

**MELHORAMENTO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS  
ARGILOSOS ATRAVÉS DA INSERÇÃO DE PET EM FIBRAS PARA  
APLICAÇÃO EM GEOTECNIA**

**LUIZ EDUARDO DOS SANTOS COSTA MORAES E SILVA**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL - ENGENHARIA CIVIL

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO – 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**MELHORAMENTO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS  
ARGILOSOS ATRAVÉS DA INSERÇÃO DE PET EM FIBRAS PARA  
APLICAÇÃO EM GEOTECNIA**

**LUIZ EDUARDO DOS SANTOS COSTA MORAES E SILVA**

ORIENTADORA: MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO–2018  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**MELHORAMENTO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLOS  
ARGILOSOS ATRAVÉS DA INSERÇÃO DE PET EM FIBRAS PARA APLICAÇÃO  
EM GEOTECNIA**

**LUIZ EDUARDO DOS SANTOS COSTA MORAES E SILVA**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM  
ENGENHARIA CIVIL.

**APROVADA POR:**

---

**Prof<sup>a</sup>. Michéle Dal Toé Casagrande, D.Sc (UFRGS)**  
(Orientadora)

---

**Prof. Luis Fernando Martins Ribeiro, D.Sc (UnB)**  
(Examinador interno)

---

**Prof. Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, D.Sc (UnB)**  
(Examinador externo)

BRASÍLIA/DF, 04 DE DEZEMBRO DE 2018

## FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, LUIZ EDUARDO DOS SANTOS COSTA MORAES E

**Melhoramento do Comportamento Mecânico de Solos Argilosos Através da Inserção de PET em Fibras para Aplicação em Geotecnia** [Distrito Federal] 2018.

49p, 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Melhoramento de Solos

2. PET em Fibras

3. Solos Argilosos

4. Aplicações

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Bacharel)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, L, E dos S, C, M e. (2018). Melhoramento do Comportamento Mecânico de Solos Argilosos Através da Inserção de PET em Fibras para Aplicação em Geotecnia. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 49p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Luiz Eduardo dos Santos Costa Moraes e Silva

TÍTULO: Melhoramento do Comportamento Mecânico de Solos Argilosos Através da Inserção de PET em Fibras para Aplicação em Geotecnia.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Luiz Eduardo dos Santos Costa Moraes e Silva  
SMDB Conj. 12-D Lote 7 Casa B, Lago Sul  
CEP: 71.680-124 Brasília – DF – Brasil  
e-mail: du.moraesesilva@gmail.com

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da inserção de fibras de PET no melhoramento do comportamento mecânico de solos argilosos e avaliar sua aplicação como alternativa na Engenharia Geotécnica.

A utilização de materiais alternativos em solos tem se tornado uma possibilidade para a reciclagem de resíduos que muitas vezes seriam descartados. Além de minimizar um grande problema ambiental, essa alternativa pode aprimorar as características mecânicas da matriz e conferir resistências melhores que as do solo puro. Esse aumento da resistência é capaz de propiciar melhores e mais modernas obras de Engenharia. Partindo dessas premissas, ensaios de compressão simples foram propostos para avaliar os compósitos solo-reforço.

A ideia é analisar as resistências à compressão no pico e no pós-pico para dois tipos de fibras e compará-las entre si e com a matriz sem adição.

## **ABSTRACT**

The present study aims to analyze the influence of insertion of PET fibers in improving the mechanical behavior of clay soils and to evaluate its application as an alternative to Geotechnical Engineering.

The use of alternative materials in soils has become a possibility for the recycling of waste that would often be discarded. In addition to minimizing a major environmental problem, this option can improve the mechanical characteristics of the matrix and grant better resistances than pure soil. This increase in resistance is capable of providing better and more modern engineering works. Based on these assumptions, simple compression tests were proposed to evaluate soil-reinforcing composites.

The idea is to analyze the peak and post-peak compression strengths for two types of fibers and to compare them with each other and with the matrix without addition.

# SUMÁRIO

1.xxx

1.1111

1.2222

1.3222

2444

2.1444

2.1.1444

2.1.2444

2.1.3666

2.1.4888

2.2101010

2.2.1101010

2.2.2111111

2.3131313

2.4141414

3171717

3.1191919

3.1.1191919

3.1.2212121

3.2232323

3.3242424

4252525

4.1252525

4.1.1252525

4.1.2272727

4.2272727

4.3282828

4.4292929  
4.5303030  
5313131  
5.1313131  
5.2323232  
6353535

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS37

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Propriedades das fibras poliméricas7

Tabela 2: Resultados do ensaio de Limite de Plasticidade25

Tabela 3: Resultados do ensaio de Limite de Liquidez26

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Estruturas de polímeros a) termoplásticos e b) termofixos.10

Figura 2: Principais polímeros termoplásticos consumidos no Brasil.12

Figura 3: Destino do PET reciclado no Brasil.13

Figura 4: Solo do campo experimental da UnB.18

Figura 5: a) Fibra PET de 3,3 dtex com 56 mm; (b) Fibra PET de 1,4 dtex com 38 mm.18

Figura 6: Limites de Atterberg.20

Figura 7: Aparelho de Casagrande.21

Figura 8: Ensaio de limite de plasticidade.21

Figura 9: Agitador mecânico para peneiramento.22

Figura 10: Soquete para ensaio de compactação em miniatura.24

Figura 11: a) prensa de CBR automática e b) câmera FLIR C2.24

Figura 12: Gráfico de Limite de Liquidez26

Figura 13: Gráfico do ensaio de curva granulométrica27

Figura 14: Curva de compactação do solo puro28

Figura 15: Gráfico de tensão-deformação para solo puro28

Figura 16: Gráfico de tensão-deformação de solo com adição de 0,5 % de fibra PET de 1,4 dtex e 38mm sem aquecimento29

Figura 17: Gráfico de tensão-deformação de solo com adição de 0,5% de fibra PET de 3,3 dtex e 56mm sem aquecimento29

Figura 18: Gráfico de tensão-deformação de solo com adição de 0,5% de fibra PET de 1,4 dtex e 38mm com aquecimento30

Figura 19: Gráfico de tensão-deformação de solo com adição de 0,5% de fibra PET de 3,3 dtex e 56mm com aquecimento31

Figura 20: Influência da presença de fibra PET na matriz de solo31

Figura 21: Influência do diâmetro das fibras e do aquecimento na resistência à compressão dos corpos de prova<sup>32</sup>

Figura 22: Corpo de prova de solo sem aquecimento com adição de PET durante ensaio de compressão simples<sup>33</sup>

Figura 23: Corpo de prova de solo com aquecimento com adição de PET durante o ensaio de compressão simples<sup>34</sup>

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

A introdução da embalagem PET teve início na década de 70, nos Estados Unidos e em sequência na Europa. O PET chegou ao Brasil no ano de 1988, mas só começou a ser utilizado em embalagens em 1993. Os benefícios trazidos por esse material foram muitos grandes, assim como os problemas gerados, especialmente com o meio ambiente e depósito dos resíduos. Milhares de toneladas de PET são produzidas anualmente no Brasil, com os números em tendência de crescimento. Nos Jogos Olímpicos do Rio de Janeiro, a produção e consumo do polímero foi estimado em 840 kton, com apenas metade desse valor com expectativas de reciclagem.

Outro grave problema é a falta de espaço nos aterros, o que gera falta de locais para descarte e tratamento dos resíduos. É importante ressaltar que esse fator é de suma importância, já que o PET, além de necessitar de bastante espaço para deposição, possui tempo de decomposição na casa dos 100 anos. Isso pode causar graves problemas, entre eles a perda de biodiversidade, o aumento de enchentes, a poluição da água e dos lençóis freáticos. Também convém lembrar que o PET reciclado não pode ser 100% reciclado, pois existe o risco de pré-contaminação com outras substâncias. A maior utilidade da reciclagem do PET é o emprego na indústria têxtil (50% de toda a reciclagem do produto, segundo a ABIPET). Essas fibras conferem ao tecido características bastante únicas, como resistência, estabilidade dimensional e durabilidade, o que aumenta a a qualidade final das peças.

A utilização de materiais alternativos em pesquisas geotécnicas é uma outra possibilidade para o PET reciclado, o que pode aumentar os investimentos nessas linhas de pesquisa e reduzir os impactos negativos que são gerados. Apesar de ser um solo com boas características, a matriz argilosa pode ser uma boa alternativa para a utilização das fibras recicladas, já que possuem coesão e permeabilidade bem favoráveis. A importância de reforçar este tipo de solo é avaliar como que, de alguma maneira, o reforço pode melhorar este processo de agregação dos grãos do solo. Portanto, este trabalho tem o objetivo de apresentar e interpretar o comportamento do solo argiloso reforçado com fibras de resíduo PET, com o objetivo de estudar a viabilidade das fibras PET como material de reforço. Para isso, serão realizados estudos experimentais pela caracterização física e mecânica dos compósitos. O uso deste resíduo como material alternativo

pode ser alternativa para a aplicação desse solo reforçado como base de fundações superficiais, taludes, camadas de aterros sanitários e aterros sobre solos moles.

## **1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, começando com o introdutório (Capítulo 1), seguido do Capítulo 2, que apresenta a revisão bibliográfica sobre PET e suas características. A revisão também apresenta informações sobre o reforço de solos com resíduos em geral, além de mostrar outros estudos realizados nessa área e uma pequena parte sobre a influência do aquecimento. O Capítulo 3 discute a metodologia dos ensaios que serão realizados na próxima etapa do trabalho, bem como seus equipamentos e procedimentos de execução. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com os ensaios realizados, desde a caracterização física até a compressão simples dos corpos de prova. No Capítulo 5, são realizadas as análises desses resultados, buscando explicar o observado nos gráficos resultantes e, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para a continuação da pesquisa e para outras investigações acerca do tema.

## **1.3 OBJETIVOS**

A escolha da fibra se deu por conta da grande utilização desse tipo de reforço em outros estudos realizados em diferentes tipos de solo. As fibras utilizadas na presente pesquisa são de dois tipos (1,4 dtex com 38 mm e 3,3 dtex com 56 mm). Como principal objetivo, o estudo pretende avaliar a utilização das fibras PET como reforços em argilas, com ênfase na melhoria das propriedades em relação ao material sem aditivos por meio de ensaios de resistência à compressão. O programa experimental foi definido para a realização de ensaios de caracterização física da argila e ensaios mecânicos para a matriz pura e misturas, com a determinação de parâmetros que possam ajudar a entender a influência deste material como material de reforço. Dessa forma, com base no objetivo principal espera-se com esse trabalho:

- Avaliar o acréscimo da resistência à compressão no pico e pós-pico para corpos de prova de solo-reforço, por meio de ensaios de compressão simples, comparando-os com a de solo sem adição de PET;

- Avaliar a diferença de comportamento da resistência à compressão no pico e no pós-pico para corpos de prova de solo-reforço, comparando a influência dos dois tipos de diâmetros e comprimentos de fibras na matriz por meio de ensaios de compressão simples;
- Observar a influência do aquecimento nas características de resistência e de modos de ruptura para os dois tipos de fibras, comparando-as entre si e entre a matriz de solo sem adição de PET;

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 SOLOS REFORÇADOS**

#### **2.1.1 CONTEXTO HISTÓRICO**

A ideia da técnica de reforço é bastante antiga e possível de se perceber na natureza em moradias de animais, como pássaros e roedores, ou mesmo com o reforço de solos por meio de raízes vegetais. Desde a antiguidade, os seres humanos perceberam que, ao adicionar materiais diversos no solo, era possível melhorar suas características e propriedades, formando um novo produto mais resistente e durável. A técnica de reforço do solo é, em relação ao aspecto técnico, a técnica mais antiga, quando comparada aos demais procedimentos realizados pela Engenharia Civil (Van Impe, 1989).

