

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

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE
SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇAÍ (*Euterpe
oleracea*)**

MATHEUS MACHADO LOPES

ORIENTADOR: MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO/2019

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

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE
SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇAÍ (*Euterpe
oleracea*)**

MATHEUS MACHADO LOPES

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

APROVADA POR:

**MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc. (ENC - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA)
(ORIENTADOR)**

**RAFAEL CERQUEIRA SILVA, D.Sc. (ENC - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**PEDRO MURRIETA SANTOS NETO, D.Sc.
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 09 DE DEZEMBRO DE 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

LOPES, MATHEUS MACHADO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea*).

ix, 108 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2019)
Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. FIBRAS NATURAIS

2. MATERIAIS ALTERNATIVOS

3. GEOSSINTÉTICOS

4. NOVOS MATERIAIS GEOTÉCNICOS

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOPES, M.M. (2019). *ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇAÍ (Euterpe oleracea)*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 108 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Matheus Machado Lopes

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea*).

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2019

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

Matheus Machado Lopes
machadomlopes@gmail.com

*“O Tempo,
do qual apenas a
sabedoria brota.”
(Frederick Goodman)*

RESUMO

A crescente busca por sustentabilidade ambiental na tecnologia aplicada a obras de engenharia, através do uso de materiais renováveis, naturais, não poluentes e sem destinação adequada guiou o estudo realizado nesta pesquisa experimental, que tem como objetivo analisar o comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com fibras de açaí distribuídas de forma aleatória. A escolha da fibra de açaí como reforço se deu pela grande produção observada no Nordeste Paraense, onde a “cultura do açaí” é muito forte, e pela qualidade de suas propriedades mecânicas, além do fato de ser uma fibra completamente natural. Foram realizados ensaios de caracterização, compressão simples e cisalhamento direto em amostras de solo argiloso de solo arenoso, com a inserção aleatória de fibras de açaí em ambos os solos, nos teores de 0,5% e 1,0% de fibras, em relação ao peso do solo seco. Os resultados obtidos demonstraram que a adição das fibras de açaí melhoraram significativamente as propriedades mecânicas do solo, alterando o comportamento de ruptura do material e proporcionando uma maior resistência de pico, bem como diminuição da queda de resistência pós-pico e maior resistência ao cisalhamento, quando a mistura solo-fibra se compara ao solo puro. Além disso, foi possível identificar que, apesar da ocorrência de degradação das fibras, estas ainda sim conferem ganho de resistência ao solo. Os compósitos solo-fibra estudados, tanto para o solo argiloso, quanto para o solo arenoso, tem grande aplicação regional, onde há maior geração deste resíduo natural, podendo ser aplicado em obras geotécnicas, como por exemplo, para reforço de aterros, taludes e bases para fundações superficiais.

Palavras-chave: Fibras Naturais – Materiais Alternativos – Novos Materiais Geotécnicos – Geossintéticos

ABSTRACT

The growing research for environmental sustainability applied in technological engineering works, with natural, non-polluting, renewable and without adequate destination materials guided this experimental research. The objective is to analyze the mechanical behavior of a clay soil reinforced with açai fibers distributed randomly. The açai fibers were chosen as reinforcement due to the large production that occurs in the north region of Brazil, that region is known for a strong consumption of açai that generates lots of this waste, besides that these fibers presents great mechanical properties and are completely natural. Characterization, simple compression and direct shear experiments were done in several samples for both kind of soils with fiber contents of 0.5% and 1.0% in relation to the dry soil weight. The results obtained demonstrate that the addition of the açai fibers significantly improved the mechanical properties of the soil, altering the material rupture behavior and providing a greater peak resistance and a decrease in the post-peak fall as well as a great increase in the shear resistance when the composite soil-fiber is compared to the natural soil. Besides that, it was possible to observe that even with the fibers degradation, these fibers gave great improvement to the soils. The studied composites for clay soil as well as for sand soil have a great application in regions of larger generation of this natural waste using it in geotechnical Works as slopes reinforcements and temporary landfills on soft soils.

Keywords: Natural Fibers – Alternate Materials – New Geotechnical Materials - Geosynthetics

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Relevância e Justificativa	15
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivos Específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Solos Reforçados	18
2.1.1. Histórico, Melhoria, Estabilização e Reforço de Solos	18
2.2. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras	19
2.2.1. Influência da Inclusão de Fibras nas Propriedades do Solo	20
2.2.2. Influência dos principais fatores no comportamento de solos reforçados 32	
2.3. Fibras Vegetais	38
2.3.1. Fibras de Açaí (<i>Euterpe oleracea</i>)	40
2.3.2. Influência dos Principais Fatores no Comportamento Mecânico das Fibras Vegetais	43
2.4. Durabilidade das Fibras Vegetais	45
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	50
3.1. Considerações Iniciais	50
3.2. Variáveis Investigadas	50
3.2.1. Ensaio de Compressão Simples	51
3.2.2. Ensaio de Adensamento e Cisalhamento Direto	51
3.2.3. Ensaio de Expansão e CBR (<i>California Bearing Ratio</i>)	52
3.3. Materiais Utilizados	53
3.3.1. Argila Laterítica	53
3.3.2. Areia	55
3.3.3. Fibras	56
3.3.4. Água	57
3.4. Métodos de Ensaio e Equipamentos Utilizados	57
3.4.1. Preparação das Amostras Argilosas para os Ensaio	57
3.4.2. Ensaio de Expansão e CBR (<i>California Bearing Ratio</i>)	60
3.4.3. Ensaio de Compressão Simples	61

3.4.4.	Ensaio de Cisalhamento Direto	62
3.4.5.	Compósitos Submetidos ao Envelhecimento Natural	64
4.	RESULTADOS	66
4.4.	Considerações Iniciais	66
4.5.	Ensaio de Compactação Mini-MCV	66
4.6.	Ensaio de Expansão e CBR (<i>California Bearing Ratio</i>)	68
4.7.	Ensaio de Compressão Simples.....	68
4.3.1.	Sem Exposição	69
4.3.2.	Com Exposição	70
4.8.	Ensaio de Cisalhamento Direto para o Solo Argiloso.....	72
4.4.1.	Sem Exposição	72
4.4.2.	Com Exposição	75
4.9.	Ensaio de Cisalhamento Direto para o Solo Arenoso	79
4.5.1.	Densidade Relativa de 50%.....	80
4.5.2.	Densidade Relativa de 75%.....	83
4.10.	Comparativo entre os Solos Arenoso e Argiloso	86
4.11.	Visualização em Lupa Microscópica	88
5.	CONCLUSÕES	91
5.1.	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Estrutura hierárquica de uma fibra de sisal (Melo Filho, 2012)	38
Figura 2.2: Açazeiro - <i>Euterpe oleracea</i> - (Fonte: Embrapa)	40
Figura 2.3: Representação de uma despoldadora convencional para frutos de açaí (adaptado de Oliveira, <i>et. al.</i> , 2007)	41
Figura 2.4: (a) Fruto (Moscoso, 2012); (b) Resíduo (Mesquita, 2013)	42
Figura 3.1: Solo Argiloso Laterítico (Fonte: Autor)	54
Figura 3.2: Curva Granulométrica do Solo Argiloso Laterítico	54
Figura 3.3: Solo Arenoso – (Fonte: Autor)	55
Figura 3.4: Curva Granulométrica do Solo Arenoso (Fonte: Autor)	56
Figura 3.5: Fibras de Açaí - <i>Euterpe oleracea</i> – (Fonte: Autor)	57
Figura 3.6: Equipamento para Compactação Miniatura (Fonte: Autor)	58
Figura 3.7: Corpos de Prova Miniatura e Proctor Normal (Fonte: Autor)	60
Figura 3.8: Ensaio de Expansão (Fonte: Autor)	61
Figura 3.9: Ensaio de Compressão Simples (Fonte: Autor)	62
Figura 3.10. Princípios do Cisalhamento Direto (adaptado de Head, 1994)	63
Figura 3.11: Equipamento para Cisalhamento Direto (Fonte: Autor)	64
Figura 3.12: Simulação de Chuva nos Corpos de Prova (Fonte: Autor)	65
Figura 3.13: Pluviometria Diária da Cidade de Belém-PA (Adaptado de INMET)	65
Figura 4.1: Curvas de Compactação	67
Figura 4.2: Índices de Vazios	67
Figura 4.3: Explicação da Legenda dos Compósitos sem Degradação	69
Figura 4.4: Curvas de Tensão <i>versus</i> Deformação sem Exposição	70
Figura 4.5: Explicação da Legenda dos Compósitos com Degradação	70
Figura 4.6: Curvas de Tensão <i>versus</i> Deformação com Exposição.....	71
Figura 4.7: Explicação da Legenda dos Compósitos sem Degradação.....	72
Figura 4.8: Curvas de Tensões de Cisalhamento versus Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Argiloso sem Exposição	73
Figura 4.9: Tensão de Confinamento versus Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Argiloso sem Exposição.....	74
Figura 4.10: Explicação da Legenda dos Compósitos com Degradação.....	76
Figura 4.11: (a) Curvas de Tensões de Cisalhamento versus Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Argiloso sem Exposição; (b) Curvas de Tensões de Cisalhamento	

versus Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Argiloso com Dois Meses de Exposição; (c) Curvas de Tensões de Cisalhamento versus Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Argiloso com Quatro Meses de Exposição e (d) Curvas de Tensões de Cisalhamento versus Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Argiloso com Cinco Meses de Exposição	76
Figura 4.12: Tensão de Confinamento <i>versus</i> Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Argiloso + 0,5% de Fibras com Exposição.....	77
Figura 4.13: Tensão de Confinamento <i>versus</i> Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Argiloso + 1,0% de Fibras com Exposição.....	78
Figura 4.14: Explicação da Legenda dos Compósitos com Solo Arenoso	79
Figura 4.15: Curvas de Tensões de Cisalhamento <i>versus</i> Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Arenoso 50%	81
Figura 4.16: Tensão de Confinamento <i>versus</i> Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Arenoso 50%	82
Figura 4.17: Curvas de Tensões de Cisalhamento <i>versus</i> Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Arenoso 75%	84
Figura 4.18: Tensão de Confinamento <i>versus</i> Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Arenoso 75%	85
Figura 4.19: Corpo de Prova de Areia + 1,0% de Fibras	86
Figura 4.20: (a) Curvas de Tensões de Cisalhamento <i>versus</i> Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Argiloso sem Exposição; (b) Curvas de Tensões de Cisalhamento <i>versus</i> Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Arenoso 50% e (c) Curvas de Tensões de Cisalhamento <i>versus</i> Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Arenoso 75%.....	87
Figura 4.21: Disposição Aleatória das Fibras sobre o Solo. Imagem com zoom de 4x	88
Figura 4.22: Fibra Recoberta pelos Finos do Solo. Imagem com zoom de 4x	89
Figura 4.23: Fibras Recobertas por Água. Imagem com zoom de 10x	89
Figura 4.24: Indícios de Degradação das Fibras. Imagem com zoom de 4x	90
Figura 4.25: Fissura na Fibra. (a) Imagem com zoom de 4x e (b) Imagem com zoom de 10x	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Propriedades Físicas das Fibras de Açai	43
Tabela 2.2: Propriedades Químicas das Fibras de Açai	43
Tabela 3.1: Variáveis investigadas no programa de ensaios de Compressão Simples	51
Tabela 3.2: Variáveis investigadas no programa de ensaios de Adensamento e Cisalhamento Direto para o Solo Argiloso	52
Tabela 3.3: Variáveis investigadas no programa de ensaios de Adensamento e Cisalhamento Direto para o Solo Arenoso	52
Tabela 4.1: Resultados de Expansão e CBR	68
Tabela 4.2: Parâmetros das Retas de Tensão de Confinamento <i>versus</i> Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Argiloso sem Exposição	74
Tabela 4.3: Evolução da Perda de Capacidade Mecânica dos Compósitos	77
Tabela 4.4: Parâmetros das Retas de Tensão de Confinamento <i>versus</i> Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Argiloso com Exposição	79
Tabela 4.5: Parâmetros das Retas de Tensão de Confinamento <i>versus</i> Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Arenoso 50%	83
Tabela 4.6: Parâmetros das Retas de Tensão de Confinamento <i>versus</i> Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Arenoso 75%	86

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CBR - *California Bearing Ratio* (Índice de Suporte Califórnia)

cm - Centímetro

D_{50} - Diâmetro médio

DNER-ME - Método de Ensaio do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Fa - Resistência da aderência fibra/matriz

Ft - Resistência à tração da fibra

G_0 - Módulo de cisalhamento inicial ou elástico

GPa - Giga Pascal

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

kN/m - Quilo Newton por metro

kPa - Quilo Pascal

L/D – Fator de forma (relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra)

Mini-MCV - *Moisture Condition Value* (Valor da Condição de Umidade) miniatura

mm - Milímetro

MPa - Mega Pascal

NBR - Norma Brasileira

PET - *Polyethylene Terephthalate* (Tereftalato de polietileno)

pH - Potencial Hidrogeniônico

TRB - *Transportation Research Board* (Conselho de Pesquisa de Transporte)

t_{90} - Tempo para 90% do adensamento

v_c - Velocidade de cisalhamento no ensaio de cisalhamento direto

μm - Micrômetro

$^{\circ}\text{C}$ - Graus Celcius

1. INTRODUÇÃO

1.1. Relevância e Justificativa

Um dos escopos de um engenheiro geotécnico é aproveitar das propriedades físico-mecânicas do solo em obras de engenharia. Não obstante, estas propriedades são insuficientes para aplicações em obras e se é imprescindível reforçar estas características a fim de adequar às necessidades.

As propriedades de um solo podem ser alteradas através de diferentes processos, entre os quais pode-se citar a compactação mecânica, a estabilização por processos físico-químicos e o reforço de solos com a inclusão de elementos resistentes, como geotêxteis, fibras, grelhas, tiras (Casagrande, 2005).

As técnicas de reforço de solo remetem à antiguidade, onde eram utilizadas por nossos antepassados misturas de solo com raízes, toras ou lã para a realização de construções civis (Palmeira, 1993); os babilônios já as utilizavam há mais de três mil anos e no mesmo período os chineses empregavam técnicas de reforço como a inclusão de fibras de bambu ao solo (Festugato, 2008). Estas técnicas caíram no esquecimento por razões desconhecidas até o século XX, onde ressurgiu na década de 60 e os princípios relativos aos seus usos foram sendo estudados e compreendidos (Silveira, 2018).

A eficiência da aplicação de fibras para reforço de solos depende essencialmente das características das fibras, do solo, da tensão de confinamento e do modo de carregamento, possibilitando a redução da fissuração, assim como o aumento da ductilidade do solo. Para a atuação das fibras faz-se necessário geralmente a presença de certa fração granular (Sales, 2011) e esta atuação se dá com maior potencial no estado pós-pico onde a solicitação das fibras é mais intensa na resistência do compósito de forma a aumentar a capacidade de absorção de energia (Silveira, 2018).

As fibras utilizadas para reforço de solos podem ser de origem natural ou sintética onde este último grupo é mais aplicado atualmente. Contudo, a produção de fibras sintéticas apresenta grande geração de resíduos e está atrelada a indústria petroquímica, a qual vem manifestando esgotamento dos seus recursos, estes fatores aliados a uma crescente conscientização da necessidade de um desenvolvimento sustentável trazem perspectiva e motivação para o uso de fibras naturais.

O uso de fibras vegetais se mostra relevante quando comparado às sintéticas, pela grande disponibilidade deste material, a facilidade de obtenção e manejo, a qualidade das

propriedades mecânicas, não geram quantidades excessivas de resíduos, empregam tecnologias relativamente simples e requerem menos energia no processo de produção, além de se apresentarem economicamente viáveis (Ghavami et al., 1999; Dittenber e Gangarao, 2012; Martins, 2014; Silveira, 2018).

Entretanto, as fibras vegetais são materiais que em ambientes naturais apresentam variações dimensionais que influenciam as características de adesão do compósito solo-fibra devido a mudanças de temperatura e teor de umidade (Ghavami *et. al.*, 1999). Ademais, as fibras vegetais são biodegradáveis, diferentemente das fibras sintéticas, que são inertes. Estes são os principais fatores que dificultam a difusão do uso destes materiais como reforço de solo em obras de terra.

Na engenharia geotécnica há um significativo número de situações onde o caso crítico para a estabilização ou funcionalidade da obra é imediatamente após a construção (Sarsby, 1997) como os aterros temporários sob solos moles, onde a solicitação das fibras ocorre imediatamente na construção da mesma. Desta forma, as fibras naturais podem apresentar bons resultados se o intervalo de tempo da solicitação não sobrepor o tempo de degradação das fibras e, evidentemente, se as fibras apresentarem características compatíveis com as necessárias para a obra.

Reconhecendo a necessidade de se avaliar a durabilidade das fibras vegetais é fundamental avaliar também o comportamento mecânico do compósito solo-fibras vegetais aleatoriamente distribuídas após exposição aos agentes climáticos diversos e ao tempo, estudos os quais já vêm sendo realizados, porém ainda por poucos pesquisadores.

Outra necessidade é a descoberta de novas fibras com diferentes características e propriedades que é o caso das fibras de açai, fibra a qual foi pouco estudada no âmbito de reforço de solos, apesar de apresentarem várias pesquisas em outras áreas como para isolamento acústico e aplicações em concreto. Esta fibra é proveniente do fruto do açai, sendo descartado como rejeito em grandes quantidades.

A cadeia do açai é uma das principais fontes de riqueza e emprego do Nordeste Paraense. Somente na cidade de Belém, existem cerca de 2,5 mil estabelecimentos que comercializam diariamente em torno de 305 toneladas do açai (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2008), gerando aproximadamente 253 toneladas de lixo orgânico, constituído principalmente de caroços descartados em aterros sanitários e cursos d'água (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, 2012). A produção significativa deste material que é considerado rejeito justifica e viabiliza economicamente o uso desta fibra na região de produção.

Neste contexto, o presente trabalho busca avaliar as propriedades físico-mecânicas de um solo reforçado com fibras de açaí aleatoriamente distribuídas bem como a suscetibilidade da degradação destas fibras, podendo potencializar o uso de misturas solo-fibra vegetal em obras de terra.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa consiste em estudar o comportamento físico-mecânico de um solo arenoso e um argiloso reforçados com fibras vegetais de açaí aleatoriamente distribuídas e a durabilidade deste reforço exposto a agentes climáticos diversos e à passagem do tempo.

Para se atingir este objetivo serão realizados ensaios em ambos os solos para avaliar como as fibras se comportam em cada um e serão feitas avaliações do comportamento tensão vs. deformação das misturas com e sem exposição às intempéries para o solo argiloso, estabelecendo padrões de comportamento que possam explicar a influência da adição de fibras, relacionando-a com os parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformação do solo.

1.2.1. Objetivos Específicos

Utilizando um solo laterítico argiloso e um solo arenoso serão avaliadas:

- A influência da adição das fibras de açaí nos solos estudados, obtendo-se os parâmetros de resistência dos compósitos através de ensaios mecânicos;
- Estudar a influência do teor de fibras (0,5% e 1,0%) no comportamento físico e mecânico dos compósitos;
- A influência das fibras nos dois tipos de solo;
- A influência das fibras para diferentes densidades relativas para o solo arenoso;
- O efeito da degradação ambiental das fibras naturais pela influência dos agentes climáticos e tempo de exposição dos compósitos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Solos Reforçados

As técnicas de reforço de solo visam à melhoria das propriedades físico-mecânicas deste por meio de processos físicos ou químicos, enquanto o termo melhoria é usado para se referir ao tratamento através de processos químicos, o reforço está associado a processos físicos de melhoramento.

Os processos de estabilização podem ser classificados como temporários, permanentes e permanentes com adição de novos materiais. A estabilização temporária consiste naquela limitada a um curto espaço de tempo, geralmente o tempo de execução de certa fase da obra, como por exemplo, o congelamento de solos e o rebaixamento do nível freático por drenos ou eletro-osmose. A estabilização permanente sem adição consiste em processos de compactação e tratamento térmico, como a compactação superficial ou profunda. A estabilização permanente de solos com adição de novos materiais normalmente combina a compactação com adição de um novo material, como estabilização com cal e cimento, injeção de materiais estabilizantes, colunas de brita ou areia, pré-carregamento e uso de drenos verticais, reforços com tiras metálicas ou geossintéticos (Van Impe, 1989).

Opta-se pelo uso do processo de reforço quando o solo do local da obra de construção civil não apresenta as propriedades geotécnicas exigidas pelo projeto, possibilitando melhorar determinadas propriedades, dispensando assim, os custos provenientes de distâncias de transporte elevadas das jazidas com material adequado e bota fora (Pessoa, 2004).

2.1.1. Histórico, Melhoria, Estabilização e Reforço de Solos

A aplicação de reforços de solo acompanha a evolução da civilização, do ponto de vista técnico, o melhoramento do solo é provavelmente a técnica mais antiga, comparando os métodos executivos comuns em obras de engenharia (Van Impe, 1989). A pirâmide de Ziggurat e a torre de Agar Quf, na Mesopotâmia (1400 A.C.), existentes ainda hoje, foram construídas empregando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes bem como estradas construídas pelos Incas, no Peru, através do emprego de lã de lhama como reforço. A Grande Muralha da China também apresentam em suas partes indícios do emprego destas técnicas (Palmeira, 1992).

As técnicas de reforço de solo foram resgatadas na segunda metade do século XX com diversos estudos avaliando o efeito de raízes de plantas na resistência ao cisalhamento dos solos, onde evidenciaram a contribuição positiva para a resistência ao cisalhamento dos solos além de comprovarem que estas contribuíam também para a estabilidade dos taludes (Silveira, 2018). Solos reforçados começaram a ser empregados quando Vidal (1969) patenteou a técnica denominada “Terra Armada”, onde o reforço de solo era conseguido através da introdução de tiras metálicas conectadas a painéis de concreto que constituíam a face do maciço.

Atualmente, reforços em forma de tiras de aço, telas metálicas e vários tipos de materiais sintéticos têm sido amplamente utilizados na construção de obras geotécnicas. Tais aplicações vão desde as estruturas convencionais à estabilização de aterros sobre solos moles, passando por reforços de taludes, aumento da capacidade de suporte de fundações e reforço de pavimentos. Obras executadas a partir de solos reforçados apresentam inúmeras vantagens técnicas, construtivas e econômicas, quando comparadas aos métodos tradicionais, contribuindo, desta forma, para o grande aumento de sua utilização em diversos tipos de obra (Palacios, 2012).

Solos reforçados com fibras atualmente são usados ou considerados para aplicações que incluem estabilização de rupturas de taludes, construção de novos aterros com solos marginais, redução das fissuras de contração em liners de argila compactadas, e para reforçar sub-bases rodoviárias. O uso de fibras naturais e/ou sintéticas em engenharia geotécnica é viável em cinco campos, incluindo camadas de pavimento (construção de estradas), muros de contenção, aterros ferroviários, proteção de encostas, engenharia sísmica e fundação de solos (Hejazi *et. al.*, 2012).

2.2. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras

Um material compósito é a combinação de dois ou mais materiais que possui propriedade que os materiais componentes não possuem por si próprios (Budinski, 1996). Eles são constituídos por uma fase chamada matriz (solo, concreto, silicone, argamassa, etc.) e pelo elemento de reforço (fibras, papéis, aço, fragmentos de borracha, isopor, etc.), sendo que ambos são desenvolvidos para otimizar (ou complementar) as características inerentes de cada um destes dois componentes.

Higgins (1994) classifica os materiais compósitos em dois grandes grupos: os materiais compósitos particulados, quando é adicionado à matriz algum material em forma

de partícula, e os materiais compósitos fibrosos, os quais as fibras atuam controlando a abertura e o espaçamento entre as fissuras, distribuindo de forma mais uniforme as tensões dentro da matriz. Desta forma, os materiais compósitos fibrosos apresentam características de extrema relevância que serão abordadas neste estudo.

O potencial dos materiais compósitos fibrosos se dá no estado pós-fissuração, onde as fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência do material, aumentando assim a sua capacidade de absorção de energia. Isto se deve ao fato de que a deformação necessária para causar fissuras em uma matriz de solo é, geralmente, muito inferior à elongação das fibras, nas quais pouco ou nenhum aumento de tensão de fissuração é esperado (Casagrande, 2005).

As mais variadas fibras estão disponíveis hoje no mercado para serem empregadas como reforço de solos. Segundo o material de origem da fibras elas podem ser minerais (carbono, vidro e amianto), vegetais (coco, sisal, curauá, etc.), poliméricas (polipropileno, polietileno, poliéster e poliamida), e metálicas (aço), e sua origem juntamente com as características de comportamento de cada uma delas, as propriedades físicas, químicas e mecânicas, afetam diretamente o comportamento do material compósito.

A compreensão do mecanismo de interação solo-fibra e como cada um contribui para o comportamento do material compósito como um todo é fundamental para a definição do tipo de fibra a ser empregado. Esta definição dependerá fundamentalmente das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante.

2.2.1. Influência da Inclusão de Fibras nas Propriedades do Solo

Os fatores que afetam o comportamento do compósito solo-fibra são muito complexos. As possibilidades de combinação que alteram de forma significativa os mecanismos de interação são diversas, onde para cada combinação de variáveis, o resultado obtido pode ser o desejado para uma dada aplicação do compósito, porém pode não ser para outra. Assim, se faz necessário entender o comportamento do solo sem nenhum tipo de reforço a fim de comparar com o solo reforçado e entender as mudanças na estrutura do material provenientes da inclusão das fibras e seus efeitos.

As características desejadas com a inclusão de fibras vão depender do tipo de aplicação do compósito, e não necessariamente serão de ganho de resistência. Em um projeto de material sismo-resistente, por exemplo, a ênfase será no aumento da capacidade

de absorção de energia e ductilidade, assim como diminuição da queda de resistência pós-pico (Martins, 2014).

As características de resistência e deformabilidade do elemento de reforço têm uma influência fundamental no comportamento tensão x deformação do solo reforçado. As técnicas de reforço de solos podem ser divididas em inclusões extensíveis e não-extensíveis. O elemento de reforço extensível tem deformação de ruptura maior que a máxima deformação de tração no solo sem reforço. Sua principal função é de aumentar a ductilidade e diminuir a perda de resistência pós-pico, além do acréscimo de resistência mecânica. Já o elemento de reforço não-extensível tem deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem reforço, confere ganho de resistência mecânica, porém, rupturas catastróficas podem ocorrer se o reforço romper (McGown *et. al.*, 1978).

É sabido que as mudanças no comportamento mecânico dos solos reforçados com fibras estão relacionadas à compactação, resistência ao cisalhamento, deformabilidade, modo de ruptura, variação volumétrica, propagação de fissuras e condutividade hidráulica. Algumas destas mudanças estão descritas a seguir.

2.2.1.1. Compactação

Foi observado por Hoare (1979) que a adição de fibras de polipropileno confere certa resistência à compactação, resultando em porosidades maiores da mistura para as mesmas energias de compactação, sendo este um aumento linear em relação à quantidade de fibra e independente do tipo de compactação empregada. Identificou ainda que a influência na compactação é comandada pela interação entre solo e reforço, atentando para aspectos como a granulometria do solo, forma das partículas, textura e área superficial do reforço.

Os efeitos da inclusão de vários teores de fibra na curva de compactação de uma argila foram estudados por Al Wahab & Al-Qurna (1995), onde os resultados encontrados demonstraram um decréscimo da massa específica aparente seca máxima e um acréscimo na umidade ótima para a adição de 2% de fibra, considerados não muito significativos.

Leocádio (2005) observou que o aumento do teor de fibras vegetais adicionado ao solo aumentou a massa específica aparente seca máxima até certo limite e depois a diminuiu mantendo o valor próximo ao do solo natural e, evidenciou também o aumento da umidade ótima.

Bueno *et. al.* (1996) observaram o mesmo comportamento com relação à umidade para um solo arenoso, ao contrário do solo argiloso, onde não foi observada nenhuma alteração na umidade ótima. Em ambos os casos, a massa específica aparente seca máxima não sofreu alterações com a inclusão de fibras.

