested, where significant changes were recorded for optimum moisture with the addition of 2% fiber. The simple compression tests for the contents of 1.0% and 1.5% of fibers were carried out for 10 and 20 mm lengths of plain fiber and 20 mm of scarified fiber. In this research, we seek to compare and evaluate the natural soil behavior and fiber additions. The effects of different fiber lengths and fiber contents on the mechanical properties of the samples will be compared through the stress strain curve. From the analysis of the results, it was possible to observe changes in the resistance provoked by the addition of PET fibers in the matrix of the studied soil. The addition of fibers generally provided an increase in peak and post-peak compression strength, where the samples with fiber addition showed higher deformations until reaching rupture, that is, they provided greater ductility for mixing with addition of fibers. The influence of the addition of fibers to the soil, recorded better results for the fibers of greater length, and not necessarily for the greater percentages. The optimum blend achieved in this study was the addition of 1% 20 mm long scarified fiber.

**Key words:** reinforced soil, pet bottles, PET fibers, recycling, simple compression test.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formação de uma superfície de cisalhamento.....	(20)
Figura 2 – Esquemática do ensaio de compressão simples.....	(21)
Figura 3 – Curva tensão x deformação.....	(22)
Figura 4 – A Grande Muralha da China.....	(23)
Figura 5 – Pirâmide Zigurate na Mesopotâmia.....	(23)
Figura 6 – Disposição fibra/fissura ideal.....	(26)
Figura 7 – Parâmetros do ensaio de compactação.....	(35)
Figura 8 – Curvas de tensão x deformação para ensaios de compressão.....	(36)
Figura 9 – Curva de tensão x deformação obtida no ensaio triaxial.....	(37)
Figura 10 – Localização da jazida.....	(39)
Figura 11 – Vista Superior da Jazida.....	(40)
Figura 12 – Filetador para produção das fibras PET.....	(41)
Figura 13 – Escarificação das garrafas PET.....	(42)
Figura 14 – Fibras de PET.....	(43)
Figura 15 – Fluxograma de ensaios.....	(44)
Figura 16 – Coleta e preparação do solo.....	(45)
Figura 17 – Realização do ensaio de sedimentação.....	(46)
Figura 18 – Realização do ensaio de análise granulométrica.....	(47)
Figura 19 – Aparelho de Casagrande.....	(47)
Figura 20 – Realização do ensaio de limite de plasticidade (LP).....	(48)
Figura 21 – Equipamentos para o ensaio de compactação.....	(50)
Figura 22 – Execução do ensaio de compactação.....	(50)
Figura 23 – Amostras obtidas no ensaio de compactação.....	(51)
Figura 24 – Misturas realizadas.....	(55)
Figura 25 – Amostras com adição de 2%.....	(55)
Figura 26 – Macaco hidráulico para compactação estática.....	(57)
Figura 27 – Materiais utilizados na moldagem dos corpos de prova.....	(57)
Figura 28 – Moldagem dos corpos de prova.....	(58)
Figura 29 – Equipamento utilizado para os ensaios de resistência à compressão.....	(59)
Figura 30 – Amostras de solo natural após ruptura.....	(62)
Figura 31 – Amostras de solo + Fibra de 10 mm após ruptura.....	(62)
Figura 32 – Amostras de solo + Fibra de 20 mm após ruptura.....	(64)



Figura 33 – Amostras de Solo + Fibra Escarificada após ruptura.....(68)

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massa específica máxima e umidade ótima.....	(34)
Tabela 2 - Valores obtidos no ensaio de compressão simples.....	(35)
Tabela 3 – Valores de resistência à compressão simples.....	(36)
Tabela 4 – Coordenadas geográficas dos pontos da jazida.....	(40)
Tabela 5 – Valores médios das propriedades mecânicas à tração para fibras PET.....	(45)
Tabela 6 – Propriedades físicas do solo.....	(48)
Tabela 7 – Composição granulométrica.....	(49)

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aplicações para reutilização de garrafas PET.....	(30)
Quadro 2 – Índice de vazios para cada mistura.....	(56)
Quadro 3 – Composições das amostras para o ensaio de compressão simples.....	(60)
Quadro 4 - Resultados obtidos de resistência à compressão de pico, deslocamento máximo de pico e índice de vazios para todas as misturas.....	(67)

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Consumo de Embalagens de PET no Brasil.....	(29)
Gráfico 2 – Evolução da Reciclagem de PET no Brasil.....	(30)
Gráfico 3 – Curva granulométrica do solo.....	(49)
Gráfico 4 – Curva de compactação para o solo natural.....	(51)
Gráfico 5 – Curva de compactação para o solo com adição de 1% de fibra.....	(52)
Gráfico 6 – Curva de compactação para o solo com adição de 2% de fibra.....	(53)
Gráfico 7 – Curva de compactação para as misturas analisadas.....	(53)
Gráfico 8 – Tensão de compressão máxima pelo índice de vazios das misturas de solo natural e solo + fibras de 10 mm.....	(61)
Gráfico 9 – Tensão de compressão máxima pelo índice de vazios das misturas de solo natural e solo + fibras de 20 mm.....	(63)
Gráfico 10 – Gráfico 10 - Tensão de compressão máxima pelo índice de vazios das misturas de solo natural e solo + fibras de 20 mm.....	(64)
Gráfico 11 – Tensão normalizada e deslocamento vertical para as amostras de solo natural, solo + fibras lisas e solo + fibras escarificadas.....	(66)
Gráfico 12 – Tensão máxima de compressão para todas as misturas.....	(68)
Gráfico 13 – Deslocamento máximo vertical para todas as misturas.....	(69)

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\gamma_d$  – Peso Específico Aparente Seco

$\varphi$  – Ângulo de Atrito

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria de PET

$c$  – Intercepto Coesivo

$f$  – Coeficiente de atrito interno

CBR – Índice de Suporte Califórnia

SPT – Standard Penetration Test

CPT – Cone Penetration Test

$F_t$  – Resistência à tração da fibra

$F_a$  – Resistência de aderência fibra/matriz

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

GPS – Global Positioning System

$\mu\text{m}$  – Micrometro

$\varepsilon$  – Deformação

$E$  – Módulo de Elasticidade

$\sigma$  – Tensão Normal

$\tau$  – Tensão Cisalhante

$N$  – Força Vertical

$l$  – Comprimento da fibra

$l/d$  – Fator de forma ( relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra)

PET – Polietileno Tereftalato

TR – Tratamento

Fibra Lisa – Fibra sem tratamento superficial

Escar. – Escarificação

$T$  – Tensão de compressão (kPa)

$T$  (máx) – Tensão de compressão máxima (kPa)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1 Problema e relevância da pesquisa</b> .....	16
<b>1.2 Objetivos</b> .....	17
<b>1.2.1 Objetivos gerais</b> .....	17
<b>1.2.2 Objetivos específico</b> .....	17
<b>1.3 Justificativa</b> .....	18
<b>1.4 Estrutura do Trabalho</b> .....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
<b>2.1 Resistência à compressão do solo</b> .....	20
<b>2.2 Ensaio de resistência à compressão</b> .....	21
<b>2.2.1 Ensaio de resistência à compressão simples</b> .....	21
<b>2.3 Solos reforçados</b> .....	22
<b>2.3.1 Reforço de solos com fibras</b> .....	22
<b>2.4 Materiais compósitos cimentados reforçados com fibras</b> .....	25
<b>2.5 Tipos de fibras utilizadas como reforço</b> .....	27
<b>2.5.1 Fibras naturais</b> .....	27
<b>2.5.2 Fibras poliméricas</b> .....	28
<b>2.5.2.1 Fibras de PET</b> .....	28
<b>2.5.2.1.1 Utilização das garrafas PET recicladas</b> .....	29
<b>2.5.2.2 Fibras de polipropileno</b> .....	31
<b>2.5.2.3 Fibras de polietileno</b> .....	31
<b>2.5.2.4 Fibras de poliamida (Kevlar)</b> .....	31
<b>2.5.3 Fibras minerais</b> .....	31
<b>2.5.3.1 Fibras de carbono</b> .....	31
<b>2.5.3.2 Fibras de vidro</b> .....	32
<b>2.5.3.3 Fibras de amianto</b> .....	32
<b>2.5.4 Fibras metálicas</b> .....	32
<b>2.6 Alterações no comportamento do solo com a inclusão de fibras</b> .....	33
<b>2.6.1 Compactação dos solos</b> .....	33
<b>2.6.2 Resistência à compressão de pico</b> .....	35
<b>2.6.3 Solos arenosos</b> .....	35
<b>2.6.4 Resistência à compressão pós-pico</b> .....	36
<b>2.6.5 Variação volumétrica</b> .....	37
<b>2.6.6 Modo de ruptura</b> .....	38
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	39
<b>3.1 Materiais utilizados</b> .....	39
<b>3.1.1 Solo</b> .....	39
<b>3.1.2 Fibras</b> .....	41
<b>3.1.3 Água</b> .....	43
<b>3.2 Metodologia</b> .....	43
<b>3.2.4 Dosagem e mistura</b> .....	54
<b>3.2.5 Ensaio de compressão simples</b> .....	58
<b>4.1 Resistência a compressão</b> .....	60
<b>4.1.1 Análise dos resultados dos ensaios de compressão simples em função do comprimento de fibra</b> .....	60
<b>4.1.1.1 Solo+Fibra 10 mm</b> .....	61

<b>4.1.1.2 Solo + Fibra 20 mm</b> .....	62
<b>4.1.1.3 Solo + Fibras Escarificadas</b> .....	63
<b>4.1.2 Influência da adição de fibras na capacidade de deformação das misturas</b> .....	65
<b>4.2. Análise global dos resultados</b> .....	66
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES</b> .....	70
<b>5.1 Considerações Finais</b> .....	70
<b>5.2 Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	72
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	73

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Problema e relevância da pesquisa

Com o crescimento de centros urbanos, houve uma grande exploração de solos com boa capacidade mecânica, tornando cada vez mais necessária a utilização de transporte para obter materiais mais resistentes. As técnicas de reforço do solo, tem como principal objetivo a melhoria, das propriedades do material, visando uma aplicação simples e econômica.

No Brasil, obras de pavimentos rodoviários, apresentam, em geral, grande dificuldade em atender as exigências de qualidade de projeto. Muito se deve a erros de execução, mas também pela baixa resistência das camadas de base e sub-base utilizadas. Para solucionar estes problemas, engenheiros buscam uma saída técnica, ambiental e economicamente viável para realização da obra. Projetar e executar obras em condições de solo de baixa resistência, implica em soluções caras, com elevada relação custo-benefício, muitas vezes inviabilizando obras de pequeno porte (SILVA, 2007).

Para solucionar este problema, uma alternativa é a remoção do material existente no local, substituindo-o por outro que atenda as solicitações de projeto. Porém, isso seria contra condicionantes ambientais, tendo grande desperdício de material, assim uma sugestão é o reforço do solo no próprio local. Com o melhoramento do solo, tem-se um produto final, com maior resistência e baixa deformação, exigidas em projeto.

O conceito que envolve a utilização de reforço no solo com materiais que apresentam resistência à tração é muito antigo. Por volta de 1000 A.C, por exemplo, hastes de bambu e junco já eram empregadas no reforço de tijolos de barro e solos granulares para auxílio de variadas obras de arte (SPETCH, 2000). Quando se fala em soluções para melhoramento de solo, a estabilização química é a pratica mais procurada, tendo início na década de 1930 no Brasil, sendo ainda hoje, a técnica mais conhecida para melhoria de solos, onde o material tratado ganha aumento de resistência, diminuindo sua compressibilidade e permeabilidade. Para Casagrande (2001), o termo melhoria de solos está associado a utilização de processos químicos, enquanto o termo reforço está associado à inclusões em aterros ou taludes.

Como alternativa à estabilização química do solo, vem sendo analisada a adição de fibras ao solo, levando o material composto apresentar melhores características mecânicas. O solo, desde que corretamente compactado, em geral, apresenta boa resistência à compressão e ao cisalhamento. No entanto a resistência à tração, é baixa ou nula. De modo similar ao que se verifica no concreto armado, a adição de fibras supre essa deficiência (EHRlich e BECKER, 2009).



Embora a técnica de reforço seja utilizada há muito tempo pela humanidade, com a inclusão de fibras vegetais ao solo, recentes avanços na área de ciência e engenharia de materiais conduziram ao desenvolvimento de materiais mais resistentes e mais duráveis, como as fibras poliméricas (CASAGRANDE, 2005).

A população vive a era dos polímeros, em que plásticos, fibras, elastômeros, adesivos, borrachas, geossintéticos, etc., tornaram-se termos comuns no nosso cotidiano (BUENO, 2004). A grande maioria dos geossintéticos é formada por polímeros sintéticos, onde os mais utilizados são o polietileno tereftalato (PET), o polipropileno (PP), o polietileno (PE) e o álcool de polivinila (PVA) (EHRLICH E BECKER, 2009).

Com aumento do consumo de materiais poliméricos pela humanidade, também elevou a disposição inadequada destes resíduos no meio ambiente, entre eles pode-se citar garrafas (PET) e pneus, ambos com elevado tempo de decomposição (300 à 600 anos). A engenharia busca reduzir estes ataques a natureza, em paralelo, realizar pesquisas para a correta reutilização de alguns rejeitos para reforço de solos.

No que tange à utilização das fibras de PET, tendo em vista sua origem e destino, é de grande importância dar o encaminhamento correto devido à grande dificuldade que o meio ambiente enfrenta com sua disposição inadequada (SILVA, 2007).

O PET é um plástico de grande popularidade. Para Mano (1991) todo esse sucesso, se deve, às suas excelentes propriedades, a exemplo das altas resistências mecânicas, térmica e química, aspecto nobre (brilho e transparência), parcialmente cristalina, barreira de gases, entre outras.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivos gerais**

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a influência que a adição de fibras PET exerce nos resultados de resistência à compressão, de um solo arenoso localizado na cidade de Alegrete/RS.

### **1.2.2 Objetivos específico**

- a) Caracterizar o solo da jazida estudada, para posterior preparação das amostras de solo natural e solo com acréscimo de fibras;
- b) Analisar a influência da adição de fibras PET na compactação do solo, analisando os parâmetros de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo;

- c) Realizar os ensaios de compressão simples e determinar a resistência de pico à compressão e deslocamento máximo vertical para o solo natural e solo acrescido de fibras;
- d) Verificar se os resultados obtidos no ensaios são satisfatórios, e se o método de reforço do solo com fibras PET é uma alternativa tecnicamente viável.

### 1.3 Justificativa

A região oeste do estado do Rio Grande do Sul possui, solo proveniente da formação Botucatu, que é de origem residual, com coloração avermelhada, textura arenosa e apresenta baixo teor de umidade natural. Este tipo de solo, em geral, não apresenta uma boa capacidade mecânica. Outra característica natural do solo, possui baixa ou nula plasticidade e praticamente nenhuma resistência a tração (KLAMT, 2012).

A inclusão de fibras no material tem como objetivo, esperados o aumento de resistência de suporte do material, maior absorção de energia, queda na redução de resistência pós-pico, melhor capacidade de absorção de deformações até atingir a resistência última, entre outros (CASAGRANDE, 2001).

Com a adição de fibras de PET no solo da região oeste do RS, esta pesquisa pretende aumentar a capacidade mecânica deste, conferindo parâmetros de resistência à compressão satisfatórios.

### 1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho será dividido em 6 capítulos:

**Capítulo 1** - Apresenta a introdução, o tema da pesquisa, objetivos gerais e específicos e a estrutura do trabalho;

**Capítulo 2** - Apresenta a revisão bibliográfica;

**Capítulo 3** - Apresenta os materiais e métodos que foram utilizados, a localização da jazida, as características principais do solo em análise, as fibras utilizadas, os teores acrescidos no solo e ensaios realizados.

**Capítulo 4** - Apresenta os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. São realizadas comparações entre o solo natural e as misturas estudadas. Foram analisadas as modificações dos parâmetros físicos e mecânicos para as diferentes misturas.

**Capítulo 5** – São apresentadas as conclusões obtidas no estudo, assim como sugestões para trabalhos futuros.

**Capítulo 6** – Apresenta as referências bibliográficas que auxiliaram na pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

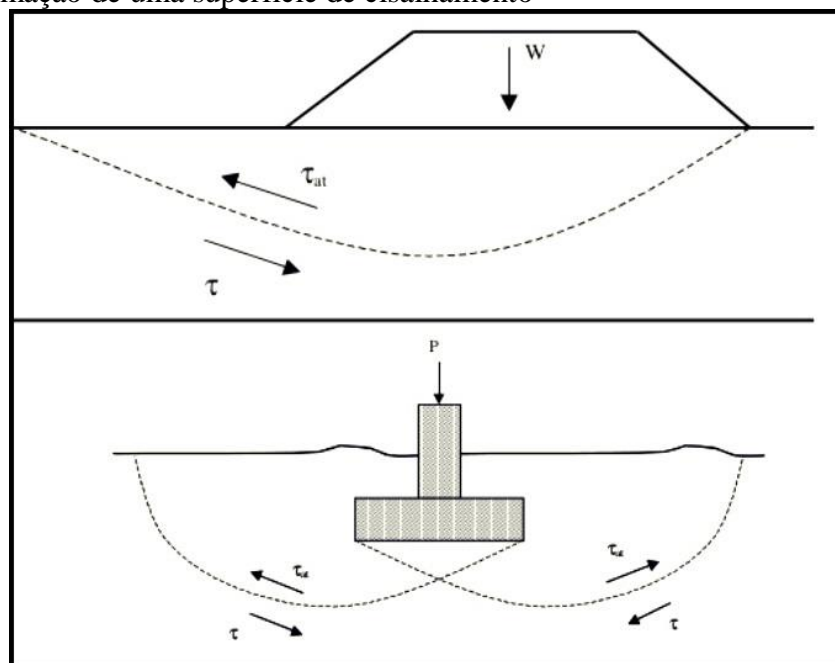
### 2.1 Resistência à compressão do solo

A resistência a compressão de um maciço de solo, é a máxima pressão ou carga vertical, que pode ser aplicada ao material, sem que ocorra sua ruptura (PINTO, 2006; MARANGON, 2009).