O conceito de reforço de solos como é conhecido atualmente foi desenvolvido em meados da década de 1960, quando o engenheiro francês Henry Vidal descobriu os benefícios do emprego da “Terra Armada”. Com essa invenção, Vidal atestou que um elemento de reforço introduzido na matriz do solo aumentaria a resistência ao cisalhamento. Portanto, o conceito de reforço é, em sua essência, qualquer melhoria dos parâmetros do solo devido à adição de outros componentes.

Hoje em dia, a evolução da técnica permitiu o uso de materiais que não possuíam a finalidade de reforço. Pode-se destacar, entre muitos, a borracha moída, fruto da reciclagem de pneus, os diferentes tipos de fibras (vidro, vegetais e recicladas como PET, objeto de estudo neste trabalho) e geossintéticos – que eram usados essencialmente para drenagem e filtração.

#### **2.1.2 SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS**

Pesquisas que estudam a aplicação de fibras como reforço de solos são relativamente recentes. Os primeiros estudos, realizados há aproximadamente três décadas, utilizavam as fibras dispostas de forma aleatória na massa de solo. Isso ocorria para entender como as raízes das plantas influenciavam na resistência ao cisalhamento dos solos (Gray e Ohashi, 1983).

Segundo Casagrande (2005), essas melhorias nas propriedades de um material, oriundo da mistura de outros materiais, podem ocorrer tanto de forma física como química. Quando a estabilização é proveniente de processos químicos, utiliza-se o termo melhoria de solos,

enquanto o termo reforço é utilizado para estabilizações relativas a processos físicos, como a incorporação de fibras. A esse novo material dá-se o nome de compósito, proveniente da mistura de dois ou mais materiais, que possui características que seus componentes originariamente não possuem (Budinski, 1996). Logo, o material compósito é formado por uma matriz que tem suas características aumentadas pela adição de um elemento de reforço.

Com o passar do tempo, observou-se que as fibras vegetais utilizadas em reforço se degradavam muito rápido. Isso gerou uma demanda por materiais compósitos sintéticos que possuíssem maior durabilidade e resistência. Materiais como o fibrossolo (obtido a partir da mistura do solo com fibras sintéticas) começaram a surgir e tiveram seu emprego bastante difundido, como os utilizados em pavimentos (Specht, 2000) e em estabilidade de taludes (Zornberg, 2002).

As fibras são um excelente material para reforço de solos pois aumentam a capacidade portante do composto quando no estado de pós-fissuração. Esse fato é observado principalmente dado o grande potencial do compósito de absorver energia. É possível notar a atingimento de tensões mais elevadas pois a deformação que é necessária para que fissuras sejam abertas é consideravelmente menor que a deformação imposta nas fibras, onde não é esperado significativo aumento de tensões de fissuração (Illston, 1994; Taylor, 1994).

Taylor (1994) também ressalta que a utilização das fibras não impede a formação das fissuras, mas sim contém seu espalhamento, fato que aumenta a resistência à tração da mistura. Esse aumento de resistência é atingido pois as interfaces das fissuras são mantidas unidas pelas fibras, melhorando assim as propriedades práticas da mistura (Hannant, 1994).

Diâmetro e comprimento possuem papel fundamental na união das faces da fissura. Illston (1994) e Taylor (1994) propuseram que a relação entre comprimento e diâmetro,  $l/d$ , denominado fator de forma da fibra, é diretamente proporcional à resistência à tração e inversamente proporcional à resistência de aderência na interação solo-fibra. Dessa forma, uma fibra de aço apresenta sua ruptura geralmente por arrancamento, porque tem elevada resistência à tração. Uma fibra vegetal mais fraca, por outro lado, pode apresentar sua ruptura por escoamento da fibra, uma vez que sua resistência à tração é menor. Também vale ressaltar que características como teor de fibra na matriz (Hannant, 1994) e a forma de disposição e orientação das fibras

(Johnston, 1994) também possui grande importância na atuação do composto pois também influencia nas propriedades físicas e mecânicas.

### **2.1.3 TIPOS DE FIBRA UTILIZADOS EM REFORÇO**

A vasta gama de opções de fibras que podem ser utilizadas como reforço podem ser classificadas em três grandes grupos: as fibras metálicas, as fibras naturais (subdivididas em animais, vegetais e minerais) e as fibras poliméricas. Como não são objeto do presente estudo, os dois primeiros tipos de fibras serão apenas mencionados, enquanto as fibras poliméricas, dentre as quais encaixa-se o PET, serão estudadas mais profundamente.

As fibras poliméricas são fibras sintéticas, fato esse que permite a manipulação de sua estrutura química. Dessa forma, sua grande vantagem é a possibilidade de criação de compósitos não-degradáveis, que não prejudiquem a saúde dos seres humanos, com boas características mecânicas e que sejam inertes. Também possuem diversas formas de serem comercializadas, desde malhas até fibras individuais, podendo assim serem aplicadas de várias formas diferentes em várias situações diferentes.

Existem quatro tipos diferentes de fibras poliméricas: poliamida, polipropileno, polietileno e poliéster. Todos eles podem ser ditos termoplásticos pois possuem a capacidade de não perderem suas propriedades e não terem sua composição alterada com ciclos subsequentes de aquecimento e resfriamento (Casagrande, 2005). Esses polímeros são formados por longas cadeias de compostos polimerizados que estão afastadas entre si e, por isso, possuem a capacidade de deslizarem umas sobre as outras, conferindo a propriedade termoplástica. Seguidamente, serão apontadas algumas características de cada um dos tipos de fibra.

As fibras de poliamida são polímeros que geralmente apresentam baixa resistência e elasticidade por conta de suas moléculas muito espiraladas. Porém, caso durante o processo de manufatura as fibras sejam esticadas e reforçadas com outro material, elas podem apresentar elevadas resistências e módulos de elasticidade (Taylor, 1994). A fibra orgânica mais bem-sucedida no mundo, o Kevlar, é uma poliamida de cadeia aromática, possuindo resistência à tração de aproximadamente 3000 MPa e módulo de elasticidade que varia de 65 a 300 GPa, a depender do tipo de produto (Hollaway, 1994);

As fibras de polipropileno, apesar de possuírem o menor módulo de elasticidade dentre as demais – 8 GPa – são muito boas pois possuem elevada tenacidade (são difíceis de quebrar) e flexibilidade (podem ser esticadas e dobradas sem prejuízo das propriedades), além de possuir elevada resistência à investida de álcalis (Taylor, 1994). Possuem resistência à tração de 400 MPa, que junto com as demais propriedades, tornam os polipropilenos bastante resistentes ao impacto;

As fibras de polietileno não apresentam módulo de elasticidade elevado e sua aderência não é muito boa, mas demonstra altíssima resistência aos álcalis. Para solucionar o problema da aderência ao solo e do módulo de elasticidade, estão sendo utilizados polietilenos com maior densidade. Ainda que apresente grande durabilidade, as deformações de fluência elevadas podem causar problemas de alongamento no combate a fissuras, quando sobre efeito de altas tensões aplicadas durante grandes períodos de tempo (Hannant, 1994);

As fibras de poliéster possuem como representante mais conhecido o polietileno tereftalato ou PET, objeto de estudo desse trabalho. São muito similares aos polietilenos pois dispõem de alta rigidez e resistência, além de densidades relativamente elevadas, detendo dessa forma as mesmas aplicações (Taylor, 1994). Tem resistência à tração de 130 a 800 MPa e módulo de elasticidade variando entre 4 e 15 GPa.

A seguir, a Tabela 1 apresenta uma comparação de algumas propriedades dos tipos de fibra mencionados.

Tabela 1: Propriedades das fibras poliméricas  
(Mano, 1991; Hull e Clyne, 1996, Heineck, 2002)

<b>Tipo de fibra polimérica</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (Gpa)</b>
Polietileno	240	1,1
Poliamida (aramida)	3500	128
Polipropileno	400	8
Poliéster (PET)	130 - 800	4 - 15

#### 2.1.4 INTERAÇÃO SOLO-FIBRA

A interação solo-fibra possui diversas variáveis que influenciam diversos fatores que têm sido amplamente estudados. O comportamento dos solos com e sem reforço foram analisados principalmente em relação aos parâmetros de resistência e deformabilidade. A seguir serão apresentadas algumas pesquisas com o intuito de esclarecer os principais mecanismos que atuam no comportamento dos compósitos reforçados com diferentes tipos de fibra. McGown *et al* (1978) estudou o efeito de alguns elementos de reforço em uma matriz arenosa, tanto no estado denso quanto no fofo. Observaram que o estado de tensão-deformação do solo reforçado está ligado às características de resistência e deformabilidade dos elementos de reforço. Também perceberam que os reforços extensíveis têm a principal função de aumentar a deformabilidade e diminuir a perda de resistência no estágio pós-pico. No entanto, os elementos de reforço não extensíveis possuem uma deformação na ruptura inferior à máxima deformação de tração no solo sem adição de reforço, o que resulta num aumento de resistência mecânica com possibilidade de ocorrer uma ruptura frágil, sem aviso, caso ocorra o rompimento do reforço.

Freitag (1986) analisou os efeitos da aleatoriedade das fibras na resistência à compressão simples de uma argila arenosa com compactação. Três tipos diferentes de fibras sintéticas com diâmetro variável e comprimento de 20 mm foram utilizados nesse estudo. Foi usado um teor de fibras de 1% em volume. Concluiu-se que essa inclusão aleatória de fibras tem a capacidade de resultar num aumento tanto de resistência quanto de tenacidade. O ganho de resistência para as amostras foi em torno de 25% quando analisadas na umidade ótima.

Maher e Ho (1993) avaliaram o comportamento de uma argila com adições de teores de cimento distintos, com uma simulação de um material de diferentes valores de coesão. Atestaram que materiais com maior coesão reduzem a contribuição das fibras no incremento da resistência de pico do solo. Os mesmos autores também estudaram propriedades mecânicas e hidráulicas de um compósito de caulinita-fibra, com a realização de ensaios de compressão não-confinada, flexão, compressão diametral e condutividade hidráulica. Utilizaram fibras de polipropileno, vidro e celulose. Concluíram que a inclusão das fibras de forma aleatória produziu aumento significativo na resistência e na ductilidade do compósito, mais visível em baixos teores de umidade. Com um mesmo teor de fibras, as que possuíam menor comprimento eram mais numerosas dentro do solo e tinham maior probabilidade de estarem presentes na superfície de

ruptura. Dessa forma, colaborava mais intensamente com o aumento da resistência. Por outro lado, as fibras de maior comprimento apresentaram maior eficácia quanto à melhora de ductilidade e capacidade de absorção de energia. Isso se deve porque, após a ruptura, as fibras de menor comprimento têm uma maior facilidade de arrancamento que as de maior comprimento. Também concluíram que a adição de fibra permitiu uma maior permeabilidade da argila, onde o aumento mais significativo ocorreu em maiores teores.

Segundo Casagrande (2005), as características de deformação e resistência, bem como os padrões de ruptura de uma gama de compósitos que utilizam fibras como reforço, dependem principalmente da aderência entre fibra e solo puro. A alta aderência entre fibra e matriz diminui o tamanho das fissuras e amplifica sua distribuição pelo compósito. Para Casagrande (2005), esse aumento que a resistência das fibras proporciona incrementa a ductilidade do compósito, desde que não ocorra a ruptura das ligações de aderência. Assim, a resistência desejada dependerá das características pós-fissuração necessárias, do teor de fibra e das propriedades da união fibra-matriz.

Curcio (2008) pesquisou os comportamentos mecânico e hidromecânico de solos compactados com reforço de fibras de PET reciclado. Como observação, teve que o comportamento do solo-reforço em relação à resistência à tração aparentou ser controlado unicamente pela matriz de solo. Porém, com o aumento das deformações, o material passou a ser controlado tanto pelas duas partes. A adição de 1% de fibras de PET favoreceu o aumento na tensão de tração máxima do solo e retardou a abertura de fissuras, não alterando significativamente as propriedades de compactação e a condutividade hidráulica.

