



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"  
Programa Interunidades

unesp 

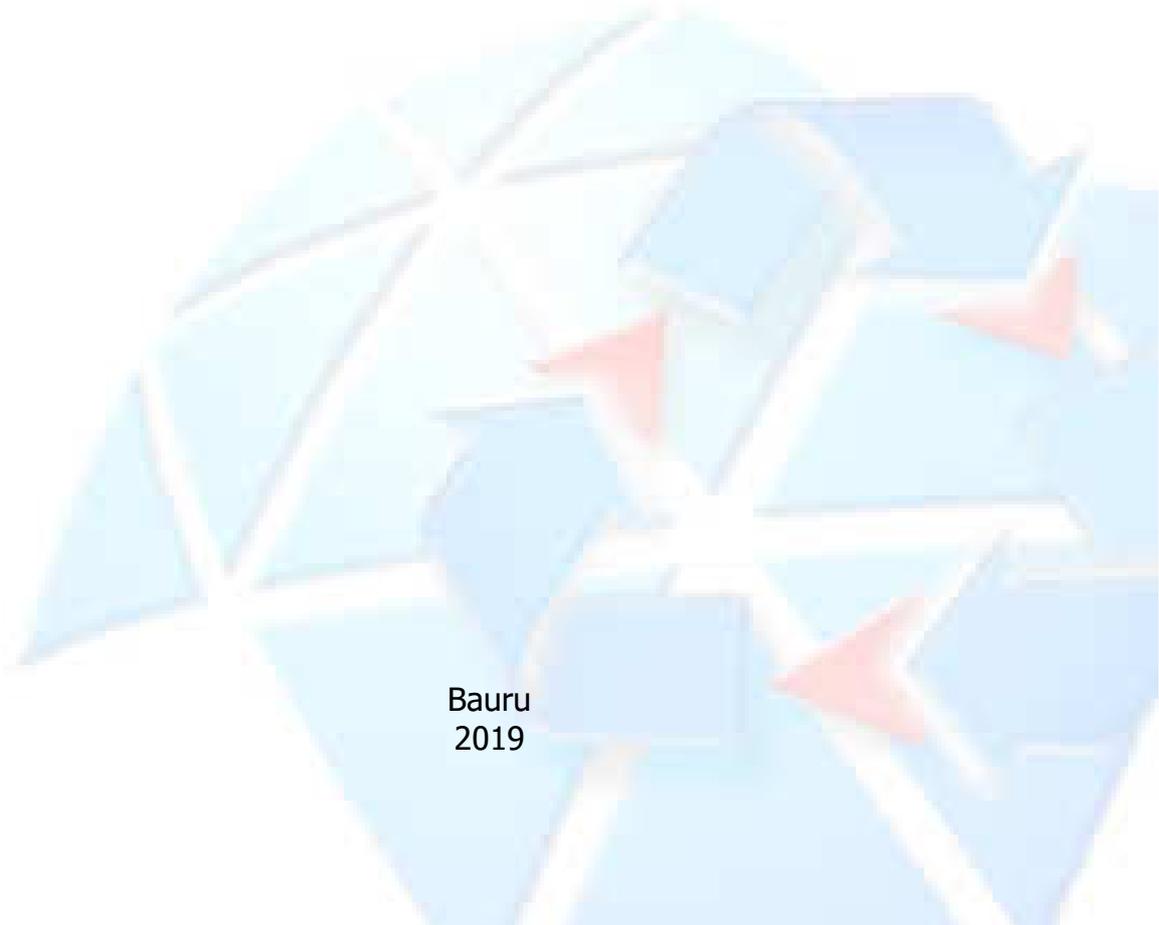
Mestrado

---

## Engenharia Civil e Ambiental

RÉGIS MARÇAL

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE SOLOS COM  
FIBRAS DE POLIPROPILENO RECICLADO**



Bauru  
2019

**RÉGIS MARÇAL**

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE SOLOS COM  
FIBRAS DE POLIPROPILENO RECICLADO**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Lodi

Marçal, Régis.

Avaliação de parâmetros de resistência de solos com  
fibras de polipropileno reciclado / Régis Marçal, 2019  
73 f.

Orientador: Paulo César Lodi

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Solos com fibras. 2. Resistência ao cisalhamento.  
3. CBR. 4. Polipropileno. I. Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de RÉGIS MARÇAL, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 12 dias do mês de julho do ano de 2019, às 10:00 horas, no(a) Anfiteatro da Diretoria Técnica de Informática da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO CESAR LODI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. MAURO MITSUUCHI TASHIMA do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de RÉGIS MARÇAL, intitulada **RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO RECICLADO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO CESAR LODI

Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES

Prof. Dr. MAURO MITSUUCHI TASHIMA

**PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO**

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:  
**RÉGIS MARÇAL**

DE: "RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO RECICLADO"

PARA:

"Avaliação de parâmetros de resistência de solos  
com fibras de polipropileno reciclado"

Bauru, 12 de julho de 2019.



Prof. Dr. Paulo César Lodi  
Orientador

## **DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais Magali e Melquior*  
*Aos meus irmãos Rafael e Marco Aurélio*  
*A minha esposa Bruna*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Paulo César Lodi pela orientação e amizade desde a graduação, quando proporcionou a oportunidade de me tornar bolsista de iniciação científica.

As discentes Naiara Pradela, Maitê Rocha e Laís Maciel pelo auxílio na realização dos ensaios de laboratório.

Ao técnico Gustavo Pinheiro, do Laboratório de Mecânica dos Solos da UNESP-Bauru, pelo apoio na prática de ensaios de laboratório.

A minha esposa, Bruna de Castilho Barduci Marçal, e minha família, Magali, Melquior, Rafael, Marco Aurélio, pelo apoio e incentivo prestados.

A Deus por me guiar durante todas as viagens realizadas entre Araçatuba e Bauru, durante o mestrado.

## RESUMO

MARÇAL, R. (2019) **Avaliação de Parâmetros de Resistência de Solos com Fibras de Polipropileno Reciclado**. Bauru, 73 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Este trabalho avaliou a influência da inclusão de fibras extraídas de recipientes reciclados de polipropileno (PP) na resistência mecânica de dois tipos de solo: arenoso da região de Bauru (SP) e argiloso da região de Pederneiras (SP). Foram realizados ensaios de compressão uniaxial, cisalhamento direto e CBR nos solos com e sem fibras. Inicialmente, as fibras de PP foram adicionadas aleatoriamente em porcentagens previamente definidas de 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50 e 2,00% em relação à massa de solo seca, a fim de se obter o teor ótimo de fibra, isto é, o percentual em massa de fibra que representa a máxima resistência à compressão não confinada (uniaxial) da mistura. De posse do teor ótimo de fibra e com base nos parâmetros ótimos de compactação, foram realizados ensaios de cisalhamento direto a fim de se avaliar a resistência ao cisalhamento do solo, além de ensaios CBR. Os principais resultados mostram que os teores ótimos de fibras obtidos na compressão uniaxial foram de 2,00% com  $L = 30$  mm (solo arenoso) e de 1,5% com  $L = 30$ mm (solo argiloso). Nesse sentido, notam-se aumentos de 52,27% e 48,12%, respectivamente, para os solos arenoso e argiloso nos valores de resistência à compressão uniaxial em relação ao solo sem a adição de fibras. Em relação aos parâmetros de resistência obtidos por meio de ensaio de cisalhamento direto, notam-se, após a adição das fibras, aumentos de 126,49% (coesão) e 14,01% (ângulo de atrito) para o solo arenoso. O solo argiloso apresentou um pequeno decréscimo no valor da coesão (17,90%). O solo arenoso teve um aumento de cerca de 117% no valor do CBR, ao passo que o solo argiloso sofreu ligeira redução no valor deste parâmetro.

**Palavras-chave:** Solos com Fibras, Resistência ao Cisalhamento, CBR, Polipropileno.

## **ABSTRACT**

**MARÇAL, R. (2019) Evaluation of Resistance Parameters of Soils with Recycled Polypropylene Fibers.** Bauru, 73 p. Dissertation (Master Degree) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

This work evaluated the influence of the fibers extracted from recycled polypropylene (PP) containers on the mechanical strength of two types of soil: sandy soil from Bauru (SP) region and clayey soil from Pederneiras (SP). Uniaxial compression, direct shear tests and CBR tests were performed in soils with and without fibers. Initially, PP fibers were randomly added at predetermined percentages of 0.25; 0.50; 0.75; 1.00; 1.50 and 2.00% in relation to the dry soil mass in order to obtain the optimum fiber content, that is, the percentage of fiber mass representing the maximum unconfined (uniaxial) compression strength of the mixture. With the optimum fiber content and based on the optimum compaction parameters, direct shear tests were performed in order to evaluate the shear strength of the soil, in addition to CBR tests. The main results show that the optimum fiber content obtained in uniaxial compression was 2.00% with  $L = 30$  mm (sandy soil) and 1.5% with  $L = 30$  mm (clay soil). In this sense, there were increases of 52.27% and 48.12%, respectively, for sandy and clayey soils in the values of uniaxial compression resistance in relation to the soil without the addition of fibers. In relation to the resistance parameters obtained by means of a direct shear test, increases of 126.49% (cohesion) and 14.01% (friction angle) were observed for the sandy soil after the addition of the fibers. The clay soil presented a small decrease in the value of cohesion (17.90%). The sandy soil had an increase of about 117% in the CBR value, while the clay soil had a slight reduction in the value of this parameter.

**Keywords:** Soil with Fibers, Shear Strength, CBR, Polypropylene.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geossintéticos disponíveis no Mercado.....	20
Figura 2: Utilização de geossintéticos na engenharia civil.....	21
Figura 3 - Diferentes tipos de fibras: a) fibras de coco, b) fibra de polipropileno e c) fibras metálicas. ....	23
Figura 4: Configurações variadas de um compósito de solo reforçado com fibra. ....	26
Figura 5: Mecanismos de potencial ruptura de um talude com solo reforçado e os respectivos testes laboratoriais mais adequados para caracterização do reforço do solo. ....	27
Figura 6: Esquema do comportamento mecânico na interface entre o elemento de fibra e a matriz do solo .....	28
Figura 7: Imagens microscópicas de: (a) solo; (b) solo e 10% de cimento; (c) solo e 0,25% de fibras; (d) solo, 10% de cimento e 0,25% de fibras.....	29
Figura 8: Elemento de solo com e sem reforço. ....	30
Figura 9: Estrutura do polipropileno. ....	34
Figura 10: Processo químico de formação do PP.....	34
Figura 11: Demanda mundial de plásticos por tipos de resina 2006 (49,5 milhões de toneladas).....	35
Figura 12: Segmento do mercado de produtos em PP.....	37
Figura 13: Cortador de fibra adaptado (à esquerda) e fibras de polipropileno (à direita). ....	38
Figura 14: Solo em sua umidade natural e fibras antes da incorporação; solo e fibras na umidade ótima, já homogeneizados.....	39
Figura 15: Esquema das etapas envolvidas na avaliação da resistência mecânica dos solos por meio da inclusão de fibras de PP. ....	40
Figura 16: Processos de mistura e homogeneização solo fibra. ....	41
Figura 17: Aparelho para moldagem dos corpos de prova.....	42
Figura 18: Prensa do ensaio de compressão simples.....	43
Figura 19: Corpo de prova após o rompimento sem a adição de fibras (à esquerda) e com a adição de fibras de PP (à direita). ....	43

Figura 20: Cisalhamento direto dos corpos de prova (a) moldagem dos corpos de prova por compactação estática (b) (c) célula do ensaio de cisalhamento direto (d) Equipamento para ensaio de cisalhamento direto.....	45
Figura 21: Preparação do Ensaio de determinação do CBR para o solo arenoso (a) solo peneirado (b) homogeneização do solo para o teor de umidade específico (c) adição do teor ótimo de fibras de PP (d) mistura solo-fibra. ....	46
Figura 22: Execução do Ensaio de determinação do CBR para o solo arenoso (a) ensaio de expansão; (b) Prensa CBR; (c) corpo de prova sem fibras após o ensaio CBR; (d) corpo de prova com fibras após o ensaio CBR. ....	47
Figura 23: Preparação do Ensaio de determinação do CBR para o solo argiloso (a) solo peneirado; (b) homogeneização do solo para o teor de umidade específico; (c) adição do teor ótimo de fibras de PP; (d) mistura solo-fibra. ....	48
Figura 24: Execução do Ensaio de determinação do CBR para o solo argiloso (a) ensaio de expansão; (b) Prensa CBR; (c) corpo de prova sem fibras após o ensaio CBR; (d) corpo de prova com fibras após o ensaio CBR. ....	49
Figura 25: Curva granulométrica dos solos arenoso e argiloso.....	51
Figura 26: Limite de Liquidez das amostras de solo arenoso e argiloso.....	51
Figura 27: Curvas de compactação para o solo arenoso e argiloso.....	52
Figura 28: Tensões de ruptura médias à compressão simples (kPa) do solo arenoso com e sem reforço de fibras constituídas de PP com diferentes combinações de teor (%) e comprimento de fibra (mm). ....	54
Figura 29: Tensões de ruptura médias à compressão simples (kPa) do solo argiloso com e sem reforço de fibras constituídas de PP com diferentes combinações de teor (%) e comprimento de fibra (mm). ....	55
Figura 30: Tensão cisalhante em função da deformação horizontal do solo arenoso sem fibra. ....	57
Figura 31: Tensão cisalhante em função da deformação horizontal do solo arenoso com fibra (L= 30mm e 2,00%). ....	58
Figura 32: Envoltória de resistência do solo arenoso sem e com fibra (L= 30mm e 2,00%)...	58
Figura 33: Tensão cisalhante em função da deformação horizontal do solo argiloso sem fibra. ....	59
Figura 34: Tensão cisalhante em função da deformação horizontal do solo argiloso com fibra (L= 30mm e 1,50%). ....	60

Figura 35: Envoltória de resistência do solo argiloso sem e com fibra (L= 30mm e 1,50%)..	60
Figura 36: Curva pressão x penetração do ensaio CBR para a umidade ótima do solo arenoso sem e com fibras de PP.....	61
Figura 37: Curva pressão x penetração do ensaio CBR para a umidade ótima do solo argiloso sem e com fibras de PP.....	62
Figura 38: Envoltórias de resistência dos solos argiloso e arenoso.....	65

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Monômeros dos principais polímeros em geossintéticos. ....	22
Tabela 2: Propriedades das fibras vegetais comparadas com a fibra de vidro. ....	24
Tabela 3: Resultados do ensaio CBR utilizando solo reforçado com fibras de polipropileno. ....	32
Tabela 4: Propriedades típicas das fibras sintéticas. ....	36
Tabela 5: Resumo da quantidade de ensaios realizados para cada tipo de solo. ....	44
Tabela 6: Limites de consistência e índices físicos. ....	53
Tabela 7: Valores médios das resistências (kPa) não confinadas devido a inclusão de fibras de PP em solo arenoso.....	54
Tabela 8: Valores médios das resistências (kPa) não confinadas devido a inclusão de fibras de PP em solo argiloso. ....	54
Tabela 9: Resistências comparativas do solo arenoso, sem e com fibras, em diferentes umidades.....	56
Tabela 10: Resistências comparativas do solo argiloso, sem e com fibras, em diferentes umidades.....	56
Tabela 11: Parâmetros de resistência obtidos para o solo arenoso.....	58
Tabela 12: Parâmetros de resistência obtidos para o solo argiloso. ....	60
Tabela 13: Resultados do ensaio CBR utilizando solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno.....	62
Tabela 14: Resultados do ensaio CBR utilizando solo argiloso reforçado com fibras de polipropileno.....	62
Tabela 15: Parâmetros de resistência obtidos na pesquisa. ....	65
Tabela 16: Valores de CBR obtidos na pesquisa.....	65

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CBR	Índice de Suporte Califórnia
NBR	Norma Brasileira
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PET	Politereftalato de Etileno
PP	Polipropileno
PPGEC	Programa de Pós Graduação Engenharia Civil
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
UNESP	Universidade Estadual Paulista

## LISTA DE SÍMBOLOS

### *Símbolos do Alfabeto Latino*

$c$	Coesão do solo
$D$	Diâmetro das fibras
$e$	Índice de vazios
$GC$	Grau de Compactação
$IP$	Índice de Plasticidade
$L$	Comprimento da fibra
$LL$	Limite de liquidez
$LP$	Limite de Plasticidade
$n$	Porosidade
$P$	Pressão
$w$	Teor de Umidade
$w_{opt}$	Teor de Umidade Ótimo

### *Símbolos do Alfabeto Grego*

$\rho$	Massa específica
$\rho_d$	Massa específica seca
$\rho_{dmax}$	Massa específica seca máxima
$\rho_s$	Massa específica dos sólidos
$\sigma$	Tensão
$\phi$	Ângulo de atrito interno do solo

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	16
2. OBJETIVO .....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
3.1 Solo Reforçado com Fibra .....	19
3.1.1 Definição .....	19
3.1.2 Geossintéticos .....	19
3.1.3 Fibras .....	23
3.1.4 Materiais Compósitos e Compósitos Fibrosos .....	25
3.1.5 A Interface solo-fibra .....	27
3.1.6 Estudos Experimentais com fibras de polipropileno .....	30
3.2 Polímeros .....	33
3.2.1 Definição .....	33
3.2.2 Classificação dos polímeros .....	33
3.2.3 Fibras de Polipropileno (PP) .....	34
3.2.4 A Reciclagem do PP .....	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	38
4.1 Material utilizado .....	38
4.2 Ensaio de caracterização .....	38
4.3 Ensaio de compressão não confinada .....	39
4.4 Preparação dos Corpos de Prova .....	40
4.5 Execução do Ensaio .....	41
4.6 Ensaio de Cisalhamento Direto: Preparação dos corpos de prova .....	44
4.7 Ensaio de Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) .....	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	50
5.1 Caracterização .....	50
5.1.1 Curva Granulométrica .....	50
5.1.2 Limites de Consistência .....	51

5.1.3	Curvas de Compactação.....	52
5.1.4	Índices Físicos.....	52
5.2	Resistência a compressão não confinada.....	53
5.3	Cisalhamento direto.....	57
5.3.1	Resultados para o solo arenoso.....	57
5.3.2	Resultados para o solo argiloso.....	59
5.4	CBR.....	61
5.4.1	Resultados para o solo arenoso.....	61
5.4.2	Resultados para o solo argiloso.....	62
5.5	Considerações finais.....	63
6.	CONCLUSÃO.....	66
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O reforço do solo foi introduzido no campo da geotecnia a fim de melhorar as propriedades de resistência mecânica do solo em projetos de engenharia (TANG et al, 2010). Além do reforço do solo, destacam-se a densificação (MITCHELLE WENTZ, 1991; GRAF, 1992), solidificação das partículas do solo (ISHIHARA et al., 1980) e estabilização do solo (YASUDA et al., 1992; CHANG & WANG, 1993).