Diversos autores relataram não ter encontrado nenhuma alteração significativa com a inclusão de fibras (Maher & Ho, 1994; Nataraj *et. al.*, 1996; Ulbrich, 1997; Consoli *et. al.*, 1999; Casagrande, 2001; Heineck, 2002).

Diab *et. al.* (2018) avaliaram o efeito de dois métodos de compactação, o de impacto (método empregado em laboratório) e o de amassamento (método empregado em campo) no comportamento mecânico não drenado de argilas reforçadas com fibras. Os resultados indicam que a melhoria na resistência é altamente dependente do método de compactação, com amostras preparadas usando compactação de impacto produzindo melhorias até três vezes maiores do que amostras preparadas por amassamento. Essa discrepância no comportamento foi atribuída às diferenças nas distribuições de orientação das fibras entre as amostras que foram compactados por impacto e amassamento.

2.2.1.2. Resistência ao Cisalhamento de Pico

“Em geral, as fibras inibem a amplitude das fissuras associadas à ruptura do compósito. Este fato leva a um aumento nas áreas sob as curvas tensão x deformação. Esta propriedade é comumente referida como tenacidade, e representa o trabalho da fratura ou a capacidade de absorção de energia do compósito” (Casagrande, 2005).

2.2.1.2.1. Materiais Argilosos

A adição de fibra aumenta a resistência ao cisalhamento de solos argilosos segundo Plé *et. al.* (2009), que estudaram fibras orgânicas de sisal, fibras de polipropileno sintéticas e uma mistura fibra metálica/pneu em pó, mas dependendo do tipo de fibra o aumento será do ângulo de atrito ou da coesão. Análises baseadas em ensaios triaxiais revelaram um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este maior quanto maior for a quantidade de fibras (Bueno *et. al.*, 1996).

Segundo Maher & Ho (1994) a inclusão de fibras de polipropileno, vidro e celulose tem uma influência significativa nas propriedades mecânicas de argilas caulínicas. Através de uma série de ensaios de compressão não confinada e diametral, os

autores observaram um aumento do pico de resistência à compressão e à tração, assim como o aumento da ductilidade do material. Os mesmos autores constataram que o aumento da quantidade de fibras aumenta a resistência à tração e à compressão, porém, o aumento do comprimento das fibras diminui a contribuição destas para a resistência, tanto à compressão como à tração. A umidade do solo no momento da compactação também afeta essas relações, sendo elas mais expressivas para menores umidades, como foi observado por Andersland & Kattak (1979) e por Nataraj *et. al.* (1996).

Al Wahab & Al-Qurna (1995), estudando uma argila siltosa e buscando maximizar os benefícios em termos de resistência, trabalhabilidade e homogeneidade, estabeleceram uma quantidade ótima de fibras poliméricas de 1%, correspondente ao ponto de maior taxa de acréscimo de resistência não confinada com a adição de fibras.

Com relação à coesão se chegou a um consenso de que esta é acrescida pela inclusão de fibras (Bueno *et. al.*, 1996; Nataraj *et. al.*, 1996; Teodoro, 1999; Heineck, 2002). Tal efeito não foi analisado por Andersland & Kattak (1979), que observaram ainda uma grande taxa de acréscimo de resistência com a deformação, mesmo para níveis elevados de deformação axial (20%). Comportamento semelhante também foi observado por Feuerharmel (2000).

Análises baseadas em ensaios triaxiais revelaram um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este maior quanto maior for a quantidade de fibras, conforme resultados de Andersland & Kattak (1979), Al Wahab & El-Kedrah (1995), Teodoro (1999) e Heineck (2002).

Estudos comparativos entre um material granular e um coesivo realizado por Bueno *et. al.* (1996) mostraram que os solos coesivos são menos sensíveis ao aumento do comprimento das fibras.

2.2.1.2.2. Materiais Granulares

O aumento da resistência de um solo granular é função das propriedades da areia (gradação, tamanho e forma das partículas) e da fibra (teor, relação L/D e módulo). A resistência diminui com o aumento do tamanho médio e da esfericidade das partículas de areia, por outro lado, há um acréscimo da resistência com o aumento do coeficiente de uniformidade da areia, do teor de fibras, do módulo das fibras e da relação L/D (Shewbridge & Sitar, 1990).

Acréscimos na resistência pela inclusão de fibras ao solo foram relatados por vários autores. Alguns constataram um aumento da resistência de forma linear com o aumento da quantidade de reforço (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986), por outro lado, outros constataram um aumento não linear (Shewbridge & Sitar, 1989; Jewell & Wroth, 1987; Teodoro, 1999).

O aumento do ângulo de atrito e do intercepto coesivo com a inclusão de fibras e com o aumento do teor de fibras também foi relatado por diversos pesquisadores (Hoare, 1979; Gray & Ohashi, 1983; Bueno *et. al.*, 1996; Nataraj *et. al.*, 1996; Stauffer & Holtz, 1996).

Outro ponto comum em termos de resistência observado por vários autores ao estudarem um solo granular reforçado foi a bi linearidade das envoltórias de resistência (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; Maher & Gray, 1990; Stauffer & Holtz, 1996; Morel & Gourc, 1997; Kaniraj & Havanagi; 2001). Gray & Al Refeai (1986) observaram ainda que quanto menor for a rugosidade ou aderência da interface solo-fibra, maior é a tensão de confinamento crítica. Fibras mais rugosas tendem a ser mais efetivas no aumento da resistência.

Com relação à granulometria do solo, Stauffer & Holtz (1996) realizaram vários ensaios triaxiais em duas areias reforçadas com distribuições granulométricas distintas, uma bem graduada e uma uniforme, porém com mesmo diâmetro médio (D_{50}) dos grãos do solo. Os autores observaram um aumento maior de resistência na areia bem graduada com a adição de fibras. A forma das partículas também é um fator que influencia na resistência do solo reforçado com fibras (Gray & Maher, 1989). A contribuição das fibras na resistência diminui com o aumento do índice de esfericidade das partículas, ou seja, partículas de solo mais arredondadas prejudicam a eficiência do reforço.

Teodoro (1999) observou um aumento da resistência com o aumento do comprimento das fibras (comprimento máximo igual a 30 mm) de uma areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno. Distinto comportamento o mesmo autor observou para um solo argiloso, onde o máximo de resistência foi alcançado para um comprimento de 15 mm.

2.2.1.3. Resistência ao Cisalhamento Pós-pico

Praticamente todos os trabalhos que analisaram o comportamento de solos reforçados em termos da resistência concluíram que a adição de fibras reduz a queda da

resistência pós-pico (Gray & Ohashi, 1983; Gray & Al-Refeai, 1986; Fatani *et. al.*, 1991; Ranjan *et. al.*, 1996; Consoli *et. al.*; 1997-b, 1999, 2002; Donato *et. al.*, 2004).

Casagrande & Consoli (2002) e Santiago (2011) relataram um crescimento constante da resistência com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de endurecimento (hardening). Santiago (2011) ainda relatou que existe um valor para o índice de forma da fibra a partir do qual o comportamento de endurecimento passa a ser mais nítido.

Para solos bentoníticos reforçados, Casagrande (2005) constatou que amostras com menor teor de umidade apresentam melhor comportamento pós-pico, devido à diminuição do índice de vazios e consequente aumento do número de contatos solo-fibra.

Para grandes deformações, o comportamento resistente do material com reforço e sem reforço é similar, isto quer dizer que a adição das fibras na areia com pedregulhos não contribui positivamente na resistência do material quando ele sofre grandes deformações de acordo com Lirer *et. al.* (2012). Já com os estudos de Vendruscolo (2003), foi constatado que as fibras possuem a capacidade de mobilizar resistência mesmo quando submetidas a grandes deformações.

2.2.1.4. Comportamento Carga-Recalque

Casagrande (2005) executou ensaios de provas de carga em placa sobre espessas camadas de areia compactada, reforçada e não reforçada com fibras. O comportamento carga-recalque do solo arenoso foi significativamente influenciado pela adição de fibras, aumentando a capacidade de suporte deste pela inibição da formação e propagação de possíveis bandas de cisalhamento.

Donato (2007) concluiu que o comportamento carga-recalque da areia e das areias reforçadas com fibras de polipropileno é similar no início do carregamento até o momento em que a mobilização das fibras inseridas na matriz se mostra mais efetiva, a partir de certo nível de recalque e carga aplicada.

Girardello (2010) avaliou o comportamento mecânico de uma areia não saturada, com e sem reforço de fibras de polipropileno, através de ensaios de placa em densidade relativa de 50% e 90%. O melhor resultado foi obtido para o ensaio de placa realizado na maior densidade relativa. Quanto maior for a densidade da mistura, mais cedo as fibras começam a ser mobilizadas dentro da massa de solo, apresentando um melhor intertravamento entre as fibras e a matriz.

2.2.1.5. Propagação de Fissuras

Taylor (1994) afirma que as fibras não impedem a formação de fissuras no compósito, contudo aumentam a resistência à tração, a deformação de ruptura e a tenacidade pelo controle da abertura e do espaçamento e, portanto, o controle da propagação de fissuras. As fibras que atravessam as fissuras mantêm as interfaces das fissuras juntas, beneficiando as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração pelo aumento da ductilidade (Hannant, 1994).

Teodoro & Bueno (1998) e Teodoro (1999) confeccionaram pequenos painéis com compósitos argilosos reforçados com fibras de polipropileno, com o objetivo de emprego como alvenaria de vedação interna de edificações. O objetivo deste trabalho era de estudar o padrão de fissuramento deste material quando submetido a variações térmicas. Os autores concluíram que o efeito da inclusão de fibras nos painéis foi o de reduzir a dimensão das trincas sem, no entanto, evitar o fissuramento. As fibras não impedem a formação de fissuras porque elas apenas são mobilizadas após a deformação da matriz, mas impedem o aumento das dimensões das fissuras pelo intertravamento que proporcionam na matriz.

Curcio (2008) estudou a adição de fibras de PET a um solo de características argilosas para uso como barreira hidráulica e concluiu que a adição de 1% de fibras, além de favorecer o acréscimo da tensão de tração máxima do solo, retarda a abertura de fissuras e reduz a magnitude das mesmas, sem alterar as propriedades desejáveis na compactação e sem influenciar negativamente a condutividade hidráulica do solo quando utilizadas sob tensão confinante.

Plé *et. al.* (2009) avaliaram o desempenho mecânico da adição de fibras como reforço em uma argila com três tipos de fibras: fibras orgânicas de sisal, fibras de polipropileno sintéticas e uma mistura fibra metálica/pneu em pó, com fator de forma igual a 300. As fissuras se formaram mais rápidas nas amostras com fibras do que em amostras sem fibras, mas a propagação das fissuras foi reduzida devido à presença das fibras, reduzindo os danos, evitando o aparecimento de uma banda de cisalhamento e aumentando a capacidade da argila de suportar carga ou a sobrecarga.

Em geral, as fibras inibem a amplitude das fissuras associadas à ruptura do compósito. Este fato leva a um aumento nas áreas sob as curvas tensão *versus* deformação. Esta propriedade é comumente referida como tenacidade, e representa o trabalho da fissuras ou a capacidade de absorção de energia do compósito (Casagrande, 2005).

2.2.1.6. Deformabilidade

McGown *et. al.* (1988) relataram uma grande parcela de deformação recuperada com o descarregamento, referente a 20% da deformação total imposta para um ensaio de placa de pequenas dimensões.

McGown *et. al.* (1985) para areias e Maher & Ho (1994) e Nataraj *et. al.* (1996) para argilas, relataram um aumento no módulo de deformação, tanto maior quanto maior o teor de fibras. Ulbrich (1997) e Consoli *et. al.* (1999) obtiveram resultados contrários onde ocorreu redução do módulo com a inclusão de fibras, para areias cimentadas e não cimentadas. O que explica estas diferenças são a granulometria dos tipos de solos diferentes, bem como o comprimento e diâmetro das fibras utilizadas, assim como diferentes tipos de fibras utilizadas.

Stauffer e Holtz (1996) relataram que a adição de fibras aumenta as deformações volumétricas de compressão na ruptura, sendo este aumento mais pronunciado para uma areia mal graduada que para uma bem graduada (ambas com mesmo diâmetro D_{50} dos grãos).

Para Heineck (2002) e Heineck *et. al.* (2003), a taxa de deformação onde as fibras passam a contribuir de forma mais significativa para o acréscimo de resistência ao cisalhamento depende do tipo de matriz.

Donato *et. al.* (2004) avaliaram resultados de módulo de resiliência e verificaram a grande importância da inclusão de fibras sobre a deformabilidade resiliente, onde o módulo do compósito é reduzido em 65%.

Consoli *et. al.* (2007) observaram que quanto maior é o deslocamento cisalhante no ensaios, maior vai ser a quantidade de fibras rompidas, isto confere a ideia de que as fibras se alongam até que as deformações do ensaio superam a deformação de ruptura das fibras, porém as fibras sofrem deformações plásticas antes de romper.

2.2.1.7. Modo de Ruptura

O aumento da ductilidade do solo com a adição de fibras é uma observação feita em caráter unânime pelos vários autores que avaliaram este parâmetro (e.g. Hoare, 1979; McGown *et. al.*, 1985; Maher & Ho, 1994; Nataraj *et. al.*, 1996; Consoli *et. al.*, 1999; Ghavami *et. al.*, 1999; Casagrande, 2005; Martins, 2014), sendo este aumento mais pronunciado quanto maior for a quantidade de fibras.

Morel & Gourc (1997) estudaram o modo de ruptura em areias reforçadas por malhas de polipropileno em um ensaio biaxial e cisalhamento direto. Foi apontado que a inserção do reforço não modifica a posição da banda de cisalhamento, porém, modifica o comportamento de ruptura. Em função da ductilidade do reforço, mesmo após a formação da banda de cisalhamento, as tensões continuam a crescer, pois parte da carga passa a ser absorvida pelo reforço. Estas bandas de cisalhamento apresentam aproximadamente as mesmas características das que são formadas nas areias não reforçadas, entretanto o desenvolvimento destas bandas é diferente, pois elas se tornam menos ativas com o aumento das deformações após um nível de deformações limite e ainda na medida em que as deformações progridem, bandas de cisalhamento secundárias se iniciam e vão se tornando mais largas, localizadas próximas da primeira banda.

Montardo (1999) concluiu que a inclusão de fibras de polietileno tereftalato (PET) no compósito de matriz cimentada altera significativamente o seu modo de ruptura. Com a inclusão das fibras o comportamento do material na ruptura, que era frágil, torna-se dúctil. Estas constatações resultaram da análise dos índices de fragilidade e da verificação visual da ausência ou presença de planos de ruptura nos corpos de prova rompidos. Concluiu ainda que a inclusão de fibras PET reduziu sensivelmente o índice de fragilidade da matriz cimentada, mas não foi suficiente para expressar uma modificação no modo de ruptura da matriz cimentada.

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

Feuerharmel (2000) afirma que a forma de ruptura do solo é altamente alterada pela inclusão de fibras de polipropileno, reduzindo a fragilidade dos solos. A amplitude dessas alterações depende fundamentalmente de uma boa adesão solo-fibra, que pode ser atingida pela ação de um agente cimentante, formando uma estrutura cimentada bastante resistente ou por uma combinação apropriada dos fatores comprimento das fibras e tensões efetivas médias normais atuantes.

Donato *et. al.* (2004) verificaram uma mudança significativa quanto ao modo de ruptura, onde todas as amostras cimentadas não reforçadas estudadas exibiram um comportamento frágil na ruptura, enquanto que as amostras reforçadas com 0.5% de fibras

de polipropileno apresentaram uma fragilidade menos pronunciada, mudando o comportamento de frágil para dúctil.

Consoli *et. al.* (2004) concluíram que as fibras de polipropileno reduziram drasticamente o índice de fragilidade da areia cimentada, mudando o modo de ruptura de frágil para dúctil, para o maior comprimento de fibra estudado (36mm), com o aumento da capacidade de energia absorvida. Os autores reforçam que não é possível estabelecer regras de comportamento sem o conhecimento prévio das propriedades dos materiais envolvidos.

Mirzababaei *et. al.* (2013) avaliaram o efeito de dois tipos de fibras oriundas de resíduos de carpetes na resistência não confinada de dois solos argilosos. Os padrões de ruptura das amostras de solo não reforçadas são evidentes planos de cisalhamento quase verticais. Com um aumento no teor de fibra o padrão de ruptura é gradualmente transformado para um abaulamento plástico com redes de pequenas fissuras sem um plano de cisalhamento aparente na ruptura. As amostras de solo não reforçado mostram um comportamento frágil e rompem com uma deformação axial muito pequena (isto é, menos de 1%), enquanto que amostras com 5% de teor de fibra rompem com uma deformação axial relativamente maior (isto é, 15% ou mais com comportamento de endurecimento e dúctil).

2.2.1.8. Variação Volumétrica

A adição de fibras aumenta as deformações volumétricas de compressão na ruptura, segundo relatos de Stauffer & Holtz (1996), sendo este aumento mais pronunciado para uma areia uniforme do que para uma areia bem graduada, ambas com mesmo diâmetro médio (D50).

O aumento da compressibilidade do solo com a inclusão de fibras também foi observado por Bueno *et. al.* (1996). Segundo Shewbridge & Sitar (1990), a deformação volumétrica aumenta com o acréscimo da quantidade de reforço, porém, de forma não linear, similar ao observado por Nataraj *et. al.* (1996).

Feuerharmel (2000) concluiu que as fibras constituem uma estrutura entrelaçada que impõe uma resistência às deformações radiais na amostra, aumentando assim as deformações de compressão do solo. Este efeito depende da adesão entre o solo e as fibras, sendo que para a areia, onde esta adesão é inferior aos demais solos, não se observa alterações significativas na variação volumétrica.

2.2.1.9. Rigidez Inicial

Montardo (1999) observou uma queda bastante acentuada da rigidez inicial de uma areia cimentada reforçada com fibras de polipropileno. No entanto, as fibras de polietileno tereftalato e de vidro não causaram alteração alguma no módulo.

Michalowski & Cermák (2003) observaram que a adição de uma fibra sintética em um solo arenoso causou uma queda da rigidez inicial, por outro lado, a adição de fibras de aço aumentou a rigidez inicial.

Para Feuerharmel (2000) a intensidade das alterações no módulo de elasticidade depende também do tipo e das características de cada solo. Estudos realizados pelo autor em argila e areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno indicaram grande redução do módulo, enquanto que, os resultados de ensaios realizados em areia reforçada mostraram pequenas alterações no módulo. Entretanto, considerando misturas cimentadas reforçadas com fibras, as reduções do módulo foram bastante acentuadas para os três solos analisados.

Os resultados de ensaios dinâmicos utilizando “*bender elements*” realizados por Heineck (2002) não indicaram alteração do módulo de cisalhamento inicial ou elástico (G_0) do solo arenoso quando da inclusão das fibras.

Plé *et. al.* (2009) reiteram que o efeito do reforço fibroso na rigidez inicial do compósito depende das características do mesmo.

Santiago (2011) observou que a adição de fibras e o aumento da tensão confinante aumentam o módulo de deformabilidade secante.

2.2.1.10. Condutividade Hidráulica

O aumento da condutividade hidráulica devido à adição de fibras em solos argilosos é relatado por vários autores. Maher & Ho (1994) observam um aumento na permeabilidade, sendo maior esse aumento quanto maior a quantidade de fibras, para 4% de fibra (polipropileno e vidro). Já Al Wahab & El-Kedrah (1995) observam um aumento da condutividade hidráulica em mais de uma ordem de grandeza para 2% de fibra (polipropileno).

Bueno *et. al.* (1996) relataram uma redução da permeabilidade de uma ordem de grandeza, causada pela adição de fibras de polipropileno a solos granulares.

Feuerharmel (2000) observa que são obtidos valores de condutividade hidráulica bem mais elevados no momento em que são adicionadas fibras e cimento ao material

argiloso, pois com a flocculação das partículas de argila, estas, que antes aderiam às fibras, passam a se aglomerar ao redor de partículas de cimento, propiciando a segregação das fibras.

Segundo Heineck (2002) e Heineck *et. al.* (2003), para todas as matrizes estudadas, a adição de 0.5% de fibras de polipropileno de 24mm não causou mudanças significativas na condutividade hidráulica avaliada.

2.2.1.11. Mudanças no CBR (*California Bearing Ratio*) e Expansão

Nataraj *et. al.* (1996) apresentaram os resultados de uma série de ensaios de laboratório em um solo arenoso e outro argiloso reforçados com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente. Tanto o solo arenoso quanto o argiloso apresentaram valores de CBR maiores com a inclusão das fibras.

Al Wahab & El-Kedrah (1995) observaram também a redução do potencial de retração e expansão em torno de 30 a 35% com a adição de fibras, sendo este efeito mais pronunciado no ramo seco da curva de compactação e menos pronunciado no ramo úmido.

Leocádio (2005) também realizou ensaio CBR em amostras de solo reforçados com fibras vegetais. Observou que o valor do CBR aumentou com o aumento do teor e do comprimento até certo valor e depois diminuiu. O aumento do teor de fibra aumentou a expansão significativamente, o que justifica a perda da capacidade de suporte.

Otoko *et. al.* (2014) realizaram ensaios de expansão onde as amostras de solo laterítico com e sem reforço de fibras vegetais ficaram submersas em água por 72 horas. Concluiu que a adição de fibras aumentou a variação de volume comparado com solo natural, e que a alteração de volume é diretamente proporcional ao teor de fibra adicionado. Os autores justificam este comportamento ao fato de que as fibras, pela sua alta capacidade de absorção, absorvem água e a conduzem para dentro da amostra como um tubo. Por esse motivo também, a adição de fibras iria aumentar significativamente a permeabilidade do solo. No entanto, na secagem, os benefícios da fibra são claramente observados nos resultados dos ensaios de compressão não confinados, com o aumento na resistência à compressão, módulo de elasticidade e a deformação última que são todos diretamente proporcionais ao aumento do teor de fibra.

2.2.2. Influência dos principais fatores no comportamento de solos reforçados

Os compósitos fibrosos são diretamente influenciados pelas propriedades das fibras, fatores como o teor de fibra presente, o comprimento das fibras, características de resistência e deformabilidade do elemento de reforço, as características do solo e aderência entre matriz e reforço são determinantes para o desempenho do compósito já que isso implica na forma com a qual as fibras atuam controlando a abertura e o espaçamento entre as fissuras que se formam (Hannant,1994). Alguns aspectos apresentaram resultados antagônicos, dependendo diretamente do tipo de fibra utilizada.

2.2.2.1. Comprimento das Fibras (L)

Quanto maior o comprimento da fibra maior é o ganho de resistência mecânica, até um limite assintótico (Gray & Ohashi, 1983; Ulbrich, 1997; Santoni *et. al.*; 2001; Heineck, 2002; Vendruscolo, 2003). Isto significa que existe um comprimento ótimo de fibras que compreende uma maior resistência ao compósito.

Crockford *et. al.*, (1993), Ulbrich (1997) e Montardo *et. al.* (2001) concluíram que o aumento do comprimento da fibra provoca redução do índice de fragilidade e aumento da capacidade de absorção de energia.

Maher & Ho (1994) observaram que para um mesmo teor de reforço, fibras mais curtas são mais numerosas dentro da matriz e existe uma maior possibilidade de elas estarem presentes na superfície de ruptura contribuindo para o aumento da resistência. Porém, após a ruptura, as fibras mais curtas são arrancadas mais facilmente, o que denota a importância de fibras mais longas quando se deseja melhorar a ductilidade e a capacidade de absorção de energia.

Ulbrich (1997) e Montardo *et. al.* (2002) relataram que o aumento do comprimento da fibra provoca o aumento da capacidade de absorção de energia de deformação.

Teodoro (1999) observou um aumento na resistência de uma areia siltosa reforçada com o aumento do comprimento das fibras de polipropileno de 0 para 30mm, comportamento este distinto do solo argiloso, que apresentou um máximo de resistência para fibras de 15mm.

Michalowski & Čermák (2003) sugerem que o comprimento da fibra deve ser de pelo menos uma ordem de magnitude maior do que o tamanho do grão para que o mecanismo de interação fibra-solo seja acionado.

Casagrande (2005) concluiu que o aumento da resistência com o aumento do comprimento da fibra provavelmente ocorre devido ao fato das fibras de maior comprimento apresentarem uma ancoragem maior dentro da amostra. Analisou o comprimento final das fibras após ensaios de *ring shear* e observou que estas tendem a sofrer grandes deformações plásticas de tração, independente do comprimento inicial, sendo solicitadas sucessivamente após estágios de alongamento, em primeira instância, e consequente ruptura ao sofrerem deslocamentos maiores.

Consoli *et. al.* (2007) estudaram o desempenho de uma areia reforçada com fibras de polipropileno de diferentes comprimentos submetida a grandes deformações cisalhantes mediante a execução de ensaios de *ring shear*. Os autores encontraram que, quanto maior for o comprimento das fibras de reforço, maior será o incremento da resistência cisalhante do solo.

Para Consoli *et. al.* (2009) fibras muito finas e longas têm problemas relacionados ao emaranhamento e eficácia reduzida.

2.2.2.2. Diâmetro das Fibras (D)

Vendruscolo (2003) afirmou que o aumento do diâmetro (título) das fibras resulta em um decréscimo da tensão de ruptura para materiais não cimentados. Para o material cimentado ocorre o inverso, há um aumento da resistência do material compósito. Isto ocorre porque com o aumento do título das fibras diminui a quantidade de fibras na matriz, já que se mantém sempre constante o peso de fibras que é adicionado ao material.

Segundo Casagrande (2005), as fibras de menor diâmetro, por serem mais flexíveis, proporcionam uma melhor interação solo-fibra e mobilização sucessiva destas, atuando positivamente na melhora do comportamento resistente do material.

2.2.2.3. Fator de Forma (L/D)

Gray & Maher (1989) verificaram a existência de uma tensão de confinamento crítica, onde o aumento da relação L/D resulta na redução desta tensão crítica e torna mais efetivo a contribuição da fibra no aumento da resistência ao cisalhamento.

Gray & Maher (1989), Michalowski & Čermák (2003), Festugato (2008) e Ibraim *et. al.* (2010) relatam que as fibras com alto fator de forma apresentam maior contribuição

no aumento da resistência ao cisalhamento do que quando comparadas às fibras com menor razão de aspecto.

Festugato (2008) conclui que o reforço de areias finas com fibras de polipropileno proporciona ao solo um comportamento de endurecimento (hardening), que passa a ser mais pronunciado a partir de um dado valor de índice de forma das fibras (em torno de 300).

Segundo Qu & Sun (2016), um alto fator de forma contribui duplamente para o aumento da resistência ao cisalhamento do compósito. Quando o fator de forma é alto, o número absoluto de fibras (volume) é relativamente maior sob o mesmo teor de fibras, e a área de contato entre as fibras e as partículas do solo passa a ser alta também, produzindo atrito suficiente maior.

2.2.2.4. Teor de Fibras

Gray & Ohashi (1983), Gray & Al-Refai (1986), McGown *et. al.* (1988), Maher & Ho (1994), Ulbrich (1997), Specht (2000), Santoni *et. al.* (2001), Vendruscolo (2003) e Consoli *et. al.* (2007) verificaram que o aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento do teor de fibra é observado até certo limite, portanto existe um teor ótimo de fibra que confere a melhor resistência.

Segundo Gray & Ohashi (1983), Maher & Ho (1993), Ulbrich (1997) e Montardo *et. al.* (2002), o aumento do teor de fibra provoca aumento a capacidade de absorção de energia de deformação.

Taylor (1994) afirmou que um alto teor de fibras confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pela fissura.

Segundo Vendruscolo (2003), o efeito do aumento do teor das fibras na rigidez inicial é nulo.

Casagrande (2005) concluiu que, para um solo bentonítico, o acréscimo de resistência de pico se torna mais acentuado para o maior teor de fibra, entretanto, o aumento de resistência pós-pico é mais evidente e permanece constante para o menor teor de fibra estudado.

2.2.2.5. Orientação das Fibras

McGown *et. al.* (1978), Fatani *et. al.* (1991), Morel & Gourc (1997) e Diambra *et. al.* (2010) afirmaram que os elementos de reforço devem estar posicionados na direção das deformações de tração do solo.