Bolanõs (2013) avaliou como um solo argiloso reforçado com fibras de coco verde se comporta mecanicamente através de ensaios triaxiais drenados isotrópicos. Tais ensaios foram realizados em corpos de prova utilizando teores de fibra moída de 0,5% e 1% e teores de fibra cortada em 0,5%, 0,75%, 1%, 1,25% e 1,5% em relação ao peso de solo seco. Foi observado, então, um aumento da resistência ao cisalhamento nas amostras de solo-fibra, já que se repara um discreto incremento no ângulo de atrito e um relevante aumento do intercepto coesivo no círculo de Mohr-Coulomb ao compará-los com a matriz pura.

## 2.2 POLIETILENO TEREFTALATO (PET)

### 2.2.1 ASPECTOS GERAIS E DE FABRICAÇÃO

O PET, ou Polietileno Tereftalato como nome oficial, é um polímero derivado de poliéster que apresenta características termoplásticas. A diferença entre um polímero termoplástico e um polímero termofixo está na estrutura de suas cadeias. Um polímero termoplástico apresenta cadeias alinhadas ligadas por ramificações que tem a capacidade de deslizar umas sobre as outras, o que possibilita a reciclagem do material, pois suas propriedades físicas são conservadas mesmo após ciclos de aquecimento e resfriamento. Os polímeros termofixos, por sua vez, não tem sua estrutura física alterada na presença de calor. Isso se dá pelo fato de suas cadeias possuírem ligações cruzadas entre si. Essas ligações impedem o remodelamento desse tipo de polímero, impossibilitando sua reciclagem.

A Figura 1 abaixo apresenta as estruturas desses dois tipos de polímeros, explicitando as diferenças nas ligações.

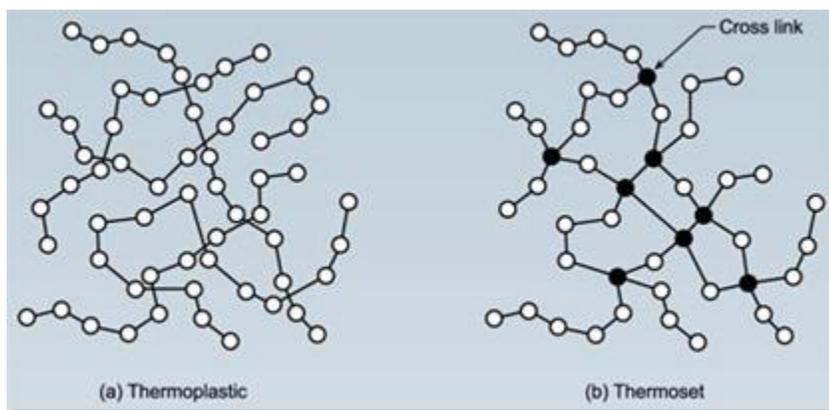


Figura 1: Estruturas de polímeros a) termoplásticos e b) termofixos. Fonte: [http://lh6.ggpht.com/\\_4A37q1WQUAk/TQsWY9YLDRI/AAAAAAAAAFE/46tnZNriQqE/thermoplastictermosets\\_thumb%5B3%5D.jpg?imgmax=800](http://lh6.ggpht.com/_4A37q1WQUAk/TQsWY9YLDRI/AAAAAAAAAFE/46tnZNriQqE/thermoplastictermosets_thumb%5B3%5D.jpg?imgmax=800)

O PET foi descoberto em 1941 por dois químicos britânicos através da reação entre o ácido tereftálico, um sólido incolor, e o etilenoglicol, um álcool líquido em temperatura ambiente. Porém, as pesquisas utilizando esse polímero só começaram a acontecer após o término da Segunda Guerra Mundial, encabeçadas pela indústria têxtil. Devido a esses avanços tecnológicos, o PET começou a ser largamente utilizado na Europa e nos Estados Unidos. A utilização de PET para fabricação de garrafas começou no final da década de 70, mas somente

após uma intensa análise do potencial de contaminação e de poluição. No Brasil, o PET foi introduzido na década de 80 para utilização em roupas.

A utilização em embalagens de bebidas carbonadas só teve início nos anos 90, de forma transformadora. Ela solucionou o problema das garrafas de vidro, que quebravam muito facilmente. Isso aconteceu por causa das excelentes propriedades mecânicas, além de serem mais leves e à prova de água.

O processo de produção do PET é aquinhado em três etapas: pré-polimerização, policondensação e polimerização no estado sólido. Durante cada processo, o controle dos fatores influenciadores é essencial para a delimitação da estrutura química e dos usos finais da resina (Soares Júnior, 2010).

Graças a essa boa relação entre quesitos econômicos de custos de produção e propriedades termomecânicas, o PET pode ser considerado o termoplástico de maior confecção no mundo, com produção mundial na década de 90 de 24 bilhões de kg. No Brasil, a maior aplicação está no mercado de embalagens, com cerca de 75% da produção destinadas a tal atividade.

### **2.2.2 IMPACTO AMBIENTAL**

Romão et al., (2009) ressalta que os polímeros passaram a ter um mérito elevado na constituição dos resíduos sólidos urbanos (RSU), passando a contribuir, em massa, com aproximadamente 20% do total. Outros polímeros fazem parte dessa porcentagem, como o polipropileno, o poliestireno, o polietileno de alta, baixa densidade e baixa densidade linear e o policloreto de vinila, conhecido como PVC.

A Figura 2 mostra os principais polímeros termoplásticos consumidos no Brasil no ano de 2016. É possível perceber que o PET corresponde a 7,1% da produção polimérica no Brasil. A explicação da diferença entre as porcentagens produzidas de PET e a porcentagem de PET no RSU está no fato de que existem outros polímeros com vida útil mais longa, como canos de PVC e chapas de polipropileno, enquanto o PET está presente em produtos de vida útil mais curta, como embalagens e roupas.

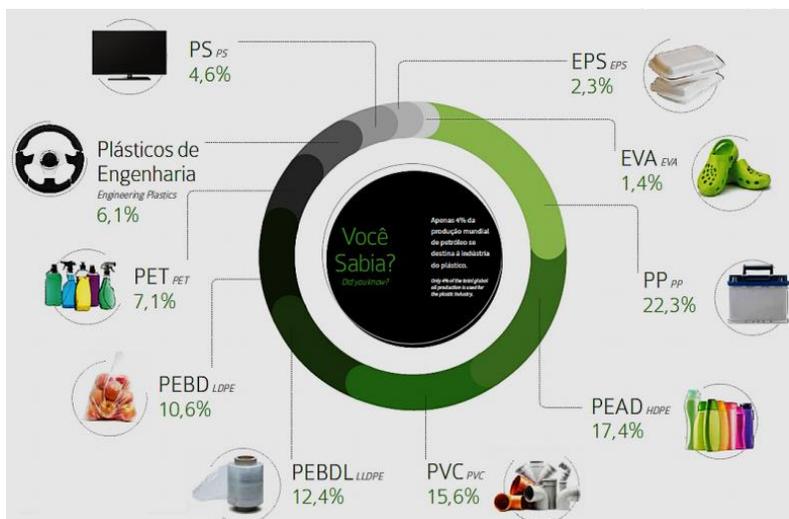


Figura 2: Principais polímeros termoplásticos consumidos no Brasil. Fonte: Perfil 2016 – ABIPLAST

A reciclagem de polímeros em geral pode ser dividida em quatro etapas: primária (reciclagem mecânica de produtos pré consumo), secundária (reciclagem mecânica de produtos pós consumo), terciária (reciclagem química) e quaternária (reciclagem energética). Dentre essas reciclagens, a mais praticada no Brasil é a secundária. A razão disso está ligada à conjuntura socioeconômica do país, uma vez que a reciclagem secundária é a mais simples de se instalar, possui a mão-de-obra mais barata e menos qualificada e é a que possui o maior volume de resíduos. A situação é diferente na Europa e na Ásia, locais nos quais as reciclagens químicas e energéticas são mais utilizadas devido às necessidades e situação de qualificação da população.

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET), em 2011 foram consumidas 573 kton de PET no país, dos quais metade foi reciclada. Além disso, a organização estimou um aumento considerável de consumo para os anos de 2014 (720 kton) e 2016 (820 kton), em virtude dos eventos esportivos mundiais que ocorreram no país. Entretanto, apesar de o PET ser a segunda matéria prima mais reciclada no país (atrás do alumínio) é possível constatar o elevado índice de não-reciclagem que ainda está presente no país, com resíduos acumulados em lixões e aterros espalhados pelo território nacional.

No que diz respeito à questão ambiental, o PET e os demais polímeros são considerados graves poluidores, pois possuem tempo de degradação na natureza muito elevado. Outro problema apresentado é o descarte ilegal dos produtos, que muitas vezes ocorrem em rios, mares,

lagos e demais ecossistemas, gerando um impacto bastante negativo na fauna e na flora locais. O meio mais simples de se combater essas adversidades é a reciclagem, que precisa de legislação específica para que o controle dos processos seja mais efetivo. O PET pós consumo é considerado no país como resíduo sólido, com sua reciclagem regulada pela lei nº 12.305, de agosto de 2010, conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

Segundo o Ministério da Saúde, em portaria publicada em 1998 pela Secretaria de Vigilância Sanitária, o PET reciclado não pode ser reutilizado em embalagens que entrem em contato direto com os produtos. Isso acontece porque o polímero pode estar contaminado da utilização anterior. O PET reciclado, como evidenciado na Figura 3, é usufruído como fibra têxtil (41%), mantas de não tecido (16%), cordas (15%), resinas insaturadas (10%), embalagens (9%), cerdas de vassouras e escovas (5%) e outros produtos (4%) (Spinacé e De Paoli, 2005).

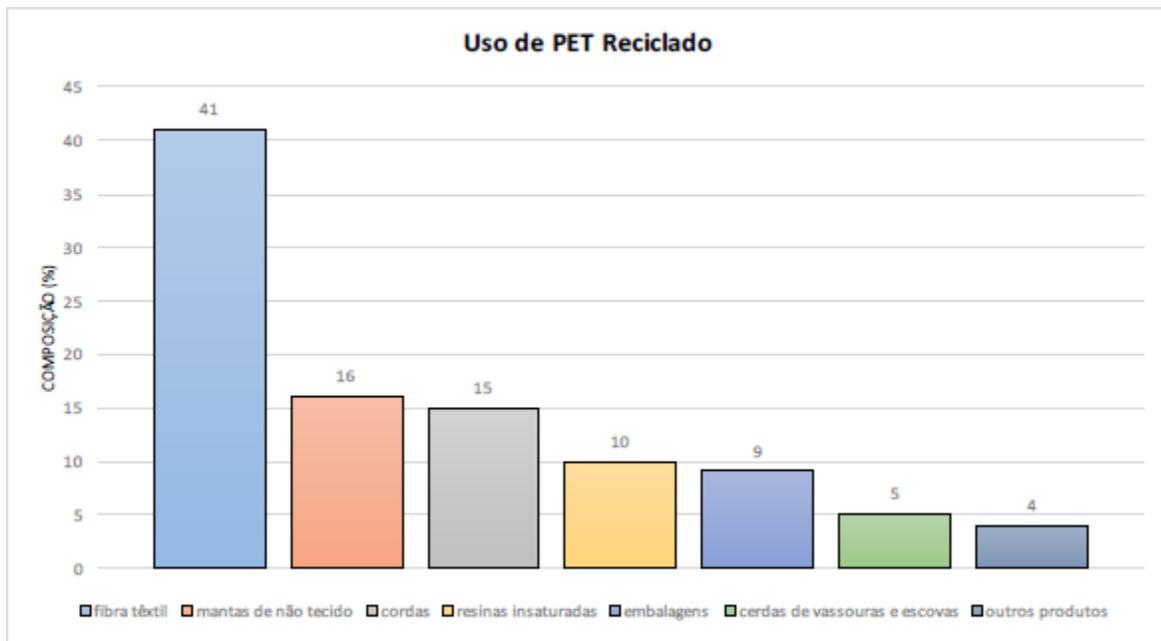


Figura 3: Destino do PET reciclado no Brasil. Fonte: Spinacé e De Paoli, 2005

### 2.3 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NOS COMPÓSITOS

A década de 60 marcou o início desses testes e estudos sobre a influência da temperatura no comportamento do solo, apesar de serem escassos até hoje. Leonards e Rahmiah (1960), Mitchell and Campanella (1964) e Mitchell et al. (1968) foram apenas alguns dos precursores no estudo da atuação da temperatura na resistência do solo e no comportamento de fluência. Na

maioria dos casos, uma abordagem de taxa foi aplicada e uma relação diretamente proporcional entre temperatura absoluta e resistência foi encontrada.