Nas últimas décadas, um importante material de engenharia surgiu com as vantagens do controle de qualidade e fácil instalação: os geossintéticos (KOERNER, 2012). Os geossintéticos desempenham papéis importantes de proteção, mitigação e reabilitação de áreas costeiras e, por isso, são utilizados em diversas áreas da engenharia, tais como hidráulica e geotecnia (LONG ET AL.,2007). No entanto, a inclusão de fibras no solo, distribuídas aleatoriamente, foi relatada como uma técnica efetiva e econômica para aumentar a resistência das camadas superficiais do solo em aplicações de campo (CONSOLI et al., 2009A; DIAMBRA, 2010; FESTUGATO et al., 2015). O solo reforçado com fibra polimérica se comporta como um compósito, proporcionando uma matriz relativamente coesa, elevando a resistência mecânica da mistura solo-fibra (JAMSAWANGET et al., 2015; MIRZABABAEI et al., 2017).

Os resíduos sólidos de plástico de polímeros estão criando novos desafios que, no cenário atual, são importantes preocupações de pesquisa. Observou-se um aumento acentuado na produção de diferentes materiais que têm como base o plástico (HISHAM, 2016). Este enorme aumento nas *commodities* plásticas também fez surgir o desperdício, colocando em foco a questão ambiental, visto que estes materiais, muitas vezes, são descartados junto à natureza. Nos últimos anos, a engenharia geotécnica buscou ampliar os horizontes de reforço de solo empregando uma técnica promissora: a utilização de polímero reciclado como reforço de solo.

As fibras poliméricas recicláveis são formadas por filamentos de recipientes de materiais recicláveis, destacando-se as garrafas e embalagens PET (politereftalato de etileno) e PP (polipropileno).

Uma das vantagens das fibras poliméricas recicláveis em relação aos geossintéticos é que sua matéria prima pode ser encontrada na forma de resíduos sólidos que vão desde garrafas plásticas até carpetes. É importante a certificação de que estes materiais recicláveis não estejam contaminados. Assim, recipientes que contenham agrotóxicos e derivados do petróleo devem passar por processos de descontaminação antes de serem reutilizados.

A alta transparência, brilho, baixa densidade e alta temperatura de fusão colocam o PP em evidência no segmento das embalagens, uma vez que é um material atóxico, podendo interagir com alimentos envasados sem que ocorram danos à saúde (HISHAM, 2016). Além disso, é um material que se adapta às necessidades do dia a dia, pois pode ser levado do freezer ao micro-ondas sem nenhum tipo de dano, graças às suas propriedades termoplásticas.

O fato é que a quantidade de resíduos plásticos recicláveis tende a aumentar com o aumento da população e a utilização destes materiais como reforço de solos pode se tornar, portanto, uma alternativa promissora no que tange à questão econômica e geoambiental, visto que a utilização destes materiais recicláveis geraria economia no consumo de energia e água, além de benefícios sociais, dado pela conscientização da população.

Atualmente, vários são os tipos de fibras empregadas como reforço de solo no campo da geotecnia (MANO & MENDES, 2004). No caso das fibras poliméricas, por serem materiais sintéticos, variam conforme o processo de fabricação, alterando, assim, as propriedades mecânicas, físicas e químicas de cada uma delas. Desse modo, o comportamento singular, no que tange à interface solo-fibra, pode influenciar na escolha do tipo de material a ser empregado pelo engenheiro geotécnico. Portanto, o correto entendimento das forças atuantes na mistura solo-fibra somado aos resultados de ensaios de laboratório são imprescindíveis, independentemente do tipo de fibra a ser empregado (VIEIRA et al., 2013).

Dessa forma, este trabalho procura avaliar o comportamento da resistência mecânica de solos arenoso e argiloso da região de Bauru (SP) pela inclusão de fibras de PP reciclado.

## **2. OBJETIVO**

Avaliar os parâmetros de resistência de solos arenoso e argiloso da região de Bauru (SP) por meio da inclusão de fibras de recipientes de polipropileno reciclado. Por meio da inclusão de diferentes tamanhos e percentuais de fibras em relação à massa de solo seco, foram analisadas a resistência à compressão não confinada, resistência ao cisalhamento direto e Índice de Suporte Califórnia (CBR).

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Solo Reforçado com Fibra**

##### **3.1.1 Definição**

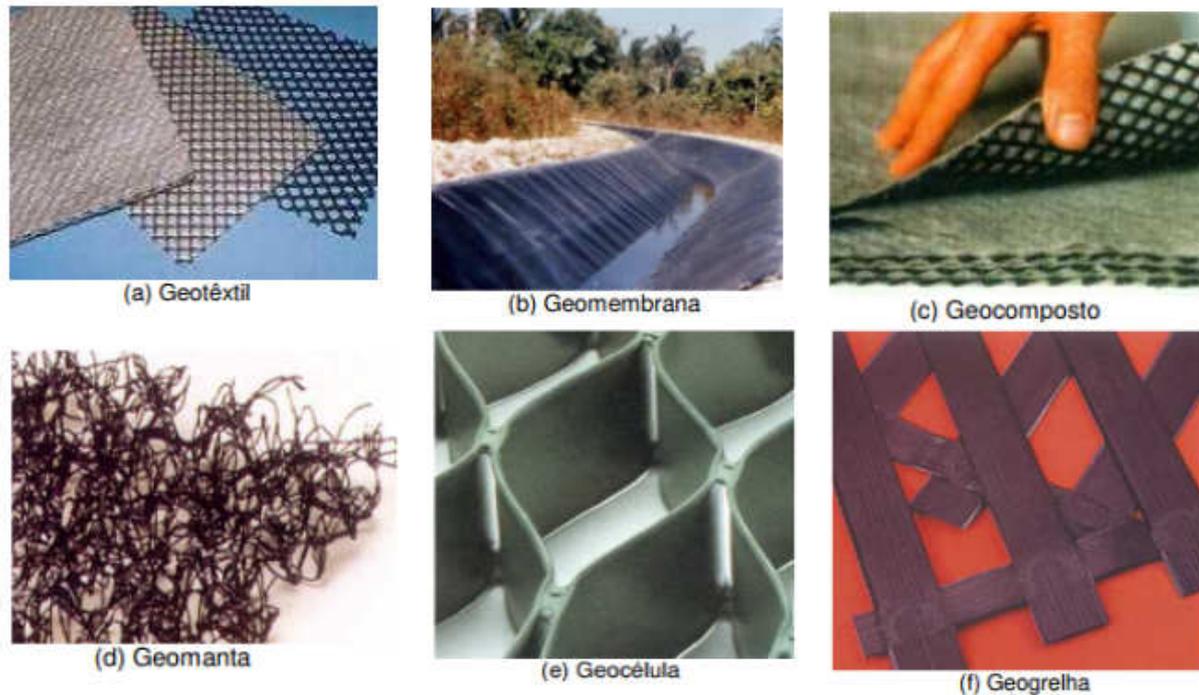
Reforço do solo pode ser descrito como um conjunto de técnicas que são empregadas para melhorar as propriedades de engenharia de solo, como resistência à tração, cisalhamento, compressibilidade e condutividade hidráulica (BABU, 2005). Reforços do solo que são comumente utilizados variam em termos da essência (natural ou sintetizada), padrão (tiras, folhas, grades, barras, fibras, pó), rugosidade (áspero ou liso) e rigidez (JAMSHIDI et al., 2010). Nesse sentido, podem ser utilizados materiais poliméricos ou naturais. Dentre os poliméricos, destacam-se os geossintéticos e as fibras sintéticas, podendo estas ser ou não recicladas.

##### **3.1.2 Geossintéticos**

A prática de reforçar o solo por meio da inclusão de materiais sintéticos é evidenciada no campo dos geossintéticos. O emprego de materiais geossintéticos no Brasil é recente, tendo em vista que as primeiras aplicações foram registradas na década de 90.

Dentre os geossintéticos disponíveis no mercado destacam-se o geotêxtil, a geomembrana, o geocomposto, a geomanta, a geocélula e a geogrelha, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1: Geossintéticos disponíveis no Mercado.



Fonte: Sieira, 2010.

Os geossintéticos estão presentes nas seguintes áreas da engenharia civil (Figura 2):

- a) Saneamento: atuando como elementos impermeabilizantes de modo a evitar a contaminação do lençol freático, destacando-se as obras de impermeabilização de aterro sanitário e as lagoas de tratamento de esgoto;
- b) Transporte: atuando como elementos de reforço para aterro sobre solos moles, destacando-se as obras de construção de estradas e ferrovias;
- c) Hidráulica: atuando como elementos de impermeabilização na construção de canais e reservatórios;
- d) Geotecnia: atuando como filtros em barragens e elementos de reforço na estabilização de taludes e,
- e) Construção civil: atuando como elementos de impermeabilização de coberturas de edificações.

Figura 2: Utilização de geossintéticos na engenharia civil.



a) Estruturas de solo reforçado;



b) Reforço de aterros sobre solos moles;



c) Filtro em barragens;



d) Canais.

Fonte: Sieira, 2010.

Os geossintéticos são constituídos por polímeros, isto é, moléculas grandes formadas por ligações repetidas de pequenas moléculas denominadas monômeros. A Tabela 1 mostra os monômeros dos principais polímeros em geossintéticos.

Tabela 1: Monômeros dos principais polímeros em geossintéticos.

Polímero	Monômero	Tipos de Geossintéticos
Polietileno (PE)	$\left[ \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$	Geotêxteis Geomembranas Geocompostos <b>Geogrelhas</b> Georredes
Polipropileno (PP)	$\left[ \begin{array}{cc} \text{H} & \text{CH}_3 \\   &   \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$	Geotêxteis Geomembranas <b>Geogrelhas</b> Geocompostos
Poliéster (PET)	$\left[ -\text{O}-\begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{C} \\   \\ \text{H} \end{array}-\begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{C} \\   \\ \text{H} \end{array}-\text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(=\text{O})- \right]_n$	Geotêxteis Geocompostos <b>Geogrelhas</b>
Poliamida (PA)	$\left[ \begin{array}{c} \text{H} \\   \\ -\text{N}- \\   \\ \text{H} \end{array} - (\text{CH}_2)_{2,8} - \text{C}(=\text{O}) - \right]_n$	Geotêxteis Geocompostos <b>Geogrelhas</b>

n indica o grau de polimerização

Fonte: Sieira, 2003.

No cenário nacional, diversas foram as pesquisas para avaliar a degradação dos geossintéticos em condições de agressividade ambiental, destacando-se os trabalhos de Lodi (2003) e Maia (2001). É função do engenheiro geotécnico a escolha adequada do tipo de geossintético a ser aplicado no campo, levando-se em conta suas propriedades mecânicas, físicas, químicas e as condições de agressividade do meio, de modo a proporcionar a integridade do material, segurança e estabilidade às obras de engenharia. Caso alguma destas abordagens não seja levada em consideração, as consequências para o meio ambiente podem ser drásticas, uma vez que podem ocorrer desde a contaminação de aquíferos até o deslizamento de terra.

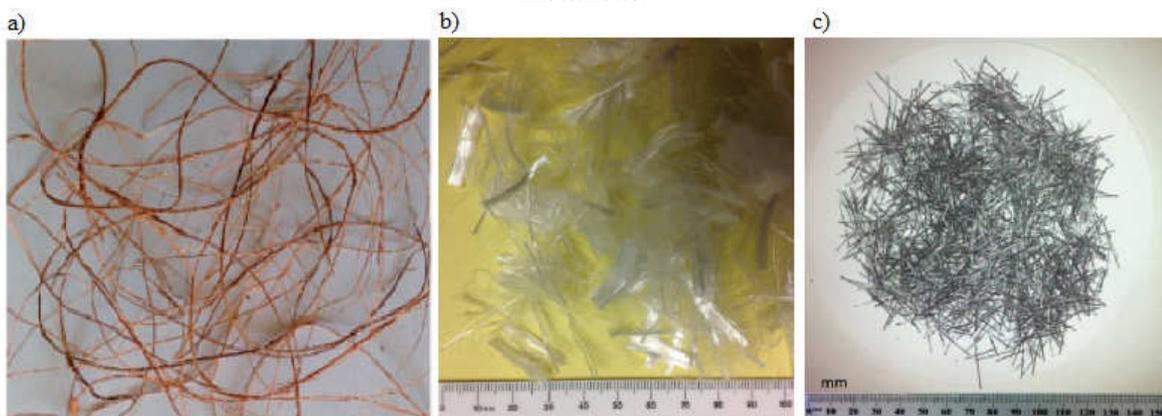
Portanto, os geossintéticos são materiais de reforço de solo já consagrados na prática da engenharia geotécnica, tendo suas aplicações estendidas para as áreas da Hidráulica, Saneamento, Transporte, Construção Civil e Ambiental.

### 3.1.3 Fibras

Fibra é um termo genérico utilizado para um corpo flexível, com seção transversal de dimensões reduzidas e elevada razão entre o comprimento e o diâmetro (superior a 100), podendo ser orgânicas ou inorgânicas, poliméricas ou não (MANO & MENDES, 2004).

Sieira & Sayão (2010) enfatizam que as fibras podem ser naturais, sintéticas e de materiais metálicos. Como exemplo de fibras naturais tem-se o algodão, lã, coco, seda, linho, juta, asbesto, entre outras. As fibras sintéticas são produzidas a partir de resinas derivadas do petróleo, tais como as fibras de poliéster e polipropileno. Pode-se citar também as fibras de vidro (fibras não-naturais) provenientes de material inorgânico e fabricadas pelo homem.

Figura 3: Diferentes tipos de fibras: a) fibras de coco, b) fibra de polipropileno e c) fibras metálicas.



Fonte: a) Danso et al. (2017), b) Fatahi et al. (2013), c) Fatahi et al. (2012).

A prática de se adicionar fibras como elemento de reforço foi estabelecida há milhares de anos, quando então adicionava-se palha de arroz ou trigo à lama para reforçar blocos de construção (ABTAHI et al., 2009). Na Tabela 2 são descritas algumas propriedades das fibras naturais, quando comparadas com a fibra de vidro.

Tabela 2: Propriedades das fibras vegetais comparadas com a fibra de vidro.

Propriedade	Vidro	Linho	Cânhamo	Juta	Rami	Coco	Sisal	Algodão
<b>Densidade</b> (g/cm <sup>3</sup> )	2,55	1,4	1,48	1,46	1,5	1,25	1,33	1,51
<b>Tensão</b> (MN/m <sup>2</sup> )	2400	800-1500	550-900	400-800	500	220	600-700	400
<b>Rigidez</b> (GPa)	73	60-80	70	10-30	44	6	38	12
<b>Alongamento</b> <b>na Ruptura</b> (%)	3	1,2-1,6	1,6	1,8	2	15-25	2-3	3-10
<b>Absorção de</b> <b>água (%)</b>	-	7	8	12	12-17	10	11	8-25

Fonte: Naldony, 2013.

Nos dias atuais diversos tipos de fibras têm sido utilizadas como reforço de solo. No caso das fibras poliméricas, estas apresentam pequenas variações face ao processo de fabricação, o que afeta diretamente suas propriedades de modo geral. Como exposto anteriormente, existe a necessidade do correto entendimento das forças atuantes na mistura solo-fibra uma vez que o comportamento singular, no que tange à interface do solo com a fibra, pode influenciar na escolha do tipo de material a ser empregado pelo engenheiro geotécnico. Para tanto, diversos estudos são necessários para essa compreensão (ensaios de laboratório e/ou de campo, principalmente).

Para Fatahi et al. (2012), ao se utilizar fibras sintéticas como reforço de solo amenizam-se questões ambientais oriundas do desperdício de materiais constituintes dos resíduos sólidos urbanos. Segundo a ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil em 2016 foi de 78,3 milhões de toneladas, das quais uma parcela significativa inclui, por exemplo, o polipropileno na forma de equipamentos eletrônicos, brinquedos, embalagens plásticas e sacolas. Desse modo, estes materiais deixariam de ser descartados em aterros sanitários para serem convertidos na forma de fibras, cuja aplicação inclina-se para o campo da geotecnia.

### 3.1.4 Materiais Compósitos e Compósitos Fibrosos

Os compósitos podem ser definidos como um conjunto de materiais que resultem em uma combinação de propriedades que isoladamente seus constituintes não seriam capaz de proporcionar. A seleção de materiais para a formação do compósito pode resultar na melhoria das propriedades mecânicas da mistura solo-fibra (DANSO et al., 2017).

Segundo Dejaloud & Jafarian (2016), os compósitos envolvem uma ampla gama de materiais, destacando-se os solos reforçados com fibras. Nos últimos anos, os compósitos formados por solo reforçado com fibras tornaram-se um dos materiais mais populares para estruturas geotécnicas. Assim, muitos pesquisadores (CONSOLI et al., 2005; ÖZKUL & BAYKAL, 2007; TANG et al., 2007; JIANG et al., 2010; ESTABRAGH et al., 2011; ESTABRAGH et al., 2013; BOTERO et al., 2015; YILMAZ, 2015) conduziram alguns experimentos variando as inclusões de diferentes frações de volume, forma e especificações das fibras. O resultado dessas investigações mostra que a presença de inclusões de fibras aumenta a resistência e a deformação residual do solo.

De acordo com Danso et al. (2017) o compósito de solo reforçado com fibra é definido como uma massa de solo que contém elementos discretos distribuídos aleatoriamente (fibras) proporcionando uma melhoria mecânica no desempenho da mistura solo-fibra. Para os autores, o desempenho da matriz de solo reforçada com fibra depende de fatores, como o tamanho da partícula de solo, além do tipo, proporção e características da fibra.

Para Dejaloud & Jafarian (2016), a resposta da curva tensão-deformação dos compósitos formados por solo reforçado com fibras é determinada pelo comportamento mecânico do solo simples, das fibras e configuração destas com o solo. A Figura 4 mostra diferentes padrões possíveis de orientação das fibras. Cada um desses padrões de orientação afeta a resposta global do compósito devido ao mecanismo de tensão / deformação.

Para Levy Neto & Pardini (2006), a principal função dos compósitos é combinar, pelo menos, duas fases denominadas de matriz e reforço. A matriz atua no sentido de distribuir a carga pelo compósito, ao passo que o reforço é responsável por restringir os esforços solicitantes (BENINI, 2011).

Figura 4: Configurações variadas de um compósito de solo reforçado com fibra.

Solo simples	Compósito solo-fibra				
	Fibras contínuas	Alinhado			Aleatoriamente orientado
		Vertical	Horizontal	Orientado	
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	
	Fibras descontínuas	(f)	(g)	(h)	(i)

Fonte: Dejaloud & Jafarian, 2016.