No momento que um carregamento vertical é aplicado na superfície do solo, este pode sofrer com deformações ou deslocamentos verticais. As deformações podem ser de dois tipos: as que ocorrem rapidamente após a construção sobre sua superfície, e as que se desenvolvem de forma lenta após a aplicação das cargas (DAS, 2007). Deformações rápidas são observadas em solos arenosos ou solos argilosos não saturados, enquanto que nos solos argilosos saturados os recalques são mais lentos, quando se faz necessária a expulsão da água dos vazios do solo (PINTO,2006). Esta deformação vertical da massa do solo, são recalques por cargas verticais, que podem ser vistos em edificações com fundações superficiais, aterros sobre solos de baixa capacidade mecânica ou mal compactados.

A baixa capacidade de suporte do solo, além da deformação do material, pode ocasionar posteriormente ruptura, com a formação de uma superfície de cisalhamento, fenômeno esquematizado na Figura 1.

Figura 1 –Formação de uma superfície de cisalhamento



Fonte: Adaptado de Bastos (2014)

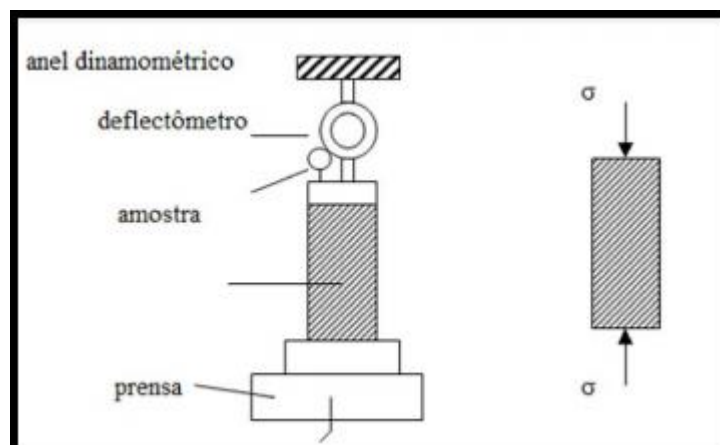
## 2.2 Ensaio de resistência à compressão

São vários os ensaios de laboratório que buscam, com variados graus de sofisticação, representar as condições possíveis de ocorrências. Os ensaios mais empregados para a determinação da resistência à compressão dos solos são: o ensaio de compressão simples e o ensaio de compressão triaxial (PINTO, 2006).

### 2.2.1 Ensaio de resistência à compressão simples

O Ensaio de resistência a compressão simples é utilizado para a determinação da tensão máxima de compressão e o deslocamento máximo que o solo suporta sem romper. O esquema de aplicação de carga do ensaio está representado na Figura 2. Este ensaio já foi muito empregado na verificação da eficácia da adição de fibras sobre a resistência de misturas solo+fibras, dada a sua simplicidade de aplicação e baixo custo.

Figura 2 – Esquemática do ensaio de compressão simples



Fonte: Adaptado de Krainer(2015)

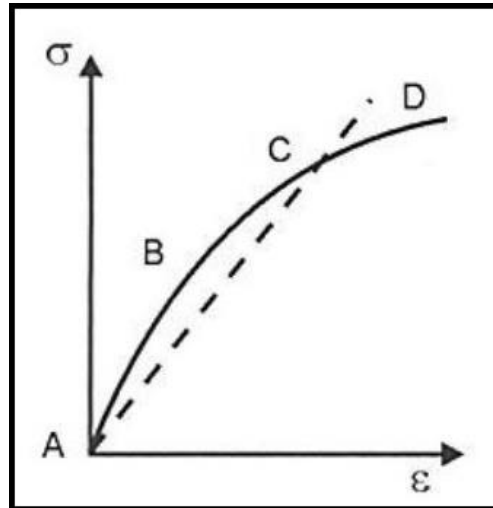
Sachetti (2008), lista; as principais vantagens do ensaio de compressão simples, que são:

- simplicidade de operação;
- facilidade na moldagem das amostras;
- custo;
- confiabilidade;
- amplamente difundido no meio técnico;

O ensaio consiste na moldagem de um corpo de prova cilíndrico e no seu carregamento axial, sem confinamento lateral. São registradas as tensões no plano horizontal (a carga aplicada dividida pela área da seção transversal) pela deformação axial (encurtamento do corpo de prova

dividido pela altura inicial do corpo de prova), e obtém-se a curva tensão x deformação, representada na Figura 3. Mais informações técnicas sobre ensaio estão presentes no Capítulo 3.

Figura 3 – Curva de tensão x deformação



Fonte: Pinto (2006, p.184)

## 2.3 Solos reforçados

### 2.3.1 Reforço de solos com fibras

A técnica de solo reforçado com fibra é comum e utilizada há muito tempo pela humanidade. Mesmo se tratando de uma prática antiga, o uso de reforços representa uma revolução no conceito usualmente seguido em projetos geotécnicos. Na antiguidade, materiais vegetais constituídos de fibras, como hastes de bambu, estivas de junco e palha, eram empregados no reforço de tijolos de barro e solos granulares para auxílio nas construções de distintas obras. Grandes obras que resistem até os dias atuais, como a Grande Muralha da China, (Figura 4), a torre de Agar Quf e o templo Zigurate na Mesopotâmia, (Figura 5), ambas foram executadas empregando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Há registros desta técnica em estradas no Peru, onde os Incas reforçaram o solo com lã de lhama. São conhecidas também, no Brasil, aplicações de mantas de folhas e galhos sobre camadas de solos moles antes da construção de aterros (VENDRUSCOLO, 2003; CASAGRANDE, 2005; EHRlich e BECKER, 2009).

Figura 4 – A Grande Muralha da China



Fonte: Sakamoto (2017)

Figura 5 – Pirâmide Zigurate na Mesopotâmia



Fonte: Bibian (2016)

O Departamento de Estradas da Carolina do Sul nos Estados Unidos, em 1926, foi o pioneiro, a utilizar mantas de algodão como reforço de pavimentos, sendo a aplicação que mais se aproxima do geossintético dos dias atuais (FESTUGATO, 2008). Na década de 1960 o arquiteto francês Henri Vidal, patenteou a técnica denominada “Terra Armada”, assim que solos reforçados começaram a ser empregados no contexto atual, onde o reforço de solo consistia na

aplicação de tiras metálicas conectadas a painéis de concreto que constituíam a face do maciço de solo (VENDRUSCOLO, 2003; EHRLICH e BECKER, 2009).

Entende-se por melhoria ou reforço de solos a utilização de processos físicos e/ou químicos que mirem o melhoramento das propriedades mecânicas. Procura-se, a elevação da resistência do solo tratado e a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade. O termo melhoria de solos está vinculado ao tratamento através de procedimentos químicos, enquanto o termo reforço está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes (CASAGRANDE, 2005).

O processo de reforço de solo incide na introdução no maciço de solo elementos com alta resistência à tração (fitas metálicas, mantas, geotêxteis, geogrelhas, malhas de aço, fibras, etc.) (SPECHT, 2000).

O emprego de geossintéticos no Brasil data do final dos anos 70 e no início dos anos 80, com obras envolvendo aplicações em drenagem e filtração e também reforço de solos. Apesar do substancial crescimento do interesse em geossintéticos no país nos últimos anos, este ainda é considerado tímido (FESTUGATO, 2008).

Em relação as fibras, as de polipropileno, são consideradas as mais promissoras existentes no mercado, oferecendo condições satisfatórias de utilização em alguns setores da construção civil. Aumentando a resistência a tração, sua aplicabilidade é bastante ampla como material de terraplenos, estabilização de solos, pavimentação, e outras aplicações (TRINDADE et al, 2004).

A inserção aleatória de fibras gera um compósito bastante importante para a engenharia geotécnica, denominado fibrossolo. Dessa forma os solos reforçados com determinados tipos de fibras podem apresentar melhorias em muitos parâmetros de engenharia, tornando-se aptos a desempenhar determinadas funções que anteriormente não poderiam (TRINDADE et al, 2004).

Com a riqueza de publicações a respeito, percebe-se a grande aplicabilidade das fibras no setor de construção civil. Desta forma, antes de se pensar em aplicar uma fibra como reforço de solos, devem-se analisar atenciosamente suas características a fim de conhecer melhor todo seu entorno, uma vez que cada fibra possui distinta particularidades (SPECHT, 2000).

O fibrossolo consiste na mistura de solo e fibras sintéticas para aplicação em pavimentos (SPETCH, 2000; HOMEM, 2002), aterros sobre solos moles, estabilidade de taludes (ZORNBERG, 2002) e fundações superficiais (CASAGRANDE et al., 2002).



## 2.4 Materiais compósitos cimentados reforçados com fibras

As propriedades do material produto da combinação de outros materiais, conhecido como material compósito, dependem das características de cada componente da mistura (VENDRUSCOLO, 2003).

Materiais compósitos, segundo Budinski e Budinski (2005), são misturas de dois ou mais materiais diferentes com propriedades inferiores à do material resultante. Assim, formado por duas fases: a matriz (resinas epóxi, concretos, silicões, argamassas, solos, etc.) e o elemento de reforço (fibras, papéis, aço, mica, entre outras) e são desenvolvidos para otimizar os pontos fortes de cada fase.

Para Hannant (1998), Taylor (2000), Vendruscolo (2003), Domone e Illston (2010), o maior potencial dos materiais compósitos constituídos de fibras está no estado pós-fissuração, evitando a propagação de fissuras, onde as fibras contribuem de forma mais eficaz na resistência do material, aumentando a capacidade de absorção de energia. Isto se deve porque a deformação necessária para causar fissuras na matriz cimentada é inferior à elongação das fibras. Taylor (2000) acredita que para haver um aumento de resistência pré-fissuração do compósito será necessária a adição de uma fibra mais rígida que a matriz, onde a aderência do reforço com a matriz dever ser satisfatória para impedir movimentos relativos entre as duas partes.

Mesmo sendo capazes de aumentar a resistência à tração pelo controle da propagação de fissuras, as fibras não impedem a formação de fissuras no compósito (TAYLOR,2000). Para Hannant (1998), as fibras mantêm as interfaces das fissuras juntas, aumentando a ductilidade no estado pós-fissuração. As fibras que “atravessam” as fissuras colaboram para o aumento da resistência, da deformação de ruptura e da tenacidade dos compósitos.

Para Taylor (2000), os principais parâmetros relacionados com o desempenho dos materiais compósitos fibrosos:

- a) Teor de fibra: um alto teor de fibras possibilita maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras consigam absorver as cargas adicionais causadas pelo surgimento das fissuras;
- b) Rigidez da fibra: um alto valor de módulo de elasticidade causaria um efeito similar ao teor de fibra, mas, na realidade, quanto maior o valor do módulo, maior a probabilidade de haver uma ruptura do compósito por arrancamento das fibras;
- c) Aderência entre a fibra e a matriz: A aderência entre a matriz e o reforço é o fator essencial para as características de resistência, deformação e modo de ruptura de uma

vários materiais compósitos à base de cimento. Uma alta aderência provoca a redução no tamanho das fissuras e aumento da distribuição destas fissuras pelo compósito;

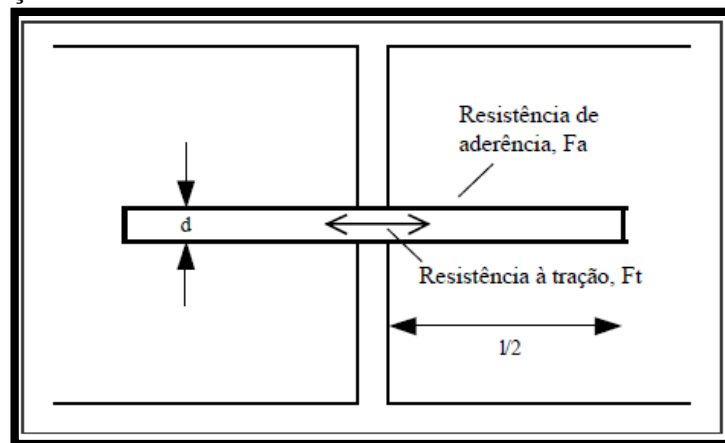
- d) Resistência da fibra: Aumentando a resistência das fibras, aumenta-se também, a ductilidade do compósito, considerando que não ocorra o rompimento das ligações de aderência. A resistência necessária pra uma fibra, depende, na prática, das características almejadas pós-fissuração, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz;
- e) Comprimento de fibra: Quanto maior o comprimento das fibras, menor a possibilidade de arrancamento das mesma. Para uma certa tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta será melhor aproveitada se o seu comprimento for suficiente para permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão trativa igual à sua resistência à tração.

Apresentado por Taylor (2000) e Domone e Ilston (2010), o equacionamento de como seria o equilíbrio de forças no momento em que a fibra é solicitada no interior do compósito, como se pode observar nas equações 1 e 2 mostradas abaixo, e demonstrado na Figura 6.

$$\frac{\pi d^2}{4} * Ft = \pi * d * \frac{1}{2} * Fa \quad (1)$$

$$\frac{l}{d} = \frac{Ft}{2 * Fa} \quad (2)$$

Figura 6 – Disposição fibra/fissura ideal



Fonte: Adaptado de Taylor (2000)

Fica evidente a importância do comprimento da fibra e do diâmetro da mesma. A relação  $l/d$  (comprimento/diâmetro), ou fator de forma como é conhecida, é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra ( $Ft$ ) e a resistência de aderência fibra/matriz ( $Fa$ ). Se a fibra

possuir uma alta resistência à tração, deve-se utilizar fibras de alta relação l/d, ou então a resistência de aderência deverá ser suficiente para evitar o seu arrancamento.

## **2.5 Tipos de fibras utilizadas como reforço**

No mercado há uma ampla variedade de fibras que podem ser utilizadas em materiais compósitos fibrosos. O processo de fabricação e o material de composição, é o que diferencia o comportamento e a característica de cada fibra.

Com a grande quantidade de fibras disponíveis, para se fazer uso ou eleger aquela que melhor se adapta à devida utilização, deve-se, antes de tudo, conhecer suas características (VENDRUSCOLO, 2003).

Silva (2004), divide as fibras de acordo com sua elasticidade, em fibras de alto e baixo módulo, possuindo aplicações diferentes. As fibras de alto módulo possuem a capacidade de aumentar a resistência do compósito, principalmente a de tração. Fibras que possuem baixo módulo, tem a oferecer melhor resistência ao impacto e permitir ao compósito trabalhar no estágio pós-fissurado proporcionando um aumento considerável de sua tenacidade. O autor ainda relata que as fibras podem ser classificadas de acordo com sua composição, em orgânicas (vegetais e poliméricas) e inorgânicas (minerais e metálicas).

Algumas características importantes devem ser levadas em conta na escolha da fibra para reforço de materiais: a fibra deve ser quimicamente neutra e não deteriorável, não sofrer ataques de fungos, bactérias ou álcalis e não ser prejudicial à saúde humana, apresentando também características físicas e mecânicas adequadas.

As fibras podem ser classificadas em quatro grandes grupos: naturais, poliméricas, minerais e metálicas, abordadas individualmente a seguir.

### **2.5.1 Fibras naturais**

Os primeiros tipos de fibras a serem utilizados na história da humanidade foram as fibras naturais. As fibras naturais apresentam uma grande gama de variedade no que diz respeito aos tipos disponíveis no mercado. Dentre as fibras vegetais mais utilizadas em materiais compósitos podemos citar as fibras de coco, juta, sisal, celulose, bambu, cana-de-açúcar, e etc. (VENDRUSCOLO, 2003). Algumas destas fibras podem atingir elevadas resistências, como por exemplo, as fibras de bambu atingem normalmente resistências acima de 100 MPa, com módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa (FESTUGATO, 2008).

A avaliação da durabilidade dos compostos constituídos com fibras vegetais é o principal problema a ser analisado, pois podem ser degradadas pela adição de fungos e microorganismos (CASAGRANDE, 2005). Para Silva (2007), este processo é fruto da ação dos fungos apodrecedores que processam a lignina, removendo-a.

Segundo Silva (2004), as fibras naturais apresentam um grande número de vantagens sobre as fibras sintéticas que podem justificar o seu uso como reforço em matrizes, tanto cimentícias como poliméricas, entre elas são:

- Conservação de energia;
- Grande variedade e fácil obtenção;
- Baixo custo;
- Não prejudicial à saúde;
- Possibilidade de incremento na economia agrícola;
- Prevenção de erosão;
- Baixa densidade;
- Biodegradáveis.

Segundo Domone e Illston (2010), as fibras vegetais estão sendo substituídas por outros materiais fibrosos na engenharia civil, por apresentarem as seguintes desvantagens:

- Propriedades de baixa resistência, principalmente ao impacto;
- Grande variabilidade de qualidade;
- Absorção à umidade;
- Restrição para a temperatura de processamento máxima;
- Menor Durabilidade
- Baixa resistência ao fogo;
- Instabilidade dimensional

## **2.5.2 Fibras poliméricas**

### **2.5.2.1 Fibras de PET**

Um dos poliésteres mais conhecido é o PET, atualmente utilizado na fabricação de garrafas tipo “PET”. A aparência das fibras de poliéster é similar às fibras de polipropileno porém mais densas, mais rígidas e mais resistentes (SPETCH, 2000).

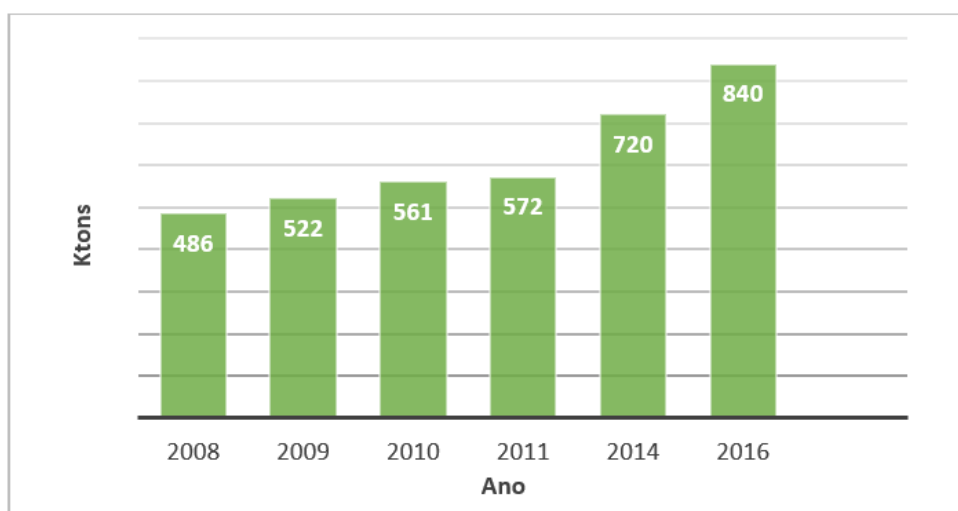
O PET tem como características, elevada resistência mecânica (ao impacto) e química, além de ser excelente barreira para gases e odores. Devido seu aspecto e peso muito menor que das embalagens tradicionais, esse material se mostrou ideal para a indústria de bebidas em todo o mundo, reduzindo custos de transporte e produção (GUELBERT, 2007).