A partir desse ponto, outros estudos apareceram, entre eles os de Passwell, 1967, Campanela e Mitchell, 1968; Plum e Esrig, 1969, instigados pela dissipação de calor proveniente de equipamentos hospedados em instalações industriais. Outros fatores também podem provocar o aquecimento do solo: adição de cal, deposição e armazenamento de rejeitos de indústrias e resíduos sólidos e o aquecimento intencional como ferramenta de melhoria, objeto de estudo do presente trabalho.

Uma revisão detalhada de quais e como os parâmetros são afetados pela temperatura foi realizada por De Campos (1979) e Rabe (1998). Ambos os autores chegaram à conclusão de que a temperatura influencia, entre outros, os parâmetros de compressibilidade, de resistência, de permeabilidade e de mudanças na poropressão.

Mais recentemente, Garcia (2016) estudou as características de resistência em areias ligadas por polímeros triturados quando submetidas a temperaturas elevadas, da ordem de 150 °C. O aquecimento causa derretimento das finas partículas de polímeros, possibilitando uma ligação mais intensa entre os grãos de solo e o material adicionado. Essa tecnologia proposta se mostrou efetiva, no sentido que maiores resistências foram encontradas nos espécimes preparados em laboratório.

## **2.4 PESQUISAS REALIZADAS COM A INSERÇÃO DE PET**

As pesquisas científicas utilizando o PET, apesar de muito recentes, tem gerado bastante interesse em virtude da vasta aplicabilidade do material. Consoli et al (2000) estudou os efeitos e calculou o comportamento mecânico da inclusão de fibras de PET espalhadas aleatoriamente em uma areia cimentada, gerando assim um compósito solo-fibra-cimento. O estudo contemplou as ações do teor de cimento e de fibra, da tensão confinante e do comportamento da fibra sobre as propriedades da mistura. O resultado mostrou que o acréscimo de fibras PET aumenta a resistência última e de pico das matrizes de solo com e sem cimento, também diminuindo o comportamento frágil da matriz cimentada. Ao que tudo indica, a rigidez das misturas não foi modificada.

Da Silva (2007) observou o comportamento de solos siltosos reforçados com fibras utilizando-se de ensaios de CBR. Os resultados encontrados apontaram uma melhoria na capacidade de suporte do material fruto da utilização de fibras PET. Além disso, dependendo do teor e do tipo de fibra utilizado, a variação do peso seco aparente do solo compactado é bastante instável. Houve uma tendência nas envoltórias de resistência ao cisalhamento, adicionando as fibras, de redução do nível de tensão máxima de cisalhamento obtida para baixos níveis de tensão. Entretanto, o comportamento oposto era observado quando a tensão de confinamento aumentava.

Modro et al (2009) mudaram o enfoque para um concreto de cimento Portland contendo resíduo de PET. Contrariando as expectativas dos autores, para todos os traços e idades, observou-se uma diminuição na resistência com o aumento do volume de PET. Os autores designaram que esta diminuição da resistência à compressão dos corpos de prova que tiveram PET adicionado, em relação ao padrão, se deve à menor interação química entre o polímero, a matriz do cimento e a porosidade residual gerada. Outra causa é a menor resistência dos polímeros, quando contraposto com a resistência dos agregados minerais. A partir das decorrências desse estudo, a utilização dos restos de PET pode ser aplicada na Construção Civil, desde que em peças não estruturais. Pelisser et al (2012) também trabalhou com adição de fibras PET em concreto e inferiu que sua adição, apesar de reduzir a resistência à compressão, melhora a tensão de flexão e a resistência ao impacto.

Silva et al (2013) discutiu a adição de PET triturado como agregado de misturas asfálticas. Os ensaios foram realizados para diferentes percentuais de PET: 2,5%, 5,0%, 7,5%, 10% e 12,5% em peso na forma de agregado miúdo, além de uma mistura de referência (sem adição de PET). Os autores estabeleceram que o PET como agregado miúdo em percentuais acima de 10% enfraquece as misturas asfálticas, conferindo elevado teor de vazios e baixa resistência mecânica. Entretanto, o aumento gradual de PET nas misturas asfálticas torna o revestimento menos suscetível a deformações permanentes aumentando, conseqüentemente, a vida de fadiga. Assim, afirmaram que o uso de PET como agregado nas misturas asfálticas deve ser limitado a 5,0%, para que os valores de propriedades volumétricas sejam atendidos.

Louzada (2015) analisou o comportamento mecânico de três solos diferentes reforçados com finos de PET (pó e triturado). Foram realizados ensaios triaxiais isotropicamente

consolidados não drenados, utilizando pressões confinantes de 50 kPa, 150 kPa e 300 kPa, para o solo argiloso com teores de pó de 0%, 10%, 20% e 30% e de triturado de 3,0 e 5,0% por peso de solo seco. Para a areia, foram utilizadas amostras com uma densidade relativa de 50% e teor de umidade de 10% e teores de pó de 0%, 10% e 20% por peso de solo seco. Já para a bentonita, foram realizados ensaios de cisalhamento direto com tensões verticais aplicadas de 50 kPa e 100 kPa, com teores de pó de 0% e 30% e de triturado de 3,0 e 5,0%, também por peso de solo seco. Ao final, depreende-se que o teor de PET e nível de confinamento influenciaram significativamente o comportamento mecânico final dos compósitos. As misturas apresentaram um comportamento satisfatório, com seus parâmetros de resistência ao cisalhamento aumentados tanto para o pó quanto para o triturado.

Arao (2016) testou o comportamento de misturas asfálticas CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) com adição de triturado de PET com diâmetro de 10 mm e 2 mm e teores de 0,5% e 1,0%. O fíler de pós de pedra, normalmente utilizado em misturas de CBUQ convencional foi mudado pelo pó derivado da moagem das garrafas PET. Os ensaios mecânicos realizados foram os de estabilidade e fluência Marshall, módulo de resiliência, vida de fadiga e de resistência à tração. A conclusão do autor foi que a utilização de PET, tanto em forma de floco como na forma de pó de PET, foi bastante satisfatória nas misturas asfálticas, especialmente em relação à vida de fadiga. O incremento dos parâmetros de resistência e na vida útil foi mais efetivo para o teor de 0,5% de flocos com 10 mm de diâmetro e com 2,5% de fíler de pó de PET.

Senez (2016) avaliou a aplicabilidade de fibras de PET como reforço de um solo arenoso utilizando ensaios de compressão triaxial drenados para dois tipos de fibras (1,4 dtex com 38mm de comprimento e 3,3 dtex e 56mm de comprimento), ensaios de prova de carga em placa e uma simulação de talude, ambos em escala reduzida. Para os dois últimos ensaios, as fibras de menor diâmetro e comprimento como foram escolhidas para o reforço. Os resultados mostraram que o comportamento da areia pura é influenciado pela adição de fibras PET, melhorando os parâmetros de resistência, como o intercepto coesivo e o ângulo de atrito, definidos pelo critério de Mohr-Coulomb. O autor obteve para a resistência ao cisalhamento que o compósito reforçado com as fibras PET de menor diâmetro e menor comprimento apresentou um maior ganho, apesar de ambos os compósitos apresentarem maior resistência quando comparados com a matriz pura.

Houve também um aumento na capacidade de suporte e diminuição dos recalques dos compósitos em relação à areia pura e uma mudança significativa no modo de ruptura do talude, o que mostra o emprego positivo em obras geotécnicas.

### **3 METODOLOGIA**

A partir do exposto anteriormente, fica bastante clara a importância das pesquisas de utilização do PET como reforço no solo, visto sua grande versatilidade e facilidade de obtenção. Também é muito interessante do ponto de vista ambiental, porque pode ser uma excelente alternativa de reciclagem do material, o que geraria um impacto positivo na redução de resíduos em lixões e aterros.

O presente estudo tem como objetivo, portanto, avaliar o melhoramento do comportamento mecânico do solo de Brasília por meio da inserção de PET em fibras com e sem aquecimento da mistura, tendo em vista a aplicabilidade na Engenharia Geotécnica (obras de pavimentação, barragens, taludes, etc.). Para tanto, o trabalho constará de estudos experimentais realizados em laboratório e avaliação dos resultados obtidos de maneira comparativa.

Dessa forma, os ensaios acontecerão em três etapas. Na primeira, serão realizados ensaios de caracterização física e mecânica da matriz de solo (Figura 4). Nas etapas subsequentes (ensaios com a mistura solo-PET), foi escolhida a porcentagem de 0,5% em massa de solo seco para o PET em fibras e dois tamanhos diferentes, 1,4 dtex com 38 mm e 3,3 dtex com 56 mm (Figura 5), em virtude do tamanho do molde (mini-MCV) e por serem porcentagens representativas que ainda não foram testadas para esse tipo de solo, podendo apresentar resultados ainda melhores que os já testados. A segunda etapa consistirá na realização dos ensaios de curva de compactação para determinação da umidade ótima para as duas porcentagens e a terceira etapa será constituída de ensaios de compressão simples na prensa do laboratório, avaliando ambas as porcentagens com e sem o aquecimento dos corpos de prova em estufa.



Figura 4: Solo do campo experimental da UnB. Fonte: Carvalho, 2018

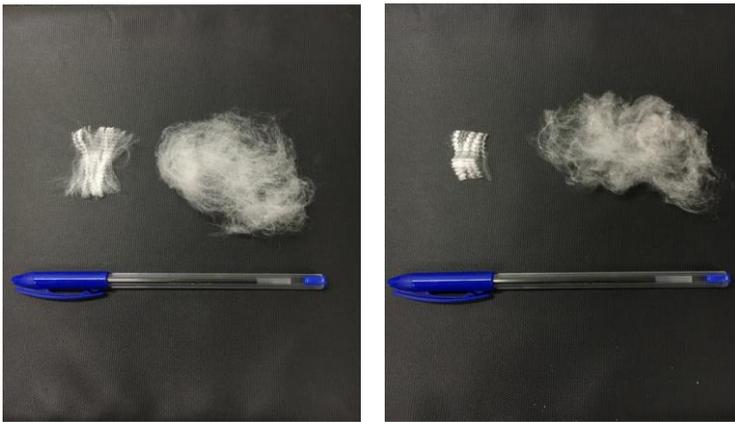


Figura 5: a) Fibra PET de 3,3 dtex com 56 mm; (b) Fibra PET de 1,4 dtex com 38 mm. Fonte: Senez, 2016

Ao todo, serão moldados 30 corpos de prova, divididos da seguinte forma:

- 15 amostras para o ensaio de compressão simples, das quais:
  - 3 amostras para PET em fibras (1,4 dtex e 38 mm) com porcentagem de 0,5% sem aquecimento;
  - 3 amostras para PET em fibras (1,4 dtex e 38 mm) com porcentagem de 0,5% com aquecimento;
  - 3 amostras para PET em fibras (3,3 dtex e 56 mm) com porcentagem de 0,5% sem aquecimento;
  - 3 amostras para PET em fibras (3,3 dtex e 56 mm) com porcentagem de 0,5% com aquecimento;
  - 3 amostras sem adição de PET sem aquecimento.
- 15 amostras para o ensaio de curva de compactação, das quais:

- 5 amostras para PET em fibras (1,4 dtex e 38 mm) com porcentagem de 0,5%;
- 5 amostras para PET em fibras (3,3 dtex e 56 mm) com porcentagem de 0,5%;
- 5 amostras sem adição de PET.