Gray & Ohashi (1983) avaliaram a orientação das fibras com relação à superfície de cisalhamento. Através da realização de ensaios de cisalhamento direto, observou-se que a inclinação de 60° em relação ao plano de ruptura representa a maior contribuição em termos de resistência e a inclinação de 120° representa a redução da resistência ao cisalhamento.

O emprego de fibras discretas aleatoriamente distribuídas possui duas grandes vantagens em relação aos solos reforçados com inclusões orientadas, contínuas ou não: minimiza o surgimento de qualquer tipo de anisotropia e não induz planos preferenciais de fraqueza (Gray & Al-Refai, 1986; Gray & Maher, 1989; Maher & Gray, 1990).

Para Johnston (1994), a orientação e distribuição das fibras na matriz tem grande influência. A orientação de uma fibra com respeito ao plano de ruptura implica nas possibilidades que esta tem de contribuir com a transferência de cargas. Uma fibra que se posiciona paralela ao plano de ruptura não tem efeito, por outro lado, uma fibra que se posiciona perpendicular a este plano contribui integralmente com sua capacidade de resistir à tração.

Tang *et. al.* (2007) apontam que a simplicidade de incorporação das fibras na matriz como uma vantagem, já que podem ser adicionadas da mesma maneira que o cimento, a cal e outros aditivos estabilizantes.

Ibraim *et. al.* (2012) investigaram os efeitos dos procedimentos de fabricação de amostras reforçadas com fibras (moist tamping e moist vibration) na distribuição da orientação das fibras. A avaliação da distribuição da orientação das fibras das amostras reforçadas com três tipos diferentes de fibras de polipropileno mostrou que ambos os métodos deixam pelo menos 80% das fibras orientadas entre $\pm 30^\circ$ da horizontal. Os testes de compressão e extensão triaxiais mostraram que as fibras usadas neste estudo são notavelmente eficazes no aumento da resistência em compressão triaxial, enquanto sua contribuição em extensão é bastante limitada, se não desprezível. Tal observação indica um comportamento anisotrópico acentuado que suporta a distribuição anisotrópica da orientação da fibra que foi determinada.

2.2.2.6. Módulo de Elasticidade das Fibras

McGown *et. al.* (1978) observaram que o comportamento tensão x deformação do solo reforçado depende fundamentalmente das características de resistência e deformabilidade dos elementos de reforço. Os autores propuseram a divisão do reforço de solos baseada na deformabilidade do reforço em inclusões extensíveis e não-extensíveis. O elemento de reforço extensível tem deformação de ruptura maior que a máxima deformação de tração do solo sem reforço. Sua principal função é de aumentar a ductilidade e diminuir a perda de resistência pós pico, além do acréscimo de resistência mecânica. Já o elemento de reforço não extensível tem deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem reforço, conferindo ganho de resistência mecânica, porém, rupturas catastróficas podem ocorrer se o reforço romper.

Gray & Ohashi (1983) e Specht (2000) observaram que as fibras com baixo módulo comportaram-se como uma inclusão extensível, ou seja, não romperam durante o ensaio. Montardo (1990) e Specht (2000) constataram que fibras com módulo baixo não contribuem para o aumento da resistência mecânica.

Shewbridge & Sitar (1990) e Taylor (1994) afirmaram que um alto valor do módulo de elasticidade causaria um efeito similar ao teor de fibra, quanto maior o módulo maior a probabilidade de haver o arrancamento das fibras.

2.2.2.7. Aderência Fibra-matriz

De acordo com Taylor (1994), as características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos cimentados reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito.

2.2.2.8. Resistência das Fibras

Taylor (1994) afirma que aumentando a resistência das fibras, aumenta, também, a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência. A resistência necessária dependerá, na prática, das características pós-fissuração necessárias, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz.

2.2.2.9. Tensão Confinante

Gray & Ohashi (1983), Teodoro (1999), Morel & Gourc (1997), Kaniraj & Havanagi (2001), Heineck (2002) e Casagrande (2005) observaram a existência de uma tensão de confinamento crítica onde, abaixo desta as fibras são arrancadas e, acima desta as fibras são alongadas.

Gray & Maher (1989) afirmaram que a tensão confinante crítica é sensível a alguns parâmetros do compósito solo-fibra como fator de forma das fibras (L/D), coeficiente de uniformidade e forma das partículas do solo.

Lirer (2012) estudou o comportamento de uma areia com pedregulho misturada com fibras de polipropileno e concluiu que a adição das fibras ao material apresenta maior influência em baixas tensões confinantes. Casagrande (2005) também concluiu que as fibras agem mais efetivamente sob tensões efetivas médias iniciais mais baixas.

2.2.2.10. Densidade Relativa (D_r)

Casagrande (2005) afirmou que quanto maior for a densidade da mistura, mais cedo as fibras começam a ser mobilizadas dentro da massa de solo, apresentando um melhor intertravamento entre as fibras e a matriz. Para densidades de compactação maiores existe um intertravamento inicial melhor entre a matriz e o reforço, o que permite que as fibras sejam solicitadas a deslocamentos muito pequenos. Para misturas solo-fibra com densidades menores as fibras passam a atuar após recalques iniciais de maior monta, devido à redução do índice de vazios e maximização dos contatos grãos-fibra.

Consoli *et. al.* (2009) estudaram o efeito da densidade relativa da areia reforçada com fibras de polipropileno submetidas a ensaios de placa, concluindo que o efeito de inclusão das fibras pode ser mais pronunciado para densidades mais altas.

2.2.2.11. Diâmetro das Partículas do Solo

Maher & Gray (1990) realizaram estudo utilizando duas composições de bolas de vidro em lugar do solo, ambas com granulometria uniforme, porém diferentes diâmetros médios das partículas, mostrou que o aumento do tamanho das partículas ($D_{50} = 0.25\text{mm}$ para 0.6mm) diminuiu a contribuição das fibras para a resistência.

2.3. Fibras Vegetais

As fibras vegetais podem ser obtidas de diferentes partes da planta. Existem fibras que podem ser obtidas através do caule, como juta linho e cânhamo; pode-se obter fibras das folhas, como sisal e curauá, das sementes como é o caso do algodão e a fibra de coco é proveniente do fruto (Thomas *et. al.*, 2011).

De um modo geral, as fibras apresentam uma mesma estrutura celular como pode ser visto na Figura 2.1 (Fidelis *et. al.*, 2013). É importante perceber também que as próprias fibras vegetais são materiais compósitos naturais compostos de numerosas fibras individuais, e parte desta estrutura contribui para as características de flexibilidade da fibra, pela elevada absorção de água e baixa massa específica aparente (Tolêdo Filho, 1997).

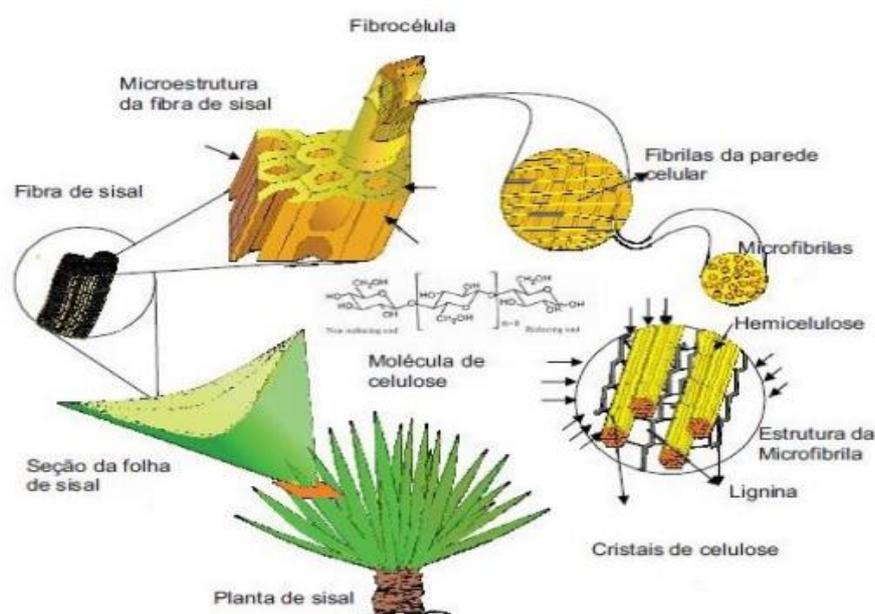


Figura 2.1: Estrutura hierárquica de uma fibra de sisal (Melo Filho, 2012).

Apesar de apresentarem uma mesma estrutura celular (paredes celulares, lamela média e lumens), as fibras vegetais se diferenciam por aspectos como a área transversal total, o número de fibrocélulas e espessura das paredes celulares, quantidade e área de lumens. Esses fatores afetam a resistência mecânica das fibras (Fidelis *et. al.*, 2013).

As paredes celulares são constituídas por microfibrilas unidas por uma matriz de lignina e hemicelulose e apresentam diferentes orientações em cada parede celular. As microfibrilas possuem diâmetro de cerca de 10 – 30 nm e são constituídas por 30 – 100

moléculas de celulose (John & Anandjiwala, 2008; Thomas *et. al.*, 2011; Dittenber & GangaRao, 2012).

Tolêdo Filho (1997) apresentou detalhadamente a composição química das fibras vegetais, sendo compostas principalmente por celulose, hemicelulose, lignina e pectina. Por serem naturais, a composição química e o percentual de cada componente variam de acordo com a espécie, a região da fibra onde é retirada a amostra, do estado de maturação, de fatores ambientais, como solo e clima, região de cultivo, entre outros (Perissotto, 2005).

A celulose é a principal componente da parede celular, em geral em estado cristalino (Tolêdo Filho, 1997). A celulose é um polímero linear de glicose com elevado grau de polimerização e alto índice de cristalinidade. É um polissacarídeo, composto por unidades de anidro-glicose, as quais contêm grupos de hidroxila que estabelecem interações por ligações de hidrogênio intra e intermolecular. Embora a estrutura química da celulose seja a mesma para diferentes fibras naturais, há variação no grau de polimerização, o qual afeta as propriedades mecânicas das fibras (Mohanty, 2005). O teor de celulose é o principal constituinte responsável pela resistência. A estrutura cristalina dos polímeros está relacionada à organização das cadeias poliméricas e afeta as propriedades mecânicas como rigidez e resistência. Quanto maior o grau de cristalinidade, melhor o alinhamento das cadeias e, portanto, maior a resistência (Canevarolo, 2006).

A hemicelulose também presente na parede celular, é raramente ou nunca cristalina (Tolêdo Filho, 1997). A hemicelulose é formada por um grupo de polissacarídeos, constituído de vários tipos de unidades de açúcares. Possui grande capacidade de absorção de água, devido entre outros fatores, à ausência de cristalinidade e à baixa massa molecular. A hemicelulose pouco contribui na resistência mecânica das fibras (Perissotto, 2005).

A lignina também presente na parede celular confere a esta resistência à compressão e rigidez (Tolêdo Filho, 1997). A lignina é um polímero amorfo constituído por unidades de fenilpropano, sendo uma de suas funções, juntamente com a hemicelulose, agir como barreira à degradação causada por microrganismos, além de conferir rigidez à fibra (Perissotto, 2005).

A pectina está presente na região de união entre células adjacentes, tornando as paredes celulares mais hidratadas e conseqüentemente mais plásticas (Tolêdo Filho, 1997). Como a lignina e a pectina são polímeros mais fracos que a celulose, os mesmos devem ser removidos quando as fibras são utilizadas como reforço em compósitos. Grande parte da pectina é removida quando os feixes são separados do caule através do processo de maceração (imersão) e espadelagem (Dittenber & GangaRao, 2012).

2.3.1. Fibras de Açaí (*Euterpe oleracea*)

As fibras de açaí, da espécie *Euterpe oleracea* (Figura 2.2), são provenientes do bagaço do fruto após a retirada da polpa. O açaí é um fruto de extrema importância para o Norte do país, principalmente no Estado do Pará, onde a “cultura do açaí” é base alimentar de grande parte da população. A cadeia do açaí é uma das principais fontes de riqueza e emprego do Nordeste Paraense. Somente na cidade de Belém, existem cerca de 2,5 mil estabelecimentos que comercializam diariamente em torno de 305 toneladas do açaí segundo o IBGE (2008), gerando aproximadamente 253 toneladas de lixo orgânico, constituído principalmente de caroços descartados em aterros sanitários e cursos d’água (EMBRAPA, 2012).



Figura 2.2: Açaizeiro - *Euterpe oleracea* - (Fonte: Embrapa)¹

¹ Disponível em:

<<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/acai/arvore/CONT000gbjedm6p02wx5ok07shnq93xf55vj.html>>. Acesso em 29 julho 2019.

A obtenção da polpa do açaí é realizada por meio das seguintes etapas: recepção dos frutos, seleção manual, lavagem em solução de hipoclorito de sódio, aspersão com água filtrada, maceração, despulpamento e refino. O despulpamento pode ser feito manualmente ou com a utilização de equipamentos mecânicos (Figura 2.3). O funcionamento do maquinário consiste na utilização de um motor elétrico, com um sistema de redução por correia e polia, que giram em uma mesma árvore com palhetas em uma das extremidades. Esse sistema está acionado a um tambor cilíndrico de aço inox no qual os frutos são batidos e misturados à água potável, então são arrastados por forças gravitacionais ao fundo do cilindro que apresenta formato cônico e possui uma peneira de 0,6 mm na qual passa somente a polpa. A borra e os caroços são liberados pela abertura lateral do cilindro após o motor ser desligado (Alexandre, *et. al.*, 2004; Fadden, 2005 apud Rogez, 2000; Nogueira, *et. al.*, 2005; Gehlen, 2014).

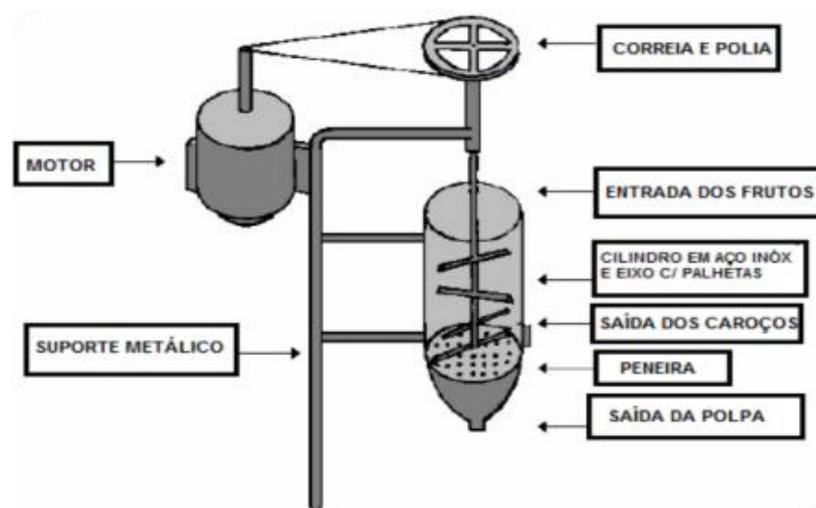


Figura 2.3: Representação de uma despulpadora convencional para frutos de açaí (adaptado de Oliveira, *et. al.*, 2007).

O resíduo gerado no processo de despulpamento corresponde a 90 % do volume dos frutos produzidos e é composto por caroços e camadas mais grossas da polpa do açaí que ficaram retidas na peneira no processo. As fibras encontram-se presentes no revestimento do mesocarpo e na polpa do fruto, sendo, portanto, um subproduto do despulpamento. Ainda que correspondam a materiais biodegradáveis, estes rejeitos muitas vezes são dispostos de maneira ilícita no meio ambiente, tornando-se poluentes quando descarregados às margens de mananciais, sendo responsáveis pela redução das taxas de oxigênio dissolvido na água e pela eutrofização (Lima Júnior, 2007; Maranhão, *et. al.*, 2012;

Martins, *et. al.*, 2009; Gehlen, 2014). Na Figura 2.4 pode-se identificar o fruto e o resíduo gerado.

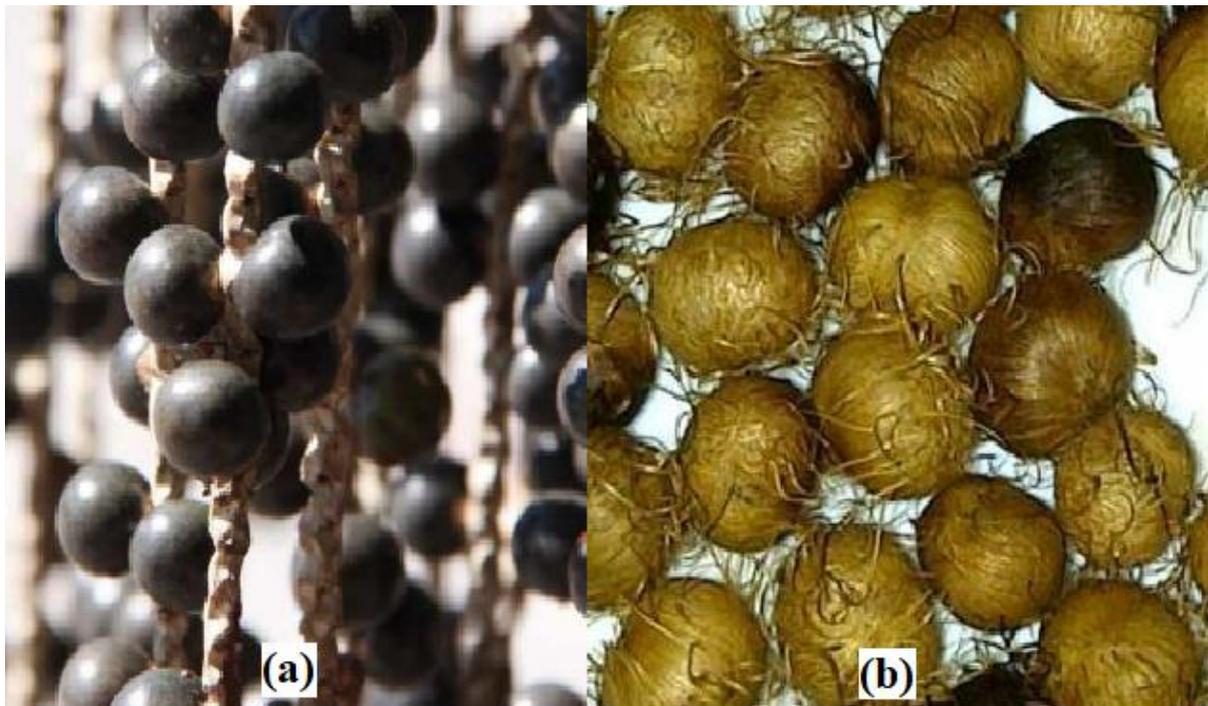


Figura 2.4: (a) Fruto (Moscoso, 2012); (b) Resíduo (Mesquita, 2013).

Algumas pesquisas foram realizadas com o intuito de destinar o aproveitamento desses materiais para aplicações como artesanato, fabricação de papéis, produção de adubo, extração de oxidante, substrato enzimático e geração de energia. Porém, estudos direcionados às fibras de açaí em compósitos ainda são escassos. Estas fibras possuem propriedades mecânicas diversas que podem ser exploradas para fins variados; existem pesquisas que estudam a fibra para fabricação de eco painéis que podem ser aplicados para isolamento acústico, por exemplo (Mesquita, 2013).

De acordo com Martins *et. al.*, (2009) as fibras e o caroço do açaí apresentam comportamento térmico compatível com aplicações na indústria de materiais e automobilística, assim como as fibras de sisal e coco que já vem sendo empregadas. Deste modo, geram-se perspectivas para o emprego das fibras de açaí no desenvolvimento de novos materiais (Martins, *et. al.*, 2005; Oliveira, *et. al.*, 2007; Valença, *et. al.*, 2011; Gehlen, 2014).

Apresentam-se a seguir valores, disponíveis na literatura, para as propriedades físicas (Tabela 2.1) e químicas (Tabela 2.2) das fibras de açaí.

Tabela 2.1: Propriedades Físicas das Fibras de Açai

Densidade (g/cm ³)	Área da Seção (µm ²)	Diâmetro (µm)	Comprimento (µm)	Fator de Forma (L/D)	Referência
1,11	2.017,29	129,93	18.410,00	142,32	Lima Junior (2007)
0,74	-	104,00	15.320,00	147,00	Gehlen (2014)

Tabela 2.2: Propriedades Químicas das Fibras de Açai

Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Umidade (%)	Referência
27,5 ± 1,4	13,9 ± 1,6	39,1 ± 1,2	1,9 ± 0,3	6,4 ± 0,3	Gehlen (2014)

2.3.2. Influência dos Principais Fatores no Comportamento Mecânico das Fibras Vegetais

Diversos autores dissertam sobre fatores que influenciam no comportamento mecânico de fibras vegetais. Em sequência, serão descritas as influências do diâmetro das fibras, comprimento das fibras, ângulo microfibrilar, estrutura das fibras e índice de cristalinidade no comportamento mecânico das fibras vegetais.

2.3.2.1. Diâmetro das Fibras (D)

Tomczak *et. al.* (2007) correlacionaram propriedades mecânicas de fibras de curauá com diâmetro, comprimento e taxa de deformação. O módulo elástico diminui de 96 a 30 GPa, enquanto que a tensão de ruptura diminui de 310 a 131 MPa com o aumento do diâmetro da fibra de 26 à 64µm.

2.3.2.2. Comprimento das Fibras (L)

Segundo Tomczak *et. al.* (2007), as propriedades das fibras de curauá variam com a mudança de comprimento de 5 a 25mm, com diâmetro médio de 46 μ m, na velocidade de 5mm/min. A tensão de ruptura diminui de 223 a 173 MPa, a deformação diminui de 10,2 a 3,74% e o módulo elástico médio aumenta de 26,6 a 52,9 GPa com o aumento da distância entre garras. A redução dos valores de tensão de ruptura e alongamento na ruptura é aceitável devido ao maior número de defeitos presentes na fibra com o aumento da distância entre garras, comportamento este que é encontrado em outras fibras naturais.

Silva (2009) utilizou diferentes comprimentos (10, 20, 30 e 40 mm), a fim de se avaliar a variabilidade na resistência da fibra, através da distribuição de Weibull. O módulo de Weibull diminuiu (4,6 para 3) à medida que o comprimento aumentou e, portanto, a variabilidade nos valores de resistência foi maior com o aumento do comprimento. A capacidade de deformação diminuiu (5,2% para 2,6%) com o aumento do comprimento. Esse comportamento se deve ao tamanho médio e a distribuição de falhas da fibra. O tamanho médio das falhas independe do comprimento, porém o número de falhas aumenta com o aumento do volume.

2.3.2.3. Ângulo Microfibrilar (Helicoidal)

Defoirdt *et. al.* (2010) afirmam que fibras com pequenos ângulos geralmente apresentam maior resistência e rigidez, enquanto fibras com maiores ângulos proporcionam comportamento dúctil.

O módulo de elasticidade é proporcional ao teor de celulose e inversamente proporcional ao ângulo microfibrilar. A fibra de juta, por exemplo, tem alto teor de celulose (72%) e ângulo microfibrilar de 8°, no entanto, é uma fibra resistente, com alto módulo de elasticidade (43.9 GPa) e baixa capacidade de deformação (0.6%). Já a fibra de coco possui baixo teor de celulose (26%) e grande ângulo microfibrilar, variando entre 30 - 49°, o que explica o fato dessa fibra ter baixa resistência mecânica (90 MPa), baixo módulo (3.8 GPa) e grande capacidade de deformação (18.8%) (Defoirdt *et. al.*, 2010).

Para Tomczak (2011), o ângulo microfibrilar influencia no comportamento mecânico da fibra, sendo proporcional à capacidade de deformação. Através da comparação entre os valores de ângulo encontrados na literatura e os valores de deformação obtidos

através dos ensaios de tração, foi observado que a fibra de sisal possui maior ângulo microfibrilar e maior capacidade de deformação.

2.3.2.4. Estrutura das Fibras

Lima Júnior (2007) realizou ensaios de termogravimetria em fibras de sisal e açaí e concluiu que a degradação superficial está relacionada à parede celular mais externa (com poucas microfibrilas de celulose em uma matriz mais volumosa de lignina e hemicelulose, basicamente). A decomposição do material celulósico (presente em maior parte) na curva do açaí se dá após os 350 °C e na curva do sisal a partir dos 360 °C.

Fidelis *et. al.* (2013) observaram que à medida que a área interna dos lúmens diminui e a espessura da parede celular secundária aumenta, a resistência à tração e o módulo de Young da fibra aumentam.

2.3.2.5. Índice de Cristalinidade

Fidelis (2014) realizou ensaios de tração nas fibras de juta, sisal, curauá, coco e piaçava, com o objetivo de comparar o comportamento mecânico dessas fibras com a morfologia e composição química. A fibra de curauá apresentou maior índice de cristalinidade, maior resistência mecânica e maior módulo de elasticidade.

2.4. Durabilidade das Fibras Vegetais

O tema do reforço de solos com recurso a geotêxteis de fibra natural foi abordado por Mwasha & Petersen (2010), que pretenderam estudar o comportamento de um aterro reforçado com um geotêxtil de fibra de sisal construído sobre solo mole. Para isso construíram um tanque e utilizaram areia de quartzito, com origem em Valência, Trinidad e Tobago, para o referido estudo. O quartzito utilizado era uma forma relativamente pura de quartzo, com cerca de 99 % deste mineral. O geotêxtil foi colocado sobre um solo mole, uma lama fina retirada do Pântano Caroni, Trinidad e Tobago, sobre o qual se ergueu o referido aterro de areia. No final da consolidação, o aterro foi desmontado a fim de testar o geotêxtil, que apresentava claros sinais de ataque de fungos. O geotêxtil biodegradado foi lavado com água destilada e seco em estufa para depois ser testado. Foi-lhe retirado uma

amostra, e verificou-se que a resistência à tração do geotêxtil tinha diminuído de 92 para 10 kN/m após dois meses de teste.

No seu estudo da durabilidade de geotêxteis de fibra de coco, Balan (1995) demonstrou que, quando incorporado no solo, o coco conservou 43% da sua resistência em meio alcalino com um pH de 11, e 60% com um pH de 3. Verificou-se que a degradação é mais rápida com valores de pH a variar entre 6 e 8, onde a resistência retida foi de 34% e 26%, respetivamente. Contudo a capacidade de absorção de umidade do geotêxtil aumentou à medida que avançou a degradação. Após um ano, a absorção do geotêxtil degradado foi 2,5 vezes maior do que quando em estado fresco.

Tolêdo Filho (1997) imergiu fibras de coco e sisal em soluções de hidróxido de cálcio (pH=12) e de hidróxido de sódio (pH=11) e a perda da resistência à tração com o tempo foi medida para avaliar a durabilidade das fibras. A partir dos resultados, nota-se que a intensidade do ataque alcalino foi maior na solução de hidróxido de cálcio que na solução de hidróxido de sódio. Os resultados mostram que após 210 dias de imersão em solução de hidróxido de cálcio, as fibras de sisal e coco retiveram, respectivamente, 33.7% e 58% das suas resistências originais. Após 300 dias, no entanto, toda a sua resistência tinha sido perdida. Quando secas, as fibras de sisal e coco perdiam completamente a sua flexibilidade e podiam ser facilmente separadas pela força imposta pelos dedos.

Num estudo sobre a biodegradação de geotêxteis de fibra de coco, Mukkulath & Thampi (2012) recorreram a este tipo de materiais como biofiltros para o tratamento de águas residuais. Foram estudados vários efluentes, com diferentes valores de pH e foi analisada a redução da resistência à tração das fibras de coco. O estudo mostra que a degradação, ou redução, da resistência à tração dos geotêxteis de fibra de coco era menor quando a gama de pH era de 6,5 a 8. O afastamento das gamas neutras de pH torna o afluente ácido ou alcalino, o que torna as fibras de coco mais frágeis e isso é evidente na redução da resistência à tração.