Com a alta utilização de PET nos últimos anos, e do fato de sua decomposição ser muito lenta, tem-se um aumento considerável de geração de resíduos. As embalagens de polietileno tereftalato (PET) são facilmente encontradas no lixo, com a produção de milhões de toneladas por ano no mundo, uma das alternativas cabíveis a essa situação, diz respeito à reciclagem desses materiais (SILVA, 2007).

Somente no final da década de 60 que o PET começou a ser aplicado em embalagens. Por possuir características de leveza, transparência, brilho e principalmente boas propriedades mecânicas, fazem dele um material adequado para fabricação de garrafas de bebidas carbonatadas como os refrigerantes. Posteriormente, na década de 80, o PET chegou ao Brasil, tendo aplicação inicial na indústria têxtil e somente em 1993 passou a ser intensamente utilizado no mercado de embalagens para refrigerantes (SILVA, 2007).

O Gráfico 1 mostra a evolução do consumo de PET no Brasil em mil toneladas por ano, dados fornecidos pela Associação Brasileira da Indústria de PET (ABIPET).

Gráfico 1 – Consumo de Embalagens de PET no Brasil.



Fonte: ABIPET (2016, p.10)

#### 2.5.2.1.1 Utilização das garrafas PET recicladas

Com o processo de reciclagem, além de ter a diminuição do impacto ambiental, é uma questão fundamental para um crescimento auto sustentável, possuindo uma função social de

grande importância. O incentivo da reciclagem proporciona a retirada de trabalhadores dos grandes lixões, direcionando-os para o trabalho em cooperativas organizadas (KLEUBER et al, 2004).

A evolução do mercado e os avanços tecnológicos têm impulsionado novas aplicações para a PET reciclada. Algumas dessas confecções oferecidas pela reutilização deste material são listadas no Quadro 1.

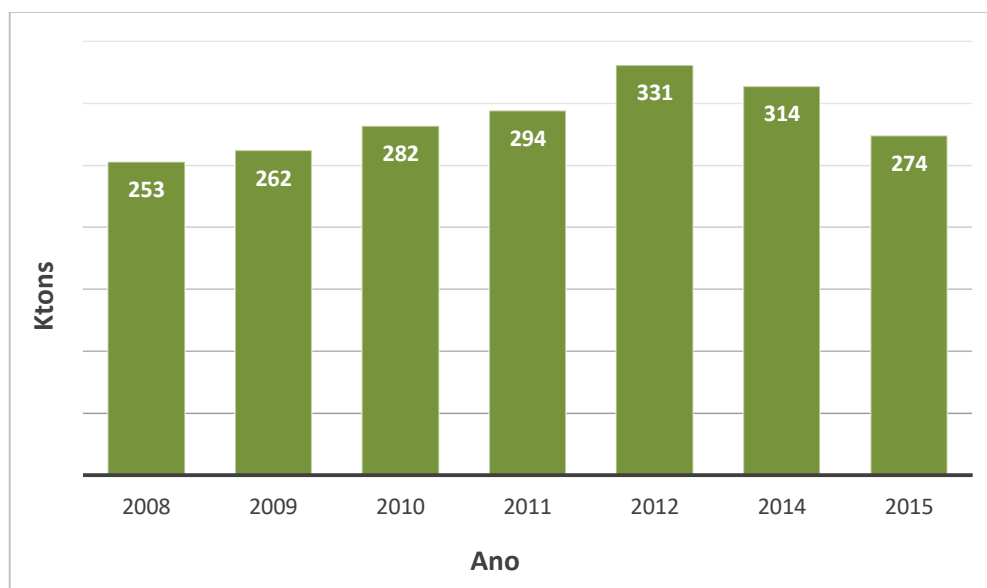
Quadro 1 – Aplicações para reutilização de garrafas PET.

Aplicações para o PET reciclado	
Área	Produtos
Têxtil	Roupas, mantas e edredom
Utilidades de casa	Cordas de varal, vassouras, cabides
Construção civil	Tubos e conexões, torneiras, piscinas, telhas e mármore reciclado
Sinalização viária	Placas indicativas, luminosos, sinalização horizontal

Fonte: ABIPET (2016)

Nos últimos anos, setores importantes, como têxtil, químico, automotivo e de transporte tiveram quedas de quase 50% em suas atividades, refletindo de forma negativa para reciclagem, já que são grandes consumidores de matéria prima reciclada. Foi registrado uma queda da reciclagem de PET no Brasil em 2015, apresentando uma taxa de 51%. O Gráfico 2 apresenta os valores do 10º censo de reciclagem no Brasil para os últimos anos. (ABIPET, 2016).

Gráfico 2 – Evolução da Reciclagem de PET no Brasil.



Fonte: ABIPET (2016, p.11)

### **2.5.2.2 Fibras de polipropileno**

As fibras de polipropileno são constituídas de um material que adquire consistência plástica com o acréscimo da temperatura, denominado termoplástico. Esse tipo de polímero é formado por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas entre si de forma que possam deslizar umas sobre as outras (HOLLAWAY, 2010).

Estas fibras possuem grande flexibilidade e tenacidade, seu módulo de elasticidade gira em torno de 8 GPa (menor que outras fibras) e sua resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Outra característica dessa fibra é possuir elevada resistência ao ataque de vários produtos químicos e aos álcalis (TAYLOR, 2000).

### **2.5.2.3 Fibras de polietileno**

As fibras de polietileno são disponibilizadas comercialmente em forma de monofilamentos picados ou malhas contínuas. Essas fibras possuem fraca aderência com a matriz cimentada, baixo módulo de elasticidade e boa resistência aos álcalis (HANNANT, 1998). Segundo Girardello (2010), tem sido desenvolvido um polietileno de alta densidade para solucionar os problemas de baixa aderência e módulo.

### **2.5.2.4 Fibras de poliamida (Kevlar)**

A fibra poliamida aromática, conhecida no mercado como Kevlar, possui maior sucesso entre as fibras orgânicas. Existem dois tipos de Kevlar, o Kevlar 29, cuja resistência mecânica é da ordem de 3000 MPa e módulo de elasticidade médio é de aproximadamente 64 GPa, e o Kevlar 49, apresenta resistência igual ao do Kevlar 29, porém seu módulo é de 300 GPa (HOLLAWAY, 2010).

## **2.5.3 Fibras minerais**

Dentre as fibras minerais podemos citar as de carbono, vidro e amianto, apresentadas na sequência.

### **2.5.3.1 Fibras de carbono**

Estes materiais são os mais atuais e promissores no desenvolvimento de materiais compósitos (SPETCH, 2000). São baseados na leveza e na resistência das ligações entre os átomos de carbono. As fibras de carbono tem diâmetros que variam entre 5 e 10  $\mu\text{m}$ , sendo

formadas por agrupamentos que chegam a conter até 20.000 filamentos (MAGALHÃES, 2005).

As fibras de carbono podem ser divididas em duas categorias: fibras com elevada resistência (resistência à tração de aproximadamente 2400 MPa e módulo de elasticidade de 240 GPa) e fibras de alto módulo (resistência à tração de 2100 MPa e módulo de 420 GPa). A resistência da ligação da fibra com a matriz deve ser relativamente alta, caso contrário, as fibras serão arrancadas sob cargas menores (VENDRUSCOLO, 2003).

### **2.5.3.2 Fibras de vidro**

As fibras de vidro na maioria da vezes, são manufaturadas na forma de “cachos”, isto é, fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos. O diâmetros destes filamentos depende das propriedades do vidro, tamanho do furo por onde serão extrusados e da velocidade de extrusão, mas geralmente são da ordem de 10  $\mu\text{m}$  (TAYLOR, 2000).

As fibras de vidro produzidas a partir do vidro tipo E, cerca de 99%, são susceptíveis ao ataque dos álcalis presentes nos materiais baseados em cimento Portland (TAYLOR, 2000; CASAGRANDE, 2005).

### **2.5.3.3 Fibras de amianto**

Segundo Vendruscolo (2003), a fibra amianto apresenta ótimas características mecânicas, se comparada às demais fibras disponíveis no mercado, com resistência média de 1000 MPa e módulos de elasticidade em torno de 160 GPa.

Segundo Casagrande (2005), Magalhães (2005) e Festugato (2008), estas fibras, quando cortadas, liberam partículas muito pequenas que prejudicam os alvéolos pulmonares, se aspiradas pelo homem, tornando sua utilização na construção civil proibida em muitos países.

Além disso, a fibra amianto apresenta comportamento frágil e baixa resistência à cargas de impacto limitam o uso desta fibra na prática da engenharia civil (MAGALHÃES, 2005).

### **2.5.4 Fibras metálicas**

Dentre a família das fibras metálicas, a mais utilizada é a de aço. As fibras de aço utilizadas na construção civil apresentam um fator de forma (relação l/d) variando na faixa de 30 a 50, comprimento na ordem de 0,1 à 7,62 cm e diâmetro entre 0,13 e 0,9 mm.

O mecanismo de ruptura de um compósito reforçado por fibra metálica é geralmente associado ao arranchamento destas fibras e não à ruptura das mesmas. (SPECHT,2000;



VENDRUSCOLO, 2003; CASAGRANDE, 2005; MAGALHÃES, 2005; FESTUGATO, 2008).

A resistência à tração da fibra é cerca de 1100 MPa e o módulo de elasticidade é de 200 GPa. Esse tipo de fibra apresenta uma grande variedade de formatos para aumentar a resistência ao arranchamento (TAYLOR, 2000; VENDRUSCILO, 2003).

Dependendo do meio que serão inseridas, podem apresentar problemas de corrosão. Um procedimento utilizado para minimizar tal problema é o banho de níquel (TAYLOR, 2000).

## **2.6 Alterações no comportamento do solo com a inclusão de fibras**

São apresentadas, na sequência, as alterações nas propriedades dos solos fibrosos. As mudanças no comportamento mecânico do solo, já relatadas por vários autores, estão relacionadas à resistência, deformabilidade, rigidez inicial, modo de ruptura, variação volumétrica e condutividade hidráulica.

### **2.6.1 Compactação dos solos**

A compactação é o método de estabilização e melhoria do solo através de processo manual ou mecânico, visando reduzir o volume de vazios do solo. Essa redução de volume pode ser pela aplicação de uma carga, tal como rolamento, adensamento e vibração. A técnica de compactação visa dois aspectos importantes: aumento da relação de contato entre os grãos e tornar o solo mais homogêneo (BARONI, 2014).

O grau de compactação do solo é medido com base em seu peso específico seco. A água ao ser adicionada durante a compactação, atua como agente amolecedor das partículas do solo, onde estas deslizam umas sobre as outras e se posicionam em uma formação compacta de alta densidade (DAS,2007).

Para Specht (2000), a compactação de um solo busca o melhoramento de suas características, não só quanto à resistência, mas, também, em relação à permeabilidade, compressibilidade, absorção de água e principalmente, estabilidade.

Hoare (1979), pesquisou a influência da adição de fibras na compactação de solos arenosos. Observou, através dos ensaios de compactação, um aumento de porosidade, com energia de compactação constante, onde este aumento é relacionando de maneira proporcional com a quantidade de fibra utilizada. Estes resultados são independentes do tipo de compactação empregada.

A influência na compactação é conduzida pela interação entre o solo e reforço, atentando para distribuição granulométrica do solo, formato das partículas do solo, textura e área superficial do reforço (HOARE, 1979; CASAGRANDE, 2005).

Segundo Sales (2011), em fase de compactação pode ser detectado o primeiro efeito provocado pela adição de fibras ao solo, por meio de aumento no índice de vazios deste, mantendo-se constante a energia de compactação. O autor afirma ainda, que este efeito pode ser mais ou menos pronunciado dependendo do atrito desenvolvido entre solo e reforço.

Nataraj e McManis (1997), realizaram ensaios de compactação para um solo argiloso e outro arenoso. Utilizando fibras de polipropileno com 25 mm de comprimento, e teores de 0,1%, 0,2% e 0,3% para argila e 0,1%, 0,2%, 0,3 e 0,4% para areia. Os resultados para o solo argiloso sem e com reforço mostraram similaridade, onde para o teor de 0,2% de fibras, o valor de massa específica máxima obteve um leve aumento de 0,84%, já para a umidade ótima, foi registrado uma redução de 11,76 % do solo natural para o solo com fibras. Para as amostras de do solo arenoso, os resultados não apresentaram diferenças significativas com a inclusão das fibras, para as porcentagens analisadas, os valores de massa específica máxima em média reduziram 1,31% e umidade ótima aumentaram em 1,93% para o solo+fibras.

Fletcher e Humphries (1991) também relatam sua experiência, onde um silte arenoso foi reforçado com fibras de polipropileno com 25 mm de comprimento nos teores de 0,5%, 1,0% e 1,5%. As médias dos resultados obtidos para cada mistura, estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 – Massa específica máxima e umidade ótima

<b>Material</b>	<b>Massa Específica Máxima (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Teor de Umidade Ótimo (%)</b>
Solo	1505,8	28,0
Solo + 0,5% de fibra	1531,5	26,7
Solo + 1,0% de fibra	1531,5	26,1
Solo + 1,5% de fibra	1541,1	25,5

Fonte: Adaptado de Fletcher e Humphries (1991)

Pode-se observar nos resultados um tendência na redução do teor de umidade ótimo e aumentar a massa específica máxima com o aumento do teor das fibras.

Maher e Ho (1994), Bueno et al. (1996), Nataraj et al. (1996), Ulbrich (1997), Consoli et al. (1999), afirmam que não há influência expressiva nos parâmetros de compactação com a inclusão de pequenas quantidades (até 2%) de fibra, mantendo-se constantes a umidade ótima e densidade máxima.

Reschetti (2008), analisou a influência da adição de fibras de polipropileno e de vidro, para um solo arenoso laterítico. Os valores de umidade ótima apresentaram pouca diferença entre solo natural e solo com fibra, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Parâmetros do ensaio de compactação

MATERIAL	MISTURA	$\omega_o$ (%)	$\rho_{m\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )
Solo <i>in natura</i>		11,40	1,995
Fibra de vidro	Solo + 0,5%	11,35	1,950
	Solo + 1,0%	11,35	1,950
	Solo + 1,5%	11,35	1,950
Fibra de polipropileno	Solo + 0,2%	11,40	1,950
	Solo + 0,4%	11,40	1,945
	Solo + 0,6%	11,40	1,935

Fonte: Reschetti (2008)

### 2.6.2 Resistência à compressão de pico

As características desejadas com a adição de fibras nem sempre dizem respeito a um aumento da capacidade de suporte do material. Outros vários aspectos podem ser analisados, como maior capacidade de absorção de energia (maior resistência ao impacto), queda na redução de resistência pós-pico (em caso de materiais mais frágeis), uma maior capacidade de absorver deformações até atingir a resistência última, entre outros (SALES, 2011).

Para Reschetti (2008), é comum um solo reforçado com fibras apresentar resistência máxima a compressão maior que o solo sem reforço.

### 2.6.3 Solos arenosos

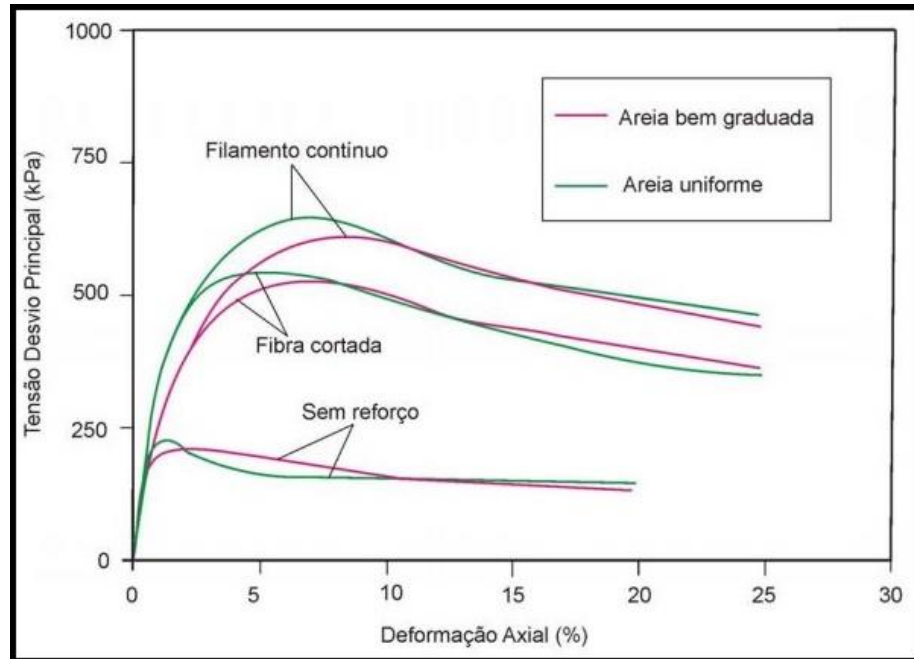
Para Specht et al. (2002), a alteração dos parâmetros de resistência depende das características do reforço. Os autores observaram que para um solo silto-arenoso cimentado reforçado com fibras extensíveis não houve alteração dos parâmetros de resistência, porém, quando considerado fibras inextensíveis, ocorreu um leve aumento de coesão e do ângulo de atrito da areia siltosa cimentada reforçada com fibras mais rígidas.

Nataraj et al. (1996), apresentaram resultados de uma série de ensaios em um solo arenoso e outro argiloso reforçados com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente. Com a inclusão de fibras não houve alterações significativas nos parâmetros de compactação do solo, porém, houve um aumento da capacidade mecânica das areias, sendo o acréscimo mais pronunciado para maiores teores de fibras.

Stauffer e Holtz (1995) utilizaram duas areias, um bem graduada e outra com graduação uniforme, possuindo mesmo diâmetro médio de grãos, e estudaram seus comportamentos mecânicos quando reforçados com fibras de polipropileno contínuas e cortadas (aglomeradas).

As fibras apresentavam um comprimento de 100 mm, para um teor de 0,2%. A análise do comportamento mecânico foi analisada através do ensaio de compressão triaxial consolidado-drenado. A Figura 8, apresenta a curva tensão x deformação mostra o comportamento do solo sem e com a adição de reforço para o ensaio de compressão.