Os corpos serão deixados em câmara úmida por 3 dias e o aquecimento se dará em estufa com temperatura de 110 °C por 1 hora. É importante ressaltar que o ensaio de resistência pode ter influência na sucção.

### **3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO**

Para os ensaios de caracterização física e mecânica, serão realizados os ensaios de limites de Liquidez e Plasticidade de Atterberg e o ensaio de curva granulométrica do solo. São ensaios simples e rápidos de serem realizados, além de serem bastante confiáveis, razões pelas quais foram escolhidos para o estudo.

#### **3.1.1 LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE DE ATTERBERG**

Os limites de Atterberg são métodos criados por Albert Atterberg com o intuito de avaliar os pontos de mudança de estado dos solos. Consistem na realização de testes para a definição do Limite de Liquidez (LL) e do Limite de Plasticidade (LP), fundamentais para se determinar o Índice de Plasticidade (IP), muito importante para entender o comportamento do solo. Os dois ensaios foram realizados segundo a NBR 7180/84.

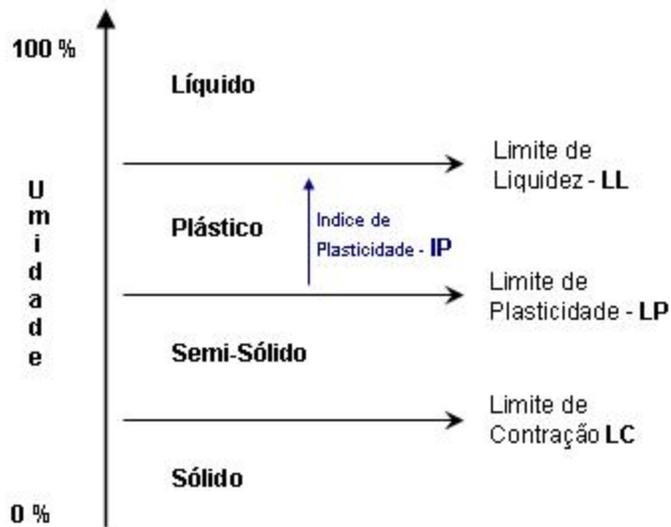


Figura 6: Limites de Atterberg. Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/45/LimitesDeAtterberg.JPG>

O Limite de Liquidez é obtido utilizando o aparelho de Casagrande. Uma porção de solo é homogeneizada acrescentando uma quantidade de água até adquirir uma consistência pastosa. Depois, a mistura é levada para o aparelho e colocada conforme a Figura 7. O aparelho realiza quedas de uma altura definida, contando o número de batidas. Assim que as duas bordas da ranhura feita com o cinzel se tocarem, desliga-se o aparelho, anota-se o número de batidas e uma pequena quantidade de material é retirada para determinação da umidade. O ensaio é realizado por pelo menos mais 4 vezes, acrescentando uma quantidade constante de água e anotando tanto o número de quedas quanto a umidade, por fim, plota-se um gráfico de número de batidas por umidade, obtendo uma reta que mais se aproxima de todos os pontos fazendo uma regressão linear. O Limite de Liquidez será a umidade correspondente a 25 quedas do aparelho de Casagrande.



Figura 7: Aparelho de Casagrande. Fonte: [http://1.bp.blogspot.com/-5tKIpYLNbgQ/Toy9IvPsh2I/AAAAAAAAAC4/PBamDujR8-U/s300/mecanica\\_dos\\_solos03.jpg](http://1.bp.blogspot.com/-5tKIpYLNbgQ/Toy9IvPsh2I/AAAAAAAAAC4/PBamDujR8-U/s300/mecanica_dos_solos03.jpg)

O ensaio para obtenção do Limite de Plasticidade consiste na moldagem de cilindros de solo em uma placa de vidro. Após homogeneização com água, os cilindros são construídos rolando pequenas esferas de solo até ficarem do tamanho de um gabarito de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento (Figura 8). Se a amostra se fragmentar antes de atingir 3 mm, adiciona-se mais água na mistura e repete-se o procedimento. Se a amostra não apresentar fissuras, o material deve ser amassado em forma de esfera e o procedimento é repetido. Quando a amostra apresentar fissuras e estiver do tamanho do gabarito, retira-se a amostra para determinar sua umidade. O Limite de Plasticidade será, portanto, a umidade encontrada.



Figura 8: Ensaio de limite de plasticidade. Fonte: <http://www.geotecnia.ufba.br/imagens/equipamentos/Limite%20de%20Plasticidade.jpg>

### 3.1.2 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA

A determinação da curva granulométrica é feita por meio de dois processos: peneiramento e sedimentação. O ensaio é de suma importância pois o tamanho dos grãos

influencia em diversas propriedades do solo, entre elas os limites de Atterberg, a compressibilidade e a permeabilidade do solo, além do número de vazios e do fluxo de água no solo. O ensaio está descrito na NBR 7181/84.

O ensaio é dividido em três partes: peneiramento grosso (material retido na peneira #10 de 2mm), peneiramento fino (material passante na peneira de 2.0mm e retido na peneira de 0.075mm) e sedimentação. No ensaio de peneiramento grosso, a amostra de solo deve ser processada no agitador mecânico (Figura 9) com as peneiras de peneiras de 50; 38; 25; 19; 9,5; 4,8 e 2,0 mm e anotam-se as massas retidas em cada peneira. Do material que passa na peneira de 2,0 mm, toma-se uma amostra de aproximadamente 120 g e retorna para o agitador mecânico, dessa vez com as peneiras de 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075 mm. Da mesma forma que no peneiramento grosso, as massas retidas em cada peneira são anotadas.



Figura 9: Agitador mecânico para peneiramento. Fonte: <http://cial-paulinia.com.br/wp-content/uploads/2017/03/granutest.jpg>

Utiliza-se então o material que passa na peneira de 0.075mm para a etapa de sedimentação. A amostra é adicionada num copo de dispersão com água destilada e o conjunto é ligado por 15 minutos. O material é transferido para uma proveta até a marca de 1000 ml e a mistura é agitada durante 1 minuto, de modo que a boca da proveta passe de cima para baixo e vice-versa. O recipiente é colocado sobre uma mesa e mergulha-se cuidadosamente um densímetro e realizam-se as leituras nos tempos de 30 segundos, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas. As leituras devem ser feitas na parte superior do menisco, após o densímetro estar estabilizado.

Os resultados são plotados em um gráfico em que o eixo x representa o diâmetro da peneira na escala log e o eixo y representa a porcentagem retida em cada peneira. Para a sedimentação, considera-se o diâmetro e a porcentagem das partículas em suspensão.

### **3.2 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE CURVA DE COMPACTAÇÃO**

O ensaio de determinação da curva de compactação de determinado solo tem como objetivo encontrar a umidade ótima de compactação, processo que reduz o número de vazios do solo e, conseqüentemente, reduz seu volume e aumenta sua resistência, permeabilidade e compressibilidade. Para o trabalho, a compactação será realizada utilizando o ensaio de compactação em equipamento miniatura para energia intermediária, descrito na norma do DNER 228/94.

Primeiramente, o solo é homogeneizado com adição de água, geralmente com umidade em torno de 15%. O material é disposto então em um cilindro medindo 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, dividido em 4 camadas. Cada camada é compactada recebendo 6 golpes de um soquete de peso e altura de queda determinados (Figura 10). Para garantir melhor aderência entre as camadas, cada interface deve ser escarificada antes da compactação da camada subsequente. Calcula-se então o peso específico e a umidade do corpo de prova, por meio da pesagem e das dimensões do corpo de prova. O processo é repetido para mais 5 umidades, adicionando água em intervalos de aproximadamente 2%, e plota-se o gráfico da curva de compactação com os 6 pontos. O peso específico aparente máximo dos grãos e a umidade ótima são obtidos no ponto de inflexão da curva.



Figura 10: Soquete para ensaio de compactação em miniatura. Fonte: <https://cdn.awsli.com.br/600x700/350/350652/produto/21847634/3078b5e4dd.jpg>

### 3.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de compressão simples foi realizado com base na NBR 12770 e os corpos de prova foram confeccionados na umidade ótima da mesma forma do ensaio de determinação de curva de compactação.

Os corpos de prova são levados para a prensa de CBR e centralizados no prato inferior (Figura 11a). A prensa é acionada de modo que a pressão aplicada gere uma deformação específica constante, com os valores de carga, tempo e deslocamento monitorados com o auxílio de uma célula de carga/deslocamento e de um cronômetro. A influência do aquecimento foi observada por meio de uma câmera térmica FLIR modelo C2 (Figura 11b). Os resultados foram então utilizados para obtenção da curva tensão-deformação e as fotografias/filmagens serão utilizadas para análise da forma de ruptura do corpo de prova.



Figura 11: a) prensa de CBR automática e b) câmera FLIR C2. Fontes: acervo pessoal

## 4 RESULTADOS

Nessa parte, os resultados dos ensaios realizados serão apresentados. Esses ensaios são os limites de Atterberg, a curva granulométrica, curva de compactação do solo puro, curvas de compactação do solo com adição das fibras de PET (1,4 dtex e 38mm e 3,3 dtex e 56mm), compressão simples do solo puro, compressão simples do solo com adição das fibras PET sem aquecimento e compressão simples do solo com adição das fibras PET com aquecimento.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

#### 4.1.1 LIMITES DE ATTERBERG

A Tabela 2 mostra os resultados encontrados para o ensaio de limite de plasticidade. O ensaio começou com a adição de 25 ml de água em 70 g de solo.

Tabela 2: Resultados do ensaio de Limite de Plasticidade

Cápsula Nº	Cápsula + Solo Úmido (g)	Cápsula + Solo Seco (g)	Cápsula (g)	Água (g)	Solo Seco (g)	Umidade
222	9.950	9.434	7.560	0.516	1.874	27.53%
234	10.340	9.589	6.850	0.751	2.739	27.42%
245	10.210	9.616	7.520	0.594	2.096	28.34%
250	10.680	10.040	7.580	0.640	2.460	26.02%
253	9.790	9.285	7.420	0.505	1.865	27.08%
Média	27.28%					

Como nenhum dos valores se diferenciou da média em 5%, o limite de plasticidade encontrado é igual a 27,28%, valor condizente com os encontrados para solos argilosos.

A Tabela 3 mostra os resultados encontrados para o ensaio de limite de liquidez.

Tabela 3: Resultados do ensaio de Limite de Liquidez

Cápsula N°	Cápsula + Solo Úmido (g)	Cápsula + Solo Seco (g)	Cápsula (g)	Água (g)	Solo Seco (g)	Umidade (%)	Golpes
3008	22.300	19.995	13.770	2.305	6.225	37.03	37
3013	19.200	17.591	13.520	1.609	4.071	39.52	31
3027	20.270	18.417	14.000	1.853	4.417	41.95	24
3033	19.320	17.470	13.390	1.850	4.080	45.34	18
3047	20.620	18.334	13.660	2.286	4.674	48.91	13

Com esses valores, é possível construir o gráfico representado na Figura 12, que mostra a variação da umidade em função do número de golpes do aparelho de Casagrande. O ensaio começou com a adição de 31 ml de água em 90 g de solo.