Um estudo realizado no âmbito da biodegradação de fibras naturais, citado por Joy *et. al.* (2011), relata que, nas condições climáticas típicas de Deli, Índia, geotêxteis de juta enterrados a uma profundidade de 300 mm em solo frouxo perderam completamente a sua resistência em dois meses e meio, observando-se também que a redução desta é maior em água com pH de 5,2.

Num estudo sobre a durabilidade de fibras naturais, quando colocadas em contato com um solo residual granítico, realizado por Carvalho (2014), foram utilizadas três tipos de fibras vegetais, sisal, coco e banana. Ao longo do tempo estas fibras foram sendo

analisadas periodicamente com recurso a ensaios de resistência à tração, sendo que foi possível verificar que, para o caso das fibras de sisal, a perda mais acentuada deste parâmetro ocorreu nos primeiros 15 dias de estudo, registrando-se perdas de resistência à tração entre os 65 e 81 %. Ao fim de 90 dias de estudo a mesma perda de resistência rondava entre os 89 e 96 %, ou seja, nos primeiros 15 dias de estudo as fibras de sisal perderam quatro vezes mais resistência que nos 30 dias que se seguiram. Em relação às fibras de banana, tal como verificado anteriormente em relação às fibras de sisal, a perda mais acentuada de resistência dá-se até aos 15 dias de estudo, onde a perda variou entre 68 e 83 %, sendo que aos 30 dias e até ao fim do estudo, a perda de resistência foi de 100 %. No que diz respeito às fibras de coco, os resultados obtidos mostram variações ao longo do tempo onde se verificam perdas e ganhos de resistência em relação aos valores padrão, tal fato poderá estar relacionado com a elevada presença de água nas fibras.

Tolêdo Filho (1997) realizou ensaio de imersão das fibras de sisal e coco em água de torneira medindo-se as massas a cada 24 horas. A variação dimensional avaliada por um micrômetro foi de um aumento de diâmetro de 15% no sisal e 9% no coco. A durabilidade das fibras foi avaliada pelo ensaio de tração até 420 dias após serem imersas em água de torneira. Os resultados mostram que, ao final do tempo de imersão, as fibras de sisal e coco retiveram, respectivamente 83.3% e 77.2%. Concluiu que a perda de resistência tem como causa provável a ação microbiana (em presença de água).

Ghavami *et. al.* (1999) avaliaram o comportamento físico e mecânico de solo reforçado com fibras de sisal e coco de 50mm de comprimento para a produção de blocos para substituir adobe e taipa na construção de casas. Realizaram tratamento com materiais betuminosos (piche e cipla) visando repelir a água. O piche foi o método de impermeabilização mais eficiente, tendo o sisal respondido melhor ao tratamento, já que reduziu drasticamente a absorção após 100 horas de 175% para 80%. Os autores justificaram este resultado pela microestrutura da fibra de sisal que é mais porosa, podendo absorver mais rápido o produto do tratamento. Ensaio de durabilidade das fibras foram realizados por imersão em água por 210 dias. Concluíram que o tempo de imersão não influencia fortemente na resistência última das fibras, mas diminui o valor da deformação última. O comportamento do compósito solo-fibra foi avaliado variando tipo de fibra, adição de 2% de emulsão betuminosa e período de secagem (7, 28, 60 e 90 dias). Avaliando as curvas tensão-deformação de todas as amostras com o tempo, observa-se que o envelhecimento não resultou em alteração nos valores de resistência. Adição de material

betuminoso no compósito não melhorou a ligação do solo com a fibra, mas aumentou sua durabilidade.

Leocádio (2005) avaliou os efeitos do tratamento de impermeabilização superficial das fibras de sisal com poliestireno expandido (EPS) reciclado nas propriedades do compósito solo laterítico-fibra. A avaliação da deposição do filme polimérico sobre a superfície da fibra feita por microscopia eletrônica de varredura e análise da cinética de absorção de água indicou a eficiência da impermeabilização superficial como elemento inibidor do processo de absorção de água. A influência do tratamento da fibra no compósito foi avaliada pelos ensaios de compactação, de capacidade de carga (CBR) e pelo ensaio de cisalhamento direto. Para a mistura de melhor desempenho tratada superficialmente, a densidade se manteve a mesma, mas a umidade ótima diminuiu. O emprego da mistura ótima com fibras tratadas diminuiu a expansão e aumentou ainda mais a capacidade de carga. A mistura ótima com e sem tratamento das fibras, submetidas às tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, apresentaram o mesmo comportamento.

Joy *et. al.* (2011) avaliaram o efeito da biodegradação dependente do tempo e da profundidade do geotêxtil com fibras de coco sob condições climáticas tropicais. Realizaram ensaios de resistência à tração em amostras de geotêxteis de fibra de coco que foram enterradas em solo laterítico em profundidades de 15, 45, 75 e 100 cm e então recuperados após 30, 60, 75, 105 e 120 dias. Concluíram que, em geral, a porcentagem de redução da resistência à tração chegou a 70-90% após 120 dias. A biodegradação do geotêxtil foi mais pronunciada à profundidade de 75 cm. Materiais celulósicos degradam severamente pela atividade microbiana em profundidades rasas comparado com profundidades maiores, portanto a redução da resistência pode ter sido devido ao ambiente alcalino, em vez de a umidade no solo.

Silveira (2018) avaliou o comportamento mecânico e da durabilidade de um solo arenoso reforçado com fibras de vegetais de sisal e curauá aleatoriamente distribuídas, submetidos ao envelhecimento natural por exposição às condições ambientais diversas por 8 meses. Também avaliou o efeito de impermeabilização para melhorar a durabilidade destas fibras através de tratamentos com sílica coloidal e copolímero de butadieno e estireno carboxilado. A exposição dos compósitos areia-fibras vegetais com e sem tratamento superficial aos agentes climáticos e ao tempo resultou na perda de capacidade no comportamento mecânico. Os compósitos com fibra de curauá perdem resistência e tenacidade com maior rapidez e maior magnitude do que o compósito com fibra de sisal,

reforçando que a fibra de curauá é mais susceptível à degradação em ambientes naturais do que a fibra de sisal.

Bernardina (2019) também avaliou o efeito da biodegradação dependente do tempo e da profundidade para fibras de coco, sisal, curauá e polipropileno. Foi observado que após oito meses sendo submetidas ao envelhecimento natural, as fibras ainda contribuíram como reforço do solo. Pelos dados obtidos através dos ensaios de tração direta, entre as profundidades analisadas, foi percebido que a maior degradação ocorreu a 75 cm de profundidade e a justificativa seria o ambiente alcalino que se encontra nesta profundidade e não a presença de microorganismos. Os resultados obtidos mostraram que, mesmo sofrendo degradação, as fibras vegetais analisadas podem ser utilizadas como método alternativo de reforço de solo em obras de terra de curto e médio prazo, como soluções temporais, como obras de contenção e estabilização e aterros.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Considerações Iniciais

O programa de ensaios estabelecido tem como objetivo principal investigar e identificar o efeito da adição de fibras de açaí nas propriedades mecânicas de dois tipos de solo distintos: um solo arenoso e um solo laterítico argiloso, bem como a atuação do reforço e degradação da fibra ao longo do tempo no solo argiloso. Desta forma, foi desenvolvido um programa experimental que se baseia em duas etapas descritas a seguir.

A primeira etapa investigou as propriedades físicas e de caracterização dos materiais utilizados na pesquisa. Na segunda etapa foi realizado o estudo do comportamento mecânico dos materiais através de ensaios de laboratório, englobando ensaios de Compressão Simples e Cisalhamento Direto com compósitos solo-fibra.

3.2. Variáveis Investigadas

Diferentemente das fibras sintéticas e de fibras naturais como sisal, curauá e coco, é inviável variar o diâmetro e o comprimento das fibras de açaí, sendo estes muito pequenos, com média de 129,93 μm de diâmetro e 18,41 mm de comprimento de acordo com Lima Júnior (2007) e 104,00 μm de diâmetro e 15,32 mm de comprimento de acordo com Gehler (2014).

Desta forma, as variáveis a serem analisadas por este trabalho se restringem ao teor de fibras (0,5% e 1,0%), às tensões de confinamento impostas em ensaios de cisalhamento direto (50, 100 e 200 kPa) para os dois tipos de solo, a densidade relativa para o solo arenoso (50% e 75%) e à variação temporal para verificar a degradação no solo laterítico argiloso (0, 2, 4 e 5 meses). Estes teores de fibra escolhidos foram testados anteriormente por Lopes e Casagrande (2018) que apresentaram resultados positivos, as tensões foram escolhidas para se obter os valores de ângulo de atrito do compósito, e para isto, são necessárias no mínimo três tensões e o tempo de degradação é o tempo disponível para a pesquisa de conclusão da graduação.

Uma vez identificadas as variáveis mais importantes, avalia-se a influência destas, variando-as de forma controlada enquanto mantêm-se as demais variáveis fixas. As faixas de variação possíveis para as variáveis investigadas referentes aos ensaios realizados são apresentadas nos itens subsequentes.

3.2.1. Ensaios de Compressão Simples

Os ensaios de compressão simples foram realizados variando o teor de fibras em 0,5% e 1,0% para o compósito com matriz argilosa compactados pelo método Mini-MCV (*Moisture Condition Value* - Valor da Condição de Umidade - miniatura) na umidade ótima e energia intermediária.

Foram expostos a intemperismo os corpos de prova de forma a analisar os efeitos da variação temporal na degradação das fibras, sendo realizados ensaios de compressão simples sobre os corpos de prova expostos por zero, dois, quatro e cinco meses. As variáveis investigadas neste tópico estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Variáveis investigadas no programa de ensaios de Compressão Simples

Teor (%)	Diâmetro (μm)	Comprimento (μm)	Tempo de Exposição (meses)
0,5	aleatório	Aleatório	0, 2, 4, 5
1,0	aleatório	Aleatório	0, 2, 4, 5

3.2.2. Ensaios de Cisalhamento Direto

Seguindo a lógica dos ensaios de compressão simples, para os ensaios de adensamento e cisalhamento direto foi avaliada a influência da variação do teor de fibras em 0,5% e 1,0% para os compósitos com matriz argilosa mas também agora, avaliando o comportamento dos compósitos com matriz arenosa.

Para os compósitos de matriz argilosa os corpos de prova foram feitos através de compactação pelo método Proctor Normal (NBR 7182, 2016) para as umidades ótimas respectivas aos teores 0,5% e 1,0% na energia intermediária. Depois de compactados e expostos às ações do clima (zero, dois, quatro e cinco meses), os corpos de prova foram desbastados para o formato da caixa de cisalhamento de 60 mm X 60 mm X 25 mm.

Então foram realizados os ensaios de adensamento e cisalhamento variando a tensão normal para os valores 50, 100 e 200 kPa. As variáveis investigadas neste tópico estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Variáveis investigadas no programa de ensaios de Adensamento e Cisalhamento Direto para o Solo Argiloso

Teor (%)	Diâmetro (μm)	Comprimento (μm)	Tempo de Exposição (meses)	Tensão Normal (kPa)
0,0	aleatório	aleatório	0, 2, 4, 5	50, 100, 200
0,5	aleatório	aleatório	0, 2, 4, 5	50, 100, 200
1,0	aleatório	aleatório	0, 2, 4, 5	50, 100, 200

Os corpos de prova de matriz arenosa foram moldados já dentro da caixa de cisalhamento para o formato da caixa de cisalhamento de 60 mm X 60 mm X 25 mm.

Então foram realizados os ensaios de adensamento e cisalhamento variando a tensão normal para os valores 50, 100 e 200 kPa e a densidade relativa dos compósitos: 50% e 75%. As variáveis investigadas neste tópico estão apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Variáveis investigadas no programa de ensaios de Adensamento e Cisalhamento Direto para o Solo Arenoso

Teor (%)	Diâmetro (μm)	Comprimento (μm)	Densidade Relativa (%)	Tensão Normal (kPa)
0,0	aleatório	aleatório	50, 75	50, 100, 200
0,5	aleatório	aleatório	50, 75	50, 100, 200
1,0	aleatório	aleatório	50, 75	50, 100, 200

3.2.3. Ensaios de Expansão e CBR (*California Bearing Ratio*)

Para os ensaios de CBR e Expansão a única variável foi o teor de fibras de 0,5% e 1,0%.

3.3. Materiais Utilizados

A seguir são apresentados os dados relativos aos materiais utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, enfatizando os aspectos de maior relevância para caracterização dos materiais ou fatores que possam fornecer elementos adicionais para o seu melhor entendimento.

Os ensaios de caracterização física dos solos utilizado foram realizados conforme os seguintes métodos e procedimentos:

- Ensaios de granulometria (NBR 7181 - ABNT, 1984-a);
- Limites de Atterberg -- liquidez e plasticidade (NBR 6459 – ABNT, 1984-b e NBR 7180 - ABNT, 1984-c);
- Massa específica real dos grãos (NBR 6508 - ABNT, 1984-d);
- Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água (NBR-6458 - ABNT, 2016);
- Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos – Método de ensaio (NBR 12051 - ABNT, 1991);
- Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos – Método de ensaio (NBR 12004 - ABNT, 1990).

3.3.1. Argila Laterítica

Foi utilizado um solo argiloso laterítico proveniente do Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (Figura 3.1). Este solo é típico do Distrito Federal e encontrado comumente na Amazônia abaixo das camadas de matéria orgânica provenientes das folhagens e detritos da densa vegetação da Floresta Amazônica. Sua ocorrência se dá sob relevo plano a forte ondulado e são geralmente provenientes de arenitos arcossianos, riolitos, gnaisses e granitos pré-Cambrianos. São encontrados sob os mais variados tipos de vegetação: mata densa e mata de cipó ou bambu (Ranzani, 1979). Sua granulometria está apresentada a seguir (Figura 3.2).



Figura 3.1: Solo Argiloso Laterítico (Fonte: Autor)

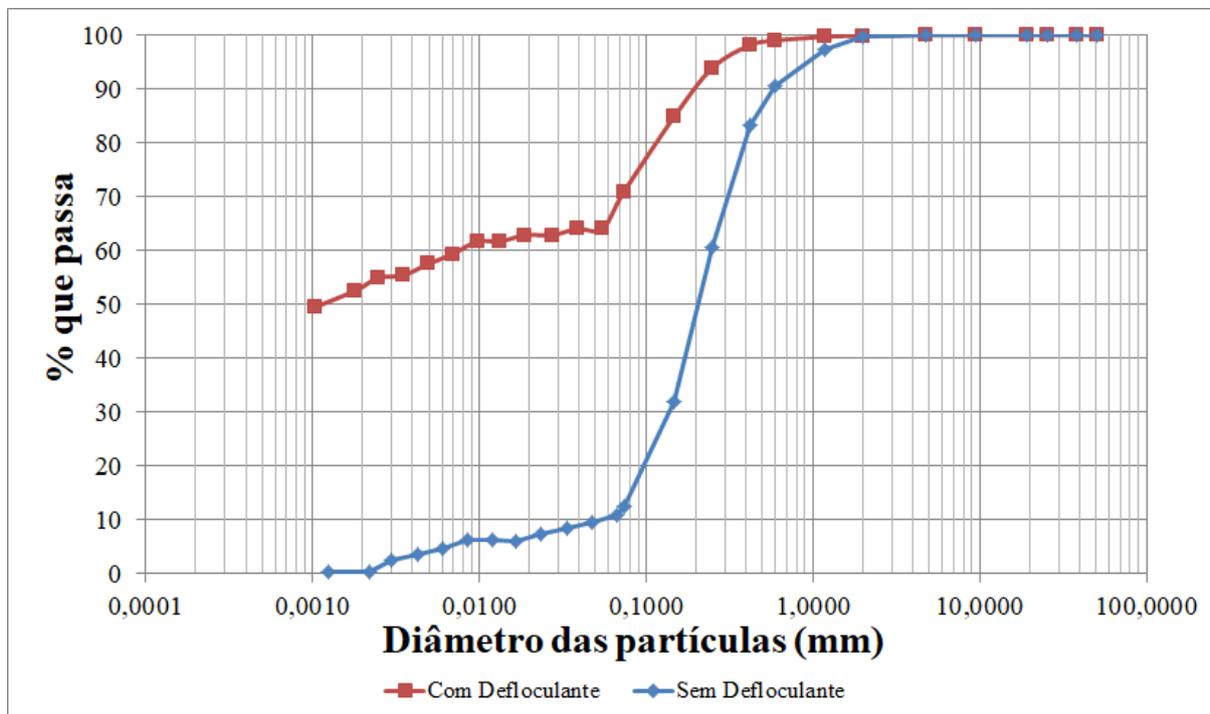


Figura 3.2: Curva Granulométrica do Solo Argiloso Laterítico (Fonte: Autor)

Com base nas análises granulométricas, verifica-se que o solo estudado é composto em sua maior parte por fração argila, representando 53,3%, seguido por 36 % de areia e 10,7 % de silte. A massa específica real dos grãos do solo puro, obtido no pentapycnometro, foi de 2,70 g/cm³. Quanto aos limites de consistência foi encontrado um valor de Limite de Liquidez de 42% e um valor de Limite de Plasticidade de 27%,

resultando em um Índice de Plasticidade de 15%. A partir dos resultados dos ensaios de granulometria e limites de Atterberg, foi possível classificar o solo de acordo com a Classificação TRB, em um material argiloso, pertencente ao grupo A-7-6 e com Índice de grupo igual a 10. Este material é considerado de regular a mau comportamento para aplicação em pavimentos.

3.3.2. Areia

O solo arenoso foi obtido em estabelecimento comercial, localizado na Região Administrativa do Guará – RA X, Distrito Federal (Figura 3.3). As amostras utilizadas na presente pesquisa, depois de coletadas, foram preparadas conforme os procedimentos descritos na Norma Brasileira – NBR-6458 (ABNT, 2016), sendo acondicionadas em tambores de plásticos de 200 litros de capacidade.

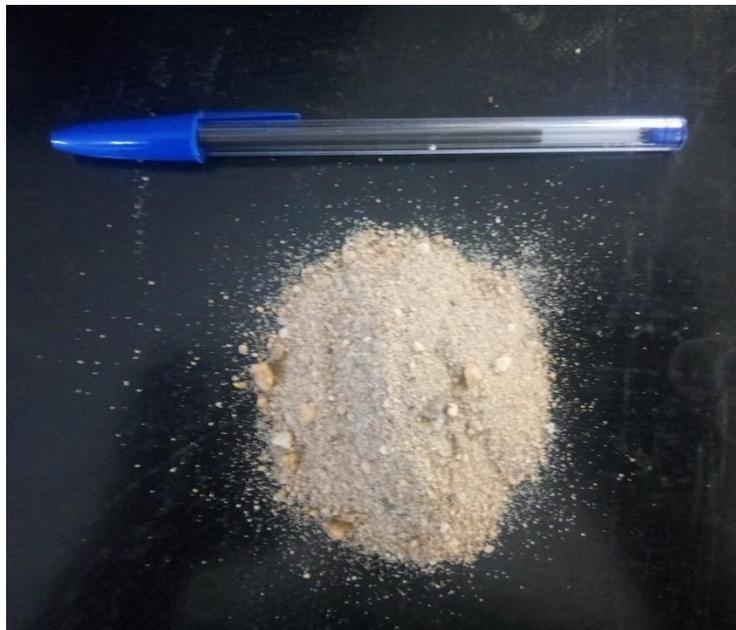


Figura 3.3: Solo Arenoso (Fonte: Autor)

A massa específica real dos grãos do solo puro, obtido no pentapycnometro, foi de $2,68 \text{ g/cm}^3$. O índice de vazios máximo foi de 0,894 e o mínimo de 0,586. O coeficiente de uniformidade (CNU) foi de 2,40 e o coeficiente de curvatura (C_c) de 1,06, com diâmetro efetivo (D_{10}) de 0,18 mm e o diâmetro médio (D_{50}) de 0,39 mm. A seguir, é apresentada a curva granulométrica desta areia (Figura 3.4).

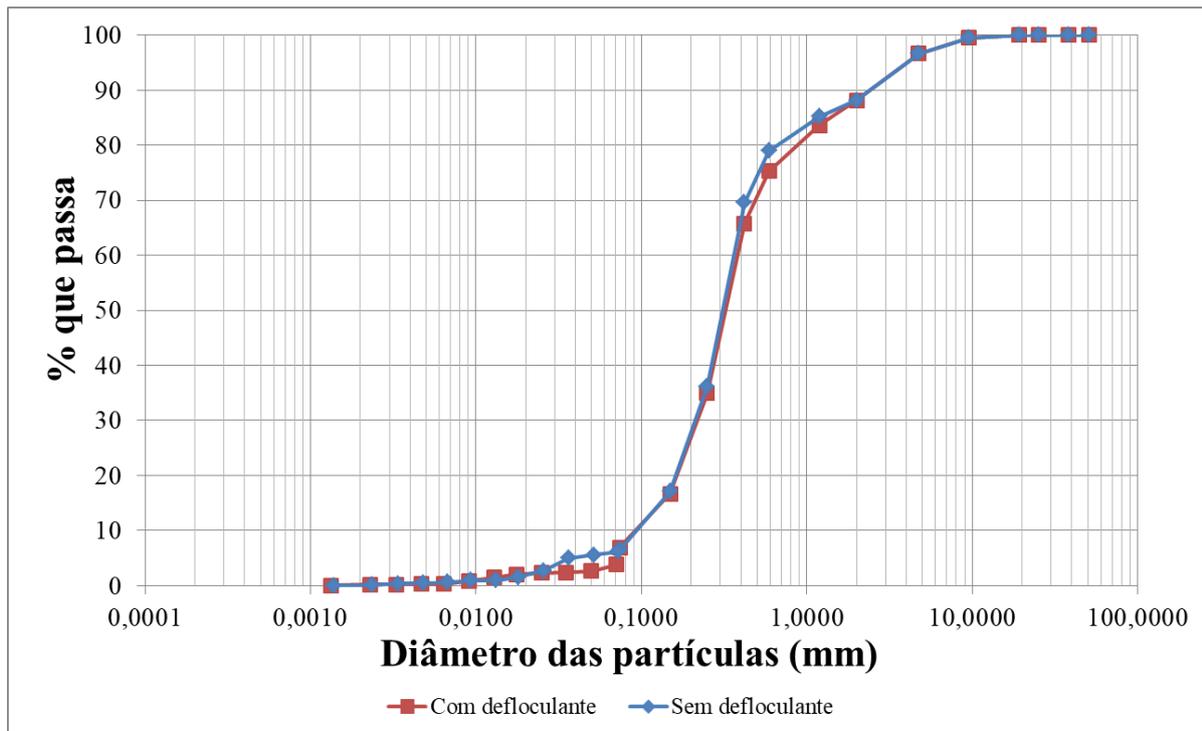


Figura 3.4: Curva Granulométrica do Solo Arenoso (Fonte: Autor)

A curva granulométrica mostra que o solo estudado é composto em 96,2% de fração arenosa e 3,8% de fração argila. O solo é classificado como areia média pela NBR 6502 (ABNT, 1995) e, conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS, uma areia bem graduada (SW), sem características plásticas.

3.3.3. Fibras

As fibras utilizadas como elemento de reforço foram as fibras vegetais provenientes do bagaço do açaí (*Euterpe oleracea*) após a retirada da polpa. Foram obtidas em contato com a Universidade Federal do Pará (UFPA) que possui uma máquina capaz de separar as fibras do caroço. Estas fibras encontram-se em abrangência pelo Nordeste Paraense sem destinação adequada, que muitas vezes são encontradas nas ruas.

As fibras de açaí foram escolhidas por apresentarem grande disponibilidade e destinações pouco adequadas, apresentando características mecânicas compatíveis com a necessidade de novos materiais geotécnicos, podendo abrir novas perspectivas para os estudos de reforço de solo com fibras naturais e alternativas acerca das problemáticas de Resíduos Sólidos Urbanos. A seguir tem-se uma imagem mais detalhada das fibras (Figura 3.5).



Figura 3.5: Fibras de Açaí (*Euterpe oleracea*)

3.3.4. Água

Foi usada água destilada para todos os ensaios realizados com exceção da utilizada para submergir a caixa do cisalhamento direto e para molhar os corpos de prova diariamente, a qual foi utilizada água proveniente da rede pública de abastecimento.

3.4. Métodos de Ensaio e Equipamentos Utilizados

A seguir serão apresentados os métodos de ensaio e demais procedimentos empregados durante o programa experimental. Para os ensaios que foram realizados baseando-se em procedimentos propostos em normas técnicas, será feita referência à mesma.

No caso de modificação de algum procedimento descrito em norma ou na ausência de norma técnica referente ao assunto abordado, será realizada uma descrição mais detalhada do método adotado.

3.4.1. Preparação das Amostras Argilosas para os Ensaios

As amostras de argila laterítica utilizadas nesta pesquisa, depois de coletadas, foram expostas à secagem e depois determinada a umidade higroscópica conforme a norma

NBR 6457 (ABNT, 1986-a). Após a secagem por refletores (60 °C), as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos hermeticamente fechados até serem usados.

Foram moldados dois tipos de corpo de prova:

- Corpos de prova miniatura de 10 cm de altura por 5 cm de diâmetro conforme a norma DNER-ME 228/94 (DNER, 1994) com energia intermediária para os ensaios de compressão simples.
- Corpos de prova de 114,3 mm de altura por 152,4 mm de diâmetro conforme a norma NBR 7182 (ABNT, 1986-b) com energia intermediária para os ensaios de adensamento e cisalhamento direto.

3.4.1.1. Corpos de Prova Miniatura

A norma DNER-ME 228/94 (DNER, 1994) descreve os procedimentos para correlacionar o teor de umidade do solo e a sua massa específica aparente seca (curva de compactação), quando a fração do solo que passa na peneira de 2 mm de abertura é compactada no aparelho de compactação miniatura (moldes cilíndricos com 50 mm de diâmetro) na energia intermediária (procedimento B) com amostras não trabalhadas. O equipamento utilizado para compactação miniatura é mostrado a seguir (Figura 3.6).



Figura 3.6: Equipamento para Compactação Miniatura (Fonte: Autor)

A quantidade de fibras adicionadas à mistura foi determinada em relação à massa de solo seco da matriz adicionando os componentes em um recipiente na seguinte sequência: solo, fibras (desfiadas manualmente) e água. Esta sequência foi a mais apropriada, pois permitiu a homogeneização dos componentes secos da mistura, antes de ser acrescentada a água. Cada corpo de prova teve uma mistura preparada separadamente. A mistura foi feita manualmente até ser obtida a homogeneização, verificada visualmente. Durante este processo todas as precauções foram tomadas no sentido de se evitar as perdas de umidade por evaporação.

Foram determinadas as curvas de compactação para o solo puro, com 0,5% de fibras e com 1,0% de fibras compactando 5 corpos de prova com aproximadamente 2% de teor de umidade de diferença entre eles. Desta forma, obteve-se a umidade ótima para cada curva com o peso específico seco máximo correspondente e com isto, foram compactados um corpo de prova com solo puro, seis corpos de prova com teor de fibras de 0,5% e seis com teor de fibras de 1,0% nas umidades ótimas correspondentes.

3.4.1.2. Corpos de Prova Proctor Normal

A norma NBR 7182 (ABNT, 1986-b) prescreve os procedimentos para correlacionar o teor de umidade do solo e a sua massa específica aparente seca de solos quando compactados. O solo foi destorroado e passado na peneira de 4,8 mm de abertura e a preparação das misturas seguiu os mesmos procedimentos descritos para a compactação miniatura (3.4.1.1.).

Foram compactados um corpo de prova com solo puro, seis corpos de prova com teor de fibras de 0,5% e seis com teor de fibras de 1,0% nas umidades ótimas correspondentes utilizando as curvas de compactação já delineadas no procedimento anterior (3.4.1.1.).

Para utilização destes corpos de prova nos ensaios de adensamento e cisalhamento direto foi necessário também desbastá-los para o formato correspondente ao da caixa de cisalhamento (60 mm X 60 mm X 25 mm). Foi possível desbastar até seis corpos de prova no formato da caixa por corpo de prova Proctor Normal. A seguir, são mostrados os corpos de prova compactados (Figura 3.7).



