

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ÉRICO RAFAEL DA SILVA

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO REFORÇADO COM
FIBRA DE CURAUÁ (*ANANAS ERECTIFOLIUS*)

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
2020

ÉRICO RAFAEL DA SILVA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO REFORÇADO COM
FIBRA DE CURAUÁ (*ANANAS ERECTIFOLIUS*)**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Área de Concentração: Construção Civil

Linha de Pesquisa: Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo.

Coorientador: Me. Jair de Jesus Arrieta Baldovino.

**CURITIBA
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Silva, Érico Rafael da

Comportamento mecânico de solo reforçado com fibra de Curauá (ananas erectifolius) [recurso eletrônico] / Érico Rafael da Silva. -- 2020.

1 arquivo texto (122 f.): PDF; 3,91 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título (visualizado em 09 set. 2020).

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2020.

Bibliografia: f. 111-122.

1. Engenharia civil - Dissertações. 2. Fibras. 3. Resistência de materiais. 4. Solos - Estrutura I. Izzo, Ronaldo Luis dos Santos, orient. II. Baldovino, Jair de Jesús Arrieta, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, inst. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 624

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271
Aluna de Biblioteconomia: Josiane Mangueira



TERMO DE APROVAÇÃO Nº 193

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO REFORÇADO COM FIBRA DE CURAUÁ (*Ananas erectifolius*)

por

ÉRICO RAFAEL DA SILVA

Esta Dissertação foi apresentado(a) em 17 de abril de 2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo
Prof. Orientador

Me. Jair, de Jesus Baldovino Arrieta
Coorientador

Prof^a. Dra. Janine Nicolosi Corrêa
Membro titular

Prof. Dr. Matheus David Inocente Domingos
Membro titular

Prof. Dr. Sidney Teixeira
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho à minha família, pelo
apoio constante na busca do
conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus por me dar forças e determinação para caminhar nessa jornada. Sou grato por tantas coisas boas que Ele me proporcionou e me fez alcançar.

À minha família, meu pai Lucindo e minha mãe Aurea e meus irmãos Marcelo e Alex. Sou grato pela confiança, pelo carinho e por acreditarem que isso seria possível. O apoio de vocês e o incentivo pela busca constante do conhecimento me deram forças para continuar.

Estendo meus cumprimentos a aqueles que estiveram ao meu lado na universidade, em especial aos meus colegas do laboratório: Wagner, João, Alexandre, Eciesielter, Vanessa, Mirian, Leandro, Juliana, Yeimy, dentre outros envolvidos, obrigado por contribuírem de alguma forma para minha formação.

Em especial, agradeço pelo empenho e confiança do meu orientador, professor e amigo Ronaldo Luis dos Santos Izzo. E ao meu grande “amiguinho” e também coorientador Jair Baldovino Arrieta. Obrigado por dividirem o conhecimento e sua amizade.

Estendo meus agradecimentos especial à banca examinadora pelas contribuições e melhorias.

Agradeço à Professor Juliana Kloss do Departamento de Química por auxiliar no processo de solubilização do EPS que busquei introduzir.

À UTFPR e em especial ao PPGEC pela oportunidade de desenvolver este trabalho nessa instituição, que considero como um lar.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Aos professores do PPGEC que dividiram seu conhecimento e contribuíram para a realização deste trabalho.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

***Le plus grand plaisir dans la vie est
de réaliser ce que les autres vous
pensent incapables de réaliser.***

(BAGEHOT, Walter)

**O maior prazer da vida é fazer o que os
outros pensavam que você
era incapaz de fazer**

(BAGEHOT, Walter)

RESUMO

SILVA, Érico Rafael. **Comportamento mecânico de solo reforçado com fibra de Curauá (*Ananas erectifolius*)**: 2020. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

A aplicação de reforços fibrosos em solos surgiu com a finalidade de fornecer a este material melhorias em suas propriedades mecânicas, principalmente na resistência à tração. As fibras de curauá (*Ananas erectifolius*) apresentam elevada resistência mecânica quando comparadas a outras fibras vegetais, muitas vezes capazes de suprir as deficiências do material a ser reforçado. Este trabalho tem como objetivo avaliar a adição de fibra vegetal de curauá no comportamento mecânico de um solo siltoso da cidade de Curitiba, no estado do Paraná, Brasil. Foi avaliada a influência das variações do teor e do comprimento de fibra adicionada ao solo. Os comprimentos estudados foram de 6, 15 e 30 mm e os teores de 0,25, 0,50 e 0,75% em relação à massa seca de solo. Inicialmente, foram definidos os índices físicos do solo natural (peso específico, teor de umidade) e as propriedades físicas da fibra vegetal (densidade, pH). Posteriormente, as fibras foram dispostas de maneira aleatória no solo para a confecção de espécimes cilíndricos de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro que foram utilizados na realização de ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral. O processo de mistura da fibra ao solo ocorreu de maneira análoga para a produção dos corpos de prova de 10 x 10 x 2 cm submetidos a ensaios de cisalhamento direto. Além disso, tendo em vista a melhoria da durabilidade da fibra vegetal, foi estudada a aplicação de uma técnica de impermeabilização utilizando resíduos de poliestireno expandido (EPS). O solo reforçado apresentou ganhos de resistência em todos os ensaios realizados. Nos ensaios de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, o teor e o comprimento ótimo foi de 0,50% e 6 mm, respectivamente. Nestes ensaios, o acréscimo de resistência foi de aproximadamente 90% nos parâmetros ótimos já mencionados. Já nos ensaios de cisalhamento direto, o acréscimo de resistência em baixas tensões confinantes é proporcional ao aumento do teor e do comprimento da fibra. A aplicação do tratamento à fibra vegetal, reduziu os efeitos da biodegradação e influenciou na redução de 10% de absorção de água e aumentou em 5% a resistência à tração da fibra. Além dos ganhos de resistência mecânica, também foi observado que a adição de fibras forneceu ao solo aumento da ductilidade e possibilitando alcançar maiores deformações sem queda brusca da resistência.

Palavras-chave: Comportamento mecânico. Solo Reforçado. Fibra Natural. Resistência ao Cisalhamento. Compressão Simples.

ABSTRACT

SILVA, Érico Rafael. **Mechanical behavior of Curauá fiber (*Ananas erectifolius*) reinforced soil**. 2020. 122 f. Thesis (Civil Engineering Master's Degree) – Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Technology - Paraná. Curitiba, 2020.

The application of reinforcement with fibers in soils has been introduced with the purpose to provide this material with improvement in its reforms in soils arose with the use of mechanical properties, especially in shear stress. Curaua (*Ananas erectifolius*) fibers, when compared to other vegetable fibers have high mechanical resistance, many times, to overcome the deficiencies of the material to be reinforced. The objective of this study was to evaluate the addition of vegetable fiber in the mechanical behavior of a silty soil in the city of Curitiba, in the state of Paraná in Brazil. The influence of variations in fiber content and length added to the soil were evaluated. The studied lengths were 6, 15 and 30 mm and the contents were 0.25, 0.50 and 0.75% in relation to the dry mass of soil. Initially, the physical indexes of the natural soil (specific weight, moisture content) and the physical properties of the vegetable fiber (density, pH) were defined. Later, the fibers are randomly placed on the soil to make cylindrical specimens of 100 mm in height and 50 mm in diameter that were used in the performance of uniaxial compression tests and split tensile strength tests. The process of mixing the fiber to the soil occurred in the same way for the production of the 10 x 10 x 2 cm specimens submitted to direct shear tests. In addition, with a view to improving the durability of vegetable fiber, the application of a waterproofing technique using expanded polystyrene (EPS) residues was studied. The reinforced soil showed better resistance in all tests results. The increase in strength was approximately 90% measured in tests of uniaxial compression and split tensile strength. These tests revealed the optimum content and length of 0.50% and 6 mm, respectively. In direct shear tests, the increase in strength at low confining stresses is proportional to the increase in fiber content and length. The application of the treatment to vegetable fiber, reduced the effects of biodegradation and influenced the reduction in 10% of water absorption increased the tensile strength of the fiber by 5%. In addition to better mechanical strength, it was also observed that the inclusion of fibers provided the soil with increased ductility and made it possible to achieve greater deformations without a sudden drop in of resistance.

Keywords: Mechanical Behavior. Reinforced Soil. Natural Fiber. Shear Stress. Unconfined compression.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da bacia de Curitiba.....	17
Figura 2 - Curva de compactação	20
Figura 3 - Classificação das fibras.....	25
Figura 4 - Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra	28
Figura 5 - Dimensões geométricas da fibra	29
Figura 6 - Disposição fibra/fissura	30
Figura 7 - Efeito do teor de fibras com relação ao aumento do índice de aspecto ...	31
Figura 8 - Variação da densidade da fibra em diferentes testes.....	33
Figura 9 - Efeito do teor de fibra na compressão simples	34
Figura 10 - Ilustração esquemática de categorias de fibras naturais incorporadas ao solo.....	37
Figura 11 - Matriz estrutural da fibra vegetal	38
Figura 12 - MEV de fibras naturais de Sisal (a) Curauá (b) e Coco (c) sem tratamento	41
Figura 13 - Planta de Curauá	42
Figura 14 - Fibra de Curauá obtida por microscópio	42
Figura 15 - Fluxograma programas de ensaios	46
Figura 16 - Mapa de localização do local de coleta do solo	48
Figura 17 - Local de coleta do solo. Camadas de coleta (a) e (b) visão geral da obra (c).....	48
Figura 18 - Procedimentos de preparação da fibra: lavagem (a), secagem (b) escovação (c).....	49
Figura 19 - Procedimento de corte das fibras em 6mm (a), 15mm (b) e 30mm (c) ..	50
Figura 20 - Análise de partículas por difração a laser. Preparo da amostra (a) e (b), equipamento de difração a laser (c)	53
Figura 21 - Prensa para compactação dos corpos de prova	56
Figura 22 - Ensaio de compressão simples. Início do ensaio (a) e ruptura (b).....	57
Figura 23 - Ensaio de compressão diametral	58
Figura 24 - Ensaio de tração da fibra vegetal	61
Figura 25 - Esquema de suporte para fibra	62
Figura 26 - Procedimento de impermeabilização por impregnação com EPS: (a) fragmentação do EPS, (b) pesagem do material e (c) EPS dissolvido em xileno PA63	
Figura 27 - Curva Granulométrica do Solo	66
Figura 28 - Classificação do solo (MCT)	67
Figura 29 - Curvas de compactação do solo e solo fibra com teor de 0,25%.....	69
Figura 30 - Curvas de compactação do solo e solo fibra com teor de 0,50%.....	69
Figura 31 - Curvas de compactação do solo e solo fibra com teor de 0,75%.....	70
Figura 32 - Definição das áreas de análise química do solo feita por EDS	71
Figura 33 - Resultados de compressão simples.....	72

Figura 34 - Resultados de tração por compressão diametral	73
Figura 35 - Gráfico tensão x deformação do cisalhamento direto do solo natural	74
Figura 36 – Envoltória de ruptura do solo natural.....	75
Figura 37 - Absorção de água da fibra vegetal.....	76
Figura 38 - Morfologia da fibra de curauá (a) sem tratamento t=0, (b) sem tratamento t=60, (c) com tratamento t=0, (d) com tratamento t=60d.....	78
Figura 39 - Diâmetros das fibras de Curauá obtidos por microscópio.....	80
Figura 40 - Compressão simples solo reforçado - Teor fixo de 0,25% de fibra	82
Figura 41 - Compressão simples solo reforçado - Teor fixo de 0,50% de fibra	82
Figura 42 - Compressão simples solo reforçado - Teor fixo de 0,75% de fibra	83
Figura 43 - Dados de resistência à compressão simples	85
Figura 44 - Tração por compressão diametral do solo reforçado - (Teor de 0,25%)	87
Figura 45 - Tração por compressão diametral do solo reforçado - (Teor de 0,50%)	87
Figura 46 - Tração por compressão diametral do solo reforçado - (Teor de 0,75%)	88
Figura 47 - Gráfico Tensão x Deformação - Cisalhamento Direto (0,25% Fibra)	90
Figura 48 - Gráfico Tensão x Deformação - Cisalhamento Direto (0,50% Fibra)	91
Figura 49 - Gráfico Tensão x Deformação - Cisalhamento Direto (0,75% Fibra)	92
Figura 50 - Envoltórias de ruptura solo reforçado - (a) teor fixo de 0,25% (b) comprimento fixo de 6mm (c) teor fixo de 0,50% (d) comprimento fixo de 15mm (e) teor fixo de 0,75% e (f) comprimento fixo de 30 mm.....	93
Figura 51 - Relação entre o teor de umidade e o teor de fibra	95
Figura 52 - Relação entre o teor de umidade e o comprimento de fibra.....	96
Figura 53 - Relação entre o peso específico e o teor de fibra	97
Figura 54 - Relação entre o peso específico e o comprimento de fibra.....	98
Figura 55 - Relação entre a resistência a compressão simples e o teor de fibra	99
Figura 56 - Relação entre a tração por compressão diametral e o teor de fibras.....	99
Figura 57 - Relação entre a tração por compressão diametral e o teor de fibras...	101
Figura 58 - Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e o comprimento de fibra.....	102
Figura 59 - Relação entre a coesão e o teor de fibras.....	103
Figura 60 - Relação entre o ângulo de atrito e o teor de fibras.....	104
Figura 61 - Relação entre a coesão e o comprimento da fibra	104
Figura 62 - Relação entre o ângulo de atrito e o comprimento da fibra	105
Figura 63 - Relação entre qt/qu	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais materiais de reforço de solo	22
Tabela 2 - Principais materiais de reforço de solo	35
Tabela 3 - Estrutura de origem de fibras vegetais	36
Tabela 4 - Propriedades das fibras vegetais.....	37
Tabela 5 - Composição química de algumas fibras naturais.....	39
Tabela 6 - Propriedades de alguns tipos de fibra.....	43
Tabela 7 - Comprimentos e teores de fibras	50
Tabela 8 - Programa de moldagem para ensaios de compressão e compressão diametral.....	55
Tabela 9 - Propriedades Físicas do Solo	66
Tabela 10 - Resultados Curvas de Compactação.....	68
Tabela 11 - Composição química do solo (Ensaio FRX)	70
Tabela 12 - Composição química do solo (Ensaio EDS)	71
Tabela 13 - Valores máximos de tensão.....	74
Tabela 14 - Composição química da fibra de curauá (Ensaio FRX)	79
Tabela 15 - Composição química da fibra de curauá (Análise EDS)	80
Tabela 16 - Resultados de caracterização mecânica da fibra de curauá.....	81
Tabela 17 - Compressão simples do solo reforçado.....	83
Tabela 18 - Tração por compressão diametral do solo reforçado.....	86
Tabela 19 - Resultados de cisalhamento direto do solo reforçado com teor de 0,25%	89
Tabela 20 - Resultados de cisalhamento direto do solo reforçado com teor de 0,50%	90
Tabela 21 - Resultados de cisalhamento direto do solo reforçado com teor de 0,75%	91
Tabela 22 - Ângulo de atrito e coesão do solo reforçado.....	92
Tabela 23 – Análise da variância do teor e comprimento de fibra dos resultados à compressão simples.....	94
Tabela 24 – Análise da variância do teor e comprimento de fibra dos resultados à compressão simples.....	95
Tabela 25 - Síntese dos principais resultados	107

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
DRX	Difração de Raios X
EDS	Espectroscopia por Energia dispersiva
FRX	Espectrometria de Fluorescência de Raios X
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
EPS	Poliestireno Expandido

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Diâmetro real dos grãos
Φ	Ângulo de atrito
γ_d	Peso específico seco aparente
γ_w	Peso específico da água
A	Área
c'	Intercepto coesivo
D	Diâmetro
F_a	Resistência de aderência
F_t	Força de tração na fibra
G_s	Massa específica real dos grãos
H	Altura
IP	Índice de plasticidade
L	Comprimento
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
q_t	Resistência à tração por compressão diametral
q_u ou RCS	Resistência à compressão simples
RCD	Resíduo de construção e demolição
w	Teor de umidade
w_h	Umidade higroscópica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVO GERAL	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	FORMAÇÃO GEOLÓGICA GUABIROTUBA	17
2.2	ESTABILIZAÇÃO E REFORÇO DE SOLO	19
2.2.1	Estabilização Mecânica	20
2.2.2	Estabilização Física	21
2.2.3	Estabilização Química	22
2.3	SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS	24
2.3.1	Interação Solo-Fibra	26
2.3.1.1	Comprimento da fibra e orientação	26
2.3.1.2	Diâmetro da fibra	28
2.3.1.3	Relação L/D	29
2.3.1.4	Densidade	32
2.3.1.5	Teor de fibra	33
2.3.2	Fibras Naturais	35
2.3.2.1	Estrutura da fibra vegetal	38
2.3.2.2	Tratamento de fibras vegetais	39
2.3.2.3	Fibra de curauá (<i>Ananas erectifolius</i>)	41
2.3.2.4	Aplicação de fibras vegetais como reforço	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	46
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	47
3.2.1	Solo	47
3.2.2	Fibras	48
3.2.3	Água de adição	51
3.2.4	Material impermeabilizante	51
3.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	51
3.3.1	Caracterização Física	51
3.3.1.1	Análise granulométrica	52
3.3.1.2	Ensaio de mini-MCV	53
3.3.1.3	Ensaio de compactação	53
3.3.2	Caracterização Química	54
3.3.3	Caracterização Mecânica	55
3.3.3.1	Moldagem dos espécimes para ensaio de compressão simples e tração por compressão diametral	55
3.3.3.2	Moldagem dos espécimes para ensaio de cisalhamento direto	57

3.3.3.3	Ensaio de compressão simples.....	57
3.3.3.4	Ensaio de tração por compressão diametral.....	58
3.3.3.5	Ensaio de cisalhamento direto.....	59
3.4	CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA.....	59
3.4.1	Caracterização Química.....	60
3.4.2	Caracterização Física.....	60
3.4.3	Caracterização Mecânica.....	61
3.5	TRATAMENTO DA FIBRA VEGETAL.....	62
3.5.1	Avaliação Morfológica das Fibras.....	63
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	64
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	65
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NATURAL.....	65
4.1.1	Caracterização física e classificação do Solo.....	65
4.1.2	Ensaio de Compactação.....	68
4.1.3	Caracterização Química do Solo.....	70
4.1.4	Caracterização Mecânica do Solo.....	72
4.1.4.1	Ensaio de resistência à compressão simples.....	72
4.1.4.2	Ensaio de tração por compressão diametral.....	73
4.1.4.3	Resultados de cisalhamento direto.....	74
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA NATURAL.....	75
4.2.1	Resultados de caracterização física da fibra de Curauá.....	76
4.2.1.1	Absorção de água da fibra natural.....	76
4.2.1.2	Densidade.....	77
4.2.1.3	Análise microestrutural.....	77
4.2.2	Resultados de caracterização química da fibra de curauá.....	79
4.2.3	Resultados de caracterização mecânica da fibra de curauá.....	80
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO REFORÇADO.....	81
4.3.1	Resultados de Resistência à Compressão Simples.....	81
4.3.2	Resultados de Tração por Compressão Diametral.....	85
4.3.3	Resultados de Resistência ao Cisalhamento.....	89
4.3.4	Análise da Variância.....	94
4.3.5	Influência do Teor e Comprimento de Fibras.....	95
4.3.5.1	Compactação.....	95
4.3.5.2	Compressão simples.....	98
4.3.5.3	Tração por compressão diametral.....	100
4.3.5.4	Cisalhamento.....	102
4.3.6	Relação Empírica Entre q_t e q_u	105
4.3.7	Síntese dos Resultados.....	106
5	CONCLUSÕES.....	108
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
	REFERÊNCIAS.....	111

1 INTRODUÇÃO

Dentro da engenharia geotécnica o solo é o material de construção mais importante a ser utilizado, podendo também ser empregado como material de suporte de inúmeros projetos. Muitas vezes, a definição de suas propriedades é considerada complexa principalmente devido à variabilidade. O estudo dos seus comportamentos físico, químico e mecânico são imprescindíveis para determinar os parâmetros de projeto e construção.

Nos casos em que as propriedades do solo são consideradas insatisfatórias para a concepção de um projeto, a associação com outros materiais pode ser uma alternativa viável ao cumprimento dos requisitos exigidos. Neste intuito, surgem as técnicas de reforço, capazes de fornecer suporte a um solo até então considerado inapropriado.

Embora a associação de materiais ao solo seja uma técnica empregada desde a antiguidade e transmitida ao longo dos anos pelo senso comum, houve um momento em que surgiu a necessidade de se compreender com exatidão os efeitos dessa aplicação. De acordo com Vidal (1969), a combinação entre solo e reforço define a denominada “Terra Armada”, termo que o próprio autor patenteou. A partir de então, o conceito de reforço passou a ser empregado e cada vez mais estudado, associando o solo a diversos materiais como o cimento Portland (BALDOVINO *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2018; FAROUK; SHAHIEN, 2013; FORCELINI *et al.*, 2016), a cal (BOZBEY *et al.*, 2018; NEMATZADEH *et al.*, 2017; TEIXEIRA, 2018), as fibras poliméricas (CASAGRANDE, 2005; FESTUGATO, 2008) e as fibras vegetais (WANG *et al.*, 2019; TAN *et al.*, 2019; PACHAURI; GARG, 2019), dentre outros.

De acordo com Casagrande (2005), a utilização das fibras como elemento de reforço passou a ser investigada há pouco mais de três décadas. Os avanços nas áreas de ciência e engenharia de materiais propiciaram o desenvolvimento de materiais com propriedades de resistência e durabilidade melhorados. Deste modo, é realizada concepção de materiais com boas características de trabalhabilidade, baixa condutividade hidráulica e alta resistência.

Quando associadas ao solo, as fibras proporcionam alteração em suas propriedades mecânicas. Em geral, não impedem a formação de fissuras, mas atuam fortemente no controle de propagação da mesma, contribuindo para o estado pós fissuração que é onde a fibra apresenta maior destaque. Entretanto, para que as

melhorias ocorram são necessárias a determinação das propriedades do solo, da fibra e também as tensões de confinamento. Desta forma, é possível avaliar a viabilidade econômica da técnica de reforço e sua metodologia de aplicação (CASAGRANDE, 2005; SILVEIRA, 2018).

Conforme apontado por Santiago (2011), a utilização de materiais derivados da biomassa é impulsionada pelo desenvolvimento sustentável que ganha destaque com a proposta de preservação do meio ambiente. Por esse motivo, o emprego de fibras vegetais surge como uma alternativa viável e ecologicamente correta como técnica de reforço do solo. Além disso, Silveira (2018) destaca que os problemas de eliminação de resíduos e o esgotamento dos recursos petroquímicos impulsionam o desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras de origem natural.

Quando comparadas às fibras poliméricas, as fibras vegetais apresentam boa resistência mecânica (LEÃO; ROWELL; TAVARES, 1998) e menor custo (GOWTHAMAN; NAKASHIMA; KAWASAKI, 2018), em especial a fibra de curauá. De acordo com Liu *et al.* (2015), as fibras sintéticas estão perdendo espaço para as naturais devido à escassez de matéria-prima originária do petróleo.

As fibras vegetais possuem grande capacidade de absorção de umidade, variado em magnitude conforme o tipo de fibra. Segundo Santiago (2011), a absorção de umidade pode ser drasticamente reduzida pela modificação química das fibras e pela boa adesão entre a fibra e o solo. A avaliação da durabilidade dos compostos formados com fibras vegetais é o principal problema a ser investigado, pois podem ser degradadas pela ação de microrganismos, exceto quando há um tipo de tratamento.

Deste modo, técnicas de impermeabilização das fibras têm sido definidas para aumentar sua durabilidade sem que haja perda de resistência mecânica. Dentre os métodos de impermeabilização estudados estão a utilização de solução de EPS e cimento asfáltico de petróleo (SANTIAGO, 2011), sílica coloidal e copolímero (SILVEIRA, 2018) e a aplicação de óleos vegetais (TAN *et al.*, 2019).

Na realização desta pesquisa, foram avaliadas as propriedades mecânicas de resistência de um solo com a adição de fibras vegetais como técnica de reforço. Além disso, houve a investigação da influência da variação dos parâmetros de teor e comprimento da fibra no compósito. Em relação ao teor de fibras, foi verificado que teores muito elevados podem interferir na aderência entre o solo e a fibra, ocasionando perda de resistência. O mesmo foi verificado no comprimento da fibra

vegetal, enfatizando que existem medidas ótimas que melhor contribuem para uma melhor interação entre o solo e o reforço.

Embora os resultados sejam promissores, a técnica de reforço com fibras vegetais carece de mais estudos, principalmente no que tange à definição de medidas capazes de diminuir os efeitos da biodegradação e prolongar sua vida útil. Desta forma, é possível avaliar as vantagens da associação das fibras vegetais ao solo e também garantir que a técnica seja difundida no meio técnico.

1.1 JUSTIFICATIVA

A preservação do planeta é um dos objetivos principais do desenvolvimento sustentável. Técnicas como a reciclagem, reutilização e redução do consumo de matéria prima estão entre as ações necessárias para a construção de um mundo ecologicamente correto. Por esse motivo, o incremento de materiais alternativos e considerados sustentáveis é cada vez mais frequente, inclusive no setor da construção civil.

As fibras naturais são biodegradáveis e capazes de fornecer melhorias no comportamento mecânico de diversos materiais. Assim como as fibras poliméricas, as fibras naturais fornecem aumento de resistência e garantem maior ductilidade ao compósito quando aplicadas como reforço de solo

Neste intuito, a avaliação do comportamento das fibras vegetais no compósito de solo e a definição do teor, comprimento e o fator de forma, são algumas das medidas capazes de estimar a sua técnica de aplicação. Além disso, por se tratar de uma fibra vegetal, é importante investigar a biodegradação no compósito, a fim de definir o tempo em que a atuação da fibra é realmente efetiva.

Deste modo, visando prolongar a durabilidade da fibra vegetal, algumas técnicas de impermeabilização são empregadas, com destaque ao revestimento utilizando resíduos poliméricos (SANTIAGO, 2011). A reutilização de materiais contribui não somente para o prolongamento da vida útil da fibra vegetal, como também oferece uma nova destinação a resíduos de difícil reciclagem, contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

Esta pesquisa busca estudar o comportamento mecânico de compósitos de solo e fibras vegetal de curauá e também investigar um método de impermeabilização utilizando resíduos de poliestireno expandido. A escolha da fibra vegetal está associada principalmente às suas propriedades mecânicas e disponibilidade no Brasil. Além disso, o incentivo à produção e comercialização de materiais oriundos da região amazônica estimulando a economia local.

1.2 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo geral estudar a influência da inclusão de fibras vegetais de curauá em diferentes teores e comprimentos no comportamento mecânico de um solo fino da cidade de Curitiba, PR.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Estudar as propriedades físico-químicas do solo e da fibra natural de curauá;
- Avaliar os efeitos de degradação de superfície da fibra vegetal submetida a um ambiente úmido em zero e 60 dias de exposição através de análise microscópica;
- Avaliar as propriedades físicas da fibra vegetal após aplicação do tratamento por impregnação de EPS e
- Definir os teores e comprimentos ótimos de fibra vegetal a ser adicionada que confere aumento às propriedades mecânicas do solo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FORMAÇÃO GEOLÓGICA GUABIROTUBA

A formação de solos sedimentares é decorrente dos processos de decomposição, transporte e depósito. Os solos sedimentares são também denominados de “solos transportados” tendo em vista que sofreram algum tipo de transporte desde seu local de origem até o local onde foram depositados. Sua classificação é decorrente do tipo de transporte das partículas, podendo ser água ou vento (LAMBE; WHITMAN, 1969).

Segundo Houben e Guillaud (1994) o solo é oriundo de um processo longo de deterioração da rocha-mãe e evolução físico-química. Dependendo da rocha de origem e das condições climáticas, aparece sob uma infinidade de formas e variedade de características. O solo pode também ser definido como o material constituído de partículas sólidas que apresentam, entre si, vazios parciais ou totalmente preenchidos por água. É um sistema polifásico, formado por fases sólidas, líquidas e gasosas.

Sendo formada por sedimentos Terciário médio ao superior e Quaternário, a Bacia de Curitiba (Figura 1), está situada na porção centro-sul do Primeiro Planalto Paranaense, com área de aproximadamente 3;000 km² e abrangendo quase a totalidade do município de Curitiba e parte dos circunvizinhos, a denominada Região Metropolitana de Curitiba (PEREIRA, 2004; SALAMUNI; STELLFELD, 2001; SALAMUNI *et al.*, 2003; SALAMUNI; EBERT; HASUI, 2004).

Figura 1 - Localização da bacia de Curitiba



Fonte: SALAMUNI; EBERT e HASUI (2004)

O embasamento rochoso da Bacia de Curitiba é composto predominantemente por (a) metabasitos anfinolíticos e metaultrabasitos; (b) gnáisses-graníticos; (c) xistos, quartzitos finos; (d) migmatitos indiferenciados; e (e) corpos graníticos anatóticos, granitos alcalinos e subalcalinos (SALAMUNI; SALAMUNI; EBERT, 1999).

A bacia de Curitiba se caracteriza pela presença de uma série de depósitos sedimentares que se formaram a partir do período Terceário tendo como litologia principal as argilas, areias arcossianas, cascalheiras em meio a sedimentos areno-argilosos, lentes de areias quartzosas e depósitos carbonáticos restritos (KORMANN, 2002; SALAMUNI; SALAMUNI; EBERT, 1999).

Os solos da Formação Guabirota são formados por materiais de granulometria muito fina. Segundo Moreira *et al.* (2020), isto inviabiliza sua aplicação na pavimentação como base, sub-base ou reforço de sub-base. Sendo assim, o estudo e o conhecimento dos materiais que compõem esta Formação torna-se um importante requisito para engenharia geotécnica.

Na engenharia, as propriedades dos solos oriundos da Formação Guabirota são objeto de estudo em diversas pesquisas que avaliam seu comportamento mecânico associado a produtos como a cal (BALDOVINO, 2018; TEIXEIRA, 2019), cimento (BALDOVINO *et al.*, 2020a; BALDOVINO *et al.*, 2020b) e recentemente, o emprego de resíduos oriundos da construção civil, tais como o vidro (BALDOVINO *et al.* 2020c), rochas ornamentais (CARDOSO, 2019) e o próprio RCD (MOREIRA, *et al.*, 2020), que é composto por vários materiais gerados na construção e/ou demolição.

2.2 ESTABILIZAÇÃO E REFORÇO DE SOLO

Devido à sua formação e à ação de agentes naturais, o solo pode ser considerado um material complexo, variável e de maior abundância na crosta terrestre. Quando comparado a outros materiais de construção, tem baixas propriedades mecânicas. No entanto, é um material necessário, sustentável e com a realização de procedimentos de melhorias são capazes de garantir o cumprimento dos requisitos básicos para a execução de projetos (CASAGRANDE, 2005; PALMEIRA, 2004; SILVEIRA, 2018; TRAN; SATOMI; TAKAHASHI, 2018).

O reforço ou melhoramento de solo compreende o emprego de processos naturais e artificiais que visam aperfeiçoar as suas propriedades mecânicas, aumentando a resistência e durabilidade e diminuindo a compressibilidade e a permeabilidade. Além disso, garantir que tais ganhos estejam presentes ao longo da vida útil das obras de engenharia. O termo melhoria de solos está associado ao tratamento através de processos químicos, enquanto que o reforço está associado à adição de inclusões em obras de terra (CASAGRANDE, 2005; PINTO, 2008).

A vantagem do emprego de materiais compósitos, caso dos solos reforçados em relação aos convencionais está assegurada no ganho de resistência e alta rigidez, devido ao emprego de materiais. Tal categoria vem ganhando destaque na área de engenharia dos materiais devido ao número crescente de publicações na literatura (HOLLAWAY; HEAD, 2001; ILLSTON; DOMONE, 2001).

Conforme Pinto (2008), a estabilização do solo é um problema complexo que envolve um número considerável de parâmetros como as propriedades do solo, custo de estabilização, as melhorias a serem obtidas, as técnicas construtivas, o sistema de construção adotado e os custos de manutenção. Por isso, exige técnica e conhecimento para a adoção do melhor método de estabilização.

Segundo Kézdi (1979), os métodos de estabilização são classificados de acordo com a sua finalidade. Dentre os principais métodos, têm destaque as estabilizações mecânica, física e química.

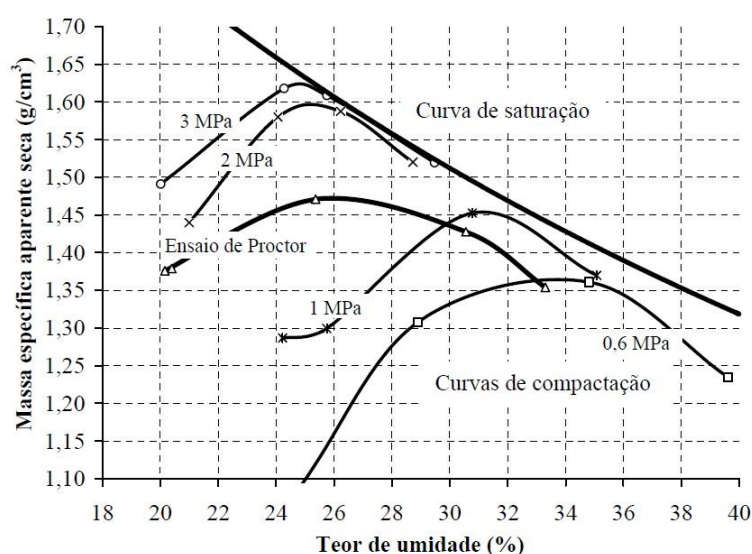
2.2.1 Estabilização Mecânica

O método mecânico fornece estabilidade ao solo sem adição de qualquer material estranho. Consiste basicamente na alteração da densidade do solo combinando diferentes técnicas, onde a compactação quase sempre é necessária. De acordo com Kézdi (1979), a estabilização pode ocorrer conforme as seguintes técnicas:

- i) Redução do volume de vazios do solo através da compactação;
- ii) Por drenagem e manutenção do teor de água a um nível constante e
- iii) Mistura de diferentes tipos de solos.