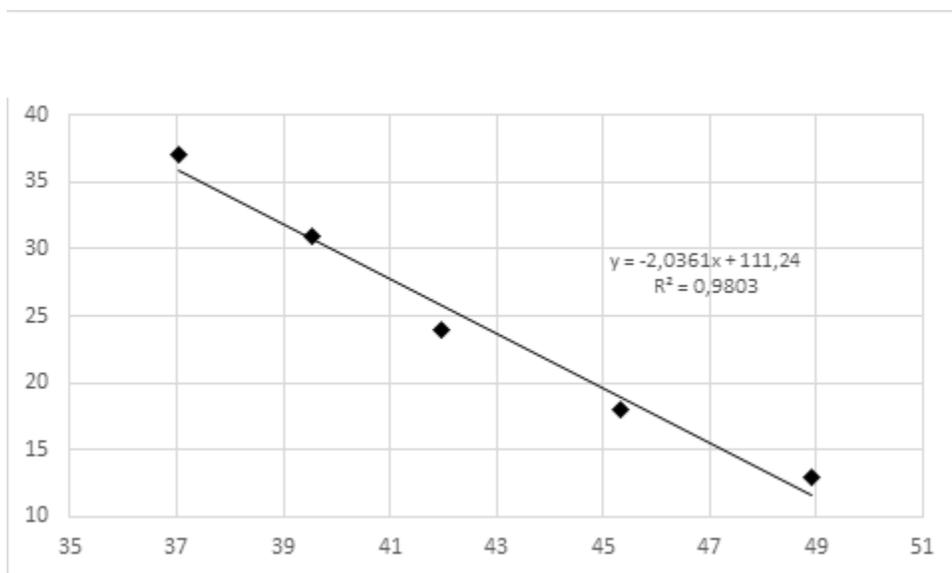


Figura 12: Gráfico de Limite de Liquidez

Assim, ao substituir x por 25 na equação encontrada pela regressão linear, o valor do limite de liquidez pode ser auferido. No caso em questão, o valor encontrado para o limite de liquidez foi 42,36%, também condizente com valores encontrados para solos argilosos.

#### 4.1.2 CURVA GRANULOMÉTRICA

Após a realização dos ensaios de peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação, é possível construir a curva granulométrica do solo, representada na Figura 13. Portanto, de posse desses dados, define-se o solo como argilo-arenoso, de boa graduação.

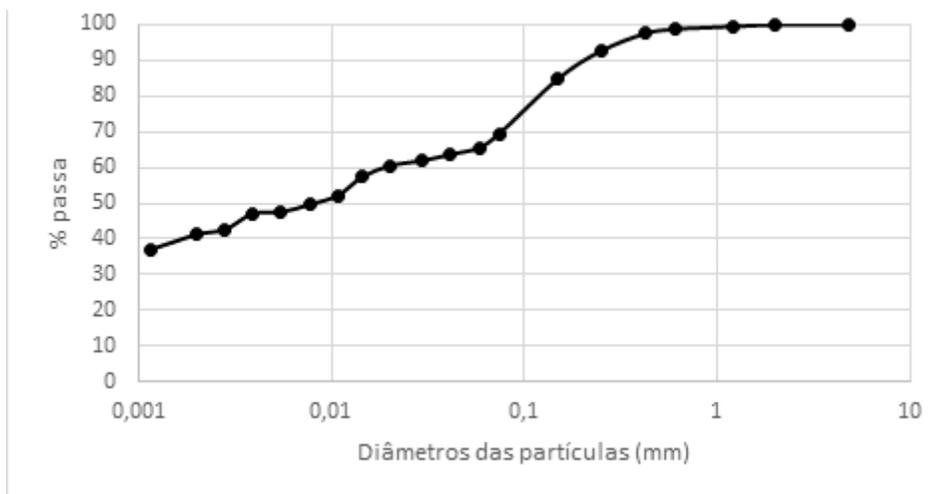


Figura 13: Gráfico do ensaio de curva granulométrica

#### 4.2 CURVAS DE COMPACTAÇÃO

Após a realização dos ensaios, calculou-se a densidade e a umidade para cada corpo de prova testado.

Com esses resultados, os gráficos de densidade por umidade puderam ser plotados, resultando nas curvas de compactação, representadas na Figura 14. Pela análise dos gráficos, depreende-se que o teor de umidade ótima da mistura de solo puro é 19,8% e a densidade máxima dos grãos é 16,7 kN/m<sup>2</sup>. As duas curvas de solo com adição foram bastante parecidas, com umidades ótimas e densidades máximas atingindo valores muito próximos uma da outra. Em relação ao solo puro, as curvas apresentaram uma densidade menor, fato explicado pela inserção das fibras na matriz. Isso ocorre porque a relação massa-volume das fibras é pequena, ou seja, não aumenta o peso de forma tão significativa quanto o volume dos corpos de prova.

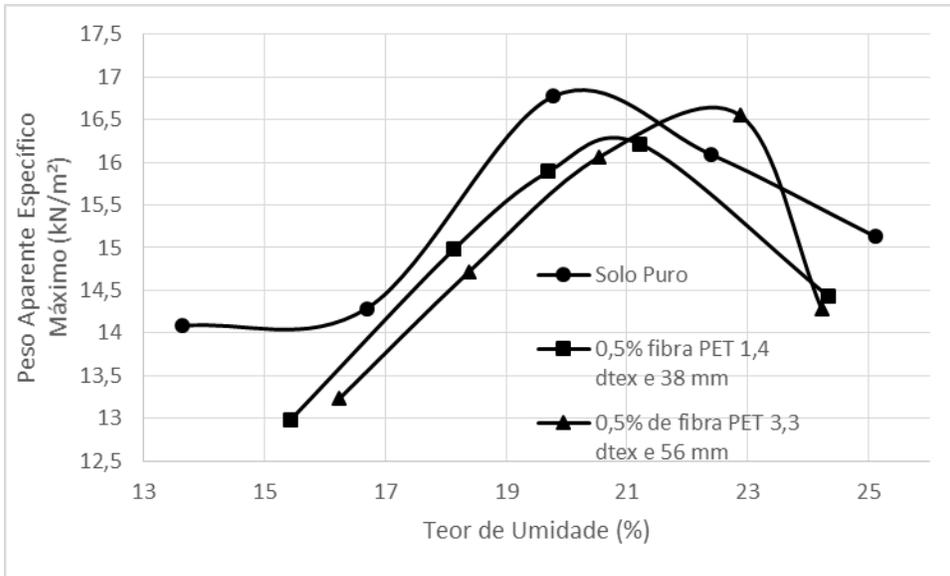


Figura 14: Curva de compactação do solo puro

### 4.3 COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO PURO

Após o rompimento dos três corpos de prova, foram calculadas médias para diâmetros, alturas e para as cargas aplicadas em múltiplos deslocamentos. Com isso, foi possível calcular as tensões e deformações e, assim, plotar o gráfico representado na Figura 15.

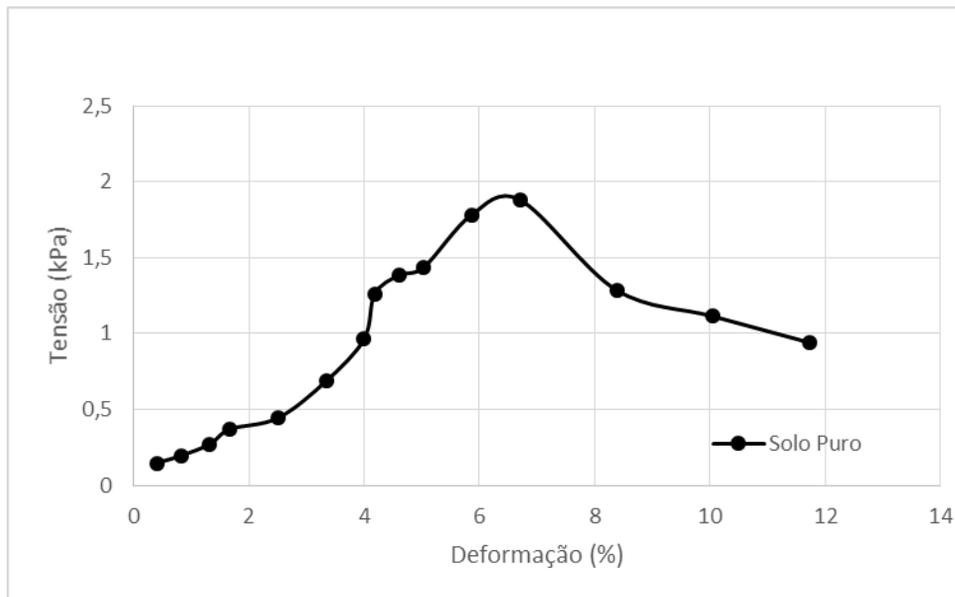


Figura 15: Gráfico de tensão-deformação para solo puro

#### 4.4 COMPRESSÃO SIMPLES DO SOLO COM ADIÇÃO DAS FIBRAS PET SEM AQUECIMENTO

O mesmo procedimento feito para o solo puro foi realizado para o solo com adição de 0,5% de cada diâmetro de fibra PET. Com isso, foi possível plotar dois gráficos: um para a fibra de 1,4 dtex (Figura 16) e um para a fibra de 3,3 dtex (Figura 17).

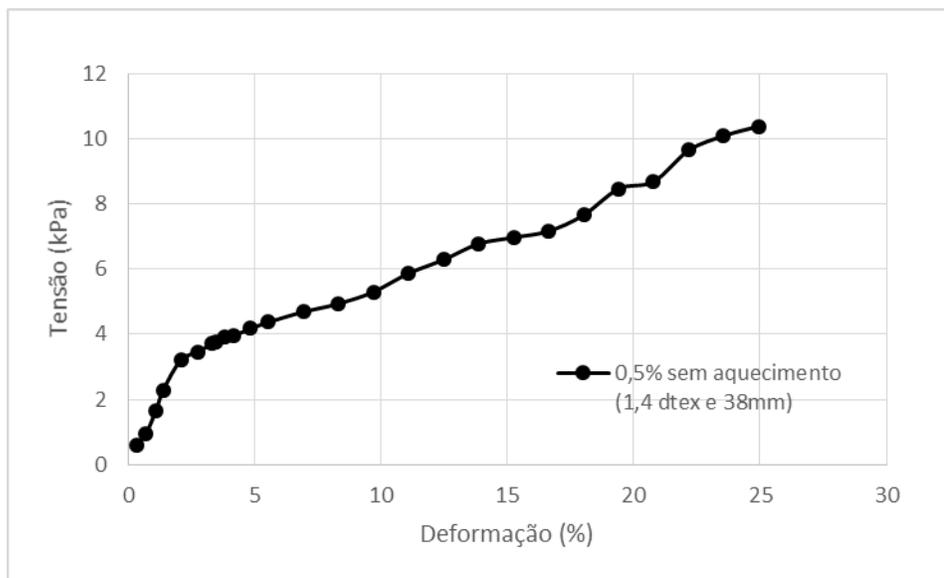


Figura 16: Gráfico de tensão-deformação de solo com adição de 0,5 % de fibra PET de 1,4 dtex e 38mm sem aquecimento

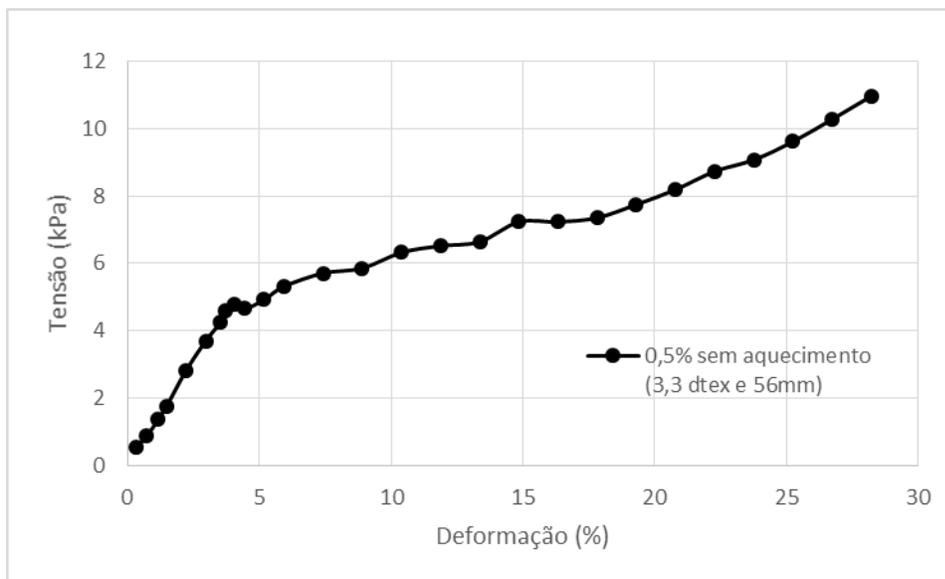


Figura 17: Gráfico de tensão-deformação de solo com adição de 0,5% de fibra PET de 3,3 dtex e 56mm sem aquecimento

#### 4.5 COMPRESÃO SIMPLES DO SOLO COM ADIÇÃO DAS FIBRAS PET COM AQUECIMENTO

O mesmo procedimento adotado para os itens 4.4 e 4.5 foi adotado para o solo com adição e com aquecimento. Após a realização dos cálculos das tensões e deformações, dois gráficos foram plotados: um para a fibra de 1,4 dtex e 38mm (Figura 18) e um para a fibra de 3,3 dtex e 56mm (Figura 19).

