



Fernanda Pecemilis Dalla Bernardina

**Influência da Degradação de Fibras no Comportamento
Mecânico dos Solos Reforçados**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientadora: Profa. Raquel Quadros Velloso
Co-Orientadora: Profa. Michéle Dal Toé Casagrande

Rio de Janeiro
Março de 2019



Fernanda Pecemilis Dalla Bernardina

**Influência da Degradação de Fibras no
Comportamento Mecânico dos Solos
Reforçados**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Profa. Raquel Quadros Velloso

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil Ambiental – PUC-Rio

Profa. Michéle Dal Toé Casagrande

Co-Orientadora

Universidade de Brasília – UnB

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Mariana Vela Silveira

Universidade Federal do Ceará – UFC

Rio de Janeiro, 22 de março de 2019

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, da orientadora e da universidade.

Fernanda Pecemilis Dalla Bernardina

Graduou-se em Engenharia Civil pela UFES (Universidade Federal do Espírito Santo) em Vitória, Espírito Santo em agosto de 2015. Ingressou no mestrado na PUC-Rio em março de 2016, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada a reforço de solo.

Ficha Catalográfica

Bernardina, Fernanda Pecemilis Dalla

Influência da degradação de fibras no comportamento mecânico dos solos reforçados / Fernanda Pecemilis Dalla Bernardina ; orientadora: Raquel Quadros Velloso ; co-orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2019.

122 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Fibras naturais. 3. Fibras sintéticas. 4. Solos reforçados. 5. Degradação. I. Velloso, Raquel Quadros. II. Casagrande, Michéle Dal Toé. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus pais

Agradecimentos

Agradeço a Deus, primeiramente, por todas as oportunidades que tive e me conceder forças para seguir em frente.

À toda minha família, em especial, aos meus pais, Esuete e Fernando, por sempre me apoiarem e por todo o amor, muito obrigada!

À minha orientadora Prof^a Michéle Casagrande pela oportunidade de trabalhar com você, por todo o apoio e confiança depositada no desenvolvimento deste trabalho. Mesmo fisicamente distante, não mediu esforços para nos ajudar. Muito obrigada!

Aos professores do programa de pós-graduação da PUC-Rio. Obrigada por todo o conhecimento e experiência transmitidos.

Aos funcionários dos Laboratórios de Geotecnia e Estruturas da PUC-Rio: Amaury, Josué, Carlos (Geotecnia), Edson, Euclides, Carlos (Estruturas), Rogério, José Nilson e Marques.

Aos alunos de iniciação científica da Professora Michéle e aos estagiários do Laboratório de Geotecnia, pela ajuda com os materiais utilizados nos ensaios.

Aos meus amigos de infância e aos amigos da UFES! Muito obrigada pela amizade e por entenderem os vários momentos em que estive ausente!

Aos amigos feitos durante o mestrado, em especial à Mariana Silveira, Juan Sotomayor e Arthur Amaral, muito obrigada por todo o apoio que me deram durante a pesquisa. A ajuda de vocês foi fundamental para mim! Obrigada por todos os momentos juntos no laboratório, pelo auxílio nos ensaios e pela paciência que tiveram comigo. Sem vocês, nada disso seria possível!

Aos amigos que fiz na BT São Clemente, vocês fizeram meus dias melhores, principalmente na reta final da dissertação.

À Priscila de Oliveira, por todo o apoio. Obrigada por me fortalecer, me ouvir e ajudar a encontrar um caminho para minha realização pessoal.

À PUC-Rio por ter permitido a realização deste estudo.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Bernardina, Fernanda Pecemilis Dalla; Velloso, Raquel Quadros; Casagrande, Michéle Dal Toé. **Influência da Degradação de Fibras no Comportamento Mecânico dos Solos Reforçados**. Rio de Janeiro, 2019. 123 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente estudo experimental apresenta o comportamento mecânico e a durabilidade de compósitos de solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno e de fibras vegetais de coco, sisal e curauá, aleatoriamente distribuídas, submetidos ao envelhecimento natural, com o objetivo de estudar a sua aplicação em obras geotécnicas. O programa experimental consistiu na execução de ensaios triaxiais drenados nas amostras de areia pura, areia-fibra no tempo zero (amostras de controle) e nos compósitos expostos por um período máximo de 8 meses, com o objetivo de avaliar a durabilidade dos compósitos. Foram realizados ensaios de tração direta nas fibras vegetais sem degradação e nas fibras utilizadas como reforço em compósitos expostos ao ambiente externo e ao tempo, localizadas nas profundidades de 75 e 125 cm. Para um melhor entendimento da variação dos resultados obtidos, os ensaios triaxiais e de tração foram executados nos intervalos de tempo: 0, 60, 120 e 240 dias. Foi possível observar que todos os compósitos expostos apresentaram queda na resistência de cisalhamento, em relação às amostras de controle, inclusive os reforçados com fibra de polipropileno. Os compósitos reforçados com fibra de coco apresentaram baixa degradação, se comparados com as amostras reforçadas com outras fibras vegetais. Quanto aos ensaios de tração, a fibra de curauá apresentou as maiores resistências à tração inicial e final, após os 8 meses, porém foi a fibra que mais sofreu degradação durante o período em exposição, sofrendo grandes perdas de resistência. Todas as fibras analisadas apresentaram degradação maior na profundidade de 75 cm.

Palavras-chave

Fibras Naturais; Fibras Sintéticas; Solos Reforçados; Degradação.

Abstract

Bernardina, Fernanda Pecemilis Dalla; Velloso, Raquel Quadros (Advisor); Casagrande, Michéle Dal Toé (Co-Advisor). **Influence of Fiber Degradation on Mechanical Behavior of Reinforced Soils**. Rio de Janeiro, 2019. 123 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present experimental study presents the mechanical behavior and the durability of composites of sandy soil reinforced with polypropylene fibers and vegetal fibers of coconut, sisal and curauá, randomly distributed, submitted to the natural aging, with the objective of studying their application in earthworks. The experimental program consisted in the execution of triaxial tests in the sand, sand-fiber samples at zero time (control samples) and in the exposed composites for up to 8 months, in order to evaluate the durability of the composites. Direct tensile tests were done on the non-degraded natural fibers and on the fibers used as reinforcement in samples exposed to the external environment and to the time, located at depths of 75 and 125 cm. For a better understanding of the variation of the obtained results, the triaxial and tensile tests were performed in the time intervals: 0, 60, 120 and 240 days. It was possible to observe that all exposed composites presented a drop in shear strength, in relation to the control samples, inclusive those reinforced with polypropylene fiber. The composites reinforced with coconut fiber presented low degradation when compared with the samples forced with other vegetable fibers. Regarding the tensile tests, the curaua fiber showed the greatest resistance to the initial and final traction, after 8 months, but it was the fiber that suffered the most degradation during the exposure period, suffering great losses of resistance. All the analyzed fibers presented degradation greater in the depth of 75 cm.

Keywords

Natural Fibers; Synthetic Fibers; Reinforced Soils; Degradation.

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Relevância e justificativa da pesquisa	16
1.2	Objetivos	17
1.3	Estrutura do trabalho	18
2	Revisão bibliográfica	20
2.1	Considerações iniciais	20
2.2	Solos reforçados	20
2.2.1	Contexto histórico	20
2.2.2	Solos Reforçados com Fibra	22
2.2.3	Tipos de fibras utilizadas como reforço	27
2.2.3.1	Fibras vegetais	27
2.2.3.1.1	Fibra de coco	31
2.2.3.1.2	Fibra de curauá	33
2.2.3.1.3	Fibra de sisal	35
2.2.3.2	Fibras poliméricas	38
2.2.3.2.1	Fibras de polipropileno	39
2.2.3.2.2	Fibras de polietileno	39
2.2.3.2.3	Fibra de poliéster	40
2.2.3.2.4	Fibra de poliamida (Kevlar)	40
2.2.3.3	Fibras minerais	41
2.2.3.4	Fibras metálicas	42
2.3	Mecanismo de interação solo-fibra: estudos experimentais	42
2.4	Durabilidade das Fibras Vegetais – estudos Experimentais	52
3	Programa experimental	59

3.1	Considerações iniciais	59
3.2	Materiais utilizados	59
3.2.1	Solo (matriz do compósito)	59
3.2.1.1	Caracterização física	60
3.2.1.2	Caracterização mecânica	60
3.2.1.2.1	A prensa triaxial	61
3.2.1.2.2	Parâmetros de moldagem	62
3.2.1.2.3	Preparo das amostras para o ensaio triaxial	63
3.2.1.2.4	Ensaio triaxial convencional	64
3.2.2	Fibra (elemento de reforço)	65
3.2.2.1	Fibras naturais	66
3.2.2.2	Fibra sintética	68
3.2.2.3	Caracterização pelo ensaio de tração direta	69
3.2.3	Compósitos sem exposição	70
3.2.3.1	Moldagem das amostras de compósito solo-fibra	71
3.2.3.2	Caracterização mecânica	72
3.2.4	Compósitos submetidos ao envelhecimento natural	72
3.2.4.1	Moldagem das amostras de compósitos expostas às condições ambientais ao longo do tempo	72
3.2.4.2	Preparo das amostras de compósitos expostas às condições ambientais ao longo do tempo para os ensaios triaxiais isotropicamente drenados	75
3.2.5	Fibras submetidas ao envelhecimento natural para ensaios de tração	76
3.2.5.1	Moldagem das amostras de compósito solo-fibra expostas às condições ambientais ao longo do tempo	76
3.2.5.2	Preparo das amostras	78
3.2.5.3	Ensaio de tração direta nas fibras submetidas ao envelhecimento natural	78
4	Resultados e discussões	80
4.1	Considerações Iniciais	80
4.2	Ensaio de caracterização física	80
4.3	Caracterização mecânica	81
4.3.1	Areia pura	81

4.3.2	Compósitos sem exposição	84
4.3.3	Compósitos submetidos ao envelhecimento natural	89
4.4	Ensaio de tração direta	102
4.4.1	Fibras vegetais sem exposição	103
4.4.2	Fibras submetidas ao envelhecimento natural	104
5	Considerações finais	109
5.1	Conclusões	109
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	111
6	Referências bibliográficas	113

Lista de figuras

Figura 2.1: Forças componentes do compósito durante um carregamento (Taylor, 1994)	23
Figura 2.2: Ciclo da fibra de sisal (Melo Filho, 2012)	28
Figura 2.3: Fibra de coco	31
Figura 2.4: Plantação e fruto de curauá (Santiago, 2011; Pinto, 2007)	33
Figura 2.5: Fibra de curauá (Tomzack, 2010)	34
Figura 2.6: Plantação de sisal (Santiago, 2011)	36
Figura 2.7: Fibras de polipropileno com 24 mm de comprimento (Casagrande, 2005)	39
Figura 2.8: Acréscimo de resistência de acordo com a inclinação da fibra (Gray & Ohashi, 1983)	44
Figura 3.1: Amostra da areia utilizada como matriz	60
Figura 3.2: Prensa triaxial	62
Figura 3.3: Corpo de prova no equipamento triaxial	63
Figura 3.4: Fibra de coco cortada, com 25 mm de comprimento	67
Figura 3.5: Fibras de sisal e curauá (Silveira, 2018)	68
Figura 3.6: Fibra de polipropileno, com 25 mm de comprimento (Sotomayor, 2018)	69
Figura 3.7: Máquina de ensaios universais MTS 810/250	70
Figura 3.8: Moldagem dos corpos de prova submetidos ao envelhecimento natural	73
Figura 3.9: Local escolhido para exposição dos corpos de prova aos agentes climáticos (Nilo Lima. Acervo Núcleo de Memória)	74
Figura 3.10: Corpos de prova expostos	74
Figura 3.11: Amostra de solo reforçada com fibra de coco após o período de exposição	75
Figura 3.12: Corpos de prova prontos para serem expostos	77
Figura 3.13: Corpos de prova cortados, após o período de exposição	78
Figura 3.14: Ensaio de tração em fibras	79

Figura 4.1: Curva granulométrica da areia (Silveira, 2018)	81
Figura 4.2: Resultados dos ensaios triaxiais nas amostras de solo arenoso	82
Figura 4.3: Resultados dos ensaios triaxiais convencionais nas amostras de controle reforçadas com fibras de coco e de polipropileno	85
Figura 4.4: Resultado dos ensaios triaxiais convencionais nos compósitos areia-coco expostos ao intemperismo e ao tempo	90
Figura 4.5: Resultado dos ensaios triaxiais convencionais nos compósitos areia-polipropileno expostos ao intemperismo e ao tempo	91
Figura 4.6: Máxima tensão desviadora e capacidade de absorção de energia (E_{def}) dos compósitos areia-fibra expostos ao intemperismo	100
Figura 4.7: Parâmetros de resistência da areia a dos corpos de prova reforçados com fibras, submetidos ao envelhecimento natural	101
Figura 4.8: Resistência à tração das fibras vegetais expostas ao tempo	107

Lista de tabelas

Tabela 2.1: Propriedades mecânicas de fibras vegetais (Bledziki <i>et al.</i> , 1999; Satyanarayana <i>et al.</i> , 1982; Tomzack, 2010)	29
Tabela 2.2: Composição química de fibras vegetais (Bledzki e Gassan, 1999)	30
Tabela 2.3: Propriedades mecânicas da fibra de coco (Tomczak, 2010)	32
Tabela 2.4: Composição química da fibra de coco	32
Tabela 2.5: Propriedades físicas das fibras de curauá	35
Tabela 2.6: Propriedades químicas das fibras de curauá	35
Tabela 2.7: Propriedades mecânicas das fibras de curauá	35
Tabela 2.8: Propriedades físicas das fibras de sisal	37
Tabela 2.9: Propriedades químicas das fibras de sisal	38
Tabela 2.10: Propriedades mecânicas das fibras de sisal	38
Tabela 2.11: Propriedades físicas e mecânicas das principais fibras poliméricas (Bentur e Mindess, 2007)	38
Tabela 2.12: Propriedades mecânicas das fibras minerais (Curcio, 2001)	41
Tabela 3.1: Propriedades mecânicas da fibra de polipropileno (Maccaferri)	69
Tabela 4.1: Índices físicos da areia	81
Tabela 4.2: Índices físicos após adensamento e cisalhamento das amostras de solo arenoso sem reforço	83
Tabela 4.3: Valores das propriedades mecânicas e dos parâmetros de resistência para a amostra de areia sem reforço	84
Tabela 4.4: Índices físicos após o adensamento e cisalhamento, das amostras de controle, no tempo zero	86
Tabela 4.5: Valores das tensões de ruptura nas amostras de controle, com acréscimo de fibras, sem exposição	86
Tabela 4.6: Valores dos parâmetros de resistência das amostras de controle, com acréscimo de fibras, sem exposição	87

Tabela 4.7: Índices físicos após o adensamento e cisalhamento, das amostras reforçadas com fibras de coco, expostas ao intemperismo e ao tempo	93
Tabela 4.8: Índices físicos após o adensamento e cisalhamento, das amostras reforçadas com fibras de polipropileno, expostas ao intemperismo e ao tempo	93
Tabela 4.9: Valores da máxima tensão desviadora obtidos nas amostras reforçadas com fibras de coco, expostas ao intemperismo e ao tempo	94
Tabela 4.10: Valores da máxima tensão desviadora obtidos nas amostras reforçadas com fibras de polipropileno, expostas ao intemperismo e ao tempo	94
Tabela 4.11: Valores da máxima tensão desviadora obtidos nas amostras reforçadas com fibras de sisal, expostas ao intemperismo e ao tempo (Silveira, 2018)	95
Tabela 4.12: Valores da máxima tensão desviadora obtidos nas amostras reforçadas com fibras de curauá, expostas ao intemperismo e ao tempo (Silveira, 2018)	95
Tabela 4.13: Parâmetros de resistência para os compósitos reforçados com fibra de coco, expostos ao intemperismo e ao tempo	96
Tabela 4.14: Parâmetros de resistência para os compósitos reforçados com fibra de polipropileno, expostos ao intemperismo e ao tempo	96
Tabela 4.15: Parâmetros de resistência para os compósitos reforçados com fibra de sisal, expostos ao intemperismo e ao tempo (Silveira, 2018)	97
Tabela 4.16: Parâmetros de resistência para os compósitos reforçados com fibras de curauá, expostos ao intemperismo e ao tempo (Silveira, 2018)	97
Tabela 4.17: Resultados médios e desvios-padrões obtidos através dos ensaios de tração nas fibras vegetais	103
Tabela 4.18: Resultados médios e desvios-padrões dos ensaios de tração realizados nas fibras de coco em exposição	105
Tabela 4.19: Resultados médios e desvios-padrões dos ensaios de tração realizados nas fibras de curauá em exposição	106
Tabela 4.20: Resultados médios e desvios-padrões dos ensaios de tração realizados nas fibras de sisal em exposição	106

Lista de símbolos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

c' – Intercepto coesivo

C_c – Coeficiente de curvatura

CID – Consolidado isotropicamente drenado

C_u – Coeficiente de uniformidade

D – Diâmetro da fibra

D_{10} – Diâmetro efetivo

D_{50} – Diâmetro médio

D_r – Densidade relativa

e – Índice de vazios

e_{max} – Índice de vazios máximo

e_{min} – Índice de vazios mínimo

ϵ_a – Deformação axial

E_{def} – Capacidade de absorção de energia deformação ou tenacidade

ϵ_v – Deformação volumétrica

G_s – Densidade real dos grãos

IC – Índice de cristalinidade

L – Comprimento da fibra

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

NBR – Norma Brasileira

p' – Tensão efetiva média

pH – Potencial hidrogeniônico

ϕ' – Ângulo de atrito interno

q – Tensão desviadora

SP – Areia mal graduada

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

σ'_1 e σ'_3 – Tensão principal maior e menor

1 Introdução

1.1 Relevância e justificativa da pesquisa

A técnica de reforço com o acréscimo de fibras foi desenvolvida há mais de três mil anos pelos Babilônicos e Chineses, utilizando fibras vegetais em solo argiloso. Apesar de ser uma técnica antiga, apenas há alguns anos que ela vem sendo amplamente estudada (Festugato, 2008).