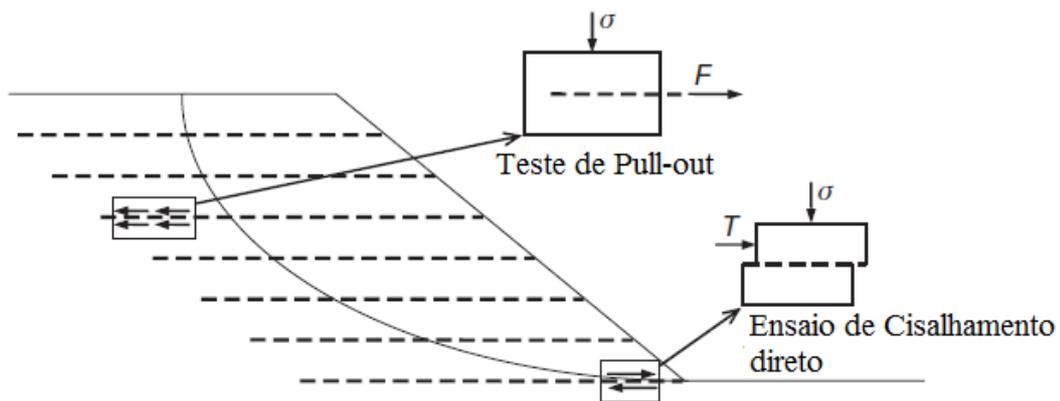
Segundo Finkler (2005), no caso dos compósitos com fibras contínuas, as tensões atuantes são transferidas às fibras que, por sua vez, suportam o esforço solicitante, ao passo que a matriz atua mantendo as fibras unidas proporcionando a transferência de tensões. Para o autor, os compósitos com fibras descontínuas são formados por fibras cortadas, dispostas aleatoriamente ou de maneira orientada e contribuem com resistência mecânica (componente estrutural), sendo a matriz o “meio” de transferência do esforço mecânico sofrido (componente matricial).

A resposta do compósito às solicitações atuantes vai depender dos elementos constituintes de sua matriz e do tipo de reforço empregado. Assim, os processos de intemperismo físico e químico sofridos pelo solo durante sua origem e formação vão influenciar na forma como a matriz vai responder aos esforços solicitantes. Portanto, é fundamental o emprego de vários tipos de solo (arenoso, silteoso e argiloso) no estudo da avaliação da resistência mecânica da mistura solo-fibra para o correto entendimento da resposta da matriz na distribuição da carga pelo compósito.

### 3.1.5 A Interface solo-fibra

Segundo Vieira et al. (2013), o mecanismo de interação do solo-reforço tem importância decisiva no projeto de obras geotécnicas. Este mecanismo depende das propriedades do solo, das características de reforço e a interação entre componentes (solo e reforço). A identificação precisa do mecanismo de interação e a escolha do ensaio mais adequado para a sua caracterização são considerações importantes a serem levadas em conta. A Figura 5 apresenta um potencial mecanismo de ruptura de um talude com solo reforçado.

Figura 5: Mecanismos de potencial ruptura de um talude com solo reforçado e os respectivos testes laboratoriais mais adequados para caracterização do reforço do solo.



Fonte: Vieira et al., 2007.

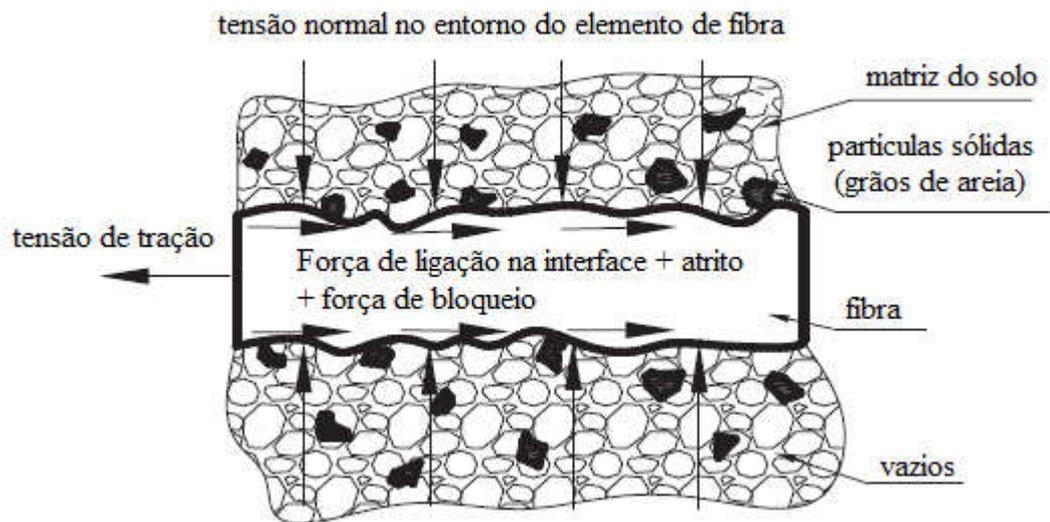
Para Vieira et al. (2013), na camada superior da massa retida de solo reforçado, o reforço é tracionado e, portanto, para que a interação do reforço do solo possa ser melhor caracterizada são realizados ensaios de *pull-out* (arrancamento) em laboratório. Perto da base do talude, o deslizamento do solo é esperado e a interação entre os dois materiais é melhor caracterizada através de testes de ensaios de cisalhamento direto.

Segundo Ferreira et al. (2013), o teste de *pull-out* é um método valioso para investigar a força de ancoragem do solo reforçado. Por outro lado, o teste de cisalhamento direto é o método de ensaio mais adequado para simular a interação solo-reforço nos casos em que o deslizamento da massa do solo da superfície pode ocorrer.

Nas últimas décadas, vários estudos experimentais foram conduzidos para avaliar os parâmetros de resistência ao cisalhamento de interfaces solo-fibra através de ensaios de cisalhamento direto, destacando-se os trabalhos de Ferreira et al. (2013), Vieira et al. (2013) e Tang et al. (2007).

Para Tang et al. (2007), os elementos de fibra atuam como uma distribuição espacial tridimensional em rede de modo a interligar os grãos de solo e ajudar a formar uma matriz coesa, restringindo o deslocamento causado por esforços cisalhantes. Devido às forças de ligação na interface, as fibras na matriz são impedidas de deslizar, suportando esforços de tração, conforme se observa na Figura 6.

Figura 6: Esquema do comportamento mecânico na interface entre o elemento de fibra e a matriz do solo



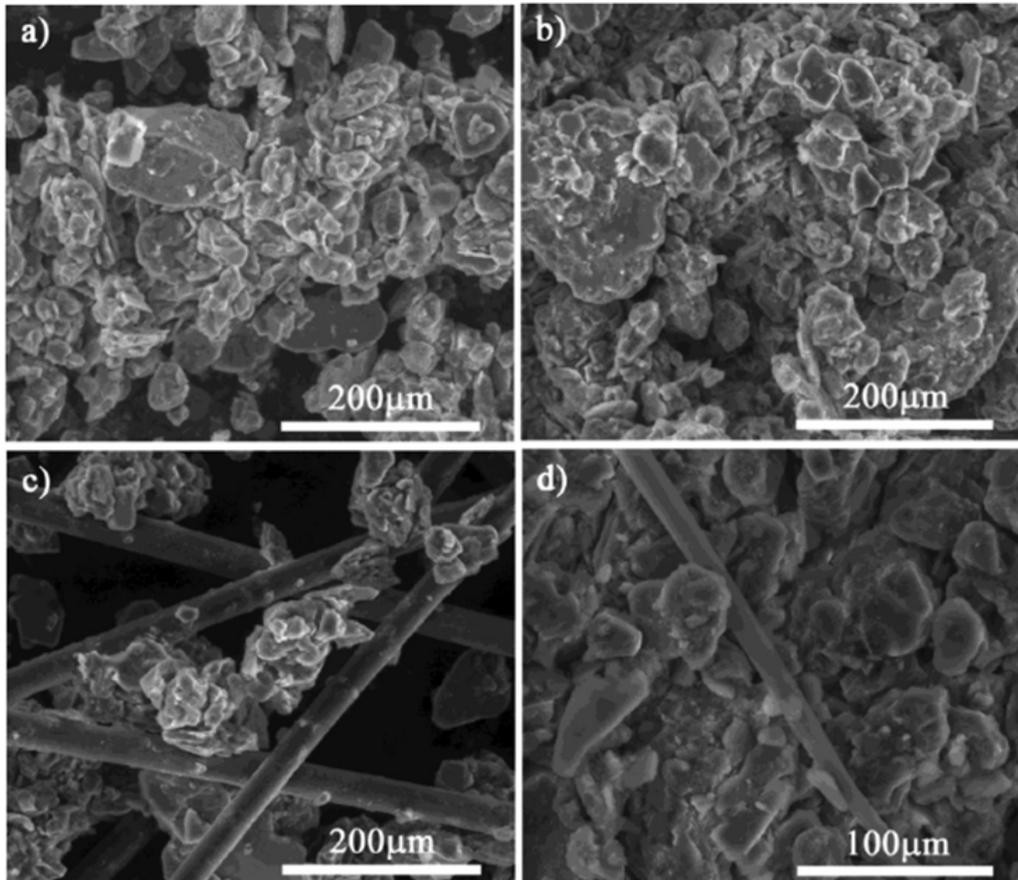
Fonte: Tang et al., 2007.

A força de ligação entre a área de contato das partículas de solo - fibra (fase sólida-sólida) e água - fibra (fase líquida-sólida) também contribui para a resistência ao cisalhamento interfacial. A força de ligação geralmente varia com composições mineralógicas / químicas do solo. Além disso, o efeito da sucção também pode ser desenvolvido devido à água capilar entre partículas de solo e a superfície da fibra proporcionar um aumento da tensão efetiva na interface solo-fibra. Geralmente, a sucção da matriz do solo tende a aumentar com a diminuição do teor de água (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

Cristelo et al. (2015) analisaram imagens microscópicas do solo sem a adição de fibras e as respectivas misturas com solo-cimento, solo-fibra e solo-fibra-cimento. Conforme se observa na Figura 7, a estrutura do solo é composta por partículas sólidas e vazios. Os poros não contribuem com a força de interface solo-fibra, gerando uma perda nas condições de resistência mecânica, uma vez que o contato é prejudicado por não haver forças de atrito. Este inconveniente pode ser reparado por meio da inclusão de cimento no solo que, por ser um material com maior presença da fração de finos, corrige a granulometria do solo, reduzindo os

vazios e aumentando a força de ligação na interface solo-fibra, proporcionando ganho nas condições de resistência mecânica da mistura.

Figura 7: Imagens microscópicas de: (a) solo; (b) solo e 10% de cimento; (c) solo e 0,25% de fibras; (d) solo, 10% de cimento e 0,25% de fibras.

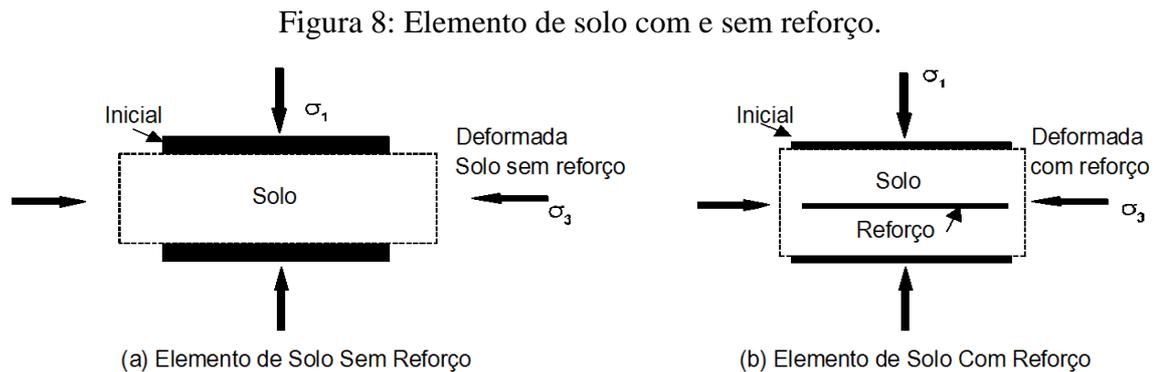


Fonte: Cristelo et al., 2015.

A combinação das técnicas de cimentação e reforço de fibras deu origem a solos cimentados reforçados com fibras. A adição de fibras em solos cimentados é de particular interesse nas areias que mostram um padrão de ruptura frágil (PARK, 2009). Maher & Ho (1993) mostraram que a inclusão aleatória de fibras orientadas para areias artificialmente cimentadas causaram um aumento no ângulo de atrito e na coesão, bem como na resistência à compressão e à tração. O mesmo comportamento foi relatado por outros autores em solos argilosos e em solos com mistura de cinzas volantes (KANIRAJ & HAVANAGI, 2001; TANG et al., 2007).

Já sob a ótica da resistência mecânica, os solos possuem elevada a resistência à compressão e baixa resistência aos esforços de tração. Este fato pode ser observado em uma determinada massa de solo carregada verticalmente, na qual ocorrem deformações verticais de

compressão e deformações laterais de extensão (tração). Para elevar a resistência à tração do solo pode-se incluir um elemento de reforço que bloqueia os movimentos laterais, devido ao desenvolvimento de esforços de tração no material adicionado. Desse modo, o solo tende a mover-se em relação ao reforço gerando tensões cisalhantes na interface solo/reforço (WHEELER, 1996).



Fonte: Wheeler, 1996.

### 3.1.6 Estudos Experimentais com fibras de polipropileno

Consoli et al. (2003) realizaram testes triaxiais drenados consolidados (CD) em solo coeso e mostraram que as fibras aumentaram substancialmente a coesão ( $c$ ), enquanto o ângulo de atrito ( $\phi$ ) foi pouco afetado pela inclusão do polipropileno. Resultados similares foram obtidos a partir de testes de cisalhamento direto por Zaimogluand Yetimoglu (2011). Em contradição, pesquisas conduzidas por Tang et al. (2007), Ahmad et al. (2010) e Pradhan et al. (2012) demonstraram que a porcentagem de fibra desempenha um papel importante no aumento de ambos os parâmetros de resistência ( $\phi$  e  $c$ ). Neste sentido, pesquisas tem sido desenvolvidas para destacar a influência das fibras sobre a resistência ao cisalhamento dos solos e, em particular, sobre a eficiência da adição de fibras refletida nos diferentes parâmetros de resistência do comportamento do cisalhamento de solos coesivos.

Tang et al. (2007) efetuaram programas experimentais para investigar os efeitos das fibras de polipropileno (PP) no comportamento mecânico de solos argilos cimentados e não cimentados. Na ocasião, 12 grupos de amostras de solos foram preparadas em três diferentes percentagens de teor de fibras de PP: 0,05%; 0,15% e 0,25% da massa de solo. Além disso, dois percentuais diferentes de cimento: 5% e 8% da massa de solo foram adicionados nas amostras. Ensaio de compressão não confinada e cisalhamento direto foram realizados após 7, 14 e 28 dias (períodos de cura). Os resultados indicaram que a inclusão do reforço de fibras

em solo não cimentado e cimentado causou um aumento da resistência à compressão não confinada, resistência ao cisalhamento e tensão axial de ruptura, mudando o comportamento frágil do solo cimentado para dúctil.

Costas et al. (2013) investigaram a influência das fibras de polipropileno na resistência ao cisalhamento de solos coesivos. Uma série de testes de cisalhamento foi conduzida em amostras de silte arenoso e argila siltosa, tanto na condição natural (não reforçadas), quanto na condição da mistura solo-fibra (reforçadas). Segundo os autores, as fibras são distribuídas de forma discreta na matriz e atuam como uma rede de trabalho tridimensional que se interliga com os grãos de argila menores. Isso forma uma matriz coesa, que restringe o deslocamento após o carregamento. Nenhuma ruptura de fibras foi observada, confirmando que o material polimérico resiste à tensão dentro da matriz sem se deformar significativamente. Por fim, após análise microscópica da mistura solo-fibra, os autores concluem que a força de ligação na interface, a força de atrito e a força de bloqueio são os mecanismos dominantes que regem o comportamento mecânico do compósito, conforme já fora constatado por Tang et al. (2007).

Manafi Khajeh Pasha et al. (2016) estudaram a confiabilidade do desempenho de fibras de polipropileno na melhoria da resistência à liquefação de areia propensa à este fenômeno. Foram obtidas propriedades dinâmicas da areia reforçada, tais como módulo de cisalhamento e relação de amortecimento, analisadas e comparadas com os da areia não reforçada. Os resultados indicaram que o módulo de cisalhamento e o amortecimento são aumentados pela adição de materiais fibrosos atuando como elementos de reforço.

Fatahi et al. (2012) analisaram a influência de três tipos de fibra (polipropileno, tapete reciclado e aço) nas propriedades mecânicas da argila tratada com cimento. As amostras de argila tratada com cimento foram preparadas com teor de cimento de 5%, 10% e 15% em peso de solo seco e curado por 14 dias. Para investigar e compreender a influência de diferentes tipos e teor de fibras foram adotadas três porcentagens diferentes de fibras. Os resultados da compressão não confinada em 90 amostras cilíndricas de argila tratada com diferentes teores de cimento e fibra foram analisados para discernir as relações entre esses parâmetros e as principais propriedades mecânicas, incluindo resistência à compressão não confinada. Os resultados mostraram que o reforço de fibras aumenta a resistência de compressão do solo. A resistência residual também sofreu um acréscimo, alterando o comportamento frágil da argila tratada com cimento para um material mais dúctil. A resistência à tração da argila tratada com cimento é aumentada pela adição de fibras de carpete e aço, mas pequenas quantidades de fibras de polipropileno não influenciaram na resistência à tração.

Fletcher & Humphries (1992) mostraram que o Índice de Suporte Califórnia (CBR) de um solo siltoso aumentou significativamente após a adição de fibras de polipropileno. Segundo os autores, foram utilizadas fibras de polipropileno variando seu teor em 0%, 0,5%, 1% e 1,5% em relação à massa seca de solo, compactado com a energia normal. As dimensões de fibras utilizadas foram de 25mm de comprimento e diâmetro de 0,76mm. De acordo com os autores, existe uma dosagem ótima de fibras que proporciona o maior valor de CBR. Dosagens maiores que a ótima diminuem o valor do CBR, visto que, com o aumento da quantidade de fibras, há uma redução da quantidade de solo que, por sua vez, afeta as forças de ligação na interface solo-fibra. Por fim, os autores concluíram que a adição de fibras resultou em um aumento no valor do CBR de 133% quando comparados ao solo sem adição de fibras. A Tabela 3 ilustra os resultados obtidos na pesquisa.

Tabela 3: Resultados do ensaio CBR utilizando solo reforçado com fibras de polipropileno.

Material	Expansão (%)	CBR (penetração 5.08 mm)
Solo	0,14	5,4
Solo + 0,5% Fibra	0,13	11,7
Solo + 1% Fibra	0,28	12,6
Solo + 1,5% Fibra	0,17	11,7

Fonte: Fletcher & Humphries, 1992.

Pradhan et al. (2012) avaliaram a resistência mecânica de um solo argiloso reforçado com fibras de polipropileno por meio de ensaios de cisalhamento direto, compressão não confinada e CBR. Os resultados revelaram que a inclusão aleatória de fibras de polipropileno aumenta o pico de resistência ao cisalhamento, bem como os valores da resistência a compressão não confinada e CBR. Neste estudo, os autores utilizaram fibras de polipropileno de 15, 20 e 25mm de comprimento e diâmetro de 0,2mm, variando o teor de fibra de 0,1 a 1,0%, com incremento de 0,1%.