Figura 8 – Curvas de tensão x deformação para ensaios de compressão



Fonte: Adaptado de Stauffer e Holtz (1995)

Teodoro (1999), observou um aumento da resistência junto ao acréscimo do comprimento (0 à 30mm) das fibras de polipropileno, para uma areia siltosa. Teodoro (1999), também analisou um solo argiloso, onde o máximo de resistência foi alcançado para um comprimento de 15 mm.

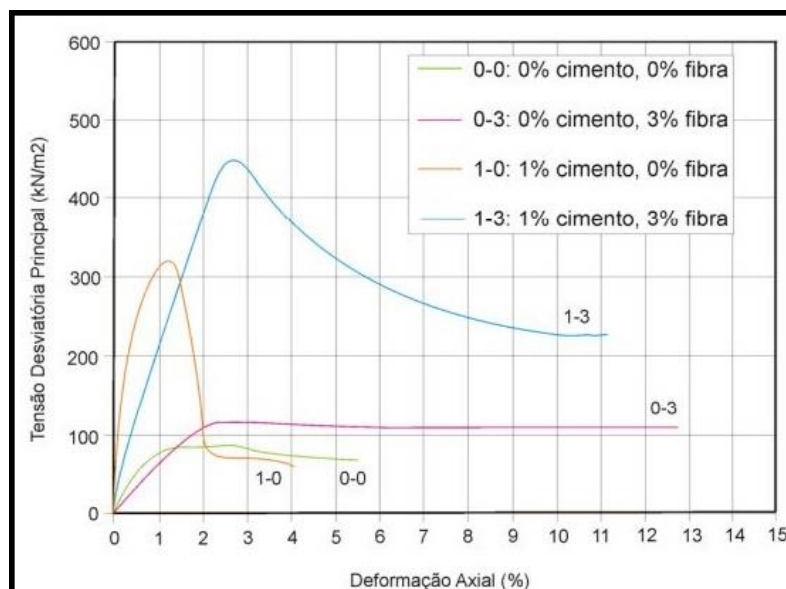
#### 2.6.4 Resistência à compressão pós-pico

Maioria dos trabalhos que analisaram o comportamento de solos reforçados em termos da resistência concluíram que a inclusão de fibras reduz a queda da resistência pós-pico (GRAY E OHASHI, 1983; CONSOLI et al., 1998; VENDRUSCOLO, 2003; DONATO et al., 2004; CASAGRANDE, 2005; FESTUGATO, 2008).

Consoli et. al (1998), adicionaram à uma areia siltosa, fibra de vidro e cimento para a estabilização. A Figura 9 apresenta o gráfico de tensão x deformação obtido para os ensaios de

compressão triaxial. Com análise dos resultados, observou-se que a resistência à compressão pós-pico é influenciada pela a adição de fibras, com e sem a utilização de cimento.

Figura 9 – Curva de tensão x deformação obtida no ensaio triaxial



Fonte: Adaptado de Consoli et.al., 1998

Teodoro e Bueno (1998) e Teodoro (1999), analisaram o comportamento de dois solos, um argiloso e outro arenoso, reforçados com fibras de polipropileno. Foram avaliados diferentes teores (0,1 à 1%) e comprimentos de fibras (10 à 30 mm) através de ensaios de compressão não-confinada. Os autores concluíram que com a adição de fibras, melhora, no geral, sua resistência, reduzindo a queda de resistência pós-pico.

### 2.6.5 Variação volumétrica

Segundo Nataraj et al. (1996), quanto maior a quantidade de reforço, maior será o aumento da deformação volumétrica, porém de forma não linear. O aumento de compressibilidade do solo com a adição de fibras foi observado por Bueno et al. (1996).

Maher e Ho (1994) e Nataraj et al. (1996), para argilas, relataram acréscimo no módulo de deformação, proporcional ao teor de fibras. Contrariamente, Ulbrich (1997), Consoli et al. (1999) e Casagrande (2001) obtiveram decréscimo do módulo com a inclusão de fibras.

Para uma areia cimentada reforçada com fibras de polipropileno, foi observado uma queda acentuada da rigidez inicial. No entanto, as fibras de PET e de vidro não causaram alteração alguma no módulo (MONTARDO, 1999).

### 2.6.6 Modo de ruptura

Montardo (1999) concluiu que a adição de fibras de polipropileno no compósito de matriz cimentada altera significativamente o seu modo de ruptura. Com a inclusão das fibras o comportamento do material na ruptura, que antes se mostrava frágil, torna-se dúctil. Essas constatações resultaram da verificação dos índices de fragilidade e da verificação visual da ausência ou presença de planos de ruptura nos corpos de prova rompidos. O autor concluiu ainda, que a inclusão de fibras PET reduziu sensivelmente o índice de fragilidade da matriz cimentada, porém não foi suficiente para expressar uma modificação no modo de ruptura da matriz cimentada, e que a adição de fibras de vidro não modificou o modo de ruptura do material.

Spetch (2000) avaliou os efeitos da inclusão de fibras poliméricas de distintas propriedades mecânicas (uma em forma de filamentos e outra fibrilada-tipo mesh) num solo cimentado artificialmente, observou que com a adição de fibras mais alongáveis (em forma de filamento) o comportamento do material, que era frágil, torna-se dúctil. Sendo que para as fibras mais rígidas (tipo mesh) não se expressa uma modificação no modo de ruptura do material.

Segundo Feuerharmel (2000), a forma de ruptura do solo é alterada pela adição de fibras de polipropileno, reduzindo a fragilidade dos solos. A magnitude dessas alterações depende essencialmente de uma boa adesão solo-fibra, que pode ser atingida pela ação de um agente cimentante ou por uma combinação apropriada de comprimento das fibras e tensões efetivas médias normais atuantes.

Uma mudança significativa foi verificada quanto ao modo de ruptura, onde todas as amostras não reforçadas exibiram um comportamento frágil na ruptura, enquanto que as amostras reforçadas com 0,5 % de fibras de polipropileno apresentaram uma fragilidade menos pronunciada, mudando o comportamento de frágil para dúctil (DONATO et al., 2004).

O aumento de ductilidade do solo com a adição de fibras, sendo este acréscimo evidente quanto maior for a quantidade de fibras, é uma observação feita por vários autores (HOARE, 1979; MAHER E HO, 1993; NATARAJ et al., 1996; MONTARDO, 1999; FEUERHARMEL, 2000; SPETCH, 2000; DONATO et al., 2004).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

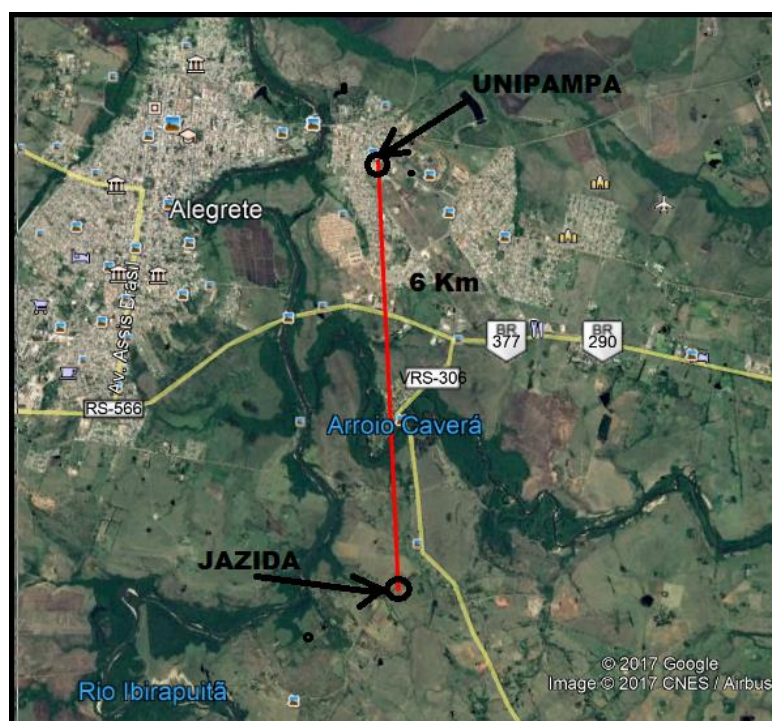
Este capítulo divide-se em três partes, primeiramente aborda as informações gerais da região estudada e as principais características dos materiais utilizados na pesquisa. Posteriormente a metodologia empregada para execução da pesquisa, e por último, os procedimentos utilizados para realização dos experimentos laboratoriais.

#### 3.1 Materiais utilizados

##### 3.1.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa pertence à formação Botucatu, descrito como um solo arenoso, apresentando coloração avermelhada e baixo teor de umidade natural. A jazida de onde foram coletadas as amostras, está localizada no município de Alegrete/ Rio Grande do Sul, nas proximidades do Balneário Caverá, com distância de 6 km da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Alegrete-RS (Figura 10). Essa jazida pertence à empresa Pedra Rosada, onde o solo é utilizado em obras correntes na cidade de Alegrete e região.

Figura 10 – Localização da jazida



Fonte: Google Earth, em 12/11/2017

A Tabela 4 apresenta as coordenadas geográficas da jazida adquiridas através de GPS (georeferenciamento). A Figura 11 apresenta a vista superior da jazida onde o solo foi coletado.



Tabela 4 – Coordenadas geográficas dos pontos da jazida

Ponto	Coordenadas
701	S29°50'13,40"
	O55°46'31,29"
702	S29°50'15,71"
	O55°46'29,87"
703	S29°50'16,17"
	O55°46'27,42"
704	S29°50'13,09"
	O55°46'23,02"
705	S29°50'10,87"
	S55°46'26,51"
706	S29°50'12,07
	O55°46'28,74"

Fonte: Google Earth, em 12/11/2017

Figura 11 – Vista superior da jazida



Fonte 1: Google Earth, em 12/11/2017



### 3.1.2 Fibras

As fibras utilizadas como reforço são poliméricas provenientes de garrafas PET (polietileno tereftalato), na forma de filamentos. O material apresenta excelentes propriedades, como elevada resistência mecânica, térmica e química.

As garrafas PET utilizadas para a produção das fibras são de origem reciclável, sendo facilmente encontradas em locais de descarte e empresas de reciclagem de plásticos.

Foi encontrada certa dificuldade para aquisição das fibras no mercado, onde foi realizado vários contatos com diferentes fabricantes, mas sem sucesso. Desta forma, foi adotada a produção manual das fibras com auxílio de um filetador ajustável. Para a produção do filetador foi utilizado um cano PVC (altura = 30cm; d = 20 mm), capa para cano soldável (d = 20 mm), madeira (e = 5 cm), lâmina de reposição para estilete 18 mm, parafusos e arruelas para ajustar a espessura de corte. Na Figura 12, está apresentado o filetador utilizado para produção das fibras PET.

Figura 12 – Filetador para produção das fibras PET

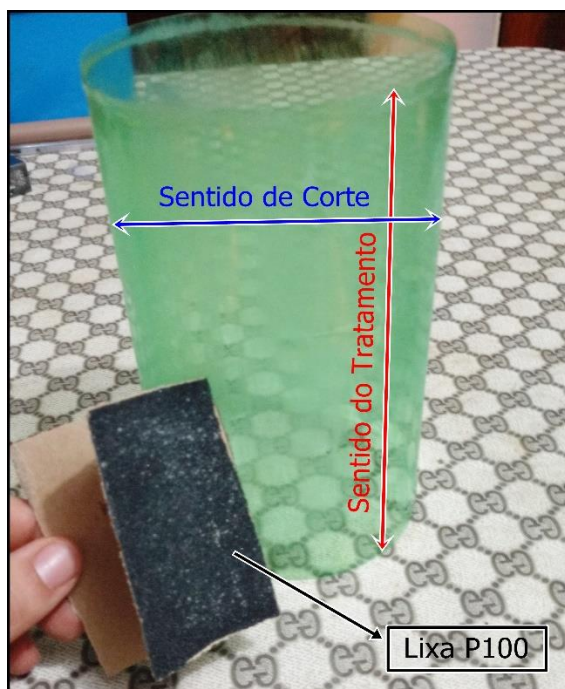


Fonte: Próprio Autor

Após produção dos filetes, com auxílio de uma folha escalonada fixada em local plano, as fibras foram marcadas e cortadas no comprimento desejado. Para ter maior padronização, e menor dificuldade de corte, foram utilizados na pesquisa os comprimentos de 10 e 20 mm para uma largura média de 2 mm.

Para aumento da aderência do conjunto solo/fibra, inicialmente foi pensando em um tratamento superficial químico para as fibras, mas para um resultado mais rápido na superfície do material foi optado pelo tratamento com esscarificação. Para este processo foi utilizada uma lixa de ferro grão 100 para a esscarificação da garrafa PET no sentido perpendicular do corte das fibras, para melhor aderência solo/fibra, como ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Escarificação das garrafas PET



Fonte: Próprio Autor

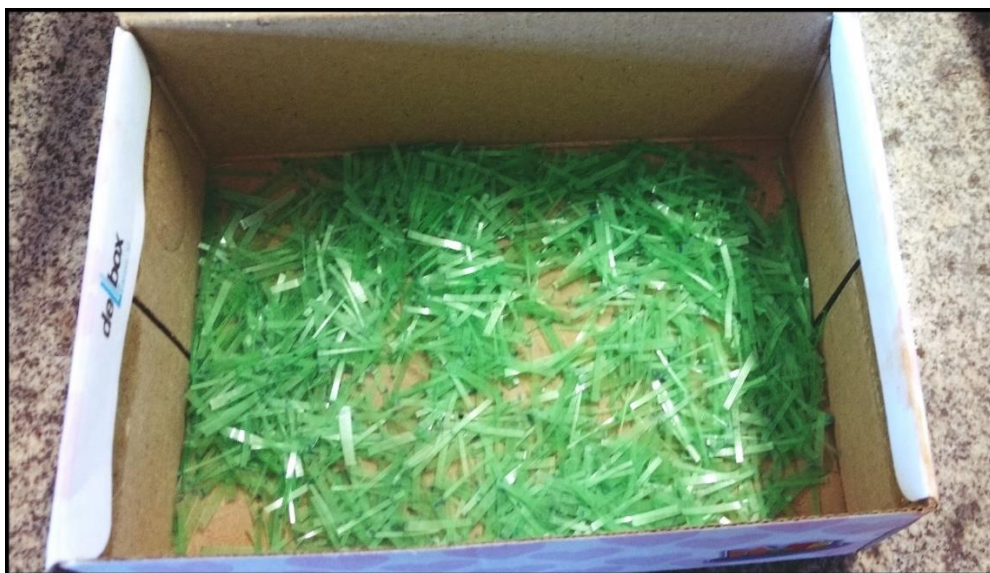
Na Tabela 5, Marangon (2004) apresenta as principais características das fibras, força de ruptura (FT), deslocamento ( $\epsilon$ ), deformação ( $\epsilon$ ) e módulo de elasticidade (E). A caracterização mecânica do material foi realizada no Laboratório de Engenharia Mecânica da URI (Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e Missões). O ensaio e preparo das amostras foi executado de acordo a norma NBR 9622/86 (Determinação das Propriedades Mecânicas a Tração – Plásticos). A Figura 14 mostra o aspecto das fibras PET produzidas no formato de tiras, utilizadas no estudo.

Tabela 5 – Valores médios das propriedades mecânicas à tração para fibras de PET.

Valores Médios				
Amostras	FT (kgf)	$\epsilon$ (mm)	$\epsilon$ (%)	E (MPa)
Verdes	23,55	25,95	0,0025	82,9
Incolores	23,43	24,59	0,00239	95,7

Fonte: Adaptado de Marangon (2004)

Figura 14 – Fibras PET



Fonte: Próprio Autor

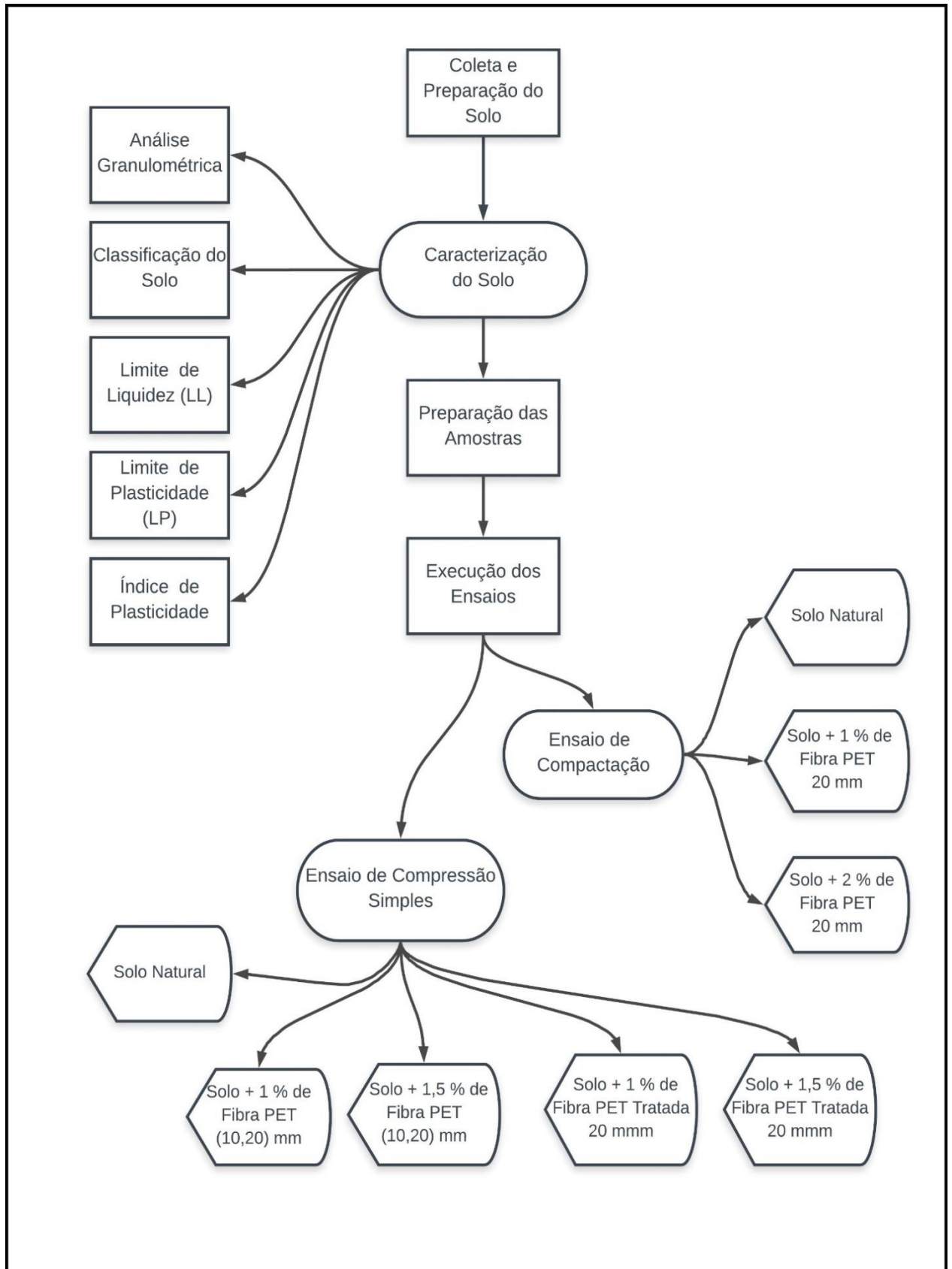
### 3.1.3 Água

Foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento da cidade de Alegrete/RS, a Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), para a produção dos corpos de prova e execução dos ensaios.