Os solos são materiais complexos e possuem muita variabilidade em suas propriedades. Portanto, é natural que, em algumas situações de obra, não atenda a todas às exigências de projetos de engenharia, sendo necessária a melhoria de suas propriedades com o acréscimo de reforço.

As fibras possuem bom desempenho como reforço de solo, são capazes de melhorar a resistência ao cisalhamento, tenacidade, resistência à tração, coesão, trabalhabilidade, etc. O seu uso não impede a formação de fissuras no compósito, porém aumenta a resistência à tração pelo controle da propagação de fissuras (Taylor, 1994).

O melhoramento das propriedades mecânicas de um solo reforçado com fibras depende das características do solo (granulometria das partículas e forma, índice de vazios, grau de cimentação, tamanho, etc.), das fibras (resistência à tração, módulo de elasticidade, comprimento, capacidade de alongamento, teor, rugosidade, etc.), do modo de carregamento, da tensão confinante. O estado pós-pico é onde as fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência do material, gerando um aumento na capacidade de absorção de energia.

O método de reforçar solo com fibra encontra-se inserido na tecnologia dos materiais compósitos. Material compósito é definido como a associação de dois ou mais materiais que possuem propriedades que não são isoladamente encontradas nos materiais que lhe deram origem. É constituído de elemento de reforço e matriz, e é elaborado para otimizar os pontos fortes de cada uma das fases (Budinski, 1996).

Comparadas às fibras sintéticas, as fibras vegetais são de baixo custo, de fácil obtenção, de fácil manuseio, possuem grande oferta, boas propriedades mecânicas, não geram grande quantidade de resíduos, demandam de tecnologia simples e de pouca energia no processo de produção, além de serem fontes renováveis (Dittenber & GangaRao, 2012). Como desvantagem, as fibras vegetais possuem grande variabilidade das propriedades mecânicas e físicas, susceptibilidade de degradação e variações dimensionais por alterações de teor de umidade e temperatura (Ghavami et al., 1999).

Apesar de serem mais susceptíveis à degradação, as fibras vegetais podem ser utilizadas em situações onde a estabilização ou funcionalidade da obra é imediatamente após a construção como, por exemplo, uma estrada de acesso construída sobre um solo de argila mole saturada, onde a prioridade é permitir que a estrada seja construída. Assim sendo, as fibras vegetais podem ser utilizadas quando a variação temporal das funções e características essenciais para solucionar uma adversidade for identificada e, em seguida, produzir o produto em conformidade (Silveira, 2018).

As fibras sintéticas vêm sendo amplamente empregadas por não se degradarem. Além disto, possuem boa maleabilidade, resistência química, física e mecânica, boas propriedades mecânicas e dimensões bem definidas. Como desvantagem, apresentam alto custo em relação às fibras vegetais.

O presente trabalho pretende apresentar o comportamento de compósitos de solo reforçado com fibras vegetais e sintéticas aleatoriamente distribuídas e comparar o efeito da degradação de diferentes fibras submetidas ao envelhecimento natural.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta pesquisa constitui-se em analisar o comportamento mecânico e a durabilidade de compósitos de solos reforçados com fibras vegetais de sisal, curauá e de coco e de fibra sintética de polipropileno distribuídas aleatoriamente e expostos aos agentes climáticos diversos e à passagem do tempo.

Para o estudo, será avaliado o comportamento tensão vs deformação das misturas sem exposição e com exposição ao envelhecimento natural, comparando a

atuação da influência da adição de fibras com os parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformação do solo.

A partir do objetivo geral, os seguintes objetivos foram estabelecidos para a pesquisa:

- Analisar as propriedades mecânicas das fibras de coco, sisal e curauá no tempo zero, sem contato com o solo e os agentes climáticos;
- Estudar a influência do acréscimo de fibras no comportamento mecânico de um solo arenoso por meio de ensaios triaxiais drenados, com carregamento axial e taxa de deformação constante;
- Avaliar a influência do envelhecimento natural pela exposição de compósitos areia-fibra aos agentes climáticos, por um período máximo de 8 meses, nas propriedades mecânicas das fibras vegetais de coco, sisal e curauá, nas profundidades de 75 e 125cm;
- Examinar os efeitos do envelhecimento natural no comportamento tensão vs deformação de compósitos de solo arenoso reforçados com fibras de coco, sisal, curauá e polipropileno, por meio de ensaios triaxiais drenados, com carregamento axial e taxa de deformação constante.

1.3

Estrutura do trabalho

Este trabalho é apresentado em cinco capítulos, incluindo esta introdução, sendo apresentados, em seguida, brevemente, o conteúdo de cada um deles.

O Capítulo 2 apresenta toda a revisão bibliográfica sobre temas referentes ao objetivo da pesquisa, englobando solos reforçados, fibras vegetais e sintéticas, o comportamento mecânico e a durabilidade de compósitos solo-fibra.

O Capítulo 3 apresenta o detalhamento do programa experimental realizado nesta pesquisa. Descreve todos os materiais utilizados, preparação dos corpos de prova, equipamentos e procedimentos executados.

O capítulo 4 mostra todos os resultados obtidos de caracterização física dos solos, caracterização mecânica das fibras e dos compósitos solo-fibra, no tempo zero e submetidos ao envelhecimento natural.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas através das avaliações dos resultados e recomendações para futuros trabalhos.

2

Revisão bibliográfica

2.1

Considerações iniciais

Neste capítulo, é apresentada uma breve revisão da literatura sobre a técnica de reforço de solos com fibras, alguns conceitos básicos e propriedades gerais, os tipos de fibras existentes e que podem ser utilizadas como reforço de solo. Aspectos técnicos à respeito dos mecanismos de interação entre solo e fibras e as modificações do comportamento dos solos causadas pela adição de fibras.

2.2

Solos reforçados

Segundo Casagrande (2005) “entende-se por melhoria ou reforço de solos a utilização de processos físicos e/ou químicos que visem o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos. Procura-se o aumento da resistência do solo tratado e a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade. O termo melhoria de solos está associado ao tratamento através de processos químicos, enquanto que o termo reforço está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes”.

2.2.1 Contexto histórico

A técnica de reforço de solo com fibras é conhecida e empregada pela humanidade há muito tempo. Na Antiguidade, hastes de bambu e junco eram utilizadas no reforço de tijolos de barro e solos granulares para auxiliar na construção de diversas obras de terra. A pirâmide de Ziggurat e a torre de Agar Quf, na Mesopotâmia (1400 A. C.), existentes ainda hoje, foram construídas utilizando-se camadas alternadas de solo e mantas de raízes. São encontrados indícios dessa técnica, também, em partes da Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas,

no Peru, empregando lã de lhama como reforço (Palmeira, 1992). Em alguns Ziggurats, utilizavam-se, como reforço adicional, cordas com 0,05m de diâmetro, inseridas perpendicularmente ao talude e regularmente espaçadas nas direções vertical e horizontal (Silva, 2009). Segundo Casagrande (2005) é, também, conhecida a utilização de mantas de folhas e galhos sobre camadas de solos moles antes da construção de aterros no interior do Brasil e outros países.

Segundo Sotomayor (2014) em algumas das estradas que conectavam o Império Romano, foram descobertos vestígios de tecidos e peles usados como reforço. Muralhas de adobe reforçadas com bambu podem ser encontradas na cidade histórica de Chan-Chan, existentes há mais de 600 anos, feitos por civilizações que antecedem aos incas, em uma zona de intensa atividade sísmica.

Do ponto de vista técnico, o melhoramento de solo é, possivelmente, a técnica mais antiga, comparando os métodos executivos tradicionais em Engenharia Civil (Van Impe, 1989).

Desde a antiguidade, o homem entendeu que há um sentido de praticidade em utilizar o solo presente no local em que se constrói, mesmo não possuindo as melhores características. Para aperfeiçoá-las, começou-se a praticar a adição de diferentes materiais, em sua maioria orgânicos, com o propósito de conseguir uma estrutura resistente e durável, ao longo do tempo (Sotomayor, 2014).

A metodologia de reforços de solo com fibras nos moldes que se tem hoje começou a ser investigada há pouco mais de três décadas, evidenciando o reforço de solo através de inclusões aleatoriamente distribuídas dentro de uma massa de solo, onde se procurava avaliar o efeito de raízes de plantas na resistência ao cisalhamento dos solos e em estabilidade de taludes (Gray & Ohashi, 1983).

No final dos anos 60, o arquiteto francês Henry Vidal patentou a técnica denominada “Terra Armada” (Vidal, 1969), onde o reforço foi alcançado através da introdução de tiras metálicas e painéis de concreto que constituíam a face do maciço.

Os processos de estabilização podem ser classificados como temporários, permanentes e permanentes com adição de novos materiais. A estabilização temporária constituiu-se naquela limitada a um curto espaço de tempo, geralmente durante a execução de uma 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 frequentemente 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. Este processo de reforço de solo consiste em se introduzir no maciço elementos que possuam resistência à tração elevada (fitas metálicas, mantas, geotêxteis, geogrelhas, malhas de aço, fibras, etc.) (Van Impe, 1989).

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).

2.2.2 Solos Reforçados com Fibra

A utilização de fibras como reforço de solos passou a ser amplamente pesquisada há apenas três décadas. Inicialmente, as fibras eram dispostas aleatoriamente dentro de uma massa de solo, para examinar a influência de raízes das plantas na resistência ao cisalhamento do solo (Grey & Ohashi, 1983).

Seguindo a tendência ambiental de se utilizar materiais recicláveis para a diminuição de resíduos, atualmente, há um grande interesse nos estudos de reforço de solos com fibras. Diante disto, a comunidade científica oportuniza o desenvolvimento de pesquisas de tal modo que, nos livros atuais de Engenharia dos Materiais, os compósitos fibrosos são tratados em capítulos específicos (Taylor, 1994; Hannant, 1994; Hollaway, 1994; Illston, 1994; Budinski, 1996).

Devido à degradação das fibras vegetais utilizadas como reforço com o tempo, iniciou-se a produção de fibras sintéticas, para a criação de compósitos mais resistentes, como o fibrosolo, constituído de solos e fibras sintéticas para utilização

em pavimentos (Homem, 2002; Specht, 2000), aterros sobre solos moles e estabilidade de taludes (Zornberg, 2002) e em fundações superficiais (Casagrande, 2001).

O compósito possui maior capacidade de absorção de energia quando há acréscimo de fibras, gerando um aumento da resistência do solo no estado pós-pico. O aumento da resistência ocorre porque a deformação necessária para o surgimento de fissuras na matriz de solo é inferior à elongação das fibras, nas quais não se espera aumento da tensão de fissuração (Hannant, 1994; Illston, 1994; Taylor, 1994). As fibras não evitam o surgimento de fissuras, mas ajudam a controlar a propagação destas, promovendo resistência à tração na mistura (Taylor, 1994). A propagação de fissuras é reduzida porque as fibras mantêm as interfaces das fissuras unidas, melhorando as propriedades mecânicas do compósito na fase pós-fissuração e a sua ductilidade (Hannant, 1994).

Segundo Chen (2010) solos reforçados com fibras estão, atualmente, sendo utilizados em estabilizações de rupturas de taludes, construção de novos aterros com solos marginais, redução das fissuras de contração em *liners* de argila compactadas e como reforço de sub-bases rodoviárias. O uso de fibras naturais e/ou sintéticas em engenharia geotécnica é viável em seis 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).

A Figura 2.1 mostra uma ilustração das forças atuantes no compósito no instante em que há a sollicitação da fibra durante um carregamento.

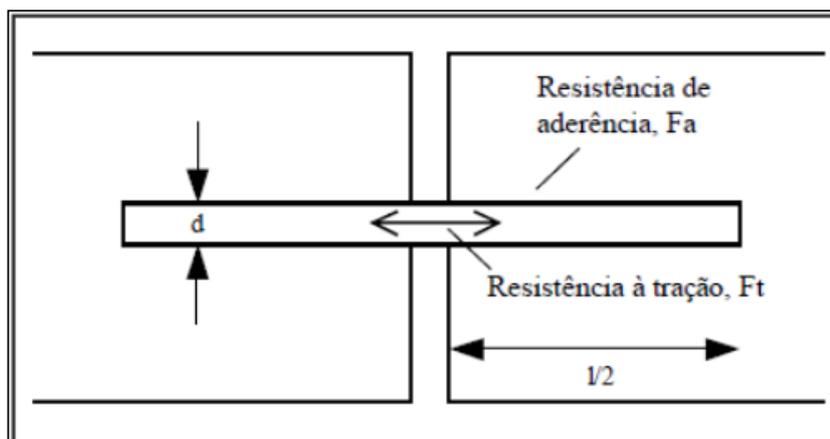


Figura 2.1: Forças componentes do compósito durante um carregamento (Taylor, 1994)

$$\frac{\tau d^2}{4} \cdot F_t = \tau \cdot d \frac{l}{2} \cdot F_a \quad (2.1)$$

$$\frac{l}{d} = \frac{F_t}{2F_a} \quad (2.2)$$

A relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra (fator de forma), l/d , é proporcional ao coeficiente resultante entre a resistência à tração da fibra (F_t) e a resistência de aderência fibra/matriz (F_a). Outros parâmetros que influenciam no comportamento do compósito solo-fibra são o teor de fibra, as propriedades físicas da fibra e da matriz de solo e a aderência entre o solo e a fibra (Hannant, 1994), como também, a forma de disposição da fibra no solo (Johnston, 1994).

De acordo com a influência dos principais parâmetros relacionados ao comportamento de solos reforçados, são mostradas as conclusões alcançadas por diversos pesquisadores. Alguns aspectos apresentaram resultados antagônicos, dependendo do tipo de fibra utilizada.

Teor de fibra: quanto maior o teor de fibra, maior o acréscimo de resistência mecânica, mas até um certo limite a partir do qual este efeito não é mais observado (Gray e Ohashi, 1983; Gray e Al-Refeai, 1986; Mc Gown *et al.*, 1988; Maher e Ho, 1994; Ulbrich, 1997; Specht, 2000; Santoni *et al.*, 2001; Casagrande, 2001; Vendruscolo, 2003, Consoli e Casagrande, 2007). O aumento do teor de fibras confere um aumento no índice de fragilidade e da capacidade de absorção de energia de deformação (Maher e Ho, 1993). O acréscimo de fibras reduz o índice de fragilidade e aumenta a capacidade de absorção de energia (Gray e Ohashi, 1983; Ulbrich, 1997, Montardo *et al.*, 2002).