## 3.2 Polímeros

### 3.2.1 Definição

O termo polímero é derivado das palavras gregas poli e mero que significam muitas partes ou unidades repetitivas. Assim, o polímero é uma molécula grande, formada por ligações repetidas de pequenas moléculas chamadas monômeros. Portanto, uma substância composta de moléculas longas, que são caracterizadas por muitas unidades moleculares repetidas em seqüência linear, é chamada de polímero.

### 3.2.2 Classificação dos polímeros

Com base em diferentes estruturas químicas, propriedades físicas, comportamento mecânico e características térmicas, os polímeros podem ser classificados da seguinte maneira:

- Polímeros naturais e sintéticos: dependendo da sua origem, os polímeros podem ser agrupados como naturais ou sintéticos. Os polímeros naturais estão presentes nos organismos animais e vegetais, incluindo nesta categoria os carboidratos, lipídios, proteínas, algodão, seda, lã e a borracha. Os polímeros sintetizados a partir de compostos de baixo peso molecular são chamados polímeros sintéticos, destacando-se, por exemplo, o polietileno, PVC e nylon.
- Polímeros orgânicos e inorgânicos: polímero cuja cadeia é essencialmente constituída por átomos de carbono. Os átomos ligados às valências laterais dos átomos de carbono são, no entanto, geralmente os de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, etc. A maioria dos polímeros sintéticos é orgânico. O vidro e a borracha de silicone são exemplos de polímeros inorgânicos.
- Polímeros termoplásticos e termorrígidos: os polímeros que se amolecem durante o aquecimento e podem ser remodelados em diferentes formas são denominados termoplásticos. O polietileno, poliestireno, poliamida e PVC são exemplos de polímeros termoplásticos. Alguns polímeros, por outro lado, sofrem algumas alterações químicas quando aquecidos e se convertem em uma massa que não pode ser moldada. Tais polímeros são chamados de polímeros termorrígidos e, como exemplo, tem-se os poliuretanos e as resinas epóxi.
- Plásticos, Elastômeros, Fibras e Resinas Líquidas: dependendo da sua forma e uso, um polímero pode ser classificado como plástico, elastômero, fibra ou resina líquida. Quando, por exemplo, um polímero é moldado em artigos de utilidade pela aplicação de calor e pressão, é

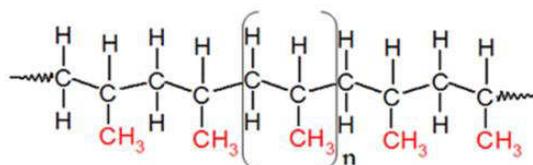
denominado como um "plástico". Exemplos típicos são poliestireno e PVC. Quando vulcanizado em produtos de borracha que exibem boa resistência e alongamento, os polímeros são usados como "elastômeros". Exemplos típicos são borracha natural, borracha sintética e silicone. Se desenhado em filamento longo como material cujo comprimento é, pelo menos, 100 vezes seu diâmetro, considera-se que os polímeros foram convertidos em "fibra", como por exemplo, o nylon. Os polímeros utilizados como adesivos vedantes sob uma forma líquida são denominados resinas líquidas. Colas de epóxi são exemplos típicos.

### 3.2.3 Fibras de Polipropileno (PP)

O polipropileno (PP) foi descoberto em 1954 por Giulio Natta, porém sua produção comercial começou em 1957. O PP é o termoplástico mais utilizado, pois é muito barato e flexível para a moldagem. Ganhou uma forte popularidade muito rapidamente devido ao fato de possuir a menor densidade entre os plásticos de *commodities*. O polipropileno é um polímero preparado cataliticamente a partir de propileno. Tem uma grande vantagem relacionada à resistência a altas temperaturas e por ser um material quimicamente inerte, que torna o PP particularmente adequado para itens como bandejas, funis, baldes, garrafas, entre outros (HISHAM, 2016).

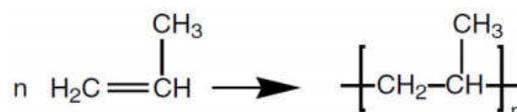
Segundo Mano & Mendes (2004), o PP (vide estrutura na Figura 9) destaca-se pelo crescente uso na indústria automobilística, em função da sua baixa densidade, baixo custo e a facilidade de moldagem. Segundo Harper (2000), o PP é sintetizado pela polimerização de propileno, um monômero derivado de produtos petrolíferos através da reação mostrada na Figura 10.

Figura 9: Estrutura do polipropileno.



Fonte: Hisham, 2016.

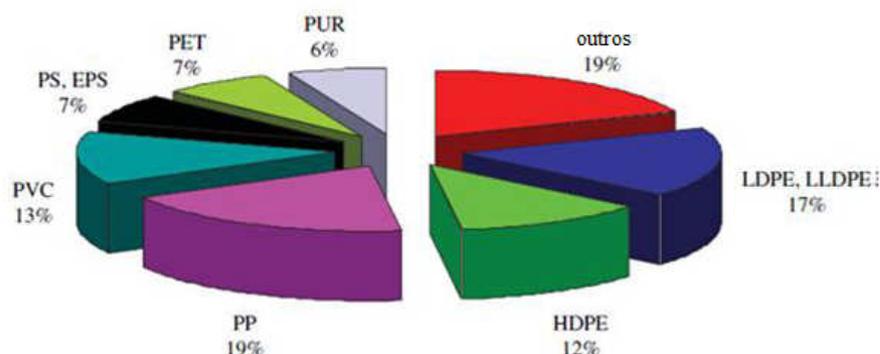
Figura 10: Processo químico de formação do PP.



Fonte: Harper, 2000.

De acordo com Hisham (2016) a demanda global anual de plásticos atingiu 245 milhões de toneladas e tende a crescer dramaticamente devido ao aumento da demanda pública. A Figura 11 mostra a demanda total de plásticos em 2006. Cerca de 90% da demanda total é representada por cinco principais plásticos básicos: polipropileno (PP), polietileno (PE), cloreto de polivinilo (PVC), poliestireno (PS) e tereftalato de polietileno (PET).

Figura 11: Demanda mundial de plásticos por tipos de resina em 2006 (49,5 milhões de toneladas).



Fonte: Hisham, 2016.

Conforme Plé & Lê (2012), a fibra de polipropileno é o material sintético mais comum usado para reforçar o concreto e o solo. Além disso, o polipropileno é um material hidrofóbico e quimicamente inerte que não absorve ou reage com a umidade do solo, possibilitando a realização de ensaios com diferentes teores de umidade, sem, contudo, distorcer os resultados.

As fibras de polipropileno são oriundas de um material polimérico denominado de termoplástico que, por sua vez, consiste em uma série de longas cadeias de moléculas polimerizadas. Todas as cadeias são separadas e podem deslizar umas sobre as outras.

Como vantagens deste material sintético destacam-se a sua resistência alcalina, baixa densidade, ponto de fusão relativamente elevado (165° C) e, por fim, baixo custo. Por outro lado, como principais desvantagens destacam-se a pouca resistência ao fogo, baixo módulo de elasticidade e sensibilidade à luz solar e ao oxigênio (BENTUR & MINDESS, 2007).

Jiang et al (2010) enfatizam as fibras de polipropileno como um novo tipo de material utilizado para reforço de solos na área da geotecnia, tendo como vantagem a facilidade de mistura junto ao solo. A construção de solos reforçados com fibras é facilmente alcançada simplesmente misturando o solo com fibras, como no caso de outras misturas estabilizadoras de cal, de sulfato de cálcio e cinzas de sílica (AHMAD et al., 2010). Em um mercado

competitivo, a facilidade de incorporação da fibra junto ao solo, aliado ao seu baixo custo, torna este tipo de material atrativo no que tange às questões econômicas.

As aplicações que visam alcançar o aumento da resistência dos solos pela mistura com fibras incluem a estabilização de taludes (Gregory & Chill 1998), construção de terraplenagem com solo de baixa resistência, minimização de dilatação de expansão em camadas de argila (Ziegler et al., 1998), estabilização mecânica de estradas flexíveis (Choubane et al., 2001) e proteção contra erosão da superfície do solo. Além disso, os elementos de fibras discretas podem fornecer um aumento isotrópico no comportamento mecânico do composto do solo sem introduzir planos contínuos de fraqueza.

Miller (2004) afirma que, devido ao seu ponto de fusão relativamente alto, é possível realizar os testes de umidade da mistura solo fibra em estufas para fins de obtenção do teor ótimo de água adicionada na mistura. A umidade ótima verificada nos ensaios de compactação é de fundamental importância no processo de obtenção do teor ótimo de fibra misturado ao solo, o qual irá resultar no incremento de resistência mecânica da mistura solo-fibra.

As propriedades das fibras sintéticas variam em relação à força e ao módulo de elasticidade, conforme é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades típicas das fibras sintéticas.

Tipo de Fibra	Diâmetro (mm)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência à Tração (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento Último (%)
Acrílica	20 - 350	1,16 - 1,18	0,2 - 1,0	14 - 19	10 - 50
Aramida (Kevlar)	10 - 12	1,44	2,3 - 3,5	63 - 120	2 - 4,5
Carbono (PAN)	8 - 9	1,6 - 1,7	2,5 - 4,0	230 - 380	0,5 - 1,5
Carbono (Pich)	9 - 18	1,6 - 1,21	0,5 - 3,1	30 - 480	0,5 - 2,4
Nylon	23 - 400	1,14	0,75 - 1,0	4,1 - 5,2	16 - 20
Poliéster	10 - 200	1,34 - 1,39	0,23 - 1,2	10 - 18	10 - 50
Polietileno	25 - 1000	0,92 - 0,96	0,08 - 0,6	5	3 - 100
Poliiolefina	150 - 635	0,91	275	2,7	15
Polipropileno	20 - 400	0,9 - 0,95	0,45 - 0,76	3,5 - 10	15 - 25
PVA	14 - 650	1,3	0,8 - 1,5	29 - 36	5,7
Aço	100 - 1000	7,84	0,5 - 2,6	210	0,5 - 3,5

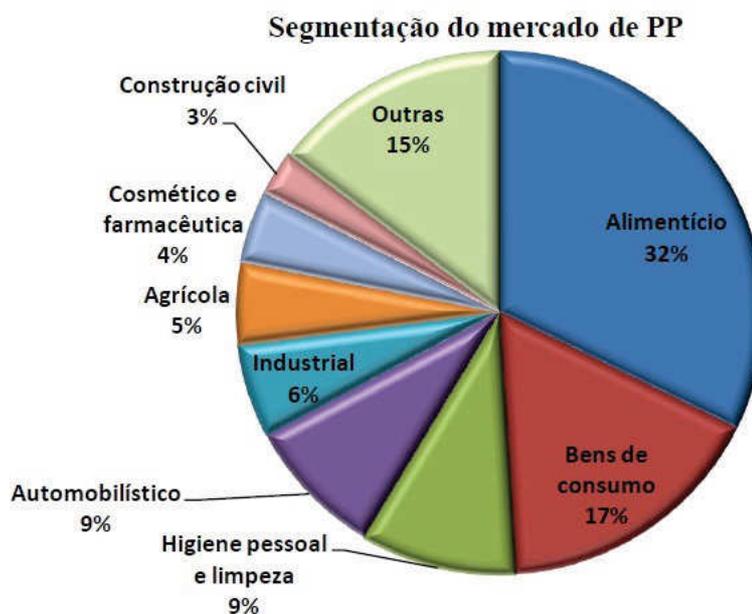
Fonte: Bentur & Mindess, 2007.

### 3.2.4 A Reciclagem do PP

A reciclagem do PP é garantida pelo fato de ser um material termoplástico. Quando submetido a altas temperaturas é possível moldá-lo e, assim, criar novos subprodutos. Desse modo, o valor agregado presente nos resíduos compostos por este material faz da reciclagem do PP uma possibilidade de geração de economia.

A Figura 12 ilustra a segmentação do mercado de polipropileno. A aplicação predominante do PP está no ramo alimentício, que responde por 32% do total e compreende as embalagens no geral. Por ser um material atóxico, este tipo de plástico pode interagir com os alimentos envasados sem causar nenhum dano à saúde. Outra versatilidade do PP está no fato das embalagens poderem sofrer extremos de temperatura (do freezer ao micro-ondas) sem nenhum tipo de dano. O segmento de bens de consumo perfaz um total de 17%, destacando-se como principais aplicações itens de utilidades domésticas e caixas, visto que o PP garante alta produtividade e acabamento nos artigos finais de plástico (MARCZUK, 2015). Diante do exposto, sua versatilidade e baixo custo ampliam as oportunidades de aplicação em diversos ramos do mercado.

Figura 12: Segmento do mercado de produtos em PP.



Fonte: Marczuk, 2015.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Material utilizado

Como essa pesquisa complementa trabalhos anteriores desenvolvidos no laboratório de Geotecnia (PRADELA, 2016; SILVEIRA, 2016), os itens 4.2 a 4.6 e 5.1 a 5.3 foram compilados com o material utilizado nessa e nas pesquisas supracitadas.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados dois tipos de solo: arenoso da região de Bauru/SP e argiloso da região de Pederneiras/SP. As amostras de solo arenoso foram extraídas do campo experimental da Faculdade de Engenharia da UNESP de Bauru (SP), localizado nas coordenadas 22°21'6.03"S; 49°01'57.68"O. No caso do solo argiloso, foram extraídas amostras da região de Pederneiras (SP), na Rodovia Comandante João Ribeiro de Barros km 202, sentido Bauru-Jaú, coordenadas 22°19'52.5"S; 48°45'32.26"O.

Foram empregadas fibras de polipropileno (PP), provenientes de embalagens plásticas que seriam descartadas sem nenhum tipo de reaproveitamento, para avaliar a resistência mecânica dos solos em estudo. Para que não houvesse discrepâncias nos resultados optou-se por utilizar apenas uma marca específica de embalagem plástica, descartando-se tampas, rótulos e demais partes, de modo a garantir a homogeneidade das fibras. Por fim, para a confecção das fibras, foram recortadas tiras com largura de 1,5 mm e comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm. Para tanto, foi utilizado um cortador adaptado conforme Figura 13.

Figura 13: Cortador de fibra adaptado (à esquerda) e fibras de polipropileno (à direita).



### 4.2 Ensaios de caracterização

Os ensaios de caracterização das amostras de solo arenoso e argiloso seguiram as recomendações da ABNT NBR 7181/1984; limites de consistência conforme a NBR 6459/1984 (limite de liquidez) e NBR 7180/1984 (limite de plasticidade); compactação de

acordo com as NBR 6457/2016 e NBR 7182/2016 e massa específica dos sólidos segundo a NBR 6508/1984.

### 4.3 Ensaio de compressão não confinada

Após os ensaios de caracterização das amostras de solo e de acordo com os parâmetros ótimos de compactação já estabelecidos, isto é, umidade ótima e máxima massa específica aparente seca, foram adicionadas fibras de PP aleatoriamente ao solo, em porcentagens previamente definidas por 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50 e 2,00% em relação à massa de solo seca, a fim de se obter a incorporação das mesmas junto ao solo, conforme a Figura 14.

Figura 14: Solo em sua umidade natural e fibras antes da incorporação; solo e fibras na umidade ótima, já homogeneizados.

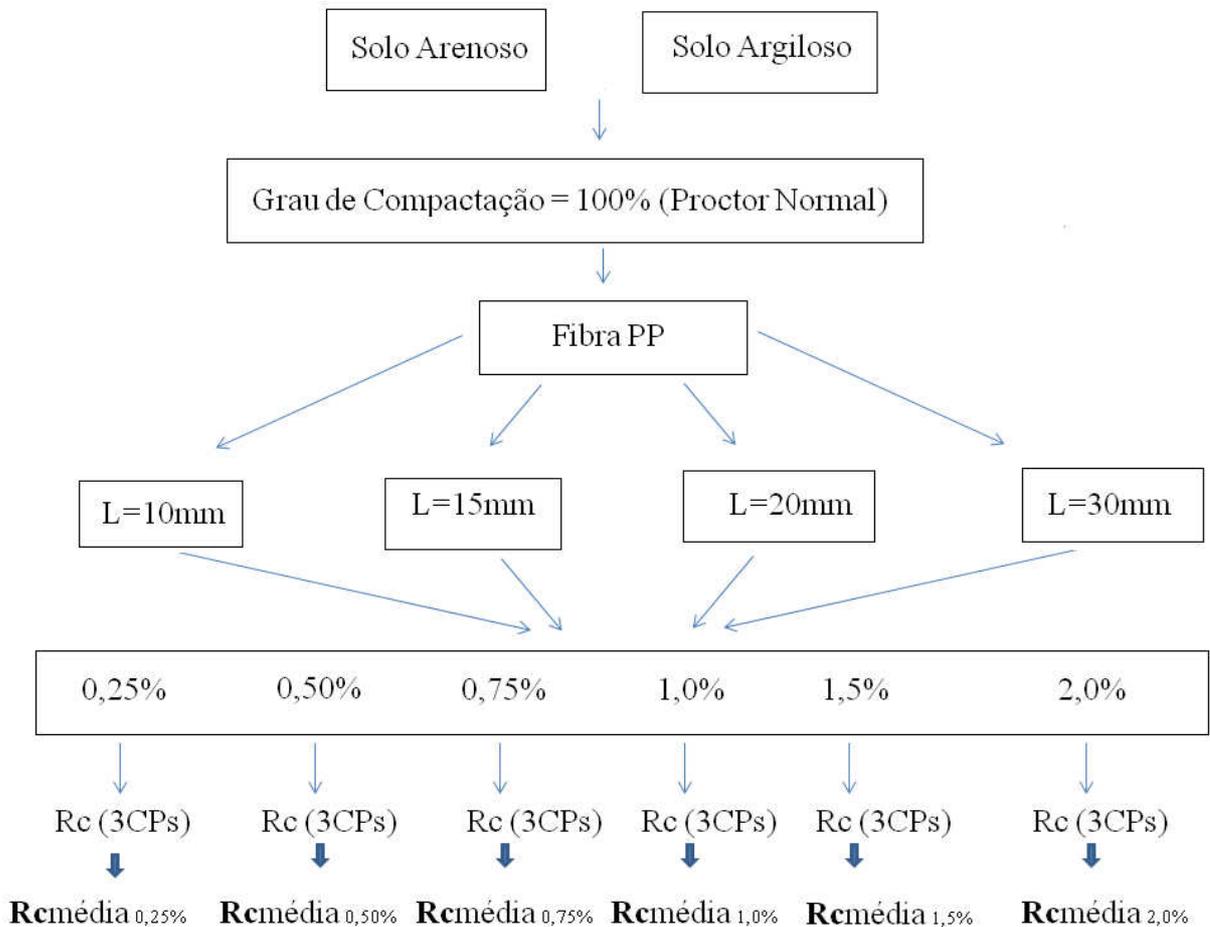


Em seguida foram realizados ensaios de compressão simples ou ensaios de resistência não confinada, segundo as recomendações da ABNT NBR 12770/1992. Para a avaliação da resistência não confinada, os solos foram moldados na umidade ótima do ensaio de Proctor Normal, ou seja, grau de compactação (GC) igual a 100%. Foram realizados ensaios com 3 corpos de prova para cada comprimento e respectivo teor de fibra:

- L = 10 cm (teores de 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5 e 2,0) – 18 ensaios;
- L = 15 cm (teores de 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5 e 2,0) – 18 ensaios;
- L = 20 cm (teores de 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5 e 2,0) – 18 ensaios;
- L = 30 cm (teores de 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5 e 2,0) – 18 ensaios.