### 3.2 Metodologia

A metodologia empregada para execução deste estudo foi de caráter experimental, consistindo em 3 etapas principais, sendo a primeira etapa a coleta e preparação do solo, a segunda etapa a preparação dos corpos de prova com amostras de solo natural e solo com a adição de fibras em distintas proporções e comprimentos. A terceira e última etapa foi destinada a execução dos ensaios, sendo, três ensaios principais, detalhados na sequência deste capítulo. A Figura 15 apresenta o fluxograma completo do cronograma experimental.

Figura 15 - Fluxograma de ensaios



Fonte: Próprio Autor



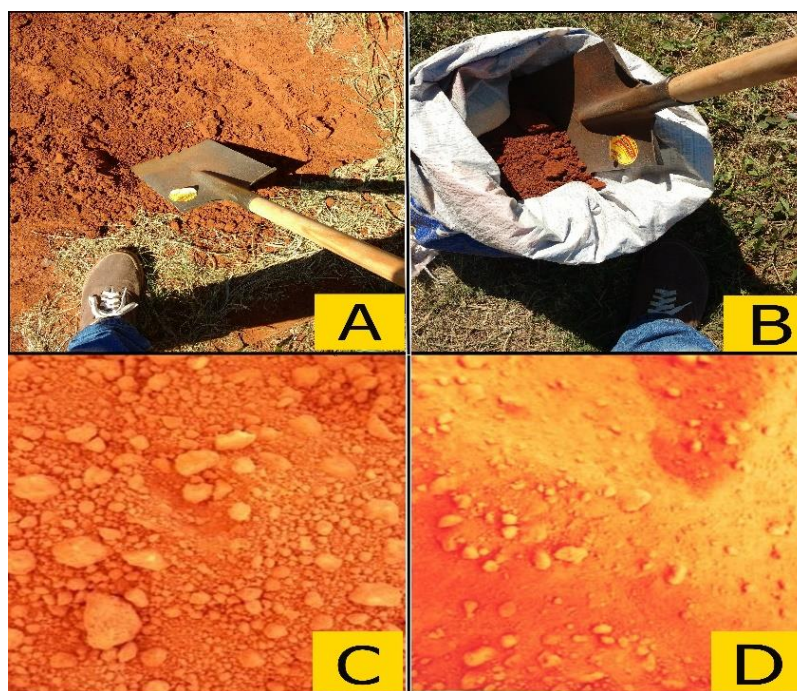
A etapa de laboratório teve como objetivo principal investigar e identificar o efeito da adição de fibras de PET nas propriedades mecânicas de um solo residual.

O cronograma experimental é composto por coleta e preparação do material, ensaios de caracterização do solo, ensaios de compactação e o ensaio de compressão simples nas amostras de solo natural e solo acrescido de fibras.

### 3.2.1 Coleta e preparação do solo

As amostras de solo foram coletadas na UNIPAMPA no estado deformado com auxílio de uma pá de corte em quantidade suficiente para realização dos ensaios de laboratório, como pode ser visto na Figura 16. O material coletado foi acondicionado em sacos plásticos para posterior secagem ao ar. Após seco, o solo foi quarteadado e passado na peneira n° 40 com abertura nominal de 0,42 mm para realização dos ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) e na peneira n° 4 com abertura nominal de 4,8 mm para execução dos ensaios de granulometria, compactação e compressão simples. Os procedimentos para preparação das amostras seguiram a regras da NBR 6457/2016.

Figura 16 – Coleta e preparação do solo: (A) Coleta do Solo; (B) Armazenamento; (C) Solo no Laboratório de Geotécnica e Pavimentação da UNIPAMPA; (D) Solo destorroado



Fonte: Próprio Autor

### 3.2.2 Ensaios de caracterização

Os ensaios de caracterização foram realizados somente para as amostras de solo natural. A análise granulométrica, das amostras do solo natural, foi executada conforme a norma NBR

7181/2016, que indica o método de análise granulométrica do solo por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento, sendo o segundo método utilizado nesta pesquisa, Figuras 17 E 18.

Figura 17 – Realização do ensaio de sedimentação: (A) Aparelho de dispersão; (B) Ensaio de Sedimentação.



Fonte: Próprio Autor

Figura 18 – Realização do ensaio de análise granulométrica



Fonte: Próprio Autor

O Limite de Liquidez foi determinado seguindo os métodos de ensaio da NBR 6459/2017. Para a execução desses ensaios, foi utilizado o aparelho de Casagrande, Figura 19. O ensaio determinou o do número de golpes necessários para fechar um sulco padrão, efetuado no solo colocado na concha. O procedimento foi executado várias vezes, variando o teor de umidade da amostra.

Figura 19 – Aparelho de Casagrande



Fonte: Próprio Autor



O Limite de Plasticidade (LP) foi determinado seguindo os procedimentos da NBR 7180/2016. O limite de plasticidade foi definido como sendo o teor de umidade no qual o cilindro de solo começou a fragmentar, quando moldado com 3 mm de diâmetro. Para execução desses ensaios, foram utilizados a base de vidro e o perfil gabarito, como mostrado na Figura 20. A Tabela 6 apresenta os valores de umidade natural e higroscópica, LL, LP e IP, obtidos para os solo.

Figura 20 - Realização do ensaio de limite de plasticidade (LP)



Fonte: Próprio Autor

Tabela 6 – Propriedades físicas do solo

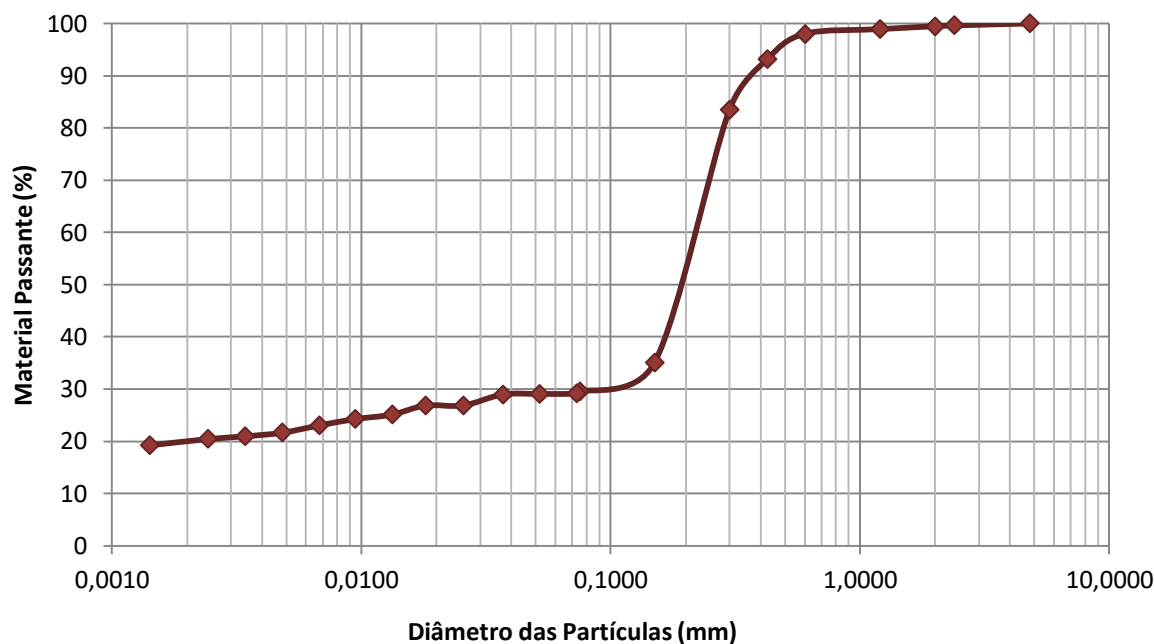
<b>Propriedades</b>	<b>Valores Médios</b>
Umidade Natural	7,27%
Umidade Higroscópica	6,25%
Limite de Liquidez	24%
Limite de Plasticidade (LP)	19%
Índice de Plasticidade (IP)	5%

Fonte: Próprio Autor

O Gráfico 3 apresenta a distribuição granulométrica do solo, descrito como arenoso. Com utilização de Metodologia MCT para classificações do solo, este material foi considerado como solo arenoso laterítico (NETTO, 2018). A Tabela 7 apresenta a composição granulométrica da amostra, e os valores encontrados para LL, LP e IP.



Gráfico 3 - Curva granulométrica



Fonte: Próprio Autor

Tabela 7 - Composição granulométrica

<b>Material</b>	<b>%</b>
Areia Grossa	6
Areia Média	1,82
Areia Fina	62,68
Silte	10,31
Argila	19,19

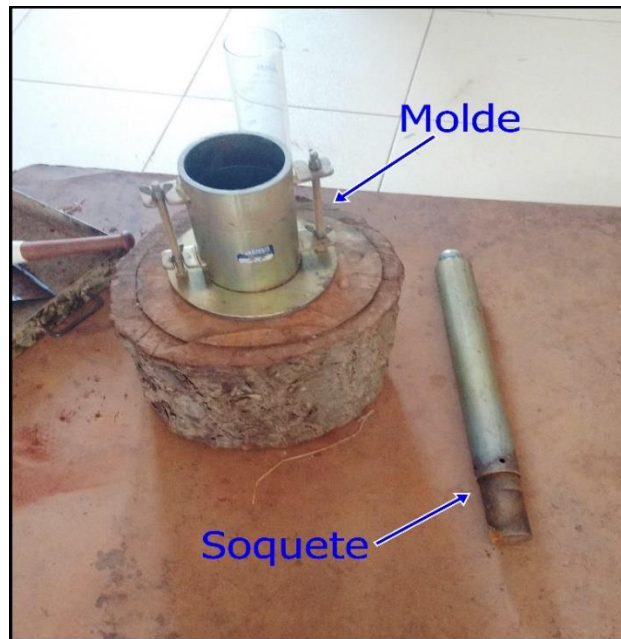
Fonte: Próprio Autor

### 3.2.3 Ensaios de compactação

Após realização da caracterização do solo, foram realizados os ensaios de compactação para determinação de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima.

Os ensaios de compactação foram executados conforme a NBR 7182/1986, utilizando para moldagem o cilindro de Proctor com volume de 1012 cm<sup>3</sup> e soquete pequeno, conforme a Figura 21.

Figura 21 – Equipamentos para o ensaio de compactação: (A) Molde Utilizado; (B) Soquete utilizado.



Fonte: Próprio Autor

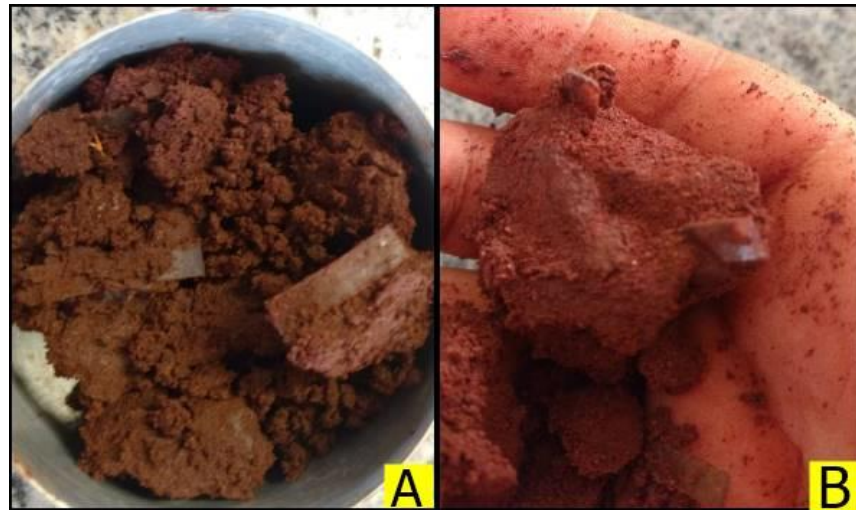
A compactação foi do tipo dinâmica realizada em três camadas com energia normal do Proctor, utilizando o soquete pequeno com 26 golpes por camada. Na Figura 22, pode ser visto a execução do ensaio. A Figura 23 mostra os aspectos das amostras obtidas no ensaio.

Figura 22 – Execução do ensaio de compactação: (A) Preparação de amostra do solo+fibra; (B) Realização do ensaio



Fonte: Próprio Autor

Figura 23– Amostras obtidas no ensaio de compactação: (A) Amostra 2% de fibra; (B) Amostra 1% de Fibra

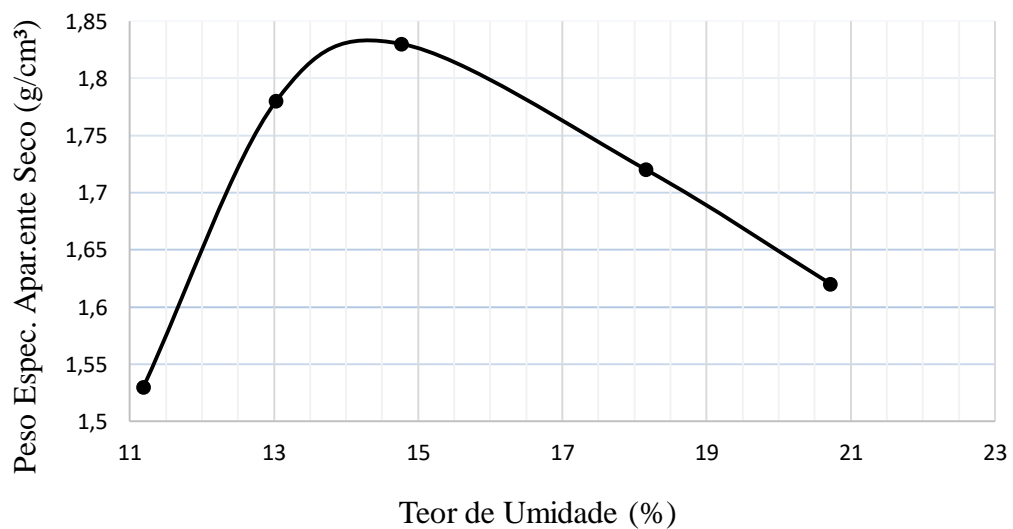


Fonte: Próprio Autor

Mesmo que alguns autores afirmam que até 2% de fibras, não influenciam nos parâmetros de compactação, optou-se por realizar o ensaio de compactação tanto para o solo natural, mas também para solo com a adição de 1% e 2% de fibra PET.

A umidade ótima encontrada no ensaio de compactação para o solo natural foi de 14,25% e o peso específico aparente seco máximo foi de 1,84 g/cm<sup>3</sup>, o Gráfico 4 apresenta a curva de compactação encontrada para o solo natural.

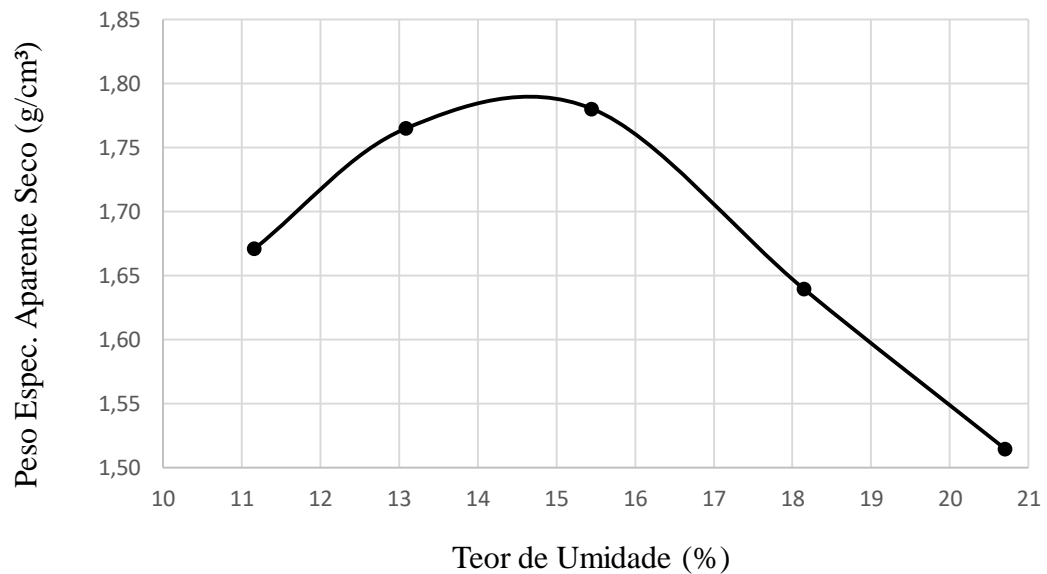
Gráfico 4 – Curva de compactação para o solo natural



Fonte: Próprio Autor

A umidade ótima encontrada no ensaio de compactação para o solo com a adição de 1% de fibras de 20 mm, foi de 14,50%, registrando uma pequena diferença em relação ao solo natural. O peso específico aparente seco máximo resultou em uma pequena redução para 1,79 g/cm<sup>3</sup>. O Gráfico 5 apresenta a curva de compactação encontrada para o solo com adição de 1% de fibra.