Figura 3.7: Corpos de Prova Miniatura e Proctor Normal

3.4.2. Ensaio de Expansão e CBR (*California Bearing Ratio*)

Os ensaios de Expansão e CBR (Figura 3.8) foram realizados de acordo com a norma NBR 9895 (ABNT, 2017). Foram compactados três corpos de prova Proctor Normal no cilindro grande na energia intermediária para o solo argiloso puro, solo argiloso + 0,5% de fibras e solo argiloso + 1,0% de fibras, todos em suas umidades ótimas respectivas. Estes corpos de prova foram submersos em água por quatro dias (96 horas) com um prato perfurado com haste de expansão e dois discos anelares sobre eles, em sequência foram avaliados de 24 em 24 horas a expansibilidade destes corpos de prova durante o período de saturação com o auxílio de um extensômetro.

Após esse período de 96 horas, os corpos de prova são retirados da submersão e postos para escoar a água por 15 minutos, então com o auxílio de um pistão de 49,6 mm de diâmetro os corpos de prova foram penetrados a uma velocidade de 1,27 mm/min realizando leituras em intervalos de 0,5 min, este ensaio é chamado de CBR.



Figura 3.8: Ensaio de Expansão (Fonte: Autor)

3.4.3. Ensaios de Compressão Simples

Os ensaios de compressão simples (Figura 3.9) foram realizados conforme os métodos estabelecidos pela NBR 12770 (ABNT, 1992). Os ensaios foram executados para os teores de fibra de 0,5% e 1,0% para os tempos de zero, dois, quatro e cinco meses.

Este ensaio constitui no rompimento de um corpo de prova não confinado com o uso de um pistão, onde é possível controlar a velocidade do deslocamento deste pistão e medir a força aplicada e o deslocamento vertical. A velocidade adotada deve estar compreendida entre 0,5% e 2,0% da deformação axial específica (ϵ) por minuto (para estes ensaios foram de 1,27 mm/min). O resultado final é expresso em um gráfico de Tensão *versus* Deformação Axial Específica (ABNT, 1992).

Com os resultados obtidos destes ensaios é possível observar a influência do teor de fibras na resistência ao cisalhamento do solo, bem como a influência da degradação destas fibras ao longo de cinco meses.



Figura 3.9: Ensaio de Compressão Simples (Fonte: Autor)

3.4.4. Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto (Figura 3.10) é o mais antigo, simples e expresso procedimento de medição imediato de resistência ao cisalhamento de solos em termos de tensões totais. A princípio, o ensaio de cisalhamento é um teste de ângulo de atrito onde uma porção do solo desliza sobre outra pela ação do acréscimo de tensões cisalhantes horizontais enquanto uma carga constante é aplicada sobre o plano normal, relativo ao movimento (Head, 1994).

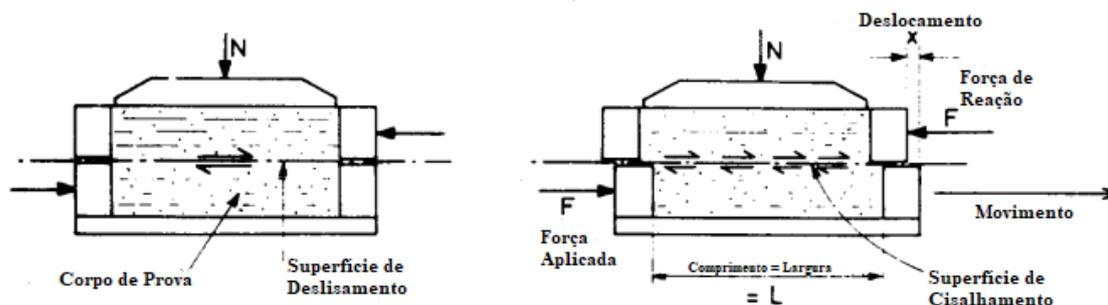


Figura 3.10. Princípios do Cisalhamento Direto (adaptado de Head, 1994)

Os ensaios de cisalhamento direto foram desenvolvidos com base na norma D3080/D3080M-11 (ASTM, 2011) e nas colocações propostas por Head (1994). Os ensaios foram executados para os teores de fibra de 0,5% e 1,0%, para os tempos de zero, dois, quatro e cinco meses para o solo argiloso, densidade relativa de 50% e 75% com cargas de 50, 100 e 200 KPa.

O primeiro passo é definir a velocidade máxima de cisalhamento dos corpos de prova, a velocidade é determinada a partir da curva de adensamento pelo método de Taylor (Taylor, 1948) na definição do tempo necessário para ocorrência de 90% do adensamento primário (t_{90}). Com base nos valores calculados e nos estudos de Pierozan (2018) adotou-se uma mesma velocidade de cisalhamento para todas as amostras ($v_c = 0,05$ mm/min, tempo total de cisalhamento igual a 3 horas e 40 minutos para deslocar 10 mm que é o limite do equipamento disponível no Laboratório de Geotecnia da UnB).

Como dito anteriormente, os ensaios de adensamento e cisalhamento direto foram desenvolvidos no mesmo equipamento (Figura 3.11), então imediatamente após o adensamento foi realizado o cisalhamento direto nas mesmas condições: disposto entre duas placas porosas e submerso com água na finalidade de evitar a evaporação e eliminar poropressões negativas segundo a norma D3080/D3080M-11 (ASTM, 2011). Este procedimento está disposto na norma, mas não há um consenso em relação a eliminação das poropressões.

Com os resultados obtidos destes ensaios é possível observar a influência do teor de fibras na resistência ao cisalhamento do solo, no ângulo de atrito, nas diferentes densidade relativas para o solo arenoso bem como a influência da degradação destas fibras ao longo de cinco meses para o solo argiloso.



Figura 3.11: Equipamento para Cisalhamento Direto (Fonte: Autor)

3.4.5. Compósitos Submetidos ao Envelhecimento Natural

Os corpos de prova compactados foram submetidos a uma simulação da ação de diversos agentes climáticos: chuva (Figura 3.12), irradiação solar e vento. A chuva foi artificial e controlada conforme a pluviometria correspondente ao mesmo período do ano anterior (2018) para a cidade de Belém do Pará, de forma a tentar simular já para o local de possível aplicação.

Desta forma, os corpos de prova foram deixados expostos à irradiação solar e vento, bem como regados diariamente com a quantidade de água correspondente ao que se encontra na Figura 3.13. A necessidade de submeter a estas intempéries se dá ao fato de que as fibras são biodegradáveis e para o bom desempenho dos microorganismos degradantes atuarem, se faz necessária à atuação destes fatores para um estudo adequado da influência da degradação das fibras nas propriedades do compósito.

Após os tempos previstos para exposição (dois, quatro e cinco meses), foram levados para submissão aos ensaios de compressão simples, adensamento e cisalhamento direto com a finalidade de identificar a influência da degradação das fibras nos parâmetros de resistência bem como no ângulo de atrito para os teores de fibra de 0,5% e 1,0%.

Esta metodologia é similar à desenvolvida por Silveira (2018) para avaliar a durabilidade das fibras submetidas ao envelhecimento natural, diferindo no controle pluviométrico devido à diferença de pluviometria das cidades em que foram desenvolvidos os ensaios e os ensaios a serem realizados.



Figura 3.12: Simulação de Chuva nos Corpos de Prova

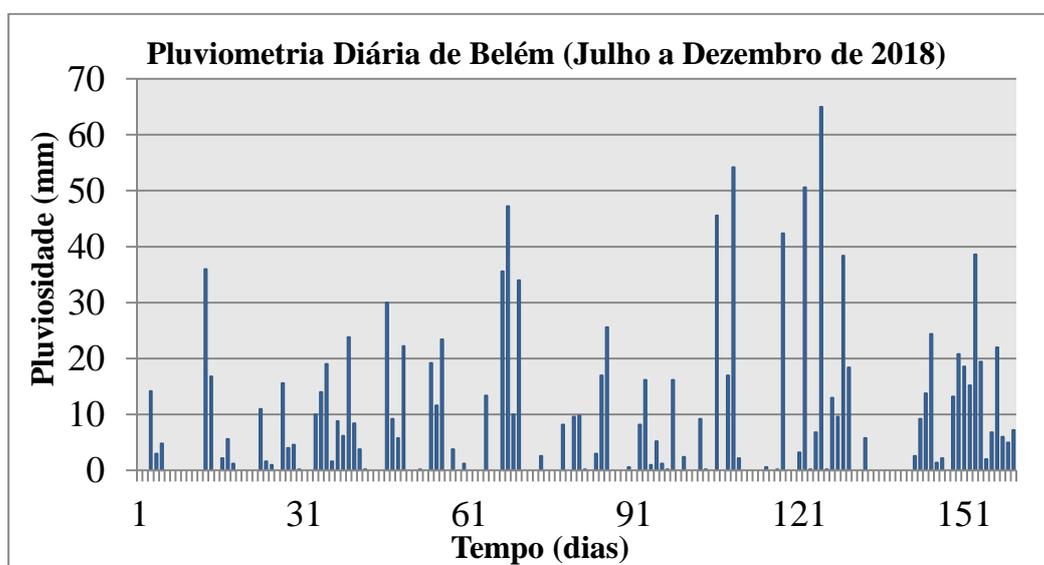


Figura 3.13: Pluviometria diária da cidade de Belém-PA (Adaptado de INMET²)

² Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTIwMQ=>>. Acesso em 29 de julho 2019.

4. RESULTADOS

4.4. Considerações Iniciais

Os resultados dos ensaios apresentados no item 3.4. estão dispostos a seguir. Estes permitem uma avaliação do comportamento físico-mecânicos dos dois tipos de solos reforçados através de medições experimentais de parâmetros de resistência dos compósitos solo-fibra, bem como a influência das fibras na expansão e CBR para o solo argiloso.

Além disso, estes resultados buscam avaliar o comportamento das fibras submetidas ao envelhecimento natural, onde há uma perda de capacidade mecânica desta, mas, ainda sim, há um ganho de resistência no intervalo de tempo analisado quando comparado ao solo puro.

4.5. Ensaio de Compactação Mini-MCV

Na Figura 4.1, estão à mostra as curvas de compactação do solo argiloso puro, solo argiloso + 0,5% de fibras e solo argiloso + 1,0% de fibras. Pelas curvas de compactação é possível perceber que com a inserção das fibras no solo argiloso há uma redução progressiva do peso específico seco aparente do solo argiloso puro para os compósitos, de 17 kN/m³ para o solo argiloso puro, 16,45 kN/m³ para o solo argiloso com adição de 0,5% de fibra e 16,28 kN/m³ para o solo argiloso com adição de 1,0% de fibra enquanto há um aumento, também progressivo, da umidade ótima 19,65 % para o solo argiloso puro, 22,71% para o solo argiloso com adição de 0,5% de fibra e 23,83% para o solo argiloso com adição de 1,0% de fibra.

Também foi possível perceber um aumento no índice de vazios do solo, conforme a Figura 4.2, sendo de 0,58 para o solo argiloso puro, 0,60 para o solo argiloso + 0,5% de fibra e 0,62 para o solo argiloso + 1,0% de fibra. Isto pode ser explicado pelo fato de que o diâmetro das fibras é maior que o diâmetro médio das partículas do solo argiloso, criando uma inconformidade no arranjo do compósito solo-fibra de forma que proporciona um leve aumento dos vazios.

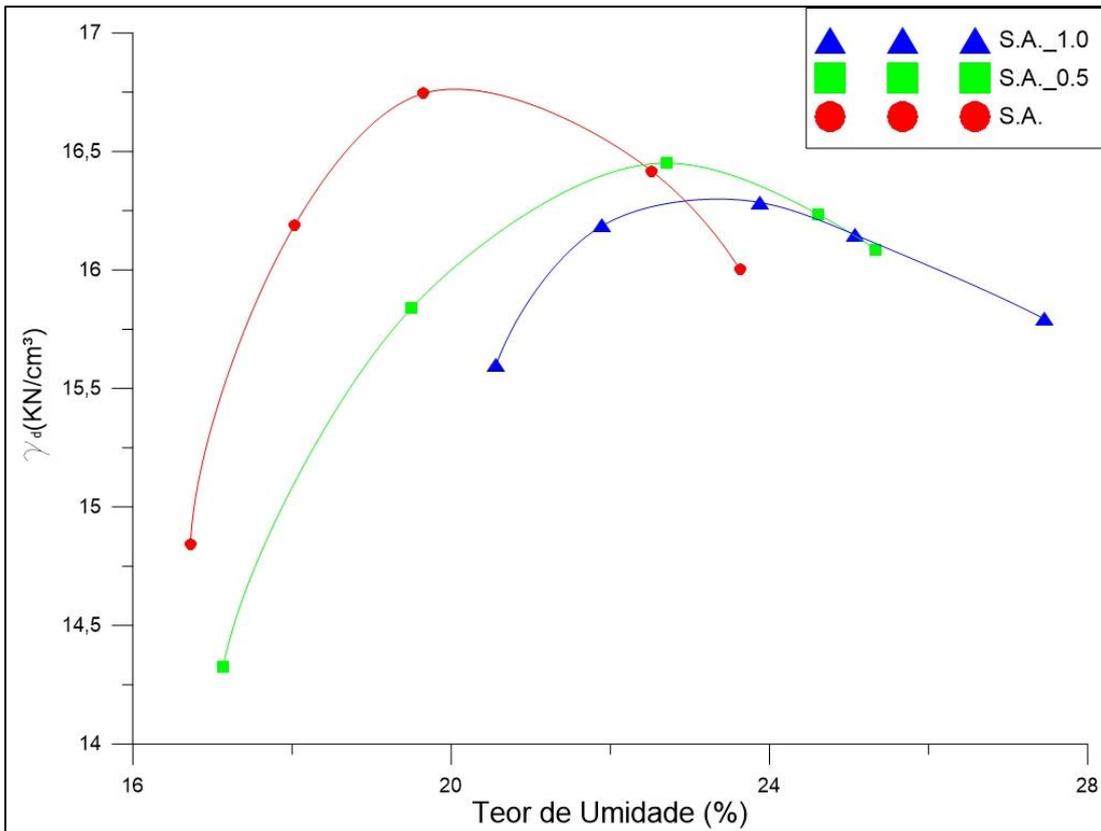


Figura 4.1: Curvas de Compactação

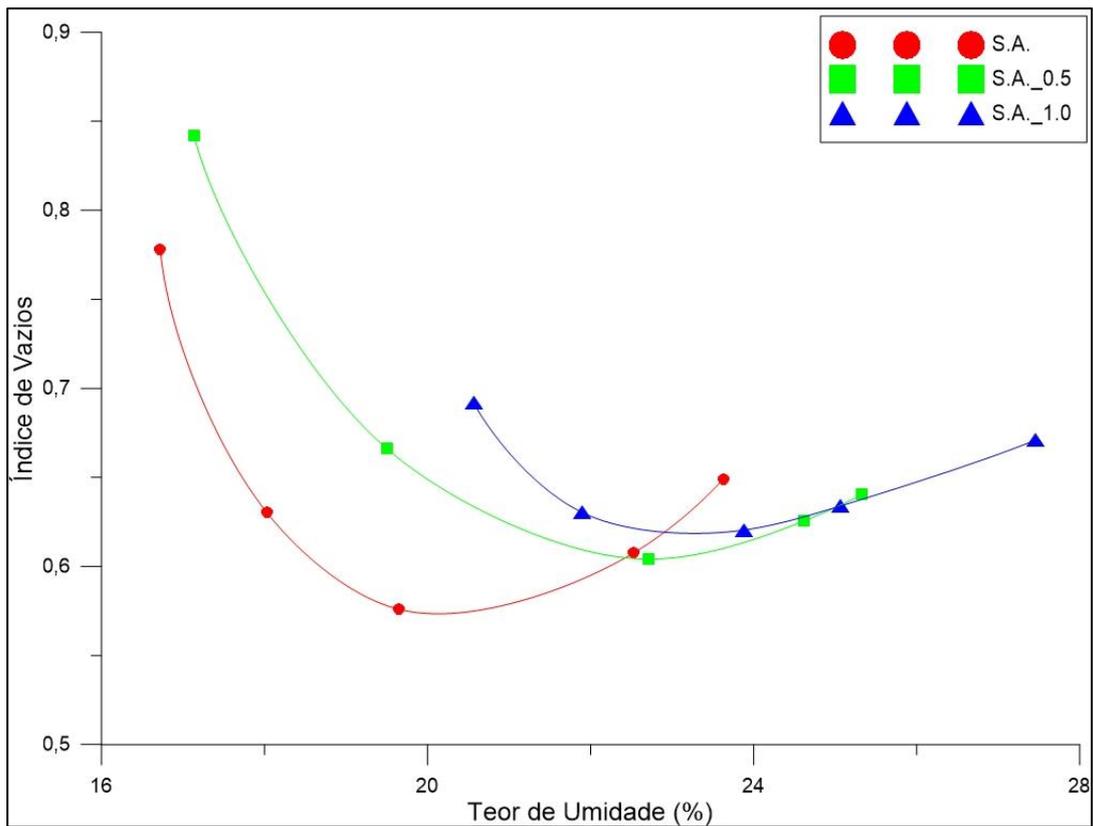


Figura 4.2: Índices de Vazios

4.6. Ensaio de Expansão e CBR (*California Bearing Ratio*)

Na Tabela 4.1 têm-se os resultados de Expansão e CBR para os compósitos com solo argiloso. Os resultados mostram que a adição das fibras de açaí diminuiu a expansibilidade do solo argiloso assim como foi retratado por Al Wahab & El-Kedrah (1995). Uma explicação para isto é que os solos lateríticos absorvem água por capilaridade, de acordo com Bernucci (1987), e as fibras criam capilares na matriz de solo, porém elas possuem capacidade de absorver esta água, não permitindo então que se crie a força repulsiva necessária para afastar os argilo-minerais.

A adição de fibras também diminuiu a capacidade de suporte do solo argiloso, porém, este ensaio de CBR tem sido cada vez menos usado, em face do aprimoramento de técnicas de avaliação de resistência cíclica, como o ensaio de Módulo de Resiliência. Apesar dos resultados de CBR se mostrarem insatisfatórios, existe a possibilidade de reavaliar estas propriedades a fim de embasar o uso em obras que necessitem uma maior resistência a solicitações cíclicas, como base de pavimento.

Tabela 4.1: Resultados de Expansão e CBR

Compósito	Expansão 96 horas (%)	CBR (%)
Solo Argiloso	55,65	133,7
Solo Argiloso + 0,5% de Fibras	16,52	53,3
Solo Argiloso + 1,0% de Fibras	18,26	70,1

4.7. Ensaio de Compressão Simples

Os ensaios de compressão simples foram executados em duas etapas: a primeira com corpos de prova sem exposição às intempéries e a segunda com exposição à chuva controlada (conforme o item 3.4.8.), e sol nos tempos de dois, quatro e cinco meses. Os resultados estão elencados a seguir.

4.3.1. Sem Exposição

A Figura 4.4 apresenta os resultados dos ensaios de compressão simples sem exposição. É possível perceber que de fato a adição das fibras não só aumentaram consideravelmente os parâmetros de resistência ao cisalhamento como também conferiram ao solo uma resistência adicional pós-pico que o solo não possuía. Os compósitos estão identificados da seguinte forma:

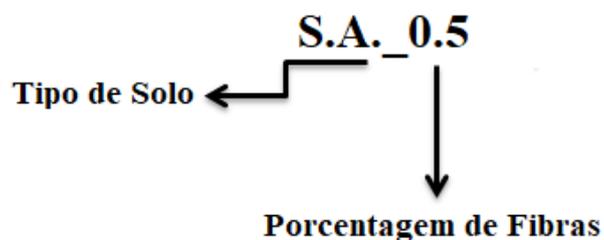


Figura 4.3: Explicação da Legenda dos Compósitos sem Degradação

A resistência de pico observada para o Solo Argiloso Puro (S.A.) foi de 488,78 kPa, já para o Solo Argiloso com Adição de 0,5% de Fibra (S.A._0.5) foi de 763,39 kPa, ou seja, 156% maior que a do solo puro; para o Solo Argiloso com Adição de 1,0% de Fibra (S.A._1.0) o valor de resistência de pico foi de 1220,35 kPa, que representa um valor 250% maior que o do solo puro e 160% maior que o solo com adição de 0,5% de fibra.

Em relação ao pós-pico, o solo com adição de 0,5% de fibra conseguiu manter uma resistência aproximadamente quatro vezes maior que a do solo puro e o com adição de 1% de fibra seis vezes maior.

exposição, que pode ser explicado pelo ressecamento dos compósitos ao longo do tempo de exposição, o qual reduziu a capacidade plástica do mesmos.

Os compósitos S.A._0.5_2M, S.A._0.5_4M, e S.A._0.5_5M apresentaram, respectivamente, as resistências de pico de 690,19 kPa, 629,35 kPa e 613,71 kPa, com isso se faz possível perceber que houve uma queda de tensão em relação ao compósito sem exposição (S.A._0.5), porém ainda maiores que a do solo puro (S.A.). Pelo gráfico, ainda se é capaz de inferir que os compósitos S.A._0.5_2M, S.A._0.5_4M e S.A._0.5_5M perdem sua capacidade de resistência pós-pico, tendo uma queda semelhante à do solo puro (S.A.).

Para os compósitos S.A._1.0_2M, S.A._1.0_4M e S.A._1.0_5M as resistências de pico respectivas foram de 1146,59 kPa, 1106,97 kPa e 930,22 kPa. Também houve queda de tensão em relação ao compósito sem exposição (S.A._1.0) as quais também foram maiores que a do solo puro (S.A.), porém, diferentemente dos compósitos com 0,5% de fibra, os compósitos S.A._1.0_2M, S.A._1.0_4M e S.A._1.0_5M ainda conferem capacidade de resistência pós-pico, menor que a do compósito sem exposição, contudo maior que as dos demais compósitos.

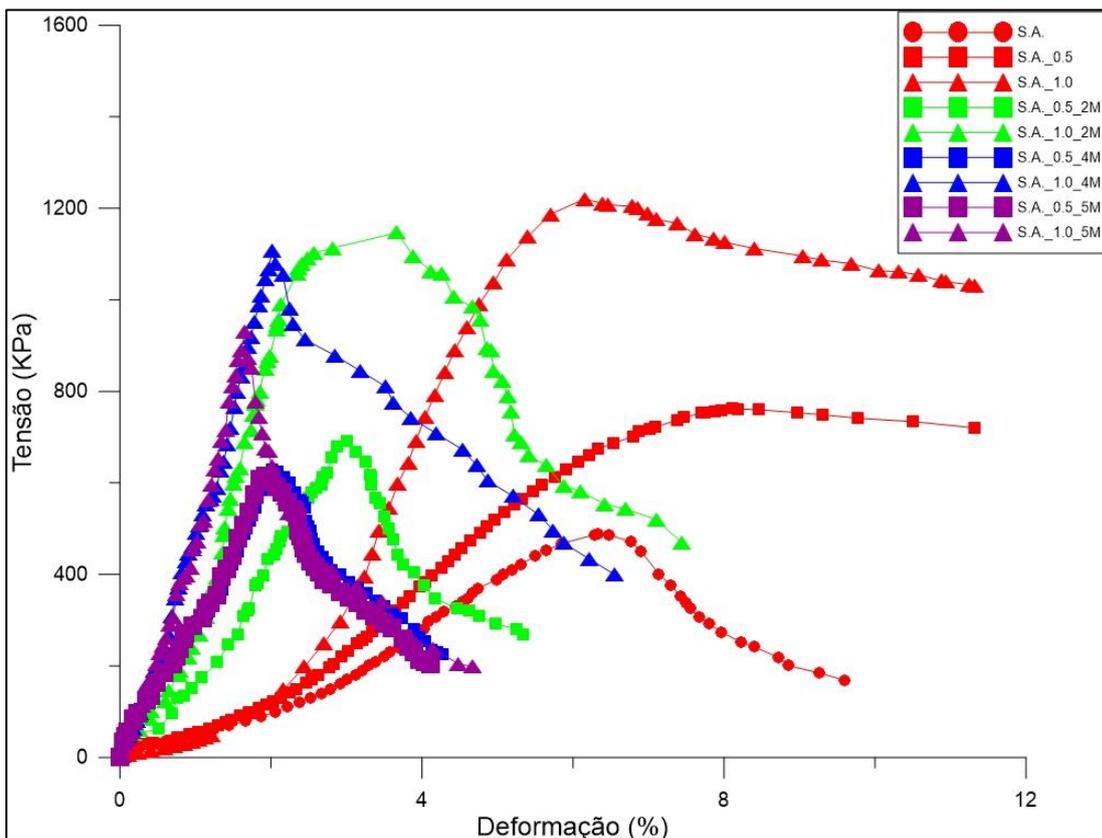


Figura 4.6: Curvas de Tensão *versus* Deformação com Exposição

4.8. Ensaio de Cisalhamento Direto para o Solo Argiloso

Assim como os ensaios de compressão simples, os ensaios de cisalhamento direto para o solo argiloso foram executados em duas etapas: a primeira com corpos de prova sem exposição às intempéries e a segunda com exposição à chuva controlada (conforme o item 3.4.8.), e sol nos tempos de dois, quatro e cinco meses. Os resultados estão elencados a seguir.

4.4.1. Sem Exposição

Os compósitos estão identificados da seguinte forma:

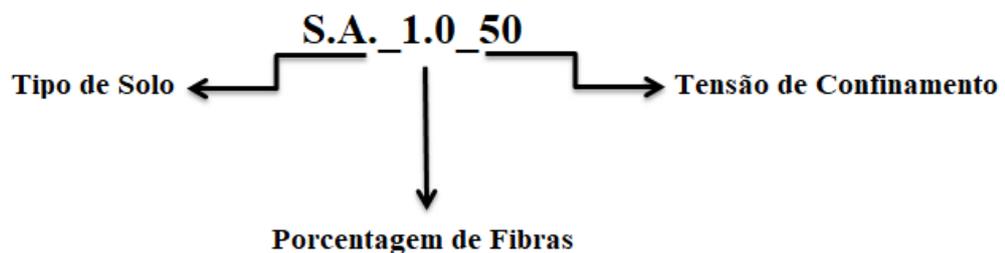


Figura 4.7: Explicação da Legenda dos Compósitos sem Degradação

Na Figura 4.8 os resultados para os ensaios de cisalhamento direto para os compósitos com solo argiloso sem exposição estão dispostos.

Os resultados apontam que a adição de fibras concedeu reforço ao solo na maioria dos casos com exceção do S.A._1.0_50, que a apresentou a mesma resistência que o solo puro (S.A.) de 81,73 kPa de resistência de pico. O compósito S.A._0.5_50 teve uma resistência de pico de 118,00 kPa que foi 43,90% maior que o compósito S.A._50.

O compósito S.A._0.5_100 teve uma resistência de pico de 175,00 kPa, 35,20% maior que o compósito S.A._100 e o compósito S.A._1,0_100 teve uma resistência de pico de 176,00 KPa, 34,97% maior que o compósito S.A._100. O compósito S.A._0.5_200 apresentou a maior resistência de pico, de 351,73 kPa, 61,54% maior que o S.A._200 (217,73 KPa) e o compósito S.A._1,0_200 apresentou um resultado próximo, de 324,40 kPa, sendo 49,00% maior que o S.A._200.

Com estes resultados se faz possível notar que as fibras de açaí funcionam muito bem como reforço para este solo nas porcentagens avaliadas, os resultados se mostram melhores na porcentagem de 0,5% de fibras para todas as tensões de confinamento sendo mais efetivos para as maiores tensões, de 100 e 200 kPa. Os resultados para 1,0% de fibras também são consideráveis, exceto para tensão de 50 kPa, sendo igualmente mais efetivos para as maiores tensões.