A Figura 15 ilustra de maneira esquemática as etapas envolvidas na pesquisa.

Figura 15: Esquema das etapas envolvidas na avaliação da resistência mecânica dos solos por meio da inclusão de fibras de PP.



Com os valores médios de resistência não confinada, foi possível a obtenção do parâmetro ótimo de solo com teor de fibra, por meio da plotagem de um gráfico com os valores médios de resistência não confinada *versus* valores dos teores de fibra em percentagem. Assim, obteve-se o comprimento e teor de fibra que proporcionou o maior valor de resistência não confinada, considerando-se os solos arenoso e argiloso.

#### 4.4 Preparação dos Corpos de Prova

Para a obtenção do teor ótimo de fibra que proporcionou a máxima resistência à compressão não confinada, foi realizada a pesagem na balança com resolução de 0,01 g da massa de solo, previamente passado na peneira nº 10, abertura 2 mm, e da quantidade de água necessária para a obtenção da máxima massa específica aparente seca e umidade ótima, previamente calculadas. Nesta fase foi adicionado uma quantidade de solo superior ao calculado (cerca de 50g) necessária para a determinação do teor de umidade do solo. A

quantidade de fibra foi adicionada respeitando-se os percentuais em massa definidos na pesquisa. Por fim, a homogeneização da mistura foi realizada por meio de uma espátula de aço triangular, conforme ilustrado na Figura 16. Na sequência, a mistura solo-fibra foi passada na peneira com abertura 4,75 mm, de modo a finalizar o processo de homogeneização da mistura.

Figura 16: Processos de mistura e homogeneização solo fibra.



#### 4.5 Execução do Ensaio

A mistura solo-fibra foi inserida em um molde cilíndrico parafinado internamente e compactada em três camadas na seguinte sequência de execução:

- 1) Com o molde cilíndrico parafinado internamente e previamente preso à ao soquete de compactação, colocou-se o primeiro terço da mistura solo-fibra com um papel filtro no fundo do molde e iniciou-se a compactação aplicando-se 6 golpes (Figura 17);
- 2) Com uma régua acoplada ao equipamento foi possível acompanhar a altura que o composto atingiu e a altura equivalente a um terço da altura do cilindro;
- 3) Escarificou-se a primeira camada e colocou-se a segunda, repetindo-se o processo de compactação, válido também para a última camada, na qual foi colocado novamente o papel filtro;
- 4) O conjunto corpo de prova mais o cilindro foi pesado e o corpo de prova foi retirado do cilindro com auxílio de um macaco hidráulico;
- 5) Foi realizado o ensaio Compressão Simples pela máquina CBR (Figura 18), controlando-se a velocidade de deformação compreendida no intervalo de 0,5 a 2,0% de deformação específica por minuto, devendo ser ajustada para não ultrapassar 10 minutos;

- 6) Iniciado o processo de compressão, a deformação observada pela leitura da mola foi anotada a cada 20 segundos, simultaneamente, às leituras da mola, até o rompimento do corpo de prova;
- 7) Com os valores obtidos foi possível plotar-se um gráfico tensão x deformação.

Os processos de montagem, assim como a compactação, também foram realizados para o solo sem fibra. O aspecto dos corpos de prova ensaiados sem a adição de fibras e após a sua incorporação estão representados na Figura 19.

Ao todo, foram realizados 150 ensaios com o solo em sua umidade ótima, dos quais seis foram executados sem a adição de fibras, sendo três ensaios para o solo arenoso da região de Bauru/SP e três ensaios para o solo argiloso da região de Pederneiras/SP. Para cada comprimento e teor de fibra definido na pesquisa, foram executados três ensaios de compressão não confiada, para ambos os solos, totalizando 144 ensaios, conforme ilustrado na Tabela 5.

Figura 17: Aparelho para moldagem dos corpos de prova.



Figura 18: Prensa do ensaio de compressão simples.



Figura 19: Corpo de prova após o rompimento sem a adição de fibras (à esquerda) e com a adição de fibras de PP (à direita).



Tabela 5: Resumo da quantidade de ensaios (compressão simples) realizados.

Solo	Comprimento de Fibra (mm)	Teor de Fibra (%)	Número de Ensaios	Total
Arenoso	10;15;20;30	0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2	75	150
Argiloso			75	

Com os resultados dos três ensaios de compressão não confinada realizados para cada comprimento e percentual em massa de fibra definidos na pesquisa, extraiu-se o valor médio de resistência a fim de se obter o teor ótimo de fibra, isto é, o percentual em massa de fibra que resulta na maior resistência à compressão não confinada.

#### 4.6 Ensaios de Cisalhamento Direto: Preparação dos corpos de prova.

Por meio do ensaio de cisalhamento direto é possível obter parâmetros de resistência do solo estudado (ângulo de atrito e coesão), a partir da envoltória de resistência do solo.

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto drenados nas amostras de solos arenoso e argiloso. Para tanto, foram utilizadas as amostras de solo sem a adição de fibras e com o teor ótimo obtido nos ensaios de compressão simples não confinada.

A compactação estática foi adotada para a moldagem dos corpos de prova (Figura 20a). Para tanto, um êmbolo metálico foi acoplado na prensa CBR e introduzido no molde metálico do ensaio de cisalhamento direto a uma velocidade constante, onde o processo de compactação da mistura solo-fibra foi processado, obtendo-se, portanto, os parâmetros ótimos de compactação, segundo os ensaios de Proctor Normal.

A Figura 20 (b e c) ilustra a caixa metálica bipartida utilizada nos ensaios de cisalhamento direto, com dimensões de 4" (2" x 2"), e o corpo de prova antes do ensaio. Os ensaios de cisalhamento direto foram executados nessa caixa metálica bipartida, deslizando-se a metade superior do corpo de prova em relação à inferior. Esta etapa foi realizada utilizando-se quatro tensões normais para cada situação, sendo as cargas utilizadas de 1, 2, 4 e 8 kgf. A Figura 20d ilustra o equipamento utilizado para o ensaio de cisalhamento direto.

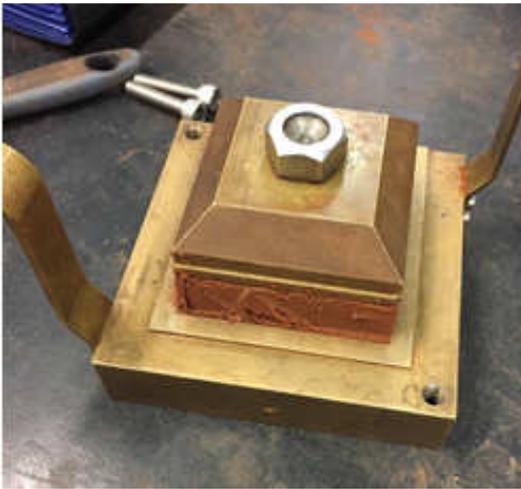
Figura 20: Cisalhamento direto dos corpos de prova (a) moldagem dos corpos de prova por compactação estática (b) (c) célula do ensaio de cisalhamento direto (d) Equipamento para ensaio de cisalhamento direto.



(a)



(b)



(c)



(d)

#### 4.7 Ensaio de Determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Foram realizados ensaios para a determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR), conforme a NBR 9895. Para tanto, adotou-se a energia intermediária de compactação de modo a obter, ao final do ensaio, o valor do CBR e da expansão do solo com e sem a adição de fibra.

A Figura 21 ilustra as etapas envolvidas na preparação da amostra do solo arenoso de Bauru, ao passo que a Figura 22 detalha a execução do ensaio de determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR).

Figura 21: Preparação do Ensaio de determinação do CBR para o solo arenoso (a) solo peneirado (b) homogeneização do solo para o teor de umidade específico (c) adição do teor ótimo de fibras de PP (d) mistura solo-fibra.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 22: Execução do Ensaio de determinação do CBR para o solo arenoso (a) ensaio de expansão; (b) Prensa CBR; (c) corpo de prova sem fibras após o ensaio CBR; (d) corpo de prova com fibras após o ensaio CBR.



(a)



(b)



(c)



(d)

A Figura 23 ilustra as etapas envolvidas na preparação da amostra do solo argiloso de Pederneiras, ao passo que a Figura 24 detalha a execução do ensaio de determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) referente ao solo argiloso.

Figura 23: Preparação do Ensaio de determinação do CBR para o solo argiloso (a) solo peneirado; (b) homogeneização do solo para o teor de umidade específico; (c) adição do teor ótimo de fibras de PP; (d) mistura solo-fibra.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 24: Execução do Ensaio de determinação do CBR para o solo argiloso (a) ensaio de expansão; (b) Prensa CBR; (c) corpo de prova sem fibras após o ensaio CBR; (d) corpo de prova com fibras após o ensaio CBR.



(a)



(b)



(c)



(d)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados e discussão dos resultados obtidos pelos ensaios realizados para a avaliação da resistência mecânica dos solos por meio da adição de fibras de PP. Inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios caracterização do solo arenoso de Bauru/SP e do solo argiloso de Pederneiras/SP, incluindo os índices físicos e limites de consistência. Posteriormente, são apresentados os ensaios de compressão simples não confinada necessários para a obtenção do teor ótimo de fibra. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de cisalhamento direto e CBR.

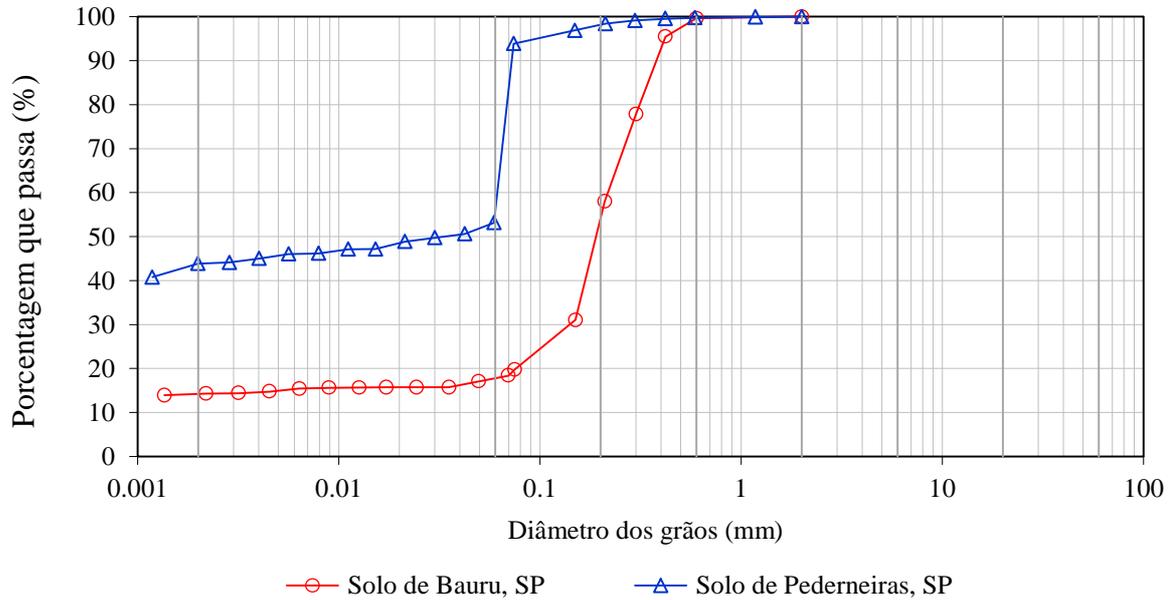
### 5.1 Caracterização

#### 5.1.1 Curva Granulométrica

Para a obtenção das curvas granulométricas foi utilizado o ensaio de granulometria conjunta com emprego de defloculante à base de hexametáfosfato. A Figura 25 ilustra a curva granulométrica obtida após o ensaio, conforme ABNT NBR 7181. Nota-se que, para o solo de Bauru/SP, predomina a fração grossa com aproximadamente 80% de solo retido na peneira de nº 200. A fração de finos também está presente neste solo, sendo designado como uma areia média a fina, pouco argilosa, marrom avermelhada. Por outro lado, no solo de Pederneiras/SP predomina a fração fina, com cerca de 95% de solo passando na peneira de nº 200, sendo designado como uma argila arenosa roxa escura.

Analisando-se as curvas granulométricas dos dois solos em estudo, representadas na Figura 25, nota-se que o solo arenoso de Bauru/SP possui maior diversidade de tamanho dos grãos que o solo argiloso de Pederneiras/SP. O trecho praticamente vertical na curva granulométrica do solo argiloso indica uma granulação uniforme, ou seja, partículas com o mesmo diâmetro, classificando este solo como mal graduado. O tamanho dos grãos pode influenciar na resistência mecânica do compósito, pois, um solo mal graduado vai apresentar maior quantidade de vazios que não contribuem com a força de interface solo-fibra, gerando uma perda nas condições de resistência mecânica, uma vez que o contato é prejudicado por não haver forças de atrito. Mesmo com o processo de compactação mecânica na umidade ótima, os solos mal graduados tendem a apresentar vazios, visto que o entrosamento entre as partículas fica prejudicado pela uniformidade dos grãos.

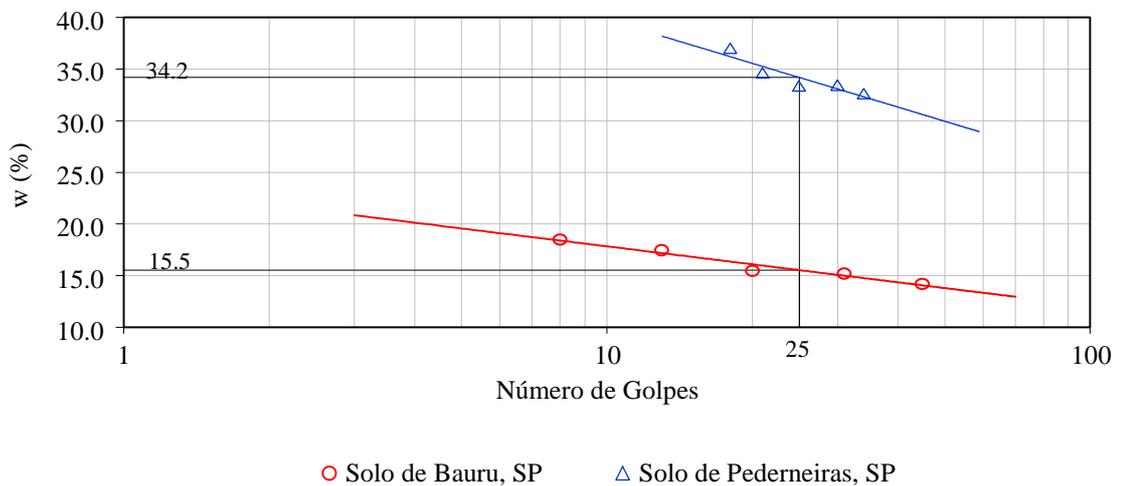
Figura 25: Curva granulométrica dos solos arenoso e argiloso.



### 5.1.2 Limites de Consistência

Os limites de consistência para o solo arenoso da região de Bauru/SP e argiloso da região de Pederneiras/SP estão representados na Figura 26. Em função da pequena fração de finos (cerca de 20%) da amostra de solo arenoso de Bauru/SP, não foi possível realizar o ensaio do limite de plasticidade, obtendo-se apenas o Limite de Liquidez  $LL = 16\%$ . Já para o solo argiloso da região de Pederneiras/SP, o Limite de Liquidez obtido foi de  $34\%$ , enquanto o ensaio do limite de plasticidade resultou em  $LP = 23\%$ , resultando em um Índice de Plasticidade  $IP = LL - LP = 11\%$ .

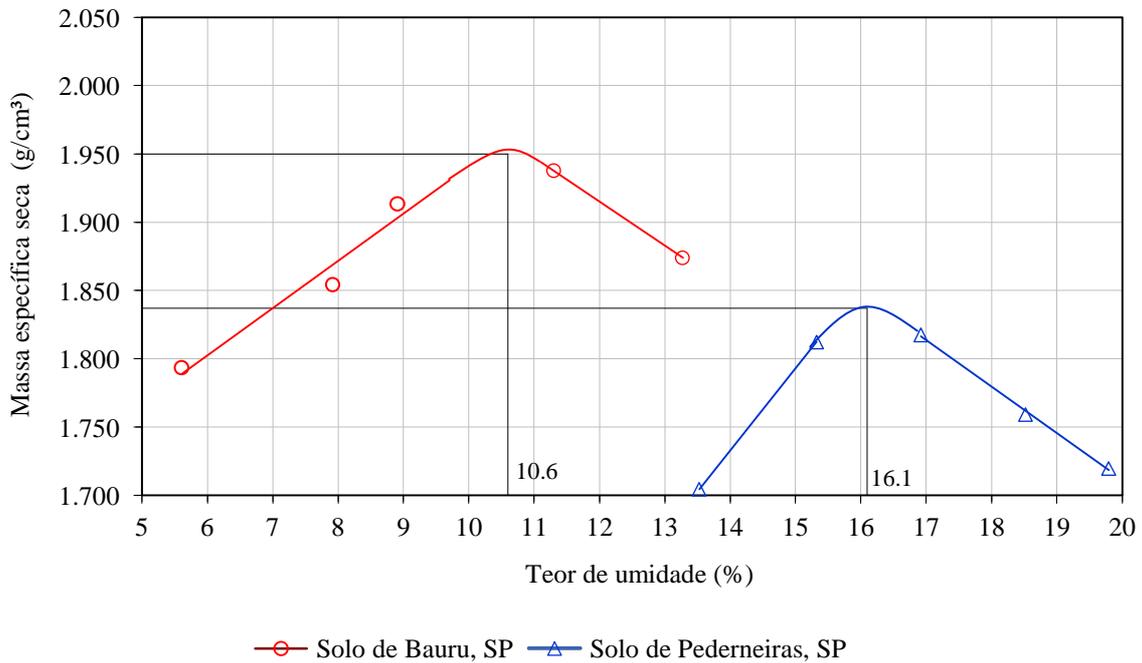
Figura 26: Limite de Liquidez das amostras de solo arenoso e argiloso.



### 5.1.3 Curvas de Compactação

Os parâmetros ótimos de compactação, isto é, umidade ótima e máxima massa específica aparente seca, foram obtidos por meio do ensaio de Proctor Normal. Os resultados das curvas de compactação para o solo arenoso de Bauru/SP e argiloso de Pederneiras/SP estão representados na Figura 27.

Figura 27: Curvas de compactação para o solo arenoso e argiloso.



### 5.1.4 Índices Físicos

Os índices físicos, tais como o índice de vazios ( $e$ ), massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ), massa específica aparente seca ( $\rho_d$ ), teor de umidade ótima ( $w_{opt}$ ), grau de saturação ( $S_R$ ), bem como os limites de consistência dos solos arenoso e argiloso estão representados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6: Limites de consistência e índices físicos.