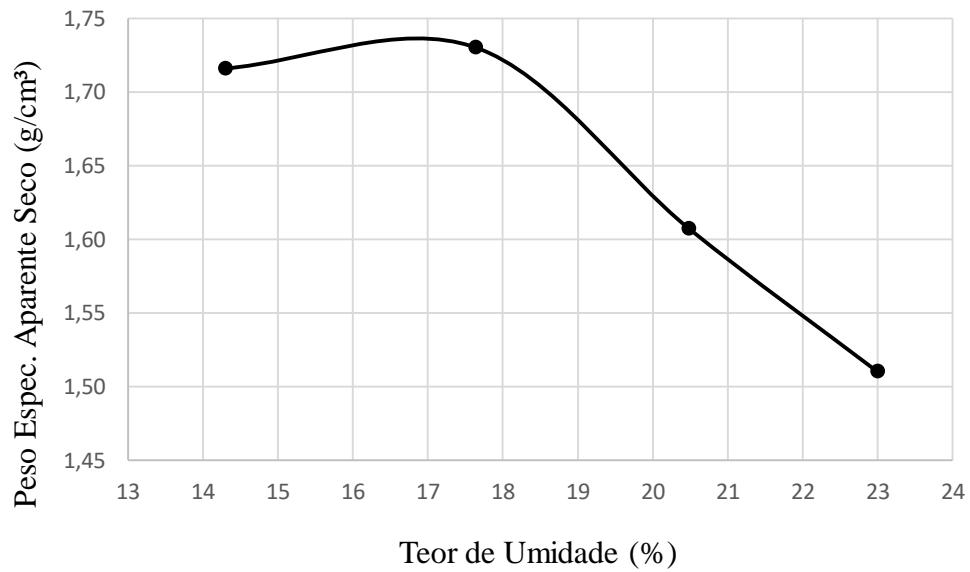
Gráfico 5 – Curva de compactação para o solo com adição de 1% de fibra



Fonte: Próprio Autor

A umidade ótima encontrada no ensaio de compactação do solo com a adição de 2% de fibras de 20 mm, foi de 17%, registrando um aumento considerável em relação ao solo natural. O peso específico aparente seco máximo sofreu redução para 1,73 g/cm<sup>3</sup>. O Gráfico 6 apresenta a curva de compactação encontrada para o solo com adição de 2% de fibra.

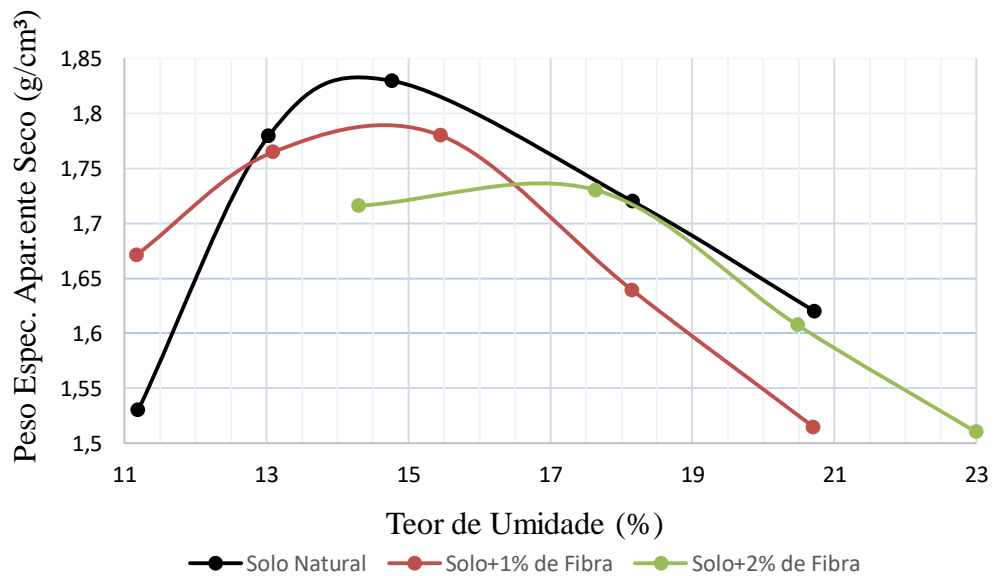
Gráfico 6 – Curva de compactação para o solo com adição de 2% de fibra



Fonte: Próprio Autor

O Gráfico 7, mostra a curva de compactação das misturas estudadas, para as amostras de solo natural, solo+1% de fibra e solo+2% de fibra.

Gráfico 7 – Curva de compactação para as misturas analisadas



Fonte: Próprio Autor

Observou-se para a adição de 1% de fibra, não gerou alterações nos resultados analisados, sendo a umidade ótima teve um aumento de 1,72%, e redução do peso específico aparente seco

máximo em 2,72%. Para a adição de 2%, os resultados levaram a alterações mais significativas nos valores de compactação do solo, onde a umidade ótima aumentou em 16,18% e o peso específico aparente seco máximo teve uma redução de 5,98%, em relação ao solo natural.

Após determinada a curva de compactação para os casos em estudo, por apresentar o maior valor de peso específico aparente seco de 1,84 g/cm<sup>3</sup> e não sofrer significativas alterações com a adição de 1% de fibra, foi optado pela utilização da umidade ótima de 14,25% para moldagem dos corpos de prova para os ensaios de compressão simples.

### 3.2.4 Dosagem e mistura

A preparação dos corpos de prova foi executada em duas fases: mistura dos elementos e moldagem. A quantidade de fibras adicionadas à mistura foi determinada em relação à massa do solo seco. Para a adição de água nas misturas, foi realizado o cálculo a partir dos resultados de umidade ótima dos ensaios de compactação (solo, solo+fibra). Todos os materiais utilizados foram pesados em balança com precisão de 0,01g. Foram utilizadas 4 amostras para cada mistura analisada, sempre dedicando uma para teste inicial. Todas as amostras foram moldadas utilizando umidade ótima. A seguir cada composição utilizadas no ensaio de compressão simples:

- Solo Natural: 4 amostras moldadas com umidade ótima;
- Solo + Fibra PET de 10 mm de comprimento:
  - Solo + 1% de Fibra: 4 amostras moldadas;
  - Solo + 1,5% de Fibra: 4 amostras moldadas;
- Solo + Fibra PET de 20 mm de comprimento:
  - Solo + 1% de Fibra: 4 amostras moldadas;
  - Solo + 1,5% de Fibra: 4 amostras moldadas;
- Solo + Fibra PET com Tratamento Superficial de 20 mm de comprimento:
  - Solo + 1% de Fibra: 4 amostras moldadas;
  - Solo + 1,5% de Fibra: 4 amostras moldadas.

Com o intuito de garantir um melhor desempenho do conjunto solo/fibras, as fibras foram espalhadas de forma uniforme dentro das amostras. A mistura foi preparada de forma manual. As fibras PET não formam grumos como fibras de polipropileno por exemplo, por serem lisas e apresentarem aspecto de filetes, facilitando a mistura manual. O procedimento foi realizado

de maneira rotacional em sentido anti-horário por 5 minutos, e por final acrescida de água destilada. A Figura 24 mostra o aspecto da mistura solo+fibras.

Figura 24 - Misturas realizadas: (A) Solo Natural; (B) Solo + 1% de Fibra; (C) Solo+1,5% de Fibra



Fonte: Próprio Autor

O método de mistura foi testado inicialmente com a inclusão de 1% de fibras de 20 e 10 mm, obtendo êxito nas misturas e moldagens. Para adição de 2% de fibras de 20 mm a moldagem não foi possível, pois a quantidade de fibras tornou inviável a estabilidade da amostra moldada. As amostras após moldagem já apresentavam pequenas fissuras, o aspecto da amostra pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 – Amostras com adição de 2%: (A) Amostra após moldagem; (B) Excesso de fibras na mistura de solo+2% de fibra



Fonte: Próprio Autor

Optou-se então em reduzir a porcentagem para 1,5 %, onde ambos comprimentos apresentaram sucesso, na mistura e moldagem das amostras. Apesar dos problemas encontrados, o método de mistura foi mantido para que os resultados do ensaio de compressão simples pudessem ser comparados entre si.

Para a moldagem dos corpos de prova destinados aos ensaios de compressão simples, optou-se pela compactação estática e amostras com dimensões de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura. Com o volume conhecido, peso específico aparente seco máximo conhecido, foi determinada a massa de solo de 355,39 g para a produção dos corpos de prova. Sabendo a massa de solo, água e fibra adicionada ao solo, utilizou-se a Equação 3 para determinação dos índices de vazios para as misturas. O Quadro 2 apresenta os valores obtidos para os índices de vazios.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3)$$

$V_v$  = Volume de vazios (cm<sup>3</sup>)

$V_s$  = Volume dos sólidos (cm<sup>3</sup>)

Quadro 2 – Índice de vazio para cada mistura

Índice de Vazio		
Solo Natural	Solo + 1% de Fibra	Solo + 1,5% de Fibra
0,47	0,46	0,43

Fonte: Próprio Autor

A compactação estática foi realizada, com auxílio do macaco hidráulico com ajuste de altura, da fabricante STARFER, tipo garrafa, com capacidade de 6 toneladas. O equipamento se encontra no Laboratório de Geotécnica e Pavimentação da UNIPAMPA, pode ser visto na Figura 26.



Figura 26 – Macaco hidráulico para compactação estática



Fonte: Próprio Autor

Realizada a pesagem dos materiais e mistura, as amostras foram colocadas em um cilindro de material PVC, com vaselina sólida de uso industrial, argolas metálicas nas duas extremidades para correção de folga do cilindro e dois cilindros metálicos protegidos com plástico para a compactação estática da amostra. Na Figura 27, pode ser visualizado os materiais utilizados para moldagem dos corpos de prova. A Figura 28 mostra a realização do ensaio e a amostra pós moldagem.

Figura 27 - Materiais utilizados para moldagem: (A) Cilindro PVC para introdução da amostra; (B) Vaselina para auxílio de desmolde; (C) Argolas para correção de folga.



Fonte: Próprio Autor

Figura 28 – Moldagem dos corpos de prova: (A) Execução; (B) Solo natural moldado; (C) Solo + 1,5% de Fibra moldado



Fonte: Próprio Autor

### 3.2.5 Ensaio de compressão simples

A última etapa de ensaios, foi a execução do ensaio de compressão simples, normatizado pela NBR 12770-92, sendo um método simples e rápido para determinação da resistência à compressão do solo (DAS, 2007).

Com o ensaio se determina a resistência à compressão simples sem confinamento lateral, que é o valor da pressão correspondente à carga que rompe um cilindro de solo submetido à um carregamento axial. A Equação 4 apresenta como obter tensão de compressão.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Sendo:

P = Carga na ruptura medida na prensa (N);

A = Área de contato do corpo de prova (m<sup>2</sup>);

A velocidade de aplicação da carga é controlada e padronizada.

O ensaio de compressão simples pode ser executado de duas maneiras:

- Por deformação controlada: controla-se a velocidade de deformação do corpo de prova e mede-se a carga aplicada correspondente;

- Por carga controlada: controla-se a carga aplicada ao corpo de prova e mede-se a deformação correspondente.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de compressão simples é da fabricante SHIMADZU, presente no Laboratório de Aerodinâmica e Transferência de Calor, no prédio C3, sala 103 na Universidade Federal do Pampa, Figura 29. O equipamento tem a capacidade máxima de carregamento vertical de 5 KN e medição de tensão através de célula de carga. A velocidade de deslocamento é variável, sendo ajustada pelo programa operacional. Para esta pesquisa a velocidade de ensaio foi de 0,1mm/min. Os valores utilizados para obtenção do gráfico de tensão x deformação, foram coletados com precisão de 0,25 segundos, ajustada no programa do equipamento.

Figura 29 - Equipamento utilizado para os ensaios de resistência à compressão



Fonte: Próprio Autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos para os ensaios de compressão simples, avaliando a influência da adição de fibras a resistência à compressão do solo.

### 4.1 Resistência a compressão

Neste trabalho, os valor de tensão máxima à compressão foi determinado por meio de ensaio de compressão simples, descrito no item 3.2.5. Como indicado anteriormente, a velocidade de ensaio aplicada para as amostras de solo natural e solo+fibras foi de 0,1 mm/min. As porcentagens e comprimentos ensaiados podem ser vistos no Quadro 3.

Quadro 3 - Composições das amostras para o ensaio de compressão simples

Composição das Amostras	Comprimento da Fibra	
	10 mm	20 mm
Solo Natural	-	-
Solo + 1 % de Fibra	x	x
Solo + 1,5 % de Fibra	x	x
Solo + 1 % de Fibra Tratada	-	x
Solo + 1,5 % de Fibra Tratada	-	x

Fonte: Próprio Autor

Nos próximos itens são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples para as misturas indicadas no Quadro 3. Para a moldagem dos corpos de prova dos ensaios de resistência à compressão foi considerado a umidade ótima de 14,25 % e peso específico aparente seco de 1,84 g/cm<sup>3</sup> para todas as misturas. Então realizou-se a comparação dos resultados de resistência máxima à compressão pelo índice de vazios de cada mistura de solo natural e solo + fibras, traçando os gráficos de tensão x índice de vazios. Para avaliar influência que a adição de fibras exerce na capacidade de deformação das misturas, foi elaborado um comparativo entre a tensão normalizada ( $T/T_{máx}$ ) e o deslocamento vertical das misturas até ruptura. Com isso pode se visualizar qual teor e comprimento de fibra proporciona maior ductilidade para as amostras.

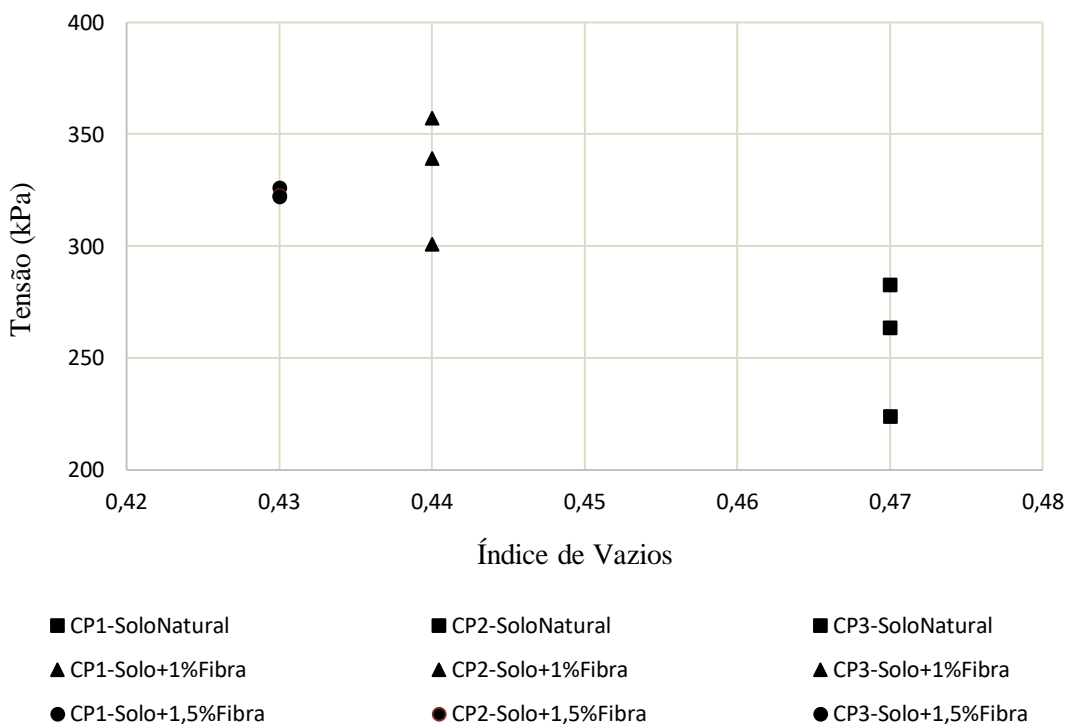
#### 4.1.1 Análise dos resultados dos ensaios de compressão simples em função do comprimento de fibra

Neste item são apresentadas as comparações entre os resultados para os diferentes comprimentos de fibra adicionadas ao solo.

#### 4.1.1.1 Solo+Fibra 10 mm

O Gráfico 8 apresenta a variação de tensão à compressão pelo índice de vazios, para as amostras de solo natural e solo acrescido de 1 e 1,5 % de fibras de 10 mm. Para o solo natural a resistência à compressão máxima foi de 273,01 kPa. A adição de 1% de fibras, obteve resultado melhor, elevando a resistência à compressão máxima para 17,72% em relação ao solo natural. A adição de 1,5% mesmo que tenha aumentado a resistência para 15,62 % em relação ao solo natural, apresentou um resultado abaixo da menor adição. O índice de vazios da adição de 1% obteve uma redução de 6,38% comparado ao solo natural, mostrando que um menor índice pode influenciar no aumento de resistência da mistura, aumentando o contato grão à grão. Para a adição de 1,5%, o índice de vazios reduziu 8,51% em relação ao solo natural, mostrando que para um menor índice a resistência não obteve um maior aumento. Tal fato pode ser explicado pela forma que as fibras podem estar dispostas dentro da massa de solo, podendo ter uma grande quantidade no sentido paralelo à zona de ruptura, diminuindo a sua influência na resistência do material. Nas Figuras 30 e 31 podem ser vistos os corpos de prova do solo natural e solo + Fibra de 10 mm, respectivamente, após a ruptura.