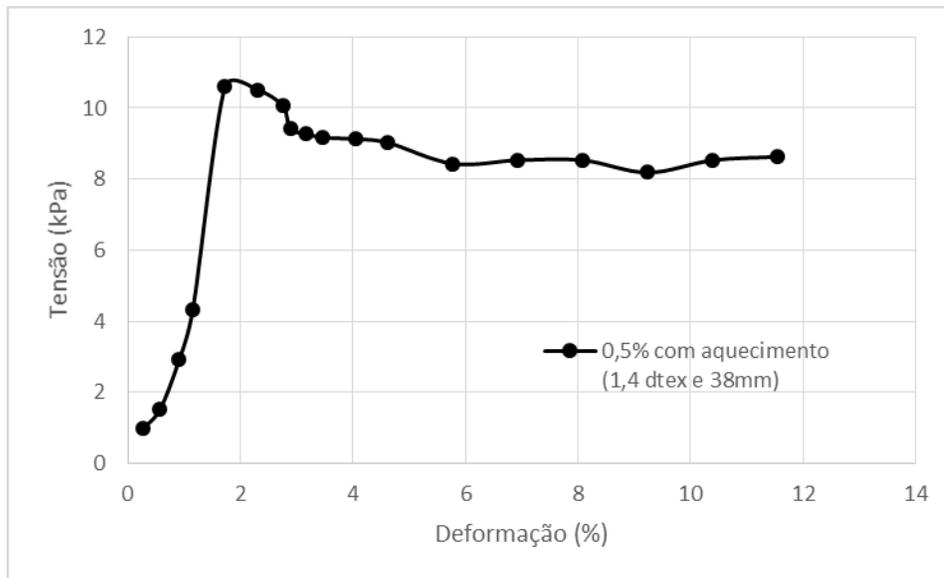


Figura 18: Gráfico de tensão-deformação de solo com adição de 0,5% de fibra PET de 1,4 dtex e 38mm com aquecimento

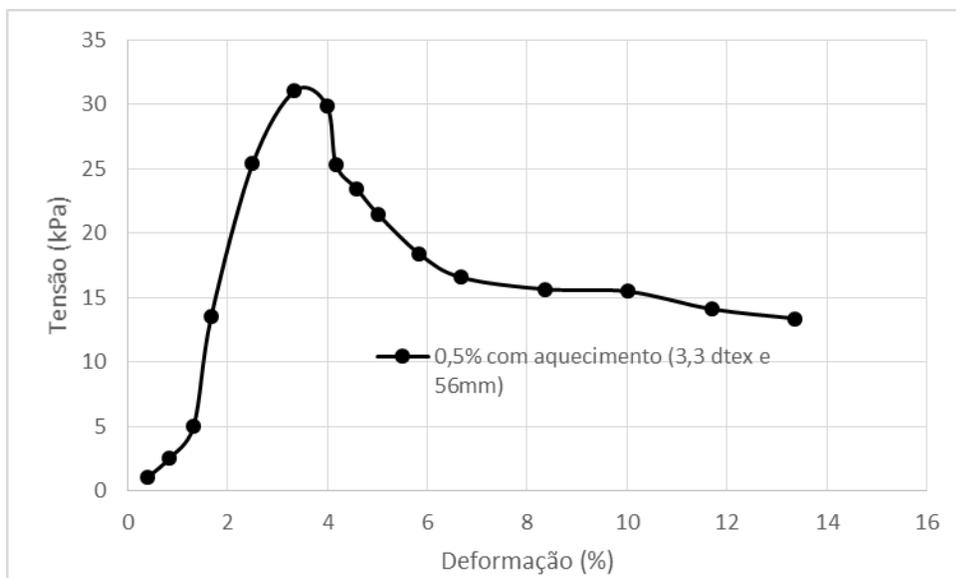


Figura 19: Gráfico de tensão-deformação de solo com adição de 0,5% de fibra PET de 3,3 dtex e 56mm com aquecimento

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De posse dos resultados, é possível explorar três tipos de influência: a influência da presença de fibra na matriz de solo puro, a influência do diâmetro da fibra no comportamento mecânico e a influência do aquecimento na melhoria das propriedades. A seguir, cada uma das influências será analisada individualmente.

### 5.1 INFLUÊNCIA DE REFORÇO NO SOLO

A influência da presença de fibra na matriz de solo puro pode ser analisada com a plotagem dos gráficos de compressão simples para cada tipo de fibra com e sem aquecimento juntamente com o de solo puro, mostrados na Figura 20.

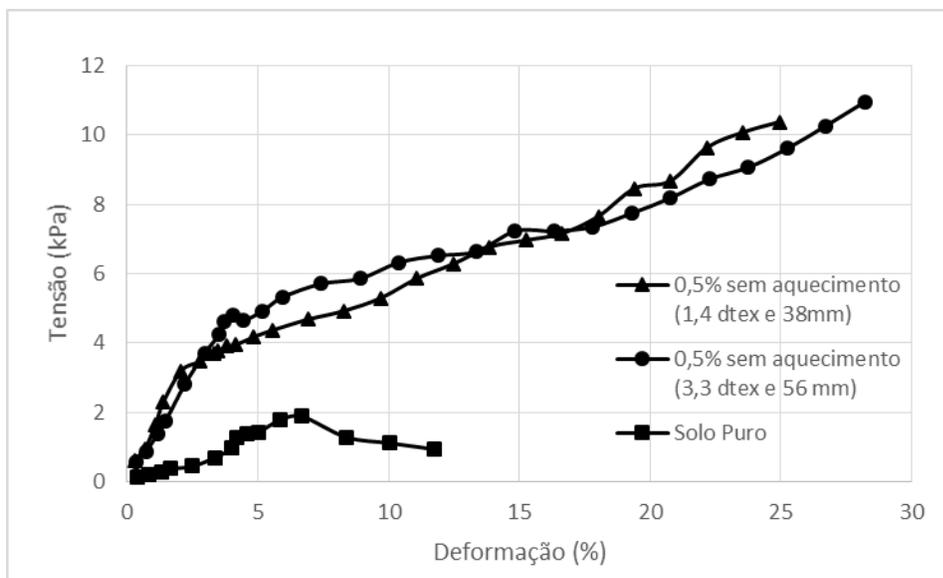


Figura 20: Influência da presença de fibra PET na matriz de solo

Observando os gráficos acima, fica bastante evidente que a presença de fibra PET na matriz de solo, independente do diâmetro, atua de forma a melhorar sua resistência estática. O solo puro atingiu seu pico de resistência em torno de 2 kPa e não é muito suscetível a grandes deformações.

Para os solos com adição de fibras sem aquecimento, apesar de não apresentar pico bem definido, seu comportamento resistivo se mostrou melhor que o do solo puro para as mesmas deformações. Dessa forma, é possível afirmar que a presença de fibra PET na matriz, qualquer que seja seu diâmetro, melhora as características de resistência do solo e, por consequência, se torna uma excelente alternativa para reforços de solos argilosos submetidos a carregamentos estáticos.

## 5.2 INFLUÊNCIA DO AQUECIMENTO

Também é possível avaliar se a variação do diâmetro interfere de forma positiva na melhoria das particularidades da matriz. Ou seja, com a confecção dos gráficos da Figura 21, é possível analisar se um tipo de fibra é melhor que o outro em situações com aquecimento, comparadas a situações sem aquecimento.

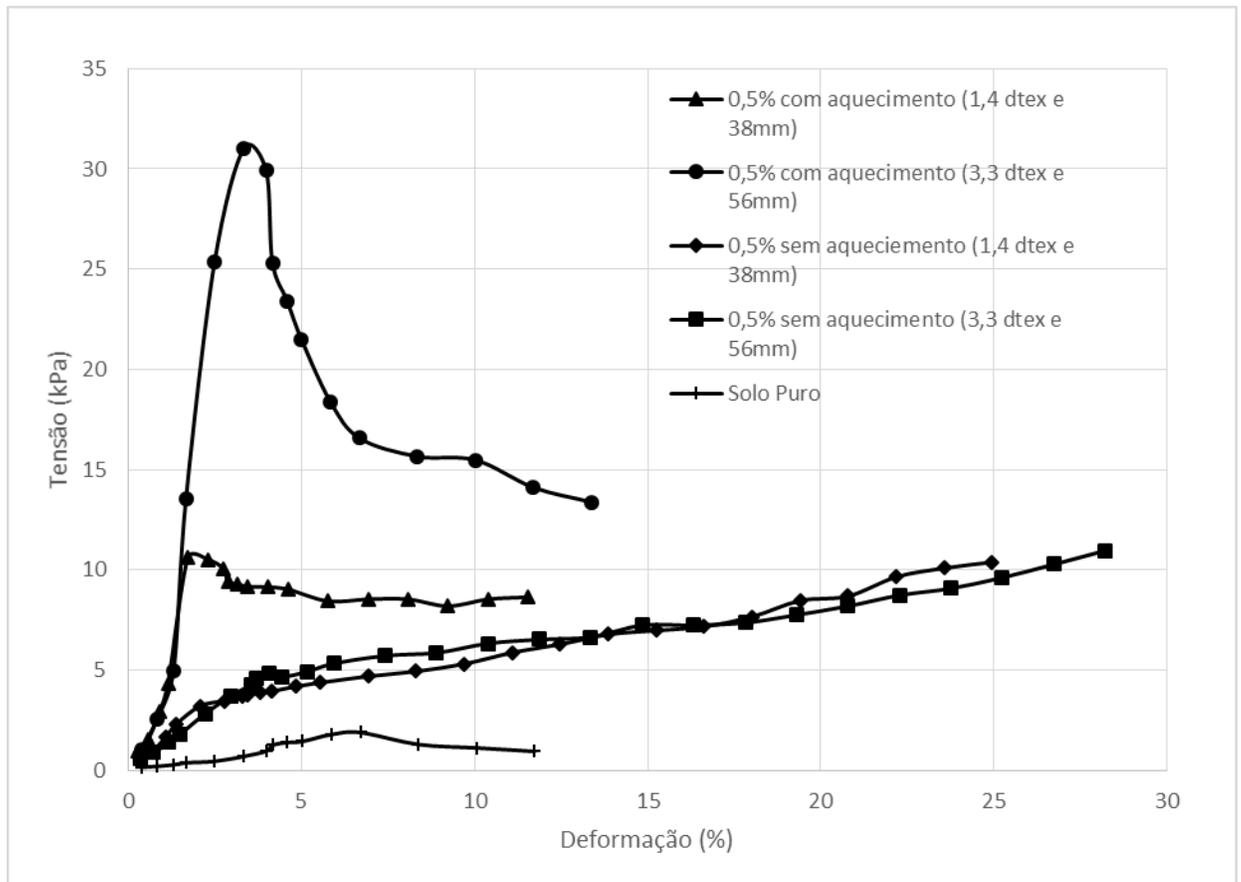


Figura 21: Influência do diâmetro das fibras e do aquecimento na resistência à compressão dos corpos de prova

Com a análise, percebem-se dois comportamentos distintos. Na situação sem aquecimento, as duas fibras apresentam desempenhos muito semelhantes, com as resistências possuindo uma taxa de crescimento constante e sem um pico definido. A diferença de inclinação entre a primeira parte do gráfico (até 5% de deformação) e a segunda (após 5% de deformação) indica o momento que o solo deixa de atuar de forma predominante, com a fibra assumindo o papel principal.