Parâmetro	Unidade	Solo Arenoso (Bauru)	Solo Argiloso (Pederneiras)
Limite de liquidez, $LL$	%	16	34
Limite de plasticidade, $LP$	%	-	23
Índice de Plasticidade, $IP$	%	Não Plástico	11
Massa específica seca máxima, $\rho_d$	$g/cm^3$	1,950	1,837
Teor de umidade ótimo, $w_{opt}$	%	10,6	16,1
Massa específica dos sólidos, $\rho_s$	$g/cm^3$	2,649	2,688
Índice de vazios (na compactação), $e$	-	0,358	0,463
Grau de Saturação (na compactação), $S_R$	%	78,4	93,5

## 5.2 Resistência a compressão não confinada

Para obtenção do teor ótimo de fibra, isto é, o percentual de fibra que misturado ao solo proporcione o maior valor de resistência à compressão (válido para a os teores de fibras adotados nesta pesquisa), plotou-se o gráfico da tensão de ruptura pela percentagem em massa de fibra, para cada comprimento de fibra previsto na pesquisa. Com o teor ótimo de fibra obtido para os solos arenoso e argiloso procedeu-se com os ensaios de cisalhamento direto e CBR para avaliar a resistência mecânica dos solos com e sem a adição de fibras.

A Tabela 7 sintetiza os valores de resistência à compressão não confinada obtidos para o solo arenoso da região de Bauru/SP, em função do percentual em massa de fibra de PP, para cada comprimento definido na pesquisa.

A Tabela 8 sintetiza os valores de resistência à compressão não confinada obtidos para o solo argiloso da região de Pederneiras/SP, em função do percentual em massa de fibra de PP, para cada comprimento definido na pesquisa.

As Figuras 28 e 29 representam, respectivamente, os gráficos das tensões de ruptura médias à compressão simples (kPa) dos solos arenoso e argiloso com e sem o reforço de fibras de PP com diferentes combinações de teor (%) e comprimento de fibra (mm).

Tabela 7: Valores médios das resistências (kPa) não confinadas devido a inclusão de fibras de PP em solo arenoso.

	0%	0,25%	0,50%	0,75%	1,00%	1,50%	2,00%
<b>10 mm</b>	56,72	57,27	61,50	63,20	64,72	68,78	70,86
<b>15 mm</b>	56,72	60,17	61,37	64,85	65,92	73,11	71,76
<b>20 mm</b>	56,72	61,24	64,85	66,05	72,96	77,59	79,10
<b>30 mm</b>	56,72	65,92	68,79	74,90	78,79	80,74	86,37

Tabela 8: Valores médios das resistências (kPa) não confinadas devido a inclusão de fibras de PP em solo argiloso.

	0%	0,25%	0,50%	0,75%	1,00%	1,50%	2,00%
<b>10 mm</b>	507,91	615,70	628,67	638,53	662,03	685,73	704,10
<b>15 mm</b>	507,91	647,60	650,97	663,67	694,93	718,83	726,27
<b>20 mm</b>	507,91	631,40	659,53	679,07	704,93	741,90	729,93
<b>30 mm</b>	507,91	642,67	673,33	698,33	724,47	752,33	742,47

Figura 28: Tensões de ruptura médias à compressão simples (kPa) do solo arenoso com e sem reforço de fibras constituídas de PP com diferentes combinações de teor (%) e comprimento de fibra (mm).

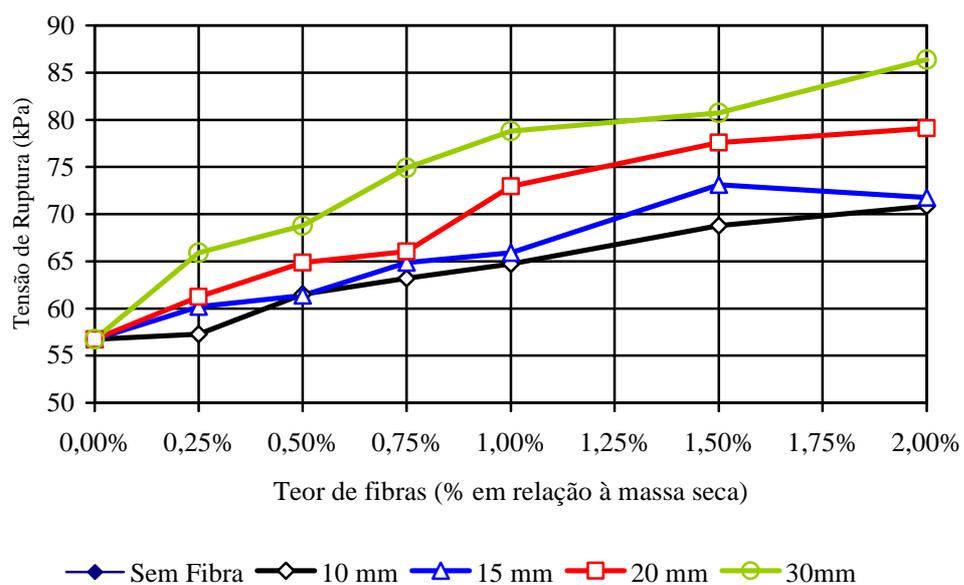
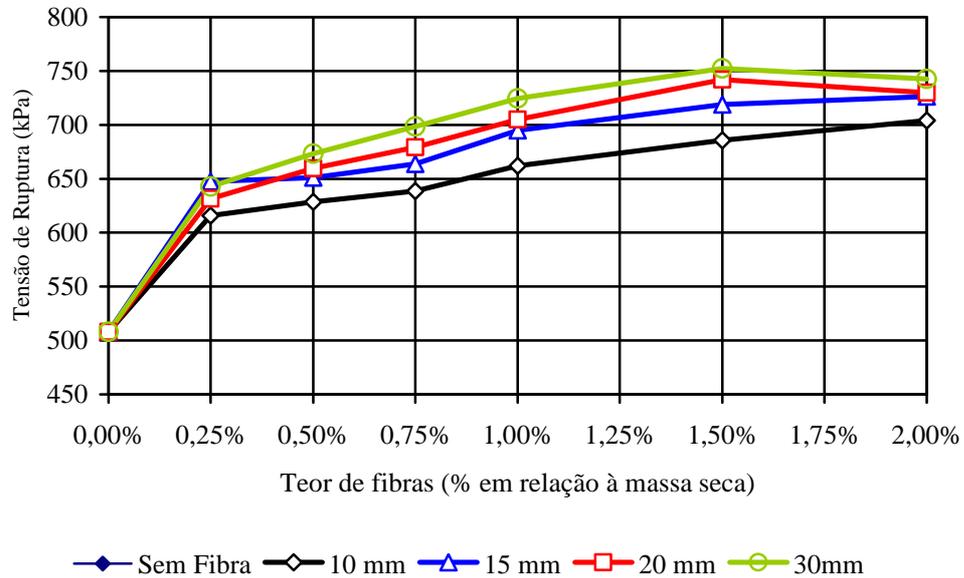


Figura 29: Tensões de ruptura médias à compressão simples (kPa) do solo argiloso com e sem reforço de fibras constituídas de PP com diferentes combinações de teor (%) e comprimento de fibra (mm).



Analisando a Figura 28 observa-se que a resistência do compósito aumenta com o aumento do teor de fibras, sendo 86,37 kPa a máxima resistência à compressão atingida para a fibra de 30 mm. Não foi constatada queda no valor da resistência quando da adição de fibras, isto é, conforme aumenta-se o teor de fibra, a resistência aumenta com o aumento do comprimento das fibras. Portanto, para os teores de fibra estudados, o teor ótimo de fibras de PP que proporciona o maior valor de resistência à compressão simples não confinada para o solo arenoso de Bauru/SP é de 2,00% para a fibra com comprimento de 30 mm. Os resultados mostraram que o teor ótimo de fibra misturado ao solo arenoso resultou em um aumento de 52,27% na resistência à compressão simples em relação ao solo sem a adição de fibras. Assim, o comprimento  $L=30\text{mm}$  de fibra de PP com um teor de 2,00% em relação à massa de solo seco foi adotado para avaliar a resistência mecânica do solo arenoso de Bauru/SP por meio de ensaios de cisalhamento direto e CBR.

Analisando a Figura 29 observa-se que a resistência do compósito aumenta conforme aumenta-se o teor de fibras, sendo 752,33 kPa a máxima resistência à compressão atingida com a fibra de 30 mm. Foi constatada uma queda nos valores de resistência para as fibras de 20 mm e 30 mm quando misturadas a um teor de 2,00% em relação à massa de solo seca. A redução observada (menos de 1,50%) pode ser atribuída pelo fato das fibras de PP, em quantidades elevadas, prejudicarem as forças de atração entre as superfícies das partículas do solo argiloso (coesão), uma vez que o polipropileno é um material quimicamente inerte

(HISHAM, 2016). Assim, para os teores de fibras estudados, o teor ótimo de fibras de PP que proporciona o maior valor de resistência à compressão simples não confinada para o solo argiloso de Pederneiras/SP é de 1,50% para a fibra com comprimento de 30 mm. Os resultados mostraram que o teor ótimo de fibra misturado ao solo argiloso resultou em um aumento de 48,12% na resistência à compressão simples em relação ao solo sem a adição de fibras. Portanto, o comprimento  $L = 30$  mm de fibra de PP com um teor de 1,50% em relação à massa de solo seco foi adotado para avaliar a resistência mecânica do solo argiloso de Pederneiras/SP por meio de ensaios de cisalhamento direto e CBR.

Destaca-se que o ganho de resistência à compressão observado para ambos os solos em estudo foi aproximadamente o mesmo, cerca de 50%, o que vai de encontro ao que diz respeito às propriedades do polipropileno apontadas por Hisham (2016), isto é, material quimicamente inerte.

Conhecidos os comprimentos e teores ótimos de fibra de PP que, misturados aos solos arenoso e argiloso proporcionam a maior resistência à compressão não confinada (válido para os teores de fibras adotados nesta pesquisa) foram realizados os mesmos ensaios, porém variando o teor de umidade em 2% acima e abaixo do teor de umidade ótima do compósito. As Tabelas 9 e 10 mostram os resultados dos ensaios.

Tabela 9: Resistências comparativas do solo arenoso, sem e com fibras, em diferentes umidades.

Condição	$W_{ót} - 2\%$	$W_{ót}$	$W_{ót} + 2\%$
Sem fibra	71,28 kPa	56,72 kPa	48,37 kPa
Teor ótimo de fibra PP	139,08 kPa	86,37 kPa	84,87 kPa

Tabela 10: Resistências comparativas do solo argiloso, sem e com fibras, em diferentes umidades.

Condição	$W_{ót} - 2\%$	$W_{ót}$	$W_{ót} + 2\%$
Sem fibra	715,45 kPa	507,91 kPa	348,26 kPa
Teor ótimo de fibra PP	889,27 kPa	752,23 kPa	540,51 kPa

Conforme observado na Tabela 9, para menores valores de umidade o solo apresenta maiores valores de resistência, ao passo que, quanto maior o teor de umidade do solo, menor é sua resistência. Entretanto, o solo compactado na umidade ótima apresenta estabilidade no

valor de sua resistência frente aos ciclos de umedecimento e secagem (sazonalidade), visto que a condição de saturação de um solo compactado abaixo da umidade ótima pode levar à uma variação (diminuição) considerável no valor de sua resistência devido à variação na pressão da água, isto é, da sucção. Assim, é vantajoso adotar a umidade ótima nos projetos geotécnicos visando a condição de estabilidade da resistência mecânica frente à variação das condições de saturação do solo.

Assim como observado no solo arenoso, os maiores valores de resistência, com e sem a adição de fibras, ocorrem abaixo da umidade ótima para o solo argiloso. Porém, deve-se adotar a condição de estabilidade ( $W_{ót}$ ) da resistência mecânica do solo frente aos ciclos de umedecimento e secagem do solo visando a menor variação da resistência mecânica do compósito, em função da variação do grau de saturação do solo.

### 5.3 Cisalhamento direto

As figuras e tabelas seguintes ilustram os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para os solos arenoso e argiloso, sem e com adição de fibras. São apresentadas as curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal bem com as envoltórias de resistências obtidas.

#### 5.3.1 Resultados para o solo arenoso

Figura 30: Tensão cisalhante em função da deformação horizontal do solo arenoso sem fibra.

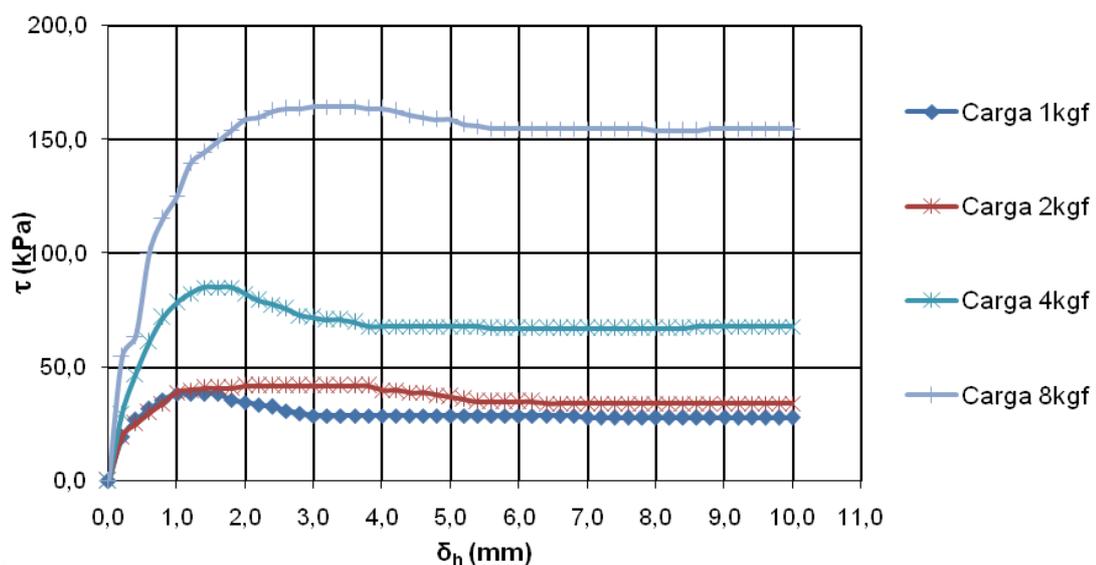


Figura 31: Tensão cisalhante em função da deformação horizontal do solo arenoso com fibra (L= 30mm e 2,00%).

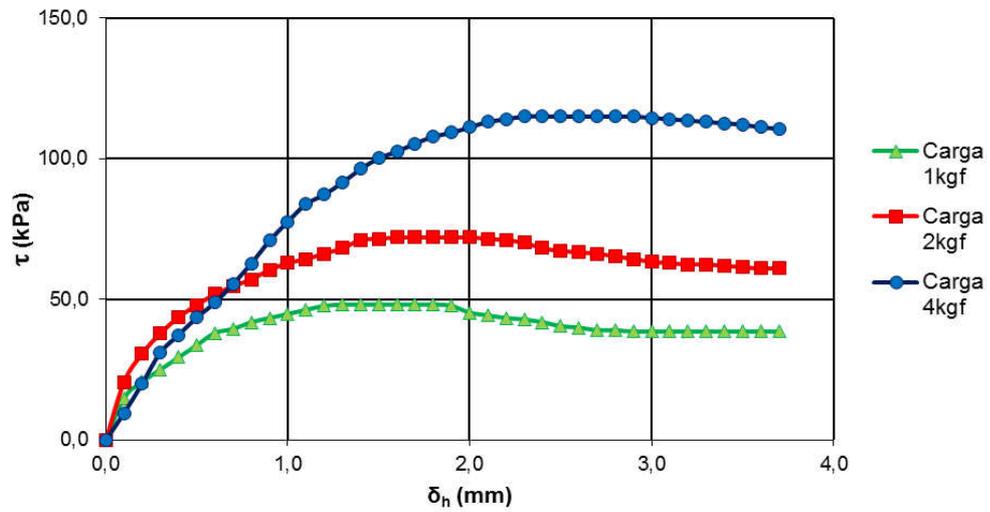


Figura 32: Envoltória de resistência do solo arenoso sem e com fibra (L= 30mm e 2,00%).

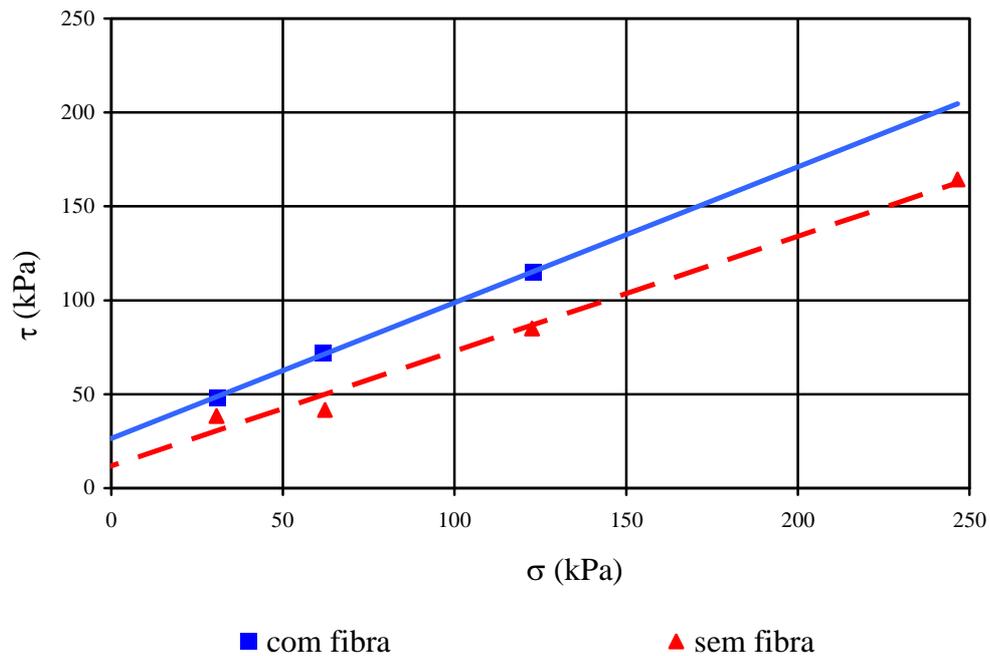


Tabela 11: Parâmetros de resistência obtidos para o solo arenoso.

Condição	Coesão $c'$ (kPa)	Ângulo de atrito $\phi'$ ( $^{\circ}$ )
Sem fibra	11,7	31,4
Com fibra	26,5	35,8

O intercepto de coesão do solo arenoso de Bauru após a adição do teor ótimo de fibras de PP atingiu um aumento de 126,49%, ao passo que o ângulo de atrito teve um aumento de 14,01%. Este acréscimo de resistência no intercepto de coesão é devido às forças de ligação na interface solo-fibra, tendo em vista que, para o solo arenoso, predomina o atrito, em função do tamanho e do entrosamento dos grãos. Assim, as fibras na matriz são impedidas de deslizar, suportando esforços de tração.

Por outro lado, o aumento do ângulo de atrito pode ser explicado, em função de que, ao adicionar fibras ao solo, tem-se um compósito de solo reforçado com fibras, sendo o comportamento do  $\phi$  regido pelas propriedades do compósito.