Gráfico 8 - Tensão de compressão máxima pelo índice de vazios das misturas de solo natural e solo + fibras de 10 mm



Fonte: Próprio Autor



Figura 30 – Amostras de solo natural pós ruptura



Fonte: Próprio Autor

Figura 31 - Amostras de solo + Fibra de 10 mm após ruptura: (A) Adição de 1%; (B) Adição de 1,5%

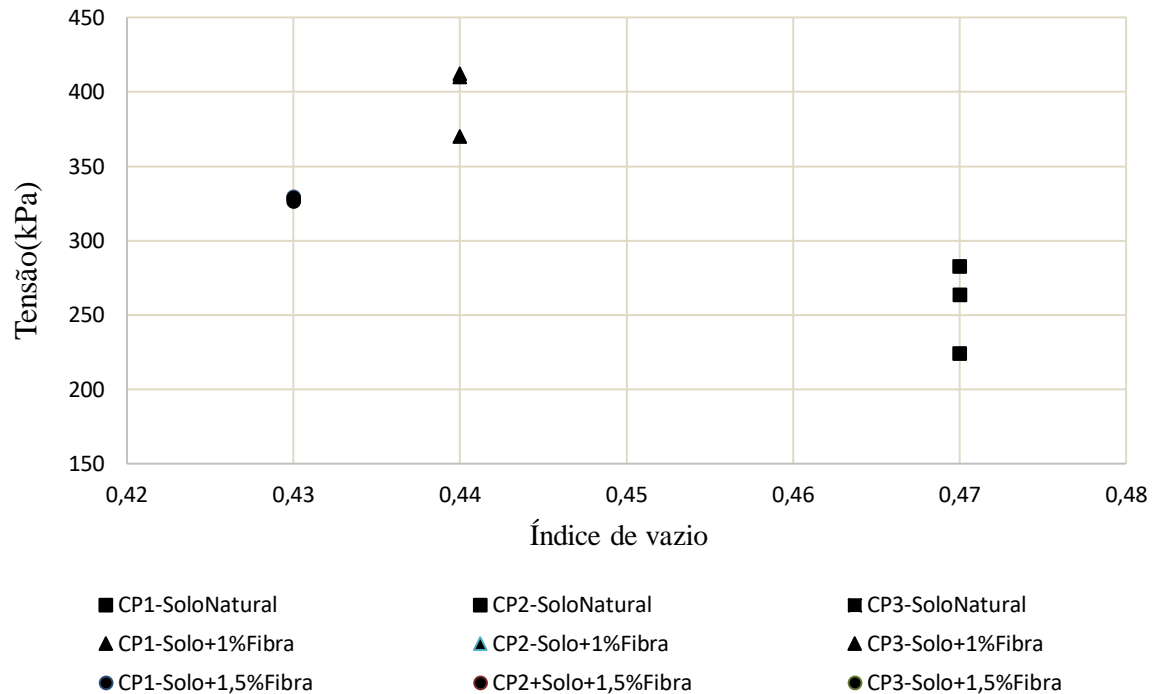


Fonte: Próprio Autor

#### 4.1.1.2 Solo + Fibra 20 mm

O Gráfico 9 apresenta a variação de tensão à compressão pelo índice de vazios, para as amostras de solo natural e solo acrescido de 1 e 1,5 % de fibras de 20 mm. O melhor resultado foi para a adição de 1%, elevando em 31,3% a resistência máxima à compressão do solo natural. A adição de 1,5% de fibras, registrou um aumento de 16,82% em relação ao solo natural. Os dois teores de fibra de 20 mm apresentaram um maior aumento de resistência em relação ao menor comprimento. Como observado nos resultados das fibras de 10 mm, para um índice de vazios de 0,44 e adição de 1% de fibra obteve resultados de resistência à compressão mais satisfatórios. Para uma maior adição de 1,5% e conseqüentemente um menor índice de vazios, os resultados novamente ficaram abaixo da menor adição de fibras. Na Figura 32 pode ser visto as amostras de solo + Fibra de 20 mm após a ruptura.

Gráfico 9 - Tensão de compressão máxima pelo índice de vazios das misturas de solo natural e solo + fibras de 20 mm



Fonte: Próprio Autor

Figura 32 - Amostras de solo + Fibra de 20 mm após ruptura: (A) Adição de 1%; (B) Adição de 1,5%



Fonte: Próprio Autor

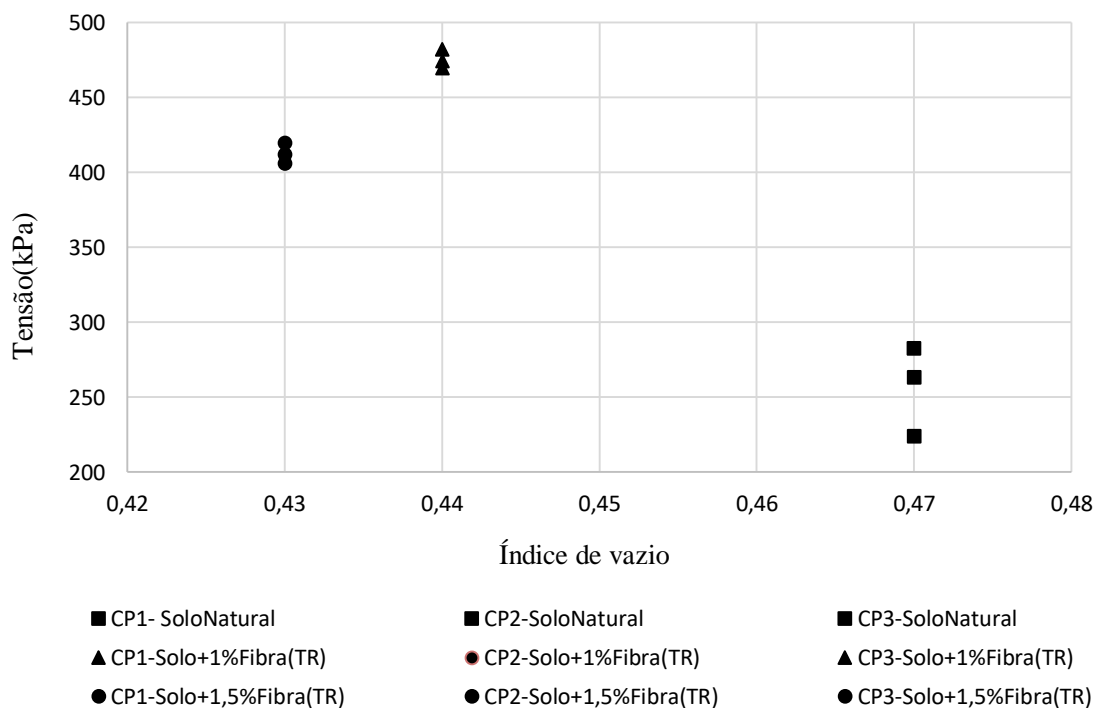
#### 4.1.1.3 Solo + Fibras Escarificadas

Como dito no item 3.2.4, as amostras de solo + fibras escarificadas foram moldadas com a umidade ótima de 14,25%. Foram ensaiadas no total 6 amostras com 7 dias de cura, protegidas

por papel filme. Após realização dos ensaios com adições de 1% e 1,5% de fibras sem tratamento superficial, foi obtido resultados mais satisfatórios para as fibras de comprimento 20 mm. Desta forma, optou-se avaliar a influência da escarificação, apenas para o comprimento de 20 mm com dois teores de 1% e 1,5%.

O Gráfico 10 apresenta o comparativo entre o solo natural e as amostras de solo+fibra escarificada, analisando a influência do tratamento nas misturas. Para as amostras de solo+1% de fibra escarificada o crescimento de tensão foi de forma rápida até atingir o pico de 475,35 kPa. Em relação ao solo natural o aumento de resistência à compressão da mistura de solo+fibra escarificada foi de 42,60% para adição de 1% e 33,75% para o teor de 1,5%. Como observado nos resultados anteriores, para o teor de 1% de fibra e índice de vazio de 0,44 o aumento de resistência foi maior. A adição de 1,5% de fibra escarificada apresentou um índice de vazios de 0,43, porém um menor aumento de resistência em relação a adição de 1%. Na Figura 33, pode-se observar as amostras de solo+fibra escarificada pós ruptura.

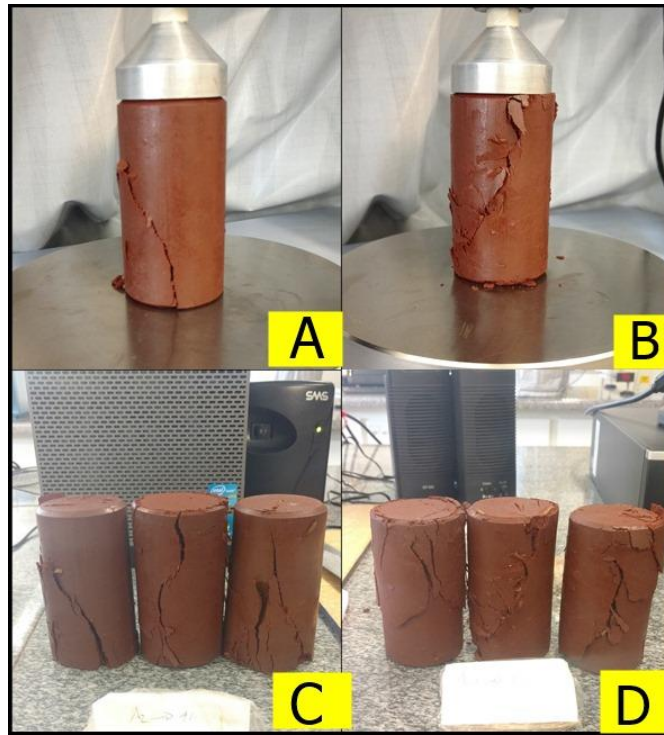
Gráfico 10 - Tensão de compressão máxima pelo índice de vazios das misturas de solo natural e solo + fibras de 20 mm



Fonte: Próprio Autor



Figura 33 - Amostras de Solo + Fibra Escarificada após ruptura: (A) Amostra de Solo+1%; (B) Amostra de Solo+1,5%; (C) Amostras de solo+1%; (D) Amostras de solo+1,5%



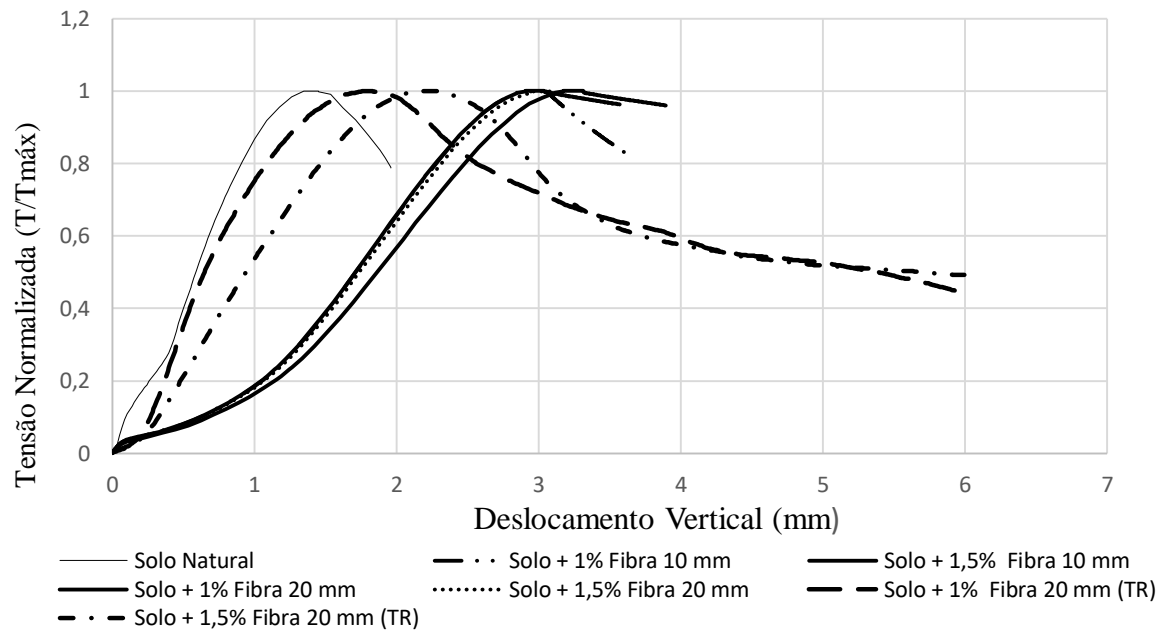
Fonte: Próprio Autor

#### 4.1.2 Influência da adição de fibras na capacidade de deformação das misturas

O Gráfico 11 apresenta os valores de tensão normalizada ( $T/T_{\text{máx}}$ ) e deslocamento vertical das misturas. Observa-se que o solo natural apresentou uma rápida redução de resistência após ruptura, mostrando um comportamento frágil do material. No geral todas as misturas acrescidas de fibras apresentaram um aumento de ductilidade ao solo natural após ruptura. Para a adição de fibras de 10 mm, os teores de 1% e 1,5%, registraram um crescimento de tensão lento, porém a adição de 1,5% apresentou um redução de tensão pós ruptura mais lenta que a menor adição, acrescentando uma maior ductilidade para a amostra. Para as fibras de 20 mm sem tratamento superficial, os dois teores de 1% e 1,5% mostraram um acréscimo de tensão lento, mesmo comportamento para a redução de tensão pós ruptura, onde as duas misturas apresentaram um comportamento dúctil. As misturas de fibras escarificadas de 20 mm, apresentaram um aumento de tensão mais rápido em relação as fibras sem tratamento. A redução de tensão pós ruptura para as misturas de solo + fibras escarificadas, também foi de forma rápida, mostrando um comportamento frágil da mistura em relação as fibras lisas. A maior capacidade de deformação das misturas acrescidas de fibras lisas, pode dada pela melhor acomodação das fibras na massa do solo, suportando um carregamento sem sofrer grandes

deformações. A mistura de solo + 1% de Fibra 20 mm, sem tratamento, registrou o maior deslocamento até ruptura, 54,89 % maior que o solo natural.

Gráfico 11 – Tensão normalizada e deslocamento vertical para as amostras de solo natural, solo + fibras lisas e solo + fibras escarificadas



Fonte: Próprio Autor

#### 4.2. Análise global dos resultados

O Quadro 4 apresenta o resumo dos resultados obtidos para as misturas ensaiadas, indicando a resistência máxima à compressão de pico, o aumento em relação ao solo natural, deslocamento máximo até ruptura e índice de vazios para cada mistura.

Quadro 4 – Resultados obtidos de resistência à compressão de pico, deslocamento máximo de pico e índice de vazios para todas as misturas

Comprimento de Fibra	Composição das Amostras	Resistência à Compressão de pico (kPa)	Aumento de Resistência à Compressão (%)	Deslocamento Máximo (mm)	Índice de Vazios
	Solo Natural	273,01	-	1,43	0,47
10 mm	Solo + 1 % de Fibra	331,82	17,72	2,92	0,44
	Solo + 1,5 % de Fibra	323,55	15,62	2,91	0,43
20 mm	Solo + 1 % de Fibra	397,27	31,30	3,17	0,44
	Solo + 1,5 % de Fibra	328,20	16,82	3,09	0,43
	Solo + 1 % de Fibra Tratada	475,35	42,60	1,78	0,44
	Solo + 1,5 % de Fibra Tratada	412,09	33,75	2,16	0,43

Fonte: Próprio Autor

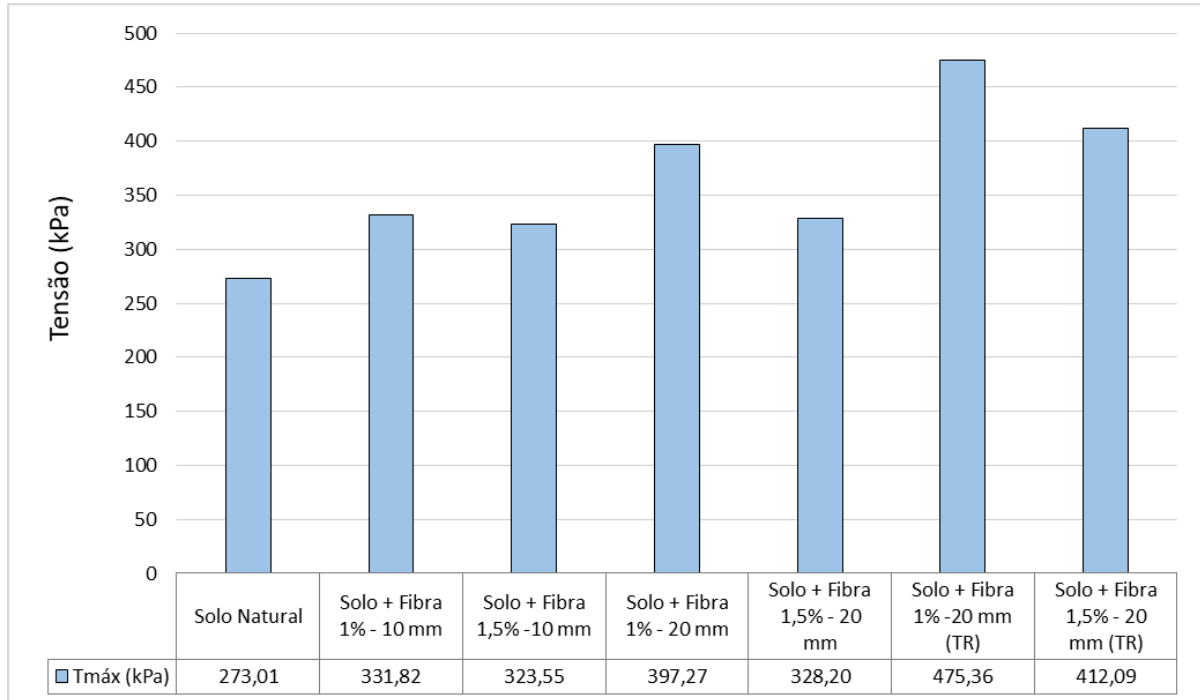
Em geral todas as misturas solo+fibra apresentaram aumento na resistência à compressão em relação ao solo natural. O deslocamento máximo também foi elevado para as misturas de solo+fibra.

Com relação ao comprimento de fibra, a de 20 mm obteve melhor desempenho que a fibra de 10 mm. Isto comprova o que foi dito por Taylor (2000), que quanto maior o comprimento das fibras, menor a possibilidade de arrancamento das mesmas, desta forma aumentando a influência na resistência do material. Analisando os teores de fibra utilizados, a adição de 1% obteve melhor desempenho que 1,5%. Como citado anteriormente, pode ser pela grande quantidade de fibras em paralelo a zona de ruptura, ou também, como visto nos resultado dos ensaios de compactação com inclusão de fibras, uma maior adição de fibras, pode ter influenciado na umidade ótima do material. Divergindo deste comportamento, Reschetti (2008), para um solo arenoso laterítico, obteve aumento de 31,4 % de resistência a compressão para adição 1,5% de fibras de vidro, em relação a adição de 1%.

O Gráfico 12 mostra que o melhor resultado para as amostras ensaiadas, foi a mistura solo+1% de fibra escarificada com 20 mm de comprimento, registrando a capacidade máxima à compressão de 475,35 kPa, elevando a resistência à 42,6% em relação ao solo natural. Para as fibras lisas sem tratamento o melhor resultado obtido foi para a mistura solo+1% de fibra de 20 mm sem tratamento, elevando a resistência à compressão do solo em 31,3%. Este aumento de resistência também pode ter sido influenciado pela redução do índice de vazios para a adição de 1%.

Silva (2007), também obteve melhor resultado para uma adição de 1% de fibra pet, elevando a resistência de um solo argila em 67,7%, lembrando que utilizou comprimento de fibra 30 mm e largura de 5 mm.