- **Orientação das fibras:** Gray e Ohashi (1983) analisaram a orientação das fibras em relação à superfície de cisalhamento, por meio de ensaios de cisalhamento direto. Observou-se que a inclinação de 60° em relação ao plano de ruptura ofereceu maiores resistências e inclinação de 120° ofereceu redução na resistência ao cisalhamento. Segundo Johnston (1994) a orientação de uma fibra em relação ao plano de ruptura implica na forma que esta tem de contribuir com a transferência de carga. Uma fibra paralela ao plano de ruptura não oferece efeito, em contrapartida, uma fibra posicionada de forma perpendicular a este plano contribuiu com a sua capacidade de resistência à tração. Para

McGown *et al.* (1978), Fatani *et al.*, (1991), Morek & Gourc (1997) e Diambra *et al.* (2010), as fibras devem estar posicionadas na direção das deformações de tração do solo. Gray & Al-Refai (1986), Gray & Maher (1989); Maher & Gray (1990) concluíram que há duas vantagens no acréscimo de fibras aleatoriamente distribuídas em relação às inclusões orientadas, contínuas ou não: diminuiu o aparecimento de qualquer tipo de anisotropia e não induz planos de fraqueza. Tang *et al.* (2007) destaca a simplicidade de incorporação de fibras aleatoriamente distribuídas na matriz, podendo ser acrescentadas da mesma forma que o cimento, a cal e outros aditivos estabilizantes.

- **Módulo de elasticidade da fibra:** O comportamento tensão vs deformação de um solo reforçado depende essencialmente dos parâmetros de resistência e deformabilidade dos elementos de reforço. Elementos de reforço extensíveis possuem deformação de ruptura maior que a máxima deformação de tração do solo sem reforço. Logo, sua principal função é de aumentar a ductilidade e reduzir a perda de resistência pós pico, além de oferecer acréscimo na resistência mecânica. Elementos de reforços não extensíveis possuem deformação de ruptura inferior que a máxima deformação de tração no solo puro, sem reforço, oferece aumento na resistência mecânica, no entanto, rupturas catastróficas podem ocorrer com a ruptura do reforço (McGown *et al.*, 1978). Gray & Ohashi (1983) e Specht (2000) concluíram que as fibras com baixo módulo de elasticidade comportam-se como uma inclusão extensível, não houve ruptura durante o ensaio. Montardo (1990) e Specht (2000) observaram que fibras com baixo módulo não contribuem na resistência mecânica do compósito. Para Shewbridge & Sitar (1990) o valor do módulo é proporcional à possibilidade de arrancamento das fibras.
- **Aderência fibra-matriz:** As fibras têm de estar bem aderidas à matriz para que ofereça resistência à tração (Taylor, 1994). Para Casagrande (2005) os parâmetros de resistência, ruptura, deformação de compósitos reforçados com fibras dependem essencialmente da aderência fibra-matriz. Quanto maior a aderência, menor o tamanho das fissuras.

- **Comprimento da fibra:** Quanto maior o comprimento da fibra, maior a resistência do compósito, contudo, esse aumento é observado até um certo limite, a partir do qual este efeito não é mais observado. Ou seja, existe um comprimento ótimo de fibras que confere maior resistência ao compósito (Gray & Ohashi, 1983; Ulbrich, 1997; Santoni *et al.*, 2001; Heineck, 2002 e Vendruscolo, 2003). Fibras muito longas e finas apresentam problemas de emaranhamento e eficácia reduzida (Consoli *et al.* 2009a). Consoli *et al.* (2007) analisaram compósitos de areia com fibras de polipropileno de comprimentos distintos, submetidos a grandes deformações de cisalhamento em ensaios de ring shear. Os autores concluíram que o comprimento da fibra é proporcional ao incremento da resistência cisalhante do solo. Segundo Casagrande (2005) o aumento da resistência relacionado ao aumento do comprimento da fibra acontece pelo fato das fibras de maiores comprimentos apresentarem uma ancoragem maior dentro da amostra. Teodoro (1999) analisou um aumento da resistência de um compósito com matriz de areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno com o aumento do comprimento das fibras de 0 para 30 mm. Diferente do solo argiloso, a resistência máxima foi registrada para fibras com 15 mm. Maher & Ho (1994) concluíram que fibras mais curtas são mais numerosas dentro de uma matriz para um mesmo teor de fibras. Com isso, é mais provável de elas estarem presentes na superfície de ruptura, colaborando no aumento da resistência. Entretanto, após a ruptura, as fibras mais curtas são arrancadas com melhor facilidade, o que torna claro a importância de fibras mais longas quando se pretende melhorar a ductilidade e a capacidade de absorção de energia. Segundo Ulbrich (1997) e Montardo *et al.* (2002), o aumento do comprimento da fibra gera aumento da capacidade de absorção de energia.
- **Resistência da fibra:** O aumento da resistência das fibras provoca aumento da ductilidade do compósito, considerando que não ocorra o rompimento das ligações de aderência. A resistência necessária dependerá das características pós-pico necessárias, assim como o teor de

fibras e das propriedades de aderência fibra-matriz (Casagrande, 2005).

- **Diâmetro da fibra:** As fibras de menor diâmetro oferecem uma melhor interação solo-fibra e mobilização sucessiva destas, atuando na melhoria do comportamento resistente do material (Casagrande, 2005). Segundo Vendruscolo (2003), o aumento do diâmetro das fibras gera uma redução da tensão de ruptura. Isso ocorre porque, em um mesmo teor de fibras, a quantidade de fibras com diâmetros maiores se reduz na matriz.
- **Fator de forma:** Fibras com maior fator de forma colaboram de forma mais efetiva no aumento da resistência ao cisalhamento em relação a fibras com menor fator de forma (Gray & Maher, 1989; Michalowski & Cermák, 2003; Festugato, 2008 e Ibraim *et al.*, 2010). Para Qu & Sun (2016), um elevado valor de fator de forma colabora duplamente no aumento da resistência ao cisalhamento. Com um alto fator de forma, o número absoluto de fibras (volume) é relativamente maior sob um mesmo teor de fibras, aumentando a área de contato entre as fibras e as partículas de solo, gerando um maior atrito.

2.2.3 Tipos de fibras utilizadas como reforço

2.2.3.1 Fibras vegetais

Foram os primeiros tipos de fibras a serem empregadas pela humanidade. São classificadas conforme o seu local de origem na planta e são divididas em fibras de fruto (coco), fibras de semente (algodão), fibras de folhas (banana, sisal, curauá, piaçava) e fibras de caule (juta, linho, cânhamo) (Morassi, 1994).

As fibras oriundas do caule são constituídas por feixes de fibras, cada um contendo fibrocélulas individuais ou filamentos. As fibras das folhas possuem maiores diâmetros se comparadas às fibras provenientes do caule (Thomas *et al.*, 2011).

Neto e Pardini (2006) enumeraram as principais vantagens das fibras vegetais: baixa massa específica, maciez a abrasividade reduzida, baixo custo, reciclável, não tóxica e biodegradável, estimula empregos na zona rural, demanda de baixo consumo de energia em sua produção. Como desvantagem, citaram a acentuada variabilidade em suas propriedades mecânicas, sensibilidade a efeitos ambientais (variações de temperatura e umidade), a presença de seções transversais de geometria complexa e não uniforme, possui propriedades mecânicas modestas quando comparadas com fibras sintéticas (fibra de carbono, de vidro, etc.).

Segundo Santiago (2011), as fibras provenientes das folhas são as que despertam um maior interesse como reforço de solo, apesar de fibras de talo, do fruto e do caule também possam ser utilizadas. As fibras do talo e são mais finas e referenciadas como fibras ‘macias’, sendo mais adequada para fins têxteis, enquanto as fibras da folha são mais grossas e referenciadas como fibras ‘duras’. Neste estudo, foram utilizadas duas fibras oriundas da folha (sisal e curauá) e uma do fruto (coco).

As fibras vegetais são, basicamente, compostas por numerosas fibras individuais (fibrocélulas) unidas por lamelas, como pode ser observado na Figura 2.2. A fibrocélula é formada, principalmente, pela parede primária, parede secundária, parede terciária e lúmen. (Silva *et al.* (2010); Fidelis *et al.* (2013); Ferreira *et al.*, (2017)). O lúmen é a parte viva da célula que proporciona a flexibilidade da fibra, pela baixa massa específica aparente e elevada absorção de água (Tolêdo Filho, 1997).

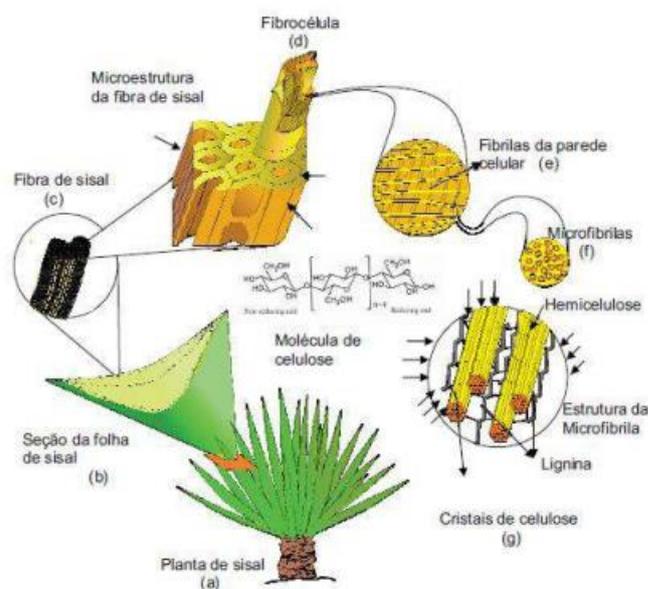


Figura 2.2: Ciclo da fibra de sisal (Melo Filho, 2012)

Ainda que apresentem uma mesma estrutura celular, as fibras vegetais apresentam diferentes características entre si que afetam na resistência mecânica das fibras como a área transversal, espessura das paredes celulares e número de fibro-células, quantidade e área dos lúmens (Fidelis *et al.*, 2013). Na Tabela 2.1 são mostradas a grande variabilidade das propriedades mecânicas de fibras vegetais.

Tabela 2.1: Propriedades mecânicas de fibras vegetais (Bledziki *et al.*, 1999; Satyanarayana *et al.*, 1982; Tomzack, 2010)

Fibra	Diâmetro (μm)	Densidade (kg/m^3)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão máxima (MPa)	Alongamento na ruptura (%)
Abacaxi	20-80	1440	34,5-82,5	413-1627	0,8-1,6
Banana	80-250	1350	7,7-20,0	54-754	1,9-13,0
Coco	100-450	1150	4,0-6,0	106-175	17,0-47,0
Curauá	10-130	1100	26,0-46,0	700-1100	2,0-4,0
Juta	-	1450	-	533	-
Palmira	70-1300	1090	4,4-6,1	180-215	7,0-15,0
Sisal	50-200	1450	9,4-15,8	568-640	3,0-7,0

As fibras vegetais possuem diferentes composições químicas, depende do tipo da planta de que provêm, da dimensão da célula cristalina, do ângulo helicoidal que a celulose faz em relação ao eixo central, da estrutura da macrofibra vegetal, dos defeitos superficiais, das propriedades físicas e mecânicas das fibras e da interação que a fibra pode fazer com a matriz do compósito (Faruk *et al.*, 2012).

As paredes celulares são constituídas por microfibrilas unidas por uma matriz de lignina e hemicelulose e possuem diferentes orientações em cada parede celular. O ângulo microfibrilar ou ângulo médio, formado entre as microfibrilas e o eixo da fibra varia de uma fibra para outra e pode ser responsável pelas propriedades mecânicas das fibras (Defoirdt *et al.*, 2010). Fibras com pequenos ângulos, geralmente, apresentam maiores resistências e rigidez, enquanto fibras com maiores ângulos apresentam comportamento dúctil (Defoirdt *et al.*, 2010).

As fibras naturais são compostas, principalmente, pela celulose, hemicelulose, lignina e, em menores teores, a pectina. Na Tabela 2.2 são apresentadas as proporções de cada componente dos diferentes tipos de fibras vegetais

Tabela 2.2: Composição química de fibras vegetais (Bledzki e Gassan, 1999)

Fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Pectina (%)
Coco	36-43	0,15-0,25	20-45	3,0
Algodão	82,7	5,7	-	5,7
Juta	64,4	12,0	11,8	0,2
Linho	64,1	16,7	2,0	1,8
Rami	68,6	13,1	13,1	0,6
Sisal	65,8	12,0	12,0	9,9

A celulose se apresenta, em geral, em estado cristalino. É o principal componente da parede celular, e o seu teor é o grande responsável pela resistência mecânica das fibras (Tolêdo Filho, 1997).

A hemicelulose é caracterizada pela ausência de cristalinidade, baixa massa molecular e higroscopicidade, que contribuem para a mobilidade interna, grande capacidade de absorção de água, aumento da flexibilidade e da área superficial disponível para interações (Frang *et al.*, 2000). A hemicelulose contribui pouco na resistência mecânica das fibras. (Perissoto, 2005).

A lignina está presente na parede celular e contribui na resistência à compressão e rigidez (Tolêdo Filho, 1997). Possui a função de agir como barreira à degradação por microorganismos, juntamente com a hemicelulose (Perissoto, 2005).

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

A composição química e o percentual de cada componente varia de acordo com a espécie, a região onde a fibra é retirada a amostra, do estado de maturação, de fatores ambientais, como solo e clima, região de cultivo, entre outros (Perissoto, 2005).

Uma característica fundamental que a fibra deve possuir como reforço de solo é não ser quimicamente neutra e não deteriorável, não sofrer ataques de fungos, bactérias ou álcalis e não ser prejudicial à saúde humana (Casagrande, 2005).

2.2.3.1.1 Fibra de coco

As fibras de coco são extraídas da parte externa do fruto da palmeira de coco (*Cocos nucifera* L.). Existem duas variedades de palmeira de coco: a normal, que pode atingir 30m, e a anã, que não ultrapassa 3m. Apesar das diferenças, as características são as mesmas (Aguilar, 2015). Segundo artigos apresentados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), o tempo de degradação para a fibra de coco é de 10 anos.



Figura 2.3: Fibra de coco

Por se tratar de fibra natural, suas propriedades físicas e mecânicas possuem uma grande variabilidade nos dados obtidos, conforme pode ser observado na Tabela 2.3. A Tabela 2.3 mostra que a fibra de coco possui baixo módulo de elasticidade. Quando utilizadas como reforço em matrizes frágeis, o arrancamento da fibra predomina sobre a ruptura, e a aderência fibra-matriz torna o principal fator de influência sobre a tenacidade, que se trata da quantidade de energia que um material absorve antes da fratura.

Tabela 2.3: Propriedades mecânicas da fibra de coco (Tomczak, 2010)

Fonte dos Dados	Diâmetro (mm)	Resistência Última à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação na Ruptura (%)
Kulkarni (1981)	0,10-0,45	106-175	3,0-6,0	17-47
CEPED (1982)	0,70	182,2	3,4	28,27
Ramaswamy (1983)	0,20-0,25	140,00	-	26,25
Paramasivam (1984)	0,30	69,30	2,00	-
Guimaraes (1984)	-	180,00	2,8	29,20
Ghavami e Veloso (1985)	0,24-0,42	37,53-110,52	-	10,47-27,77
Aziz (1987)	0,10-0,40	120-200	19,0-26,0	10-25
Satanarayana (1990)	0,10-0,45	106-175	4,0-6,0	17-47
Aggarwal (1992)	0,10-0,40	100-130	0,019-0,026	10-26
Toledo Filho (1997)	0,25	174,00	3,50	25,00
Savastano e Agopyan (1998)	-	95-118	2,8	23,90-51,40
Fabio Tomczak (2010)	0,13-0,23	100-250	3,00	30,00

Segundo Tomczak (2010) as propriedades mecânicas das fibras de coco dependem de fatores como o local de origem, a maturação, composição química, espécie e método de extração, além das condições de realização dos ensaios.

O diâmetro da fibra influencia nos valores de resistência da mesma, e isso pode ser explicado em termos de propriedades estruturais. Com o aumento do diâmetro, há variações na quantidade de células da fibra, promovendo alterações em outros parâmetros estruturais, como o ângulo helicoidal, volume de células constituintes e o número de defeitos. Estes fatores agem reduzindo a resistência das fibras (queda da tensão de ruptura e modo elástico) (Tomczak, 2010).

Tabela 2.4: Composição química da fibra de coco

Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Referência
37,0	9,0	42,0	Tolêdo Filho (1997)
43,4-53,0	14,7	38,0-40,0	Tomczak (2010)

A partir da Tabela 2.4 é possível observar o alto teor de lignina da fibra de coco e o baixo teor de celulose, se comparada a outras fibras vegetais utilizadas neste estudo experimental. Portanto, a sua degradação é mais lenta se comparada a outras fibras vegetais (Hejazi *et al.*, 2012).

2.2.3.1.2 Fibra de curauá

Fibra extraída a partir das folhas da planta da espécie *Ananas erectifolius*, que são bromeliáceas da Amozônia. As folhas de curauá podem chegar a até 1,5m de comprimento e 4cm de largura. As fibras possuem elevada resistência mecânica quando comparadas às outras fibras vegetais, tais como fibra de sisal, juta e linho (Santiago, 2011).