Já na situação com aquecimento, constata-se uma conduta diferente. Apesar de ambos os solos indicarem um pico de resistência bem definido, o solo com adição de fibra de 3,3 dtex e 56mm se mostrou muito mais forte que o solo com adição de fibra de 1,4 dtex e 38mm. Esse aumento pode ser fruto da maior área de contato da fibra de maior diâmetro, o que faz com que as partículas de solo fiquem mais juntas e aumentem a resistência do corpo de prova.

A influência da temperatura na mistura também pode ser estudada com o auxílio dos mesmos gráficos da Figura 21. Neles, serão comparados os gráficos sem e com aquecimento para cada tipo de fibra e, assim sendo, pode-se extrair algumas informações importantes.

Em ambas as fibras é possível perceber um comportamento mais dúctil nos corpos de prova sem aquecimento. Isso pode ser observado na Figura 22, que mostra o modo de ruptura do corpo de prova com adição de fibra de 3,3 dtex e 56mm durante o ensaio de compressão simples.



Figura 22: Corpo de prova de solo sem aquecimento com adição de PET durante ensaio de compressão simples

Ocorre que, quando não há presença de aquecimento, a fibra de PET atua como uma malha sintética, garantindo maior sustentação ao corpo de prova e permitindo o incremento na carga apesar das grandes deformações. É possível perceber tal ductilidade ao observar o “embarrigamento” do corpo de prova, causado pela absorção de carga pela fibra. Quando há presença de aquecimento, o corpo de prova adquire características mais rígidas, com um aumento significativo da resistência e o aparecimento do pico bem definido. É possível inferir visualmente esses argumentos quando analisamos a Figura 23.



Figura 23: Corpo de prova de solo com aquecimento com adição de PET durante o ensaio de compressão simples

Nele pode-se ver o aparecimento da fissura diagonal, característica de rupturas frágeis, e a atuação da fibra. O comportamento do corpo de prova com aquecimento indica que as fibras atuam como um material cimentante, o que confere uma maior ligação entre os grãos e seu consequente aumento de resistência.

Outra característica a se observar dos gráficos é a região de estabilização que aparece nos corpos aquecidos, diferentemente dos corpos não-aquecidos. Essa região também é resultante das características cimentantes que o material adquire quando colocado na estufa, enquanto os corpos sem aquecimento não possuem esse estágio. Neles, tem-se uma região de resistência sempre crescente, característica do desempenho de malha do material. Isso gera comentários divergentes para cada tipo de fibra.

Portanto, com o auxílio da Figura 21, nota-se que o solo com aquecimento com adição das fibras de 1,4 dtex e 38mm não possui a queda no pós-pico acentuada, atingindo o patamar de estabilidade logo após o alcance da resistência máxima. Isso pode acontecer devido ao teor de fibras ser inserido em massa, resultando numa maior distribuição dessas fibras no solo, visto que a quantidade de fibras inserida é maior que no solo com fibra de 3,3 dtex e 56mm. Por ser uma fibra com diâmetro menor e com menor comprimento, é necessário um volume maior para atingir o 0,5% de adição, fato que confere maior resistência em maiores deformações e maior mobilização na situação com aquecimento. Sendo assim, o solo com adição de fibra 1,4 dtex e 38mm aquecido pode ser considerado a melhor opção, tanto em relação ao solo com a adição das mesmas fibras sem aquecimento, quanto em relação ao solo aquecido com a adição do outro tipo de fibra.

No caso da adição da fibra de 3,3 dtex e 56mm, é nítido que o solo com aquecimento apresenta forte queda após chegar na resistência máxima, mal atingindo o patamar de estabilidade no regime pós-pico. A explicação para isso pode estar justamente no comportamento contrário ao da fibra anterior: como a fibra de 3,3 dtex e 56mm possui maior comprimento e maior diâmetro, a quantidade de fibras adicionadas no solo é menor que na situação de adição da fibra de 1,4 dtex e 38mm. Dessa maneira, o grau de mobilidade desses corpos de prova ficou reduzido, resultando em um comportamento semelhante ao do solo puro. Assim, constata-se que o solo com aquecimento e adição da fibra de 3,3 dtex e 56mm, apesar de atingir um pico de resistência mais alto que os corpos de prova de ambas as fibras sem aquecimento e que o solo aquecido com a fibra de 1,4 dtex e 38mm, pode ser considerado pior que as demais situações, já que não possui o formato desejado da curva de resistência.

## **6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Ao longo do estudo, ficou bastante claro que o reforço de solos é um assunto extremamente relevante dentro da Engenharia Geotécnica, devido à sua vasta aplicabilidade em diversos tipos de obras, como barragens, aterros e obras de pavimentação. Além disso, a busca por novos materiais que possam ser reciclados e reutilizados para tais causas tem ganhado mais destaque em virtude do impacto ambiental da poluição que esses materiais provocam. Assim, a utilização do PET passa a ser considerada para se empregar nessas situações.

No que diz respeito ao comportamento mecânico de solos argilosos, é incontestável que a adição de PET promove uma grande melhoria. Foi possível constatar ganho de resistência considerável em relação a carregamentos estáticos tanto para solos sem aquecimento quanto para solos com aquecimento. Em relação à influência da temperatura, conclui-se que o aquecimento é a melhor opção para solos com 0,5% de massa seca em fibras de 1,4 dtex e 38mm, enquanto o não-aquecimento se torna mais eficiente em solos com 0,5% de massa seca de fibras de 3,3 dtex e 56mm. Já ao analisar o diâmetro e tamanho das fibras, entende-se que, se não houver aquecimento, os dois tipos de fibra atuam praticamente da mesma forma. Caso exista o aquecimento, o comportamento é diferenciado: o menor diâmetro apresenta um pico de resistência inferior ao de maior diâmetro, mas possui o patamar de estabilidade mais bem definido e maior.

No caso analisado, portanto, conclui-se que o aquecimento é melhor para o solo analisado, ressaltando que não foi analisado o caso de aquecimento para o solo puro. Assim, apesar de melhorar consideravelmente as propriedades do solo em questão, não é possível afirmar que todas as melhorias devem-se essencialmente à inserção da fibra, pois a influência na sucção pode ter sido um fator de melhora que não foi observado.

Dessa forma, dentro do espectro de ensaios realizados, é possível classificar o solo com adição de fibra PET de 1,4 dtex e 38mm como a melhor alternativa para o percentual avaliado no presente trabalho. Como sugestão para trabalhos futuros, é interessante realizar os mesmos ensaios para corpos de prova maiores, uma vez que será possível utilizar porcentagens maiores de fibra. Também seria vantajoso investigar o comportamento de resistência dinâmica, para confirmar a boa aplicação em obras de rodovias. No tocante à questão da temperatura, uma ideia seria avaliar diferentes tempos de aquecimento na estufa, para decidir qual é o ideal. Seguindo a mesma linha, valem tentativas com outros tipos de materiais, para continuar a busca por novas alternativas que possam ser aplicadas como métodos de reforço.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

BUDINSKI, K.G. **Engineering materials, properties and selection.** 5ed. New Jersey: Prentice Hall International, 653p., 1996.

CAMPANELLA, R. G.; MITCHELL, J. K. **Influence of Temperature Variations on Soil Behavior.** Jour. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Proc. Paper 5958, Vol. 94, No. SM3, p. 709-734, 1968.

CASAGRANDE, M.D.T., **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidas a grandes deformações.** Porto Alegre, 2005, 243 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

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

CURCIO, D. S., **Comportamento hidromecânico de compósito solo-fibra.** Rio de Janeiro, 2008. 169p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRJ.

DA SILVA, C.C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

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

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

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

HEINECK, K.S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais.** Porto Alegre, 2002.

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

HULL, D., CLYNE, T.W., **An introduction to composite materials**. Cambridge University Press, 1996.

ILLSTON, J.M. **Construction materials; their nature and behavior**. 2ed. London: E & FN Spon, 518p., 1994.

JOHNSTON, C.D. **Fiber-reinforced cement and concrete**. In: Advances in concrete technology. 2ed. Ottawa: V.M. Malhorta, p.603-673., 1994.

LEONARDS, G. A.; RAMIAH, B. K. **Time Effects in the Consolidation of Clay**. Symposium on Time Rate of Loading in Soils, ASTM Spec. Tech. Publ. 254, p. 116-130, 1959.

LEONARDS, G. A.; ANDESLAND O. B. **The Clay-Water System and the Shearing Resistance of Clays**. [Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils](#), 1960

LOUZADA, N.S.L. **Experimental study of soils reinforced with crushed polyethylene Terephthalate (PET) residue**. Dissertação de Mestrado, DEC, PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2015.

MAHER, M.H.; HO, Y.C. **Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads**. Geotechnical Testing Journal, Philadelphia, v.16, n.3, p.330-338, 1993.

MAHER, M.H.; HO, Y.C. **Mechanical properties of Kaolinite/fiber soil composite**. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.120, n.8, p. 1381-1393, 1994.

MANO, E.B., **Polímeros como materiais de engenharia**, São Paulo, 1991.

MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z.; AL-HASANI, M.M. **Efect of inclusion properties on the behavior of sand**. Géotechnique, London, v.28, n.3, p.327-346, 1978.

MITCHELL, J. K.; CAMPANELLA, R. G. **Creep Studies on Saturated Clays**. Symposium on Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM Spec. Tech. Publ. 361, p. 90-103, 1963.

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

GARCIA, N.F. 2016 **Strength Characteristics of a Polymer Bonded Sand**. San Diego State University, 90p.

PAASWELL, R. E. **Temperature Effects on Clay Soil Consolidation**. Jour. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Proc. Paper 5225, Vol. 93, No. 5M3, p. 9- 22, 1967.

PELISSER, F.; MONTEDO, O.R.K.; GLEIZE, P.J.P.; ROMAN, H.R. **Mechanical properties of recycled PET fibers.** Materials Research, v.15, n.4, p.679-686, 2012.

PLUM, R. L. **The Effect of Temperature on Soil Compressibility and Pore Pressure.** MS thesis submitted to Cornell University, 1968.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M.A.S.; DE PAOLI, M.A. **Politereftalato de Etileno, PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismo de degradação e sua reciclagem.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.19, n.2, p.121-132, 2009.

SENEZ, P. C. **Comportamento de uma areia reforçada com fibras de polietileno tereftalato (PET).** Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2016. 124 p.

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

SOARES JÚNIOR, A.B. **Produção do Poli (tereftalato de etileno) Modificado com Glicerol e Derivados.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

SPECHT, L.P. **Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidos a carregamentos estáticos visando à pavimentação.** Porto Alegre, 2000. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

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

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

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