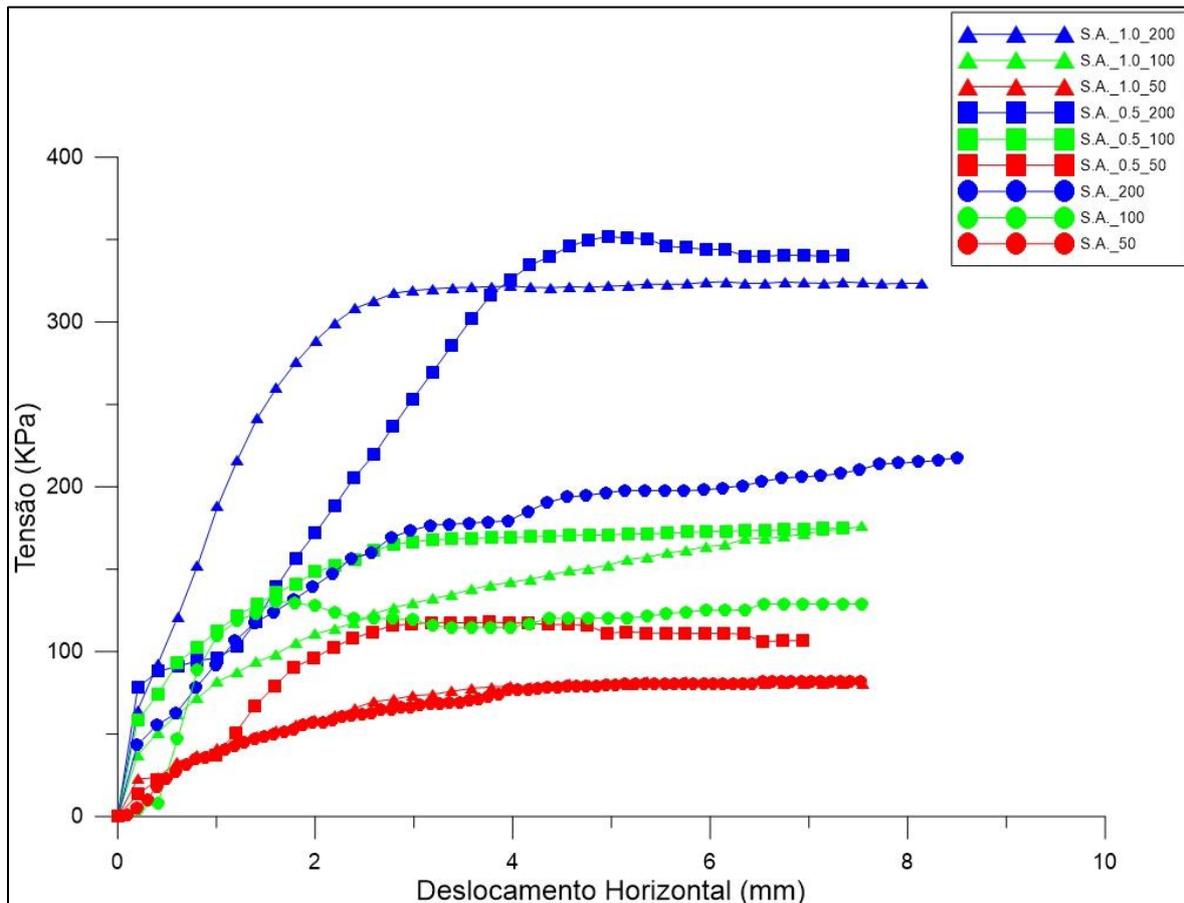


Figura 4.8: Curvas de Tensões de Cisalhamento *versus* Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Argiloso sem Exposição

Na Figura 4.9, tem-se o ajuste da tensão máxima de resistência ao cisalhamento pela tensão confinante, nela se faz possível avaliar a influência da adição das fibras de açaí nos parâmetros de ângulo de atrito e coesão.

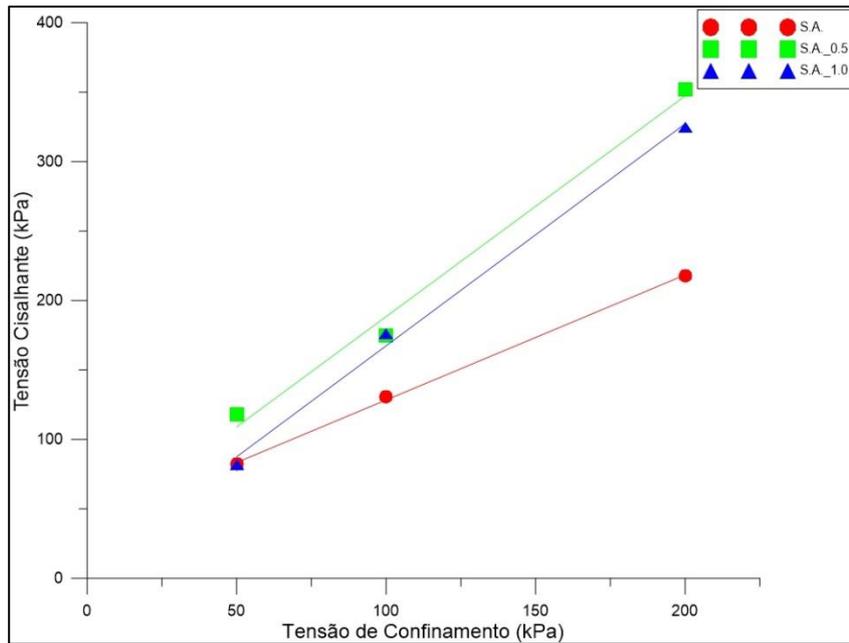


Figura 4.9: Tensão de Confinamento *versus* Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Argiloso sem Exposição

Na tabela 4.2 é possível identificar as diferenças entre os parâmetros de ângulo de atrito e coesão entre o solo argiloso e os compósitos solo-fibra. Percebe-se que a adição de fibras diminuiu a coesão aparente dos compósitos e aumentou o ângulo de atrito, o que pode ser uma explicação é que o melhoramento do ângulo de atrito fez com que o intercepto coesivo decaísse graficamente, mas os compósitos ainda possuem coesão física das argilas. Além disso, têm-se as equações e os parâmetros de ajuste das retas para verificar a conformidade deste ajuste, representado pelo R^2 .

Tabela 4.2: Parâmetros das Retas de Tensão de Confinamento *versus* Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Argiloso sem Exposição

Compósito	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Equação da Reta	R^2
Solo Argiloso (S.A.)	42,00	38,33	$Y = 0,90 * X + 39,33$	0,999
Solo Argiloso + 0,5% de Fibra (S.A._0.5)	57,80	29,63	$Y = 1,59 * X + 29,63$	0,991
Solo Argiloso + 1,0% de Fibra (S.A._1.0)	59,97	7,53	$Y = 1,60 * X + 7,53$	0,996

4.4.2. Com Exposição

Os compósitos expostos ao envelhecimento natural para os ensaios de cisalhamento direto estão identificados da seguinte forma:

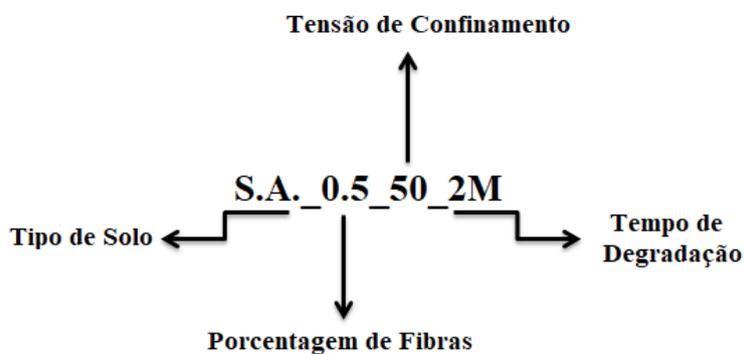
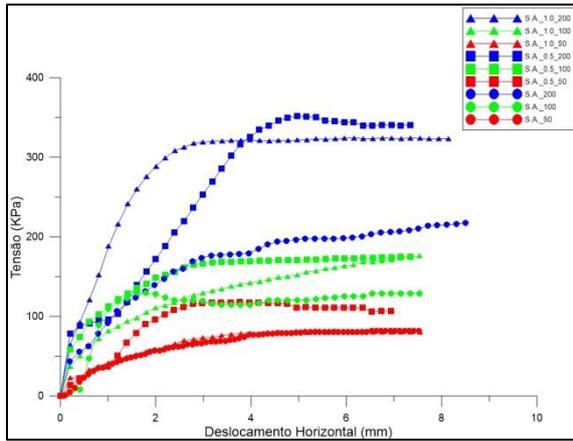


Figura 4.10: Explicação da Legenda dos Compósitos com Degradação

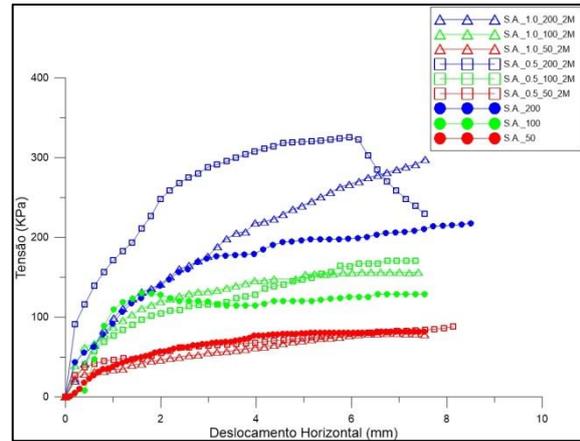
Assim como foi resultado na compressão simples, para o cisalhamento direto os dados apresentam a ação das intempéries que degradam as fibras de açaí, também ocasionando na perda de parte da sua capacidade mecânica resultando a diminuição da resistência à compressão dos compósitos solo-fibra.

Mediante as curvas de Tensões de Cisalhamento *versus* Deslocamento Horizontal apontadas na Figura 4.11 é capaz de se observar a evolução da perda de capacidade mecânica das fibras ao longo dos cinco meses de observação. Os compósitos submetidos à tensões de confinamento de 50 kPa apresentaram resistência inferiores a do solo puro e, conseqüentemente, inferiores que as dos compósitos à mesma tensão. Para as demais tensões de confinamento, todos os compósitos tiveram resistência ao cisalhamento superiores que o solo puro e, coerentemente, inferiores aos compósitos sem degradação.

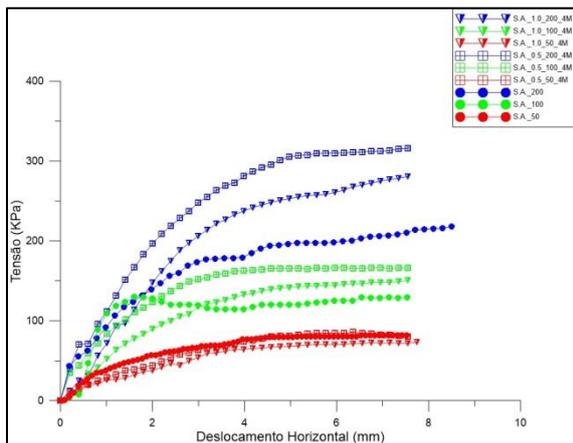
Os valores de resistência de pico para os compósitos estão resumidos na Tabela 4.3, nela é possível notar que a perda de capacidade mecânica conferida pelas fibras varia entre 8,34-32,43%.



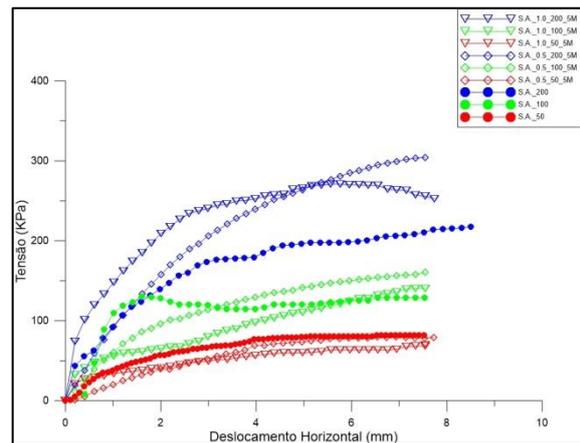
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.11: (a) Curvas de Tensões de Cisalhamento *versus* Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Argiloso sem Exposição; (b) Curvas de Tensões de Cisalhamento *versus* Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Argiloso com Dois Meses de Exposição; (c) Curvas de Tensões de Cisalhamento *versus* Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Argiloso com Quatro Meses de Exposição e (d) Curvas de Tensões de Cisalhamento *versus* Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Argiloso com Cinco Meses de Exposição.

Tabela 4.3: Evolução da Perda de Capacidade Mecânica dos Compósitos

Mistura	Sem Degradação	2 meses	4 meses	5 meses	Perda de Capacidade* (%)
S.A._0,5_50	118,00	88,07	85,00	79,73	32,43
S.A._0,5_100	175,00	170,93	166,47	160,40	8,34
S.A._0,5_200	351,73	325,33	315,73	304,40	13,46
S.A._1,0_50	81,73	79,73	73,07	70,00	14,36
S.A._1,0_100	176,00	156,40	150,33	140,33	20,27
S.A._1,0_200	324,40	298,00	280,73	270,73	16,54

Nota: (*) ao longo dos cinco meses

Nas Figuras 4.12 e 4.13, têm-se, respectivamente para 0,5% e 1,0% de fibras, os ajustes da tensão máxima de resistência ao cisalhamento pela tensão confinante para os tempos de degradação. Nas figuras, é possível avaliar a influência da degradação das fibras de aço nos parâmetros de ângulo de atrito e coesão.

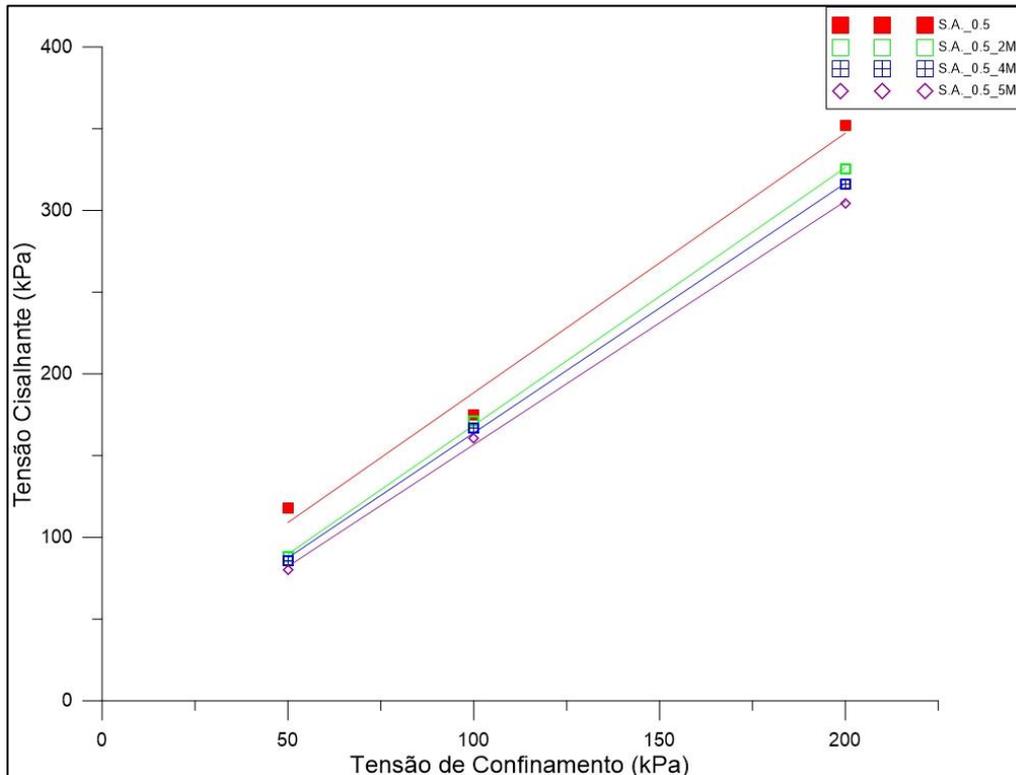


Figura 4.12: Tensão de Confinamento *versus* Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Argiloso + 0,5% de Fibras com Exposição

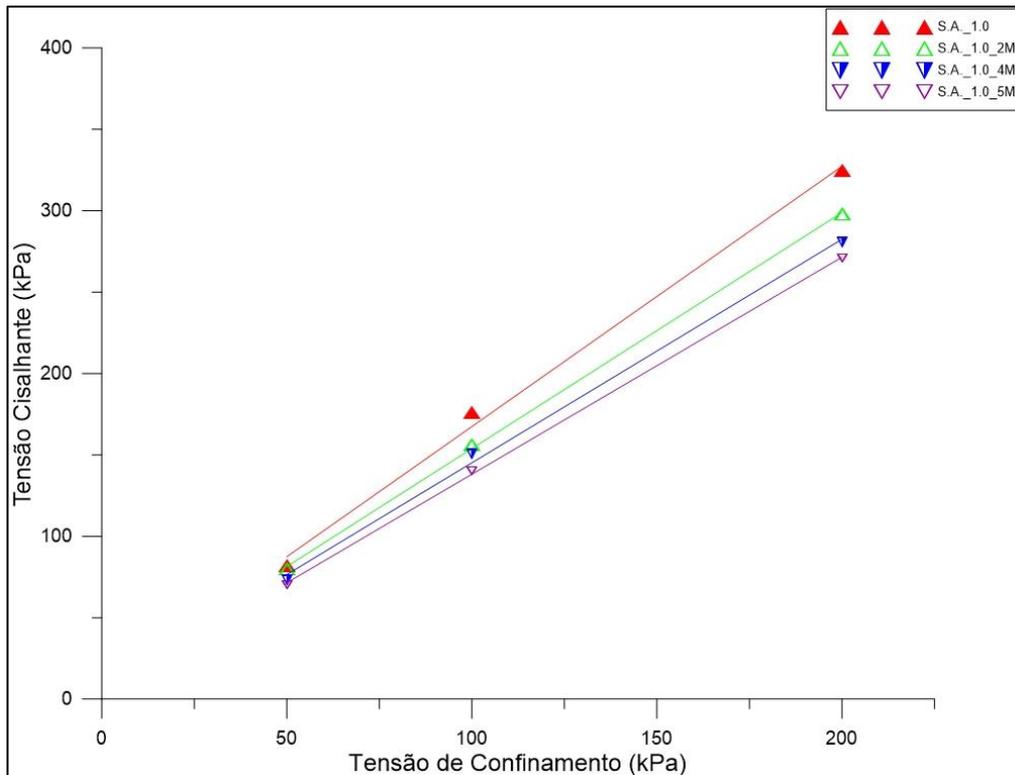


Figura 4.13: Tensão de Confinamento *versus* Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Argiloso + 1,0% de Fibras com Exposição

Na tabela 4.4 é possível identificar as diferenças entre os parâmetros de ângulo de atrito e coesão entre o solo argiloso, os compósitos solo-fibra sem exposição e com exposição, além disso, têm-se as equações e os parâmetros de ajuste das retas para verificar a conformidade deste ajuste, representado pelo R^2 .

. É possível notar que, gradativamente, há uma diminuição do ângulo de atrito e do intercepto coesivo para os compósitos expostos às intempéries justamente causadas pela degradação das fibras e conseqüente perdem de capacidade. A adição de fibras já havia causado uma diminuição gráfica da coesão o que se prolongou pelos compósitos degradados, já em relação ao ângulo de atrito, as duas porcentagens de fibra haviam aumentado este, que decaiu ao longo dos cinco meses de exposição, porém em todos os casos ainda são maiores que o ângulo de atrito do solo puro (S.A.).

Tabela 4.4: Parâmetros das Retas de Tensão de Confinamento *versus* Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Argiloso com Exposição

Compósito	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Equação da Reta	R ²
S.A.	42,00	38,33	$Y = 0,90 * X + 39,33$	0,999
S.A._0.5	57,80	29,63	$Y = 1,59 * X + 29,63$	0,991
S.A._0.5_2M	57,61	10,87	$Y = 1,58 * X + 10,87$	0,999
S.A._0.5_4M	56,86	10,37	$Y = 1,53 * X + 10,37$	0,999
S.A._0.5_5M	56,12	7,73	$Y = 1,50 * X + 7,73$	0,999
S.A._1.0	59,97	9,53	$Y = 1,60 * X + 9,53$	0,996
S.A._1.0_2M	55,40	8,93	$Y = 1,45 * X + 8,93$	0,999
S.A._1.0_4M	53,93	7,87	$Y = 1,37 * X + 7,87$	0,998
S.A._1.0_5M	53,13	4,80	$Y = 1,33 * X + 4,80$	0,999

4.9. Ensaios de Cisalhamento Direto para o Solo Arenoso

Os ensaios de cisalhamento direto para o solo arenoso foram executados para duas porcentagens de densidade relativa da areia: 50% e 75%. A seguir estão denotados os resultados para cada porcentagem.

Os compósitos estão identificados da seguinte forma:

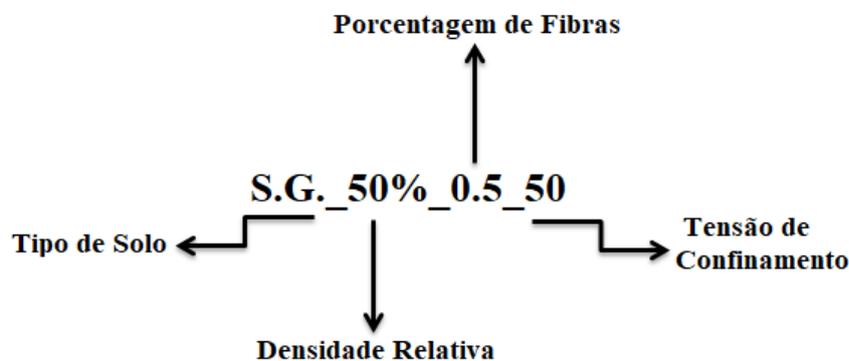


Figura 4.14: Explicação da Legenda dos Compósitos com Solo Arenoso³

³ A sigla S.G. foi adotada para o Solo Arenoso fazendo referência à Solo Granular, pois S.A. foi usada como sigla para Solo Argiloso.

4.5.1. Densidade Relativa de 50%

Os resultados para o solo arenoso com densidade relativa de 50% os compósitos apresentaram leves melhoras nos parâmetros de resistência ao cisalhamento conforme a Figura 4.15, o único que não apresentou melhora foi o S.G._50%_0.5_50, que teve resistência de pico de 81,00 kPa, valor semelhante ao do solo puro (S.G._50%_50) que foi de 81,33 kPa. O compósito S.G._50%_1.0_50 teve resistência de pico de 91,47 kPa, 12,46% maior que a do S.G._50%_50.

Para o confinamento de 100 kPa, o compósito S.G._50%_0.5_100 teve resistência de pico de 167,73 kPa e o compósito S.G._50%_1.0_100 teve resistência de pico de 184,67 kPa, sendo 3,11% e 13,52%, respectivamente, maiores que a do solo puro (S.G._50%_100) de 162,67 kPa. O compósito S.G._50%_0.5_200 teve resistência de pico de 308,13 kPa e o compósito S.G._50%_1.0_200 teve resistência de pico de 315,07 kPa, sendo levemente maiores que a do solo puro (S.G._50%_200) de 304,00 kPa.

Os resultados apontam que as fibras de açaí como reforço de solo arenoso com densidade relativa de 50% funcionam melhor para a porcentagem de 1,0% de fibras e a tensões de confinamento mais baixas, tendo melhor desempenho nas tensões de 50 e 100 kPa. Já os compósitos com 0,5% de fibras de açaí tiveram resultados muito próximos do solo puro, sendo levemente superiores para as tensões de confinamento de 100 e 200 kPa.

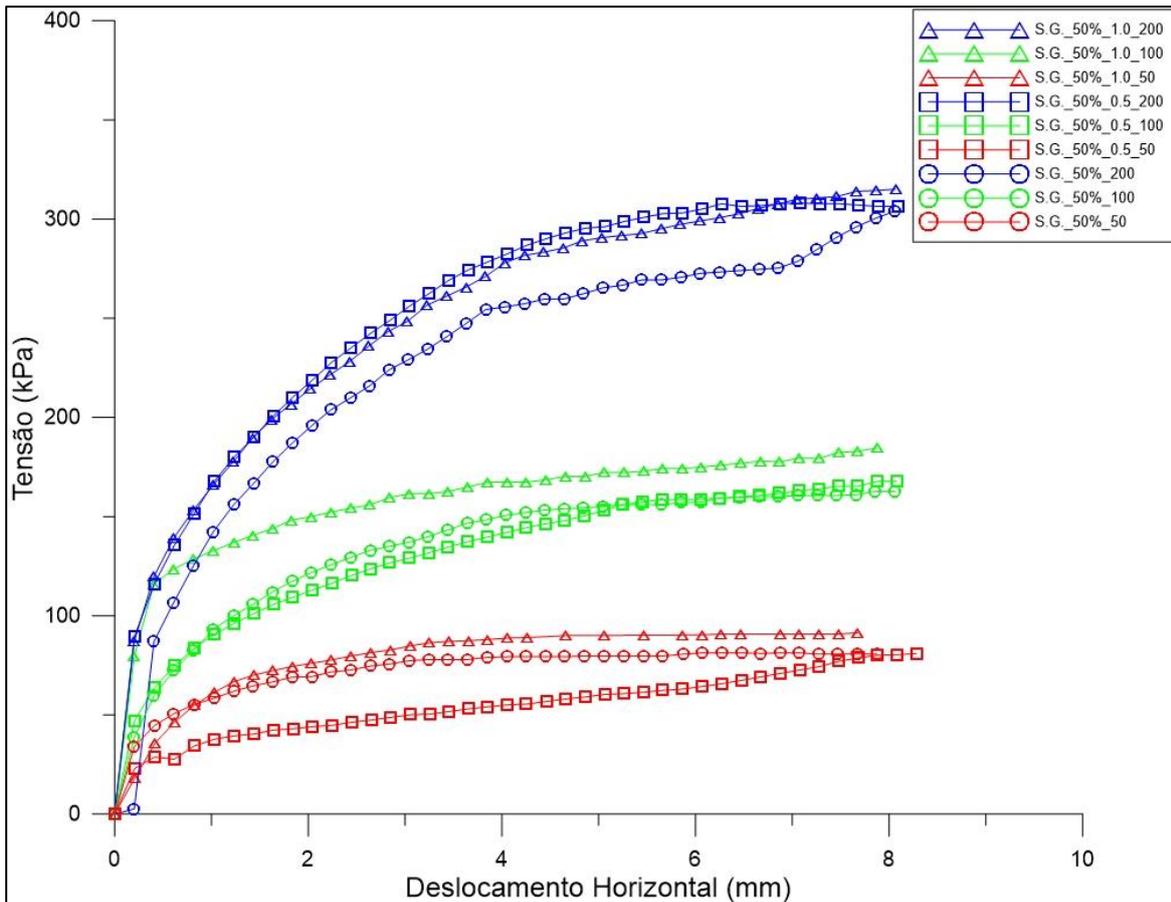


Figura 4.15: Curvas de Tensões de Cisalhamento *versus* Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Arenoso 50%

Na Figura 4.16, tem-se o ajuste da tensão máxima de resistência ao cisalhamento pela tensão confinante, nela se faz possível avaliar a influência da adição das fibras de aço nos parâmetros de ângulo de atrito e coesão para o Solo Arenoso com densidade relativa de 50%.