As forças de ligação na interface solo-fibra são dependentes do contato entre a fase sólida (minerais) e a fibra. Sendo assim, o compósito formado a partir de um solo com curva granulométrica bem graduada vai resultar em valores de resistência superiores, após a adição de fibras, quando comparada ao de um solo mau graduado. Os poros não contribuem com a força de interface solo-fibra, gerando uma perda nas condições de resistência mecânica, uma vez que o contato é prejudicado por não haver forças de atrito. A adição de um material cuja granulometria seja predominantemente de fração de finos como o cimento, por exemplo, poderia elevar ainda mais os valores da resistência do solo arenoso de Bauru/SP.

### 5.3.2 Resultados para o solo argiloso

Figura 33: Tensão cisalhante em função da deformação horizontal do solo argiloso sem fibra.

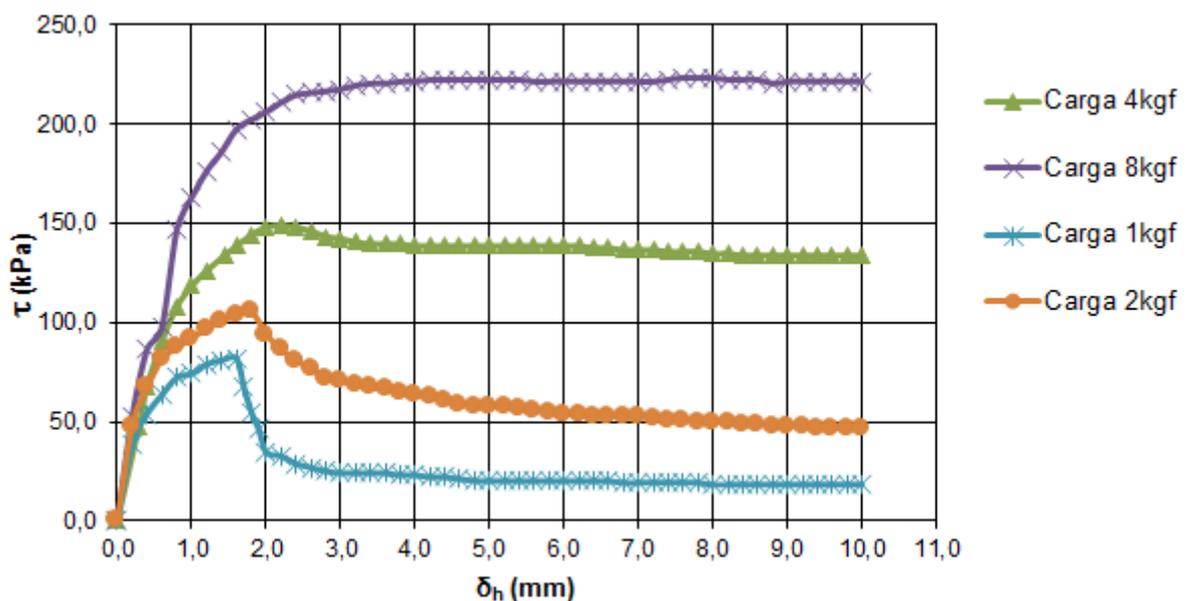


Figura 34: Tensão cisalhante em função da deformação horizontal do solo argiloso com fibra (L= 30mm e 1,50%).

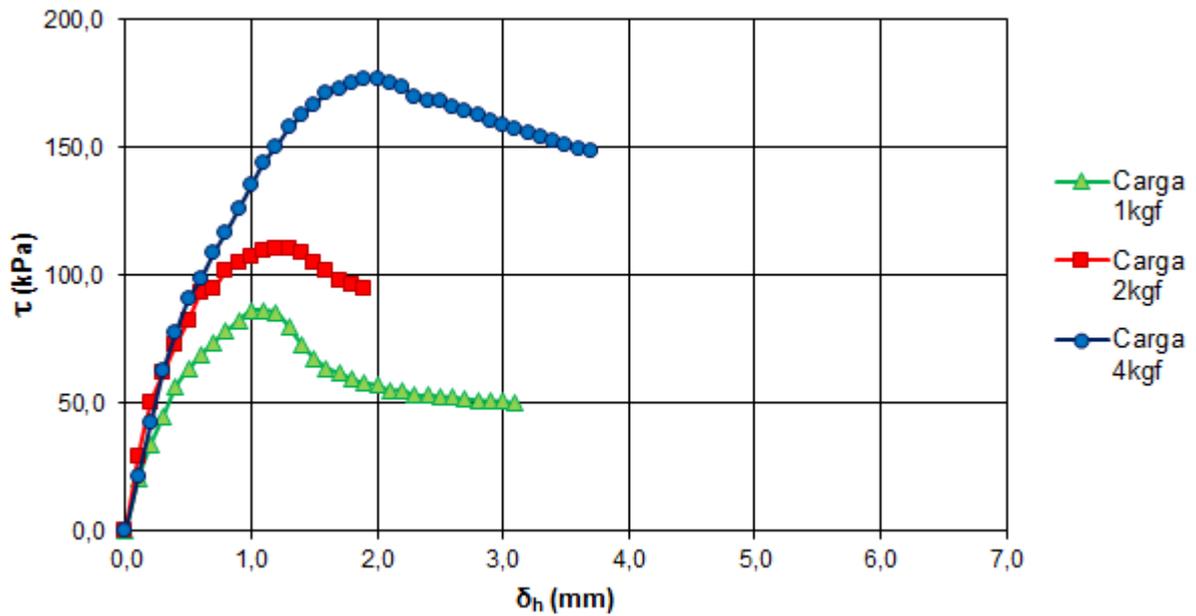


Figura 35: Envoltória de resistência do solo argiloso sem e com fibra (L= 30mm e 1,50%).

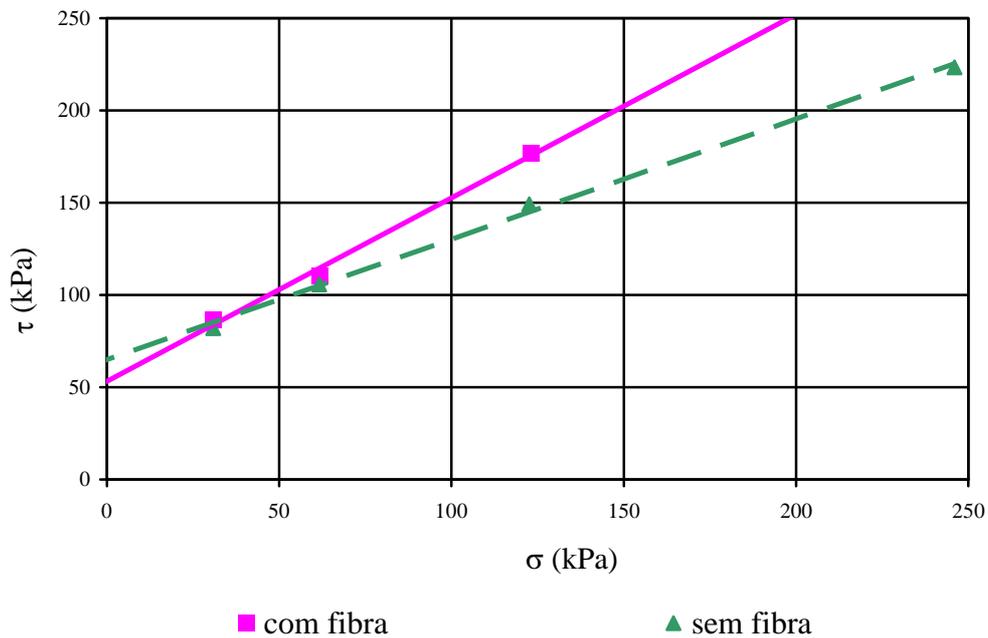


Tabela 12: Parâmetros de resistência obtidos para o solo argiloso.

Condição	Coesão $c'$ (kPa)	Ângulo de atrito $\phi'$ ( $^{\circ}$ )
Sem fibra	64,8	33,1
Com fibra	53,2	45

O intercepto de coesão do solo argiloso de Pederneiras é cerca de 5 vezes maior que a do solo arenoso Bauru, pois predominam as forças de atração eletroquímica entre as partículas de argila. Assim, as forças de ligação que resultam na resistência ao cisalhamento do solo são maiores quando comparadas ao solo arenoso.

O intercepto de coesão do solo argiloso de Pederneiras, após a adição do teor ótimo de fibra, sofreu em uma redução de 17,90%. A redução observada pode ser atribuída pelo fato das fibras de PP, em quantidades elevadas, prejudicarem as forças de atração entre as superfícies das partículas do solo argiloso (coesão), uma vez que o polipropileno é um material quimicamente inerte (HISHAM, 2016). Já o aumento do ângulo de atrito pode ser explicado, em função de que, ao adicionar fibras ao solo, tem-se um compósito de solo reforçado com fibras, sendo o comportamento do  $\phi$  regido pelas propriedades do compósito.

## 5.4 CBR

As figuras e tabelas a seguir ilustram os resultados dos ensaios de determinação do Índice de Suporte Califórnia (CBR) para o solo arenoso de Bauru e argiloso de Pederneiras, sem e com adição de fibras.

### 5.4.1 Resultados para o solo arenoso

Figura 36: Curva pressão x penetração do ensaio CBR para a umidade ótima do solo arenoso sem e com fibras de PP.

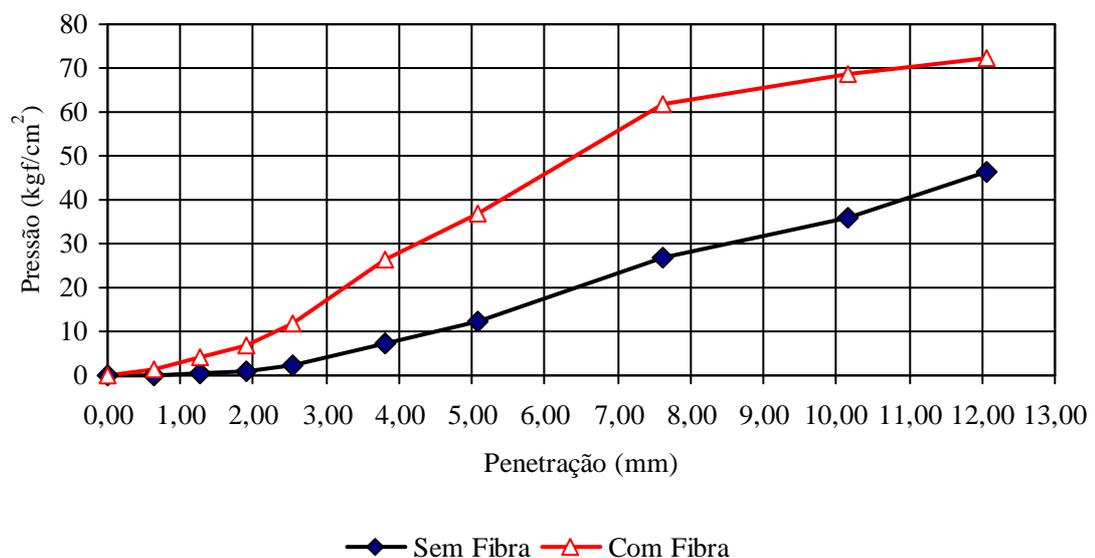


Tabela 13: Resultados do ensaio CBR utilizando solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno.

Material	Expansão (%)	CBR (%)
Solo	0	22.3
Solo + 2,0% Fibra	0	48.3

Conforme se observa na Tabela 13, o CBR do solo arenoso sofreu um acréscimo de cerca de 117%. Como não houve expansão do solo arenoso, o contato entre as fibras (atrído) foi mantido, prevalecendo, portanto, as forças que agem na interface solo-fibra, melhorando o desempenho mecânico do compósito.

#### 5.4.2 Resultados para o solo argiloso

Figura 37: Curva pressão x penetração do ensaio CBR para a umidade ótima do solo argiloso sem e com fibras de PP.

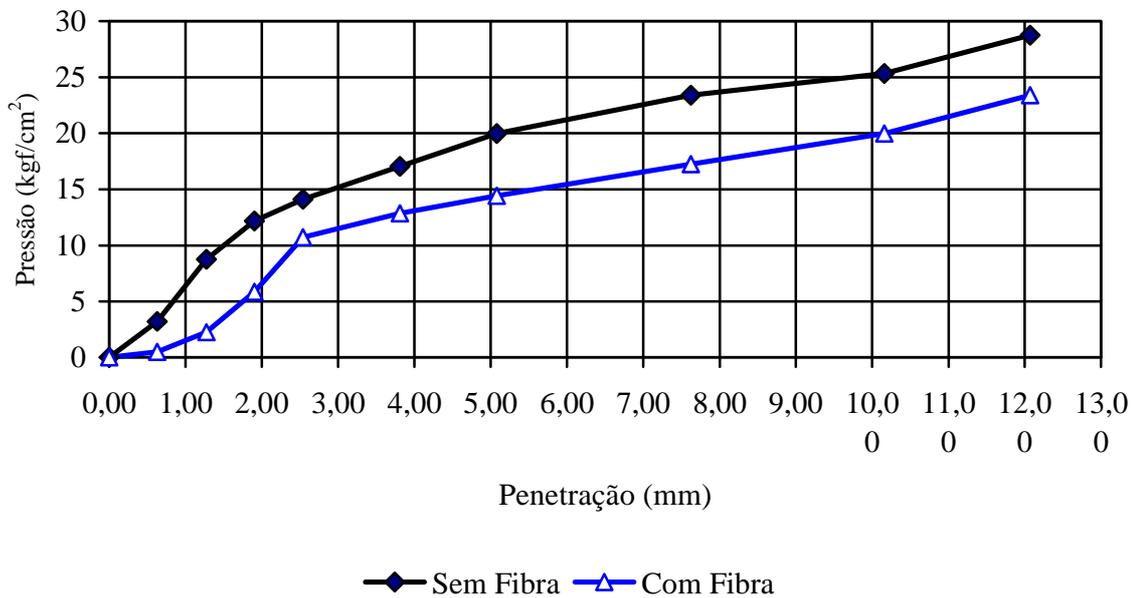


Tabela 14: Resultados do ensaio CBR utilizando solo argiloso reforçado com fibras de polipropileno.

Material	Expansão (%)	CBR (%)
Solo	0,03	21,0
Solo + 1,5% Fibra	0,14	17,9

Conforme se observa na Tabela 14, o CBR do solo argiloso sofreu uma redução de cerca de 15%. Como houve expansão do solo argiloso, o contato entre as fibras (atrito) foi prejudicado, de modo que afetou as forças que agem na interface solo-fibra, provocando a redução no valor do CBR.

### **5.5 Considerações finais**

A avaliação do reforço de solo por meio da inclusão de fibras de PP apresentou resultados que evidenciam a importância da utilização deste material no campo da geotecnia.

Para o solo arenoso da região de Bauru/SP, entre os comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm e teores de 0,25%, 0,5%, 0,75%, 1%, 1,5% e 2%, o teor ótimo de fibra, isto é, a percentagem em massa de fibra de PP que proporciona a maior resistência à compressão não confinada, foi de 2,00% para a fibra com comprimento de 30 mm (válido para os comprimentos e teores de fibras estudados na pesquisa). Os resultados mostraram um aumento de 52,27% na resistência à compressão simples em relação ao solo sem a adição de fibras. Embora os valores de resistência do solo foram maiores para umidades abaixo do teor ótimo, deve-se buscar a estabilidade da resistência alcançada com o emprego da umidade ótima, visando a menor variação da resistência mecânica do compósito, em função da variação do grau de saturação do solo decorrente dos ciclos de umedecimento e secagem (sazonalidade). Já os parâmetros de resistência do intercepto de coesão e ângulo de atrito, obtidos por meio ensaio de cisalhamento direto, tiveram um aumento de 126,49% e 14,01% após a adição do teor ótimo de fibra. Este aumento é resultado das forças de ligação na interface solo-fibra, que são dependentes do contato entre a fase sólida (minerais) e a fibra. Quanto maior a diversidade de tamanho (diâmetro) dos grãos maior será a força de ligação na interface solo-fibra e, portanto, maior será a resistência mecânica do compósito. Este fato foi observado no solo arenoso de Bauru/SP, constituído de cerca de 80% de fração grossa e 20% de fração de finos. Assim, pelo fato das partículas do solo arenoso serem maiores, há maior aderência (atrito) entre a fibra e o solo, aumentando a força de ligação.

Por outro lado, o solo argiloso da região de Pederneiras/SP apresentou um teor ótimo de fibra de PP equivalente a 1,50% para o comprimento de fibra de 30mm, entre os comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm e teores de 0,25%, 0,5%, 0,75%, 1%, 1,5% e 2% analisados (válido para os comprimentos e teores de fibras estudados na pesquisa). Os resultados mostraram que o teor ótimo de fibra misturado ao solo argiloso resultou em um aumento de 48,12% na resistência à compressão simples em relação ao solo sem a adição de

fibras. Também foi constatado que, para valores abaixo da umidade ótima, o solo apresentou maiores valores de resistência. Entretanto, visando a estabilidade da resistência mecânica do compósito, deve-se empregar a umidade ótima nos processos de compactação do solo. O ângulo de atrito teve um aumento de 35,95% e o parâmetro de resistência do intercepto de coesão, por sua vez, teve uma redução de 17,90%. A redução observada pode ser atribuída pelo fato das fibras de PP, em quantidades elevadas, prejudicarem as forças de atração entre as superfícies das partículas do solo argiloso (coesão), uma vez que o polipropileno é um material quimicamente inerte (HISHAM, 2016).

Portanto, o comportamento da resistência mecânica varia em função do tipo de solo estudado. Na Figura 38 e na Tabela 15 estão resumidos os resultados obtidos na pesquisa para solo arenoso e argiloso com e sem a adição de fibras. Para o solo arenoso de Bauru/SP a adição aleatória de fibras discretas de PP se mostrou um método promissor para aumentar a resistência mecânica do solo e o Índice de Suporte Califórnia (CBR). Já para o solo argiloso de Pederneiras/SP novas pesquisas devem ser realizadas visando o máximo desempenho das fibras de PP.

No que tange aos dados de pesquisas encontradas na literatura, os valores obtidos para o solo argiloso vão em desconformidade com os resultados obtidos por Consoli et al. (2003), embora estes tenham utilizado ensaios triaxiais ao invés do ensaio de cisalhamento direto. Segundo os autores, as fibras aumentaram substancialmente a coesão ( $c$ ), enquanto o ângulo de atrito ( $\phi$ ) foi pouco afetado pela inclusão do polipropileno, após a realização de testes triaxiais drenados consolidados (CD). Isto pode ser justificado pelo fato do PP prejudicar a força de interface solo-fibra, gerando uma perda nas condições de resistência mecânica, tendo em vista que as forças de atração entre as superfícies das partículas do solo argiloso são prejudicadas (coesão) pelo fato do polipropileno ser um material quimicamente inerte (HISHAM, 2016). Por fim, a adição de fibras ao solo argiloso, no teor ótimo proposto, gerou aumento da expansão e redução do CBR. Este fato vai em desconformidade com o defendido por Pradhan et al. (2012). A redução do CBR pode ser atribuída ao aumento da expansão do solo devido a quantidade de fibras presente, prejudicando o contato (atrito) entre as partículas.