Um dos princípios fundamentais da Mecânica dos Solos foi divulgado em 1933 pelo engenheiro norte-americano R. Proctor, estabelece a relação entre a água e a densidade do solo durante o processo de compactação. A denominada curva de compactação relaciona o teor de umidade, do inglês OMC (*optimum moisture content*), e o peso específico, MDD (*maximum dry unit weight*), conforme Figura 2. Com a adição de água e a energia de compactação constante, a densidade aparente do solo aumenta até o ponto denominado de umidade ótima. Ao se acrescentar teores de água acima do ótimo, a densidade tende a diminuir, porque ocorre uma lubrificação das partículas e facilitação do preenchimento de todos os vazios (GRANDE, 2003).

Figura 2 - Curva de compactação



Fonte: Pinto (2008)

O aumento da densidade do solo através da compactação é capaz de reduzir os vazios, aumentar a resistência e a durabilidade do solo, e diminuir a compressibilidade e a permeabilidade. A redução dos poros também inibe a erosão provocada pelo efeito da percolação da água (MALLICK; EL-KORCHI, 2013; PINTO, 2008).

As propriedades do solo não são afetadas pelo teor de umidade nos solos granulares, mas sim pela densidade obtida no processo de compactação. Já em solos coesivos, a estrutura do solo (floculada ou dispersa) pode influenciar nas propriedades do solo, mesmo para densidades secas iguais (MALLICK; EL-KORCHI, 2013).

Deste modo, é importante definir as propriedades desejadas do solo e selecionar o método adequado para o controle da densidade, avaliando o nível de compactação no teor de umidade desejado. Conforme Mallick e El-Korchi (2013), devem ser considerados os seguintes fatores na compactação em campo:

- i) Tipo de solo;
- ii) Tamanho dos rolos, peso e área de contato;
- iii) Espessura da camada – quanto mais espessa, menos eficaz é a compactação;
- iv) Número de passadas e
- v) Força e rigidez do material de base.

2.2.2 Estabilização Física

No caso da estabilização física, são consideradas as alterações nas propriedades de material e na sua textura, incluindo efeitos de temperatura, evaporação e hidratação. A adição de fibras ao solo (metálicas, vegetais, sintéticas ou minerais) e a correção granulométrica são exemplos que se enquadram dentro deste tipo de estabilização. A partir desta combinação, surge um terceiro produto que agrega as propriedades dos materiais que o compõem, designado como material compósito (KÉZDI, 1979; PINTO, 2008).

O material compósito é resultado da combinação de dois materiais distintos e agrega as propriedades de suas fases constituintes. Os compósitos foram criados

para prover a combinação de características mecânicas como rigidez, tenacidade e resistência a altas temperaturas, entre outros (SALES, 2006).

2.2.3 Estabilização Química

Conforme Kézdi (1979), as reações químicas presentes na estabilização do solo são a troca de íons, a precipitação, a polimerização e a oxidação. No processo de estabilização, é importante que sejam consideradas mudanças de outras propriedades durante o processo de estabilização, oriundas dos efeitos do teor de água, permeabilidade, grau de saturação, dentre outros (ÅHNBERG, 2006; LIM *et al.*, 2014).

Embora não seja escopo da presente pesquisa, a estabilização química pode ser encontrada em muitos trabalhos da literatura, conforme apresentado na Tabela 1. Dentre os materiais utilizados em misturas com solos destacam-se o cimento Portland, cal, geopolímeros e materiais oriundos da queima do cimento. Técnicas de estabilização também são observadas com a adição de cinza de casca de arroz, cloretos, aditivos de argila e emulsões eletrolíticas, dentre outros (LIM *et al.* 2014).

Tabela 1 - Principais materiais de reforço de solo

Material	Autor
Cimento Portland	Chen et al., (2018); Farouk e Shahien, (2013); Forcelini et al., (2016); Horpibulsuk et al., (2012); Lin e Wong, (1999); Bunawan et al., (2018).
Cal	Bozbey et al., (2018); Nematzadeh et al., (2017)
Geopolímeros	Ghadir e Ranjbar, (2018); Rimal, Poudel e Gautam, (2018) Yaghoubi et al., (2019).

O uso destes materiais se dá principalmente pelas suas propriedades aglutinantes ou ligantes e, quando combinado ao solo, contribuem significativamente para o ganho de resistência, redução da permeabilidade e compressibilidade.

A adição de cimento ao solo é uma técnica bastante relevante quando se trata de estabilização de solo. Através dela, é possível a construção de estruturas em solos moles e também a utilização deste material como base de pavimentos rodoviários e ferroviários (ÅHNBERG, 2006; FAROUK; SHAHIEN, 2013; FORCELINI *et al.*, 2016; SIRIVITMAITRIE *et al.*, 2011).

O sucesso da técnica de estabilização química ocorre devido às propriedades aglutinantes dos materiais. O cimento Portland, por exemplo, é recomendado para a estabilização de qualquer tipo de solo com exceção dos altamente orgânicos e contribui significativamente para ganhos de resistência e durabilidade e a diminuição da compressibilidade (CHEN *et al.*, 2018; LIN e WONG, 1999; LIM *et al.*, 2014).

Conforme Lin *et al.* (1999) e Farouk e Shahien (2013), a resistência de solos estabilizados com cimento varia inversamente com o teor de água, ou seja, à medida que o teor água-cimento aumenta, ocorre a diminuição da resistência à compressão do solo misturado. No módulo de elasticidade, este fator apresenta efeitos quase insignificantes.

Cabe lembrar que pesquisas têm avaliado a adição de outros materiais no processo de estabilização de solos moles, como é nos casos dos geopolímeros. O incremento destes novos materiais tem o interesse ambiental na diminuição da emissão de gás carbônico e por questões econômicas. No estudo de Yaghoubi *et al.* (2019), uma argila marinha foi estabilizada com diferentes percentuais de cinzas volantes e escórias, e foram observados ganhos de resistência superiores a 40% quando o percentual deste material passou de 10% para 20% com 28 dias de tempo de cura.

No processo de geopolimerização do solo e suas misturas, a água desempenha um papel muito importante. Ao se comparar solos estabilizados com cimento e geopolímeros, constata-se que o tratamento com cimento Portland é excelente em ambientes úmidos, enquanto os geopolímeros são mais eficientes em condições secas (GHADIR, 2018).

Em sua pesquisa, Bunawan *et al.* (2018), destacaram o emprego de técnicas eficientes capazes de permitir construções sobre solos moles melhorando suas propriedades mecânicas com destaque ao método de mistura profunda (DMM) com estabilização de superfície. Além disso, além de eficiente o método mostrou-se economicamente viável.

2.3 SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS

A adição de materiais para reforço do solo é uma técnica existente desde a antiguidade. Exemplo disso foi a aplicação de fibras vegetais pelos mesopotâmicos há cerca de 5.000 anos na construção do templo de Zigurate de Ur, no atual Iraque. Aplicações semelhantes foram relatadas na China, na construção de reforços de barragens e em trechos da Muralha da China. Os Incas também utilizaram esta técnica em estradas reforçadas com adição de lã de vicunha (PALMEIRA, 1992).

Em geral, as fibras estão inseridas no grupo dos materiais geossintéticos. Segundo Palmeira (1995), os geotêxteis mais conhecidos são as fibras, mantas de fibras ou filamentos, tecidos e não tecidos. São empregados em soluções geotécnicas para problemas envolvendo reforços, estruturas de contenção, estabilidade de taludes, aterros, estabilização de solos, drenagem e filtração, barreiras de fluidos e gases, controle de erosão, barreiras de sedimentos, proteção ambiental dentre outras aplicações (PALMEIRA, 2018).

Os materiais fibrosos são empregados desde soluções geotécnicas até problemas envolvendo reforços, estruturas de contenção, estabilidade de taludes, aterros, estabilização de solos, drenagem e filtração, barreiras de fluidos e gases, controle de erosão, barreiras de sedimentos, proteção ambiental, dentre outras aplicações (PALMEIRA, 2018).

No caso da construção de pavimentos, os geossintéticos são empregados principalmente na separação do subleito com a base, evitando a contaminação dos materiais que compõem estas camadas e no fortalecimento do subleito para solos considerados de baixa resistência (MALLICK; EL-KORCHI, 2013).

Conforme Casagrande (2005), tanto no Brasil como em outros países, são conhecidas aplicações de mantas de folhas e galhos sobre solos moles antes da construção de aterros. Todavia, foi a partir de 1969, quando Henry Vidal patenteou a técnica denominada "Terra Armada", que o conceito de solo reforçado passou a ser empregado com maior vigor. No Brasil, os geossintéticos foram primeiramente empregados no início da década de 80, em obras de drenagem e infiltração e como reforço de solo.

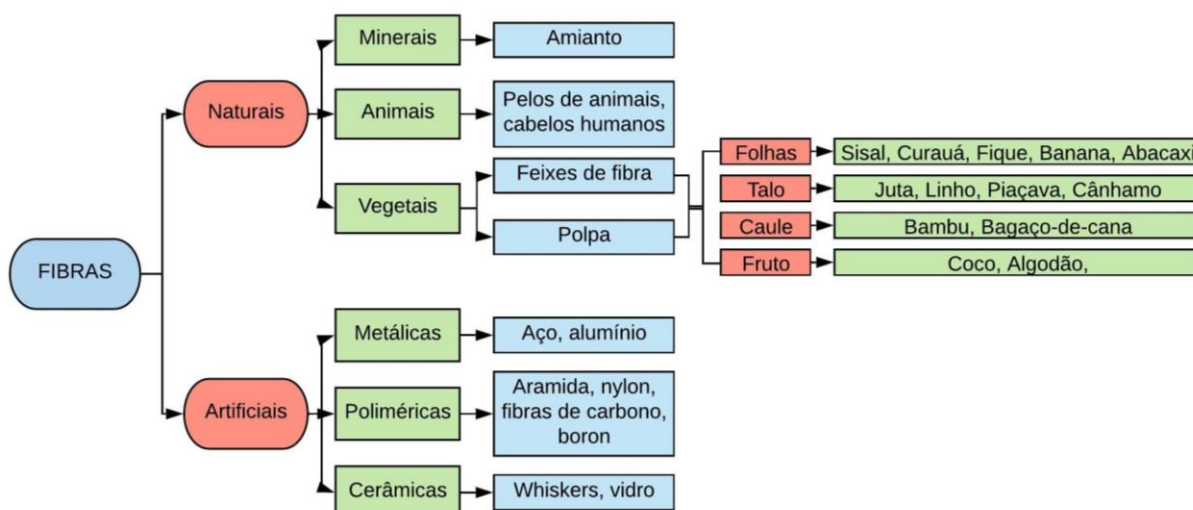
Deste modo, técnicas de reforço utilizando fibras passaram a ser cada vez mais estudadas e aplicadas tanto em solos (GALVEZ, 2018; GIRARDELLO, 2014; SILVEIRA, 2018), quanto em compósitos cimentícios na elaboração de argamassas e

concretos (MASSONE; NAZAR, 2018; WEBER, 2018). Para tanto, é primordial que se conheçam as propriedades físicas, mecânicas e químicas do material a ser empregado e de que maneira se dará essa combinação (PALACIOS, 2012).

O conceito de fibrossolo é empregado para definir compósitos constituídos pela inclusão de fibras curtas ao solo (CABALA, 2007), capazes de apresentar melhorias às suas propriedades de resistência e principalmente a ductilidade (ARAYA-LETELIER *et al.*, 2018; GHAVAMI; TOLEDO FILHO; BARBOSA, 1999; KURUGODU *et al.*, 2018; WEI *et al.*, 2018) além de dar suporte na execução de obras de pavimentação (RESCHETTI JUNIOR, 2008) e fundações (GIRARDELLO, 2014). Kaniraj e Havanagi (2001), observaram melhorias de resistência à compressão simples de 545% com uma mistura reforçado com fibras PET.

Atualmente há uma grande diversidade de fibras que podem ser usadas como reforços. Elas podem ser classificadas conforme Figura 3, em função da sua origem: animal, vegetal, mineral, poliméricas e metálicas.

Figura 3 - Classificação das fibras



Fonte: Adaptado de Santiago (2011).

Na literatura, pesquisas relevantes citam o uso de fibras de pelos de porco (ARAYA-LETELIER *et al.*, 2018), fibras de vidro (RESCHETTI JUNIOR, 2008;), fibras de coco (BORDOLOI *et al.*, 2017), sisal (GHAVAMI; TOLEDO FILHO; BARBOSA, 1999), curauá (PINTO, 2008; SILVEIRA, 2018), juta (WEI *et al.*, 2018), palha de trigo (QU e SUN, 2016), polipropileno (GÁLVEZ, 2018; GIRARDELLO, 2014;

JAMSAWANG *et al.*, 2018; RESHETTI JUNIOR, 2008; WEI *et al.*, 2018) dentre outras. Devido à sua disponibilidade no mercado e boas propriedades mecânicas, as fibras plásticas são as mais utilizadas na aplicação de solo reforçado. Entretanto, as naturais vêm atraindo a atenção principalmente por ser uma alternativa sustentável.

O comportamento de cada tipo de fibra, assim como suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, está intimamente relacionado ao material que as compõem e ao seu processo de fabricação. Conseqüentemente, devem ser estudadas para avaliar o desempenho do material compósito.

2.3.1 Interação Solo-Fibra

Quando se trata de compósitos fibrosos, são muitos os fatores que influenciam nas características e parâmetros de resistência do material reforçado. Grande parte dos estudos realizados comparam solos reforçados com os não reforçados, o que implica em inúmeras interações. Conforme Ibrahim *et al.* (2010), a eficácia do reforço é influenciada pelas propriedades da fibra com destaque ao tipo de fibra, comprimento, volume, módulo de elasticidade, e a interação com as características do solo. As principais propriedades das fibras e a influência das mesmas no compósito serão abordadas a seguir

2.3.1.1 Comprimento da fibra e orientação

Estudos destacaram que o comprimento das fibras dentro do compósito tem influência direta na resistência. A área de contato entre a fibra e as partículas de solo aumenta para maiores comprimentos, gerando maior atrito. No entanto, o aumento da resistência é observado até certo ponto. Efeitos da falta de dispersão das fibras causam sobreposições e, conseqüentemente, interfaces de baixa resistência, resultando na queda de resistência do compósito (GRAY; OHASHI, 1983; ROQUE, 2017; TAYLOR, 1994; WEI *et al.*, 2018).

Em ensaios de cisalhamento *ring shear*, que admite maiores deformações, independentemente do comprimento inicial do reforço, as fibras sofrem grande

deformações plásticas (CASAGRANDE, 2005), chegando inclusive à ruptura, sobretudo nos casos de fibras maiores (CONSOLI *et al.*, 2007).

O tamanho da fibra é um fator que influencia no ganho resistência do compósito. No entanto, existe um denominado comprimento ótimo de fibra, que confere maior resistência ao compósito (SILVEIRA, 2018). Wei *et al.* (2018) destacaram que o comprimento ótimo de fibras é de cerca de 30-40% do diâmetro da amostra. Para Consoli *et al.* (2007), as fibras finas e longas apresentam baixa eficiência devido ao emaranhamento na matriz de solo.

Em uma areia não cimentada Consoli *et al.* (2002) avaliaram a adição de fibras PET e constataram que os ganhos de resistência foram significativos. Os autores também citaram que a eficiência do reforço em um solo cimentado depende do comprimento da fibra, sendo que os melhores resultados foram atingidos com fibras de 36 mm.

Roque (2017) observou que fibras corrugadas de 25 mm apresentaram melhores resultados em ensaio de compressão diametral quando comparada com fibras de mesmo material com 50 mm devido à sua melhor interação com o solo. Além disso, houve acréscimo de resistência para solos com teor de umidade acima de 13%.

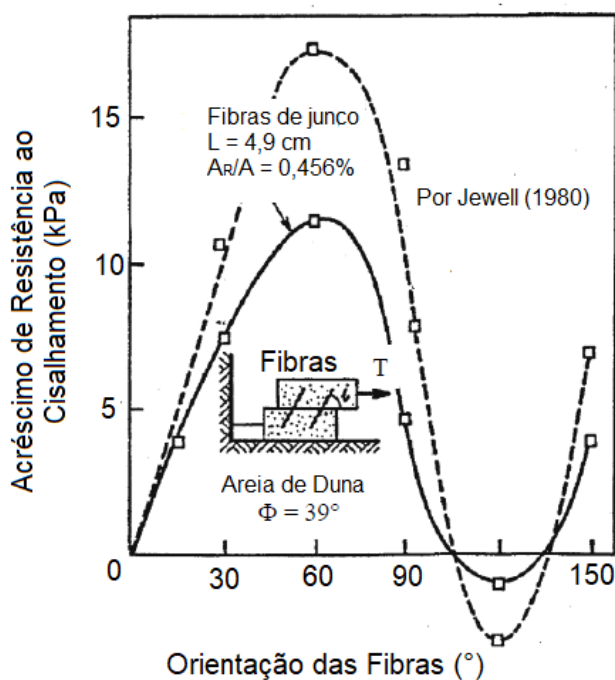
Santiago (2011) constatou que, para areias reforçadas com fibras naturais, não houve ruptura por tração nas fibras sob condições de compressão triaxial. A interação entre a matriz de solo e as fibras ocorreu por deslizamento, que é quando a tensão de confinamento está abaixo da resistência última à tração da fibra. O efeito de deslizamento das fibras também é notado por Harmia (1996), para o caso de fibras orientadas perpendicularmente às fissuras. Nos casos em que estão paralelas às fissuras, ocorre o denominado efeito de descolamento.

Com relação à orientação das fibras, Gray e Ohashi (1983), avaliaram o comportamento da inclinação das mesmas em uma areia reforçada em ensaios de cisalhamento direto. Conforme a Figura 4, os autores constataram que a inclinação da fibra exerce influência significativa na resistência do compósito. A fibra inclinada a 60° apresenta o maior acréscimo de resistência devido à coincidência entre esta posição e o plano de tensão de tração da areia.

Embora a inclinação da fibra seja uma variável importante para se obter resultados satisfatórios de resistência, deve-se garantir este que este parâmetro seja devidamente seguido. Além disso, no ensaio de cisalhamento direto o plano de ruptura é pré-definido o que não ocorre no ensaio triaxial, por exemplo. Maher e Gray (1990),

constatarem que fibras distribuídas aleatoriamente apresentam vantagens quanto à resistência isotrópica sem o desenvolvimento de planos preferenciais de fraqueza ou força.

Figura 4 - Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra



Fonte: Adaptado de Gray e Ohashi (1983)

2.3.1.2 Diâmetro da fibra

Para Vendruscolo (2003), o diâmetro das fibras e a distribuição granulométrica do solo influenciam na resistência de pico e última da matriz, sendo que o efeito da adição de fibras é mais enfático para maiores comprimentos e teores. Além disso, o aumento do diâmetro das fibras ocasiona um decréscimo da tensão de ruptura, uma vez que o teor se mantém constante e o diâmetro é inversamente proporcional ao número de fibras.

Casagrande (2005) avaliou a aplicação de fibras de polipropileno de comprimentos e diâmetros distintos. Segundo a publicação, as fibras de menor diâmetro proporcionam uma melhor interação solo-fibra devido à flexibilidade e a

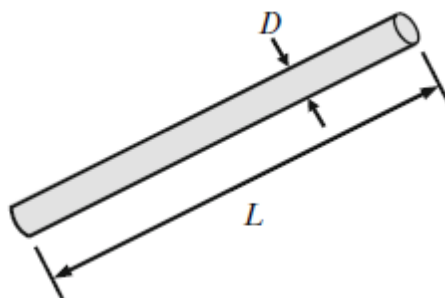
mobilização no interior da massa de solo, atuando positivamente na melhora do comportamento resistente do material. Entretanto, em relação aos efeitos da tensão de confinamento, as fibras de menor diâmetro tendem mais ao rompimento para tensões menores.

De acordo com Babu, Vasudevan e Sayida (2008), a tensão de resistência de um solo reforçado com fibra de coco sofreu um acréscimo de 30% com o aumento do teor de fibra, bem como, no aumento do diâmetro da mesma.

2.3.1.3 Relação L/D

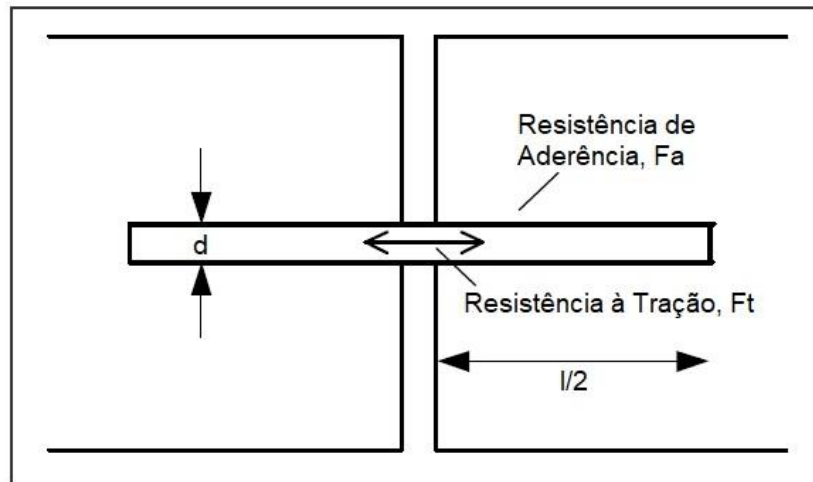
O comprimento e o diâmetro ambos apresentados na Figura 5, são parâmetros fundamentais na definição da geometria da fibra, e têm extrema importância na composição do reforço/matriz. A relação entre os parâmetros L/D (comprimento/diâmetro) denominada índice aspecto ou fator de forma, contribui significativamente para a resistência do compósito.

Figura 5 - Dimensões geométricas da fibra



Fonte: Shukla (2017).

Taylor (1994) define as Equações 1 e 2 que representam as condições de equilíbrio de forças no instante em que a fibra sofre uma sollicitação, conforme Figura 6.

Figura 6 - Disposição fibra/fissura

Fonte: Festugato (2008).

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot F_t = \pi \cdot d \cdot \frac{1}{2} \cdot F_a \quad (1)$$

$$\frac{l}{d} = \frac{F_t}{2F_a} \quad (2)$$

Onde:

d é o diâmetro da fibra

l é o comprimento da fibra

F_t é a resistência da fibra à tração e

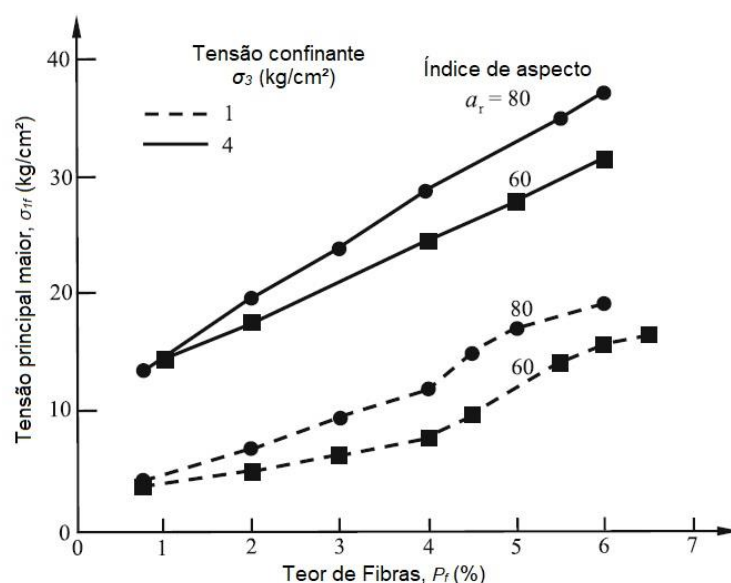
F_a é a resistência de aderência da fibra à massa de solo

De acordo com a Equação 2, o fator de forma é proporcional à resistência da fibra à tração (F_t) e a resistência de aderência (F_a) da fibra à massa de solo (FESTUGATO, 2008). Deste modo, se o comprimento da fibra for elevado, a resistência de aderência também aumenta, e para o caso em que a resistência da fibra é muito alta, aderência entre a fibra e a matriz também deve ser alta para impedir o arrancamento. Alternativamente devem ser utilizadas fibras de alta relação L/D .

Festugato (2008), Ibraim *et al.* (2010), Maher e Gray (1990) e Silveira (2018), constataram um aumento na resistência ao cisalhamento em fibras com alto fator de forma, vide Figura 7. Além disso, Festugato (2008) e Maher e Gray (1990) também verificaram que o aumento de L/D ocasiona a redução de uma tensão de confinamento crítica, tornando mais eficaz a contribuição da fibra à resistência ao cisalhamento.

De acordo com Qu e Sun (2016) para um teor fixo de fibra, um fator de forma elevado significa maior volume de material e, conseqüentemente, maior é o atrito entre a fibra e as partículas de solo. Valores elevados para o fator de forma também contribuem para diminuição da expansão e aumento do intercepto coesivo. O aumento do fator de forma também ocasiona diminuição da expansão e aumento no intercepto coesivo (FESTUGATO, 2008).

Figura 7 - Efeito do teor de fibras com relação ao aumento do índice de aspecto



Fonte: Adaptado de Maher e Gray (1990)

Santiago (2011) e Silveira (2018) avaliaram fibras vegetais de curauá e sisal associadas a solos arenosos. Por ser mais fina, a fibra de curauá apresentou fator de forma mais elevado, justificando maior resistência ao cisalhamento desse tipo de fibra sobre a fibra de sisal. Os fatores de forma das fibras de sisal e curauá obtidos por Silveira (2018) foram respectivamente de 146,11 e 352,11. Este estudo também

observou que o aumento no fator de forma acarretou no acréscimo do ângulo de atrito e do intercepto de coesão do solo.

Tendo em vista a contribuição do aumento do fator de forma, conforme mencionado anteriormente, valores elevados deste parâmetro podem não favorecer alguns tipos de fibras. As fibras vegetais, por exemplo, estão mais suscetíveis ao ataque de fungos e a redução do diâmetro do reforço pode acelerar o processo de decomposição e, conseqüentemente, perda de resistência. Silveira (2018) avaliou técnicas de impermeabilização da fibra vegetal para impedir e/ou retardar a decomposição da fibra, no entanto, o emprego dos materiais causa uma união entre as fibras e diminuição do fator de forma, afetando também na resistência do solo reforçado.

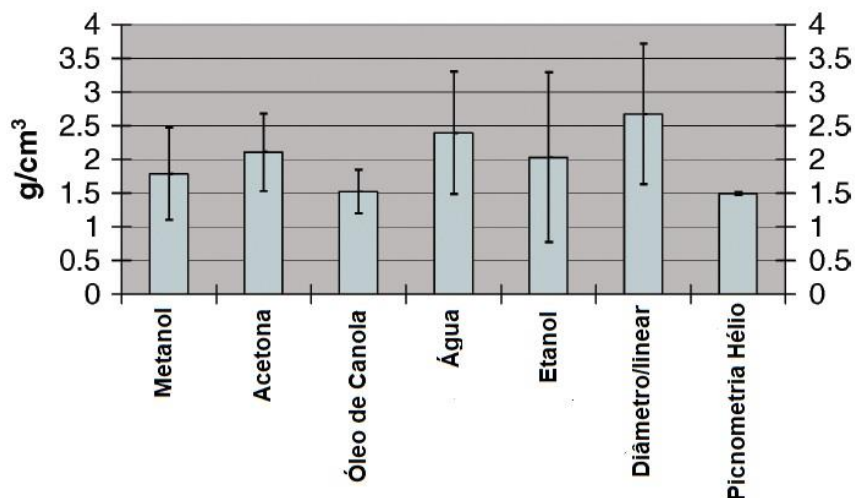
2.3.1.4 Densidade

A avaliação da qualidade dos materiais compósitos abrange o conhecimento da fração e volume de vazios das fibras. Tais parâmetros baseiam-se na densidade das fibras e são definidas pela na norma ASTM D3171 (1999).

Truong *et al.* (2009) identificaram cinco importantes métodos abordados pela literatura para determinar a densidade de fibras: densidade linear e cálculo do diâmetro, Arquimedes, picnômetro de hélio, coluna gradiente e picnometria líquida. Com relação aos métodos de determinação da densidade da fibra, o método de Arquimedes utilizando óleo de canola como fluido de imersão e a picnometria de hélio, conforme Figura 8, apresentam vantagens sobre os demais devido à sua precisão e melhor repetibilidade.

Casagrande (2005) verificou o efeito da densidade em compósitos de areias reforçadas com fibras. A variação da densidade relativa tem um forte efeito sobre a resistência do material reforçado e, quanto mais densa for a mistura, maior é o ganho de resistência e melhor é o intertravamento entre as fibras e a matriz.

Figura 8 - Variação da densidade da fibra em diferentes testes

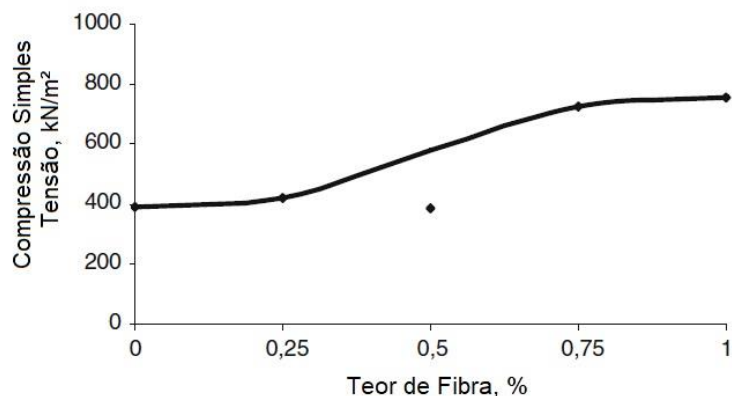


Fonte: Adaptado de Truong *et al.* (2009).

Nota-se que a água e o etanol, líquidos de fácil obtenção, foram os que apresentaram maior dispersão entre os resultados.

2.3.1.5 Teor de fibra

Zaimoglu e Yetimoglu (2012), avaliaram a influência do teor de fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente em solo fino por meio de ensaio de compressão simples, vide Figura 9. Os autores constataram que a resistência tende a aumentar de acordo com o aumento do teor de fibras, mas essa taxa não é significativa para teores superiores a 0,75%. Efeito similar também é observado nas curvas obtidas em ensaios de CBR, onde a resistência aumenta até um teor ótimo e posteriormente não é mais relevante.

Figura 9 - Efeito do teor de fibra na compressão simples

Fonte: Adaptado de Zaimoglu e Yetimoglu (2012).

De maneira análoga ao apresentado na Figura 9, efeitos de crescimento de resistência também são observados por Consoli *et al.* (2007), Qu e Sun (2016) e Meher e Gray (1990) na resistência ao cisalhamento do compósito com teores crescentes de fibra. Isso ocorre devido ao maior contato entre a fibra e o solo. No entanto, este aumento é observado até um determinado limite, influenciado principalmente pela tensão confinante e o fator de forma. Em outras palavras, Silveira (2018) destaca que há um teor ótimo de fibra capaz de fornecer maior resistência.

Para Qu e Sun (2016), o ângulo de atrito em termos de tensões totais e efetivas sofre um aumento até o teor ótimo de fibra, o mesmo ocorrendo com a rigidez do solo. Todavia, segundo Zaimoglu e Yetimoglu (2012), o aumento no teor de fibras aumenta a coesão, mas o ângulo de atrito não é alterado significativamente. Para Santiago (2011), o efeito do material fibroso na rigidez inicial do compósito depende das características do mesmo. Deste modo, o teor de fibra é uma variável que precisa ser conhecida para garantir os maiores valores de resistência.

O aumento na energia de compactação é necessário para produzir amostras com maiores teores de fibras a uma dada densidade seca. Isso deve ser considerado em uma análise de custo-benefício: melhoria do desempenho ou uso de solos reforçados de baixa densidade (IBRAIM *et al.*, 2010).

2.3.2 Fibras Naturais

As fibras naturais, em especial as vegetais, são amplamente utilizadas pelo homem desde a antiguidade. Atualmente, seu uso está associado à fabricação de peças de artesanato e também ao desenvolvimento de produtos sustentáveis, substituindo as fibras de origem poliméricas derivadas do petróleo.

Conforme Santiago (2011), a indústria automotiva fez significativos avanços quanto ao desenvolvimento de compósitos de fibras naturais para serem utilizadas em peças de automóveis a partir da década de 90, pelo impulsionamento da consciência ambiental e também por serem materiais alternativos de baixo custo e baixo consumo energético quando comparados a outras fibras. A Tabela 2 apresenta um comparativo entre os custos de fibras sintéticas e fibras vegetais.

Tabela 2 - Principais materiais de reforço de solo

Material Fibra		Custo (USD/Ton)	Cons. Energético (GJ/Ton)
Fibra de Carbono		12.500	130
Fibra de Aramida	Fibra de material sintético	75.000	25
Fibra de Vidro		1.200-1.800	30
Fibra Vegetal	Alternativa sustentável	200-1.000	4

Fonte: Adaptado de Gowthaman; Nakashima e Kawasaki (2018).

Segundo Staiger e Tucker (2008), mudanças na legislação americana e europeia (principalmente no setor automotivo) impulsionaram o emprego de materiais recicláveis e biodegradáveis, como é o caso das fibras naturais extraídas da madeira ou de plantas. Deste modo, as fibras naturais servem de alternativa barata e renovável, ao mesmo tempo que oferecem alta resistência e rigidez. Para Liu *et al.* (2015), as fibras sintéticas estão perdendo espaço para as fibras naturais devido à escassez da matéria-prima originária do petróleo.