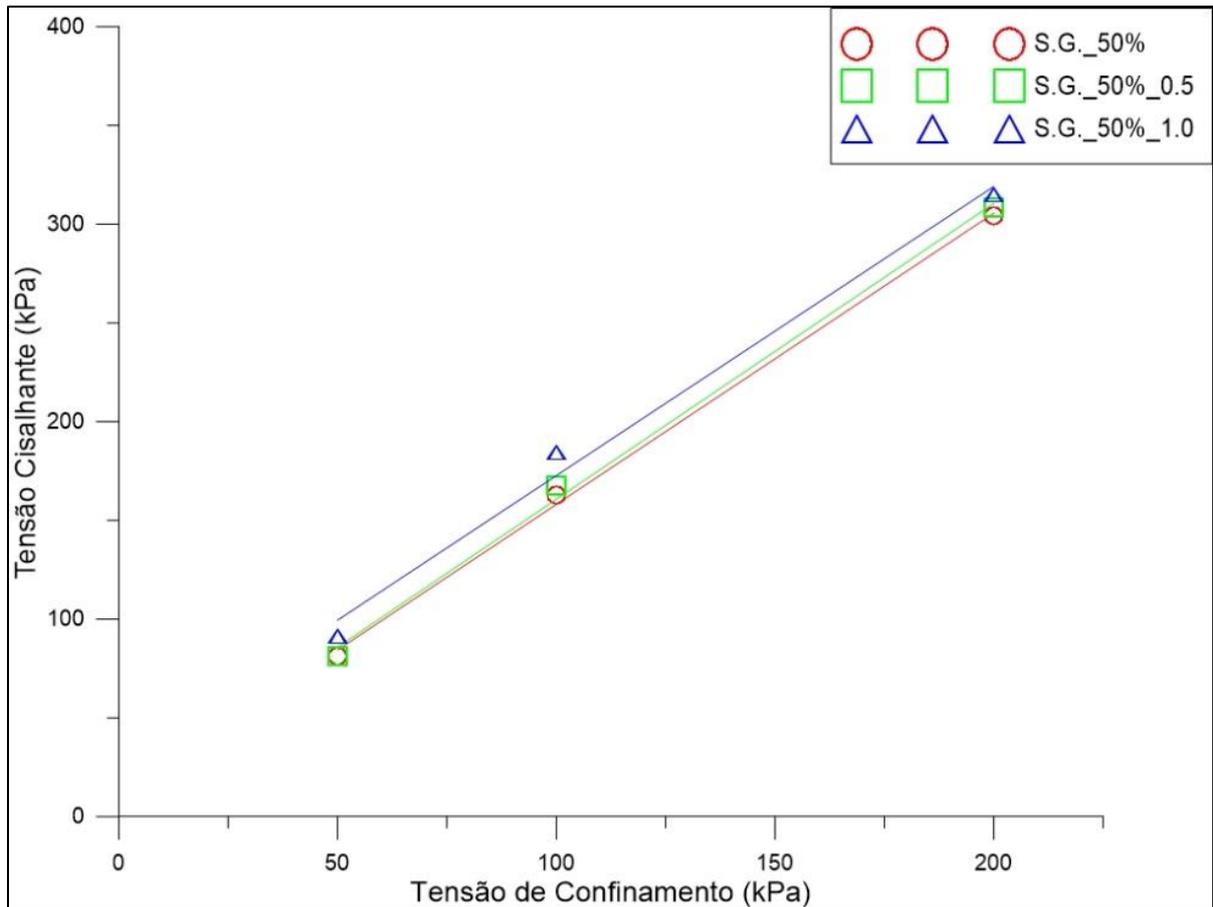


Figura 4.16: Tensão de Confinamento *versus* Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Arenoso 50%

Na Tabela 4.5 é possível identificar as diferenças entre os parâmetros de ângulo de atrito e coesão entre o solo arenoso com densidade relativa de 50% e os compósitos solo-fibra, as equações e os parâmetros de ajuste das retas para verificar a conformidade deste ajuste, representado pelo R^2 . As variações no ângulo de atrito são muito pequenas, podendo considerá-las desprezíveis já o intercepto coesivo sofreu uma melhora significativa para o compósito com 1,0% de fibras de açaí (S.G._50%_1.0) de 26,27 kPa, 46,20% maior que o solo puro (S.G._50%), de 10,67 kPa. O aumento de coesão para o compósito com 0,5% de fibras de açaí (S.G._50%_0.5) pode ser considerado desprezível.

Tabela 4.5: Parâmetros das Retas de Tensão de Confinamento *versus* Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Arenoso 50%

Compósito	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Equação da Reta	R ²
Solo Arenoso 50% (S.G._50%)	55,86	10,67	$Y = 1,47 * X + 10,67$	0,999
Solo Arenoso 50% + 0,5% de Fibra (S.G._50%_0.5)	56,28	10,80	$Y = 1,50 * X + 10,80$	0,997
Solo Arenoso 50% + 1.0% de Fibra (S.G._50%_1.0)	55,66	26,27	$Y = 1,46 * X + 26,27$	0,991

4.5.2. Densidade Relativa de 75%

Os resultados para o solo arenoso com densidade relativa de 75% os compósitos apresentaram leves melhoras nos parâmetros de resistência ao cisalhamento para baixas e médias tensões de confinamento (50 e 100 kPa) conforme apresentado na Figura 4.17. Para a tensão de confinamento de 200 kPa os resultados dos compósitos reforçados com fibras foram inferiores aos do solo puro.

Para o confinamento de 50 kPa, o compósito S.G._75%_0.5_50 teve resistência de pico de 97,73 kPa e o compósito S.G._75%_1.0_50 teve resistência de pico de 95,73 kPa, sendo 11,91% e 9,62%, respectivamente, maiores que a do solo puro (S.G._75%_50) de 87,33 kPa. O compósito S.G._75%_0.5_100 teve resistência de pico de 186,27 kPa e o compósito S.G._75%_1.0_100 teve resistência de pico de 173,07 kPa, sendo 23,63% e 14,87%, respectivamente, maiores que a do solo puro (S.G._75%_100) de 150,67 kPa. O compósito S.G._75%_0.5_200 teve resistência de pico de 266,00 kPa e o compósito S.G._75%_1.0_200 teve resistência de pico de 277,73 kPa, sendo inferiores que a do solo puro (S.G._50%_200) de 301,33 kPa.

Os resultados apontam que as fibras de açaí como reforço de solo arenoso com densidade relativa de 75% funcionam bem para ambas as porcentagens de 0,5% e 1,0% de fibras e a tensões de confinamento mais baixas, tendo melhor desempenho nas tensões de 50 e 100 kPa.

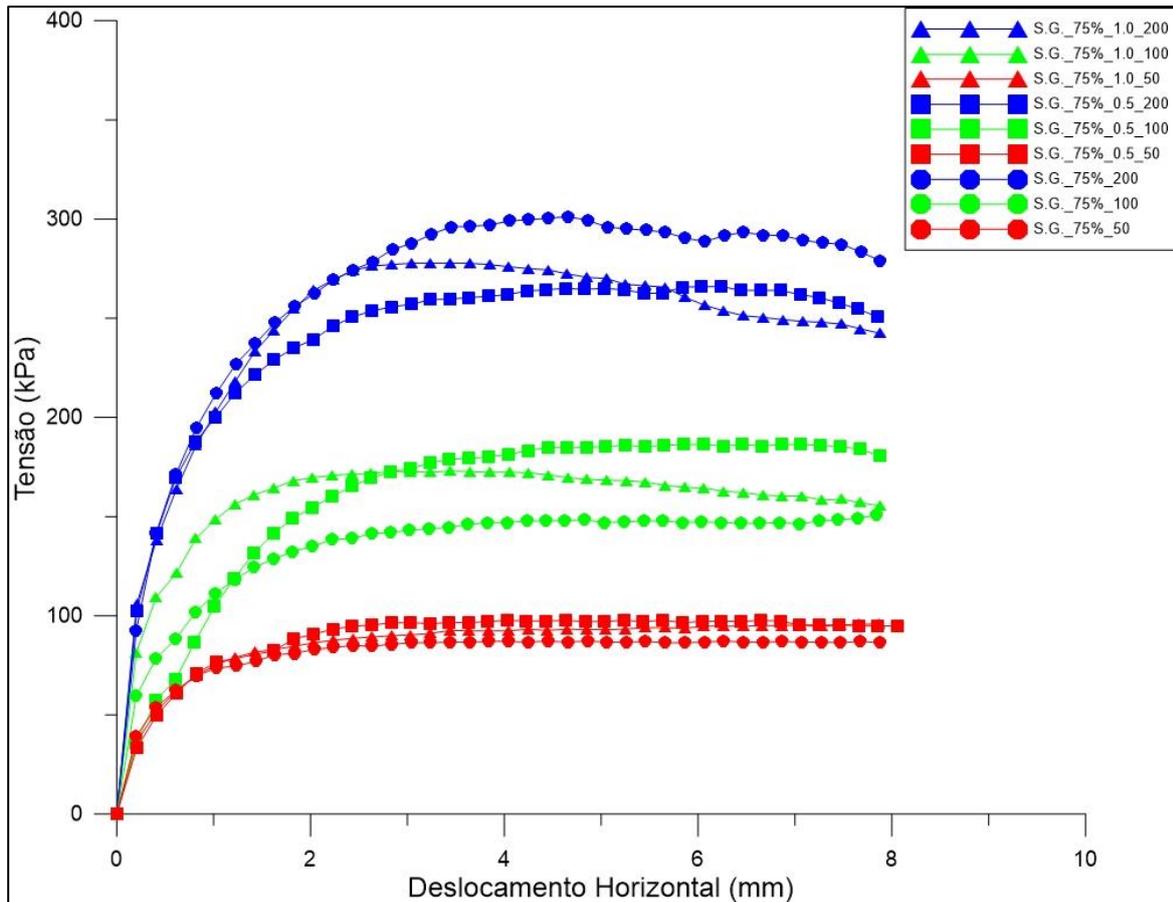


Figura 4.17: Curvas de Tensões de Cisalhamento *versus* Deslocamento Horizontal dos Compósitos com Solo Arenoso 75%

Na Figura 4.18, tem-se o ajuste da tensão máxima de resistência ao cisalhamento pela tensão confinante, nela se faz possível avaliar a influência da adição das fibras de aço nos parâmetros de ângulo de atrito e coesão para o Solo Arenoso com densidade relativa de 75%.

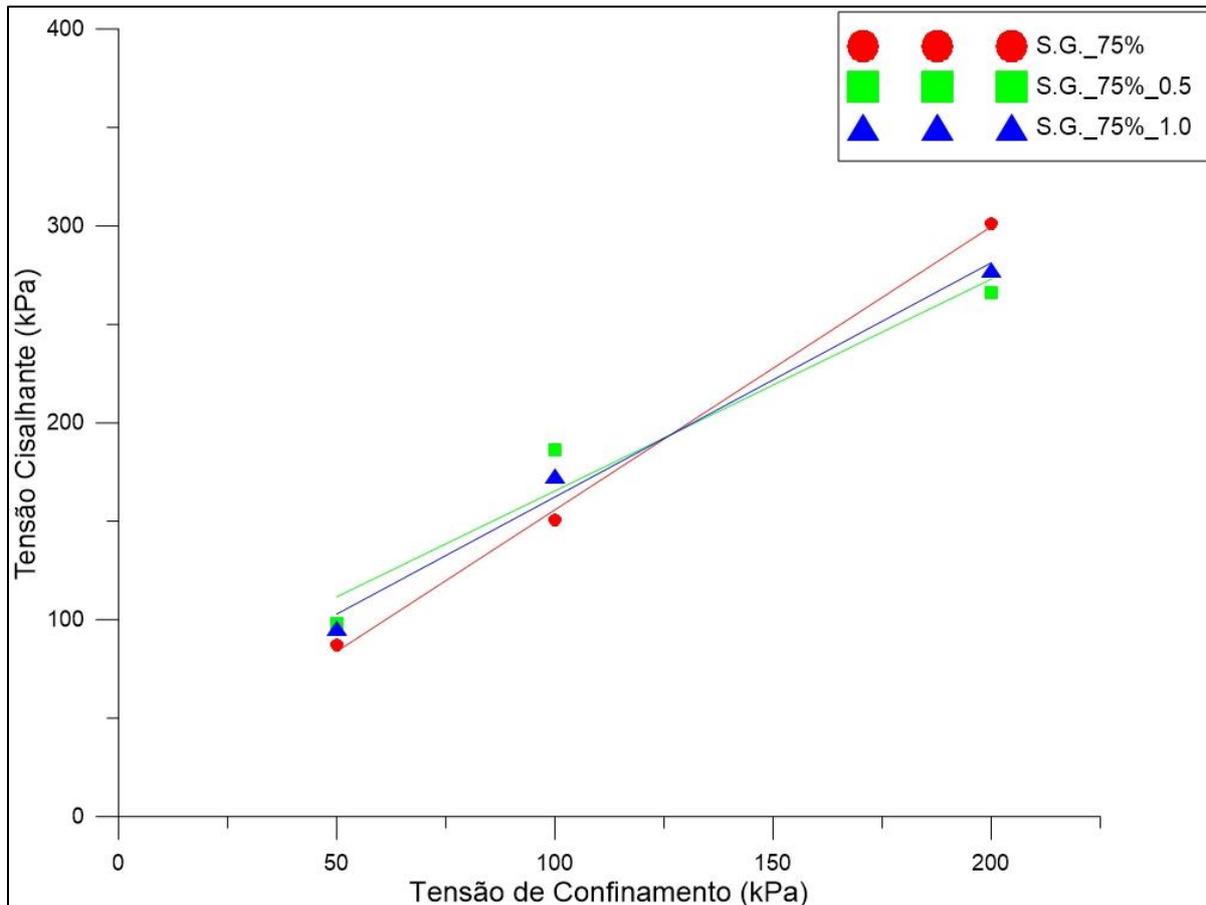


Figura 4.18: Tensão de Confinamento *versus* Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Arenoso 75%

Na Tabela 4.6 é possível identificar as diferenças entre os parâmetros de ângulo de atrito e coesão entre o solo arenoso com densidade de 75% e os compósitos solo-fibra, as equações e os parâmetros de ajuste das retas para verificar a conformidade deste ajuste, representado pelo R^2 . Há um pequeno decaimento no ângulo de atrito para ambas as porcentagens de fibra, já o intercepto coesivo sofreu uma melhora expressiva para ambos os compósitos; o compósito com 0,5% de fibras de açaí (S.G._75%_0.5) teve um aumento de 482,22% em relação ao solo puro (S.G._75%) e o compósito com 1,0% de fibras de açaí (S.G._50%_1.0) teve um aumento de 361,66% em relação ao solo puro.

O melhoramento no intercepto coesivo do solo arenoso com densidade relativa de 75% foi o maior ganho na adição de fibras de açaí para este solo, de forma que as areias apresentam baixa coesão ou até mesmo coesão nula, este ganho foi tão significativo que foi possível retirar os corpos de prova da caixa de cisalhamento sem que eles se partissem, como mostrado na Figura 4.19. Destarte, a depender do tipo de aplicação, este arranjo matriz-reforço pode se apresentar interessante do ponto de vista técnico.

Tabela 4.6: Parâmetros das Retas de Tensão de Confinamento *versus* Tensão Cisalhante dos Compósitos com Solo Arenoso 75%

Compósito	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Equação da Reta	R ²
Solo Arenoso 75% (S.G._75)	55,19	12,00	$Y = 1,44 * X + 12,00$	0,998
Solo Arenoso 75% + 0,5% de Fibra (S.G._0.5_75)	47,08	57,87	$Y = 1,08 * X + 57,87$	0,952
Solo Arenoso 75% + 1.0% de Fibra (S.G._1.0_75)	49,95	43,40	$Y = 1,20 * X + 43,40$	0,989



Figura 4.19: Corpo de Prova de Areia + 1,0% de Fibras

4.10. Comparativo entre os Solos Arenoso e Argiloso

A Figura 4.20 apresenta três gráficos comparando os resultados para argila e areia, a partir dele, é notável que os reforços com fibra de açaí foram mais eficazes para o solo argiloso, conferindo maior ganho de resistência e aumentando o ângulo de atrito, como já

explicado no t3pico 4.4.1. Uma explica33o para isto 33 que as part33culas mais finas de solo, que est33o presentes em maior quantidade no solo argiloso, se aderem 33s fibras destarte criando uma maior interface entre a matriz de solo e o refor33o fibroso.

Ainda assim, os refor33os para o solo arenoso tamb33m se mostraram eficazes em diversos casos sendo mais efetivos para a areia com densidade relativa de 75%, o que pode ser explicado pela diminui33o dos vazios no solo, que leva a um maior contato entre a matriz e o refor33o, ou seja, uma maior interface solo-fibra. Uma evid33ncia deste fen33meno 33 o ganho significativo no intercepto coesivo para estes comp33sitos, que foram os maiores ganhos dentre as duas densidades de areia.

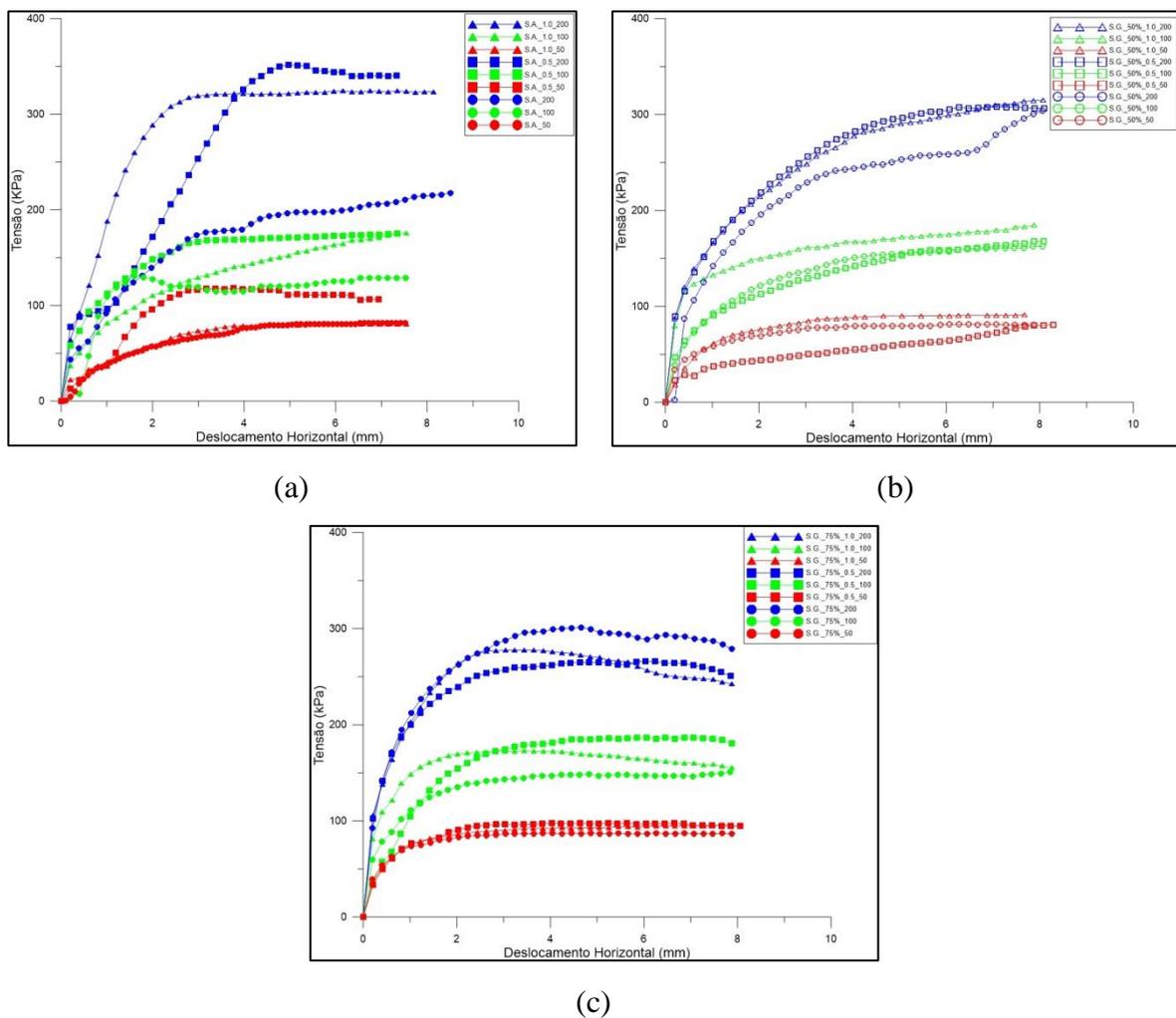


Figura 4.20: (a) Curvas de Tens33es de Cisalhamento *versus* Deslocamento Horizontal dos Comp33sitos com Solo Argiloso sem Exposi33o; (b) Curvas de Tens33es de Cisalhamento *versus* Deslocamento Horizontal dos Comp33sitos com Solo Arenoso 50% e (c) Curvas de Tens33es de Cisalhamento *versus* Deslocamento Horizontal dos Comp33sitos com Solo Arenoso 75%.

4.11. Visualização em Lupa Microscópica

Foram realizadas algumas imagens em uma Lupa Eletrônica modelo SLQ-M-003 para visualizar a interface entre o solo argiloso e as fibras de açaí, nas imagens fica evidente a aderência das partículas finas do solo nas fibras. Para estas imagens foram utilizadas apenas as lentes 4x e 10x da lupa, sem o uso de zoom digital.

A Figura 4.21 demonstra a disposição aleatória das fibras na matriz de solo argiloso, nesta imagem é possível notar a presença de alguns óxidos de ferro, característicos de um solo laterítico.



Figura 4.21: Disposição Aleatória das Fibras sobre o Solo. Imagem com zoom de 4x.

Na Figura 4.22 fica evidente a agregação das partículas finas de solo sobre a superfície da fibra, onde se é possível ver um recobrimento quase total da fibra de açaí.



Figura 4.22: Fibra Recoberta pelos Finos do Solo. Imagem com zoom de 4x.

A Figura 4.23 apresenta um compósito solo-fibra na presença de água, é possível perceber a capacidade de retenção de água pelas fibras, as quais tem água aderida a sua superfície.

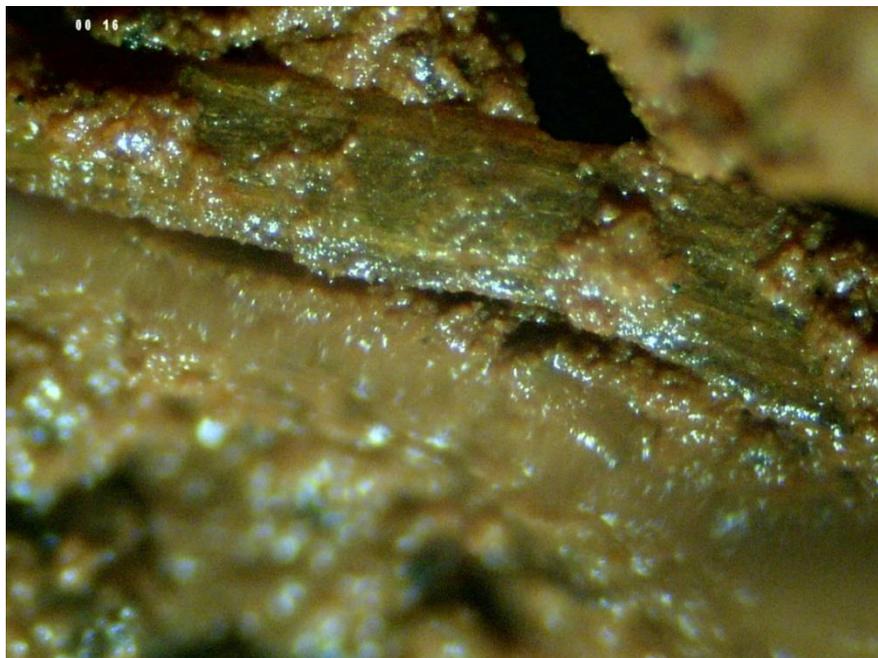


Figura 4.23: Fibras Recobertas por Água. Imagem com zoom de 10x.

Na Figura 4.24 há um indicativo descascamento da fibra, já que esta passou pelo processo de degradação de cinco meses, com esta imagem pode se conjecturar que as fibras de açaí degradam de fora para dentro. Para se ter uma melhor resposta a respeito disso o ideal seria realizar uma Microscopia Eletrônica de Varredura.

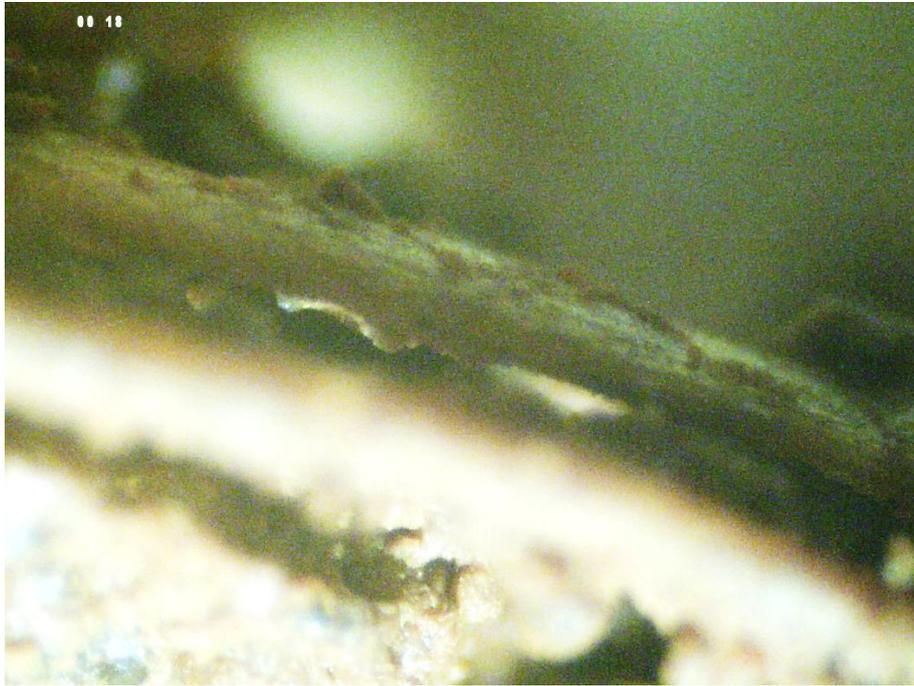


Figura 4.24: Indícios de Degradação das Fibras. Imagem com zoom de 4x.

Na Figura 4.25 pode-se evidenciar uma fissura na fibra, também para um compósito com exposição de cinco meses.

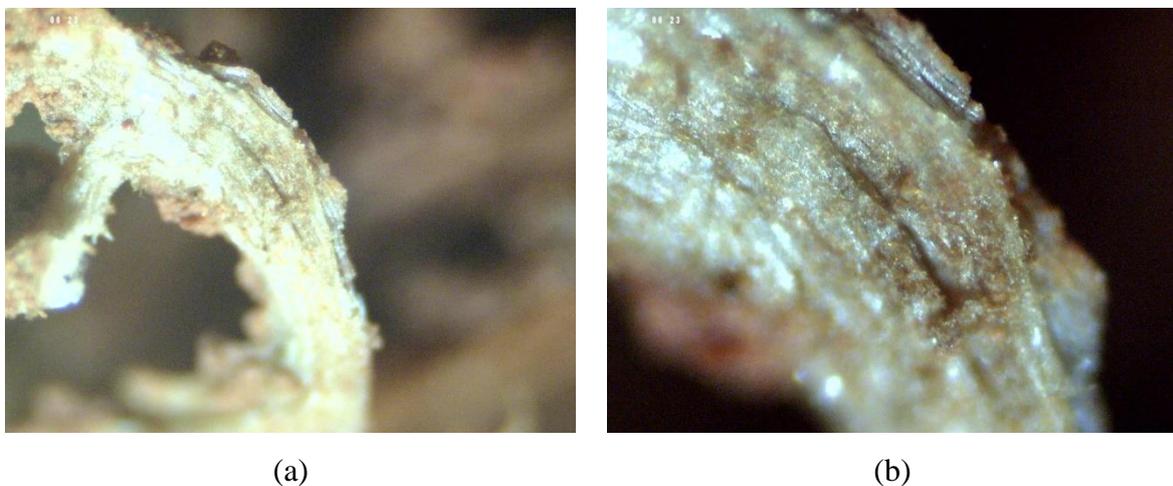


Figura 4.25: Fissura na Fibra. (a) Imagem com zoom de 4x e (b) Imagem com zoom de 10x.

5. CONCLUSÕES

A motivação principal deste trabalho consistiu na avaliação do comportamento mecânico e da durabilidade de solos reforçados com fibras de açai (*Euterpe oleracea*) aleatoriamente distribuídas, para um solo arenoso com duas porcentagens de densidade relativa e para um solo argiloso com avaliação de compósitos submetidos ao envelhecimento natural por exposição às condições ambientais diversas por cinco meses.