Por outro lado, para o solo arenoso, os resultados obtidos estão condizentes com Tang et al. (2007), Ahmad et al. (2010) e Pradhan et al. (2012). De acordo com os autores, a porcentagem de fibra desempenha um papel importante no aumento de ambos os parâmetros de resistência ( $\phi$  e  $c$ ). No que tange ao CBR, para o solo arenoso, os resultados obtidos estão condizentes com Fletcher & Humphries (1992), tendo em vista que o CBR atingiu um

aumento de cerca de 117%, sem a ocorrência de expansão, favorecendo o atrito entre as partículas.

Tabela 15: Parâmetros de resistência obtidos na pesquisa.

Solo	Condição	Coesão $c'$ (kPa)	Ângulo de atrito $\phi'$ (°)
Argiloso	Sem fibra	64,8	33,1
	Com fibra	53,2	45
Arenoso	Sem fibra	11,7	31,4
	Com fibra	26,5	35,8

Figura 38: Envoltórias de resistência dos solos argiloso e arenoso.

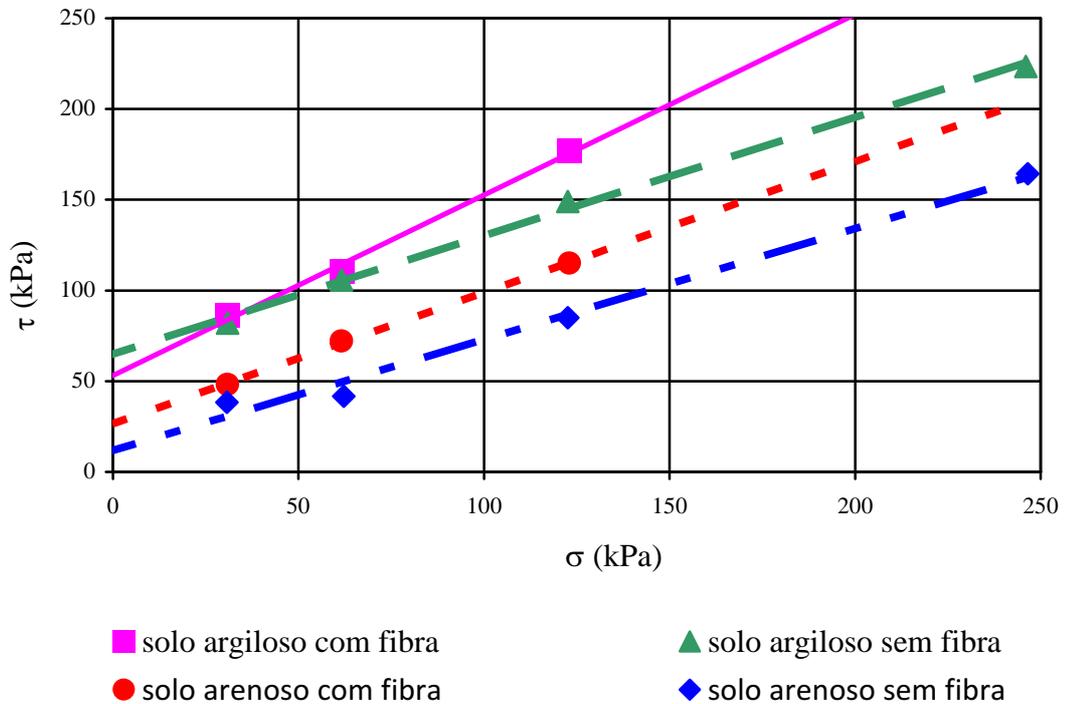


Tabela 16: Valores de CBR obtidos na pesquisa.

Solo	Condição	Expansão (%)	CBR (%)
Argiloso	Sem fibra	0,03	21,0
	Com fibra	0,14	17,9
Arenoso	Sem fibra	0	22,3
	Com fibra	0	48,3

## 6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesta pesquisa permitiram concluir que a inclusão de fibras de polipropileno recicladas, distribuídas aleatoriamente, é uma técnica efetiva e econômica para aumentar a resistência dos solos estudados.

Os resultados mostraram que, para o solo arenoso, o teor ótimo de fibra, isto é, o percentual de fibra que misturado ao solo proporcionou o maior valor de resistência à compressão (válido para a os teores de fibras adotados nesta pesquisa), foi obtido com comprimento  $L = 30\text{mm}$  de fibra de PP com um teor de 2,00% em relação à massa de solo seco. Os resultados mostraram que a adição de fibras ao solo arenoso resultou em um aumento de 52,27% na resistência à compressão simples em relação ao solo sem a adição de fibras. Por seu turno, o intercepto de coesão do solo arenoso de Bauru, após a adição do teor ótimo de fibras de PP, atingiu um aumento de 126,49%, ao passo que o ângulo de atrito teve um aumento de 14,01%. Por fim, o CBR do solo arenoso aumentou em cerca de 117%, quando comparado ao solo sem adição de fibras, sem que houvesse aumento da expansão.

Já para o solo argiloso, o teor ótimo de fibra, ou seja, o percentual de fibra que misturado ao solo proporcionou o maior valor de resistência à compressão (válido para a os teores de fibras adotados nesta pesquisa), foi obtido com comprimento  $L = 30\text{ mm}$  de fibra de PP com um teor de 1,50% em relação à massa de solo seco. Os resultados mostraram que a adição de fibras ao solo argiloso resultou em um aumento de 48,12% na resistência à compressão simples em relação ao solo sem a adição de fibras. Por sua vez, o intercepto de coesão do solo argiloso de Pederneiras, após a adição do teor ótimo de fibra, sofreu em uma redução de 17,90%, ao passo que o ângulo de atrito teve um aumento de 35,95%. Por fim, o CBR do solo argiloso sofreu ligeira redução, com aumento significativo da expansão.

Diante do exposto, o solo arenoso de Bauru (SP), quando comparado ao argiloso de Pederneiras (SP), foi o que apresentou resultados promissores, em todos os ensaios realizados nesta pesquisa, quando aplicada a técnica da inclusão de fibras de polipropileno reciclado, distribuídas aleatoriamente.

Portanto, foi possível avaliar os parâmetros de resistência dos solos da região de Bauru por meio da inclusão de fibras de polipropileno reciclado. Foi constatado que o tipo de solo tem influência no comportamento mecânico da mistura solo-fibra e que o teor, comprimento e orientação das fibras devem ser levados em consideração para avaliação da resistência mecânica do compósito.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABTAHI, M.; OKHOVAT, N.; HEJAZI, M. Using textile fibers as soil stabilizers–new achievements. In: **1st Int and 7th nat conf text eng, Rasht, Iran**. 2009.

AHMAD, Fauziah; BATENI, Farshid; AZMI, Mastura. Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 1, p. 93-99, 2010.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais: **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**, 2015. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso em: 12 fev. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 7181**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro 1984.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604**: Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo, com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de Solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770**: Solo coesivo – Determinação a resistência a compressão de solo não confinado. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC). Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15588**: Pré-forma de PET para sopro de embalagem para alimentos e bebidas - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.

BABU, G. L. S. *An Introduction to Soil Reinforcement and Geosynthetics*, New Delhi, Orient Blackswan, 2005.

BENINI, K. C. C. C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas: HIPS / fibra da casca do coco verde e bagaço de cana de açúcar**. 2011. 125 f. Dissertação de Mestrado – UNESP, São Paulo, 2011.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre reinforced cementitious composites**. Crc Press, 2006.

BOTERO, E. et al. Stress–strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). **Geotextiles and Geomembranes**, v. 43, n. 4, p. 363-369, 2015.

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

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. 219 f. Tese de Doutorado - UFRGS, Porto Alegre, 2005.

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

ANAGNOSTOPOULOS, C. A.; TZETZIS, D.; BERKETIS, K. Shear strength behaviour of polypropylene fibre reinforced cohesive soils. **Geomechanics and Geoengineering**, v. 9, n. 3, p. 241-251, 2014.

CONSOLI, N.C.; CASAGRANDE, M.D.T.; PRIETTO, P.D.M.; THOMÉ, A. Plate load test on fiber-reinforced soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 10, p. 951-955, 2003.

CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D.; COOP, M. R. Effect of fiber reinforcement on the isotropic compression behavior of a sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 11, p. 1434-1436, 2005.

CONSOLI, N. C.; ROSA, F. D.; FONINI, Anderson. Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 135, n. 12, p. 1846-1856, 2009.

CHANG, J. C. AND WANG, W. H. *Jet grouting to reduce liquefaction potential, Proceedings of the 3rd International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering St Louis, Missouri, 1993 University of Missouri-Rolls, MO, USA, 609–611, 1993.*

CHOUBANE, B., HO, R.K. AND ARMAGHANI, J.M. *Full-scale lab-oratory evaluation of polypropylene fiber reinforcement of sub-grade soils. Florida: State Materials Office. Florida Department of Transportation, Research Report No 99-432, 1999.*

DANSO, Humphrey et al. Mechanisms by which the inclusion of natural fibres enhance the properties of soil blocks for construction. **Journal of Composite Materials**, v. 51, n. 27, p. 3835-3845, 2017.

DEJALOUD, H.; JAFARIAN, Y. A micromechanical-based constitutive model for fibrous fine-grained composite soils. **International Journal of Plasticity**, v. 89, p. 150-172, 2016.

DIAMBRA, A. **Fibre Reinforced Sands: Experiments and Constitutive Modelling**. 2010. 266 f. Tese de doutorado - University of Bristol, UK , 2010.

DONATO M. **Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno**. 2007. 162 f. Tese de Doutorado - UFRGS, Porto Alegre, 2007.

ESTABRAGH, A. R.; BORDBAR, A. T.; JAVADI, A. A. Mechanical behavior of a clay soil reinforced with nylon fibers. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 29, n. 5, p. 899, 2011.

ESTABRAGH, A. R.; BORDBAR, A. T.; JAVADI, A. A. A study on the mechanical behavior of a fiber-clay composite with natural fiber. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 31, n. 2, p. 501-510, 2013.

FATAHI, B.; FATAHI, B.; LE, T. M.; KHABBAZ, H. Small-strain properties of soft clay treated with fibre and cement. **Geosynthetics International**, v. 20, p. 286–300, 2013.

FATAHI, B., KHABBAZ, H. & FATAHI, B. Mechanical characteristics of soft clay treated with fibre and cement. **Geosynthetics International**, v. 19, p. 252–262, 2012.

FERREIRA, F. B.; VIEIRA, C. S.; LOPES, M. Direct shear behaviour of residual soil–geosynthetic interfaces–influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type. **Geosynthetics International**, v. 22, n. 3, p. 257-272, 2015.

FESTUGATO L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto**. 2008. 146 f. Dissertação de Mestrado - UFRGS, Porto Alegre, 2008.

FESTUGATO, L.; CONSOLI, N. C.; FOURIE, A. Cyclic shear behaviour of fibre-reinforced mine tailings. **Geosynthetics International**, v. 22, n. 2, p. 196-206, 2015.

FEUERHARMEL M.R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. 152 f. Dissertação de Mestrado - UFRGS, Porto Alegre, 2000.

FINKLER, M. **Desenvolvimento de compósitos com base de rejeito em tecidos de algodão e acrílico em matriz de polietileno de alta densidade**. 2005. 127 f. Dissertação de mestrado - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS, 2005.

FLETCHER, C. S.; HUMPHRIES, W. K. California bearing ratio improvement of remolded soils by the addition of polypropylene fiber reinforcement. **Transportation Research Record**, n. 1295, 1991.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. John Wiley & Sons, 1993.

GRAF, E. D. Earthquake support grouting in sands. In: **Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics**. ASCE, 1992. p. 879-888.

GREGORY, G. H.; CHILL, D. S. Stabilization of earth slopes with fiber reinforcement. In: **Proc., 6th Int. Conf. on Geosynthetics**. International Geosynthetics Society, 1998. p. 1073-1078.

HARPER, C. A. *Modern Plastics Handbook*. Nova Iorque: McGraw-Hill Handbooks, p. 1298, 2000.

HISHAM, M. A. Polypropylene as a promising plastic: A review. **Am. J. Polym. Sci**, v. 6, n. 1, p. 1-11, 2016.

HSIEH, C.; HSIEH, M. Load plate rigidity and scale effects on the frictional behavior of sand/geomembrane interfaces. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 21, n. 1, p. 25-47, 2003.

INGOLD, T. S. Some observations on the laboratory measurement of soil-geotextile bond. **Geotechnical Testing Journal**, v. 5, n. 3/4, p. 57-67, 1982.

ISHIHARA, K.; KAWASE, Y.; NAKAJIMA, M. Liquefaction characteristics of sand deposits at an oil tank site during the 1978 Miyagiken-Oki earthquake. **Soils and foundations**, v. 20, n. 2, p. 97-111, 1980.

JAMSAWANG, P.; VOOTTIPRUEX, P.; HORPIBULSUK, S. Flexural strength characteristics of compacted cement-polypropylene fiber sand. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 9, p. 04014243, 2015.

JAMSHIDI, R.; TOWHATA, I.; GHIASSIAN, H.; TABARSA, A. R. Experimental evaluation of dynamic deformation characteristics of sheet pile retaining walls with fiber reinforced backfill. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 30, n. 6, p. 438-446, 2010.

JIANG, H.; CAI, Y.; LIU, J.. Engineering properties of soils reinforced by short discrete polypropylene fiber. **Journal of Materials in civil Engineering**, v. 22, n. 12, p. 1315-1322, 2010.

KANIRAJ, S. R.; HAVANAGI, V. G. Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 127, n. 7, p. 574-584, 2001.

NETO, Flaminio Levy; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Editora Blucher, 2016.

LODI, P. C. **Aspectos de Degradação e Envelhecimento de Geomembranas Poliméricas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e de Poli Cloreto de Vinila (PVC)**. 2003. 284 f. Tese de Doutorado - EESC (USP), São Carlos, 2003.

LONG, P. V.; BERGADO, D. T.; ABUEL-NAGA, H. M. Geosynthetics reinforcement application for tsunami reconstruction: evaluation of interface parameters with silty sand and weathered clay. **Geotextiles and geomembranes**, v. 25, n. 4-5, p. 311-323, 2007.

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

MAIA, I.S. **Avaliação da Degradação de Propriedades Mecânicas de Geomembranas de PEAD e PVC**. 2001. 102 f. Dissertação de Mestrado - EESC (USP), São Carlos, 2001.

MANO, Eloisa Biassoto; MENDES, L. C. Introdução a Polímeros, 2ª edição. **Editora Edgard Blucher LTDA, São Paulo**, 1999.

MARCZUK, V. C. **Reaproveitamento de pallets industriais para preparação e caracterização mecânica de compósitos poliméricos**. 2015. 67 f. Dissertação de mestrado – Fundação Oswaldo Aranha, Volta Redonda, 2015.

MILLER, C. J.; RIFAI, S. Fiber reinforcement for waste containment soil liners. **Journal of Environmental Engineering**, v. 130, n. 8, p. 891-895, 2004.

MIRZABABAEI, M.; MOHAMED, M.; MIRAFTAB, M. Analysis of strip footings on fiber-reinforced slopes with the aid of particle image velocimetry. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 4, p. 04016243, 2017.

MITCHELL, J. K.; WENTZ, F. J. **Performance of improved ground during the Loma Prieta earthquake**. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1991.

NADOLNY, P. R. **Utilização de reforço lignocelulósico em polietileno de alta densidade**. 2013. 69 f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ÖZKUL, Z. H.; BAYKAL, G. Shear behavior of compacted rubber fiber-clay composite in drained and undrained loading. **Journal of geotechnical and Geoenvironmental engineering**, v. 133, n. 7, p. 767-781, 2007.

PALMEIRA, E.M. Discussion on direct shear tests on reinforced sand. **Geotechnique**, v. 38, n. 1, p.146-148, 1988.

PALMEIRA, E. M. Soil–geosynthetic interaction: modelling and analysis. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 27, n. 5, p. 368-390, 2009.

PARK, S. Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 27, n. 2, p. 162-166, 2009.

PLE, O.; LÊ, T. N. H. Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 32, p. 111-116, 2012.

PRADELA, N. P. **Avaliação da resistência mecânica do solo por meio da inclusão de fibras poliméricas**. São Paulo: FAPESP, 2016. Disponível em:

<<https://bv.fapesp.br/pt/bolsas/169247/avaliacao-da-resistencia-mecanica-do-solo-por-meio-da-inclusao-de-fibras-polimericas/>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

PRADHAN, P. K.; KAR, R. K.; NAIK, A. Effect of random inclusion of polypropylene fibers on strength characteristics of cohesive soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 30, n. 1, p. 15-25, 2012.

SARBAZ, H.; GHIASSIAN, H.; HESHMATI, A. A. CBR strength of reinforced soil with natural fibres and considering environmental conditions. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 15, n. 7, p. 577-583, 2014.

SIEIRA, A. C. C.F. **Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha**. 2003. 363 f. Tese de Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SIEIRA, A. C. C. F.; SAYÃO, A. S. F. J. Ensaios triaxiais em solo reforçado com geogrelhas. **Revista Geotecnia**, n. 118, p. 43-64, 2010.

SILVEIRA, M. R. **Efeito da inclusão de fibras poliméricas na resistência ao cisalhamento do solo**. São Paulo: FAPESP, 2016. Disponível em: <<https://bv.fapesp.br/pt/bolsas/167818/efeito-da-inclusao-de-fibras-polimericas-na-resistencia-ao-cisalhamento-do-solo/>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

TANG, C., SHI, B., GAO, W., CHEN, F., CAI, Y. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 25, n. 3, p. 194-202, 2007.

TANG, C.; SHI, B.; ZHAO, L. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 1, p. 54-62, 2010.

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

VIEIRA, C. S.; LOPES, M. D. L.; CALDEIRA, L. M. Sand-geotextile interface characterisation through monotonic and cyclic direct shear tests. **Geosynthetics International**, v. 20, n. 1, p. 26-38, 2013.

WHEELER, P. *Earth bound: reinforced soil and BS8006. Ground engineering, reinforcement soil supplement, London, UK., p. 3-5, 1996.*

ZAIMOGLU, A. S.; YETIMOGLU, T. Strength behavior of fine grained soil reinforced with randomly distributed polypropylene fibers. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 30, n. 1, p. 197-203, 2012.

YASUDA, S., NAGASE, H., YUTAKA, U. AND MASATO, K. Shaking table tests on countermeasures against large ground displacement due to liquefaction. In: **Technical Report NCEER**. US National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER), 1992. p. 367-80.

YILMAZ, Y. Compaction and strength characteristics of fly ash and fiber amended clayey soil. **Engineering geology**, v. 188, p. 168-177, 2015.

ZIEGLER, S., LESHCHINSKY, D., LING, H.I. AND PERRY, E.B. Effect of short polymeric fibers on crack development in clays. **Soils and Foundations**, v. 38, n. 1, p. 247-253, 1998.