Embora pareça uma ótima alternativa capaz de substituir as fibras industrializadas presentes no mercado, Shukla (2017) destaca algumas desvantagens práticas quanto à reprodução da técnica e biodegradação das fibras. A variabilidade das fibras também é um destaque negativo quanto à sua aplicação, já que sua geometria varia significativamente. Deste modo, técnicas de revestimento são estudadas com a finalidade de combater os efeitos da degradação (AHMAD; BETENI; AZMI, 2010; SANTIAGO, 2011).

Na engenharia civil, a aplicação de fibras vegetais é observada em compósitos cimentícios e também como reforço de solos. Oliveira *et. al.* (2014) e Borges (2017) avaliaram a adição de fibras vegetais de bambu, cana-de-açúcar, sisal e rami incorporadas em compósitos cimentícios. Adicionalmente, Weber (2018) estudou a viabilidade da incorporação de fibras vegetais de curauá a compósitos cimentícios laminados. O estudo constatou que a viabilidade da técnica é aplicável para adição de até 15% de volume de fibra.

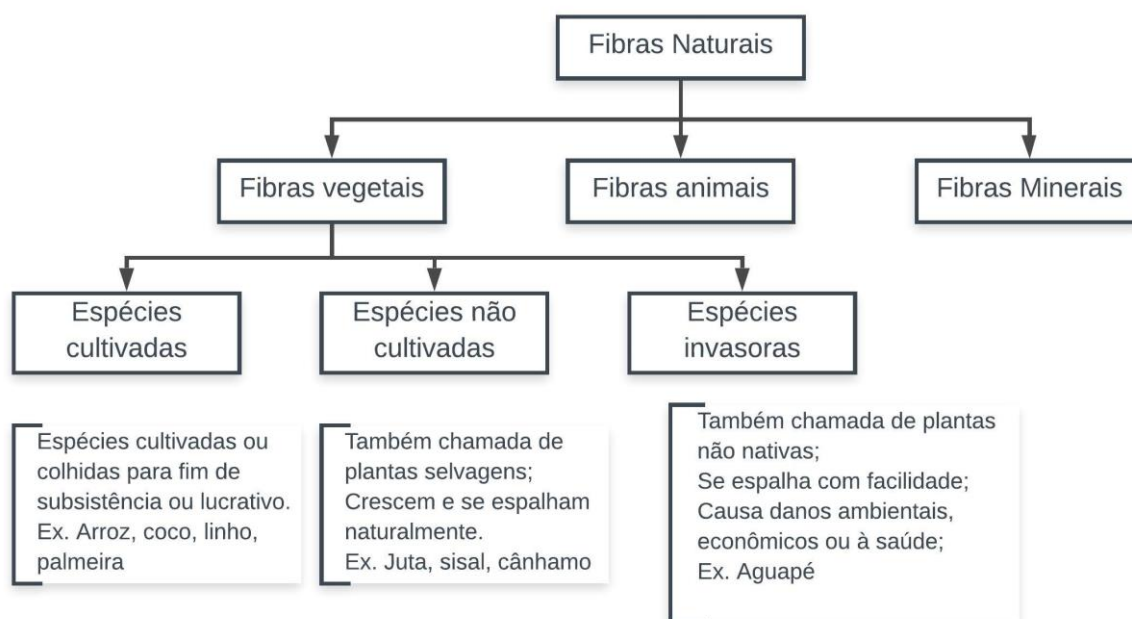
Conforme descreve Aguilar (2015) e Silveira (2018), as fibras vegetais podem ser obtidas e classificadas conforme sua origem nas plantas podendo ser agrupadas em fibras de caule, fibras de folhas, fibras de sementes e fibras de fruto (vide Tabela 3). As fibras de juta, linho, cânhamo, por exemplo, são fibras retiradas do caule e as fibras de curauá, sisal e banana são oriundas das folhas da planta.

Tabela 3 - Estrutura de origem de fibras vegetais

Estrutura de origem	Fonte da Fibra
Colmo	Bamboo
Caule	Juta, Cana-de-açúcar, Aguapé, Linho, Cânhamo, Kenaf
Folha	Sisal, Curauá, Banana
Palha	Pinheiro, Cevada, trigo
Fruto	Coco, Dendê, Açaí
Casca	Arroz

Fonte: Adaptado de Gowthaman, Nakashima e Kawasaki (2018).

A origem da planta e o método de cultivo também são relevantes na definição das propriedades da fibra e na definição de questões econômicas. Plantas com maior disponibilidade no mercado apresentam maior facilidade de coleta e beneficiamento. Deste modo, Gowthaman, Nakashima e Kawasaki (2018) classificam as fibras com base no aspecto de cultivo, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Ilustração esquemática de categorias de fibras naturais incorporadas ao solo

Fonte: Adaptado de Gowthaman, Nakashima e Kawasaki (2018).

As fibras vegetais apresentam grande variabilidade de suas propriedades inclusive considerando fibras de mesmo tipo ou do mesmo lote de produção. De acordo com a Tabela 4, nota-se que as fibras de curauá, linho e bambu apresentaram maior resistência à tração e módulo de elasticidade acima de 20 GPa. Tais características mecânicas fornecem alta resistência e justificam a sua aplicação desses materiais na indústria automotiva, na engenharia de materiais e na construção civil.

Tabela 4 - Propriedades das fibras vegetais

Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (10 ³ kg/m ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)
Algodão	16 - 21	1,5 - 1,6	5,5 - 12,6	287 - 597	7 - 8
Coco	100 - 450	1,5 - 1,45	4 - 13	175	15 - 40
Curauá	60 - 100	1,2	20 - 36	859 - 1404	-
Linho	-	1,5	27,6	345 - 1035	2,7 - 3,2
Bamboo	-	0,715 - 1,22	33 - 40	400 - 1000	-
Juta	200	1,3 - 1,45	10 - 30	393 - 773	1,5 - 1,8
Sisal	-	0,7 - 1,5	9 - 22	511 - 635	2 - 2,5

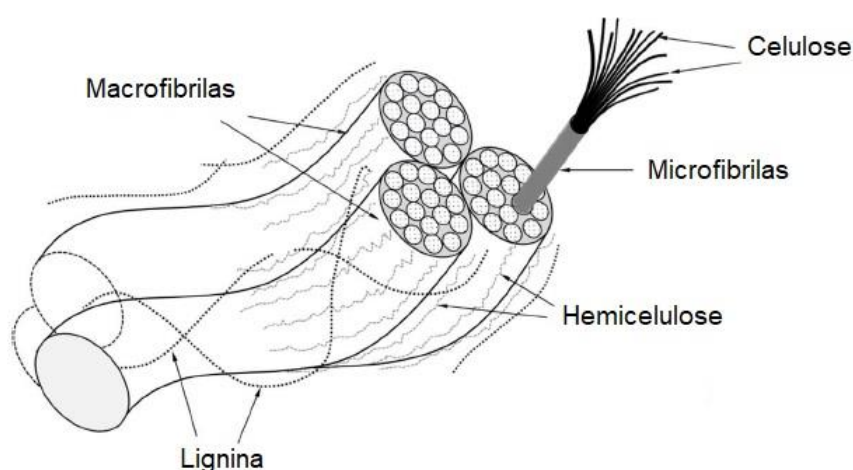
Fontes: Bledzki e Gassan (1999); Gowthaman, Nakashima e Kawasaki (2018)

2.3.2.1 Estrutura da fibra vegetal

A estrutura que compõe as fibras vegetais é definida principalmente por compostos naturais de celulose, lignina e hemicelulose (MASLINDA *et al.*, 2017). A celulose é um biopolímero e o principal polissacarídeo estrutural das plantas e, juntamente com a hemicelulose, tem influência direta na capacidade de absorção da planta. As fibrilas formadas a partir de moléculas de celulose alinhadas ao longo do comprimento da fibra fornecem maior resistência mecânica e maior rigidez (ZAKIKHANI *et al.*, 2014).

Segundo o desenho esquemático disposto na Figura 11, a estrutura da matriz da fibra apresenta macrofibrilas formadas por um conjunto de microfibrilas, e estas são compostas por celulose. As microfibrilas são unidas por uma matriz de lignina e hemicelulose. A lignina é uma macromolécula tridimensional amorfa e capaz de desempenhar um papel importante na estrutura da fibra, garantindo maior proteção e impedindo a degradação da planta. A hemicelulose difere da celulose em três aspectos distintos: unidades de açúcar, estrutura, e grau de polimerização. A hemicelulose compreende um grupo de polissacarídeos que permanece associado à celulose após a remoção da lignina (BLEDZKI e GASSAN,1999).

Figura 11 - Matriz estrutural da fibra vegetal



Fonte: Adaptado de Gowthaman, Nakashima e Kawasaki (2018).

Com relação à composição química das fibras, Faruk *et al.* (2012), destacam que o principal componente presente nas mesmas é a água. No entanto, em base seca, todas as paredes celulares vegetais são constituídas principalmente por polímeros à base de açúcar (celulose, hemicelulose) e combinados com lignina com menores quantidades de proteínas, extrativos, amidos e inorgânicos. A Tabela 5 mostra os principais componentes encontrados em diferentes tipos de fibras. Nota-se que a composição química é distinta conforme o tipo de planta e também varia segundo a retirada do local da amostra.

Tabela 5 - Composição química de algumas fibras naturais

Fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Ceras (%)
Bamboo	26-43	30	21-31	-
Juta	61-71	14-20	12-13	0,5
Sisal	65	12	9,9	2
Curauá	73,6	9,9	7,5	-
Abacaxi	81	-	12,7	-
Cânhamo	68	15	10	0,8

Fonte: Adaptado de Faruk *et al.* (2012)

2.3.2.2 Tratamento de fibras vegetais

As fibras vegetais apresentam em sua composição estrutural grupos de hidroxila (OH⁻), fornecendo ao material características de alta higroscopicidade (MOLINARI *et al.*, 2018). Este é um motivo preponderante que torna as fibras vulneráveis aos efeitos de degradação, especialmente no caso de ataque de fungos e bactérias. Segundo Alvarez e Illman (2005), os microrganismos são os principais responsáveis pela decomposição de materiais têxteis. Quando comparados, as bactérias estão mais propensas ao crescimento em ambientes mais úmidos e em solos de pH entre 6 e 8 que os fungos (JOY *et al.*, 2011; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Devido os efeitos da degradação, as fibras naturais apresentam uma perda progressiva de força quando incluídas no solo. Tal problema pode ser solucionado com a aplicação de tratamentos químicos específicos capazes de protegê-la e aumentar a sua durabilidade. As fibras naturais sem tratamento são bem-vindas em aplicações de curto prazo e temporárias, por exemplo, no controle de erosão (COSTA, 2013).

Silveira (2018) avaliou alternativas de tratamento de fibras vegetais com adição de sílica e um polímero com um tratamento superficial por impregnação. Santiago (2011) utilizou soluções com poliestireno expandido (EPS) e cimento asfáltico de petróleo (CAP) para a impermeabilização das fibras e Tan *et al.*, (2019) estudaram o tratamento de fibras utilizando óleo de linhaça e terebintina (líquido oriundo de árvores coníferas).

O poliestireno expandido (EPS) é um polímero de vasta aplicação em embalagens de equipamentos, utilidades domésticas de conservação térmica e também na engenharia civil, como isolante acústico, térmico e em alguns tipos de estruturas. O EPS é oriundo do processo de expansibilidade do poliestireno, que na maioria dos casos ocorre por extrusão direta, formando o denominado poliestireno levemente expandido (SANTIAGO, 2011).

O uso de EPS reciclado é uma alternativa de destinação do material, impedindo que o mesmo seja disposto em aterros sanitários, vias urbanas e no meio ambiente. Na engenharia, há relatos do emprego deste material na redução da permeabilidade de superfícies de concreto (AMIANTI, 2005), na fabricação de compósitos reforçados (MANIKANDAN NAIR, *et al.*, 2001) e também como material impermeabilizante de fibras vegetais (SANTIAGO, 2011).

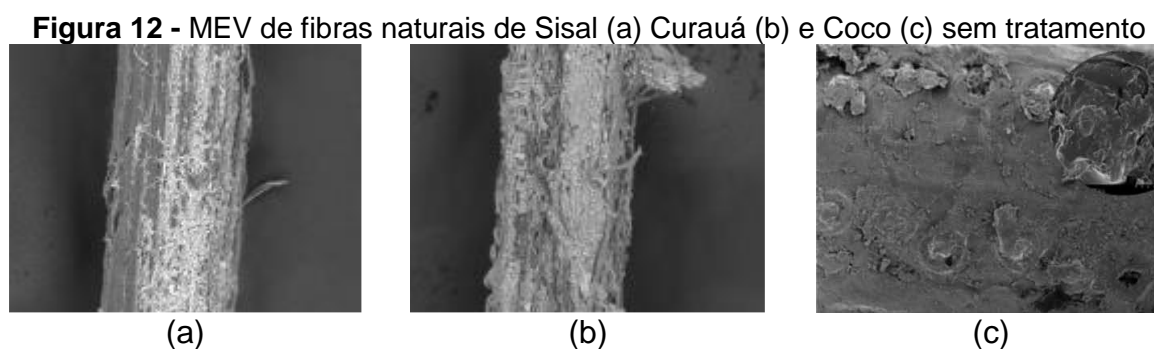
Silveira (2018) constatou que tanto as fibras tratadas quanto as não tratadas, sofreram perda de propriedades mecânicas quando expostas aos agentes climáticos, e que a perda de massa foi mais acentuada na fibra de curauá que na de sisal. No entanto, a impregnação superficial com sílica contribuiu na durabilidade do compósito, mantendo a resistência ao cisalhamento em todos os tempos avaliados (60, 120 e 240 dias).

Tan *et al.*, (2019) realizaram ensaios de tração por compressão diametral em um solo reforçado com fibras de coco. As fibras passaram por dois tratamentos distintos, com óleo de linhaça e terebintina. Em relação ao solo não reforçado, os resultados foram 29% e 184% superiores com aplicação do tratamento com terebintina e linhaça respectivamente. Além disso, também foi avaliado o comportamento mecânico dos espécimes submetidos a um meio alcalino por 7 e 28 dias. Notou-se que não houve perda de resistência, demonstrando que este meio não foi significativo na degradação das fibras.

Outros tipos de tratamentos também são aplicados para melhoria das propriedades mecânicas. Segundo Gomes *et al.*, (2007), o tratamento alcalino em alta

concentração é uma alternativa viável no aumento da tensão de ruptura de materiais laminados reforçados com fibra de curauá, sendo um forte candidato na substituição de compósitos reforçados com fibra de vidro. No entanto, os autores destacam a necessidade de um método de tratamento para ambientes úmidos.

O tratamento por impregnação é adotado valendo-se da alta capacidade hidrocópica das fibras vegetais. Este método foi utilizado por Santiago (2011), Silveira (2018) e Tan *et al.*, (2019). Em trabalhos consultados na literatura, a alteração da morfologia das fibras é avaliada através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), vide exemplo na Figura 12 para o caso de fibras de sisal, curauá e coco sem qualquer tipo de tratamento e após a ação de intempéries.



Fontes: Silveira (2018) e Tan *et al.*, (2019)

A fibra de sisal apresenta uma superfície mais lisa e contínua que a fibra de curauá e de coco. Já a fibra de curauá possui uma aparência mais áspera e porosa, caracterizando maior potencial higroscópico que a fibra de sisal. De acordo com os resultados obtidos por Silveira (2018) em ensaio de absorção de água, a fibra de curauá teve um ganho de massa de 110% enquanto que a fibra de sisal teve 70%.

2.3.2.3 Fibra de curauá (*Ananas erectifolius*)

A fibra de curauá é originária da planta curauá, a qual é uma espécie da família das bromeliáceas. De acordo com a Figura 13, a planta apresenta folhas longas e sem espinhos. Ela se desenvolve em clima quente e úmido, sendo bem conhecida na Bacia Hidrográfica do Amazonas e cultivada principalmente na região oeste do Pará. Neste local, tiveram início as primeiras plantações comerciais da planta. Embora apresente um fruto comestível e sabor e aspecto semelhantes ao abacaxi, o interesse econômico

nesta planta está relacionado à produção de fibras oriundas de suas folhas (PINTO, 2008; SANTIAGO, 2011; SILVEIRA, 2018; WEBER, 2018; ZAH *et al.*, 2007).

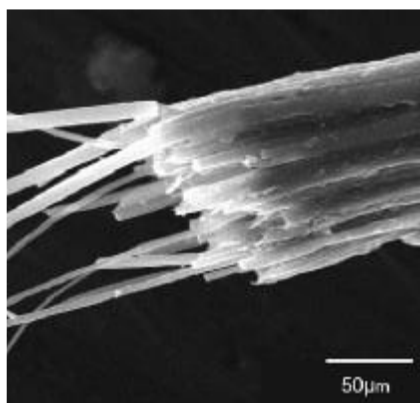
Figura 13 - Planta de Curauá



Fonte: Monteiro *et al.* (2017).

O setor automobilístico passou a utilizar a fibra de curauá (Figura 14) em substituição às fibras de vidro na construção de peças, gerando benefícios econômicos, ambientais e sociais. Conforme Zah *et al.* (2007), o carro alemão Trabant produzido pela VEB, foi o primeiro veículo construído utilizando fibras naturais. Atualmente, os fabricantes de automóveis europeus estão aplicando compósitos em várias peças internas.

Figura 14 - Fibra de Curauá obtida por microscópio



Fonte: Gomes *et al.* (2007).

Embora o setor automobilístico seja o foco principal de toda a produção, o emprego da fibra de curauá também tem destaque na indústria têxtil (FUJIHASHI; BARBOSA, 2002), no reforço de compósitos naturais (GOMES *et al.*, 2007),

poliméricos (HARNNECKER *et al.*, 2012; MONTEIRO *et al.*, 2017; SILVA; AQUINO, 2008; SPINACÉ *et al.*, 2015;), cimentícios (WEBER, 2018) e reforço de solos (PINTO, 2008; SANTIAGO, 2011; SILVEIRA, 2018). Além disso, as fibras também são matéria prima na produção de cordas, redes e produtos de artesanato.

O preço de mercado das fibras de curauá é praticamente o mesmo de outras fibras naturais encontradas no Brasil (ZAH *et al.*, 2007) e seus parâmetros de resistência são maiores que outras fibras vegetais (vide Tabela 6). Em relação ao custo, as fibras naturais mostraram-se bem mais econômicas.

Em estudos recentes, a fibra de curauá quando incorporada ao solo acarretou aumento no intercepto coesivo e no ângulo de atrito interno, significando um acréscimo de resistência ao cisalhamento (SANTIAGO, 2011). Além disso, a publicação destaca que os resultados de resistência obtidos com a aplicação do tratamento foram semelhantes aos da fibra natural. As deformações das fibras na ruptura foram de 2,5% e 3,3% para as fibras de curauá e sisal, respectivamente.

Tabela 6 - Propriedades de alguns tipos de fibra

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Mód. Elastic. (GPa)	Preço/kg (US\$)	Referencia
Curauá	1,4	500-1150	11,8	0,60	Leão, Rowell e Tavares (1998)
Sisal	1,33-1,45	468-700	9,4-38	0,36	Mohanty, Misra e Hinrichsen (2000)
Coco	1,15-1,25	131-220	4 - 6	0,25	
Vidro	2,5-2,55	1800-3500	70-73	3,25	
Carbono	1,7	4000	230-240	200	

Fonte: O autor 2020

Santiago (2011) também observou que o solo apresenta um comportamento enrijecido mais pronunciado a partir de um dado valor de fator de forma, 400 e 240 para fibras de curauá e sisal, respectivamente. Para Ahmad, Bateni e Azmi (2010), a tensão de cisalhamento aumentou de maneira não linear com o aumento do comprimento da fibra até 30 mm. Ademais, segundo os autores para comprimentos e teores acima de 0,50% e 30 mm, respectivamente, ocorre a redução da interação entre o solo e a fibra, ocasionando baixa resistência.

O ganho de resistência em solos reforçados com fibras de curauá também foi observado por Pinto (2008). Segundo a pesquisa, os melhores resultados de

resistência à compressão simples estão presentes adição de teores de fibra entre 0,4% e 0,8%.

No entanto, embora a fibra de curauá seja uma boa alternativa a ser aplicada como reforço, Silveira (2018) destaca que agentes climáticos diversos são capazes de alterar o comportamento mecânico das fibras, inclusive nos casos em que foram devidamente tratadas.

2.3.2.4 Aplicação de fibras vegetais como reforço

O uso de fibras vegetais como reforço de solos é uma técnica considerada sustentável e promissora na substituição de materiais não degradáveis, artificiais em situações em que a melhoria do solo é requerida em um curto prazo. Quando incorporadas ao solo as fibras são capazes de aumentar a resistência à tração, deformação de ruptura, tenacidade e ductilidade (FERREIRA, 2012; MARTINS, 2014; TAYLOR, 1994).

A geotecnia apresenta várias situações em que a estabilidade imediata é requerida durante ou logo após o término da construção, como é o caso de alguns tipos de fundações, drenagem e no controle de erosão de solos. Tais problemas de engenharia são solucionados com o emprego de geossintéticos que fornecem uma força de estabilização adicional. Com o passar do tempo, toda o sistema ganhará estabilidade e a assistência adquirida pelo geotêxtil não será mais necessária (HORROCKS e ANAND, 2000; MWASHA, 2008).

Na aplicação em pavimentos Sheela, Sayida e Girish (2019), avaliaram a resistência de cinco rodovias reforçadas com geotêxtil de fibras de coco em relação a uma não reforçada. Na pesquisa concluiu-se que houve redução na deflexão característica para pavimentos reforçados em comparação com pavimentos não reforçados. Além disso, os valores obtidos nos ensaios de DCP (*dynamic cone penetration*) nas rodovias reforçadas foi inferior sob uma variação de 25 a 80% em relação ao não reforçado. Por fim, os autores evidenciam que os resultados de resistência do subleito reforçado com coco permaneceram satisfatórios no intervalo de tempo entre 3 e 7 anos, evidenciando que este tipo de fibra pode ser efetivamente usado como material de reforço de longo prazo em pavimentos flexíveis.

Além de apresentar boas características mecânicas, o pavimento reforçado com fibras de coco também mostra vantagens em relação à economia. O custo inicial de implantação é cerca de 58% inferior em relação ao não reforçado graças à diminuição na espessura da camada de agregado e uma redução de cerca de 33% no uso de materiais (SAYIDA; SHEELA e GIRISH, 2019; VISVANATHAN; VELAYUDHAN e MATHEW, 2020).

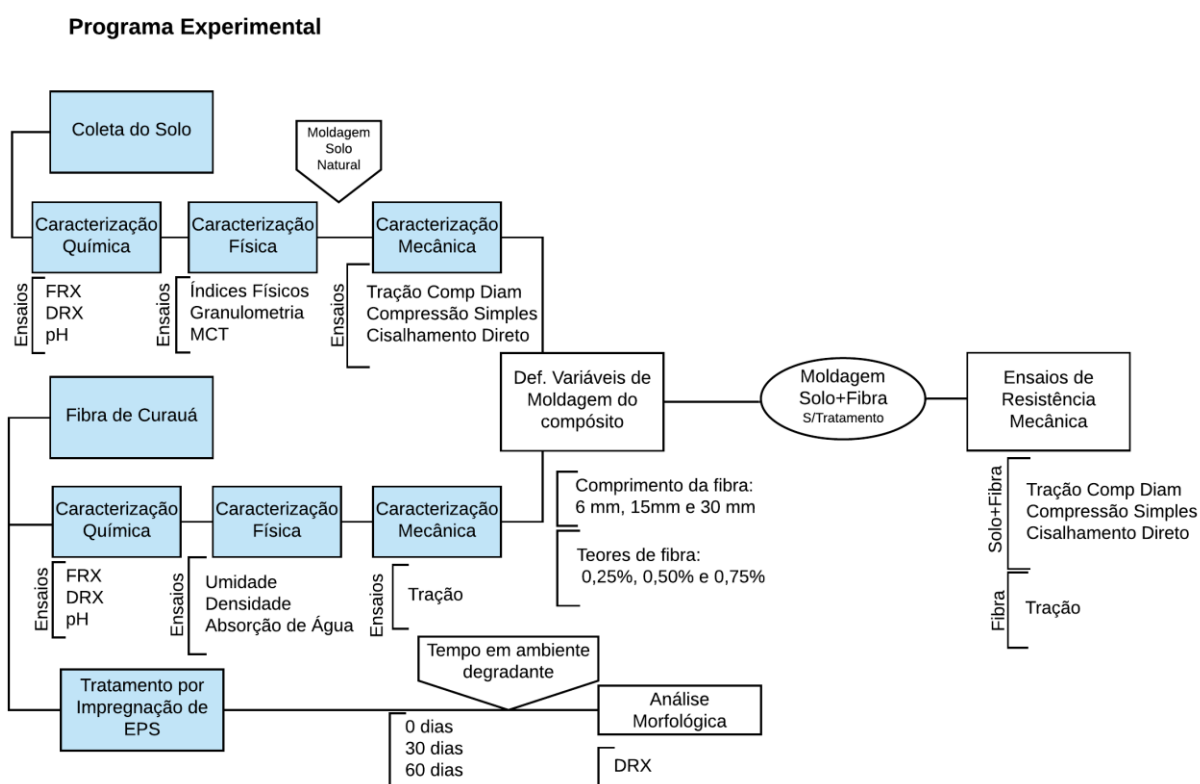
Embora os resultados obtidos na literatura sejam considerados promissores, a utilização de fibras vegetais na construção civil carece de mais estudos. Sabe-se que há inúmeras vantagens quanto a sua utilização, principalmente, em relação à minimização de custos, propriedades mecânicas e no conceito de desenvolvimento de materiais sustentáveis, entretanto, pesquisas devem ser desenvolvidas para avaliar o comportamento deste material em relação as ações do tempo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Grande parte dos estudos sobre inclusão de fibras tem a finalidade de avaliar a contribuição das mesmas na massa de solo, analisando parâmetros de compactação, resistência e deformabilidade entre o solo reforçado e o não reforçado (ROQUE, 2017). Deste modo, o programa experimental da presente pesquisa está principalmente voltado para a classificação dos materiais utilizados e a realização de ensaios de caracterização mecânica, para avaliar os parâmetros de resistência. Os ensaios e demais etapas são apresentados no fluxograma da Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma programas de ensaios



Fonte: O autor (2020)

Os parâmetros avaliados estão principalmente relacionados ao solo e à fibra vegetal, sendo agrupadas em dois grupos: fixos e variáveis. Os parâmetros fixos são: tipo de solo, tipo de fibra, temperatura de moldagem ($25^{\circ} \pm 2^{\circ}$), velocidade de

deformação em ensaio de compressão simples, velocidade de deformação em ensaio de tração por compressão diametral e velocidade de deformação em ensaio de cisalhamento direto. Já os parâmetros variáveis são: comprimento da fibra vegetal, teor de fibra, tipo de tratamento, tempo em ambiente degradante e teor de umidade.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Solo

A coleta do solo foi realizada em 17 de abril de 2018 na cidade de Curitiba-PR, Brasil em uma obra nas mediações do Campus Ecoville da UTFPR. As coordenadas são: Latitude: 25°26'44.9"S e Longitude: 49°21'13.0"O, no bairro Cidade Industrial de Curitiba, vide Figura 16. Além disso, o local encontra-se entre as ruas Monsenhor Ivo Zanlorenzi e Dep. Heitor Alencar Furtado. A obra encontrava-se em processo de escavação, conforme Figura 17, o que facilitou o procedimento de extração do solo.

O talude exposto apresentava camadas distintas de solo, como é notado na Figuras 17a e 17b, o que é característico da Formação Guabirota. O solo coletado foi denominado de "solo natural", de coloração cinza amarelada, com presença de material de cor escura que visualmente pode ser classificado como um mineral oriundo do processo de decomposição das rochas. O material foi disposto em 2 tambores de 200 litros e posteriormente armazenados no Laboratório de Geotecnia (LABGEO) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ecoville.

extraídas das folhas das plantas por um rolo em movimento coberto com facas, onde somente as fibras prevalecem.

As fibras permaneceram acomodadas em sacos plásticos e ao abrigo de intempéries, para que não houvesse ações degradantes que afetassem sua estrutura. As fibras apresentavam comprimentos distintos, cerca de 50 – 70 cm. Antes do processo de caracterização, as fibras passaram por lavagem, secagem e escovação conforme Figuras 18a, 18b, e 18c, respectivamente.

Algumas das justificativas para utilização desta fibra incluem pesquisas recentes envolvendo suas propriedades mecânicas (SANTIAGO, 2011; SILVEIRA 2018; WEI *et al.*, 2018), a necessidade de emprego de materiais de origens renováveis na substituição das fibras sintéticas e também devido à sua disponibilidade. Além disso, Silveira (2018) destaca que o uso de fibras vegetais é uma alternativa de renda para agricultores das regiões produtoras, bem como um produto ecologicamente viável.

Figura 18 - Procedimentos de preparação da fibra: lavagem (a), secagem (b) escovação (c)



Fonte: Weber (2018)

A definição dos comprimentos e dos teores de fibra foi baseada em trabalhos encontrados na literatura, dentre os quais, destacam-se os presentes na Tabela 7. Em geral, adotam-se fibras curtas de comprimento máximo de 50 mm e com teores de até 1%, já que valores acima do mencionado afetam diretamente a trabalhabilidade e homogeneização do material, acarretando baixa resistência ao compósito.

Tabela 7- Comprimentos e teores de fibras

Tipo de Fibra	Comprimento (mm)	Teores (%)	Autores
Sisal e coco	50	0,40	Ghavami <i>et al.</i> , (1999)
Polipropileno	12 e 36	0,50	Feuerhamel (2000)
Polipropileno	50	0,50	Gálvez (2018)
Polipropileno	35	0,30; 0,60 e 0,90	Ibraim <i>et al.</i> , (2010)
Sisal	40 - 50	1,0	Mattone (2005)
Sisal e Curauá	24, 36 e 50	0,50	Santiago (2011)
Palha de trigo	5, 10 e 15	0,10 – 0,60	Qu e Sun (2015)

Nesta pesquisa, os comprimentos adotados foram de 6, 15 e 30 mm, conforme literatura consultada e apresentada na Tabela 7. Nota-se que o teor máximo de fibras não ultrapassa 1,0% em qualquer um dos trabalhos. Deste modo, os teores de fibra utilizados foram fixados em 0,25%, 0,50 e 0,75% da massa de solo seca.

O procedimento de corte da fibra foi realizado com uma tesoura, nos comprimentos já mencionados (Figuras 19a, 19b e 19c). De acordo com as figuras, foi feito uso de um material conhecido para comparar o comprimento das fibras. Após o procedimento de corte, as fibras foram colocadas em sacos plásticos, e armazenadas para que não houvesse absorção de umidade.

Figura 19 - Procedimento de corte das fibras em 6mm (a), 15mm (b) e 30mm (c)

(a)

(b)

(c)

Fonte: O autor (2020)

3.2.3 Água de adição

Para a realização dos ensaios de caracterização e moldagem dos corpos de prova desta pesquisa, a água utilizada foi destilada em um destilador de água tipo Pilsen modelo NT425 produzido pela Novatécnica. O procedimento ocorreu seguindo os padrões especificados pelo fabricante. O uso da água destilada busca impedir a incidência de reações não desejadas e garantir a inexistência de impurezas.

3.2.4 Material impermeabilizante

A metodologia utilizada para aplicação do EPS como meio de tratamento da fibra de curauá seguiu as recomendações propostas por Santiago (2011), que utilizou como solventes 30% de acetona P.A e 70% de ciclohexano P.A. No entanto, devido à alta volatilidade da solução descrita, buscou-se utilizar outro solvente. Deste modo, seguindo as recomendações de Manrich *et al.*, (2007), optou-se por utilizar o xileno P.A, um hidrocarboneto aromático utilizado como matéria prima na indústria química de plásticos, tecidos, solventes de tintas, dentre outros.

3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

3.3.1 Caracterização Física

Os ensaios de caracterização física do solo foram realizados conforme os procedimentos descritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e Departamento de Estradas e Rodagens (DNER-MT), sob as seguintes normas técnicas:

NBR 7181 (2016)	Solo - Análise granulométrica;
NBR 6459 (2016)	Solo - Determinação do limite de liquidez;
NBR 7180 (2016)	Solo - Determinação do limite de plasticidade;
NBR 7182 (2016)	Solo - Ensaio de compactação;

NBR 16097 (2012)	Determinação do teor de umidade - Métodos expeditos de ensaio;
NBR 6457 (2016)	Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
DNER-ME 093 (1994)	Solo - Determinação da densidade real;
DNER-ME 256 (1994)	Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão;
DNER-ME 258 (1994)	Solos compactados com equipamento miniatura - Mini-MCV.

3.3.1.1 Análise granulométrica

O ensaio de granulometria foi realizado conforme norma NBR 7181 (2016), e após lavagem do material retido nas peneiras. Conforme Baldovino (2018), os solos da Formação Guabirotuba são muito finos e, conseqüentemente, dificulta a caracterização real dos grãos quando não ocorre o processo de lavagem. Para o material passante na peneira de número 200 (0,075 mm), optou-se por realizar a medição do diâmetro das partículas por difração a laser, ao invés do procedimento de sedimentação, pela facilidade de execução e precisão dos resultados.

A medição do tamanho de partículas por tecnologia de difração a laser ocorreu no Laboratório de Caracterização de Partículas do Departamento de Engenharia Mecânica da UTFPR, Campus Ecoville. A amostra de solo foi disposta em um béquer e posteriormente misturada com água. Em seguida, a amostra foi condicionada em aparelho agitador (Figuras 20a e 20b), para depois ser colocada no interior do equipamento de análise S3500 da empresa Microtrac, Figura 20 (c).