O programa experimental consistiu na realização de ensaios de compressão simples e cisalhamento direto em amostras de solo argiloso laterítico, solo argiloso laterítico com duas porcentagens de fibra (0,5% e 1,0%) no tempo zero (de controle) e em compósitos expostos aos agentes do ambiente externo por até cinco meses, além de ensaios de cisalhamento direto em solo arenoso e em solo arenoso com duas porcentagens de fibra em duas porcentagens de densidade relativa.

Abaixo estão dispostas as conclusões que caracterizam a relevância e originalidade da pesquisa com base nos resultados apresentados e analisados nos itens anteriores.

- Os reforços com fibra de açai foram significativos, tendo efeito direto sobre a resistência de pico e pós-pico para situações não confinadas e sobre a resistência ao cisalhamento. Ademais, teve influência significativa nos parâmetros de ângulo de atrito e no intercepto coesivo dos solos; Estes aumentos nos parâmetros dependem das características dos solos estudados, como foi evidenciado nos comparativos entre argila e areia, dependem do teor de fibra inserido, da densidade relativa para o caso de solo arenoso, bem como a influência do tempo, por conta da degradação;
- O reforço com fibras de açai para o solo argiloso apresentaram melhores resultados para a porcentagem de fibras de 0,5% e mais acentuado para as tensões de confinamento de 100 e 200 kPa;
- Comparativamente o solo argiloso teve maior ganho de resistência ao cisalhamento que o solo arenoso enquanto que este teve maior ganho no intercepto coesivo;
- Contrastando as densidades relativas para os compósitos com areia foi possível perceber que os compósitos de solo arenoso com 50% de densidade relativa apresentaram melhores resultados para as tensões de 100 e 200 kPa e para a porcentagem de fibras de 1,0%. Para os compósitos

solo-fibras com densidade de 75% o ganho foi maior para tensões de confinamento de 50 e 100 kPa e para a porcentagem de fibras de 0,5%. Além disto, ambas tiveram aumento no intercepto coesivo, sendo bem mais significativo para os compósitos solo-fibra com densidade relativa de 75%;

- A exposição das fibras de açai aos agentes climáticos e ao tempo resultou na perda das propriedades mecânicas das fibras e consequente perda de resistência para os compósitos solo-fibra. Porém, as perdas de resistência não foram muito vigorosas, com perdas máximas de 30%;
- Há indícios de que as fibras de açai degradam de fora para dentro, de acordo com as imagens feitas com a lupa microscópica.

O estudo de reforço de solos com fibras de açai (*Euterpe oleracea*) se mostrou bastante positivo, onde os resultados apresentaram um real melhoramento dos dois tipos de solo analisados, do ponto de vista geotécnico. Para o solo arenoso, fica evidenciado que o melhor arranjo de aplicação seria para densidade relativa de 75% com a porcentagem de 0,5% de fibras a tensões de confinamento mais baixas, entre 50 e 100 kPa, que obteve ganhos de resistência ao cisalhamento de até 24% e um aumento significativo no intercepto coesivo.

Para o solo argiloso, é demonstrado que o melhor arranjo foi com a porcentagem de fibras de 0,5% a tensões de confinamento mais elevadas, de 100 e 200 kPa. Para os ensaios com solo argiloso foram analisados também o tempo de degradação das fibras onde se conjectura que a partir de quatro meses de exposição a degradação já não surte efeitos muito significativos, assim como foi explicado por Silveira (2018);

A análise geral dos resultados indica que as fibras de açai podem ser usadas em obras onde o caso crítico para a estabilização ou funcionalidade da obra é imediatamente após a construção, como estabilização de taludes, aterros temporários, estradas de acesso construído sobre argila mole saturada, onde a função primária de qualquer reforço é permitir que a estrutura seja construída. Para estes casos as fibras de açai podem ser usadas desde que conhecidas à variação temporal de seu comportamento mecânico e/ou um tratamento adequado for aplicado para melhorar suas características.

Para casos onde a estabilização precisa ser duradoura, os resultados existentes deixam em aberto estas possibilidades, sendo inconclusivos, mas que podem ser melhor avaliados, de acordo com as sugestões para trabalhos futuros a seguir.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento de qualquer trabalho de pesquisa sempre se procura aprofundar um determinado assunto, buscando respostas para diversas perguntas, principalmente quando se tratam de materiais pouco explorados, como é o caso das fibras de açai. Porém, o desenvolvimento de pesquisas experimentais sempre tem mudanças de percepção ou mesmo novas alternativas que até então não haviam surgido. Muitas possibilidades acabam sendo deixadas para trás por não terem sido contempladas no cronograma inicial, por motivos de falha ou pela falta de tempo.

Tendo isto em mente, abaixo seguem algumas sugestões para o desenvolvimento e aprimoramento de pesquisas relacionadas ao uso de fibras de açai e de fibras vegetais no geral:

- Realizar ensaios mais complexos para as fibras de açai, como triaxiais e ensaios de placa;
- Avaliar maiores tempos de exposição para as fibras de açai;
- Avaliar a perda de massa das fibras de açai para os tempos de exposição;
- Realizar o tratamento superficial das fibras de açai com para avaliar uma possível diminuição das perdas mecânicas;
- Realizar análises microbiológicas após cada intervalo de tempo de exposição às intempéries;
- Avaliar a influência do envelhecimento natural das fibras vegetais em diferentes tipos de solos;
- Desenvolver um modelo de previsão do comportamento mecânico e da durabilidade dos compósitos solo-fibras vegetais visando a simulação numérica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL WAHAB, R.; AL-QURNA, H. (1995). *Fiber reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures*. In: Proceedings of the GEOSYNTHETICS'95 CONFERENCE. [S.l.: s.n.], v. 2, p. 433–466.
- AL WAHAB, R.; EL-KEDRAH, M. (1995). *Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay*. In: ASCE. Geoenvironment 2000: Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics. [S.l.], p. 791–805.
- ANDERSLAND, O.; KATTAK, A. (1979). *Shear strength of kaolinite/fiber soil mixtures*. In: International Conference on Soil Reinforcement. Paris: [s.n.], p. 11–16.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984-b). *Solo – Determinação do limite de liquidez: NBR 6459*. Rio de Janeiro, 6p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984-d). *Grãos de Solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica: NBR 6508*. Rio de Janeiro, 8p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984-c). *Solo – Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180*. Rio de Janeiro, 4p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984-a). *Solo – Análise granulométrica: NBR 7181*. Rio de Janeiro, 13p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986-a). *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457*. Rio de Janeiro.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986-b). *Solo - Ensaio de Compactação: NBR 7182*. Rio de Janeiro, 10p.

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017). *Solo – Índice de Suporte Califórnia: NBR 9895*. Rio de Janeiro, 14p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2011). *ASTM D3080/ASTM D3080M-11: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. Pennsylvania, USA, 9 p.
- BALAN, K. (1995). *Studies on Engineering Behaviour and Uses of Geotextiles with Natural Fibres*. Tese (Doutorado) - Indian Institute of Technology, Delhi, Índia.
- BERNARDINA, F.P.D. (2019). *Influência da Degradação de Fibras no Comportamento Mecânico de Solos Reforçados*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- BERNUCCI, L.L.B. (1987). *Expansão e Contração de Solos Tropicais Compactados e suas Aplicações às Obras Viárias, Classificação de Solos Tropicais com Base na Expansão e Contração*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 200p.
- BUDINSKI, K. (1996). *Engineering materials, properties and selection*. 5. ed. New Jersey: Prentice Hall International, 653 p.
- BUENO, B.d.S. *et. al.* (1996). *Soil fiber reinforcement: basic understanding*. In: International Symposium on Environmental Geotechnology. [S.l.: s.n.], v. 3, p. 878–884.
- CANEVAROLO, S. V. (2006). *Ciência dos Polímeros*. [S.l.]: Artliber Editora Ltda.
- CARVALHO, R.; FANGUEIRO, R.; NEVES, J. (2014). *Durabilidade de fibras naturais para geotecnia*. *Materiais de Construção*, p. 237.
- CASAGRANDE, M.D.T. (2001). *Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais*. Dissertação (Mestrado) — PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.

- CASAGRANDE, M.D.T. (2005). *Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- CONSOLI, N.C.; ULBRICH, L.A.; PRIETTO, P.D.M. (1997). *Engineering behavior of randomly distributed fiber-reinforced cement soil*. In: International Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, 1997, Rio de Janeiro. Proceedings... Rotterdam: A.A. Balkema, p.481-486.
- CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; ULBRICH, L.A. (1999). *The behavior of a fiber-reinforced cemented soil*. Ground Improvement, London, v. 3, n. 1, p. 21–30.
- CONSOLI, N.C.; MONTARDO, J.P.; PRIETTO, P.D.M.; PASA, G. (2002). *Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York, v.128, n.6, p. 462-472.
- CONSOLI, N.C. *et. al.* (2004). *Effect of material properties on the behaviour of sand—cement—fibre composites*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, Thomas Telford Ltd, v. 8, n. 2, p. 77–90.
- CONSOLI, N.C. *et. al.* (2009). *Effect of relative density on plate loading tests on fibre-reinforced sand*. Géotechnique, Thomas Telford Ltd, v. 59, n. 5, p. 471–476.
- CONSOLI, N.C.; CASAGRANDE, M.D.T.; COOP, M.R. (2007). *Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains*. Géotechnique, Thomas Telford Ltd, v. 57, n. 9, p. 751–756.
- CURCIO, D. S. (2008). *Comportamento hidromecânico de compósito solo-fibra*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFRJ, Rio de Janeiro.
- DAS, B. M. (2002). *Soil Mechanics Laboratory Manual*. 6. ed. Oxford: Oxford University Press, 341 p.

- DEFOIRDT, N. *et. al.* (2010). *Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre*. Composites Part A: applied science and manufacturing, Elsevier, v. 41, n. 5, p. 588–595.
- DIAB, A.A. *et. al.* (2018). *Effect of compaction method on the undrained strength of fiber-reinforced clay*. Soils and Foundations.
- DIAMBRA, A. *et. al.* (2010). *Fibre reinforced sands: experiments and modelling*. Geotextiles and geomembranes, Elsevier, v. 28, n. 3, p. 238–250.
- DITTEMBER, D. B., GANGARAO, H. V. S. (2012). *Critical Review of Recent Publications on Use of Natural Composites in Infrastructure*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 43(8), p. 1419-1429.
- DONATO, M.; FOPPA, D.; CERATTI, J. A. P.; CONSOLI, N. C. (2004). *Fibras de polipropileno como reforço para materiais geotécnicos*. Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, v.27, n.2, p. 161-179.
- EMBRAPA (2012). *Tecnologias para Inovação nas Cadeias Euterpe*. Brasília.
- FATANI, M.; BAUER, G.; AL-JOULANI, N. (1991). *Reinforcing soil with aligned and randomly oriented metallic fibers*. Geotechnical Testing Journal, ASTM International, v. 14, n. 1, p. 78–87.
- FESTUGATO, L. (2008). *Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- FEUERHARMEL, M. (2000). *Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Porto Alegre.

- FIDELIS, M. E. A. *et. al.* (2013). *The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers*. Journal of Materials Research and Technology, Elsevier, v. 2, n. 2, p. 149–157.
- FIDELIS, M. (2014). *Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE.
- GEHLEN, L.R. (2014). *Efeito da Utilização de Fibras Lignocelulósicas (Açaí e Curauá) em Compósitos com Matriz de Resina Poliéster Insaturado*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba.
- GHAVAMI, K., TOLEDO FILHO, R. D., BARBOSA, N.P. (1999). *Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres*. Cement and Concrete Composites 21.
- GIRARDELLO, V. (2010). *Ensaio de placa em areias não saturadas reforçada com fibras*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- GRAY, D.H.; AL-REFAI, T. (1986). *Behaviour of fabric versus fibre-reinforced sand*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v. 112, n. 8, p. 804–826.
- GRAY, D.H.; OHASHI, H. (1983). *Mechanics of fiber reinforcement in sand*. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, v. 109, n. 3, p. 335–353.
- GRAY, D.H.; MAHER, M.H. (1989). *Admixture stabilization of sands with random fibers*. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12., 1989, Rio de Janeiro, Proceedings... Rotterdam: A.A. Balkema, v.2, p.1363-1366.
- HANNANT, L. (1994). *Polymers and polymers composities*. Construction materials: their nature and behavior. 2ed., JM Illston/E & FN Spon, p. 359–403.

- HEAD, K.H. (1994). *Manual of Soil Laboratory Testing – Volume 2*. John Wiley & Sons, New York, USA, 440 p.
- HEINECK, K.S. (2002). *Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras impermeáveis horizontais*. Tese (Doutorado) — PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- HEINECK, K.S., CONSOLI, N.C., BICA, A., CASAGRANDE, M.D.T. (2003). *Comportamento de Solos Micro-Reforçados a Pequeníssimas e Grandes Deformações Cisalhantes*. Solos e Rochas. São Paulo - SP, ABMS/ABGE, v.26, n.1, p.3-17.
- HEJAZI, S. *et. al.* (2012). *A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers*. Construction and building materials, Elsevier, v. 30, p. 100–116.
- HIGGINS, R.A. (1994). *Properties of engineering materials*. London: E. Arnold, 2ed., 495p.
- HOARE, D. (1979). *Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibers*. In: Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement. [S.l.: s.n.], v.1, p. 47–52.
- IBRAIM, E. *et. al.* (2012). *Assessment of laboratory sample preparation for fibre reinforced sands*. Geotextiles and Geomembranes, Elsevier, v. 34, p. 69–79.
- IBRAIM, E. *et. al.* (2010). *Static liquefaction of fibre reinforced sand under monotonic loading*. Geotextiles and Geomembranes, Elsevier, v. 28, n. 4, p. 374–385.
- ILLSTON, J.M. (1994). *Construction materials; their nature and behavior*. 2ed. London: E & FN Spon, 518p.
- JEWELL, R.A.; WROTH, C.P. (1987). *Direct shear tests on reinforced sand*. Géotechnique, London, v.37, n.1, p.53-68.

- JOHN, M.J.; ANANDJIWALA, R.D. (2008). *Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites*. Polymer composites, Wiley Online Library, v. 29, n. 2, p. 187–207.
- JOHNSTON, C. (1994). *Advances in Concrete Technology*. [S.l.]: Ottawa: National Resources Canada) Fiber-Reinforced Cement and Concrete.
- JOY, S. et. al. (2011). *Biodegradation of coir geotextile in tropical climatic conditions*. In: Proceedings of the golden jubilee Indian geotechnical conference, Kochi, India. [S.l.: s.n.], p. 604–606.
- KANIRAJ, S. R.; HAVANAGI, V. G. (2001). *Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, American Society of Civil Engineers, v. 127, n. 7, p. 574–584.
- LEOCÁDIO, G. (2005). *Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.
- LIMA JÚNIOR, U.M. (2007). *Fibras da Semente do Açaizeiro (Euterpe Oleracea Mart.): Avaliação Quanto ao Uso como Reforço de Compósitos Fibrocimentícios*. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- LIRER, S.; FLORA, A.; CONSOLI, N.C. (2012). *Experimental evidences of the effect of fibres in reinforcing a sandy gravel*. Geotechnical and Geological Engineering, Springer, v. 30, n. 1, p. 75–83.
- LOPES, M.M.; CASAGRANDE, M.D.T. (2018). *Análise do Comportamento Mecânico de Solo Reforçado com Fibras de Açaí (Euterpe oleracea)*. Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia, PET, v. 2, p. 21-26.
- MAHER, M.H.; GRAY, D. (1990). *Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v. 116, n. 11, p. 1661–1677.

- MAHER, M.H.; HO, Y.C. (1993). *Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads*. Geotechnical Testing Journal, Philadelphia, v.16, n.3, p.330-338.
- MAHER, M.H.; HO, Y. (1994). *Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite*. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, v. 120, n. 8, p. 1381–1393.
- MARANHO, Á.S.; PAIVA, A.V de. (2012). *Produção de Mudas de Physocalymma scaberrium em Substratos Compostos por Diferentes Porcentagens de Resíduo Orgânico de Açaí*. Revista Floresta, v.42, n.2, p.399-408.
- MARTINS, M.A.; MATTOSO, L.H.; PESSOA, J.D.C. (2005). *Comportamento Térmico da Fibra de Açaí*. São Carlos: EMBRAPA.
- MARTINS, M.A; MATTOSO, L.H.; PESSOA, J.D.C. (2009). *Comportamento térmico e caracterização morfológica das fibras de mesocarpo e caroço do açaí (Euterpe oleracea Mart.)* Revista Brasileira Fruticultura, v.31, n.4, p.1150-1157.
- MARTINS, A.P.S. (2014). *Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal*. Tese (Doutorado) – UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro.
- MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.; AL-HASANI, M. (1978). *Effect of inclusion properties on the behaviour of sand*. Geotechnique, Thomas Telford Ltd, v. 28, n. 3, p. 327–346.
- MCGOWN, A. *et. al.* (1985). *Soil strengthening using randomly distributed mesh elements*. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. [S.l.: s.n.], v. 11, p. 1735–1738.
- MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z.; HYTIRIS, N. MERCER, F.B. (1988). *Soil strengthening using randomly distributed mesh elements*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 11., São Francisco, Proceedings... v.3, p.1735-1738.

- MELO FILHO, J. A. (2012). *Durabilidade Química e Térmica e Comportamento Mecânico de Compósitos de Alto Desempenho Reforçados com Fibras de Sisal*. Tese (Doutorado) — PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- MESQUITA, A.L. (2013). *Estudo dos processos de extração e caracterização de fibras do fruto do açaí (Euterpe oleracea MART.) da Amazônia para produção de ecopainel de partículas de média densidade*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, PRODERNA/ITEC, da Universidade Federal do Pará, Pará.
- MICHALOWSKI, R. L.; ČERMÁK, J. (2003). *Triaxial compression of sand reinforced with fibers*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, American Society of Civil Engineers, v. 129, n. 2, p. 125–136.
- MIRZABABAEI, M. et. al. (2013). *Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 139, n. 3, p. 483–493.
- MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. (2005). *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. [S.l.]: CRC press.
- MONTARDO, J.P. (1999). *Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes*. Dissertação (Mestrado) — CPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- MONTARDO, J.P.; CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M. (2002). *Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes*. Revista Solos e Rochas, São Paulo, v. 24, n. 3, p. 191–209.
- MOREL, J.; GOURC, J. (1997). *Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements*. Geosynthetics International, Thomas Telford Ltd, v. 4, n. 5, p. 481–508.
- MUKKULATH, G.; THAMPI, S.G. (2012). *Biodegradation of coir geotextiles attached media in aerobic biological wastewater treatment*. J. Bioremed Biodeg. vol.3, nº.11.

- MWASHA, A.; PETERSEN, A. (2010). *Thinking outside the box: the time dependent behavior of a reinforced embankment on soft soil*. *Materials & Design*. vol.31, n°.5, pp.2360-2367.
- NATARAJ, M.; ADDULA, H.; MCMANIS, K. (1996). *Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils*. In: *International Symposium on Environmental Geotechnology*. [S.l.: s.n.], v. 3, p. 826–835.
- OLIVEIRA, M.S.P.; NETO, J.T.F.; PENA, R.S. (2007). *Açaí: Técnicas de Cultivo e Processamento*. In: *7º Flor Pará – Semana da Fruticultura, Floricultura e Agroindústria*, Belém, Pará.
- OTOKO, G.; EPHRIAM, M.; IKEGBOMA, A. (2014). *Reinforcement of a lateritic soil using oil palm fruit fibre*. *International Journal Of Engineering and Technology Research*, v. 2, n. 6, p. 1–5.
- PALACIOS, M. (2012). *Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de Polipropileno Submetida a Ensaio Triaxiais de Extensão*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PALMEIRA, E.M. (1992). *Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos*. In: SÃO PAULO: Associação brasileira de Geossintéticos e Engenharia Geotécnica. 1º Simpósio Brasileiro Sobre Geossintéticos - Geossintéticos'92. p. 1–20. Brasília.
- PALMEIRA, E.M. (1993). *Curso de Estabilização e Reforço de Solos: Introdução à Utilização de Geossintéticos*. Publicação No. GAP002B/93 2a. Edição, Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília. Brasília.
- PERISSOTTO, D. (2005). *Estudo Comparativo das Propriedades Químicas de Polpas Kraft Convencionais e MCC de Eucalipto*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- PESSOA, F. (2004). *Análises dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília-DF.

- PIEROZAN, R.C. (2018). *Estudo da Resistência de Interface de Tiras Metálicas e Poliméricas em Diferentes Solos*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília. Programa de Pós Graduação em Geotecnia. Brasília.
- PLÉ, O.; LÊ, H.; GOTTELAND, P. (2009). *A mechanical approach for fibre-reinforced clay in landfill caps cover application*. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Taylor & Francis, v. 13, n. 1, p. 53–69.
- QU, J.; SUN, Z. (2016). *Strength behavior of shanghai clayey soil reinforced with wheat straw fibers*. *Geotechnical and Geological Engineering*, Springer, v. 34, n. 2, p. 515–527.
- RANJAN, G.; VASAN, R.; CHARAN, H. (1996). *Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil*. *Journal of Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 122, n. 6, p. 419–426.
- RANZANI, G. (1979). *Recursos pedológicos da Amazônia*. *Acta Amaz.*, Manaus, v. 9, n. 4, supl. 1, p. 23-35.
- SALES, K. C. DOS S. (2011). *Melhorias de Solos por Inclusão de Fibras Naturais*. 113 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília. Programa de Pós Graduação em Geotecnia. Brasília.
- SANTIAGO, G. A. (2011). *Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.
- SHEWBRIDGE, E.; SITAR, N. (1990). *Deformation-based model for reinforced sand*. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.116, n.7, p.1153-1170.
- SILVEIRA, M.V. (2018). *Análise do comportamento mecânico e da durabilidade em compósitos de areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

- SPECHT, L. (2000). *Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidos a carregamentos estáticos visando à pavimentação*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre.
- STAUFFER, S.; HOLTZ, R. (1995). *Stress-strain and strength behavior of staple fiber and continuous filament-reinforced sand*. Transportation research record, n. 1474.
- TANG, C. *et. al.* (2007). *Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil*. Geotextiles and Geomembranes, Elsevier, v. 25, n. 3, p. 194–202.
- TAYLOR, D.W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, USA, 770 p.
- TAYLOR, G. D. (1994). *Materials in construction*. [S.l.]: Longman Scientific & Technical.
- TEODORO, J.; BUENO, B. (1998). *Estudo do comportamento dos solos reforçados com fibras plásticas de polipropileno*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. [S.l.: s.n.], v. 11, p. 1093–1100.
- TEODORO, J. M. (1999). *Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas*. Dissertação (Mestrado) — Escola de São Carlos/ USP, São Paulo.
- THOMAS, S. *et. al.* (2011). *Natural fibres: structure, properties and applications*. In: Cellulose fibers: bio-and nano-polymer composites. [S.l.]: Springer, p. 3–42.
- TOLÊDO FILHO, R. (1997). *Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental*. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K. G.; SYDENSTRICKER, T.H.D. (2007). *Studies on lignocellulosic fibers of brazil: Part iii—morphology and properties of brazilian curauá fibers*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Elsevier, v. 38, n. 10, p. 2227–2236.

- TOMCZAK, F. (2011). *Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná.
- ULBRICH, L. (1997). *Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras*. Porto Alegre, 1997. 122p. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- VALENÇA, P.M.A.; FROTA, C.A. (2011). *Misturas Areia – Asfalto com Fibra do Açaí e Resíduo da Construção Civil para a Cidade de Manaus*. T e C Amazônia, Ano 9, n. 21.
- VAN IMPE, W.F.V. (1989). *Soil improvement techniques and their evolution*. Rotterdam, A.A. Balkema, 125p.
- VENDRUSCOLO, M. (2003). *Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre.
- VIDAL, H. (1969). *The principle of reinforced earth*. *Highway Research Record*. Washington, D.C., NCR-HRB, n.282, p.1-16.

ANEXOS

Pluviometria Diária da Cidade de Belém (Fonte: INMET⁴)

Data	Chuva (mm)	Data	Chuva (mm)	Data	Chuva (mm)	Data	Chuva (mm)
01/07/2018	0	02/07/2018	0	03/07/2018	14,2	04/07/2018	3
05/07/2018	4,8	06/07/2018	0	07/07/2018	0	08/07/2018	0
09/07/2018	0	10/07/2018	0	11/07/2018	0	12/07/2018	0
13/07/2018	36	14/07/2018	16,8	15/07/2018	0	16/07/2018	2,2
17/07/2018	5,6	18/07/2018	1,2	19/07/2018	0	20/07/2018	0
21/07/2018	0	22/07/2018	0	23/07/2018	11	24/07/2018	1,6
25/07/2018	1	26/07/2018	0	27/07/2018	15,6	28/07/2018	4
29/07/2018	4,6	30/07/2018	0,2	31/07/2018	0	01/08/2018	0
02/08/2018	10	03/08/2018	14	04/08/2018	19	05/08/2018	1,6
06/08/2018	8,8	07/08/2018	6,2	08/08/2018	23,8	09/08/2018	8,4
10/08/2018	3,8	11/08/2018	0,2	12/08/2018	0	13/08/2018	0
14/08/2018	0	15/08/2018	30	16/08/2018	9,2	17/08/2018	5,8
18/08/2018	22,2	19/08/2018	0	20/08/2018	0	21/08/2018	0,2
22/08/2018	0	23/08/2018	19,2	24/08/2018	11,6	25/08/2018	23,4
26/08/2018	0	27/08/2018	3,8	28/08/2018	0	29/08/2018	1,2
30/08/2018	0	31/08/2018	0	01/09/2018	0	02/09/2018	13,4
03/09/2018	0	04/09/2018	0	05/09/2018	35,6	06/09/2018	47,2
07/09/2018	10	08/09/2018	34	09/09/2018	0	10/09/2018	0
11/09/2018	0	12/09/2018	2,6	13/09/2018	0	14/09/2018	0
15/09/2018	0	16/09/2018	8,2	17/09/2018	0	18/09/2018	9,6

⁴ Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTlwMQ=>>. Acesso em 29 de julho 2019.

19/09/2018	9,8	20/09/2018	0,2	21/09/2018	0	22/09/2018	3
23/09/2018	17	24/09/2018	25,6	25/09/2018	0	26/09/2018	0
27/09/2018	0	28/09/2018	0,6	29/09/2018	0	30/09/2018	8,2
01/10/2018	16,2	02/10/2018	1	03/10/2018	5,2	04/10/2018	1,2
05/10/2018	0,2	06/10/2018	16,2	07/10/2018	0	08/10/2018	2,4
09/10/2018	0	10/10/2018	0	11/10/2018	9,2	12/10/2018	0,2
13/10/2018	0	14/10/2018	45,6	15/10/2018	0	16/10/2018	17
17/10/2018	54,2	18/10/2018	2,2	19/10/2018	0	20/10/2018	0
21/10/2018	0	22/10/2018	0	23/10/2018	0,6	24/10/2018	0
25/10/2018	0,2	26/10/2018	42,4	27/10/2018	0	28/10/2018	0
29/10/2018	3,2	30/10/2018	50,6	31/10/2018	0,2	01/11/2018	6,8
02/11/2018	65	03/11/2018	0,2	04/11/2018	13	05/11/2018	9,6
06/11/2018	38,4	07/11/2018	18,4	08/11/2018	0	09/11/2018	0
10/11/2018	5,8	11/11/2018	0	12/11/2018	0	13/11/2018	0
14/11/2018	0	15/11/2018	0	16/11/2018	0	17/11/2018	0
18/11/2018	0	19/11/2018	2,6	20/11/2018	9,2	21/11/2018	13,8
22/11/2018	24,4	23/11/2018	1,4	24/11/2018	2,2	25/11/2018	0
26/11/2018	13,2	27/11/2018	20,8	28/11/2018	18,6	29/11/2018	15,2
30/11/2018	38,6	01/12/2018	19,4	02/12/2018	2	03/12/2018	6,8
04/12/2018	22	05/12/2018	6	06/12/2018	5	07/12/2018	7,2