Figura 2.4: Plantação e fruto de curauá (Santiago, 2011; Pinto, 2007)

Essa planta é da família do abacaxi (*Ananas comosus*), seu fruto é semelhante, em aspecto e sabor, ao abacaxi (Picanço, 2005). Ainda que comestível, o interesse econômico pelo curauá está, primeiramente, associado às fibras extraídas de suas folhas (Pinto, 2007).

Não se trata de uma planta exigente quanto ao solo, podendo se desenvolver até em solo arenoso, pouco fértil e, inclusive, em áreas degradadas. Não há degradação de mata nativa para o seu cultivo, podendo, inclusive, contribuir com a revitalização de áreas desmatadas, não é exigente quanto a fertilizantes químicos e pode

ser consorciada com culturas alimentares, podendo ser uma fonte de renda alternativa, garantindo, também, segurança alimentar ao pequeno produtor da região amazônica (Santiago, 2011).

Cada planta produz cerca de 24 folhas e o rendimento de fibra seca é de, aproximadamente, 6%. Um hectare produz, em média, 3,6 toneladas de fibra seca ao ano (Oliveira, 2010). Produtores colhem duas safras por ano do curauá nativo (Pinto, 2007).



Figura 2.5: Fibra de curauá (Tomzack, 2010)

Segundo Santos (2009) a fibra de curauá está entre as mais competitivas, sendo uma das mais economicamente viável. Vem atraindo a atenção da indústria automobilística, devido às suas características, sendo utilizada como agente de reforço em painéis dianteiros, porta-pacotes, laterais de porta e porta-malas de veículos que integram o portfólio de gigantes do setor, como Volkswagen, Honda e General Motors (Santiago, 2011).

São apresentadas nas Tabelas 2.5, 2.6 e 2.7, respectivamente, as propriedades físicas, químicas e mecânicas das fibras de curauá, disponíveis na literatura.

Tabela 2.5: Propriedades físicas das fibras de curauá

Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Densidade (g/cm ³)	Cristalinidade (%)	Referência
-	0,004	-	80,1	Fidelis (2014)
0,115		1,29	-	Pinto (2007)
0,09		-	-	Santiago (2011)
0,092-0,127		1,34	-	Picanço (2005)

Tabela 2.6: Propriedades químicas das fibras de curauá

Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Referência
59,4	19,1	14,4	-	Fidelis (2014)
71,2	12,1	7,4	0,9	Santiago (2011)
58,8	23,8	14,7	-	Ferreira (2016)

Tabela 2.7: Propriedades mecânicas das fibras de curauá

Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação na ruptura (%)	Referência
543,0	63,7	1,0	Fidelis (2014)
492,6	11,5	3,0	Picanço (2005)
605,0	23,0	2,5	Santiago (2011)
464,8	10,0	4,5	Silveira (2018)

2.2.3.1.3 Fibra de sisal

A fibra de sisal é derivada da folha de uma planta (Figura 2.6) da espécie *Agave sisalana* (Costa, 2013). O cultivo de sisal começou antes da chegada dos

européus, no México, mas apenas em 1888 a produção se expandiu para outras regiões tropicais e subtropicais (Ghavami *et al.*, 1999).

Por se tratar de uma planta de fácil adaptação a diferentes condições ecológicas e climáticas, a plantação de sisal foi introduzida nos continentes africano e asiático entre o final do século XVIII e início do século XIX e passou a ser cultivada em países como Quênia, Tanzânia, Brasil, Estados Unidos e China (Anandjiwala & John, 2010).



Figura 2.6: Plantação de sisal (Santiago, 2011)

Segundo Leocadio (2005) o crescimento da planta depende, dentre outros elementos, da disponibilidade de água ao decorrer de um período do ano. A planta possui a capacidade de estocar água na temporada chuvosa e consumi-la na estação seca.

O Brasil está entre os maiores produtores de sisal, juntamente com a Indonésia e alguns países do leste africano. No Brasil, o cultivo de sisal concentra-se na região Nordeste, sendo que os estados da Bahia e Paraíba são os maiores produtores (Martins, 2014).

O cultivo de sisal possui uma grande importância econômica para a região do semiárido do Nordeste, pois um milhão de pessoas, aproximadamente, dependem dela para seu sustento (Mattoso *et al.*, 1997).

As fibras de sisal são denominadas fibras estruturais, pois oferecem sustentação e rigidez às folhas e são extraídas com o uso de desfibradeira (Leocádio, 2005). Em média, cada folha de sisal possui 4% em peso de fibra. Dos 96% restantes, 81%

é líquido (suco) e 15% são os resíduos gerados pelo processo de desfibragem e podem ser utilizados como adubo orgânico e ração animal (Mattoso *et al.*, 1997).

A planta de sisal pode chegar a produzir entre 200 a 250 folhas, e cada folha possui entre 700 a 1400 fibras. As fibras se apresentam por toda extensão longitudinal da folha e de forma praticamente regular, com comprimentos entre 45cm a 120cm. Em cada folha, há três tipos de fibras: fibras mecânicas, fibras de xilema e fibras de fita. As mecânicas são as de maior interesse comercial, uma vez que se apresentam em maior número e dificilmente se dividem ao longo do procedimento de manufatura (Leocádio, 2005).

Segundo Martins (2014) depois da colheita, as fibras passam pelo processo de desfibrilamento (raspagem mecânica) a fim de remover a polpa que envolve a fibra. Posteriormente, são submetidas a etapas de limpeza (lavagem, secagem e escovação) e enfardamento (conforme qualidade e comprimento). Em seguida, os fardos são distribuídos para indústrias que utilizam a fibra de sisal como matéria prima. A fibra de sisal é amplamente aplicada na produção de cordoalhas, tapetes, estofamentos e barbante.

A fibra de sisal é caracterizada por ser uma fibra leve, atóxica, com alto módulo de resistência e pode chegar a custar dez vezes menos que a fibra de vidro. Possui facilidade de modificação superficial, característica típica de fibras vegetais, é abundante no Brasil e possui facilidade no cultivo. Apresenta uma microestrutura helicoidal oca, que é responsável por um mecanismo de falha distinto de outras fibras vegetais, uma vez que os compósitos reforçados por sisal apresentam trabalho de fratura semelhante ao de compósito de polietileno de altíssimo peso molecular reforçado por fibra de vidro (Martins, 2014).

São apresentadas nas Tabelas 2.8, 2.9 e 2.10, respectivamente, as propriedades físicas, químicas e mecânicas das fibras de sisal, disponíveis na literatura.

Tabela 2.8: Propriedades físicas das fibras de sisal

Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Densidade (g/cm ³)	Cristalinidade (%)	Referência
0,08-0,3	-	0,75-1,07	-	Tolêdo Filho (2007)
0,15	-	-	-	Santiago (2011)
0,228	-	1,13	-	Pinto (2007)
-	0,023	-	76,3	Fidelis (2014)

Tabela 2.9: Propriedades químicas das fibras de sisal

Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Referência
74	12	10,1	1,2	Santiago (2011)
59,5	18,4	11,9	-	Fidelis (2014)
60,5	25,7	12,1	-	Ferreira (2016)

Tabela 2.10: Propriedades mecânicas das fibras de sisal

Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação na ruptura (%)	Referência
227,8-10002,3	10,9-26,7	2,8-4,2	Tolêdo Filho (1997)
340,0	12	3,3	Santiago (2011)
484,0	19,5	3,3	Fidelis (2014)
270,9	5,5	5,2	Silveira (2018)

2.2.3.2 Fibras poliméricas

Para ser empregada como reforço de solos, as fibras poliméricas talvez sejam as mais promissoras. Os polímeros apresentam diferentes denominações e comportamentos, de acordo com a sua estrutura química, dando origem a diferentes tipos de fibras (Casagrande, 2005). As fibras poliméricas são divididas em fibras de polipropileno, de polietileno, de poliéster e de poliamida.

A Tabela 2.11 apresenta os valores das propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras poliméricas.

Tabela 2.11: Propriedades físicas e mecânicas das principais fibras poliméricas (Bentur e Mindess, 2007)

Fibra	Diâmetro (mm)	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
Polipropileno	20-400	0,90-0,95	0,45-0,76	3,50-10,00	15,00-25,00
Polietileno	25-1000	0,92-0,96	0,08-0,60	5	3,00-100,00
Poliéster	10-200	1,34-1,39	0,23-1,20	10,00-18,00	10,00-50,00
Poliamida (Kevlar)	10-12	1,44	2,30-3,50	63,00-120,00	2,00-4,50

2.2.3.2.1 Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno (Figura 2.7) são formadas por material termoplástico, que adquire uma consistência plástica com o aumento da temperatura. Os polímeros termoplásticos são formados por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas entre si, de uma maneira que passam deslizar umas sobre as outras (Hollaway, 1994).



Figura 2.7: Fibras de polipropileno com 24 mm de comprimento (Casagrande, 2005)

As fibras de polipropileno são caracterizadas por possuírem uma grande flexibilidade e tenacidade, em função da sua constituição, baixo módulo de elasticidade, em torno de 8GPa, e uma resistência à tração de 400MPa, aproximadamente. São fibras resistentes ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis (Taylor, 1994).

As principais vantagens dessas fibras são o relativo alto ponto de fusão (165°C), a resistência aos álcalis e o baixo custo do material. No entanto, como desvantagens, elas possuem baixa resistência ao fogo, sensibilidade à luz do sol e oxigênio e baixo módulo de elasticidade (Bentur e Mindess, 2007).

2.2.3.2.2 Fibras de polietileno

As fibras de polietileno possuem um baixo módulo de elasticidade, altamente resistentes aos álcalis e são fracamente aderidas à matriz cimentada. Possui alta durabilidade e grandes deformações de fluência, com isso, se elas forem usadas para suportarem elevadas tensões permanentemente em um compósito fissurado, relevantes elongações e deflexões podem ocorrer ao longo do tempo (Hannant, 1994).

Tem sido elaborado o polietileno de alta densidade com o intuito de minimizar o problema da baixa aderência e módulo.

2.2.3.2.3

Fibra de poliéster

O poliéster possui alta densidade, rigidez e resistência, conferindo tais características às fibras feitas desse material. Possuem um aspecto muito semelhante às fibras de polipropileno e podem ser usadas para as mesmas aplicações (Taylor, 1994). O polietileno tereftalato é o poliéster mais conhecido atualmente, cuja sigla é PET. Trata-se do material componente das garrafas plásticas de refrigerantes, águas minerais, óleos de cozinha etc. Seu consumo e produção vem crescendo muito nos últimos anos. No ano de 2016, foram consumidas no Brasil 150 mil toneladas de PET, o que representa um grande problema ambiental, pois estima-se que somente 7% desse material seja reciclado (revista Amanhã, junho de 2016).

2.2.3.2.4

Fibra de poliamida (Kevlar)

As fibras de poliamida são polímeros que possuem longas cadeias de moléculas, geralmente possuem baixas resistência e rigidez, devido ao fato de que suas moléculas são espiraladas e dobradas. No entanto, se as moléculas forem esticadas e reforçadas no momento do processo de manufatura, podem-se alcançar altas resistências e módulo de elasticidade, como é o caso do Kevlar (Taylor, 1994).

O Kevlar, como é comercialmente conhecida, que é a fibra de poliamida aromática, é a fibra orgânica de maior sucesso. Existem dois tipos de Kevlar: o Kevlar 29, que possui resistência mecânica em torno de 3000 Mpa e o módulo de elasticidade médio é de, aproximadamente, 64 GPa, e o Kevlar 49, que possui a mesma resistência que o Kevlar 29, mas um maior módulo de elasticidade, 300 GPa (Hollaway, 1994).

2.2.3.3 Fibras minerais

Dentre as fibras minerais utilizadas, pode-se citar as de carbono, vidro e amianto, apresentadas a seguir:

Fibras de Carbono: Possuem elevada resistência à tração e módulo de elasticidade por volta de 420GPa, baseada na resistência das ligações entre os átomos de carbono e na leveza das fibras. Devido a estas propriedades, não há uma grande aderência entre a matriz e as fibras (Taylor, 1994).

Fibras de Vidro: Apresentam elevada resistência mecânica e estabilidade dimensional, alta resistência química e à corrosão, o que torna resistente ao ataque da maioria dos ácidos e boas propriedades elétricas. Mantêm suas características a uma temperatura de cerca de 340°C, perdendo por volta de 50% de sua resistência à tração. Cerca de 99% das fibras de vidro são confeccionadas a partir do vidro tipo E, que é passível ao ataque dos álcalis.

Fibras de Amianto: São conhecidas, também, como fibras de asbestos, possuem cerca de 1000MPa de resistência à tração e módulo de elasticidade por volta de 160GPa e apresentam uma grande aderência com matrizes compostas por cimento. Trata-se de uma fibra com diâmetro baixo, com 1µm, aproximadamente (Taylor, 1994). Atualmente, está proibida a sua utilização na construção civil em muitos países, devido ao fato de que, quando cortada, libera pequenas partículas que lesam os alvéolos pulmonares quando aspiradas pelo homem.

A Tabela 2.12 apresenta as propriedades mecânicas de fibras minerais.

Tabela 2.12: Propriedades mecânicas das fibras minerais (Curcio, 2001)

Fibra	Densidade (kg/dm ³)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência à tração (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Carbono	1,70 a 1,90	0,30 a 1,80	5,50	290 a 400
Vidro	2,50	5,00	1,50 a 4,50	87,00
Asbesto	2,50	0,62	1,00	160,00

2.2.3.4 Fibras metálicas

As fibras de aço são as fibras metálicas mais utilizadas em reforço de materiais compósitos. As fibras de aço empregadas na construção civil possuem fator de forma entre 30 a 50, comprimento entre 0,1 a 7,62 cm e diâmetro variando entre 0,13 a 0,9 mm. A ruptura do compósito é, normalmente, associada ao arranchamento da fibra, e não a sua ruptura (Casagrande, 2005).

As fibras metálicas possuem resistência à tração na ordem de 1100 MPa, e o módulo de elasticidade é de 200 GPa. Este tipo de fibra tem uma grande variedade de formatos para aumentar a resistência ao arranchamento. Podem apresentar problemas de corrosão, dependendo do meio onde forem inseridas. Para minimizar tal problema, uma técnica utilizada é o banho de níquel (Taylor, 1994). Possui formato variável de forma a aumentar a sua aderência com a matriz (Hannant, 1994).

2.3 Mecanismo de interação solo-fibra: estudos experimentais

Segundo Casagrande (2005) devido ao grande número de combinações de variáveis que alteram de maneira considerável os mecanismos de interação, é viável afirmar que há uma grande complexidade nos parâmetros que influenciam no comportamento solo-fibra. Para uma determinada combinação de variáveis, o resultado obtido pode ser o esperado para uma dada aplicação do compósito, mas pode não ser para outra. Tendo conhecimento das mudanças na estrutura do material reforçado com fibras em comparação ao solo sem reforço, tem-se fundamentos para analisar até que ponto o comportamento mecânico de solos reforçados pode ser esclarecido pelas alterações usuais nos parâmetros aplicados para solos não reforçados.

As propriedades pretendidas com a adição de fibras dependem do tipo de aplicação do compósito, e sem sempre será para o aumento de resistência. Tendo como exemplo projetos de material sismo-resistente, a ênfase será no ganho da capacidade de absorção de energia e ductilidade, bem como a diminuição da queda de resistência pós pico (Martins, 2014).

As características de resistência e deformabilidade do material de reforço tem uma atuação relevante no comportamento tensão x deformação do solo reforçado.

McGown *et. al.* (1978) analisaram o efeito de distintos elementos de reforço em um solo arenoso, nos estados denso e fofo. Os autores constataram que o comportamento tensão deformação do solo está associado, principalmente, às características de resistência e deformabilidade do material de reforço. Foi proposta a divisão de reforço de solos, de acordo com a deformabilidade do reforço, em inclusões extensíveis e não extensíveis. O elemento de reforço extensível é caracterizado por possuir uma maior deformação de ruptura em relação à máxima deformação de tração no solo sem o reforço. Sua principal função, além de contribuir na resistência mecânica, é de aumentar a ductilidade e diminuir a perda de resistência pós-pico. O elemento de reforço não extensível possui deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem o reforço. Contribui na resistência mecânica, mas rupturas catastróficas podem ocorrer caso aconteça ruptura do reforço.