O processo de medição das partículas por difração a laser é uma técnica utilizada na indústria, sendo capaz de avaliar partículas em uma faixa típica de 10 nanômetros a 2-3 milímetros, segundo dados informados pelo fabricante. Durante o processo de medição das partículas, um feixe a laser é passado através da amostra e o tamanho das partículas é aferido pela detecção da intensidade da luz difusa produzida.

Figura 20 - Análise de partículas por difração a laser. Preparo da amostra (a) e (b), equipamento de difração a laser (c)



(a)



(b)



(c)

Fonte: O autor (2020)

3.3.1.2 Ensaio de mini-MCV

O objetivo deste ensaio é a classificação dos solos tropicais com base na metodologia MCT (miniatura, compactado, tropical), fundamentado na determinação das propriedades em corpos de prova compactados nas dimensões de 130 mm de altura e 50 mm de diâmetro.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus de Bauru no Estado de São Paulo. Sua realização seguiu as determinações técnicas descrita pela DNER-ME 258 (1994).

Em resumo, o ensaio mini-MCV consiste em um processo de compactação utilizando um molde com dimensões de 50 mm de diâmetro e 130 mm de altura. O ensaio indica o abatimento do solo relacionando os teores de umidade com as crescentes energias de compactação, conforme as determinações técnicas.

3.3.1.3 Ensaio de compactação

Conforme mencionado anteriormente, o ensaio de compactação do solo seguiu as especificações da NBR 7182 (2016), para que fossem determinadas as relações entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de solo em estado compactado.

Na compactação do solo, a aplicação de uma carga reduz o volume de uma massa de solo pela expulsão do ar de seus vazios. A partir deste método, duas propriedades físicas importantes podem ser obtidas: o teor de umidade ótimo e o peso específico seco (SHUKLA, 2017).

Os ensaios foram realizados utilizando a energia de compactação normal tanto para o solo natural quanto para o reforçado com fibras. Estes procedimentos estão de acordo com os seguidos por Qu e Sun (2016) e Kaniraj e Havanagi (2001) na determinação dos parâmetros de densidade e umidade ótima. Considerando a variação do comprimento e o teor de fibra natural, foram obtidas nove curvas de compactação referentes ao solo reforçado.

3.3.2 Caracterização Química

A caracterização da composição química do solo ocorreu com o emprego do método de determinação por Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) e com o equipamento de modelo Rainy EDX 720, da marca Shimadzu. Este ensaio foi realizado no Núcleo de Pesquisa Tecnológica (NPT) da UTFPR, Campus Ecoville.

Segundo Melo Junior (2007), a análise por fluorescência de raios X é um método qualitativo e quantitativo que se baseia na medida das intensidades dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra. Para que isso ocorra, é necessária a excitação dos elementos que constituem a amostra e em seguida, ocorre a detecção dos raios X emitidos.

Já no Centro multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM), da UTFPR, na Sede Centro, foi realizado a análise com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com o equipamento Zeiss, modelo EVO MA 15. Além de imagens, o aparelho também está equipado com detectores da marca Oxford Instruments para realização da microanálise química com Espectroscopia por Energia dispersiva (EDS).

3.3.3 Caracterização Mecânica

3.3.3.1 Moldagem dos espécimes para ensaio de compressão simples e tração por compressão diametral.

A moldagem e a preparação das amostras para os ensaios de caracterização mecânica foram realizadas nas dependências do Laboratório de Geotecnia da UTFPR, Campus Ecoville. A execução deste procedimento é realizada após a obtenção dos dados oriundos do ensaio de compactação.

Com relação aos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral, foram moldados corpos de prova com dimensões de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Para cada combinação de comprimento e teor de fibra, foram moldados 8 corpos de prova idênticos, a fim de atender aos dois ensaios mencionados (4 para compressão e 4 para tração por compressão diametral). A adoção deste número de amostras foi definida com base em tratamento estatístico posterior. Com a variação do teor e comprimento da fibra vegetal, foram moldados um total de 80 amostras sem tratamento prévio da fibra, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8- Programa de moldagem para ensaios de compressão e compressão diametral

Teor de Fibra	Composição do Corpo de Prova	Notação	Nº CP Compressão Simples	Nº CP Compressão Diametral
0,00%	Solo Natural	Solo Natural	4	4
0,25%	Solo + 0,25% Fibra 6mm	0,25%SF06mm	4	4
	Solo + 0,25% Fibra 15mm	0,25%SF15mm	4	4
	Solo + 0,25% Fibra 30mm	0,25%SF30mm	4	4
0,50%	Solo + 0,50% Fibra 6mm	0,50%SF06mm	4	4
	Solo + 0,50% Fibra 15mm	0,50%SF15mm	4	4
	Solo + 0,50% Fibra 30mm	0,50%SF30mm	4	4
0,75%	Solo + 0,75% Fibra 6mm	0,75%SF06mm	4	4
	Solo + 0,75% Fibra 15mm	0,75%SF15mm	4	4
	Solo + 0,75% Fibra 30mm	0,75%SF30mm	4	4
Total de Amostras			40	40

O solo utilizado nesta pesquisa passou por uma secagem prévia em estufa de grandes dimensões. Posteriormente, o material foi destorroado, peneirado e armazenado em sacos plásticos dentro de uma bombona de 100 litros. Em dias

anteriores às moldagens, amostras de solo eram coletadas e secas em estufa a 100° C para verificar a umidade do solo e fazer as devidas correções.

No processo de preparação e moldagem das amostras, o solo foi disposto em bandejas em quantidades suficientes para oito espécimes. Em seguida é feita a adição da água e a homogeneização. Com o solo já úmido e devidamente pesado, foi adicionada a fibra e o composto foi novamente homogeneizado. Nesse processo de mistura de solo úmido e fibra, feito manualmente, buscou-se uma separação das fibras que tendiam ao aglomeramento.

A compactação dos corpos de prova ocorreu após a homogeneização do material. Para compactar o solo foi utilizada a prensa hidráulica manual da marca Bovenau, de 15 ton., vide Figura 21. Para melhor distribuição das tensões nos espécimes foi adotado o procedimento de compactação em 3 camadas com o auxílio de 3 soquetes de tamanhos diferentes. Após a execução de cada camada, foram feitas ranhuras no solo para que houvesse maior adesão entre as camadas.

Figura 21 - Prensa para compactação dos corpos de prova



Fonte: O autor (2020)

Para finalizar o procedimento, as amostras foram retiradas do molde metálico com o auxílio de um extrator, e em seguida passaram por um processo de pesagem, identificação e acomodação em câmara úmida até a data de ruptura.

3.3.3.2 Moldagem dos espécimes para ensaio de cisalhamento direto

Para a realização do ensaio de cisalhamento direto, foram moldados corpos de prova quadrados com arestas de 10 cm e altura de 2 cm. As variáveis referentes ao comprimento e teores de fibras adotados nesta moldagem foram as mesmas dos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral.

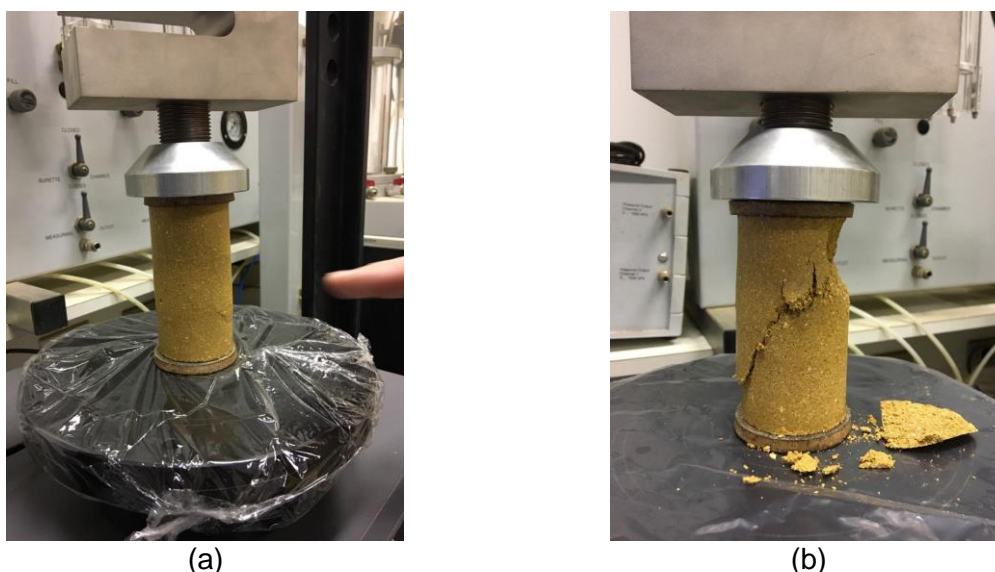
Os espécimes foram avaliados sob tensões confinantes de 50, 100, 200 e 400 kPa, para que fosse construída a envoltória de ruptura do solo e demais combinações de solo reforçado.

O procedimento de moldagem é basicamente o mesmo do item anterior: correção da umidade, adição de água destilada, adição das fibras, homogeneização e compactação.

3.3.3.3 Ensaio de compressão simples

Para a realização dos ensaios de compressão simples, foi utilizada a prensa automática LoadTrac-II da marca Geocomp. Durante o ensaio (Figura 22), o software apresenta as leituras dos transdutores de força e deslocamento. Os ensaios foram feitos com um sistema de coleta de dados automatizada, sob uma velocidade de 1 mm/s e com sensibilidade de 0,001 mm.

Figura 22 - Ensaio de compressão simples. Início do ensaio (a) e ruptura (b)



Fonte: O autor (2020)

Os procedimentos para a realização do ensaio seguiram a norma técnica brasileira NBR 12770 (ABNT, 1992). Após o início do ensaio (Figura 22a), o corpo de prova começa a apresentar fissuras até que ocorre a sua ruptura. Foi observado que o desprendimento de material e maior fissuração ocorreram em amostras com baixo teor de fibras, como a apresentada na Figura 22b.

A resistência à compressão simples é o valor da pressão correspondente à carga na qual ocorre deformação específica do cilindro de 20%, quando a curva tensão-deformação axial não apresenta um pico máximo. Adota-se a resistência à compressão não confinada ou simples (q_u) de acordo com a seguinte expressão (Equação 5), quando a curva tensão-deformação alcança um pico máximo.

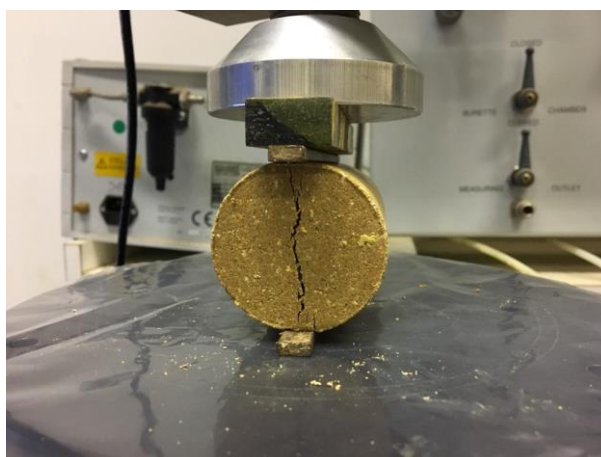
$$q_u = \frac{P_R}{A_T} \quad (5)$$

Onde P_R é a carga de ruptura no pico da curva tensão-deformação axial e A_T é a área transversal do corpo de prova.

3.3.3.4 Ensaio de tração por compressão diametral

Na realização dos ensaios de compressão diametral, foi utilizada a mesma aparelhagem do item anterior. Os corpos de prova foram posicionados horizontalmente (Figura 23) e solicitados à tração.

Figura 23 - Ensaio de compressão diametral



Fonte: O autor (2020)

A resistência à tração obtida através deste ensaio de compressão diametral (q_t) é calculada pela Equação 6.

$$q_t = \frac{2P_R}{\pi DH} \quad (6)$$

A carga de ruptura no pico da curva tensão-deformação diametral é P_R e D e H são respectivamente o diâmetro e a altura do corpo de prova. O procedimento de realização do ensaio seguiu as recomendações da NBR 7222 (ABNT, 2011).

3.3.3.5 Ensaio de cisalhamento direto

A realização do ensaio de cisalhamento direto utilizou a prensa ELE International (Direct Shear Apparatus 220-240V 50/60Hz 1Ph) com capacidade máxima de 5 kN, e anéis calibrados para carga axial com capacidades de 4,5 kN. O ensaio está de acordo com a norma D3080 (ASTM, 2011).

A velocidade do ensaio foi definida em 0,8 mm/min e os dados obtidos foram coletados de maneira automática. As forças foram medidas em Newtons, ao passo que o deslocamento foi medido em mm (com sensibilidade de 0,001 mm).

Os corpos de prova passaram inicialmente pela fase de adensamento. Em seguida, ocorreu a fase de cisalhamento. Foram utilizadas 4 tensões normais (50, 100, 200 e 400 kPa) para traçar a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA

São apresentados neste item os ensaios para a caracterização da fibra de curauá, com base nas suas propriedades químicas, físicas e mecânicas.

3.4.1 Caracterização Química

Assim como na caracterização química do solo, as fibras também passaram pelo ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) e ensaio de Difração de Raios X (DRX). Seguindo as orientações de Silveira (2018), as amostras foram preparadas com tamanhos menores que 1 mm.

A determinação do pH ocorreu de acordo com as recomendações da TAPPI T 252 om (2012). A fibra foi previamente moída e adicionada cerca de 3 g à um béquer com água. O material foi aquecido por 1h e depois permaneceu em repouso. O pH foi determinado com o auxílio de um pHmetro.

3.4.2 Caracterização Física

Na caracterização física da fibra vegetal, foram realizados ensaios para determinar a densidade e a capacidade de absorção de água.

A densidade da fibra foi obtida através de ensaios de Picnometria com 4 fluidos distintos: água, querosene, óleo de canola e gás hélio, este último, realizado nas dependências do NPT da UTFPR. A escolha dos fluidos para a realização deste ensaio foi baseada nos ensaios descritos por Truong *et al.*, (2009).

O teor de umidade seguiu o procedimento descrito pela NBR NM ISO 287 (2012). Em um recipiente previamente tarado, foram adicionadas amostras de fibras e levadas à estufa sob temperaturas entre 100°C a 110°C. As amostras permaneceram em estufa até que sua massa permanecesse constante. O teor de umidade é calculado com base no valor da massa antes e após a secagem.

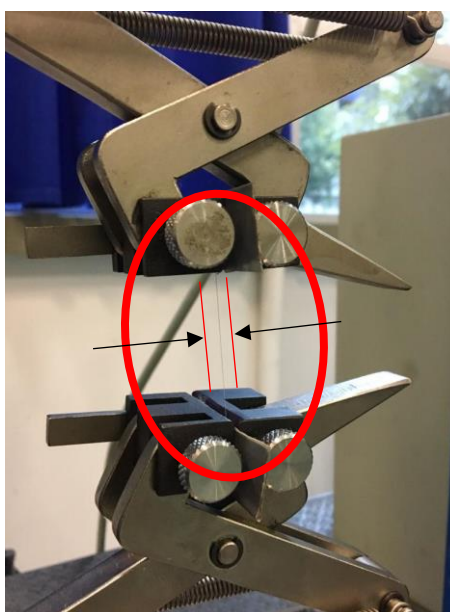
A capacidade de absorção de água das fibras foi avaliada antes e após o tratamento das mesmas. O ensaio seguiu as orientações descritas por Silveira (2018), e foi realizado em duplicata com fibras pesando 1 g e com 30 cm de comprimento.

As fibras passaram por um processo de imersão em água destilada por 1, 2, 3, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240 e 360 min, conforme descreve Silveira (2018). Decorrido o tempo, o excesso de água das fibras foi retirado com papel toalha e, em seguida, foi verificado o peso do material. O ganho de massa representa a absorção de água.

3.4.3 Caracterização Mecânica

Por se tratar de uma fibra vegetal a característica mecânica de interesse foi obtida em ensaio de tração direta, baseado na norma ASTM C 1557 (ASTM, 2014). Para a realização dos ensaios (Figura 24), utilizou-se a máquina da marca EMIC modelo DL 3000 com obtenção de dados através do computador.

Figura 24 - Ensaio de tração da fibra vegetal

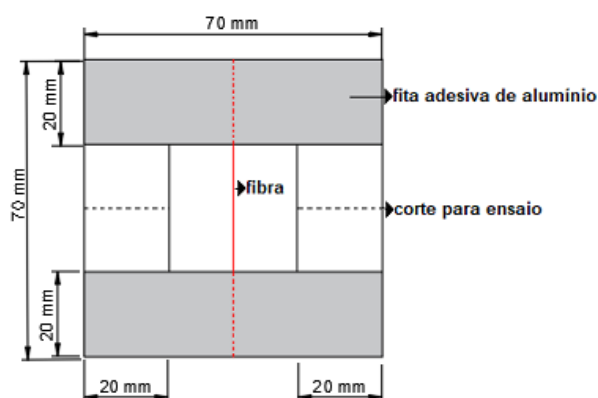


Fonte: O autor (2020)

Seguindo as recomendações de Weber (2018) para a realização do ensaio, utilizou-se um suporte em papel de gramatura 75 g/m² (Figura 25), fita de alumínio para fixação e também cola de secagem rápida. O diâmetro das fibras foi previamente obtido com auxílio do microscópio.

A resistência à tração das fibras foi avaliada em seu estado natural e, posteriormente, com a aplicação do tratamento de EPS, conforme já mencionado. Além disso, também foram avaliadas as fibras que passaram por processo de degradação em ambientes de umidade elevada.

Figura 25 - Esquema de suporte para fibra



Fonte: Weber (2018).

Os valores de tensão última foram obtidos pela Equação 8, onde P é a força máxima de tração e A é a área da seção transversal obtida em medições realizadas durante o ensaio.

$$\sigma_{Tração} = \frac{P}{A} \quad (8)$$

3.5 TRATAMENTO DA FIBRA VEGETAL

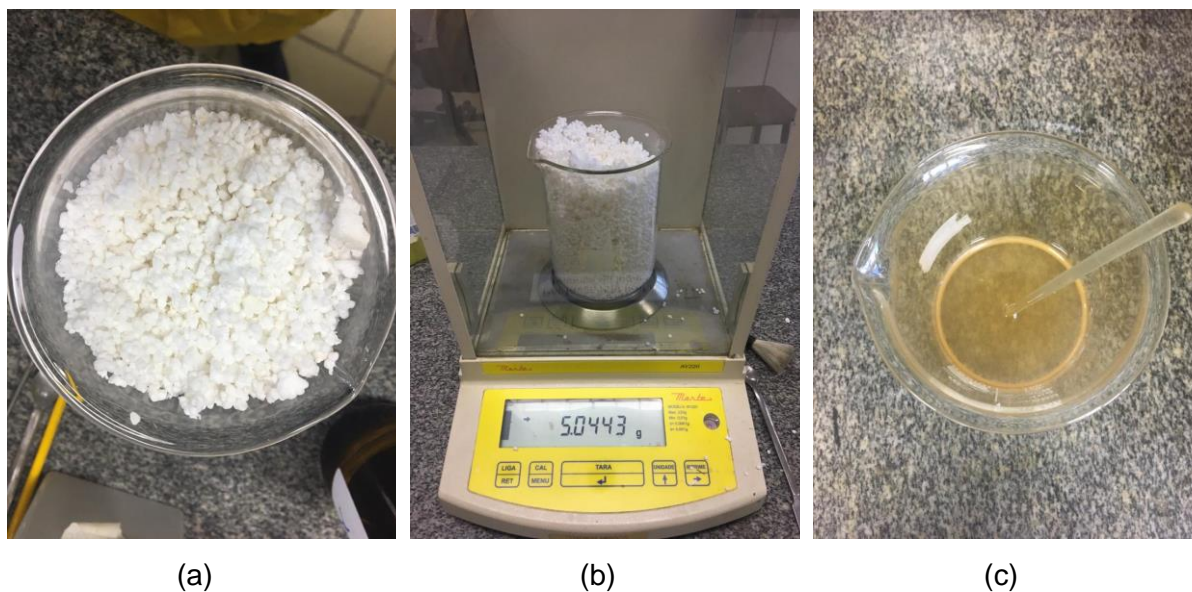
Tendo em vista a fragilidade das fibras de curauá em ambientes considerados favoráveis à degradação da mesma, a técnica de impermeabilização superficial utilizando resíduos de poliestireno expandido (EPS) foi empregada. Conforme Santiago (2011), este polímero é capaz de inibir o processo de absorção de água, bem como impedir o ataque microbológico.

O procedimento de solubilização do EPS se deu no Laboratório de Polímeros do Departamento de Química da UTFPR, sede Ecoville. A escolha deste material foi baseada nos procedimentos descritos por Santiago (2011) e, principalmente, pelo apelo ambiental que envolve a reutilização de um material de difícil reciclagem.

Inicialmente, o EPS foi partido em pequenos fragmentos e posteriormente colocado em um béquer de 1000 ml, conforme mostrado na Figura 26a. Em seguida,

o material foi pesado em uma balança analítica (Figura 26b), e por fim, foi adicionado 300 ml de xileno P.A. e com o auxílio de um bastão de vidro, foi feita a mistura até obter-se um líquido viscoso, de acordo com a Figura 26c.

Figura 26 - Procedimento de impermeabilização por impregnação com EPS: (a) fragmentação do EPS, (b) pesagem do material e (c) EPS dissolvido em xileno PA



Fonte: O autor (2020)

Após o procedimento de solubilização do EPS, a fibra de curauá foi adicionada à mistura e em seguida o material passou por um processo de agitação por um período de 2 horas. Este tempo foi estimado tendo em vista o resultado do ensaio de absorção de água. Passado o tempo descrito, as fibras foram retiradas da solução e secas ao ar livre por 24h.

3.5.1 Avaliação Morfológica das Fibras

O processo de avaliação da estrutura externa das fibras de curauá foi realizado para verificar a degradação do material quando exposto a um ambiente considerado degradante.

As fibras foram avaliadas considerando o tempo de exposição em ambiente úmido, favorável para proliferação de fungos e agentes decompositores, como

também, a eficácia do método de impermeabilização através do recobrimento da fibra vegetal pelo resíduo de EPS.

A análise foi feita visualmente através de imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscópio óptico. Estes equipamentos foram os mesmo para avaliar a estrutura do solo, conforme mencionado anteriormente.

Deste modo, foram avaliadas as seguintes composições.

- Fibra sem tratamento;
- Fibra sem tratamento em meio úmido por 60 dias;
- Fibra tratada e
- Fibra com tratamento em meio úmido por 60 dias.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O procedimento experimental foi avaliado por meio da análise da variância (ANOVA), em que são avaliadas a existência de diferenças significativas entre as médias e também a sua influência na variável dependente. A análise da variância foi feita com o auxílio do *Software Past*® 3.24. A elaboração dos gráficos de resistência à compressão e tração por compressão diametral obedeceu ao grau de confiança de 95% dos dados obtidos com relação à média dos 4 corpos de prova.

Para o ensaio de cisalhamento direto, não foram moldados espécimes suficientes para que fosse feita a análise da variância.

As variáveis estudadas nos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral estão relacionadas ao comprimento e teor da fibra vegetal e serviram de referência para o cálculo e a análise da variância.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos em ensaios de caracterização do solo, da fibra de curauá, e do compósito formado entre estes dois materiais. As fibras vegetais também foram avaliadas quanto ao seu processo de degradação. Desta forma, pode-se então definir a aplicabilidade do método de impermeabilização utilizando EPS reciclado.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NATURAL

Na caracterização do solo, foram realizados ensaios necessários para a obtenção de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Posteriormente este material será utilizado como matriz do compósito solo-fibra vegetal, tema deste trabalho.

4.1.1 Caracterização física e classificação do Solo

A curva granulométrica é apresentada na Figura 27 e contém o resultado do procedimento de granulometria com lavagem e o procedimento de análise granulométrica feita no equipamento de difração a laser.

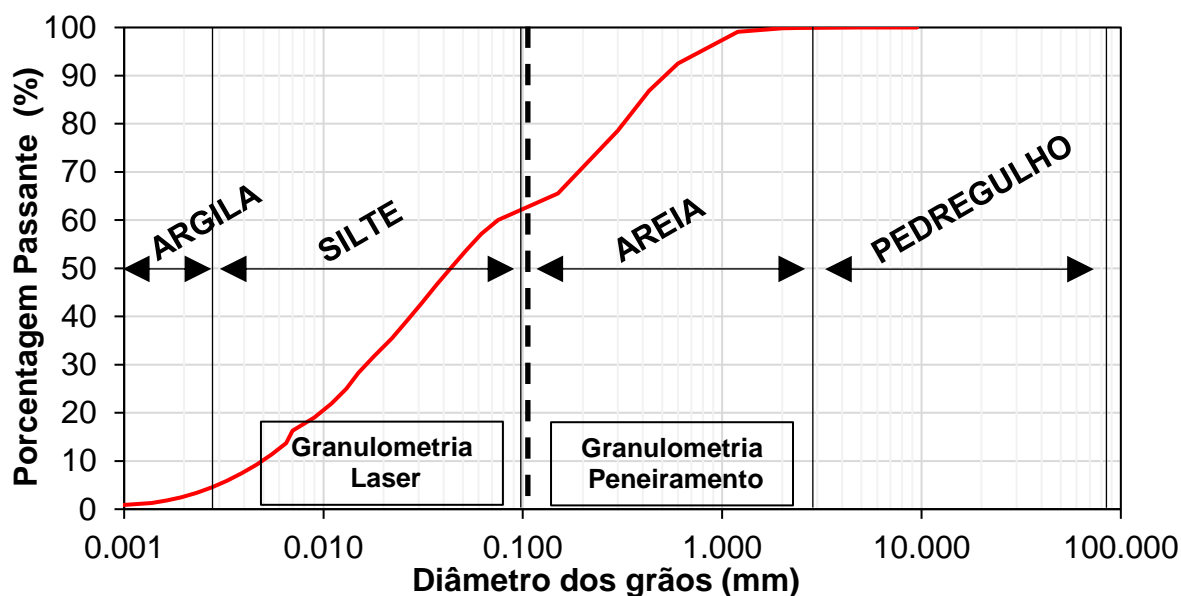
A análise granulométrica do solo sugere que o material é composto por 41,5% de areia ($0,06 \text{ mm} < \emptyset < 2,0 \text{ mm}$), 55,5% de silte ($0,002 \text{ mm} < \emptyset < 0,06 \text{ mm}$) e 3% por argila ($\emptyset < 0,002 \text{ mm}$).

Os demais resultados necessários para a caracterização do solo são apresentados na Tabela 9.

Conforme a norma D 3282 (ASTM, 2015), que propõe o procedimento de classificação de solos para fins rodoviários baseado na distribuição granulométrica, limite de liquidez e no índice de plasticidade, o solo estudado pertence ao grupo A-7-5 – Argila plástica com elevado limite de liquidez.

Já no Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), idealizado por Casagrande em 1942 e atualmente normatizado pela D 2487 (ASTM, 2017), indica que o solo pertence à categoria MH, cuja nomenclatura é silte elástico arenoso de alta plasticidade.

Figura 27 - Curva Granulométrica do Solo



Fonte: O autor (2020)

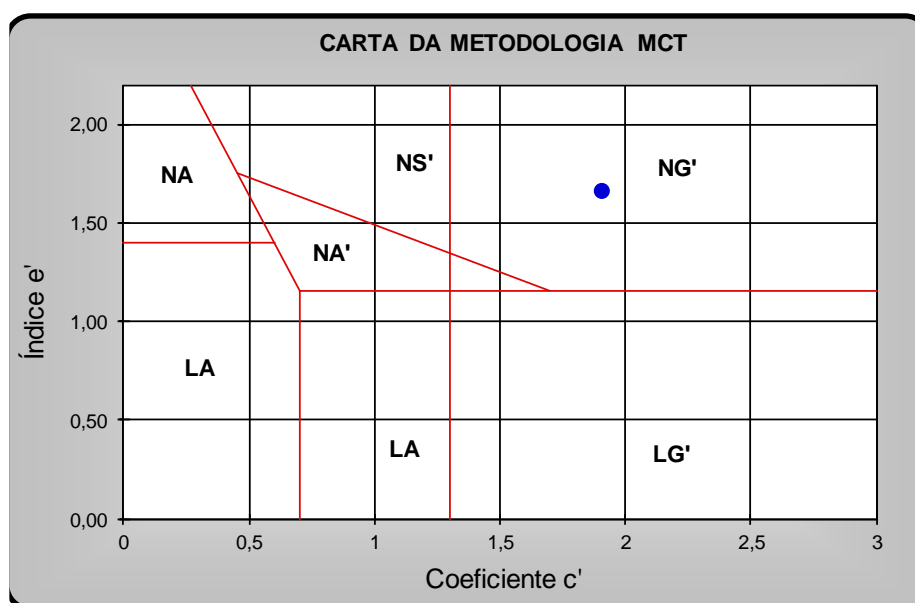
Tabela 9 - Propriedades Físicas do Solo

Propriedade Física	Valor	Norma técnica
Densidade Real dos Grãos (G_s)	2,832	DNER 093
% Argila	3,0 %	
% Silte	55,50%	NBR 6502
% Areia	41,50%	
Limite de liquidez (LL)	58,36%	NBR 6459
Limite de plasticidade (LP)	40,78%	NBR 7180
Índice de plasticidade (IP)	17,59%	-
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,0050	-
D_{60}	0,080	-
Coefficiente de Uniformidade (C_u)	16,00	-
Coefficiente de Curvatura (C_c)	0,722	-

Fonte: O autor (2020)

No sistema de classificação MCT para solos tropicais, o coeficiente c' referente à inclinação do trecho reto da curva Mini-MCV foi de 1,91, e o valor do índice e' foi de 1,65. O solo então é classificado como NG', cuja nomenclatura é não laterítico argiloso, conforme representado na Figura 28.

Figura 28 - Classificação do solo (MCT)



Cortesia do professor Heraldo Giacheti

Baldovino (2018) e Moreira *et al.* (2020) também utilizaram materiais oriundos da Formação Geológica Guabirotuba. Eles destacam a presença de solos finos (53,6% de silte e 9,8% de argila), conforme procedimento realizado pela NBR 6502 (ABNT, 1995). Além disso, a densidade real dos grãos foi igual a 2,71.

Já o material utilizado por Silveira (2018), foi classificado conforme a NBR 6502 (ABNT, 1995), como areia média, com densidade real dos grãos igual a 2,63. Essa mesma densidade foi encontrada por Teixeira (2019) em um solo classificado pela D 2487 (ASTM, 2017) como silte arenoso de alta plasticidade e pelo método MCT como não laterítico siltoso.

Com relação ao material utilizado nesta pesquisa, nota-se um aumento na densidade real dos grãos, e também uma variação na granulometria, mesmo nos solos originados da mesma formação geológica, possivelmente justificado pelas características distintas de cada horizonte presente na Formação Guabirotuba.

Em relação aos limites de Atterberg, Baldovino (2018) e Moreira *et al.* (2020), obtiveram valores de 53,1%, 31,8% para os limites de liquidez e plasticidade respectivamente.

4.1.2 Ensaio de Compactação

Conforme já relatado, os ensaios de compactação foram realizados com o solo natural e posteriormente com a adição de fibras nos comprimentos e teores estudados na energia normal.

Nas curvas de compactação apresentadas, o resultado obtido na curva de compactação do solo natural foi de 25,00% e 13,80 kN/m³ para o teor de umidade o peso específico aparente seco, respectivamente. Já para as curvas de solo reforçado, os resultados são apresentados na Tabela 10 e, para representação gráfica das curvas de compactação, o teor de fibras foi fixado em 0,25%, 0,50% e 0,75% conforme Figuras 29, 30 e 31, respectivamente. Ainda nas figuras, as curvas de saturação são expressas pela letra S, conforme legenda correspondente.

É notório que a adição de fibras interfere no comportamento da curva de compactação. Em termos das Figuras 29, 30 e 31, a curva de compactação do solo natural está posicionada sempre acima das curvas de solo reforçado, em outras palavras, o incremento de fibras diminui o peso específico.

Tal fenômeno é observado por Ibraim *et al.* (2010) e Mirzababaei *et al.* (2013), que avaliaram os efeitos da adição de fibras em solos através do ensaio Proctor. Além disso, Mirzababaei *et al.* (2013), destacam que a diminuição do peso específico está associada à diferença entre a gravidade específica da partícula de solo e da fibra.

Já o aumento de água do compósito ocorre pela absorção da fibra, em especial, as fibras vegetais, objeto de estudo dessa pesquisa. Por esse motivo, é observado nos gráficos das Figuras 29, 30 e 31 o deslocamento das curvas de compactação para a direita.