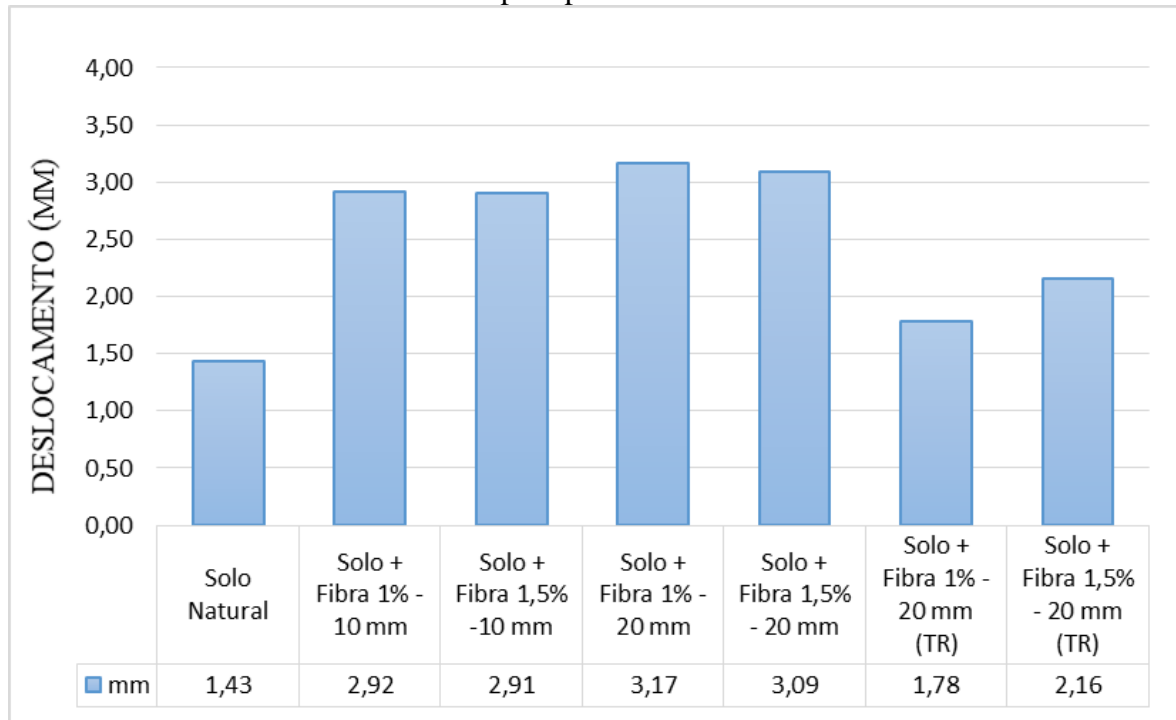
Gráfico 12 – Tensão máxima de compressão para todas as misturas



Fonte: Próprio Autor

O Gráfico 13 apresenta os valores de deslocamento máximo até ruptura para cada mistura analisada. A mistura de solo+1,5% de fibra 20 mm escarificada teve um deslocamento máximo de 2,16 mm, 33,79% maior que o solo natural. A amostra que apresentou maior deslocamento vertical até ruptura foi a mistura solo+1% de fibra lisa 20 mm, deslocando 3,17 mm até ruptura, 54,89% a mais que o solo natural e 31,86% maior que o solo+1,5% de fibra 20 mm com tratamento. O que pode explicar a mistura com fibra sem tratamento deslocar mais até ruptura, é que esta pode ter mais facilidade de se acomodar por deslizamento na massa de solo, suportando um carregamento por mais tempo. Isto pode ser analisado através do Gráfico 13 que as misturas solo+fibras lisas apresentaram um comportamento mais dúctil que as misturas solo+fibras com tratamento. Silva (2007), de para mistura solo+1% de fibra lisa de 30 mm, registrou um deslocamento máximo de 2,37 mm, 4% a mais que o solo argila.

Gráfico 13 – Deslocamento máximo de pico para todas as misturas



Fonte: Próprio Autor

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

Após análise dos resultados obtidos e suas variações, é possível chegar às considerações finais. Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões e sugestões para as pesquisas futuras, da análise obtida através do programa experimental do solo em estudo. As considerações abordadas a seguir, são ligadas aos resultados adquiridos no estudo, onde se fez possível avaliar a influência das fibras PET no solo.

### 5.1 Considerações Finais

Para o estudo realizado, antes de desenvolver os objetivos principais da pesquisa e determinar a influência das fibras PET nos parâmetros de resistência a compressão simples, o solo foi caracterizado. Utilizando a Metodologia MCT para a classificação do solo, o material foi descrito como um solo arenoso laterítico.

Verificou-se a influência da adição dos teores de, 1% e 2% de fibras PET, nos parâmetros de compactação do solo, umidade ótima e peso específico aparente seco máximo. Após execução dos ensaios e obtenção dos resultados, foi visto que para a adição de 1% de fibra, não gerou grandes modificações nos parâmetros analisados, onde a umidade ótima registrou aumento de 1,72%, e redução do peso específico aparente seco máximo em 2,72%. Para a adição de 2%, os resultados causaram modificações mais significativas nos parâmetros de compactação do solo, onde a umidade ótima foi elevada em 16,18%, e o peso específico aparente seco máximo, obteve redução de 5,98%, em relação ao solo natural. A umidade ótima então utilizada para a moldagem dos corpos de prova, foi de 14,25% de teor de água na mistura.

A adição de 2% de fibras, apresentou problemas na moldagem dos corpos de prova dos ensaios de compressão simples, apresentando uma grande concentração de fibras na massa do solo, apresentando o surgimento de fissuras pós moldagem. Assim, foram adotados os teores de 1 e 1,5% para os ensaios de compressão simples.

Inicialmente para os ensaios de compressão simples, foi utilizada a adição de fibras lisas (sem tratamento superficial) de 10 e 20 mm, com os teores de 1 e 1,5%. Após análise dos resultados, foi relatada a falta de homogeneidade para as adições de 1,5%, apresentando resultados menores que os esperados. Esperava-se uma resistência à compressão crescente com o aumento de teor de fibra e redução do índice de vazios. Com relação ao comprimento de fibra, a de 20 mm atendeu a expectativa para as fibras lisas, onde obteve os melhores resultados de resistência máxima à compressão. Para as fibras sem tratamento, a mistura que apresentou melhor resultado, foi o solo com adição de 1% de fibra de 20 mm de comprimento, registrando

um aumento de resistência de 31,30% em relação ao solo natural. O melhor resultado obtido para a adição de fibras sem tratamento para o teor de 1,5%, foi um aumento de 16,82% da resistência do material.

Para uma melhor aderência solo/fibra, foi optado por fibras tratadas superficialmente por escarificação, para o comprimento de 20 mm e teores de 1 e 1,5% de fibra. As duas amostras apresentaram resultados mais satisfatórios, que as misturas solo + fibras lisas. Como ocorrido nas fibras lisas, o teor de 1,5%, obteve resultado abaixo do menor teor, apresentando uma evolução na resistência de 33,75%.

A mistura que mostrou melhor resultado para a pesquisa, foi de solo com a adição de 1% de fibra PET com tratamento superficial e comprimento de 20 mm. A mistura apresentou uma evolução de 42,60 % na resistência à compressão de pico do solo.

De forma geral, a adição de fibras PET ao solo aumentou a resistência à compressão máxima, como também influenciou na resistência pós-ruptura, onde as fibras atribuíram comportamento mais dúctil para o mistura solo+fibras. Foi analisado a influência das fibras para o índice de vazios das misturas, onde para a adição 1% de fibra o índice reduziu em 6,38%, auxiliando no aumento de resistência do material. Para a adição de 1,5% o índice de vazios foi reduziu em 8,51%, porém obteve um aumento de resistência menor que a adição de 1%, mostrando que para teores e índices de vazios maiores a resistência decresceu. As deformações das misturas também foram analisadas, onde a adição de fibras, além de reduzir a velocidade de crescimento de tensões, também tornaram a redução de resistência pós-ruptura, mais lenta, suportando maiores deformações sem romper. Em relação a deformações, as fibras lisas apresentaram maior ductilidade do que fibras escarificadas, isto pode ser, pela melhor acomodação destas na massa do solo. As fibras tratadas por ter mais aderência ao solo, podem resistir uma maior tensão mais rapidamente, reduzindo sua ductilidade pós-pico.

Com base nos resultados obtidos, a adição de fibras PET ao solo, demonstrou ser uma técnica viável. É necessário ter cuidado com os métodos de mistura, para que a disposição das fibras no material, ocorra de forma homogênea, para não acarretar em grandes concentrações de fibras na matriz do solo, favorecendo a abertura de fissuras, prejudicando a eficiência e a capacidade mecânica da mistura solo+fibra.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O estudo sempre procurou atender os objetivos propostos, mesmo que alguns problemas foram relatados durante os processos práticos, foi importante ter a percepção destes, e criar alternativas e soluções para atingir os objetivos principais.

A adição de fibras provenientes de garrafas PET ao solo, não apresenta uma grande variedade de estudos, comparado a outros tipos de reforços utilizados. Com a intenção de complementar este estudo, algumas sugestões para ampliação e continuação do estudo de reforço do solo com fibras PET em trabalhos futuros são citadas a seguir.

- Utilização de fibras PET, produzidas mecanicamente, possuindo larguras e comprimentos menores, e medidas mais precisas, obtendo uma maior padronização no reforço utilizado;
- Estudar outros métodos de reforço com a matriz de solo, analisando qual tipo de reforço, apresenta melhor entrosamento com o solo, verificando o aumento de resistência de pico para teores e comprimentos variados.
- Realizar estudos com diferentes tratamentos superficiais, avaliando a influência destes na capacidade mecânica da fibra, e qual possui melhor interação com a mistura solo+fibra;
- Realizar ensaios de cisalhamento direto, com adição de fibras PET, em solos arenosos e argilosos, e analisar o comportamento das misturas para a resistência ao cisalhamento.
- Estudar a influência de fibras PET em outras matrizes de compósitos, avaliando o comportamento das adições de fibras PET em solos estabilizados quimicamente;
- Aplicar modelos numéricos, reproduzindo o comportamento do solo reforçado com fibra PET, em base e sub-base de pavimentos.



## 6 REFERÊNCIAS

ABIPET – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **10° Censo da reciclagem do pet no Brasil**. Araçatuba-SP,2016.

ABIPET – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **Indústria do pet no Brasil**. Araçatuba- SP, 2016.

BARONI, M. **Notas de Aula – Compactação dos solos**. Universidade Federal do Pampa. Alegrete-RS, 2014.

BASTOS, C. **Curso de mecânica dos solos**. Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande-RS, 2014.

BIANCHINI, M. **Estudo da resistência ao cisalhamento de um solo argilo-arenoso com a inclusão de fibras de polipropileno**. Tese (Graduação em Engenharia Civil): Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2013.

BUDINSKI, K.G.; BUDINSKI, M.K. **Engineering materials: Properties and selection**. 8ª edição. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005, 853p.

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

BUENO, B.S.; VERTEMATTI, J.C. Introdução. In: VERTEMATTI, J.C. **Manual brasileiro de geossintéticos**. 1ª edição. São Paulo: Edgar Blücher, 2004.13p.

CASAGRANDE, M.D.T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. Tese ( Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

CASAGRANDE, M. D. T.; CONSOLI, N.C.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P. D. M. Comportamento em campo e laboratório de um solo reforçado com fibras. Artigo técnico. Solos e Rochas. São Paulo. 25.p. 247-255, 2002.

CASAGRANDE, M.D.T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. Tese ( Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; ULBRICH, L A. **Influence of Fibers and Cement Addition on Behavior of Sand Soil**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 124, nº 12, 1998.

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.

CONSOLI, N.C.; CASAGRANDE, M.D.T.; COOP, M.R. **Behavior of a fiber-reinforced sand under large strains**. In: 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Osaka, 2005.

DAS, B.M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica – tradução da 6ª edição norte-americana**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

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.

DOMONE, P.; ILLSTON, J. **Construction Materials: Their nature and behaviour**. 4ª edição. New York: Spon Press, 2010.

EHRlich, M.; BECKER, L. **Muros e taludes de solo reforçado – Projeto de execução**. São Paulo : Oficina de Textos, 2009. 17, 20p.

FARO, V. **Notas de Aula – Mecânica dos solos**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

FESTUGATO, L. **Comportamento de hidratação e resposta cisalhante cíclica de resíduo de mineração cimentado reforçado com fibras**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

FEUERHARMEL, M.R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

FLETCHER, C. S e HUMPHRIES, W. K. **California Bearing Ratio Improvement**. TRB – Transportation Research Record, nº1295, 1991.

GERSCOVICH, D. **Notas de Aula- Resistência ao cisalhamento de solos**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Departamento de Estruturas e Fundações. Rio de Janeiro, 2010.

GIRARDELLO, V. **Ensaio de placa em areia não saturada reforçada com fibras**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

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

GUELBERT, T. **A embalagem pet e a reciclagem: uma visão econômica sustentável para o planeta**. In: XXVII: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Foz do Iguaçu-PR, 2007.

HANNANT, D.J. **Durability of polypropylene fibers in Portland cement- based composites: eighteen years of data**. Cement and Concrete Research, v. 28, n. 12, p. 1809-1817, 1998.

HEINECK, K.S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

HOARE, D.J. **Laboratory Study of Granular Soils Reinforced with Randomly Oriented Discrete Fibres**. IN: Internacional Conference on Soil Reinforcement. Paris.v.1, p. 47-52, 1979.

HOLLAWAY, L. **Polymers: types, properties and applications**. In: DOMONE,P.; ILLSTON,J. **Construction Materials: Their nature and behaviour**. 4ª edição. New York: Spon Press, 2010. p 307-317.

HOMEM, T.R. **Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

NETTO, J. F. **Análise da permeabilidade de diferentes solos com base nas classificações tradicionais e na metodologia MCT**. Tese (Graduação em Engenharia Civil): Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2018.

KLAMT, R.A. **Utilização da cal e da cinza da casca de arroz no melhoramento das propriedades geotécnicas dos solos**. Tese (Graduação em Engenharia Civil): Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2012.

KLEUBER, R.; ALMEIDA, M. O.; FERRARI JÚNIOR, M. J.; ATHAYDE, G. B.; SONCIM, S. P. **Utilização da areia de PET em substituição a areia natural na dosagem de concretos estruturais convencionais**. Anais, 46º IBRACON. Florianópolis, SC, p. 1686 – 1694. 2004.

KRAINER, C. **Notas de Aula – Noções de Resistência à compressão de solos**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

MAGALHÃES, M.A. **Resistência ao arrancamento de grampos com fibras de polipropileno**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

MAHER, M.H.; HO, Y.C. **Behavior of Fiber-Reinforced Cemented Sand Under Static and Cyclic Loads**. Geotechnical Testing Journal, v. 16, nº 3, p. 330-338, 1993.

MAHER, M.H.; HO, Y.C. **Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite**. Journal of Geotechnical Engineering, v.120, n.8, p.1387-1393, 1994.

MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. 1º edição. São Paulo: Edgar Blücher, 1991.

MARANGON, E. **Aspectos do comportamento e da degradação de concreto de cimento portland reforçados com fibras provenientes da reciclagem de garrafa pet**. Tese (Graduação em Engenharia Civil): Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí,2004.

MARANGON, M. Notas de Aula – Resistência ao cisalhamento dos solos. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora-MG, 2009.

MONTARDO, J.P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999.

NATARAJ, M.S.; ADDULA, H.R.; MCMANIS, K.L. **Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils**. In: International Symposium on Environmental Geotechnology. San Diego. Anais... v.1, p.826-835, 1996.

NATARAJ, M.S e McMANIS, K.L. **Strenght and Deformation Properties of Soils Reinforced with Fibrillated Fibers**. Geosynthetics International, vol.4, p.67-79. San Diego – USA, 1997.

OMINE, K; OCHIAI, H.; YASUFUKU,N.; KATO,T. **Effect of plastic wastes in improving cement-treated soils**. In: **International Conccress on Environmental Geotechnology**. Rotterdam: Balkema,1996. P.875-880.

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

REFALKO, S. D. e BRANDON, T. L. **Fiber reinforcement foir rapid stabilization of soft clay soils**. TRB, Annual Meeting CD-ROM, 2007.

RESCHETTI, P.R.J. **Avaliação do comportamento mecânico de um solo arenoso fino laterítico reforçado com fibras para uso em pavimentação**. Tese ( Mestrado em Engenharia Civil) : Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. São Paulo, 2008.

RODRIGUES, R.E. **Caracterização e estabilização de um solo na cidade de Alegrete/RS com cimento Portland e cinza de casca de arroz**. Tese (Graduação em Engenharia Civil): Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2012.

SACHETI, A.S. **Resistência à compressão simples de um solo artificialmente cimentado reforçado com fibras de vidro**. Resumo publicado no GEORS 2009 – V Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul. Pelotas. Rio Grande do Sul, 2009.

SALES, K.C.S. **Melhoria de solos por inclusão de fibras naturais**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade de Brasília. Brasília, 2011.

STAUFFER, S.D. e HOLTZ, R.D. **Stress-strain and strength behavior of staple fiber and continous filamento-reinforced sand**. TRB, Transportations Research Record, n° 1474, p. 82-95, 1995.

SILVA, F. A. **Tenacidade de materiais compósitos não convencionais**. Rio de Janeiro, 2004. 234 p. Dissertação (Mestradoem Engenharia Civil), Rio de Janeiro, PUCRJ.

SILVA, C.C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil): Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

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

SPECHT, L.T.; 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.

TAYLOR, G.D. **Materials in Construction: An introduction.** 3ª edição. England: Pearson Education Limited, 2000, p. 334.

TEODORO, J.M. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

TEODORO, J. M.; BUENO, B.S. **Estudo do comportamento dos solos reforçados com fibras plásticas de polipropileno.** In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Brasília, 1998. Anais...v.2, p.1093-1000.

TRINDADE, T.P.; IASBIK, I.; LIMA, D.C.; SILVA, C.H.C.; BARBOSA, P.S.A. **Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória : estudo em laboratório.** REM: Revista Escola de Minas, v. 57, n. 1, p. 53-58. Ouro Preto, 2004.

ULBRICH, L.A. **Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.

VENDRUSCOLO, M.A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

ZORNBERG, J.G. **Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil.** Géotechnique, London, v. 52, n. 8, p. 593-604, 2002.