Gray e Ohashi (1983) apresentaram um modelo teórico a fim de prever o comportamento de uma areia reforçada com fibras. Foram executados ensaios de cisalhamento com areia nos estados fofo e denso, reforçada com diferentes fibras (naturais, sintéticas e metálicas). A partir dos resultados obtidos nos ensaios, foi possível observar que a inclusão da fibra aumentou a resistência de cisalhamento de pico e reduziu a queda pós-pico. As fibras com menores comprimentos comportaram-se como uma inclusão extensível e não se romperam durante a execução dos ensaios. O aumento dos comprimentos das fibras gerou o aumento da resistência, entretanto, esse aumento possui um limite, a partir do qual o mesmo efeito não é mais observado.

Gray e Ohashi (1983) investigaram, também, a orientação das fibras em relação à superfície de cisalhamento. Na Figura 2.8 são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto. Observa-se que a inclinação de 60° em relação ao plano de ruptura apresenta a maior influência na resistência ao cisalhamento, porém, a inclinação de 120° confere uma redução na resistência.

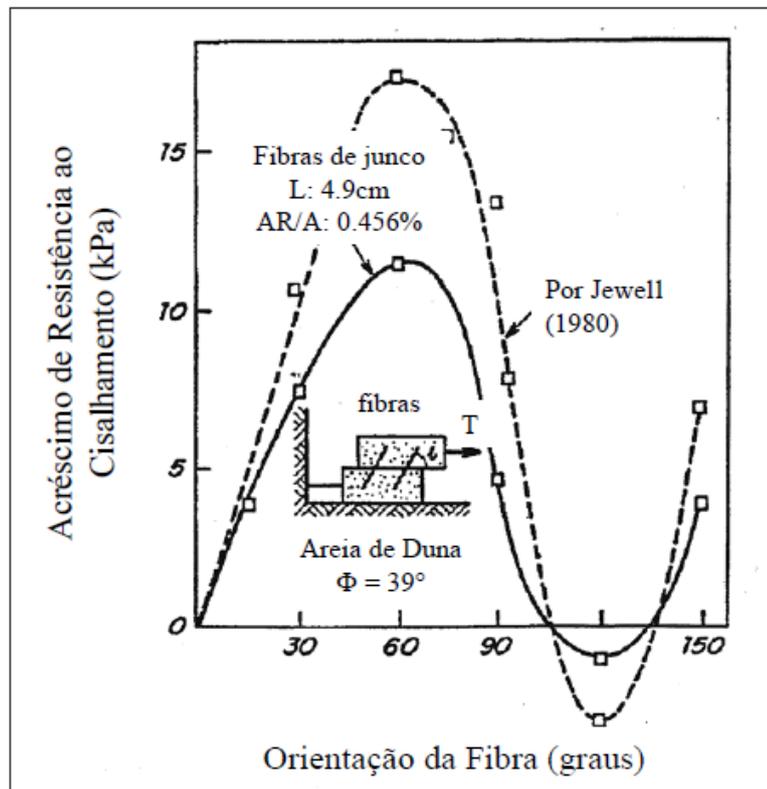


Figura 2.8: Acréscimo de resistência de acordo com a inclinação da fibra (Gray & Ohashi, 1983)

Freitag (1986) avaliou os efeitos da inclusão de fibras na resistência à compressão simples de um solo residual de calcário compactado com uma larga faixa de teores de umidade. Neste estudo, foram utilizadas três diferentes tipos de fibras sintéticas com diâmetro variável, comprimento de 20mm e teor de 1% de fibra em volume. Os resultados obtidos resultaram em aumento da resistência à compressão não confinada, especialmente para teores de umidade próximos à ótima e no ramo úmida da curva de compactação. As curvas tensão x deformação apresentaram que o solo reforçado rompe em uma deformação superior à do solo não reforçado, sendo capaz de absorver maiores energias de deformação.

Gray e Maher (1989) analisaram o comportamento tensão-deformação de misturas solo-fibra, verificando a influência de vários parâmetros, tanto dos solos quanto das fibras, dispostas aleatoriamente na massa de solo. Provaram que a distribuição aleatória das fibras não gera plano de fraquezas, que podem ser desenvolvidos em sistemas de reforço orientado, além de manter a resistência isotrópica. Concluíram, também, que o aumento da relação comprimento/diâmetro (l/d) da fibra torna mais eficiente a contribuição da fibra no aumento da resistência ao cisalhamento, mas até um certo limite.

Shewbridge e Sitar (1989) estudaram o mecanismo de desenvolvimento da zona de cisalhamento de um solo granular reforçado com diferentes tipos de fibra. Foram feitos ensaios em equipamento de cisalhamento direto, com dimensões maiores que as convencionais. Para o solo reforçado, a zona de cisalhamento era mais larga e aumentava com a concentração, rigidez e aderência entre solo e reforço. Os autores concluíram, também, que o aumento da resistência está relacionado com as 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 da partícula de areia. O modelo apresentado pelos autores para avaliar o comportamento do solo reforçado com fibra é fundamentado em um modelo aplicado a concreto reforçado com fibras. Há um pequeno ajuste entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo. Todavia, ainda é necessário um melhor refinamento do modelo, especialmente em relação à estimativa da espessura da zona de cisalhamento.

Maher e Ho (1993) pesquisaram o comportamento de uma argila com diferentes teores de cimento, simulando um material com diferentes valores de coesão. Demonstraram que o aumento da coesão reduz a contribuição das fibras no aumento da resistência de pico do solo.

Maher e Ho (1993) investigaram, também, as propriedades mecânicas e hidráulicas de um compósito caulinita – fibra por meio de ensaios de compressão não confinada, compressão diametral, flexão e condutividade hidráulica. As fibras utilizadas foram de polipropileno, vidro e celulose (madeira). Os autores concluíram que a inclusão aleatória de fibras aumentou consideravelmente a resistência e a ductilidade do compósito, sendo que este aumento era mais observado em baixos teores de umidade. Dentro de uma matriz de solo, para um mesmo teor de fibras, aquelas que apresentam um menor comprimento se apresentam em maior quantidade, sendo maior a probabilidade de estarem presentes na superfície de ruptura, colaborando no aumento da resistência. As fibras de maior comprimento são mais eficazes para a melhoria da ductilidade e da capacidade de absorção de energia pois, após a ruptura, as fibras de menor comprimento são arrancadas mais facilmente se comparadas às de maior comprimento. Os autores também observaram que a adição de fibra aumentou a permeabilidade da argila, sendo este aumento mais significativo em maiores teores de fibras.

Nataraj *et al* (1996) realizaram vários ensaios de laboratório em um solo arenoso e em um solo argiloso, ambos reforçados com fibras de polipropileno, distribuídas aleatoriamente em uma massa de solo. O acréscimo de fibras não gerou mudanças significativas nos parâmetros de compactação do solo, mas ocorreu um acréscimo da resistência ao cisalhamento na areia, sendo este aumento maior para maiores teores de fibra. Para os dois solos estudados, a inclusão de fibras elevou a resistência à compressão simples. Também apresentaram maiores valores de CBR (California Bearing Ratio) com a inclusão de fibras.

Teodoro e Bueno (1998) estudaram o comportamento de dois solos reforçados, um arenoso e um argiloso, com fibras de polipropileno através de ensaios triaxiais não drenados e compressão não confinada. Foram utilizados diferentes teores (0,1% a 1%) e comprimentos de fibra (10 a 30mm). Foram executados painéis de compósitos solo-fibra com o intuito de analisar o padrão de fissuramento deste material quando submetido a variações térmicas. Os autores mostraram que a inclusão de fibras ao solo melhora, no geral, sua resistência ao cisalhamento e reduz a queda de resistência pós pico. Para o solo arenoso, observou-se que as envoltórias tendem a bilinearidade na medida que o teor e o comprimento das fibras aumentam. O efeito da inclusão das fibras nos painéis executados com o solo argiloso foi o de reduzir a dimensão das trincas, mas sem evitar o fissuramento.

Montardo (1999), Montardo *et al.* (2002) e Consoli *et al.* (2002) analisaram os efeitos do acréscimo de fibras distribuídas aleatoriamente no comportamento de um solo arenoso, artificialmente cimentado e não cimentado. Os autores constataram que as fibras relativamente rígidas (fibras de vidro e de PET) proporcionam efeito mais visível na resistência de ruptura, enquanto fibras relativamente flexíveis, como as de polipropileno, por exemplo, exercem efeito mais visível no modo de ruptura e no comportamento último. Observaram, também, que a adição de fibras de PET e de vidro aumentou a resistência à tração e a resistência à compressão da matriz cimentada, entretanto, não houve aumento dessas duas variáveis na matriz reforçada com fibra de polipropileno. A inclusão de fibras de polipropileno na matriz cimentada alterou o comportamento do material na ruptura de frágil para dúctil, uma vez que o acréscimo de fibras de PET e de vidro não alterou o modo de ruptura. Outro ponto observado foi que a adição de qualquer tipo de fibra contribuiu no aumento da capacidade de absorção de energia de deformação de forma mais significativa para maiores comprimentos de fibra. Por último, a rigidez inicial não foi

alterada pela inclusão de fibras de PET e de vidro, todavia, ela é drasticamente reduzida com o acréscimo de fibras de polipropileno.

Specht (2000) investigou os efeitos do acréscimo de fibras poliméricas de diferentes propriedades mecânicas – uma em forma de filamentos e outra fibrilada, formada por pequenos filamentos unidos – com relação às propriedades de resistência e deformabilidade de um solo residual artificialmente cimentado sob condições de carregamento estático e dinâmico. Concluiu-se que as fibras extensíveis (em forma de filamentos), ofereceram melhorias mais significativas das características pós-ruptura do compósito, aumentando de forma expressiva a tenacidade, ductilidade e a vida de fadiga. No entanto, as fibras de caráter inextensíveis (fibriladas) foram mais eficazes na redução da deformabilidade e no aumento de resistência de pico. Estruturas de pavimento semi-rígidos foram dimensionadas, onde foi observado uma significativa redução na espessura da camada cimentada, quando se utilizaram reforços fibrosos em forma de filamentos.

Feuerhamel (2000) explorou o comportamento de três diferentes tipos de solo – uma argila, uma areia-siltosa e uma areia – artificialmente cimentados, com teor de 7% de cimento em relação ao peso seco de material e não cimentadas, com o acréscimo de fibras de polipropileno, no teor de 0,5%, em dois distintos comprimentos (12 e 36mm). As fibras foram aleatoriamente distribuídas na massa de solo. O autor chegou às seguintes conclusões: (1) o acréscimo de fibras de polipropileno causou reduções no módulo de deformação inicial do solo, sendo que a intensidade das alterações é resultado do tipo e das características de cada solo. Para misturas não-cimentadas, os solos menos rígidos (argila e areia siltosa) foram os mais afetados, em contrapartida, a areia quase não sofreu alteração. Nas misturas cimentadas, as reduções foram relevantes para os três solos, sendo mais significativas na argila e na areia siltosa; (2) quanto à resistência ao cisalhamento, o comportamento resistente dos solos não-cimentados reforçados pode ser classificado em três etapas, uma inicial, onde o comportamento é orientado basicamente pela matriz de solo, uma etapa intermediária, na qual o comportamento do material compósito é comandado juntamente pela matriz e pelos elementos de reforço, e uma etapa final, onde o comportamento do material é comandado exclusivamente pelas fibras; (3) para os solos não cimentados, cujas deformações se distribuem por toda a amostra, as fibras formam uma estrutura entrelaçada que aplica uma resistência às deformações radiais

à amostra, aumentando as deformações de compressão do solo. Este resultado depende da adesão entre o solo e as fibras, todavia, para a areia, onde esta adesão é inferior, não se observa alterações significativas na variação volumétrica; (4) para os solos cimentados, onde as deformações se concentram apenas na superfície de ruptura, as fibras atuam, em hipótese, de duas maneiras, (a) o efeito de ancoragem, proporcionado pelas fibras ancoradas nos dois lados da superfície de cisalhamento e que tende a reduzir a dilatância; (b) a redistribuição de esforços, que causa a expansão da superfície de cisalhamento, tendendo a aumentar as deformações volumétricas de expansão.

Estudos experimentais executados por Casagrande (2001) e Casagrande e Consoli (2002) em areia siltosa com inclusão de fibras de polipropileno evidenciaram um crescimento constante da resistência com o aumento da deformação axial, descrevendo um comportamento elasto-plástico de enrijecimento. Segundo os autores, as fibras passaram a contribuir de forma mais relevante para o acréscimo da resistência a partir de 2,5% de deformação axial.

Heineck (2002) verificou os comportamentos hidráulico e mecânico de novos materiais geotécnicos compósitos, com o intuito de adaptar suas características à utilização em barreiras horizontais impermeáveis. Foram misturadas bentonita e fibra de polipropileno com 24mm de comprimento em amostras compactadas de solo, areia, cinza e caulina. Uma das conclusões foi que o acréscimo de fibras influencia no aumento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (c e ϕ) e a resistência ao cisalhamento de pós pico dos materiais compósitos, especialmente a baixas tensões efetivas médias iniciais e após grandes deformações.

Prabakar e Sridhar (2002) usaram fibras de sisal com quatro distintos teores de fibra, 0,25%, 0,5%, 0,75% e 1% em relação ao peso seco do solo, e quatro diferentes comprimentos, 10 mm, 15 mm, 20 mm e 25 mm. Foi analisado o comportamento de um solo reforçado com fibras de sisal dispostas aleatoriamente. As amostras do compósito foram submetidas a ensaios de compactação e ensaios de compressão triaxial. Os resultados obtidos dos ensaios evidenciaram um relevante aumento na tensão desviadora de ruptura e parâmetros de resistência ao cisalhamento (c e ϕ) do solo estudado.

Vendruscolo (2003) avaliou os parâmetros de resistência e deformabilidade de um solo arenoso cimentado e não cimentado, reforçado com fibras, por meio de ensaios triaxiais e ensaios de placa. Com os resultados obtidos, o autor demonstrou

que o efeito da adição de fibras é mais significativa nos maiores comprimentos e teores de fibra, bem como tendo seu efeito mais notável em materiais compósitos com maiores densidades. O autor também concluiu que o diâmetro da fibra e a distribuição granulométrica do solo são outros fatores que influenciam na resistência de pico do compósito.

Consoli *et al.* (2004) estudaram o comportamento de uma areia cimentada e não cimentada reforçada com fibras. As fibras de polipropileno reduziram, extremamente, a propagação de fissuras da areia cimentada, alterando o modo de ruptura de frágil para dúctil, para o maior comprimento de fibra estudado (36 mm), com o aumento da capacidade de energia absorvida, o que não é observado para os outros tipos de fibra estudados. Contudo, torna-se impossível determinar regras de comportamento sem o conhecimento prévio das propriedades dos materiais envolvidos.

Santos (2004) criou um equipamento de compressão confinada com medição de tensão lateral e analisou o comportamento, sobre a trajetória de tensões K_0 , de uma areia e de misturas de areia-fibra, levando em consideração a influência do acréscimo de fibras de diferentes comprimentos. Os resultados obtidos evidenciaram que: (1) a adição de fibras faz-se cada vez mais relevante com o aumento das tensões e que a variação do comprimento das fibras também tem efeito sobre a trajetória de tensões, sendo que, quanto maior o comprimento das fibras, maior a sua influência; (2) a tensão lateral reduz com o acréscimo de fibras, sendo esta redução cada vez mais significativa com o aumento das tensões verticais e proporcional ao comprimento das fibras; (3) a presença de fibras altera o comportamento tensão-deformação no carregamento, especialmente nas tensões iniciais e praticamente mantém a mesma forma da curva da areia sem fibras nas tensões maiores e no descarregamento e (4) os valores de K_0 reduzem com a inclusão de fibras e com o aumento do comprimento das mesmas para todos os níveis de tensões, seja no carregamento ou no descarregamento, mantendo-se praticamente constantes no carregamento e aumentando no descarregamento.

Casagrande (2005) estudou o comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno, submetidos a grandes deformações, que possuem características adequadas para o emprego em *liners* de cobertura de aterros sanitários e aterros sobre solos moles. O autor realizou ensaios triaxiais consolidados, drenados com distintas trajetórias de tensões – compressão axial, descarregamento lateral e p'

constante –, e isotrópicos, com aplicação de altas tensões em amostras de areia e areia-fibra. Também foram executados ensaios do tipo *ring shear* nas matrizes de areia e bentonita, com e sem reforço e provas de carga em placa de 0.30 m de diâmetro sobre espessas camadas de areia compactada, reforçada e não reforçada com fibras. A adição de fibras ao solo aumenta tanto os parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico, quanto a resistência pós-pico das matrizes estudadas após grandes deslocamentos horizontais, sem quedas significativas de resistência pós-pico no caso da matriz arenosa. Para a matriz de alta plasticidade e altos índices de vazios, o acréscimo de resistência tende a se reduzir com o aumento das deformações cisalhantes. Por outro lado, o efeito da inclusão de fibras foi mais evidente para baixas tensões efetivas médias iniciais, menores diâmetros, maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo seu efeito mais visível em misturas mais densas. O comportamento carga recalque do solo arenoso foi significativamente influenciado pela adição de fibras, aumentando, assim, a capacidade de suporte deste e alterando mecanismos de ruptura.