Tabela 10 - Resultados Curvas de Compactação

Teor de Fibra (%)	Fibra de 6mm		Fibra de 15mm		Fibra de 30mm	
	Umidade ótima (%)	P.esp.seco (kN/m ³)	Umidade ótima (%)	P.esp.seco (kN/m ³)	Umidade ótima (%)	P.esp.seco (kN/m ³)
0,25	31,00	13,50	32,50	13,15	32,50	13,30
0,50	30,00	13,40	31,00	13,30	31,00	13,45
0,75	30,00	13,45	31,00	13,30	31,00	13,15

Fonte: O autor (2020)

Figura 29 - Curvas de compactação do solo e solo fibra com teor de 0,25%

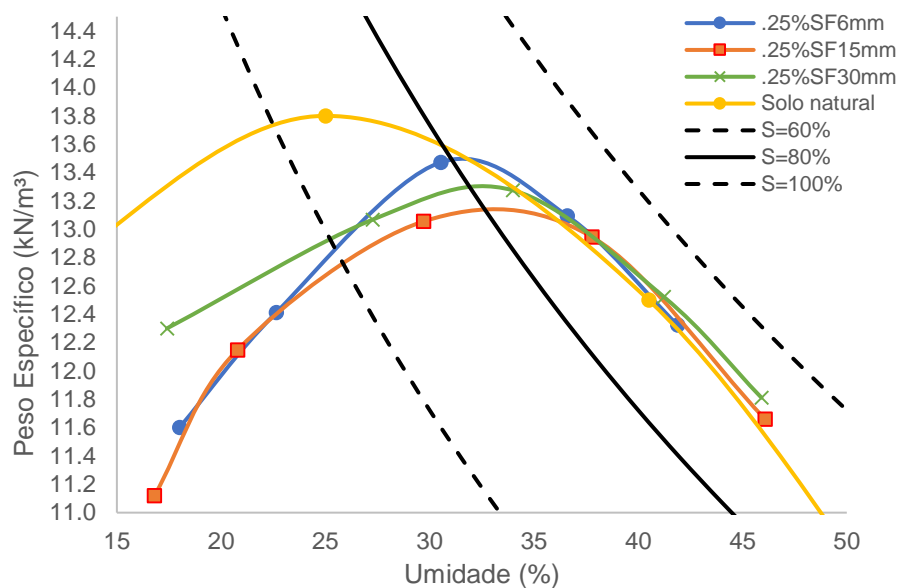


Figura 30 - Curvas de compactação do solo e solo fibra com teor de 0,50%

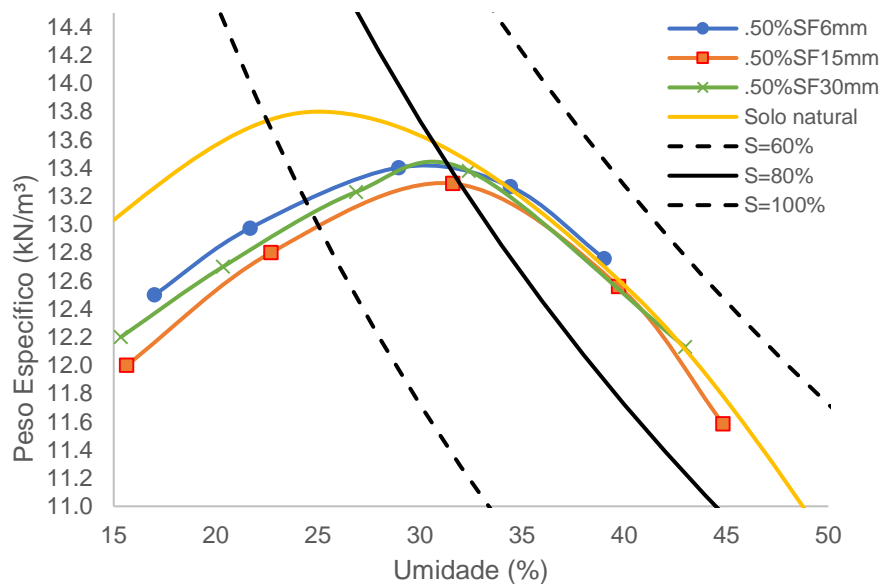
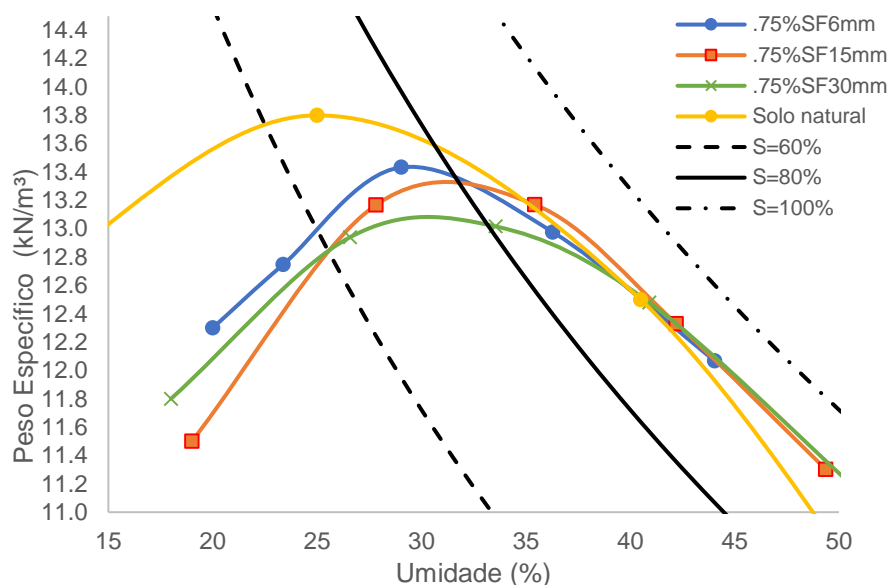


Figura 31 - Curvas de compactação do solo e solo fibra com teor de 0,75%



Fonte: O autor (2020)

4.1.3 Caracterização Química do Solo

A realização do ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) teve por finalidade identificar a composição química da amostra de solo de maneira quantitativa e qualitativa. Os resultados da análise são apresentados na Tabela 11, juntamente com outros resultados da literatura.

Tabela 11 - Composição química do solo (Ensaio FRX)

Amostra	Material constituinte em porcentagens							Autor
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	
Solo Nat.	57,81	32,47	4,54	4,21	0,89	0,28	0,28	Esta pesquisa
Silte	53,12	24,30	-	0,39	0,03	1,37	10,46	Moreira <i>et al.</i> (2019)
Areia	66,02	30,01	-	3,20	-	0,50	0,21	Silveira (2018)

Fonte: O autor (2020)

Quando comparado às demais pesquisas apresentadas, nota-se que o solo desta pesquisa apresenta valores mais elevados de Al₂O₃, K₂O e SO₃, este último, não

foi computado nos demais tipos de solo. Em todos os casos, a sílica é o material mais abundante.

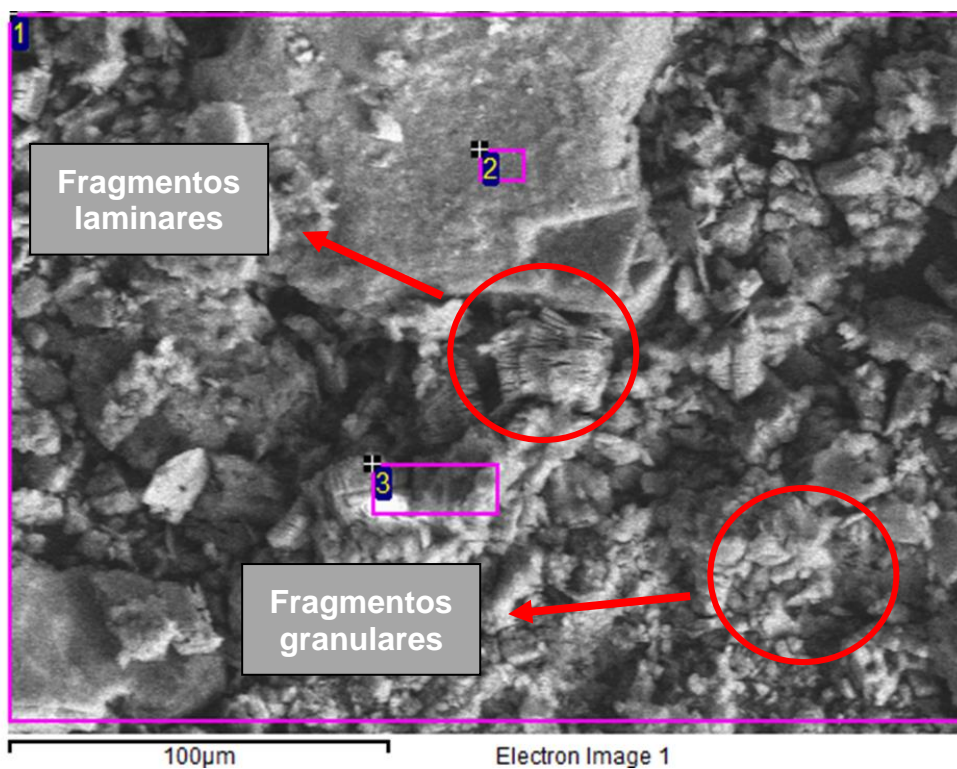
Outra análise química do solo foi realizada por meio de EDS, apresentada na Tabela 12. Neste ensaio foram selecionados 3 pontos distintos na amostra para obtenção do resultado. De acordo com a Figura 32, feita durante o ensaio, é possível observar pequenos fragmentos granulares de solo, assim como, partículas dispostas de maneira laminar.

Tabela 12 - Composição química do solo (Ensaio EDS)

Área	Materiais constituintes em porcentagens									
	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Au
1	6,43	50,09	1,03	11,87	18,90	1,03	-	0,23	5,23	5,27
2	-	47,20	1,93	10,53	21,78	0,62	0,30	0,57	11,23	5,83
3	-	54,17	0,38	16,41	19,77	0,56	-	-	3,48	5,24

Fonte: O autor (2020)

Figura 32 - Definição das áreas de análise química do solo feita por EDS



Fonte: O autor (2020)

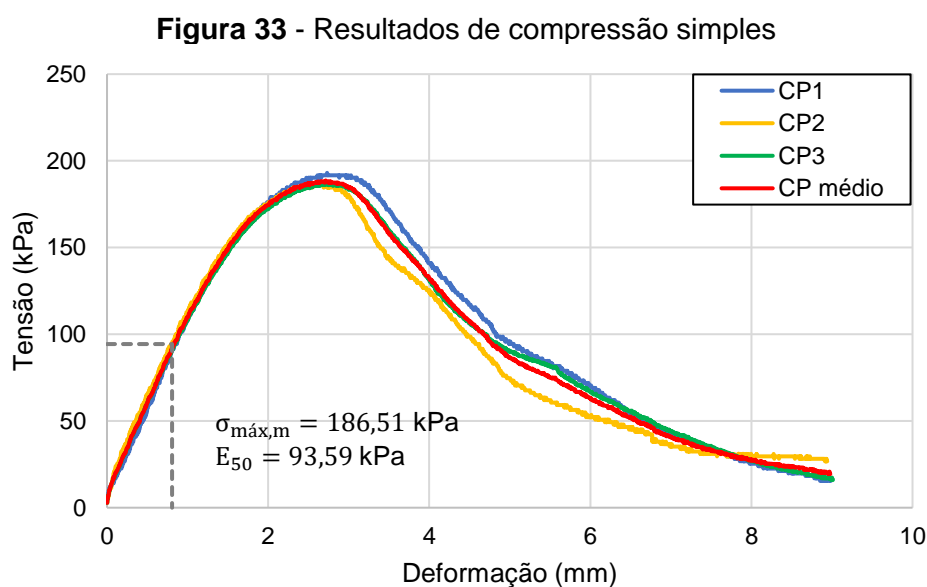
Em ambas as análises, é possível observar que há uma presença mais acentuada de sílica e alumínio, dois materiais que funcionam como agentes cimentantes. Além disso, o surgimento do ouro (Au) no ensaio de EDS é justificado pela preparação inicial de materiais não condutores (neste caso o solo) que passam por um recobrimento inicial com essa substância.

4.1.4 Caracterização Mecânica do Solo

Os parâmetros de resistência mecânica do solo foram obtidos em ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral e cisalhamento direto. Os corpos de prova foram moldados na energia normal de compactação.

4.1.4.1 Ensaio de resistência à compressão simples

Os resultados dos ensaios de compressão são apresentados na Figura 33. A resistência à compressão simples máxima do solo (q_u) foi obtida através da média aritmética dos corpos de prova ensaiados seguindo critério estatístico da variância. Deste modo, o valor resultante foi de 186,51 kPa.



Fonte: O autor (2020)

O módulo secante (E_{50}), definido como o coeficiente angular de $0,5 \sigma_{rup}$, foi de 93,59 kPa e o pico de resistência de 186,51 kPa atingido com deformação de 2,59 mm.

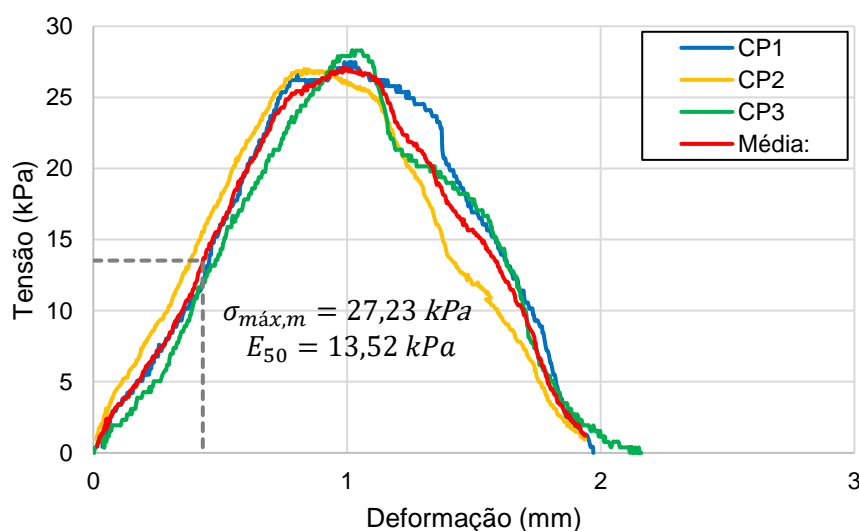
Os resultados de compressão simples obtidos por Baldovino (2018) com um solo da Formação Guabirota foi de 276,21 kPa. Utilizando um solo da mesma região com adição de cal, em níveis de 3% e 7% Teixeira (2019) alcançou uma resistência à compressão simples do solo de 190 kPa, em energia de compactação normal e modificada sem tempo de cura. Tal resistência está próxima do valor encontrado nesta pesquisa.

4.1.4.2 Ensaio de tração por compressão diametral

Nos ensaios de tração por compressão diametral, o esforço médio máximo resistente (q_t) foi de 27,23 kPa. Assim como no resultado de compressão simples, o módulo secante (E_{50}), foi de 13,52 kPa. Os resultados são apresentados na Figura 34.

Os resultados de Teixeira (2019) e Baldovino (2018) obtidos sob o mesmo ensaio e condições semelhantes de moldagem foram de 23 e 43 kPa, respectivamente. Em relação a estes resultados, as variações são de 4,28 e 15,77 kPa.

Figura 34 - Resultados de tração por compressão diametral



Fonte: O autor (2020)

4.1.4.3 Resultados de cisalhamento direto

Pelo ensaio de cisalhamento direto do solo, é possível determinar a sua resistência ao cisalhamento. Além disso, dois dados importantes também foram determinados através da construção da envoltória de ruptura.

A tensão normal foi corrigida com o decorrer do ensaio, conforme apresentado na Tabela 13, e acompanhada do valor da tensão cisalhante máxima obtida.

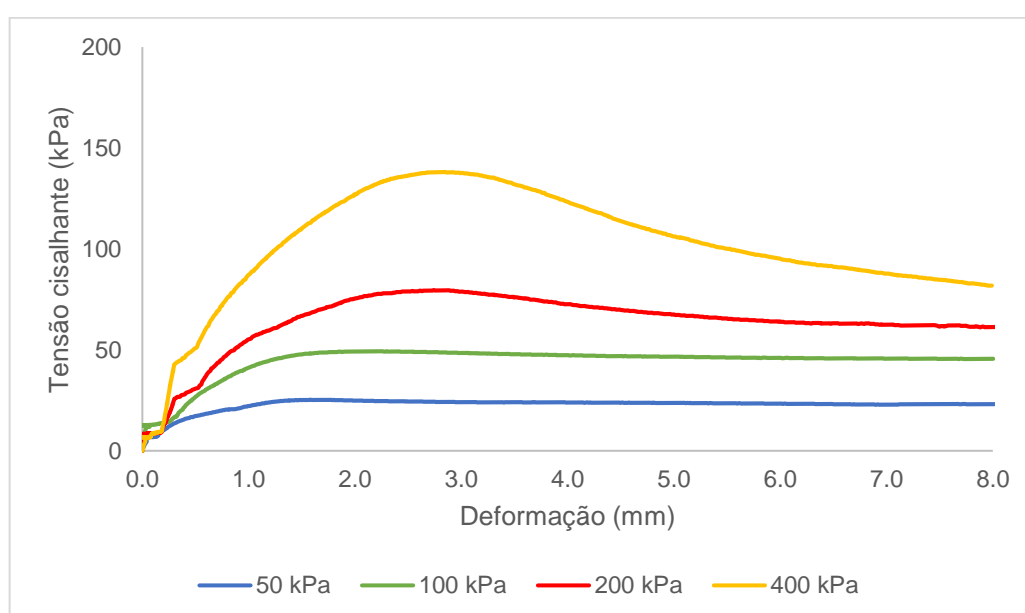
Nota-se que para valores menores dessa tensão, a resistência cisalhante varia muito pouco da tensão residual, vide Figura 35, ou seja, após atingir o pico a resistência não apresenta grandes variações, seguindo praticamente inalterada.

Tabela 13 - Valores máximos de tensão

Nome CP	Tensão normal máxima	Tensão cisalhante máxima
Solo_nat01	53,63	25,32
Solo_nat02	108,6	49,33
Solo_nat03	213,97	79,65
Solo_nat04	431,19	138,19

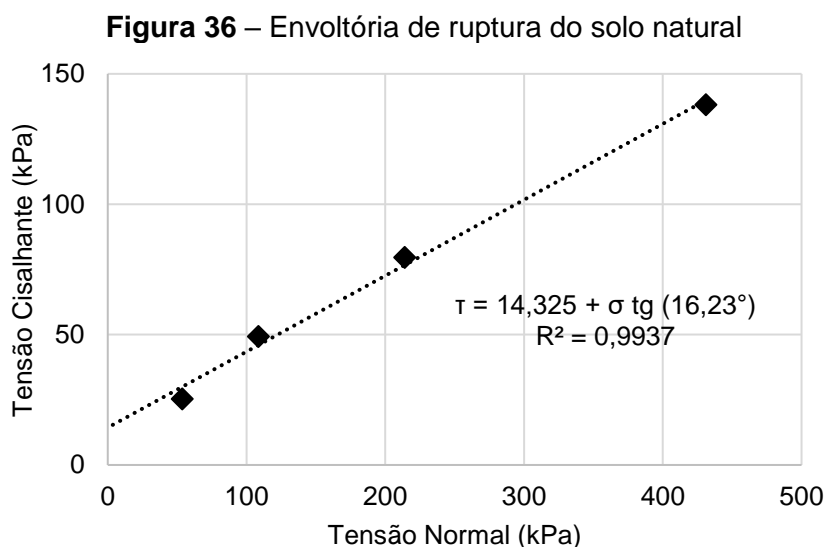
Fonte: O autor (2020)

Figura 35 - Gráfico tensão x deformação do cisalhamento direto do solo natural



Fonte: O autor (2020)

A partir da envoltória de ruptura (Figura 36), os resultados de coesão e ângulo de atrito foram respectivamente de 14,325 kPa e 16,23°. Tais valores estão abaixo dos obtidos por Baldovino (2018) e Cardoso (2019). Os autores apresentaram resultados de coesão de 24,80 kPa e 32,40 kPa, respectivamente, e ângulo de atrito de 27,6° e 28,82°.



Fonte: O autor (2020)

Embora as pesquisas mencionadas tenham sido realizadas com solo da mesma região e da mesma formação geológica, notam-se divergências entre os valores obtidos para ângulo de atrito e coesão. A presença de partículas de areia justifica valores inferiores de coesão e ângulo em relação aos valores obtidos por Baldovino (2018) e Cardoso (2019), além disso, as amostras foram coletadas de perfis distintos, apresentando variação nas propriedades, inclusive, na coloração do solo.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA NATURAL

Os resultados oriundos do ensaio de caracterização da fibra abordados nessa seção avaliaram as propriedades físicas, químicas e mecânicas da fibra natural e também da fibra após tratamento (impermeabilização), com o uso de EPS.

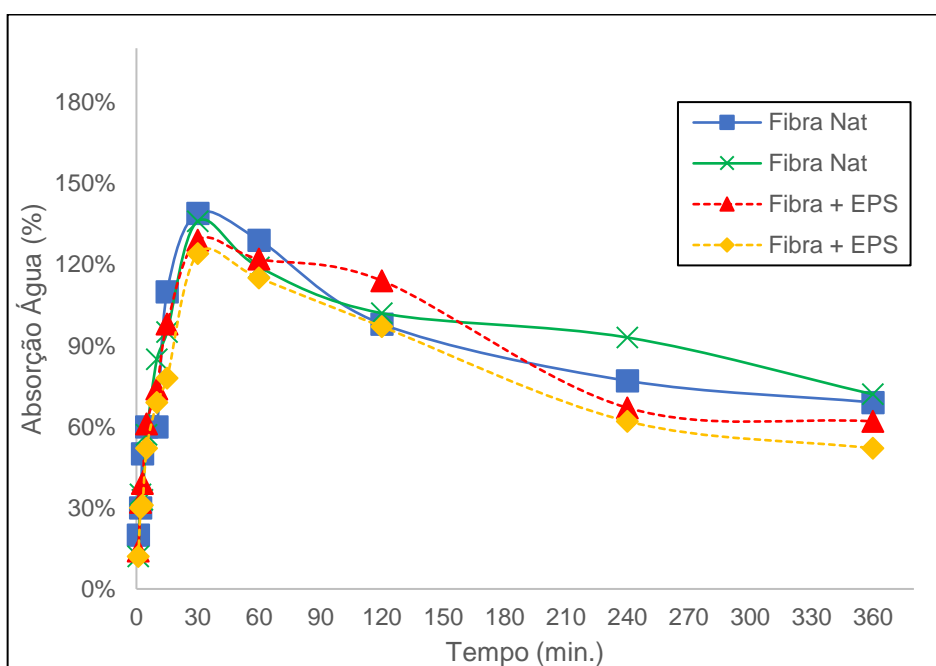
4.2.1 Resultados de caracterização física da fibra de Curauá

4.2.1.1 Absorção de água da fibra natural

Quanto ao ensaio de absorção de água, a fibra natural de curauá obteve um pico de absorção médio de 137,50% nos primeiros 30 minutos de imersão, em relação ao peso da fibra, (Figura 37). Após este pico, nota-se que há uma queda na absorção tanto para a fibra natural, como para a fibra tratada com EPS.

Ainda na Figura 37, é possível perceber que a fibra que passou por um processo de impermeabilização apresentou uma variação inferior de absorção de água, possivelmente justificado pela aplicação do EPS que impediu a absorção do líquido.

Figura 37 - Absorção de água da fibra vegetal



Fonte: O autor (2020)

Os resultados alcançados por Silveira (2018) mostram que a fibra sem tratamento apresentou um ganho de massa de 110% e, analisando as fibras tratadas, o trabalho relata redução de absorção de aproximadamente 12%. Nesta pesquisa, este percentual foi de aproximadamente 10%.

4.2.1.2 Densidade

Os ensaios de picnometria foram realizados com a fibra natural utilizando quatro fluidos distintos: água destilada, querosene, óleo de canola e gás Hélio. Os resultados foram respectivamente de 1,475 g/cm³, 1,681 g/cm³, 1,461 g/cm³ e 1,453 g/cm³. Em relação aos fluidos utilizados, a querosene apresentou o valor mais discrepante dos demais, caracterizando uma precisão inferior aos outros materiais.

Conforme Truong *et al.*, (2009), a Picnometria a Hélio fornece excelentes resultados, seguido pelo óleo de canola. Nos resultados obtidos a densidade varia muito pouco utilizando a água, hélio e óleo de canola, fornecendo uma densidade média de 1,463 g/cm³ que varia 17% da densidade apresentada por Gowthaman, Nakashima e Kawasaki (2018).

4.2.1.3 Análise microestrutural

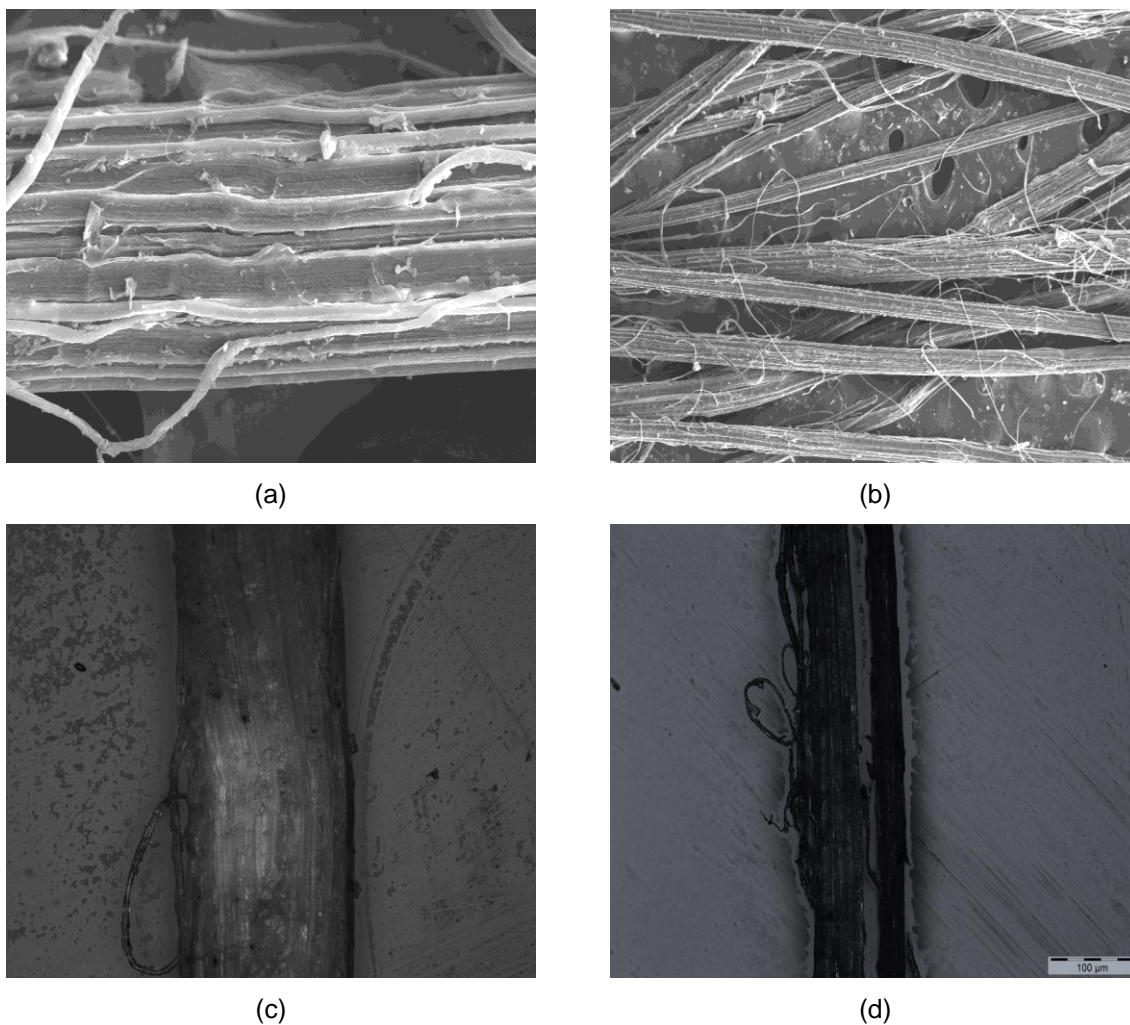
Esta análise consiste em avaliar a superfície das fibras vegetais utilizando imagens ampliadas. As fibras foram dispostas em ambiente considerado degradante com variação do tempo e também foram verificados a aplicação do tratamento por impregnação do EPS.

Na Figura 40, são apresentadas imagens microscópicas da fibra vegetal em seu estado natural (sem tratamento), e com aplicação do tratamento por impregnação de EPS. Além disso, as fibras permaneceram em ambiente úmido por 60 dias para avaliar se houveram mudanças devido a degradação do material.

De acordo com as Figuras 38a e 38b, que não foram submetidas ao tratamento, é perceptível que as fibras aparentam uma superfície mais rugosa com filamentos aparentes. Entre estas duas imagens não é possível identificar se houve alteração na superfície com o passar do tempo.

Já na Figura 38c, a aplicação do tratamento alterou levemente a superfície da fibra, ainda é possível perceber determinada rugosidade da superfície e desta vez, nota-se diminuição na dispersão dos filamentos que compõem a fibra. Em relação à Figura 38d, submetida à ação do tempo, nota-se que a rugosidade aumentou, mas os filamentos permanecem unidos.

Figura 38 - Morfologia da fibra de curauá (a) sem tratamento $t=0$, (b) sem tratamento $t=60$, (c) com tratamento $t=0$, (d) com tratamento $t=60d$.



Fonte: O autor (2020)

De acordo com Silveira (2018), ao avaliar a superfície de fibras de curauá submetidas ao envelhecimento, constatou-se o aumento da rugosidade da fibra como também, o surgimento de uma estrutura filamentosa indicando a ação de fungos. Nas fibras submetidas ao tratamento, a seção transversal foi menos afetada, enquanto a superfície longitudinal apresentou degradação por perda de massa após os oito meses de exposição.

4.2.2 Resultados de caracterização química da fibra de curauá

Para determinar a composição química da fibra de curauá nas formas quantitativa e qualitativa, foram realizados ensaios de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) em amostras de fibra natural e fibra impermeabilizada. Os resultados da análise são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Composição química da fibra de curauá (Ensaio FRX)

Amostra	Material constituinte em porcentagem					
	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
Fibra	26,01	12,35	9,54	34,59	17,27	0,25
Fibra +EPS	29,63	10,98	7,54	36,57	14,66	0,67

Fonte: O autor (2020)

Da Tabela 14, os materiais constituintes em maior abundância nas amostras foram óxido de potássio (K₂O) e a sílica (SiO₂). Em relação à fibra impermeabilizada, não foram constatadas grandes variações nos elementos.

No entanto, considerando os resultados obtidos por Silveira (2018) nota-se que ocorre uma pequena variação entre a fibra natural e a impermeabilizada principalmente com no tratamento com polímero. De acordo com Faruk *et al.* (2012) nas fibras de base seca, as paredes celulares são constituídas principalmente por celulose, hemicelulose combinados com lignina, cujos elementos principais são o carbono e hidrogênio.

Uma das justificativas para a divergência de resultados está relacionada a presença de partículas de solo presente na amostra, o que pode ter influenciado na realização do ensaio. Silveira (2018) destaca que o fato da fibra não apresentar o elemento químico benzeno (CH), não significa que as fibras perderam este constituinte, mas que os materiais que permanecem aderidos em sua superfície mesmo após a lavagem e secagem passaram a ser predominantes.

Já nos resultados obtidos em análise EDS, presentes na Tabela 15, os materiais constituintes em maior abundância foram o oxigênio com 52,14% e o carbono com 36,42%.

A fibra tratada com EPS apresentou um teor de carbono superior a fibra natural (12,78%), possivelmente justificado pela aplicação do tratamento.

Tabela 15 - Composição química da fibra de curauá (Análise EDS)

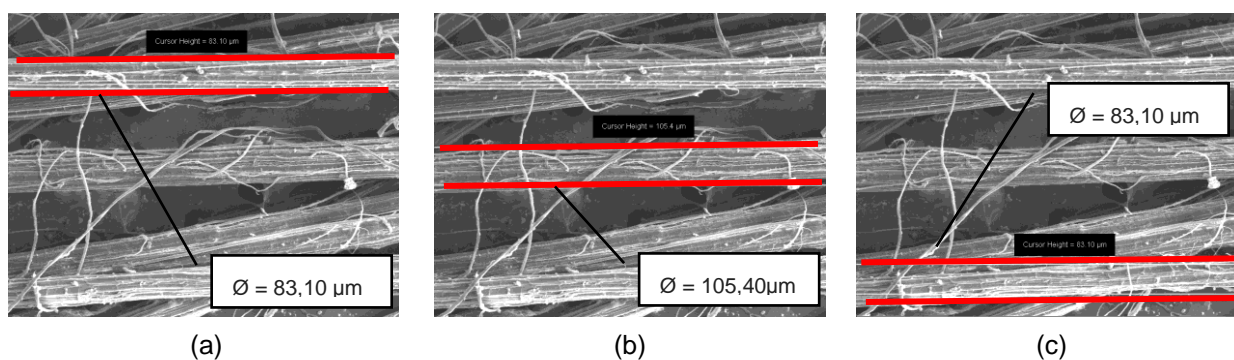
Amostra	Material constituinte em porcentagens						
	C	O	Mg	Al	Si	K	Fe
Fibra	23,64	61,76	0,54	5,54	7,44	0,23	0,85
Fibra +EPS	36,42	52,14	3,12	2,02	4,51	1,07	0,72

Fonte: O autor (2020)

O pH médio medido da fibra vegetal foi de 5,22, considerado o material de base ácida. Os resultados dos ensaios de pH obtidos por Weber (2018) também classificaram o material como de base ácida (pH = 4,74). Para a fibra tratada com EPS, este parâmetro não foi medido pois o tratamento impediu uma moagem adequada do material.

4.2.3 Resultados de caracterização mecânica da fibra de curauá

A caracterização mecânica da fibra de curauá é obtida através dos resultados de tração da fibra. Os diâmetros da fibra de curauá ensaiadas foram obtidos através de análise microscópica conforme Figura 39. O valor médio obtido foi de 90,53 μm .

Figura 39 - Diâmetros das fibras de Curauá obtidos por microscópio

Fonte: O autor (2020)

A resistência à tração da fibra foi obtida entre com os dados de força e área da seção transversal da fibra. A resistência apresentada é a média de 10 repetições para a fibra natural e fibra natural tratada. As fibras expostas ao ambiente úmido não foram avaliadas. Os resultados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados de caracterização mecânica da fibra de curauá

Fibra, Referência	Resistência à tração sem tratamento (MPa)	Resistência à tração com tratamento polimérico (MPa)
Curauá (o autor, 2020)	509,23	531,12
Curauá (Weber, 2018)	542,64	-
Curauá (Silveira, 2018)	464,81	450,04

Fonte: O autor (2020)

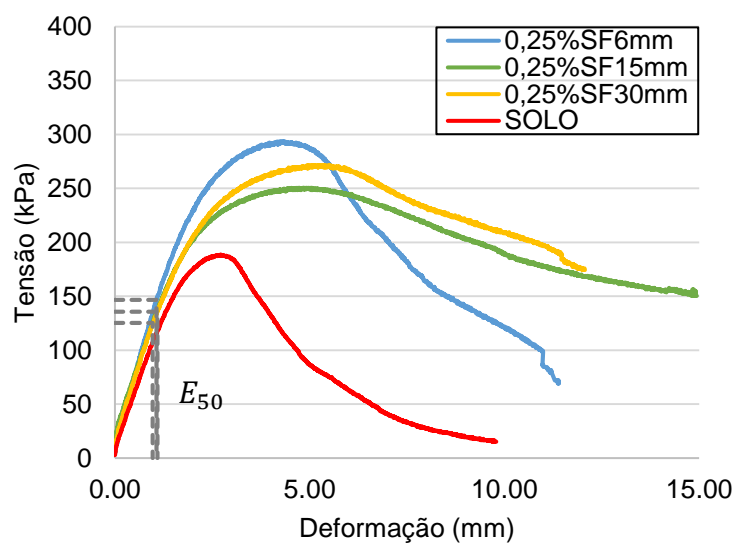
De acordo com a Tabela 16, a resistência à tração da fibra sem tratamento apresenta uma variação de cerca de 9% e 6% em relação aos dados reportados por Silveira (2018) e Weber (2018), respectivamente. Em relação à fibra tratada, foi observado um ganho de resistência de aproximadamente 4%, possivelmente oriundo da resistência do material impermeabilizante que recobre a fibra.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO REFORÇADO

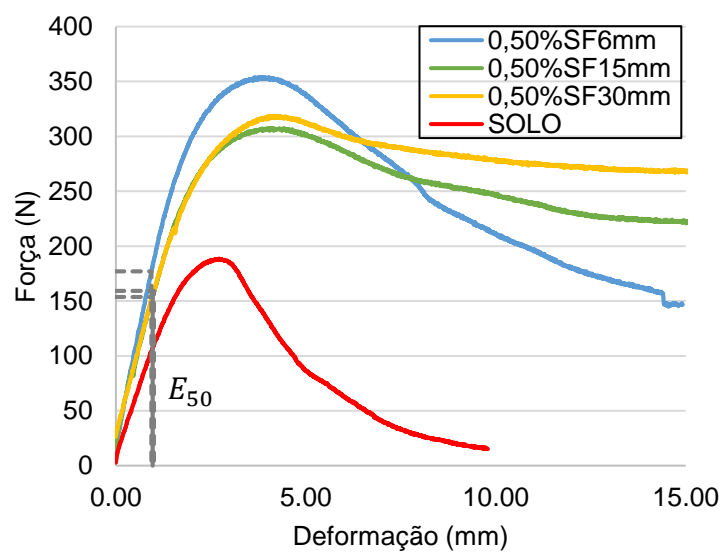
A alteração das características do solo após a adição de fibras foi avaliada através de ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral e cisalhamento direto. Os corpos de prova utilizados foram fabricados nas mesmas condições do solo natural, a fim de avaliar e quantificar o ganho de resistência com esse tipo de reforço.

4.3.1 Resultados de Resistência à Compressão Simples

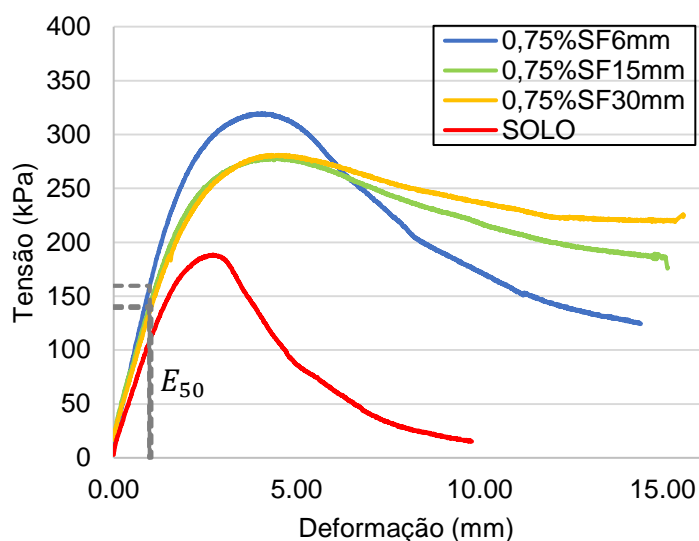
Como já mencionado, o processo de adição de fibras ocorreu segundo dois parâmetros: o comprimento e o teor de fibras inserido à matriz. Deste modo, nas curvas obtidas em ensaio de compressão simples apresentados nas Figuras 40, 41 e 42, optou-se em apresentar os gráficos com o teor de fibra fixado em 0,25%, 0,50% e 0,75%, respectivamente. Além disso, os dados apresentados referem-se à média dos espécimes ensaiados em cada caso.

Figura 40 - Compressão simples solo reforçado - Teor fixo de 0,25% de fibra

Fonte: O autor (2020)

Figura 41 - Compressão simples solo reforçado - Teor fixo de 0,50% de fibra

Fonte: O autor (2020)

Figura 42 - Compressão simples solo reforçado - Teor fixo de 0,75% de fibra

Fonte: O autor (2020)

Um resumo dos resultados obtidos de resistência do solo reforçado está disposto na Tabela 17, juntamente com os dados obtidos do solo não reforçado. O ganho de resistência refere-se à tensão de ruptura do solo reforçado em relação ao não reforçado.

Tabela 17- Compressão simples do solo reforçado

Teor de Fibra (%)	Comprimento de fibra (mm)	Tensão ruptura, σ_{rup} (kPa)	E_{50} (kPa)	Deformação na ruptura ϵ_{rup}	Ganho de resistência (%)
Solo Natural	-	186,98	115,18	2,59	-
0,25	6	294,26	137,65	4,37	57,37
	15	250,44	129,28	4,72	33,94
	30	272,12	124,28	5,07	45,53
0,50	6	351,45	189,25	4,10	87,96
	15	310,86	158,27	4,29	66,25
	30	319,62	159,23	4,31	70,94
0,75	6	323,77	161,66	4,05	73,16
	15	278,81	143,74	4,49	49,11
	30	281,21	136,60	4,52	50,40

Fonte: O autor (2020)

A partir dos resultados médios obtidos das curvas de tensão x deformação, fica evidente o ganho de resistência quando a fibra natural é adicionada. Antes da

adição das fibras, o solo apresentava resistência à compressão simples menor que 200 kPa e em todos os casos, a adição da fibra garante uma resistência mínima de 250,44 kPa adquirida com o teor de 0,25% e 15 mm de comprimento.

Na Figura 40, com teor de fibra fixado em 0,25%, a resistência de pico da composição de solo-fibra de 6 mm foi igual a 294,26 kPa, com 30 mm foi de 272,12 kPa e a última de 15 mm atingiu 250,44 kPa.

Analogamente, na Figura 41 o teor de fibra é fixado em 0,50%. Com 351,45 kPa, os espécimes moldados com 6 mm foram os que apresentaram maior resistência. Já a adição de fibras com 30 mm de comprimento resultou em uma resistência de 319,62 kPa seguida pela fibra de 15 mm com 310,86 kPa.

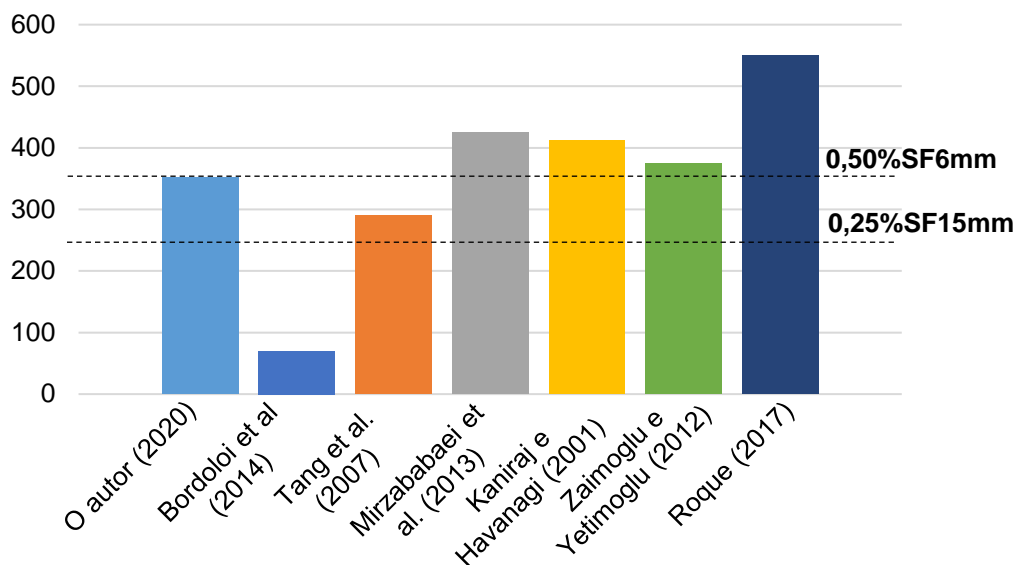
Nas curvas de resistência com teor fixo em 0,75% mostradas na Figura 42, o comprimento de fibra que apresentou os melhores resultados foi de 6 mm com 323,77 kPa, seguido pelo comprimento de 30 mm com 281,21 kPa e por último com 278,81 kPa o comprimento de 15 mm.

Em todos os casos, os gráficos apresentaram um pico definido, o denominado pico de resistência, que é quando a resistência atinge o seu máximo. Além deste parâmetro, também foi observado que o material continuava sofrendo deformações, no entanto, sem a queda brusca de resistência, o que chamamos de resistência residual.

O solo em seu estado natural apresentou resistência muito baixa após 10 mm de deformação, ao passo que, o solo reforçado obteve resistências próximas ou superiores à 200 kPa, com exceção das composições utilizando fibras de 6 mm, que dentre as demais, foram que apresentaram o comportamento mais próximo à curva do solo natural.

Na literatura, os resultados de compressão simples de solos reforçados variam de acordo com os parâmetros adotados, tais como: tipo de solo, tipo de fibra, comprimento de fibra, teor de fibra, energia de compactação, dentre outros.

Os resultados obtidos por Bordoloi *et al.* (2014), Roque (2017), Tang *et al.* (2007), Zaimoglu e Yetimoglu (2012) à compressão simples (Figura 45), avaliaram a adição de fibras de polipropileno nos respectivos teores, 0,50%, 0,50%, 0,25% e 0,25%, enquanto, Kaniraj e Havanagi (2001) utilizaram fibras de poliéster em 1% e Mirzababaei *et al.* (2013), empregou *naylon* também a 1%.

Figura 43 - Dados de resistência à compressão simples

Fonte: O autor (2020)

Os resultados alcançados seguem o mesmo padrão observado por Tang *et al.*(2007). Quando o teor de fibras aumenta, a tensão de pico também aumenta e há uma diminuição da perda de resistência pós pico. Além disso, segundo os autores, o aumento no teor de fibras também está relacionado a diminuição da rigidez, evidenciado pela queda do E_{50} , conforme mostrado na Tabela 17.

Na Figura 43 o resultado obtido por Bordoloi *et al.* (2014), foi o menor dos apresentados, 70 kPa, enquanto que o maior de 550 kPa é atingido por Roque (2017). Considerando os resultados da Tabela 18 e comparando aos apresentados, nota-se que o valor de Tang *et al.* (2007) está entre os limites inferior e superior que corresponde às tensões mínima e máxima de resistência de 0,25%SF15mm e 0,50%SF6mm, na devida ordem.

4.3.2 Resultados de Tração por Compressão Diametral

A tração por compressão diametral (q_t) foi obtida de maneira análoga ao ensaio de resistência à compressão. Os gráficos contendo os resultados dos ensaios estão dispostos nas Figuras 44, 45 e 46, obedecendo a ordem do teor de fibra de

0,25%, 0,50% e 0,75%. Além dos gráficos, os dados de tensão de ruptura são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Tração por compressão diametral do solo reforçado

Teor de Fibra (%)	Comprimento de fibra (mm)	Tensão ruptura, σ_{rup} kPa	Ganho de resistência (%)
Solo Natural	-	27,23	-
0,25	6	45,38	66,65
	15	37,06	36,10
	30	42,18	54,90
0,50	6	51,77	90,12
	15	46,70	71,50
	30	46,56	70,99
0,75	6	46,05	69,11
	15	42,21	55,01
	30	43,68	60,41

Fonte: O autor (2020).

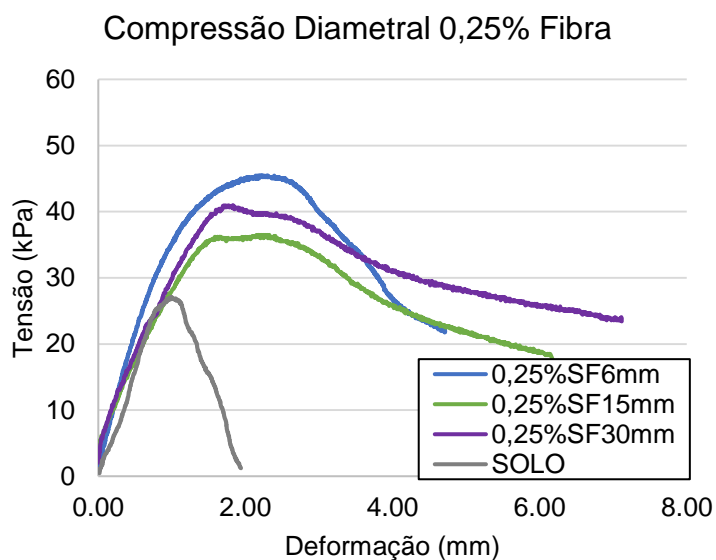
A tensão máxima de tração é obtida com solo reforçado com teor de 0,50% e fibras com 6 mm de comprimento. Houve acréscimo de resistência de 90,12% em relação ao solo natural. O valor mínimo de tensão foi de 37,06 kPa que representa acréscimo de 36,10% com adição de fibras de 15 mm e teor de 0,25%.

O ganho de resistência obtido foi maior nas fibras de 6 mm em comparação aos demais comprimentos. Tal como na presente pesquisa, os resultados de tração apresentados por Roque (2017) utilizando fibra lisa de polipropileno como método de reforço para um solo argiloso mostram um ganho de resistência de 28,57% para fibras de 24 mm e de 35,71% para fibras de 12 mm.

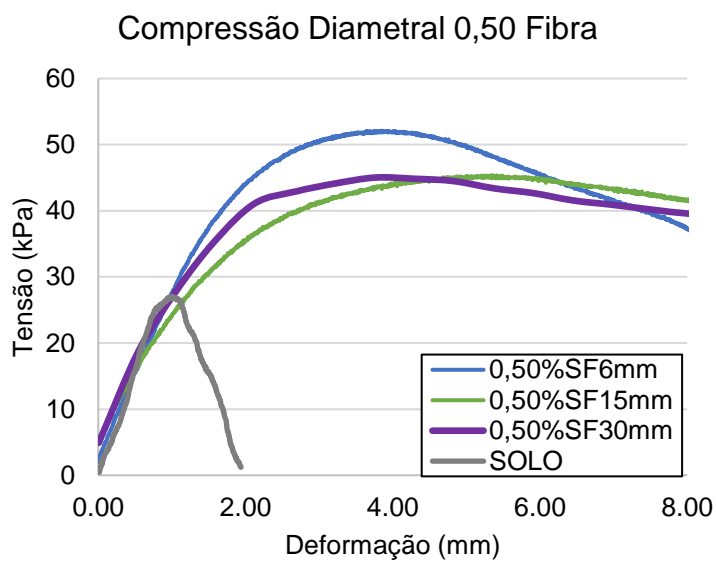
Do mesmo modo que na resistência à compressão, uma contribuição relevante da adição de fibras está no aumento da resistência residual, que cresce com o aumento do teor e do comprimento da fibra. Uma das justificativas está relacionada aos efeitos da ancoragem da fibra à matriz do solo, possibilitando maior resistência pós pico e minimizando as deformações.

Na Figura 44, a resistência de pico correspondente ao incremento de fibras de 6mm é de 45,38 kPa e o acréscimo de tensão em relação ao solo natural foi de 66,65%.

Dentre as curvas de resistência à tração da Figura 44, a resistência maior pertence à fibra de 6 mm. O mesmo ocorre na Figura 45, em que a fibra de 6 mm também fornece maior resistência que as demais.

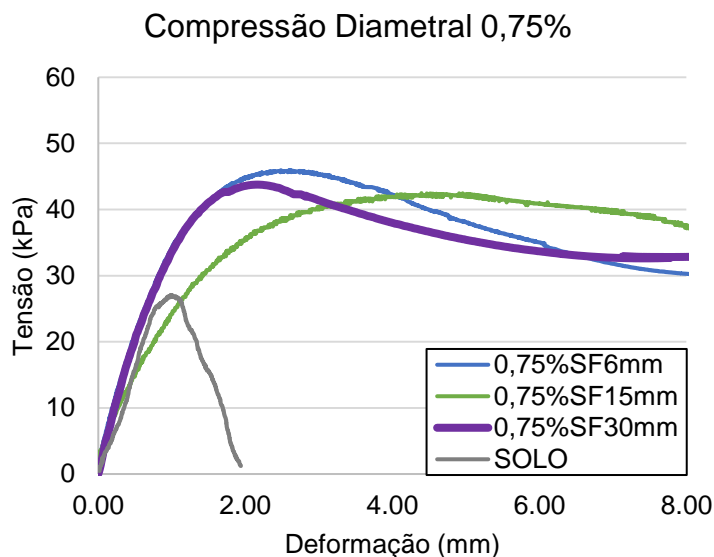
Figura 44 - Tração por compressão diametral do solo reforçado - (Teor de 0,25%)

Fonte: O autor (2020)

Figura 45 - Tração por compressão diametral do solo reforçado - (Teor de 0,50%)

Fonte: O autor (2020)

Figura 46 - Tração por compressão diametral do solo reforçado - (Teor de 0,75%)



Fonte: O autor (2020)

Além do já observado aumento da resistência de pico com a adição das fibras em todos os casos estudados, os resultados oriundos do ensaio de compressão simples e diametral evidenciam claramente um aumento da ductilidade do solo reforçado visto na resistência pós-pico.

De acordo com Martins (2014), uma das características almeçadas com a inclusão de fibras não necessariamente está relacionada apenas ao ganho de resistência. Em projetos sismo-resistentes, por exemplo, dá-se ênfase à capacidade de absorção de energia e ductilidade do material, assim como diminuição da queda de resistência pós-pico.

O comportamento de amortecimento gradual após o pico foi observado por Martins (2014) em compósitos de solo-cimento reforçados com fibra que alcançaram grandes deformações em valores na ordem de 80.000 $\mu\epsilon$. Além disso, o trabalho também destaca que a incorporação de fibras altera o padrão de ruptura do material, tornando-a mais dúctil e absorção de energia de 0,81 J com fibras de sisal de 50 mm.

Nos compósitos solo-fibra apresentados nesta pesquisa, nota-se que nos ensaios de compressão diametral, foi observado que com a adição de fibras 15 mm e

um percentual de 0,50% a resistência de pico diminuiu cerca de 9%. Esta foi a menor variação da resistência pós-pico considerando uma deformação de 8 mm.

Além disso, em relação ao comprimento de fibras, com exceção do teor de 0,25%, a fibra de 15 mm de comprimento forneceu ao compósito uma maior ductilidade, seguida pela fibra de 30 mm, que mostrou uma variação entre a resistência de pico e pós-pico de aproximadamente 16% e 25% para os teores de fibra de 0,50% e 0,75%, respectivamente.

4.3.3 Resultados de Resistência ao Cisalhamento

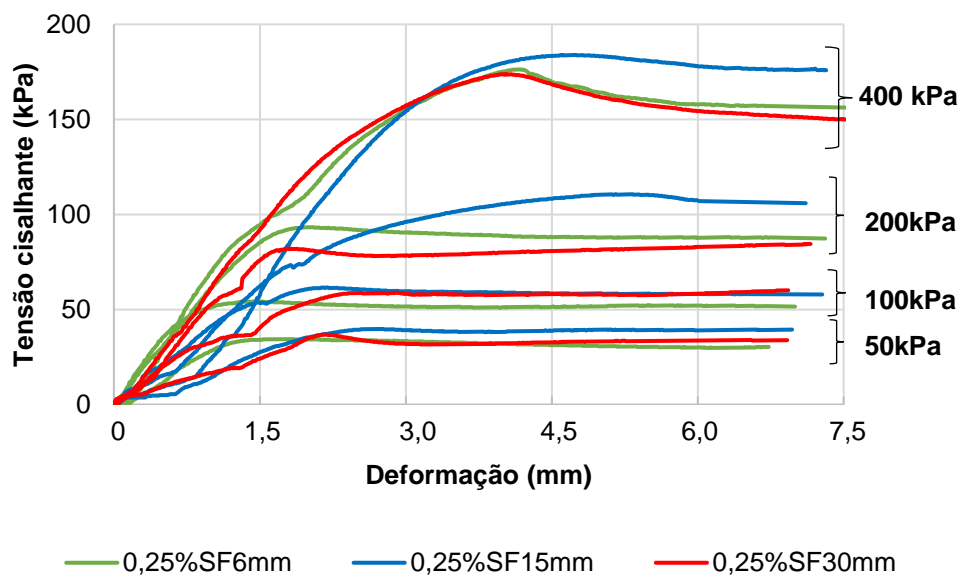
A resistência ao cisalhamento do solo reforçado medida em ensaio de cisalhamento direto obedeceu aos mesmos critérios de adição de fibras dos ensaios anteriores, tanto no que se refere aos teores quanto aos comprimentos de fibra. Além disso, foram utilizadas 4 tensões normais (50, 100, 200 e 400 kPa) para traçar a envoltória de ruptura Mohr-Coulomb.

Os resultados de resistência ao cisalhamento do solo reforçado com teor de 0,25% são exibidos na Tabela 19. Já o gráfico referente ao mesmo teor é apresentado na Figura 47.

Tabela 19 - Resultados de cisalhamento direto do solo reforçado com teor de 0,25%

Tensão normal σ (kPa)	Comprimento de fibra (mm)	Resistência de pico, τ (kPa)	Tensão normal σ corr. (kPa)
50 kPa	0,25%SF6mm	34,41	49,89
	0,25%SF15mm	39,74	49,90
	0,25%SF30mm	36,80	54,70
100 kPa	0,25%SF6mm	54,37	109,47
	0,25%SF15mm	61,54	109,31
	0,25%SF30mm	60,07	99,76
200 kPa	0,25%SF6mm	93,28	218,50
	0,25%SF15mm	110,64	217,40
	0,25%SF30mm	94,48	220,46
400 kPa	0,25%SF6mm	176,29	437,11
	0,25%SF15mm	183,91	427,37
	0,25%SF30mm	173,82	435,75

Fonte: O autor (2020)

Figura 47 - Gráfico Tensão x Deformação - Cisalhamento Direto (0,25% Fibra)

Fonte: O autor (2020)

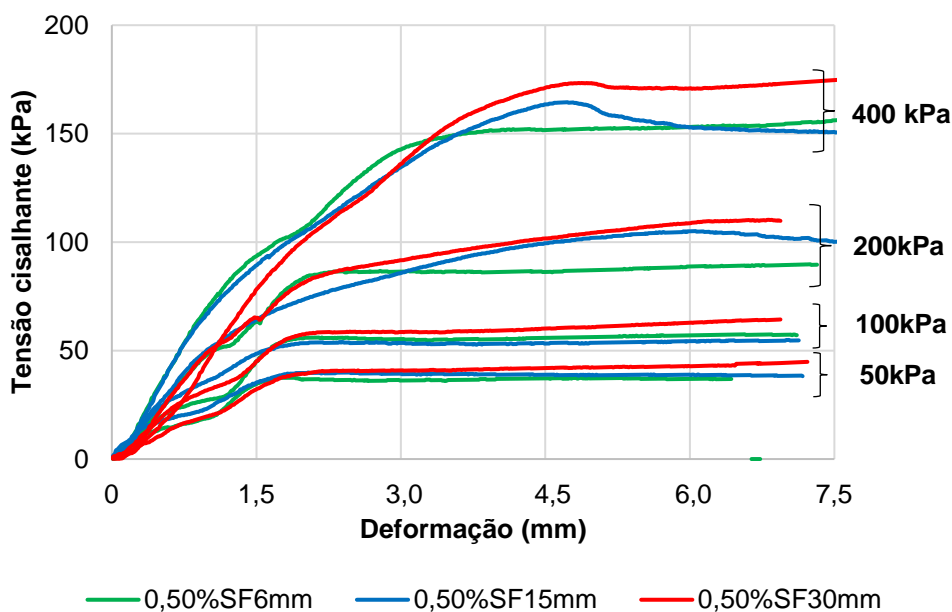
No gráfico da Figura 47, as curvas que representam o comprimento de 15 mm apresentaram maiores resistência de pico, e inclusive é mais acentuada com as tensões de confinantes de 200 e 400 kPa.

Já em relação ao teor de 0,50%, os resultados são apresentados na Tabela 20 e na Figura 48. Desta vez, o comprimento de 30 mm apresentou os valores de maior resistência quando comparado aos demais.

Tabela 20- Resultados de cisalhamento direto do solo reforçado com teor de 0,50%

Tensão normal σ (kPa)	Comprimento de fibra (mm)	Resistência de pico, τ (kPa)	Tensão normal σ corr. (kPa)
50 kPa	0,50%SF6mm	37,49	49,65
	0,50%SF15mm	39,95	54,98
	0,50%SF30mm	44,81	54,70
100 kPa	0,50%SF6mm	57,58	109,41
	0,50%SF15mm	54,89	99,81
	0,50%SF30mm	64,34	109,38
200 kPa	0,50%SF6mm	89,77	218,68
	0,50%SF15mm	105,08	221,94
	0,50%SF30mm	110,29	220,46
400 kPa	0,50%SF6mm	156,70	439,35
	0,50%SF15mm	164,49	439,40
	0,50%SF30mm	175,56	437,43

Fonte: O autor (2020)

Figura 48 - Gráfico Tensão x Deformação - Cisalhamento Direto (0,50% Fibra)

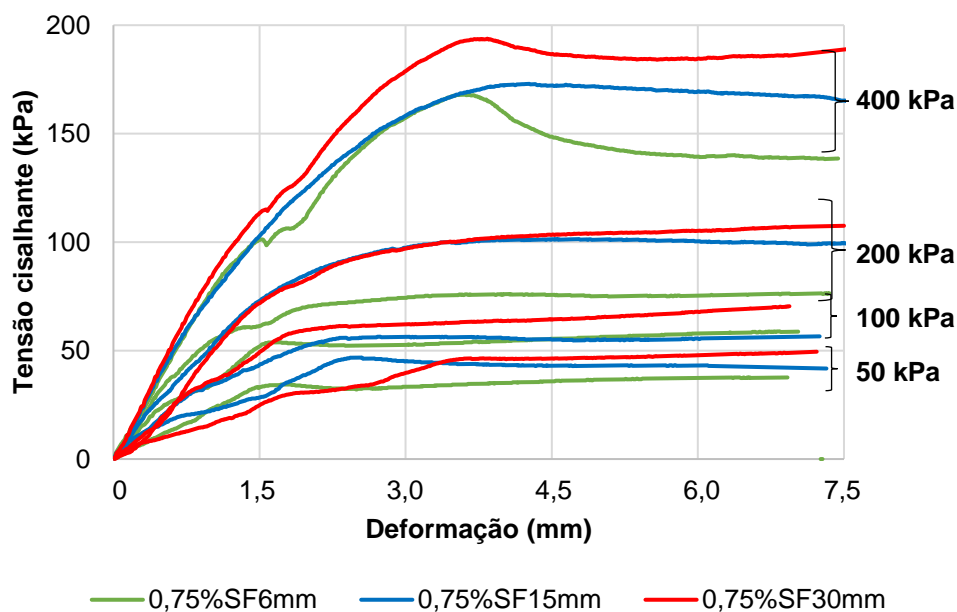
Em relação ao solo natural, o pico de resistência do solo reforçado de 0,50%SF30mm com tensão de confinamento de 400 kPa sofreu aumento de 26%. O mesmo não foi observado nas curvas cuja tensão de confinamento é de 100 kPa e 200 kPa. Nestas curvas, não foi constatado um pico definido, vide Figura 48.

Por fim, os resultados do solo reforçado com 0,75% de fibra são dados na Tabela 21 e o gráfico tensão x deformação na Figura 49.

Tabela 21- Resultados de cisalhamento direto do solo reforçado com teor de 0,75%

Tensão normal σ (kPa)	Comprimento de fibra (mm)	Resistência de pico, τ (kPa)	Tensão normal σ corr. (kPa)
50 kPa	0,75%SF6mm	37,67	49,87
	0,75%SF15mm	46,78	54,98
	0,75%SF30mm	49,49	54,70
100 kPa	0,75%SF6mm	58,85	109,35
	0,75%SF15mm	56,56	99,76
	0,75%SF30mm	70,44	110,36
200 kPa	0,75%SF6mm	76,47	221,33
	0,75%SF15mm	101,41	219,81
	0,75%SF30mm	107,53	220,46
400 kPa	0,75%SF6mm	167,99	437,19
	0,75%SF15mm	172,95	437,25
	0,75%SF30mm	193,77	437,43

Fonte: O autor (2020)

Figura 49 - Gráfico Tensão x Deformação - Cisalhamento Direto (0,75% Fibra)

Novamente, a fibra de comprimento de 30 mm apresentou maiores resultados de tensão cisalhante quando comparados aos demais comprimentos. Curvas sem um pico definido foram observadas com aplicação de tensão confinante de 50, 100 e 200 kPa em todos os comprimentos estudados.

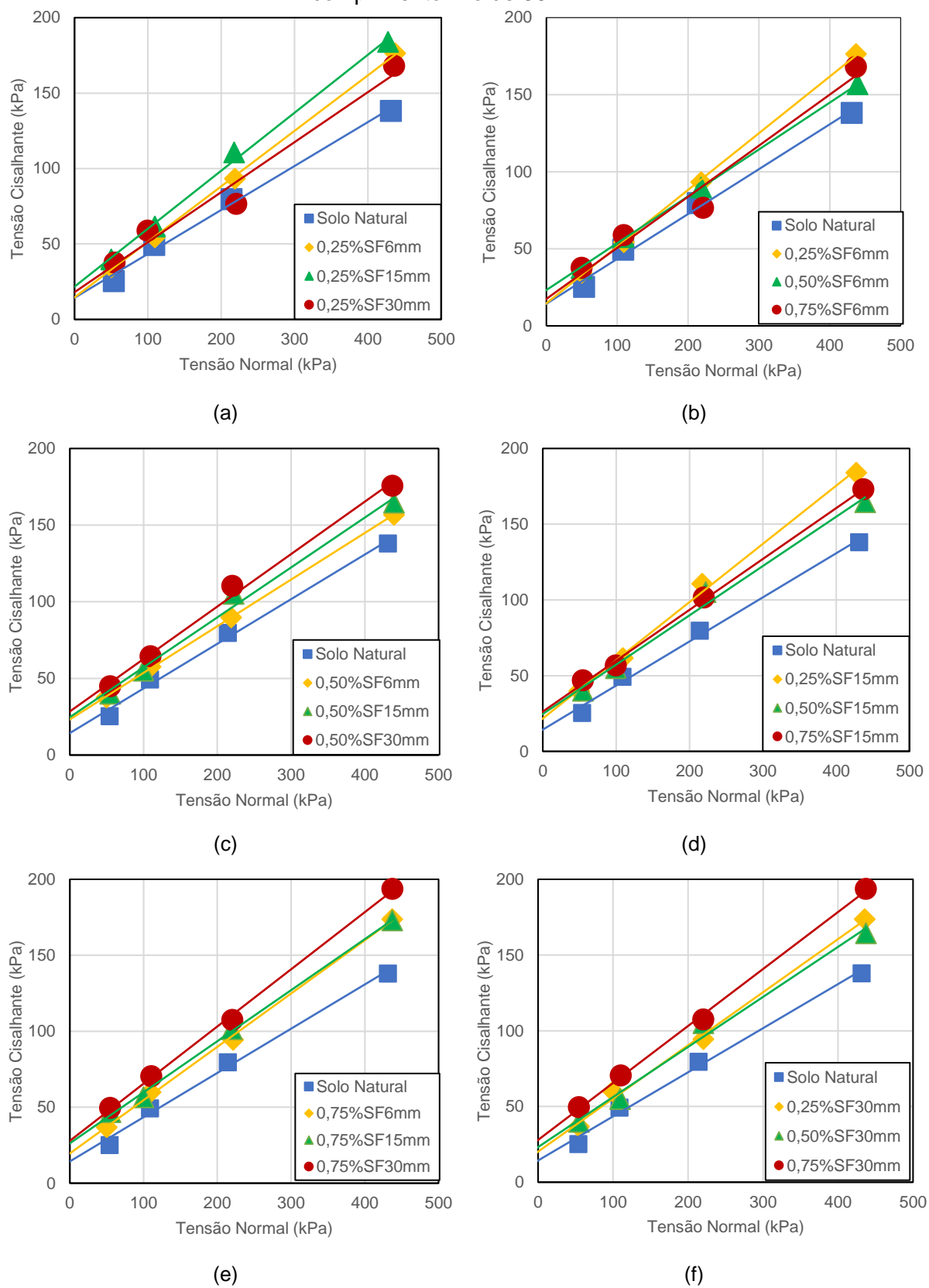
Os valores máximos de resistência foram utilizados na construção da envoltória de ruptura. Os parâmetros de coesão e ângulo de atrito estão descritos na Tabela 22. Já as envoltórias de ruptura são apresentadas na Figura 50.