Donato (2007) estudou as tensões em um solo arenoso com acréscimo de fibras de polipropileno através de ensaios de prova de carga em placa circular com 30 cm de diâmetro, com medidas diretas de tensão pela utilização de células de tensão total. Além do mais, empregou-se o método dos elementos finitos (MEF) com o intuito de simular a distribuição de tensões no interior de câmaras de calibração. O autor concluiu que o comportamento carga-recalque da areia e das areias com acréscimo de fibras é semelhante no início do carregamento, até o momento em que a mobilização das fibras, introduzidas na matriz, apresentasse mais efetiva a partir de certo nível de recalque e carga aplicada.

Festugato (2008) pesquisou o comportamento mecânico de uma areia fina microrreforçada com fibras de polipropileno. Realizou-se ensaios triaxiais com medidas internas de deformações em amostras de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. O autor concluiu que os microrreforços ofereceram ao solo um comportamento de endurecimento (*hardening*), que passa a ser mais observado a partir de um certo teor de fibras. Também concluir que as fibras conseguem que a região de estados limite do material seja aumentada com a adição dos microrreforços.

Curcio (2008) avaliou o comportamento mecânico e hidromecânico de amostras de solo compactado reforçado com fibras de PET reciclado. Constatou-se que

o comportamento do compósito em relação à resistência à tração parece ser controlado, à princípio, somente pela matriz de solo. À medida que crescem deformações, o comportamento do material passa a ser controlado pela matriz e pelas fibras. O acréscimo de 1% de fibras de PET possibilita o acréscimo da tensão de tração máxima do solo além de retardar a abertura de fissuras e reduzir a magnitude destas, sem modificar os parâmetros almejados na compactação e sem influenciar, de forma negativa, a condutividade hidráulica do solo.

Girardello (2010) examinou o comportamento mecânico de uma areia não saturada, com e sem acréscimo de fibras de polipropileno, através de ensaios de placa com densidade relativa de 50% e 90%, ensaios triaxiais e de sucção. Observou-se que nos ensaios de sucção, o acréscimo de fibras não proporcionou nenhuma influência na resistência apresentada relacionada a sucção. Em relação aos ensaios de placa, o acréscimo aleatório das fibras ofereceu ao material uma melhoria no comportamento carga-recalque, com influência na mudança dos mecanismos de ruptura. À princípio, o comportamento carga-recalque não difere para o solo reforçado e sem reforço. Essa diferença é observada no instante em que a mobilização das fibras, que são acrescentadas na matriz arenosa, passa a mostrar-se mais efetiva, que acontece somente após certo nível de recalque e de carga aplicada.

Lirer *et al.* (2012) avaliaram o comportamento de uma areia com pedregulho reforçada com fibras de polipropileno. Concluíram que o acréscimo das fibras ao solo oferece uma maior influência para baixas tensões confinantes. Para grandes deformações, o comportamento resistente do material com reforço e sem reforço são semelhantes, ou seja, o acréscimo de fibras a matriz de areia com pedregulhos não ofereceu resistência ao material quando ele sofre grandes deformações.

Palacios (2012) estudou, por meio de ensaios triaxiais de extensão, o comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno no teor de 0,5% em relação ao peso seco do solo. O autor constatou que o acréscimo de fibras de polipropileno à matriz de solo não contribui na resistência à tração do material, além de ainda gerar uma queda na resistência. Realizou-se a medição das fibras após os ensaios e verificou-se que as fibras se alongaram, mas não foi constatado ruptura em nenhuma delas. Para maiores tensões de confinamento a elongação das fibras aumentou consideravelmente.

Bolanõs (2013) avaliou, através de ensaios triaxiais isotropicamente drenados, o comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com fibras de coco

verde. Foram executados ensaios em amostras com teores de fibra moída de 0,5% e 1% e teores de fibra cortada de 0,5%, 0,75%, 1%, 1,25% e 1,5% em relação ao peso seco do solo. O autor constatou um aumento na resistência ao cisalhamento dos compósitos solo-fibra, e um discreto aumento do ângulo de atrito e um expressivo aumento do intercepto coesivo, em relação ao solo puro.

Sotomayor (2014) examinou o comportamento carga-recalque de um solo arenoso reforçado com fibras de coco com 50 mm de comprimento e teor de 0,5%, em relação ao peso seco do solo, aleatoriamente distribuídas, através da realização de ensaios de placa. O autor concluiu que houve um ganho de resistência ao cisalhamento em todas as amostras reforçadas com fibras, além de conseguir uma melhor inibição na propagação de fissuras, comparado aos resultados obtidos na areia pura.

Aguilar (2015) estudou o comportamento de um solo arenoso reforçado com fibras de coco nos teores de 0,25%, 0,5% e 0,75% em relação ao peso seco do solo e comprimentos de 25 mm e 50 mm, por meio de ensaios triaxiais isotropicamente drenados. O autor constatou um aumento na resistência ao cisalhamento em todos os compósitos, observando-se um relevante aumento no intercepto coesivo das misturas e um discreto aumento do ângulo de atrito, em relação aos resultados obtidos para a areia pura.

2.4 Durabilidade das Fibras Vegetais – estudos Experimentais

Tolêdo Filho (1997) executou ensaio de imersão das fibras de coco e sisal em água de torneira conferindo-se as massas em intervalos de 24h. Após 10 dias de imersão, obteve-se a saturação completa, com absorção de 230% pelo sisal e 100% pelo coco, sendo que a maior parte da absorção ocorreu nas primeiras 24h. Através de um micrômetro foi constatado um aumento de diâmetro de 15% no sisal e 9% no coco. Através de ensaios de tração foi possível analisar a durabilidade das fibras até 420 dias após serem imersas em água de torneira. Os resultados obtidos revelam que, ao final do tempo de imersão, as fibras de sisal e coco preservaram, respectivamente 83.3% e 77.2%. Concluiu-se que a provável causa da perda de resistência seja a ação microbiana.

Ghavami *et al.* (1999) garantem que as variações dimensionais da fibra vegetal causada pela variação da umidade e da temperatura interferem na adesão entre o solo e fibras. Também afirmam que a absorção de água pela fibra causa sua expansão, afastando o solo em seu entorno. Quando ocorre diminuição da umidade do composto solo-fibra, a fibra sofre uma redução em suas dimensões, gerando pequenos vazios a sua volta.

Ghavami *et al.* (1999) executaram ensaios de absorção de água com fibras de coco e sisal. Foi observado que, nas primeiras 15 horas, ocorre rápida absorção, que é estabilizada após 150 horas nos valores de 225% e 90%, respectivamente, para as fibras de sisal e coco. Os autores afirmaram que houve aumento nas dimensões longitudinais e transversais após absorção por 96 horas: sisal longitudinal 0,84%, transversal 12,9% e coco longitudinal 0,12% e transversal 9,8%. As fibras vegetais sofrem biodegradação por várias condições como umidade, temperatura, tipo de fibra, teor de matéria orgânica e de umidade do solo, o pH e assim por diante.

Toledo Filho (1997) executou ensaios de tração em fibras de coco e sisal, imergidas em soluções de hidróxido de cálcio (pH = 12) e de hidróxido de sódio (pH = 11) para avaliar a durabilidade das fibras de acordo com a perda da resistência à tração com o tempo. Observou-se que a intensidade do ataque alcalino foi maior na solução de hidróxido de cálcio que na solução de hidróxido de sódio. 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. Entretanto, após 300 dias, toda a sua resistência tinha sido perdida, sendo possível ser facilmente separadas pela força imposta pelos dedos, quando secas.

Para Chesson (1997) a perda de resistência à tração com o tempo é o principal problema que afeta o uso de fibras naturais como reforço de solo. Essa perda de resistência pode ser causada devido a efeitos físicos, químicos ou biológicos, ou devido a uma combinação de todos eles. Pode-se considerar como dano físico a deterioração da lignina que mantém as fibras individuais em conjunto para formar a cadeia de fibra longa. O dano químico pode ser considerado no momento em que as cadeias moleculares nas fibras começam a romper. Danos biológicos são quando bactérias que vivem nas fibras passam a digeri-las. Pode-se considerar a lignina como sendo a primeira variável na determinação das taxas de degradação das fibras. A lignina é resistente à degradação, e que também contribui com a diminuição da degradação de outros componentes celulares.

Isaac & Nair (2005) afirmam que a celulose serve como uma fonte imediata de energia para os microrganismos do solo e assim, contribui na quebra de fibras. A lignina dificulta a degradação de celulose através da sua proteção.

Alvarez & Illman, (2005); Costa, (2013); Alvarez & Illman; (2015) declaram que a celulose é sujeita à ataque por parte de fungos e bactérias, e as fibras vegetais são materiais de base celulósica. As condições de elevada umidade no solo provocadas pela precipitação propiciam a proliferação destes microrganismos acelerando o processo de biodegradação das fibras causando uma rápida deterioração. Segundo Tolêdo Filho (1997) a perda de resistência e ductilidade das fibras é causada pela degradação dos compósitos pela ação de intempéries.

Para Alvarez & Illman (2005), bactérias, actinomicetos e fungos formam a microflora natural do solo e podem agir sinergicamente nele no processo de degradação e se reproduzirem em condições naturais. As bactérias e os fungos são os principais responsáveis pela decomposição microbiana de materiais têxteis naturais. Comparadas aos fungos, as bactérias demandam de mais umidade para o crescimento, de modo que elas não provocam deterioração tão frequentemente como os fungos (Joy *et al.*, 2011)

Joy *et al.* (2011) analisaram o efeito da biodegradação em relação ao tempo e a profundidade do geotêxtil com fibras de coco sob condições climáticas tropicais através de ensaios de resistência à tração. Amostras de geotêxteis de fibra de coco 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. Observaram que a porcentagem de redução da resistência à tração chegou a 70-90% após 120 dias. A biodegradação do geotêxtil foi mais evidenciada à profundidade de 75 cm. Apesar de materiais celulósicos degradarem severamente pela atividade microbiana em profundidades rasas em relação a profundidades maiores, neste caso, a queda da resistência pode ter ocorrido devido ao ambiente alcalino, em vez de a umidade no solo.

Kugan & Sarsby (2011) analisaram a resistência à tração do geotêxtil de palmeira de Buriti para o seu uso em solo reforçado. Os geotêxteis foram enterrados em tanques de areia saturada e parcialmente saturada por um período máximo de 12 meses. A perda de resistência foi maior para os enterrados em solo parcialmente saturado do que os enterrados sob condições totalmente saturadas. Os geotêxteis foram totalmente decompostos após um período de 9 meses enterrados em areia parcialmente saturada. Ao mesmo tempo que, após 12 meses de enterro na areia

totalmente saturada, eles ainda mantinham cerca de 40% de sua resistência inicial. Concluiu-se que, sob a saturação parcial é mais propícia para difusão de oxigênio através do solo e esta disponibilidade de oxigênio favorece a biodegradação por ambos os microrganismos aeróbios e anaeróbios. Ensaio de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) foi efetuado para determinar os níveis de microrganismos nos geotêxteis após serem enterrados. Nos primeiros períodos de enterro, quanto menor for o grau de saturação (S_r igual a 25%) maior foi a presença de microrganismo. Após 3 meses de ensaio, os resultados mostram que não houve significativa influência do teor de umidade na presença organismo.

Costa (2013) observou o comportamento mecânico e a estrutura fibrosa de geotêxteis de fibras de juta e de sisal ao longo do tempo. As fibras foram introduzidas no solo, e o compósito foi exposto a condições ambientais e também a condições controladas, sem ação de agentes climáticos. A degradação foi observada em maior magnitude nas fibras expostas a condições ambientais em relação às fibras submetidas a condições controladas, o que mostra a considerável ação da umidade, temperatura e incidência de radiação solar no processo de biodegradação. A degradação foi observada de forma mais acentuada durante as primeiras semanas de exposição no solo. O acelerado processo de biodegradação ocorre devido a interação de geotêxteis naturais com o solo e agentes climáticos diversos, devido à ação química dos solos e de microrganismos, como pode ser apresentado pela perda significativa de propriedades como a resistência à tração, perda de massa das fibras e degradação da superfície da estrutura fibrosa da juta e sisal. A grande perda nas propriedades mecânicas pode ser explicada pela perda de matéria existente na composição das fibras. A perda de massa das amostras de fibras em função do tempo de exposição pode ser relacionada com a perda dos constituintes da composição química das fibras (hemicelulose, celulose, lignina entre outros).

Martins (2014) analisou o acréscimo de fibras curtas de sisal em compósitos solo-cimento auto adensáveis, na criação de um material que possa ser útil na produção de painéis monolíticos para construções térreas. Foram utilizadas pozolanas com o intuito de consumir o hidróxido de cálcio, produzido pela hidratação do cimento e aumenta a alcalinidade da matriz, que degrada as fibras naturais. Ensaio de flexão foram realizados para a verificação da durabilidade, em quatro pontos após etapas de envelhecimento natural (4 e 8 meses) e acelerado. Observou-se que

os compósitos mantiveram os mesmo valores de tensão de ruptura e valores próximos de deformação na ruptura após 8 meses de envelhecimento natural e ao fim de 25 ciclos de molhagem e secagem, além de conservar as propriedades mecânicas pós-fissuração (queda pós pico, tenacidade, modo de fratura). A preservação das propriedades mecânicas destaca a não degradação do reforço fibroso para o período de exposição estudado.

Carvalho *et al.* (2014) avaliou a degradação no comportamento mecânico de fibras naturais de origem vegetal usadas em geotêxteis, causada por envelhecimento acelerado por agentes agressivos simulados em laboratório, e em condições reais, expondo compósitos solo-fibra às condições climáticas de transição primavera verão por um período de três meses. Usou-se solo residual granítico (solo ácido com pH 5), com classificação unificada SM, e três tipos de fibras: a de sisal, de banana e a de coco. As fibras foram agrupadas em intervalos representativos de massas lineares com o objetivo de estudar seu efeito no desempenho. Observou-se que as amostras de sisal e banana submetidas ao ensaio de envelhecimento em solo (condições de calor e umidade, a pressão e abrasão exercidas pelo solo sobre as fibras) mostraram maior perda de resistência ao longo do tempo em relação às amostras submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado em QUV. Entretanto, as fibras de coco apresentam-se com resultado inverso. Constatou-se que a maior perda de resistência acontece nos primeiros 15 dias de exposição (360 horas), gerando uma redução da resistência à tração superior a 50% da sua resistência inicial, e ao final do primeiro mês de exposição verificou-se uma estabilização da perda de resistência, mantendo-se praticamente inalterável. As fibras de coco são as que apresentam menor degradação na investigação das fibras estudadas por microscópio eletrônico de varredura, para intervalos de massas lineares semelhantes. As fibras de sisal e banana apresentam a presença de orifícios e fissuras logo nas primeiras 360 horas de exposição. A elevada concentração de lignina é a principal responsável pela lenta degradação das fibras de coco. A lignina é responsável por oferecer resistência às fibras naturais à radiação ultra-violeta, o que justifica a maior resistência à tração das fibras de coco nos ensaios de envelhecimento em solo, podendo então desempenhar varias funções como separação e reforço de solos. Para oferecer proteção, as fibras de sisal poderão ser empregadas em geotêxteis, pois as fibras podem começar a sua degradação quando a vegetação inicia o seu crescimento, tornando-se então biomassa, possibilitando que a vegetação desenvolva-se mais rapidamente. As

fibras de banana dificilmente são aplicadas em geotecnia, pois apresentam degradação muito acentuada.

Fidelis (2014) analisou o comportamento mecânico de compósitos cimentícios com acréscimo de fibra de juta. Foi utilizada uma matriz com baixo teor de hidróxido de cálcio para aumentar a durabilidade dos compósitos, além de um tratamento superficial do tecido de juta com o polímero estireno butadieno. O polímero impede o contato da fibra com os produtos de hidratação, melhorando a estabilidade volumétrica da fibra (devido ao seu comportamento hidrofóbico) e a transferência de tensões fibra-matriz. Por meio de processos de envelhecimento acelerado (5, 10, 15, 20 e 25 ciclos de molhagem e secagem) e natural (4, 8 e 12 meses de exposição ao intemperismo), a durabilidade dos compósitos foi investigada. Análises termogravimétrica e microestrutural e ensaios de tração direta foram realizados após envelhecimento. O tratamento com polímero forneceu o aumento da aderência, resistência e durabilidade dos compósitos, que apresentaram bom comportamento mecânico até 20 ciclos de molhagem e secagem e 8 meses de exposição ao envelhecimento natural.

Silveira (2018) investigou o comportamento mecânico e a durabilidade de solos reforçados com fibras de vegetais aleatoriamente distribuídas, submetidos ao envelhecimento natural por exposição às condições ambientais diversas por 8 meses. Para tal fim, foram selecionados um solo arenoso como a matriz do compósito, dois tipos de fibras vegetais (sisal e curauá) como elementos de reforço do compósito. O programa experimental consistiu na realização de ensaios triaxiais convencionais em amostras de areia e areia-fibras no tempo zero (de controle) e em compósitos expostos aos agentes do ambiente externo por até 8 meses, além de ensaios de tração direta após cada período de exposição (60, 120 e 240 dias). As fibras de sisal e curauá apresentam altos valores de resistência à tração, o que as caracterizam como fibras de alto desempenho, e baixos valores de capacidade de deformação. Estes valores são obtidos como resultado da presença de altos e semelhantes valores de celulose em ambas as fibras. No entanto, a fibra de curauá apresenta melhor comportamento mecânico o que poderia ser explicado tanto pelo seu maior índice de cristalinidade relacionada a celulose quanto pela sua maior área efetiva de seção transversal (paredes celulares secundárias mais espessas). Foi constatado, também, que o envelhecimento natural afetou o mecanismo de ruptura dos compósitos areia-fibra de sisal e curauá com e sem tratamento expostos aos agentes climáticos. O

comportamento de endurecimento (strainhardening) adquirido com a adição das fibras nas amostras de controle foi gradualmente sendo perdido com o aumento do tempo de exposição o que, conseqüentemente, afeta a capacidade de absorção de energia destes materiais. A perda do comportamento "strainhardening" foi mais acentuada no compósito reforçado com fibras de curauá, sendo registrado uma grande perda logo no primeiro tempo analisado (2 meses). Tal observação indica que a fibra de curauá seja mais susceptível à degradação em ambientes naturais do que a fibra de sisal.

3 Programa experimental

3.1 Considerações iniciais

O programa experimental tem como objetivo principal investigar, identificar e comparar os efeitos da adição de fibras de coco, sisal, curauá e de polipropileno nas propriedades mecânicas de um solo arenoso, assim como a sua degradação em relação ao tempo, em condições de campo, desenvolvendo um programa por etapas, descrito a seguir.

A primeira etapa descreve as propriedades físicas e de caracterização dos materiais utilizados na pesquisa. Na segunda etapa será descrito o método utilizado na preparação dos corpos de prova para os ensaios traxiais convencionais nos compósitos e de tração direta nas fibras. Na terceira etapa são descritos detalhadamente, os métodos e procedimentos que são necessários para a execução dos ensaios realizados.

Os ensaios triaxiais convencionais deste programa experimental foram executados nos equipamentos triaxiais do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC- Rio (LGMA) e os ensaios de resistência à tração foram realizados na máquina de ensaios universais MTS modelo 810 com capacidade de carga de 250 kN no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM).

3.2 Materiais utilizados

3.2.1 Solo (matriz do compósito)

A areia (Figura 3.1) utilizada é proveniente de uma jazida localizada no município de Itaboraí – RJ. Trata-se de uma areia média, limpa e de granulometria

uniforme, com comportamento mecânico bem definido e estável, de modo a facilitar a interpretação do efeito causado pela adição de fibras.

Os ensaios de caracterização do material foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)



Figura 3.1: Amostra da areia utilizada como matriz

3.2.1.1 Caracterização física

Os ensaios para a caracterização física do solo arenoso foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC – Rio e foram determinados de acordo com os procedimentos a seguir:

- Ensaios de granulometria (NBR 7181 – ABNT, 2016);
- Massa específica real dos grãos (NBR 6458 – ANBT, 2016);
- Índices de vazios mínimo e máximo (NBR 12051 – ABNT, 1991; NBR 12004 – ABNT, 1990).

3.2.1.2 Caracterização mecânica

Para a determinação do comportamento mecânico do solo e dos compósitos areia/fibra utilizados nesta pesquisa, foram realizados ensaios triaxiais convencionais no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC – Rio. São mostrados,

a seguir, a metodologia realizada na preparação das amostras, os métodos de execução dos ensaios e o equipamento usado para a realização do ensaio triaxial.

3.2.1.2.1

A prensa triaxial

Todos os ensaios realizados para determinar os parâmetros de resistência na prensa triaxial, seja a matriz de solo reforçada com fibras ou não, foram do tipo consolidado isotropicamente drenado (CID).

O equipamento utilizado é da marca Wykeham-Farrance Eng Ltd., modelo WF10071), disponível no Laboratório de Geotecnia e Meio ambiente da PUC – Rio. A prensa possui um motor elétrico coligado a um sistema de engrenagens que possibilita a adoção de diversas velocidades de cisalhamento e conta com uma capacidade máxima de 10 toneladas-força. A câmara triaxial é de acrílico e suporta uma pressão confinante máxima de 1000 kPa e é própria para corpos de prova com 1,5 polegadas de diâmetro.

A célula de carga utilizada para medir os acréscimos de força axial é da marca ELE International Ltd., possui capacidade de 50 kN, com resolução de 0,1 kN. Para aferir a tensão confinante na câmara e a contrapressão, utilizou-se um transdutor de pressão da marca Schaevitz, com capacidade máxima de 150 psi (aproximadamente 1034 kPa). Para analisar o deslocamento axial do corpo de prova, usou-se um LSCDT (*Linear Strain Conversion Displacement Transducer*) de 25,4 mm da Wykeham-Farrance. A variação volumétrica sofrida pelo corpo de prova foi medida por um medidor de variação de volume do tipo Imperial College, projetado e construído na PUC-Rio (de Campos, 1985).

A pressão confinante e a contrapressão foram aplicadas por meio de um sistema de ar comprimido, regulado por um painel de válvulas de pressão, ligado à rede de ar comprimido do laboratório.

Para a gravação dos dados lidos nos transdutores, utilizou-se o sistema de aquisição de dados QuantumX da empresa alemã HBM, com amplificador universal MX840A e o software CatmanEasy, da HBM.



Figura 3.2: Prensa triaxial

3.2.1.2.2 Parâmetros de moldagem

Foi adotado um valor de densidade relativa de 50%, que representa um índice de vazios de 0,84 e massa específica seca de 1,42 g/cm³. O valor de densidade relativa foi o mesmo tanto para o solo arenoso sem reforço quanto para o compósito solo-fibra.

A baixa densidade relativa foi utilizada com a finalidade de ajudar na percepção do mecanismo de interação das fibras de oferecer resistência ao compósito. Na prática, apesar de ser costumeiro em pesquisas de solos reforçados com fibras, não trabalha-se com baixas densidades relativas.

Foi utilizado um teor de umidade de 10% para as amostras de solo arenoso sem reforço e com reforço. Foi necessário o umedecimento para evitar a segregação solo-fibra. A mistura foi executada manualmente, até ser alcançada a homogeneização, verificada visualmente.

Os parâmetros de moldagem dos corpos de prova de solo arenoso e solo-fibra foram os mesmo adotados por Casagrande (2005), Girardello (2010), Santiago

(2011), Santos (2012), Sotomayor (2014), Louzada (2015), Aguilár (2015), Senez (2016) e Silveira (2018).

3.2.1.2.3 Preparo das amostras para o ensaio triaxial

Os corpos de prova, com dimensões de 40 mm de diâmetro e 86 mm de altura, foram moldados e compactados diretamente no pedestal da prensa triaxial, no interior de membranas impermeáveis e flexíveis, com o apoio de um molde tri-partido adequado para este tipo de moldagem. A compactação foi de forma manual, e em três camadas, sendo controladas pelo peso da mistura e a altura de cada camada, de forma a se obter a densidade relativa almejada. A Figura 3.3 mostra o corpo de prova no equipamento triaxial.



Figura 3.3: Corpo de prova no equipamento triaxial

3.2.1.2.4 Ensaio triaxial convencional

Os ensaios triaxiais seguiram os mesmos procedimentos dos ensaios descritos por Head (1998) e pelos ensaios já realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC – Rio.

Após a moldagem do corpo de prova na câmara triaxial, as amostras passavam pelo processo de saturação por percolação, sendo o gradiente de pressão entre base e topo de 5 kPa, gerando um sentido de percolação da base para o topo. A amostra foi sujeita a uma tensão confinante efetiva de 10 kPa, para evitar o fluxo preferencial entre a membrana e o corpo de prova.

Esse processo foi controlado por meio da medição do parâmetro B de Skempton, até que alcançasse um valor igual ou superior a 0,95. Posteriormente, ajustou-se a tensão confinante para a fase de adensamento isotrópico na amostra.

Os ensaios foram executados com tensões confinantes efetivas de 50, 100 e 150 kPa. Esses valores estão de acordo com os princípios realistas de algumas aplicações de engenharia, como fundações rasas assentadas nas camadas reforçadas do solo.

A velocidade de cisalhamento adotada em todos os ensaios foi calculada de acordo com o critério apresentado por Head (1998). Foi utilizada a velocidade de 0,030 mm/min. Por se tratar de ensaios drenados, as válvulas de drenagem permaneciam abertas durante todo o processo de cisalhamento. Esta etapa era finalizada quando o corpo de prova atingia 20% de deformação axial.

Em grande parte dos casos, foi constatado uma forma de ruptura plástica com embarrigamento na parte central do corpo de prova. Para este tipo de ruptura, utilizou-se a fórmula de correção de área recomendada por Bishop e Henkel (1962). O critério de ruptura adotado foi o máximo valor da tensão desviadora, para o caso onde a curva tensão-deformação manifestou pico. Nas curvas que não manifestaram picos, foi adotado o valor da deformação axial máxima (20%).

Os resultados obtidos através dos ensaios triaxiais são mostrados a partir dos gráficos tensão desviadora vs deformação axial (q vs ϵ_a), deformação volumétrica vs deformação axial (ϵ_v vs ϵ_a), tensão efetiva média vs tensão desviadora (p' vs q).

Para a obtenção da tensão efetiva média e tensão desviadora, utilizou-se as equações a seguir:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3}{3} \quad (3.1)$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (3.2)$$

Sendo σ'_1 a tensão principal maior e σ'_3 a tensão principal menor.

O intercepto coesivo (c') e o ângulo de atrito (ϕ'), parâmetros de resistência ao cisalhamento de Mohr-Coulomb, foram obtidos da relação entre a inclinação da linha de ruptura (η) e o intercepto da linha de ruptura no espaço p-q (Q_0). Para a obtenção do intercepto coesivo e ângulo de atrito, utilizou-se as equações a seguir:

$$\sin \phi' = \frac{3 \cdot \tan \eta}{6 + \tan \eta} \quad (3.3)$$

$$c' = \frac{3 - \sin \phi'}{6 \cdot \cos \phi'} \cdot Q_{10} \quad (3.4)$$

A capacidade de absorção de energia (E_{def}) também é apresentada. Ela é determinada pelo produto entre a tensão desviadora e a variação da deformação axial correspondente. A capacidade de absorção de energia avalia a capacidade que o material possui em absorver energia durante a deformação.

3.2.2 Fibra (elemento de reforço)

Para a determinação do comprimento da fibra utilizada na pesquisa, foram considerados os valores adotados na literatura. Normalmente, em geotecnia trabalha-se com teores inferiores a 1%. Existem estudos que relatam problemas de trabalhabilidade e baixa resistência do material quando se utiliza teor de 1.0% (Pinto, 2007; Leocádio, 2005; Prabakar e Sridhar, 2002).

Prakabar & Sridhar (2002) assumiram 0,25; 0,5; 0,75 e 1% de teor de fibras de sisal e comprimentos de 10, 15, 10 e 25 mm. Leocádio (2005) analisou teores de 0,25% a 1,0% de fibras de sisal e comprimentos de 10, 15, 20 e 25 mm. Casagrande (2005) adotou teor de 0,5% de fibra de polipropileno com comprimento de 24 mm.

Santiago (2011) adotou 0,5% de tor de fibras de sisal e de curauá e comprimentos de 24, 36 e 50 mm como reforço de solo. Sotomayor (2014) utilizou fibras de coco a um teor de 0,5% e 50 mm de comprimento. Senez (2016) utilizou teor de 0,5% de fibra PET com comprimentos de 38 mm e 56 mm. Silveira (2018) utilizou fibras de sisal e curauá a um teor de 0,5% e comprimento de 25 mm em solo arenoso.

Consoli *et al.* (2007) apresentaram que um comprimento de 24 mm e um teor de fibra de 0,5% são o mínimo necessário para que ocorra um acréscimo de resistência considerável. Teores de fibra superiores a 0,5% e comprimentos maiores que 24 mm tornam difícil a homogeneidade da mistura solo-fibra.

Baseando-se em estudos anteriores, e com a finalidade de comparar este estudo com pesquisas anteriores, será adotado neste trabalho o comprimento de 25mm no teor de 0,5% de fibra, em relação a massa seca do solo.

3.2.2.1 Fibras naturais

As fibras de coco utilizadas nesta pesquisa foram beneficiadas pela ECOFIBRA, sendo a Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB) e a Secretaria de Conservação e Serviços Públicos (SECONSERVA) as responsáveis pela segregação e coleta, sendo os trabalhos controlados pela Prefeitura do Rio de Janeiro.

Esta fibra foi escolhida por apresentar diferentes características físicas e químicas em relação às fibras de sisal e curauá: possui um elevado teor de lignina, baixo teor de celulose e maiores diâmetros.



Figura 3.4: Fibra de coco cortada, com 25 mm de comprimento

Para a preparação das misturas, as fibras foram desmaranhadas manualmente, uma a uma e cortadas em comprimentos de 25mm, aproximadamente, e foram distribuídas de forma aleatória na areia.

Por ser tratar de um material natural, os diâmetros da fibra são variáveis e, por isso, há uma grande variação de propriedade mecânica entre as fibras.

As fibras de sisal foram compradas da Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira (APAEB), do município de Valente, Bahia. As fibras de curauá foram compradas da empresa Pematec Triangel do Brasil, da cidade de Santarém/ Pará.



Figura 3.5: Fibras de sisal e curauá (Silveira, 2018)

As fibras vegetais utilizadas foram escolhidas por apresentarem boas propriedades mecânicas e como uma alternativa de matérias primas de fontes renováveis.

Após o processo de corte das fibras no comprimento de trabalho (25mm), foi necessário realizar uma lavagem em água quente (100°C) e secagem em estufa de 60°C nas fibras, devido à presença de resíduos na superfície da fibra.

3.2.2.2 Fibra sintética

A fibra sintética utilizada neste estudo experimental foi a de polipropileno, produzida pela Maccaferri do Brasil Ltda. É encontrada no mercado em forma de pequenos filamentos.

A utilização de fibra sintética neste estudo experimental tem como objetivo verificar a ocorrência de degradação em compósitos reforçados com este tipo de fibra, expostos a agentes climáticos e ao tempo. Além disso, caso ocorra degradação, comparar os resultados obtidos com os de compósitos reforçados com fibras vegetais, expostos sob as mesmas condições.

Por se tratar de fibra sintética, suas características são uniformes e bem definidas, e é facilmente encontrada no comércio. Possuem grande aplicabilidade como

reforço para o concreto. As fibras cedidas pela empresa possuem comprimento de 25 mm. A Tabela 3.1 apresenta algumas propriedades mecânicas da fibra utilizada.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas da fibra de polipropileno (Maccaferri)

Propriedades Mecânicas	Valor
Diâmetro (μm)	18
Densidade relativa	0,92
Módulo de elasticidade (GPa)	5
Resistência à tração (MPa)	300
Deformação axial na ruptura (%)	80



Figura 3.6: Fibra de polipropileno, com 25 mm de comprimento (Sotomayor, 2018)

3.2.2.3 Caracterização pelo ensaio de tração direta

Para o comportamento mecânico das fibras, foram executados ensaios de tração direta nas fibras. Os ensaios foram efetuados em uma máquina de ensaios universais MTS modelo 810/250 (Figura 3.7). Foi utilizada uma célula de carga com capacidade de 100N, e a taxa de deslocamento do ensaio foi de 0,1 mm/min.