Tabela 22- Ângulo de atrito e coesão do solo reforçado

Teor de Fibra (%)	Comp. de Fibra (mm)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)
0,25%	6	20,20	14,62
	15	21,02	21,71
	30	19,33	20,19
0,50	6	16,91	23,23
	15	18,04	24,69
	30	18,89	28,43
0,75	6	18,34	16,91
	15	18,57	26,23
	30	20,62	27,89

Fonte: O autor (2020)

Figura 50 - Envoltórias de ruptura solo reforçado - (a) teor fixo de 0,25% (b) comprimento fixo de 6mm (c) teor fixo de 0,50% (d) comprimento fixo de 15mm (e) teor fixo de 0,75% e (f) comprimento fixo de 30 mm.



Fonte: O autor (2020)

De um modo geral é possível notar que o incremento da fibra vegetal aumentou a resistência ao cisalhamento do solo em todos os casos. Entretanto, as fibras com 30 mm de comprimento e com teores de 0,50 e 0,75% apresentaram valores mais elevados de resistência que os demais.

O solo natural apresentou um intercepto coesivo inferior ao solo reforçado. No que diz respeito ao ângulo de atrito, o teor de 0,25% apresentou maiores valores que os demais. A variação da coesão foi mais evidente quando com alteração no comprimento das fibras, conforme dados apresentados na Tabela 22. A influência da variação dos parâmetros da fibra é assunto que será abordado nos itens seguintes.

4.3.4 Análise da Variância

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples foram submetidos à análise da variância com dois fatores independentes: o teor e o comprimento de fibra. Os resultados da análise são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23– Análise da variância do teor e comprimento de fibra dos resultados à compressão simples

Fonte de Variação ⁽¹⁾	SQ ⁽²⁾	GL	QM ⁽³⁾	F ⁽⁴⁾	Valor p ⁽⁵⁾	Significância
Teor de Fibra	29910,6	8	3738,82	69,72	3,605x10 ⁻¹⁵	Significante
Compr. de Fibra	1340,74	25	53,6295			
Total	31251,3	33				

⁽¹⁾ variáveis analisadas.

⁽²⁾ soma dos quadrados correspondentes do ao grupo amostral acompanhado do erro residual.

⁽³⁾ quadrado médio.

⁽⁴⁾ razão entre o QM(fator)/QM(residual)

⁽⁵⁾ probabilidade de que os valores obtidos pertençam a uma mesma distribuição.

Fonte: O autor (2020)

O valor de p mostrou ser inferior a 5%, sendo assim, o teor de fibra é uma variável considerada significativa.

A análise da variância do teor e comprimento de fibra dos resultados à tração por compressão diametral esta apresentada na Tabela 24. De maneira análoga, os resultados apontam um valor de *p* inferior a 5%, o que significa que, as variáveis de teor e de comprimento foram consideradas significativas.

Tabela 24 – Análise da variância do teor e comprimento de fibra dos resultados à compressão simples

Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F	Valor p	Significância
Teor de Fibra	489.27	8	61,1846	19,58	2,29x10 ⁻⁹	Significante
Compr. de Fibra	84,3798	27	3,12518			
Total	31251,3	35				

Fonte: O autor (2020)

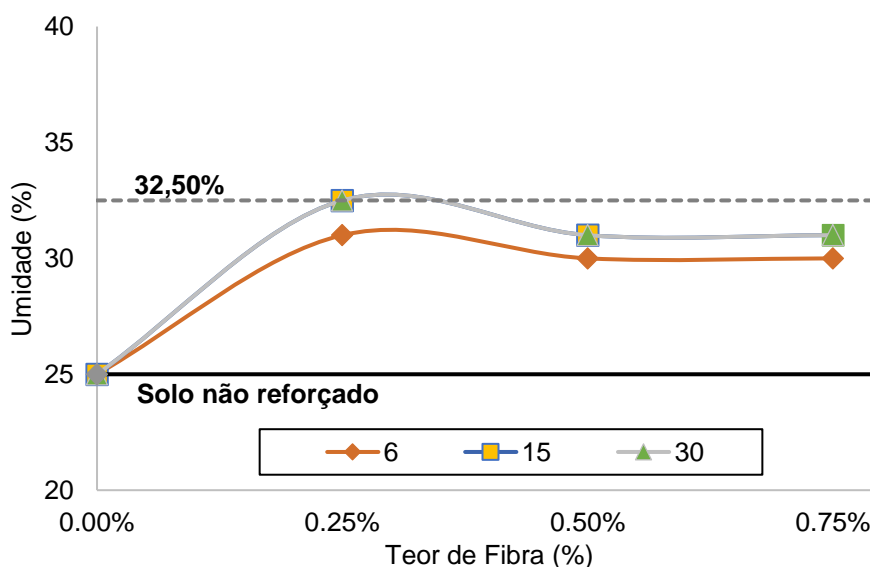
4.3.5 Influência do Teor e Comprimento de Fibras

4.3.5.1 Compactação

Os resultados obtidos no ensaio de compactação do solo foram apresentados anteriormente na Tabela 11. Desta vez, busca-se avaliar a influência dos parâmetros da fibra na matriz de solo reforçado, através de gráficos apresentados nas Figuras 51 a 54.

De acordo com a Figura 51, o teor de umidade ótimo do solo reforçado atingiu o valor máximo de 32,50%, cerca de 30% superior ao não reforçado. Além disso, nos comprimentos de 15 mm e 30 mm, a absorção de água foi mais acentuada.

Figura 51 - Relação entre o teor de umidade e o teor de fibra

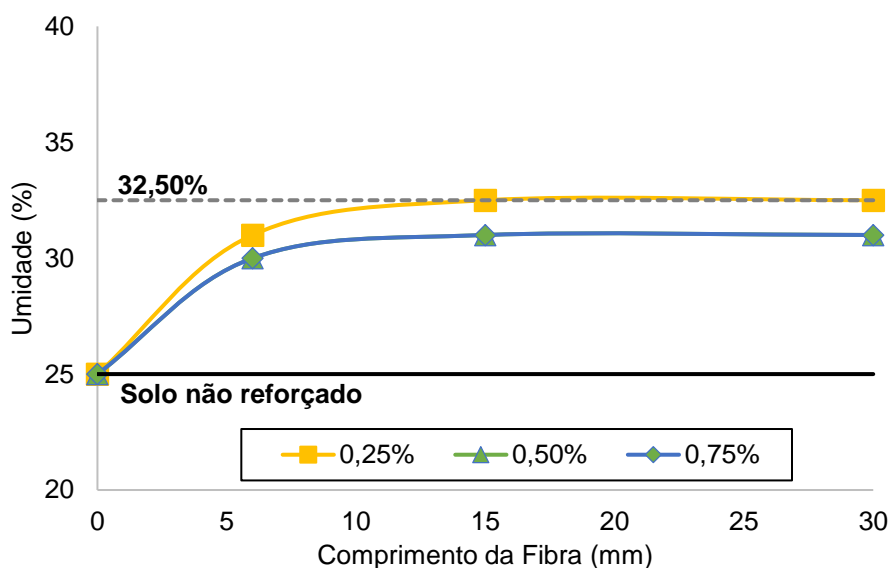


Fonte: O autor (2020)

Para teores menores de adição de fibra, o teor de umidade atinge valores mais elevados. Contudo, quando se aumenta o percentual da fibra adicionada, há uma queda no teor de umidade ótimo. Este fenômeno também foi observado por Kaniraj e Havanagi (2001), Prabakar e Sridhar (2002), justificando a queda do teor de umidade visto na Figura 51.

Assim como no teor de fibras, a relação entre o teor de umidade e o comprimento de fibra mostrada na Figura 52, revela que a variação do tamanho da fibra afeta na absorção de água. O percentual de adição de 0,25% atingiu maiores valores de OMC com fibras de comprimento de 15 e 30 mm.

Figura 52 - Relação entre o teor de umidade e o comprimento de fibra



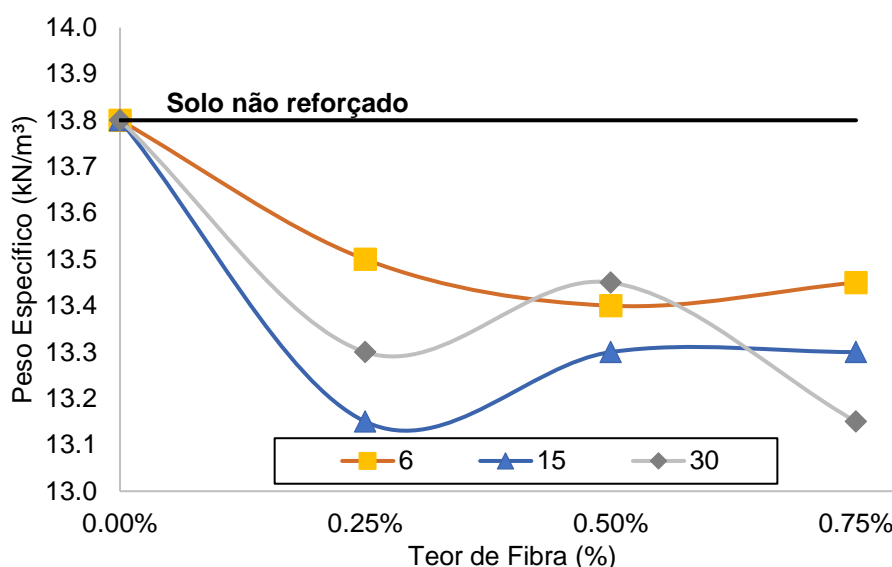
Fonte: O autor (2020)

Tendo em vista a variação do comprimento da fibra, nota-se que as fibras de 15 e 30 mm apresentaram um teor de umidade superior à fibra de 6 mm, e após atingirem o pico, há uma pequena diminuição desse teor. Entretanto, de acordo com resultados obtidos por Prabakar e Sridhar (2002), o aumento do tamanho da fibra ocasiona queda no teor de umidade ótimo, fato este que não foi observado. Apesar disso, em estudo mais recente, Gelder e Fowmes (2016), relatam que as fibras podem resistir aos esforços de compactação resultando numa estrutura entrelaçada e com mais espaços vazios, consequentemente aumentando o teor de umidade ótimo e peso específico.

Ao contrário dos efeitos de adição de fibras no teor de umidade ótimo do solo reforçado, o peso específico seco do solo (MDD) apresenta queda com a inclusão de fibra, conforme é exibido na Figura 53. Pode-se considerar que uma das justificativas para isso é a densidade dos materiais envolvidos.

Na relação entre o peso específico e o teor de fibra, nota-se que em todos os casos, o incremento de fibras ocasionou diminuição do peso específico seco. A maior variação é observada no gráfico da Figura 53, em que o peso específico passou de 13,80 kN/m³ para 13,15 kN/m³ em ensaios com 0,25%SF15mm.

Figura 53 - Relação entre o peso específico e o teor de fibra



Fonte: O autor (2020)

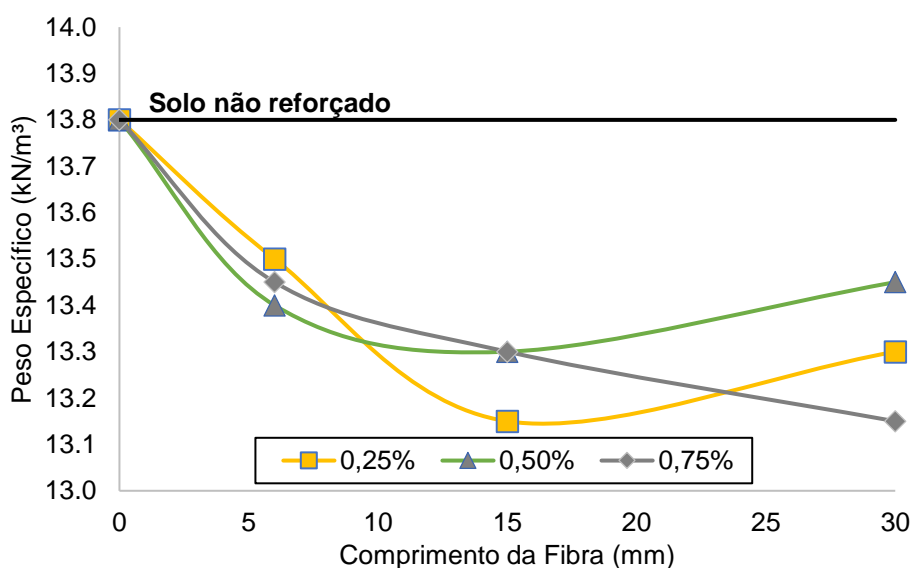
Já em relação ao comprimento das fibras é possível observar na Figura 54 que a diminuição do peso específico obedece ao aumento do tamanho das fibras de 6 para 15mm e de 15 para 30mm nos teores de 0,25 e 0,50%. Posteriormente, para estes mesmos casos é visto um aumento do peso específico devido à resistência conferida pelas fibras durante a realização do ensaio, conforme descreve Gelder e Fowmes (2016).

Outro motivo que justifica o aumento do peso específico pode estar relacionado aos efeitos da homogeneização da amostra que foi menos pronunciado nos comprimentos citados. Todavia, em relação à fibra com teor de 0,75% ocorre o esperado, aumento do comprimento e queda do peso específico.

No que diz respeito à variação do peso específico seco do solo nas curvas de compactação, Kumar e Singh (2008) alcançaram uma redução de 2,8% desse parâmetro adicionando fibra de polipropileno em teor de 0,50% e 51 mm de comprimento.

Finalmente, o comportamento do solo reforçado de maneira geral obedece aos preceitos indicados na literatura, que tem como características aumentar o teor de umidade ótimo e diminuir a peso específico seco do solo.

Figura 54 - Relação entre o peso específico e o comprimento de fibra



Fonte: O autor (2020)

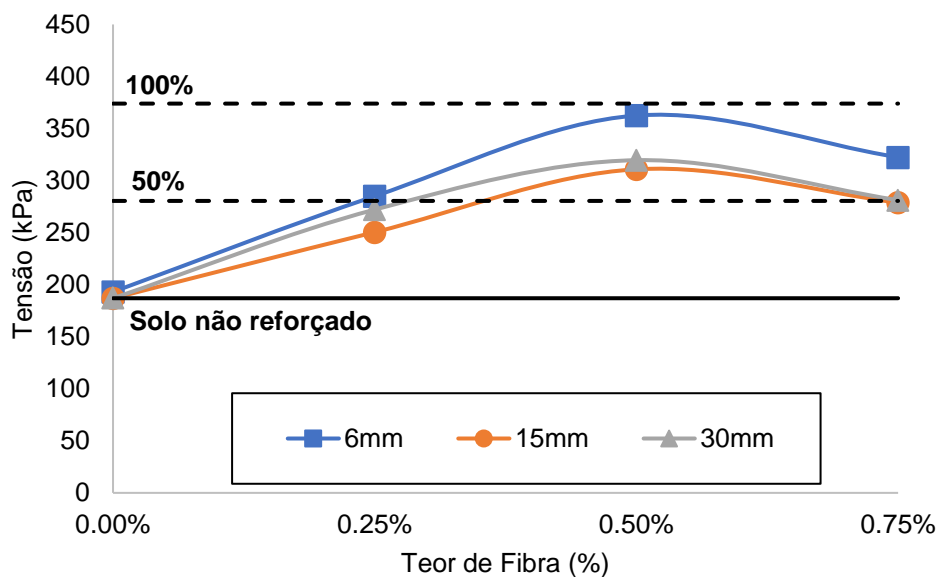
4.3.5.2 Compressão simples

Na compressão simples, as fibras adicionadas provocaram um acréscimo de resistência em todos os casos estudados em que houve variação do seu teor e comprimento, em relação ao solo não reforçado, conforme apresentado nas Figuras 55 e 56.

O maior ganho de resistência foi obtido com o incremento de fibra de 6 mm no teor de 0,50%. Nos gráficos apresentados, a curva que representa a fibra de 6 mm foi superior em todos os teores estudados, seguido pela curva de 30 mm. Na Figura 56, não foram observados grandes variações de tensão para os comprimentos de 15

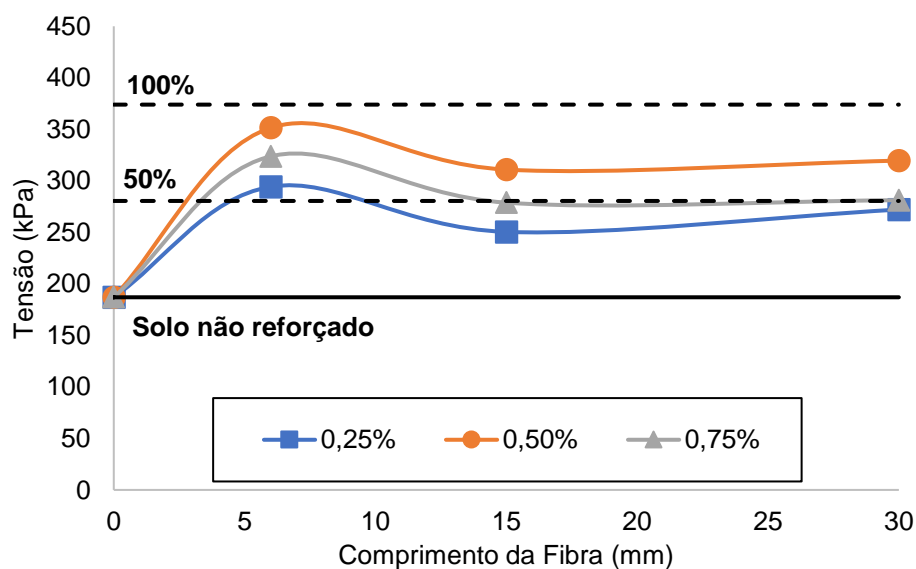
e 30 mm. Já para a fibra de 6 mm, o ganho de resistência em qualquer teor estudado está entre 50% e 100%.

Figura 55 - Relação entre a resistência a compressão simples e o teor de fibra



Fonte: O autor (2020)

Figura 56 - Relação entre a tração por compressão diametral e o teor de fibras



Fonte: O autor (2020)

Estudando os efeitos da variação do teor de fibra, Kumar e Singh (2008), avaliaram os teores de 0,1 a 0,5% em intervalos de 0,1% em cinzas volantes e

misturas com solos. Os autores verificaram que o atrito entre a mistura e a fibra concede maior resistência, e também, uma relação linear crescente entre o teor de fibra e a resistência, sendo que o comprimento e o teor de fibra ótimos foram de 30 mm e 1%, respectivamente, e para valores acima dos mencionados, nota-se uma queda nos valores de compressão.

De acordo com Consoli *et al.* (2002) na variação do teor de fibras de 0,1 a 0,9% foi constatado aumento médio de resistência à compressão de cerca de 40% em uma areia cimentada. Os autores também enfatizam a influência do comprimento do reforço adicionado à matriz, sendo que os melhores resultados foram observados em fibras de 36 mm. Já o aumento de resistência alcançado por Festugato *et al.* (2016) foi de 35% considerando a variação de fibras de 0-24 mm.

Embora usual, segundo Consoli *et al.* (2002), os efeitos de melhoria do comprimento do reforço não são detectados em ensaio de compressão simples, havendo necessidade de realização do ensaio triaxial.

Em resumo, em relação aos resultados de compressão simples pode-se afirmar que o teor e o comprimento ótimos de fibra a ser adicionado a uma matriz de solo é de respectivamente 0,50% e 6 mm.

4.3.5.3 Tração por compressão diametral

Assim como nos demais ensaios, a adição de fibras e variação dos seus parâmetros forneceram efeitos positivos de resistência ao solo. Em todos os casos, o acréscimo de resistência à tração foi superior à 50%, o que pode ser visto nas Figuras 59 e 60, com exceção da fibra de 15 mm no teor de 0,25% que atingiu o menor dos resultados mensurados.

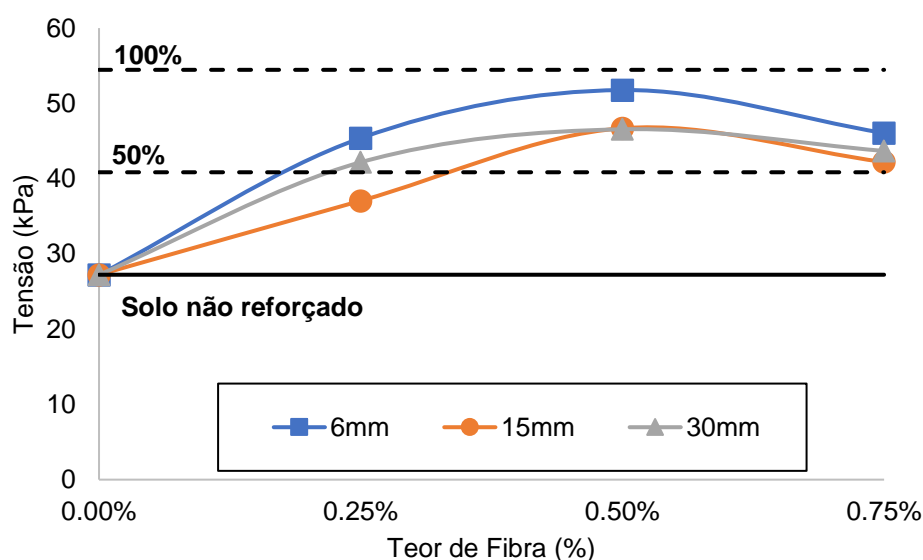
Com relação aos teores de fibra utilizados, há um crescimento da resistência à tração com o aumento do teor de fibra. Na Figura 57, nota-se que há elevação da resistência nos teores de 0,25% e 0,50%. Já entre os teores de 0,50% a 0,75% ocorre uma redução. Deste modo, pode-se dizer que o teor de 0,50% apresenta os melhores resultados, conforme ilustrado na Figura 57.

Em relação ao comprimento das fibras adotadas, nota-se que o valor máximo de resistência é obtido utilizando fibra de 6 mm. Após apresentar o pico de resistência,

visto na Figura 68, o valor de tração sofre uma queda. Posteriormente, utilizando fibras de 30 mm a resistência sofre um aumento.

Festugato *et al.*(2016) relatam que melhorias na resistência à tração de aproximadamente 67% foram obtidas com o aumento do comprimento da fibra de zero para 24mm. Este mesmo comprimento também apresentou melhores resultados quando comparados à fibra lisa de 12 mm, conforme descreve Roque (2017). Ademais, verificou-se também que fibras corrugadas de 25 mm apresentaram resultados superiores as de 50 mm, e demais fibras lisas. Nas fibras corrugadas há maior interação fibra-solo, o que justifica o ganho de resistência elevado.

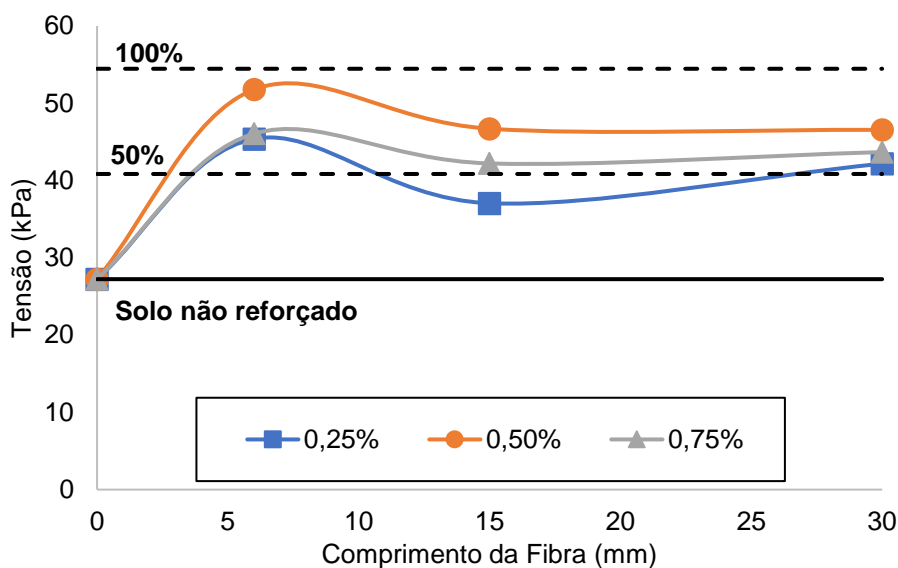
Figura 57 - Relação entre a tração por compressão diametral e o teor de fibras



Fonte: O autor (2020)

Por fim, dado os resultados indicados de tração por compressão diametral, o comprimento de fibra de 6 mm e o teor de 0,50% são os que atingiram resultados superiores. No entanto, cabe ressaltar que a dificuldade de homogeneização das fibras à matriz, principalmente em teores e comprimentos elevados, interfere nos resultados obtidos (ROQUE, 2017).

Figura 58 - Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e o comprimento de fibra



Fonte: O autor (2020)

4.3.5.4 Cisalhamento

Os principais efeitos da adição de fibras no cisalhamento direto residem no aumento da ductilidade do solo reforçado pós pico e na redução da densidade. A alteração dos parâmetros de coesão e do ângulo de atrito também é notada com o incremento das fibras, conforme apresentado nas Figuras 59 e 60, respectivamente.

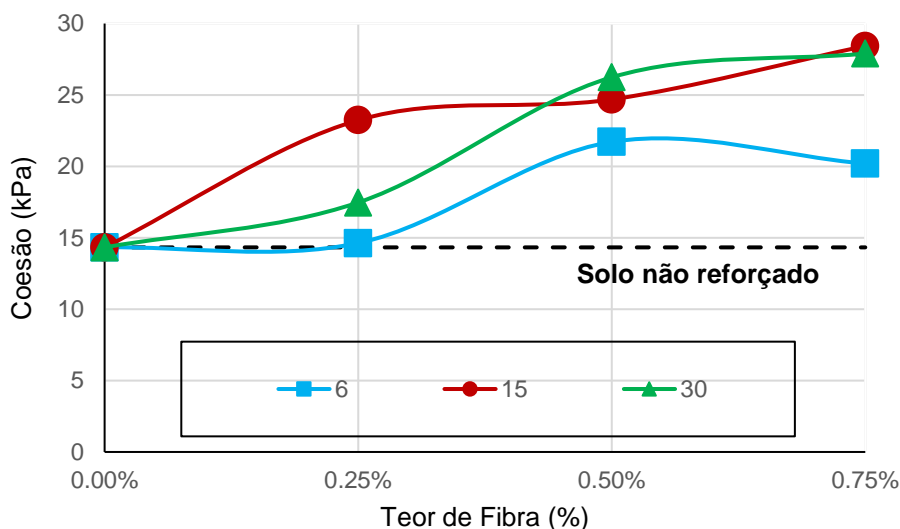
Com o aumento do teor de fibras, nota-se na Figura 61 que a coesão passou de 15 kPa para valores superiores a 20 kPa, considerando o teor de 0,75%. Este aumento foi gradativo, haja visto que, os teores de 0,25% e 0,50% também mostraram ser maiores que a coesão do solo não reforçado.

Dados da literatura apontam que nos solos reforçados com fibra os valores de coesão são superiores aos não reforçados (GRAY; OHASHI, 1983; HEJAZI *et al.*, 2011; KANIRAJ; HAVANAGI, 2001; SILVEIRA, 2018; VENDRUSCULO, 2003; WEI *et al.*, 2018; ZAIMOGLU; YETIMOGLU, 2012).

Em uma matriz arenosa reforçada com fibra de coco de 50 mm, Aguilar (2015) constatou que houve acréscimo de 20% no ângulo de atrito e geração de uma coesão aparente de 50,43 kPa em relação ao solo não reforçado. Para esta pesquisa, o incremento do teor de fibra também influenciou no aumento do ângulo de atrito

segundo o que foi mencionado por Aguilar (2015), já o valor da coesão variou de acordo com o comprimento e distribuição das fibras.

Figura 59 - Relação entre a coesão e o teor de fibras

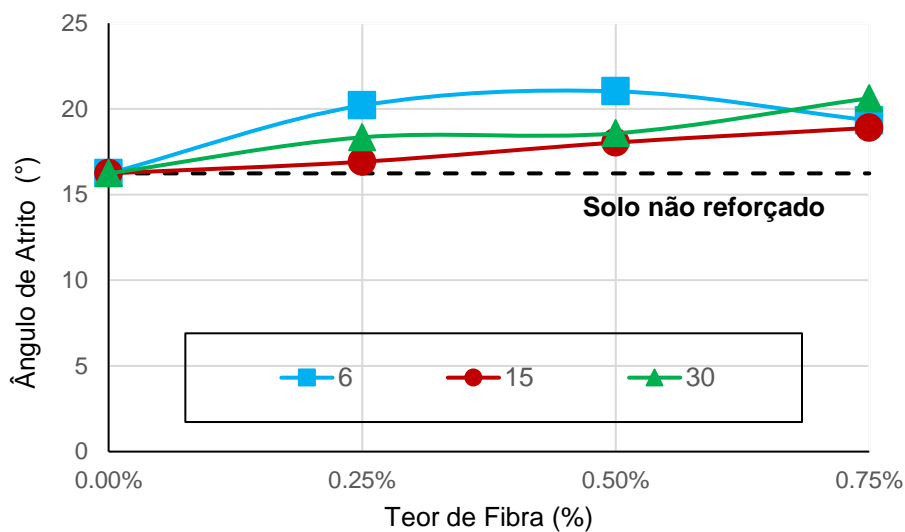


Fonte: O autor (2020)

A variação do ângulo de atrito ao longo do aumento do teor de fibras não apresentou grandes variações. Na Figura 60, nota-se que em relação ao solo não reforçado, a variação do ângulo de atrito foi de aproximadamente 5° . Considerando a relação entre as curvas de solo reforçado apresentadas, esta variação é ainda menor.

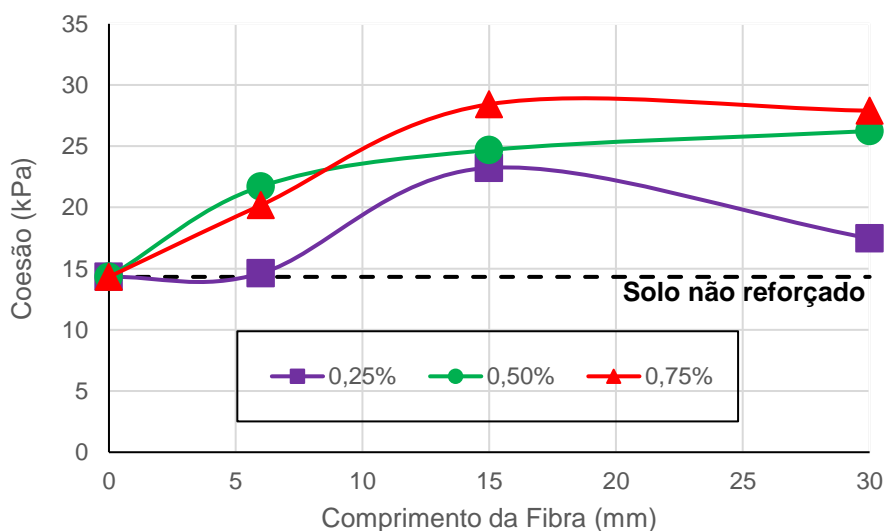
Na relação entre a coesão e o comprimento da fibra (Figura 61), percebe-se que o aumento da coesão da mistura está relacionado a um maior comprimento da fibra.

Conforme Figura 62, na relação entre o ângulo de atrito e o comprimento de fibra observa-se uma tendência de pico referente às fibras de 6 mm. Após o pico, e aumentando o comprimento, percebe-se uma queda no ângulo de atrito, e posteriormente ele volta a subir. No entanto, a variação do ângulo de atrito não ultrapassa 5° , conforme Figura 64, o que corresponde a um aumento de aproximadamente 33%.

Figura 60 - Relação entre o ângulo de atrito e o teor de fibras

Fonte: O autor (2020)

Utilizando reforço com fibra natural de palmeira, Ahmad, Beteni e Azmi (2010), identificaram um aumento aproximado de 25% no ângulo de atrito e 35% na coesão, comparando o material sem reforço. Este resultado foi obtido empregando fibras de 30 mm em um teor de 0,5%. Na presente pesquisa, estes mesmos parâmetros forneceram melhorias de aproximadamente 98 e 16%, para coesão e ângulo de atrito, respectivamente.

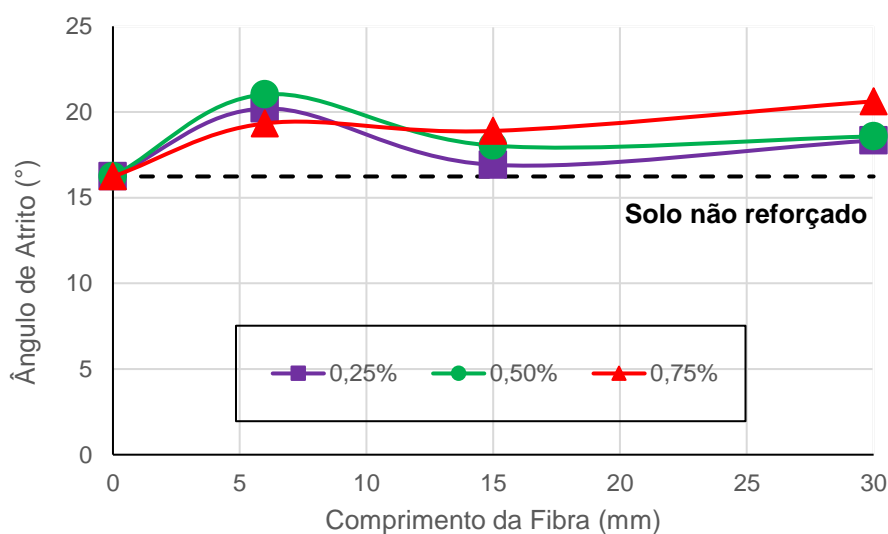
Figura 61 - Relação entre a coesão e o comprimento da fibra

Fonte: O autor (2020)

Por fim, observa-se que em geral, tanto o aumento do comprimento quanto do teor de fibra gera aumento no ângulo de atrito e na coesão do solo reforçado. Diferentemente dos outros parâmetros analisados, não houve uma formação de um pico, haja visto que nos resultados obtidos essa informação não ficou explícita.

A adoção dos parâmetros de teor e comprimento das fibras a serem adicionadas à massa de solo deve atender os critérios de resistência mencionados anteriormente. No que diz respeito à resistência ao cisalhamento os maiores valores de tensão cisalhante foram obtidos com aplicação de fibras no teor de 0,25% e 15 mm de comprimento, que conseqüentemente, forneceu dados ângulo de atrito de 21,02 kPa e coesão de 21,71°, conforme já apresentado na Tabela 22.

Figura 62 - Relação entre o ângulo de atrito e o comprimento da fibra

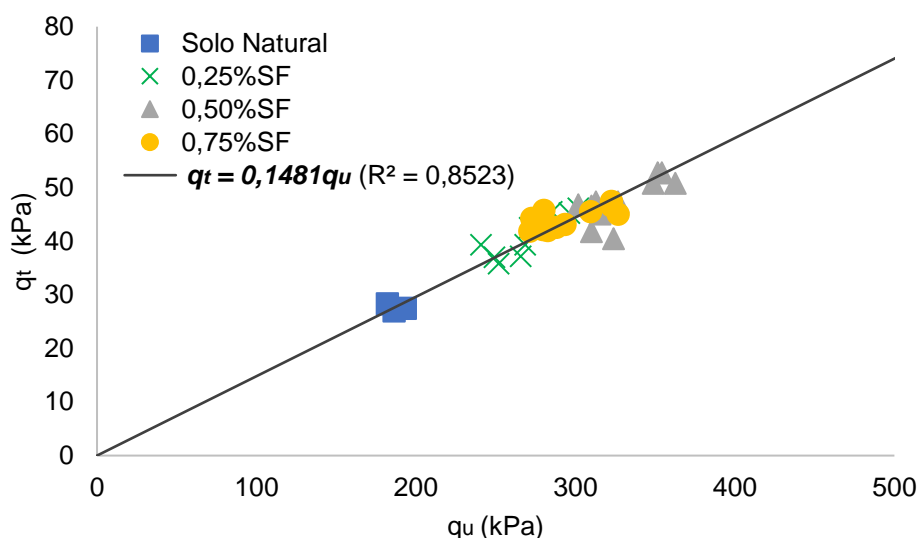


Fonte: O autor (2020)

4.3.6 Relação Empírica Entre q_t e q_u

Esta relação se dá a partir dos resultados oriundos dos ensaios de tração por compressão diametral e compressão simples (Figura 63).

Figura 63 - Relação entre q_t/q_u



Fonte: O autor (2020)

Na Figura 63, observa-se que há uma relação linear de $R^2 = 0,8523$ entre q_t e q_u . Pela equação linear obtida, a resistência à tração corresponde a aproximadamente 15% da tensão de compressão. Além disso, os valores que apresentaram maior resistência correspondem ao teor de 0,50%, seguido por 0,75% e por fim 0,25% em suas respectivas resistências de pico.

Os resultados obtidos por Teixeira (2019) e Baldovino (2018) mostram que para um solo estabilizado com cal, a relação entre q_t/q_u é de aproximadamente 0,15 e 0,16 respectivamente. Além disso, Baldovino (2018) destaca que essa relação é útil para aplicação em campo, para determinar de maneira rápida a resistência do solo quando se tem resultados apenas de ensaios de compressão e deseja-se estimar a resistência à tração do solo.

4.3.7 Síntese dos Resultados

Em relação aos resultados obtidos nesta pesquisa, têm destaque a eficiência da aplicação da técnica de reforço utilizando fibras vegetais de curauá. Nota-se que o aumento no teor de fibras proporciona um aumento na resistência de pico. Entretanto este aumento de resistência é observado até o denominado teor ótimo de fibra.

Tendo em vista a variação no comprimento do reforço, a fibra vegetal de 6 mm apresentou resultados mais satisfatórios levando em consideração os ensaios de compressão simples e tração diametral. Todavia, no que diz respeito aos ensaios de cisalhamento direto, as fibras de maior comprimento evidenciaram o estado de ancoragem das fibras no solo, fornecendo maiores resistência para maiores tensões de confinamento.

O aumento da ductilidade do material reforçado é um dos grandes destaques, haja visto que em todos os casos em que a fibra foi aplicada, a deformação atingiu valores bem mais elevados que no solo não reforçado sem que houvesse queda brusca de resistência.

Já em relação ao tratamento das fibras, percebe-se que a absorção de água em fibras tratadas é menor devido a ação impermeabilizante do polímero na superfície da fibra, e também que os efeitos da degradação natural são minimizados. Já aspectos econômicos da aplicação do tratamento não foram avaliados.

Por fim, alguns dos principais resultados obtidos com a realização desta pesquisa são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Síntese dos principais resultados

	W_{ot} (%)	γ_{esp} (kN/m ³)	q_u (kPa)	ϵ_p^* (%)	q_t (kPa)	ϵ_p^* (%)	σ (kPa)	τ (kPa)	ϵ_{rup} (%)	c (kPa)	ϕ (°)
Solo Natural	25	13,80	186,5	2,8	27,23	2,0	431	138	2,9	24,8	32,4
0,5%SF6mm	30	13,40	351,4	4,2	51,77	7,0	439	156	4,7	23,2	16,9
0,5%SF15mm	31	13,30	310,8	4,5	46,70	8,0	439	164	4,7	24,7	18,0
0,5%SF30mm	31	13,45	319,6	4,6	46,56	8,0	437	175	4,7	28,4	18,9

* Deformação específica no pico de resistência

Fonte: O autor (2020)

5 CONCLUSÕES

A aplicação de fibras vegetais de curauá como reforço tornou-se uma alternativa eficiente devido principalmente às suas propriedades de resistência, sendo inclusive aceita na substituição de fibras de origem polimérica, como é visto na indústria automotiva.

Em relação à utilização de fibras associada a solos, a literatura é unânime em ressaltar os efeitos benéficos de resistência oriundos da adição deste tipo de reforço, entretanto, alguns parâmetros devem ser definidos: o tipo de fibra, suas propriedades físicas e o percentual a ser inserido. Nas fibras vegetais, o efeito da biodegradação também é uma variável a ser analisada. Deste modo, pesquisas recentes têm sido promissoras em oferecer um tratamento às fibras capazes de aumentar sua durabilidade no compósito.

De maneira prática, o uso das fibras naturais na geotecnia é recomendado para obras em que a solicitação é maior durante ou imediatamente após a conclusão do projeto, como por exemplo, algumas obras temporárias de rodovias. De qualquer forma, é muito importante que sejam avaliados os parâmetros de durabilidade da fibra em relação ao seu processo de degradação, ou então, que seja aplicado um tratamento eficiente capaz de garantir que os requisitos de segurança perdurem ao longo da vida útil da construção.

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar o comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras de curauá em três diferentes teores e comprimentos, quantificando os ganhos de resistência em relação ao solo não reforçado. Desta forma, conclui-se que:

- 1) Obedecendo aos critérios de classificação, o solo foi definido como um silte arenoso com apenas 3% de argila. Em sua composição química, foram observados os mesmos componentes químicos do quartzo e da bauxita;
- 2) A composição química da fibra de curauá realizada em ensaio de FRX identificou a presença de partículas de solo aderidas à superfície da fibra. Já nos resultados obtidos por análise EDS identificou-se a presença majoritária dos elementos de oxigênio e carbono. De acordo com o pH, a fibra é de base ácida;

- 3) A capacidade de absorção da fibra vegetal sofreu leve diminuição com o tratamento por impregnação de EPS. Uma pequena alteração também foi observada na resistência à tração da fibra vegetal com o tratamento, aumentando em aproximadamente 5%;
- 4) As fibras tratadas com EPS apresentaram uma alteração de superfície devido à aplicação do polímero. Os efeitos da biodegradação foram observados nas fibras, independentemente do tratamento. No entanto, efeitos mais nocivos foram visualmente observados nas fibras sem tratamento e que apresentaram maior dispersão e rugosidade;
- 5) Na compactação, o aumento no teor de fibra fez com que a umidade ótima variasse de 25% (solo natural) para 32,5% (solo reforçado). Já em relação ao peso específico ocorreu o inverso, o aumento no teor de fibras ocasionou uma diminuição de 13,80 kN/m³ (solo natural) para 13,15 kN/m³ (solo reforçado com fibra de 30 mm e teor de 0,75%), possivelmente justificado pela densidade da fibra ser menor que a do solo.
- 6) Na resistência à compressão simples, o acréscimo mínimo de resistência foi de 33,94% e o máximo de 87,96%. Em geral, o aumento no teor de fibra proporcionou melhores resultados de resistência, embora, o teor ótimo tenha sido de 0,50%. O mesmo não foi observado com o comprimento, sendo que as fibras de 6 mm apresentaram resultados superiores aos outros tamanhos;
- 7) O comprimento e o teor ótimo que forneceram os melhores resultados nos ensaios de compressão simples e tração diametral foram de 6 mm e 0,50%, respectivamente. O acréscimo de resistência em relação ao solo não reforçado atingiu o valor máximo de 90,12%. Já a composição com teor de 0,25% e 15 mm de comprimento atingiu o acréscimo mínimo de resistência observado foi de 36,10%;
- 8) A resistência ao cisalhamento do solo reforçado foi superior ao solo natural. As fibras de 30 mm apresentaram os melhores resultados, o acréscimo de resistência foi de 95% e 43% para as tensões confinantes de 50 e 100 kPa, respectivamente. Em grande parte dos casos com tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa, não foi observado um pico definido um possível alongamento ou deslizamento das fibras ancoradas.

- 9) O intercepto coesivo aumenta em função do aumento do teor e do comprimento das fibras, o mesmo ocorre com o ângulo de atrito com variação máxima de aproximadamente de 5°;
- 10) Considerando os ensaios realizados, os solos reforçados com teor de 0,50% e comprimento de 6 mm apresentaram resistência de pico mais relevantes que os demais teores e comprimentos. Entretanto, embora não apresentada, a resistência residual mostrou ser o efeito mais notório do solo reforçado, independentemente do teor ou comprimento de fibra adotado, o que garante ao compósito maior ductilidade.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento de um trabalho científico nem sempre é capaz de responder à todas as perguntas pertinentes a um determinado assunto. Muitas vezes busca-se dar maior ênfase em alguma área ou ensaio e algumas perguntas acabam ficando sem resposta.

Em se tratando no desenvolvimento de um novo material em que se busca sua aplicabilidade e aceitação junto à comunidade, muitas questões estão envolvidas quanto à sua viabilidade econômica, propriedades mecânicas, durabilidade, necessidade de manutenção, dentre outros assuntos.

Em virtude disso, algumas sugestões de assuntos a serem abordados para ampliação do conhecimento são apresentados a seguir:

- Avaliar a aplicação de técnicas de impermeabilização da fibra vegetal que possam garantir ao longo do tempo que os efeitos de degradação ambiental sejam minimizados;
- Quantificar e avaliar os aspectos econômicos relacionados ao tratamento de fibras vegetais a fim de validar sua execução;
- Avaliar as propriedades mecânicas das fibras vegetais ao longo do tempo e desenvolver uma equação capaz de relacionar a perda de resistência ao longo do tempo.
- Verificar o envelhecimento natural de outros tipos de fibras.

REFERÊNCIAS

AGUILAR, J. R. T. **Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Reforçado com Fibras de Coco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Técnico Científico da PUC-Rio, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2015.

AHMAD, F.; BATENI, F.; AZMI, M. Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. **Geotextiles and Geomembranes**. v.28, n. p. 93-99. Jan 2009.

ÅHNBERG, H.. Strength of stabilised soils: **A laboratory study on clays and organic soils stabilised with different types of binder**. Thesis (Doutorado) - Department of construction Sciences, Lund University. Lund, 2006.

ALVAREZ, P. J.; ILLMAN, W. A. Bioremediation and natural attenuation: process fundamentals and mathematical models: **John Wiley & Sons**, 2005. v. 27.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-3282**: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Pur-poses. West Conshohocken, 2015.

_____. **ASTM D-2487**: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). West Conshohocken, 2017.

_____. **ASTM C1557**: Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers. West Conshohocken, 2014.

_____. **ASTM D3080 / D3080M-11**: standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken, 2011.

_____. **ASTM D3171**: Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials. West Conshohocken, 1999

AMIANTI, M. **Uso e Aplicação do Poliestireno Expandido (EPS) Reciclado para Impermeabilização por Impregnação de Superfícies de Concreto Pré-fabricado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro preto, 2005.

ARAYA-LETELIER. G.; CONCHA-RIEDEL, J.; ANTICO, F.C.; VALDÉS, C.; CÁCERES, G. Influence of natural fiber dosage and length on adobe mixes damage-mechanical behavior. **Construction and Building Materials**. v.174, n.1, p. 645-655, abr. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 12770**: Solo coesivo - Determinação da resistência a compressão não confinada. - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 16097**: Solo - Determinação do teor de umidade - Métodos expeditos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7180**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR NM ISO 287**: Papel e cartão - Determinação do teor de umidade de um lote - Método por secagem em estufa, Rio de Janeiro, 2009.

BABU, S. G. L.; VASUDEVAN, A. K.; SAYIDA, M. K. Use of coir fibers for improving the engineering properties of expansive soils. **Journal of Natural Fibers**. v. 5, n. 1, p.61-75, out. 2008.

BALDOVINO, J.J.A.; IZZO, R. L. S.; FELTRIM, F.; SILVA, E. R. Experimental study on guabirota's soil stabilization using extreme molding conditions. **Geotechnical and Geological Engineering**. v.1, n.1, p. 1-17, jan. 2020b.

BALDOVINO, J.J.A.; IZZO, R. L. S.; PEREIRA, M. D.; ROCHA, E. V. G.; ROSE, J. L.; BORDIGNON, V. R. Equations controlling tensile and compressive strength ratio of sedimentary soil–cement mixtures under optimal compaction conditions. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v.32, n. 1, jan. 2020a.

BALDOVINO, J.J.A.; IZZO, R. L. S.; SILVA, E.R.; ROSE, J.L. Sustainable use of recycled-glass powder in soil stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 32, n. 5, p. mai. 2020.

BALDOVINO, Jair J. A. **Comportamento Mecânico de um Solo Siltsoso da Formação Geológica Guabirotuba Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in polymer science**, v. 24, n. 2, p. 221-274, 1999.

BORDOLOI, S.; HUSSAIN, R.; GARG, A.; SREEDEEP, S.; ZHOU, W. H. Infiltration characteristics of natural fiber reinforced soil. **Transportation Geotechnics**. v.12, n.1, p.37-44. mar. 2017.

BORGES, Ana Paula S. N. **Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

BOZBEY, I.; KELESOGLU, M. K.; DEMIR, B.; KOMUT, M.; COMEZ, S.; OZTURK, T.; MERT, A.; OCAL, K.; OZTOPRAK, S. Effects of soil pulverization level on resilient modulus and freeze and thaw resistance of a lime stabilized clay. **Cold Regions Science and Technology**. v. 151, n. 1, p. 323-334, jul. 2018.

BUDINSKI, K. G.; BUDINSKI, M. K. **Engineering Materials: Properties and Selection**. 9. Ed. Londres: Pearson, 2010.

BUNAWAN, A. R.; MOMENI, E.; ARMAGHANI, D. J.; SAID, K. N. M.; RASHID, A. S. A. Neuro-fuzzy and neural network techniques to estimate bearing capacity of cohesive soft soils reinforced with soil-cement columns. **Measurement**. v. 124, n. 1, p. 529-538, abr. 2018.

CABALA, Guillermo V. E. **Estudo do Comportamento Mecânico de Estruturas de Solo-Cimento Reforçado com Fibras de Coco e Hastes de Bambu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRN, Natal, 2007.

CARDOSO, A. **Comportamento Mecânico de um Solo da Formação guabirotuba Com Adição De Resíduo de Rochas Ornamentais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

CASAGRANDE, Michéle Dal Toé. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

CHEN, C.; ZHABG, G.; ZORNBERG, J. G.; MORSY, A. M.; ZHU, S.; ZHAO, H. Interface behavior of tensioned bars embedded in cement-soil mixtures. **Construction and Building Materials**. v. 186, n. 1, p. 840-853, jul. 2018.

CONSOLI, N. C.; CASAGRANDE, M. D. T.; COOP, M. R. Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. **Géotechnique**, Porto Alegre, v. 57, n. 9, p. 751-756, jan. 2007.

CONSOLI, N. C.; MONTARDO, J. P.; PRIETTO, P. D. M.; PASA, G. S. Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**. v.128, n. p. 462-472, jun. 2002.

COSTA, José E. G. **Estudo da degradação de geotêxteis em fibra natural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER ME 258**: Solos Compactados em Equipamento Miniatura - Mini-MCV, Brasília, 1994.

_____. **DNER – ME 093**: Solos – determinação da densidade real – método de ensaio. Brasília, 1994.

_____. **DNER – ME 256**: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão – método de ensaio. Brasília, 1994.

FAROUK, A.; SHAHIEN, M. M. Ground improvement using soil–cement columns: Experimental investigation. **Alexandria Engineering Journal**. v. 52. n. 1, p. 733-740, set. 2013.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H.; SAIND, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**. v. 37, n. 11, p. 1552-1596, mai. 2012.

FESTUGATO, L.; Menger, E.; Benezra, F.; Kipper, E. A. Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 45, n. p. 77-82, set. 2016.

FESTUGATO, Lucas. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FERREIRA, S. **Influência do Tratamento de Molhagem e Secagem na Aderência Fibra-Matriz e no Comportamento Mecânico de Compósitos Cimentícios Reforçados Randomicamente com Fibras de Sisal**. Dissertação (Mestrado) -

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UEFS, Bahia, 2012.

FEUERHARMEL, Marcos R. **Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

FORCELINI, M.; GARBIN, G. R.; FARO, V. P.; CONSOLI, N. C. Mechanical Behavior of Soil Cement Blends with Osorio Sand. **Procedia Engineering**. v. 143, n. 1. p. 75-81, jun. 2016.

FUJIHASHI, G. A.; BARBOSA, W. L. R. Ananas erectifolius (Curauá): padronização dos extratos, frações e do material vegetal. **Revista Científica da UFPA**, v.3 n. p. 1-6. 2002.

GALVEZ, Jorge H. F. **Efeito da adição de fibras no comportamento de uma areia sob carregamentos cíclicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

GELDER, C.; FOWMES, G. J. Mixing and compaction of fibre and lime-modified cohesive soil. **Ground Improvement**. v.169, n.2, p. 98-108, mai. 2016.

GHADIR, P.; RANJBAR., N.; Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. **Construction and Building Materials**. v. 188, n.1, p. 361- 371, jul. 2018.

GHAVAMI, K.; TOLEDO FILHO, R. D.; BARBOSA, N. P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. **Cement and Concrete Composites**. v. 21, n. 1, p. 39-48, 1999.

GIRARDELLO, Vinicius. **Comportamento de ensaios de arrancamento de placas embutidas em camadas de solo-cimento-fibra**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2014.

GOMES, A.; MATSUO, T.; GODA, K.; OHGI, J. Development and effect of alkali treatment on tensile properties of curaua fiber green composites. **Composit Part**. v.38, n. p. 1811-1820. 2007.

GOWTHAMAN, S.; NAKASHIMA, K.; KAWASAKI, S. A state-of-the-art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: Past findings, present trends and future directions. **Materials**. v. 11, n. 4, 2018.

GRANDE, Fernando M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2003.

GRAY, D. H.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, American Society of Civil Engineering. Ann Arbor. v. 109, n. 3, p. 335-353, mar. 1983.

HARMIA, T. Fatigue behavior of neat and long glass fiber (LGF) reinforced blends of nylon 66 and isotactic PP. **Polymer Composites**. v. 17, n. 6, p. 926-936, dez. 1996.

HARNNECKER, F.; ROSA, D. S.; LENZ, D. M. Biodegradable Polyester-Based Blend Reinforced with Curauá Fiber: Thermal, Mechanical and Biodegradation Behaviour. **Journal Polymer Environment**. v.20, n. p. 237-244. 2012.

HEJAZI, S. M.; SHEIKHZADEH, M.; ABTAHI, S. M.; ZADHOUSH, A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Construction and Building Materials**. v.30, n.2012. p.100-116, jul. 2011.

HOLLAWAY, L. C.; HEAD, P. R. **Advanced polymer composites and polymers in the civil infrastructure**. 1. ed. Cambridge: Elsevier, 2001.

HORPIBULSUK, S.; CHINKULKIJNIWAT, A.; CHOLPHATSORN, A.; SUEBSUK, j.; LIU, M. D. Consolidation behavior of soil–cement column improved ground. **Computers and Geotechnics**. v. 43, n. 1, p. 37-50, mar. 2012.

HORROCKS, A. R.; ANAND, S. C. **Handbook of technical textiles**. The Textile Institute. Cambridge, 2000.

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Earth Construction: A Comprehensive Guide**. 1. ed. Londres: Pratical Action, 1994.

IBRAIM, E.; DIAMBRA, A.; MUNIR WOOD, D.; RUSSELL, A. R. Static liquefaction of fibre reinforced sand under monotonic loading. **Geotextiles and Geomembranes**. Reino Unido. v. 28, n.1, p. 374-385, fev. 2010.

ILLSTON, J. M.; DOMONE, P. L. J. **Construction Materials: Their nature and behavior**. 3. ed. Londres: Spon Press, 2001.

JAMSAWANG, P.; SUANSOMJEEN, T.; SUKONTASUKKUL, P.; JONGPRADIST, P.; BERGADO, D. T. Comparative flexural performance of compacted cement-fiber-sand. **Geotextiles and Geomembranes**. v.46, n.4, p. 414–425, mar. 2018.

JOY, S.; BALAN, K. N.; JAYASREE, P. K. Biodegradation of coir geotextile in tropical climatic conditions. In: PROCEEDINGS OF THE GOLDEN JUBILEE INDIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE, J-341., 2011, Kochi, **Anais** [...]. Kochi, 2011. p. 604–606.

KANIRAJ, S. R.; HAVANAGI, V. S. Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**. v.127, n.1, p. 574-584, jul. 2001.

KÉZDI, A. **Stabilized Earth Roads**. 1. ed. New York: Elsevier scientific publishing company, 1979.

KORMANN, A. C. M. **Comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

KUMAR, P.; SINGH, S. P.; Fiber-Reinforced Fly Ash Subbases in Rural Roads. **Journal of transportation engineering**. v. 134, n. 4, p. 171-180, abr. 2008.

KURUGODU, H.; BORDOLOI, S.; HONG, Y.; GARG, A.; GARG, A.; SREEDEEP, S.; GANDOMI, A. Genetic programming for soil-fiber composite assessment. **Advances in Engineering Software**. v.122, n.1, p. 50–61, abr. 2018.

LAMBE, T. W., WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: J. Wile, 1969.

LIM, S. M.; WIJEYESEKERA, D.C.; LIM, A. J. M. S.; BAKAR, I. B. H. Critical review of innovative soil road stabilization techniques. **International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)**. v. 3, n. 5, p. 204-211, jun. 2014.

LIN, K. Q.; WONG, I. H. Use of deep cement mixing to reduce settlements at bridge approaches. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. Singapura. v. 125, n. 4, p. 309-320, abr. 1999.

LIU, W.; XIE, T.; QIU, R.; FAN, M. N-methylol acrylamide grafting bamboo fibers and their composites. **Composites Science and Technology**. v.117, n. 1, p. 100-106, jun. 2015.

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

MALLICK, R. B., EL-KORCHI, T. **Pavement Engineering: Principles and Practice**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

MANIKANDAN, K. C.; THOMAS, S.; GROENINCKX, G. Thermal and dynamic mechanical analysis of polystyrene composites reinforced with short sisal fibres. **Composites science and technology**. v.61 n. p.2519-2529. 2001.

MANRICH, Sati; ROSALINI, Antônio C.; FRATTINI, Gustavo; MANRICH, Silvio. Identificação de plásticos: uma ferramenta para reciclagem. 2. ed. EDUFSCAR, 2007.

MARTINS, Adriana P. S. **Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MASLINDA, A. B.; ABDUL MAJID, M. S.; RIDZUAN, M. J. M.; AFENDI, M.; GIBSON, A. B. Effect of water absorption on the mechanical properties of hybrid interwoven cellulosic-cellulosic fibre reinforced epoxy composites. **Composite Structures**. v.167, n. 1, p. 227-237, fev. 2017.

MASSONE, L. M.; NAZAR, F. Analytical and experimental evaluation of the use of fibers as partial reinforcement in shotcrete for tunnels in Chile. **Tunnelling and Underground Space Technology**. v. 77, p. 13–25, 2018.

MATTONE, R. Sisal fibre reinforced soil with cement or cactus pulp in bahareque technique. **Cement & Concrete Composites**. v. 27, n. 1, p. 611-616, mai. 2005.

MELO JÚNIOR, Ariston S. **Análise quantitativa do material articulado na região de campinas através das técnicas de microfluorescência de raios x e reflexão total usando radiação sincrotron**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

MIRZABABAEI, M.; MIRAFTAB, M.; MOHAMED, M.; MCMAHON, P. Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**. v. 139, n. 3, p. 483-493. 2013.

MONTEIRO, S. N.; BRAGA, F.O.; LIMA, E.P.; LOURO, L.H.L; DRELICH, J.W. Promising Curauá Fiber-Reinforced Polyester Composite for High-Impact Ballistic Multilayered Armor. **Polymer engineering and science**. v. n. 2017.

MOREIRA, E. B.; BALDOVINO, J. J. A.; IZZO, R. L. S.; ROSE, J. L. Impact of sustainable granular materials on the behavior sedimentary silt for road application. **Geotechnical and Geological Engineering**. v. 38, n. p. 917-933, jan. 2020.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2 ed. Lavras: Editora UFLA, 2006.

MWASH, A. Using environmentally friendly geotextiles for soil reinforcement: A parametric study. **Materials and Design**. v. 30. n. 5. p. 1798-1803, mai. 2008.

NEMATZADEH, M.; ZARFAM, P.; NIKOO, M. Investigating laboratory parameters of the resistance of different mixtures of soil – lime – fume using the curing and administrative Method. **Case Studies in Construction Materials**. v. 7, n. 1, p. 263-279, ago. 2017.

OLIVEIRA, C. A. S.; GOUVEIRA, L. L. A.; TEIXEIRA, R. L. P. Concreto estrutural com adição de fibras vegetais. **Construindo**. v. 6, n. 2, p. 14-19, dez. 2014.

PACHAURI, S. M.; PRIYA, M.I.; GARG, A. comparative analysis of strength characteristics of soil reinforced with coir and polypropylene fibers. **Ground Improvement Techniques and Geosynthetics**. v. 14, n.1, p. 355-361, 2019.

PALACIOS, Miguel A. P. **Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de Polipropileno Submetida a Ensaio Triaxiais de Extensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2012.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

PALMEIRA, E.M. Evolução dos geossintéticos no Brasil. *In: Simpósio Brasileiro Sobre Aplicação De Geossintéticos*. Geossintéticos 95... Palestras especiais, 1995, São Paulo, p. 5-15.

PALMEIRA, E.M. Geossintéticos: Tipos e evolução nos últimos anos. *In: 1º SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE GEOSSINTÉTICOS - GEOSSINTÉTICOS'92*, 1992, Brasília. **Anais** [...] São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 1992. v. 1. p. 1-20.

PEREIRA, Eliana Martins. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2004.

PINTO, André R. A. G. **Fibras de curauáa e sisal como reforço em matrizes de solo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2008.

QU, J.; SUN, Z. Strength behavior of shanghai clayey soil reinforced with wheat straw fibers. **Geotechnical and Geological Engineering**. v.34, n.2, p. 515-527, abr. 2016.

RESCHETTI JUNIOR, Paulo R. **Avaliação do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Fino Laterítico Reforçado com Fibras para Uso em Pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil.) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2008.

RIMAL, S.; POUDEL, R. K.; GAUTAM, D. Experimental study on properties of natural soils treated with cement kiln dust. **Case Studies in Construction Materials**. Nepal. v. 124, n. 1, p. 529-538, ago. 2018.

ROQUE, Priscila F. B. **Uso de materiais alternativos para melhoria de solos em pavimentação**. Tese (Doutorado em Geotecnia). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SALAMUNI, E.; EBERT, H. D.; HASUI, Y. Morfotectônica da bacia sedimentar de Curitiba. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 34, n. 4, p. 469–478, 2004.

SALAMUNI, E.; EBERT, H.; BORGES, M. S.; HASUI, Y.; COSTA, J. B. S.; SALAMUNI, R. Tectonics and sedimentation in the Curitiba Basin, south of Brazil. **South American Earth Sciences**. v. 15, n. 1, p. 901-910, abr./out. 2003.

SALAMUNI, E.; SALAMUNI, R.; EBERT, H. D. Contribution to the Geology of the Curitiba basin (PR) **Boletim Paranaense de Geociências**. v.1, n. 47, p. 123–142, 1999.

SALAMUNI, E.; STELLFELD, M. Banco de dados geológicos geo-referenciados da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR) como base de sistema de informação geográfica (SIG). **Boletim Paranaense de Geociências**. v. 1, n. 49, p. 21-31, 2001.

SALES, A. T. C. **Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, 2006.

SANTIAGO, Gislene A. **Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

SAYIDA, M.K.; SHEELA, Y. E.; GIRISH, M. S. Coir geotextiles for paved roads: a laboratory and field study using non-plastic soil as subgrade. **Journal of Natural Fibers**. Jan. 2019

SHEELA, Y. E.; SAYIDA, M.K.; GIRISH, M. S. Long-term performance of rural roads reinforced with coir geotextile – a field study. **Journal of Natural Fibers**. Dec. 2019.

SHUKLA, S. K. **Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering**. 1. ed. Perth: Springer, 2017.

SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F. Curaua fiber: a new alternative to polymeric composites. **Journal of reinforced plastics and composites**. v.27, n.1, p. 103-112. 2008.

SILVEIRA, Mariana Vela. **Análise do comportamento mecânico e da durabilidade em compósitos de areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal**. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2018.

SIRIVITMAITRIE, C.; PUPPALA, A. J.; SARIDE, S.; HOYOS, L. Combined lime-cement stabilization for longer life of low-volume roads. **Journal of the Transportation Research Board**. v. 2204, n. 1, p. 140-147, jan. 2011.

SPINACE, M.; A.; S.; FERMOSELI, K. K. G. DE PAIOLI. Recycled polypropylene reinforced with curaua fibers by extrusion. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 1. n.1. 2008.

STAIGER, M. P., TUCKER, N. Natural fibre composites in structural applications. In: PICKERING, K. **Properties and performance of natural fibre composites**. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2008. p. 269-300.

TAN, T.; HUAT, B.B.K.; ANGGRAINI, V.; SHUKLA, S.K. Improving the engineering behaviour of residual soil with fly ash and treated natural fibres in alkaline condition. **International Journal of Geotechnical Engineering**. v.14, n.1, p.1-14, jan. 2019.

TAYLOR, G. D. **Materials in construction**. Longman Scientific e Technical, 1994.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T 252 om**: pH and electrical conductivity of hot water extracts of pulp, paper, and paperboard, 2002.

TEIXEIRA, W. **Comportamento Mecânico De Misturas Solo, Cal E Rcd Para Uso Em Pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

TRAN, K. H.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers. **Construction and Building Materials**. v.1, n. 178, mai. 2018.

TRUONG, M; ZHONG, W.; BOYKO, S.; ALCOCK, M. A comparative study on natural fibre density measurement. **The Journal of The Textile Institute**. v.100, n.6, p. 525-529, ago 2009.

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

VISVANATHAN, A.; VELAYUDHAN, S.; MATHEW, S. Field evaluation of coir geotextile reinforced subgrade for low volume pavements. **Journal of Natural Fibers**. Mai. 2020.

WANG, Y.; GUO, P.; LI, X.; LIU, Y.; YUAN, H. Behavior of fiber-reinforced and lime-stabilized clayey soil in triaxial tests. **Applied Sciences**. v.900, n. 9, p.1-15, mai, 2019.

WEBER, Alessandra M. **Viabilidade técnica da utilização de fibra de curauá (ananas erectifolius) como reforço em compósitos cimentícios laminados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

WEI, L.; CHAI, S. X.; ZHANG, H. Y.; & SHI, Q. (2018). Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber. **Construction and Building Materials**. v.172, n.1 p. 300–308, abr. 2018.

WEN, K.; BU, C.; LIU, S.; LI, Y.; LI, L. (2018). Experimental investigation of flexure resistance performance of bio-beams reinforced with discrete randomly distributed fiber and bamboo. **Construction and Building Materials**. v.176, n.1, p. 241–249, jul. 2018.

YAGHOUBI, M.; ARULRAJAH, A.; DISFANI, M. M.; HORPIBULSUK, S.; DARMAWAN, S.; WANG, J. Impact of field conditions on the strength development of a geopolymer stabilized marine clay. **Applied Clay Science**. v. 167, n. 1, p. 33-42, out. 2019.

ZAH, R.; Hirschier, R.; LEÃO, A. L.; BRAUN, I. Curauá fibers in the automobile industry - a sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**. v. 15, n. 1, p. 1032-1040, nov. 2006.

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, fev. 2012.

ZAKIKHANI, P.; ZAHARI, R.; SULTAN, M. T. T H.; MAJID, D. L. Extraction and preparation of bamboo fibre-reinforced composites. **Materials and Design**. v. 63, n. 1, p. 820-828, jul. 2014.