Figura 3.7: Máquina de ensaios universais MTS 810/250

Os corpos de prova foram executados de acordo com ASTM C1557 (2008) e a distância entre as garras foi de 15mm. Foram selecionados 15 bons resultados. Os ensaios de tração direta foram executados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio.

3.2.3 Compósitos sem exposição

Os principais objetivos da investigação do compósito sem exposição foram para verificar os efeitos do acréscimo de fibras aleatoriamente distribuídas nas propriedades mecânicas de um solo arenoso e comparar o comportamento mecânico

do compósito no tempo zero (amostras de controle) com os compósitos que sofreram envelhecimento natural.

Os elementos de reforços utilizados foram fibras de coco e fibras de polipropileno. Neste caso, não houve exposição das fibras ao envelhecimento natural, ou seja, o contato entre fibras e a matriz arenosa deu-se imediatamente antes da execução dos ensaios triaxiais, realizados no Laboratório de Geotécnica e Meio Ambiente da PUC – Rio.

3.2.3.1

Moldagem das amostras de compósito solo-fibra

Os métodos empregados nos ensaios triaxiais foram apresentados na Seção 3.2.1.2.4, os critérios de moldagem dos corpos de prova e a metodologia utilizada na confecção das amostras para os ensaios triaxiais foram mostrados nas Seções 3.2.1.2.2 e 3.2.1.2.3, respectivamente.

Para os compósitos solo-fibra, foram utilizados os mesmos valores de densidade relativa (50%) e teor de umidade (10%) que foram adotados nas amostras de solo arenoso. Mesmo após a adição de fibras na matriz de solo, foi possível atingir eficientemente esta densidade relativa.

Com o teor fixo de fibras (0,5%) em relação ao peso seco do solo, foi calculada e fixada a massa de fibras a ser acrescida à matriz arenosa, e chegou-se no valor de 0,77g de fibras, de acordo com a areia utilizada no estudo e as dimensões do molde tri-partido, onde o corpo de prova foi diretamente moldado.

Para uma melhor homogeneização, em todas as amostras os componentes foram adicionados na sequência solos, fibras e água. A mistura e confecção dos corpos de prova ocorriam imediatamente antes da realização do ensaio triaxial. Durante todo este processo, todos os cuidados foram tomados para se evitar perdas de materiais e umidade por evaporação.

3.2.3.2 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica dos compósitos solo-fibra sem exposição se deu por meio de realizações de ensaios traixiais isotropicamente drenados (CID), como descrito na Seção 3.2.1.2.4

3.2.4 Compósitos submetidos ao envelhecimento natural

Nesta seção são mostrados os critérios para a confecção dos corpos de prova de matriz arenosa, reforçado com fibras de coco e polipropileno, submetidos à exposição aos agentes climáticos diversos por 8 meses.

O principal objetivo foi avaliar os efeitos da degradação natural quanto ao comportamento mecânico dos compósitos reforçados com fibras por meio de ensaios de compressão triaxial, realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC – Rio. As amostras foram ensaiadas em diferentes intervalos de tempo de exposição (60, 120 e 240 dias) com o intuito de comparar as variações nos resultados de diferentes tempos de degradação.

3.2.4.1 Moldagem das amostras de compósitos expostas às condições ambientais ao longo do tempo

Para analisar os efeitos da degradação dos compósitos, que foram sujeitos às condições reais de campo, sofrendo envelhecimento ao longo do tempo, foram realizados dois cenários de estudo: matriz de solo arenosa reforçada com fibra no tempo zero, sem exposição, como apresentada na Seção 3.2.3, e solo reforçado com fibras com exposição.

Para a moldagem dos corpos de prova submetidos ao envelhecimento natural, foram utilizados tubos PVC bipartidos com 11 cm de altura e 4,7 cm de diâmetro. Para conter o compósito, um geotêxtil foi colado na base. O solo reforçado exposto foi confeccionado utilizando os mesmos critérios de moldagem das amostras de solo arenoso e solo reforçado com fibras sem exposição, apresentados nas Seções 3.2.1.2.2 e 3.2.3.1, respectivamente.

As amostras foram compactadas manualmente, e foram divididas em cinco camadas, sendo que a massa da mistura e a altura das camadas foram controladas durante todo o processo a fim de se obter a densidade relativa desejada (Figura 3.8). Cada camada continha a quantidade exata de cada material necessária para cada camada da amostra submetida ao ensaio triaxial.



Figura 3.8: Moldagem dos corpos de prova submetidos ao envelhecimento natural

As Figuras 3.9 e 3.10 mostram o local escolhido para a exposição e os corpos de prova expostos, respectivamente. Iniciou-se entre os meses de setembro e outubro, período de transição entre inverno e primavera no hemisfério sul, sendo executados ensaios nos tempos 60, 120 e 240 dias com o propósito de traçar as curvas que associem as variáveis resistência e tempo.

Os corpos de prova foram submetidos à ação de diversos agentes climáticos como variações de temperatura do solo, fruto não só da transição do dia para a noite, mas também de estações, variação da umidade do solo, resultado da precipitação,

como também da radiação solar, que influencia no processo de degradação das fibras (Silveira, 2018).



Figura 3.9: Local escolhido para exposição dos corpos de prova aos agentes climáticos (Nilo Lima. Acervo Núcleo de Memória)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1612906/CA

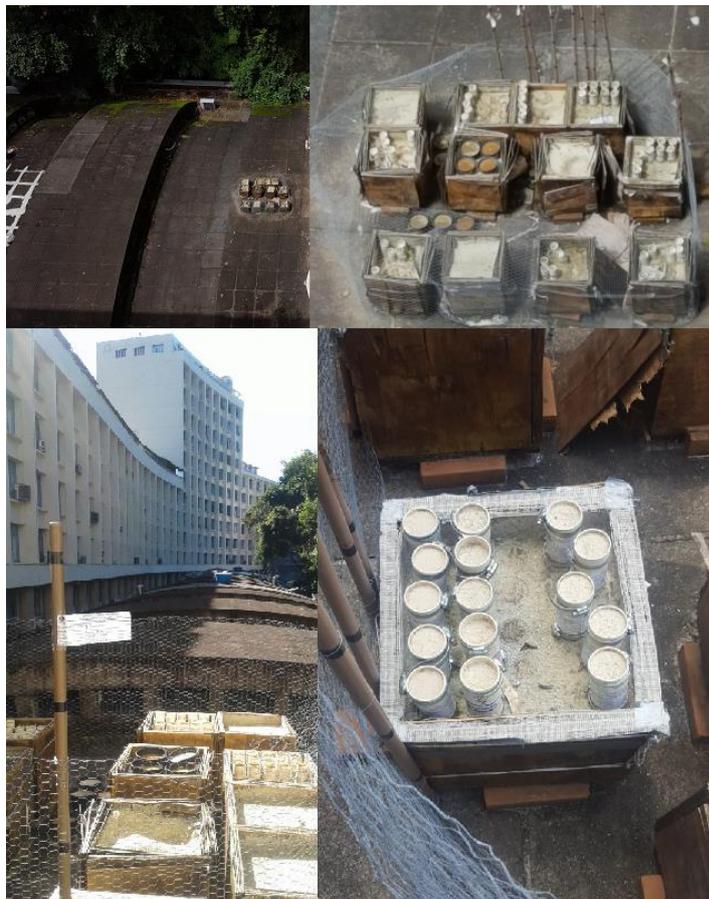


Figura 3.10: Corpos de prova expostos

3.2.4.2

Preparo das amostras de compósitos expostas às condições ambientais ao longo do tempo para os ensaios triaxiais isotropicamente drenados

Logo após cada intervalo de tempo definido de exposição, três tubos eram retirados do ambiente externo. Posteriormente, no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC – Rio, as camadas eram separadas (Figura 3.11) e acondicionadas em cápsulas separadas. As camadas de base e topo eram descartadas e as três camadas centrais eram preparadas para serem submetidas ao ensaio triaxial convencional, nas mesmas condições que foram submetidas as amostras sem exposição. Nesta etapa, havia a correção da umidade ($w=10\%$), homogeneização e compactação diretamente no pedestal da prensa triaxial, com o controle da altura de cada camada para se obter a densidade relativa desejada.

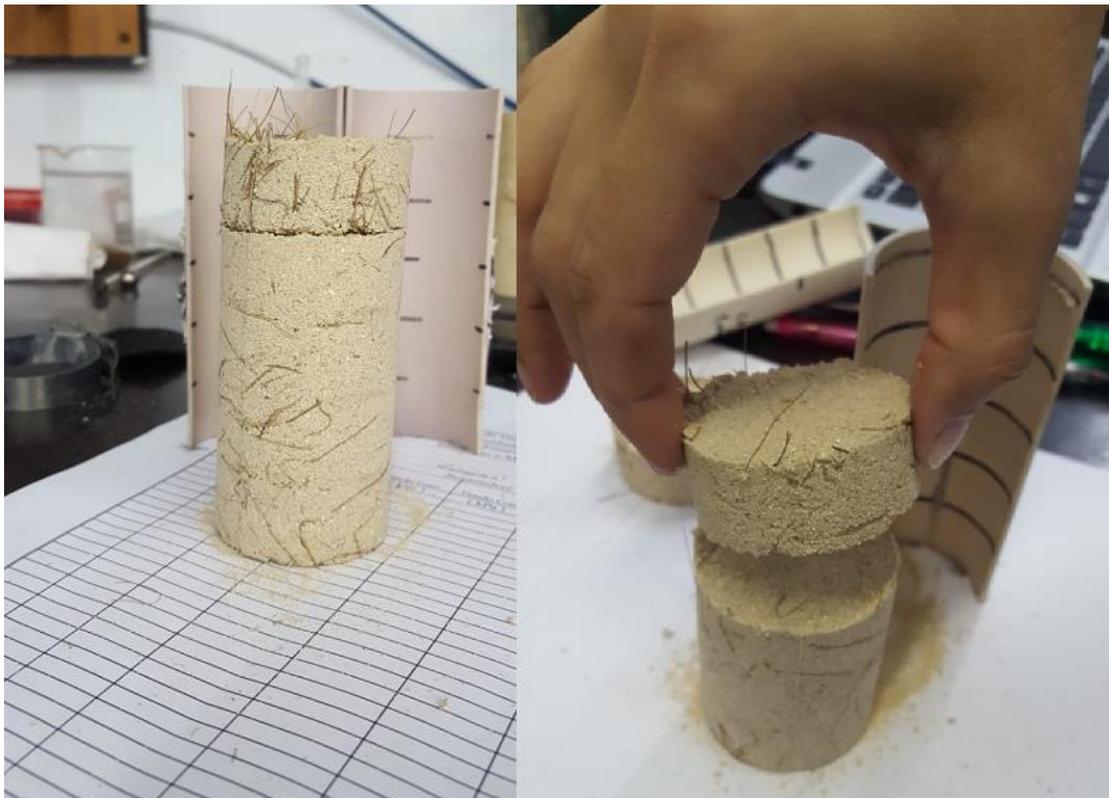


Figura 3.11: Amostra de solo reforçada com fibra de coco após o período de exposição

3.2.5

Fibras submetidas ao envelhecimento natural para ensaios de tração

Nesta seção são mostrados os métodos de confecção dos corpos de prova e os parâmetros utilizados para a realização dos ensaios de tração direta nas fibras de curauá, coco e sisal, adicionadas ao solo como reforço. Os compósitos foram expostos a diversos agentes climáticos por um período máximo de 8 meses.

O principal objetivo foi analisar e apontar os efeitos dos agentes da degradação devido ao envelhecimento natural sobre o comportamento mecânico das fibras vegetais. Ensaios de tração direta foram realizados nas fibras após diferentes períodos de exposição (60, 120 e 140 dias).

As fibras vegetais foram analisadas em duas diferentes profundidades (75cm e 125cm) com o objetivo de avaliar a degradação em ambientes onde não há incidência de radiação solar e grande variação de umidade, como ocorre em menores profundidades.

3.2.5.1

Moldagem das amostras de compósito solo-fibra expostas às condições ambientais ao longo do tempo

Para a confecção das amostras, foi utilizado uma série de tubos PVC com 125 cm de altura e 20 mm de diâmetro, com um geotêxtil aderido na base para conter o solo reforçado. O compósito foi preparado com os mesmos parâmetros de densidade relativa (50%) e umidade (10%) de moldagem das amostras de controle e das amostras submetidas ao envelhecimento natural para o ensaio triaxial.

Para facilitar a compactação, as amostras foram divididas em cinco camadas. Cada camada teve a massa dos componentes do compósito devidamente pesadas, para um melhor controle dos parâmetros. As camadas foram compactadas manualmente, com um controle das alturas para se obter a densidade desejada.



Figura 3.12: Corpos de prova prontos para serem expostos

As amostras foram expostas no mesmo local que as amostras de compósitos submetidos ao ensaio triaxial, por um período de 8 meses, sendo que foram realizados ensaios nos intervalos de tempo de 60, 120 e 240 dias para relacionar as variáveis resistência e tempo através das curvas traçadas.

Os corpos de prova ficaram sujeitos à ação de diversos agentes climáticos: variações de temperatura do solo arenoso devido à transição do dia para a noite, troca de estações, diferentes umidades do solo resultantes da precipitação, radiação solar e o processo de biodegradação das fibras.

3.2.5.2 Preparo das amostras

Os tubos eram retirados respeitando o seu período de exposição. Posteriormente, eles eram cortados a cada 25 cm (Figura 3.13). As profundidades e o tipo de fibra eram identificados no momento do corte. Os compósitos solo-fibra localizados nas profundidades determinadas para a realização dos ensaios de tração direta nas fibras eram retirados e lavados em peneiras para separar as fibras da matriz arenosa. Após essa etapa, as fibras retidas na peneira eram identificadas e secas em estufa a 60°C e, preparadas para o ensaio de tração direta, conforme mencionado na Seção 3.2.2.3.



Figura 3.13: Corpos de prova cortados, após o período de exposição

3.2.5.3 Ensaio de tração direta nas fibras submetidas ao envelhecimento natural

Os ensaios de tração direta nas fibras degradadas foram executados da mesma forma que as fibras sem degradação, conforme mencionado na Seção 3.2.2.3.

A Figura 3.14 apresenta o ensaio de tração sendo realizado em uma fibra de coco degradada.

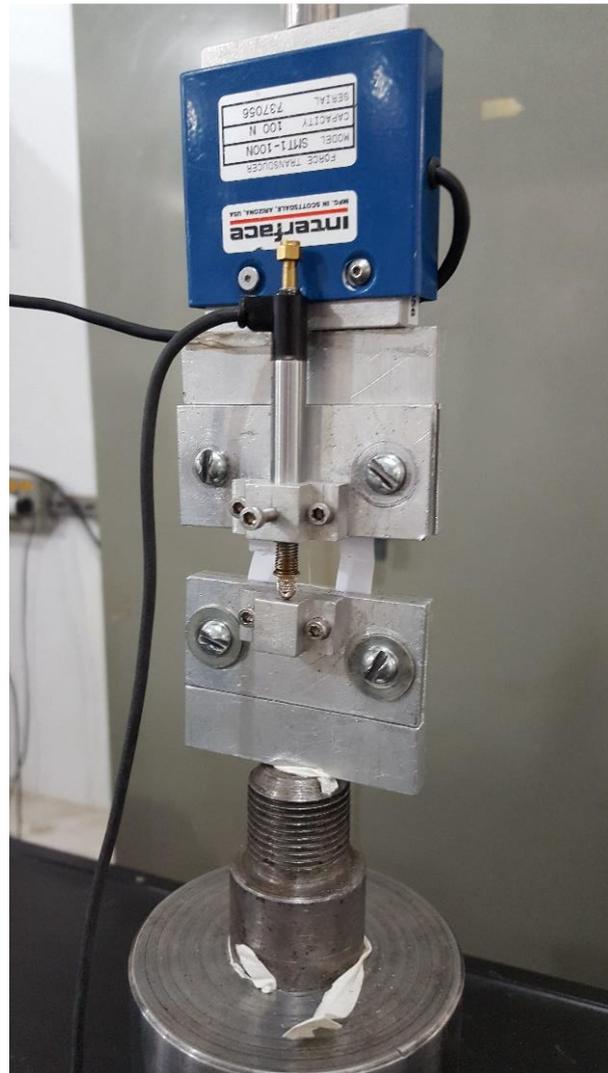


Figura 3.14: Ensaio de tração em fibras

4

Resultados e discussões

4.1

Considerações Iniciais

Serão apontados neste capítulo os resultados e as análises dos ensaios executados na presente pesquisa, para as amostras de areia pura e compósitos de solo-fibra sem exposição e submetidos ao envelhecimento natural, assim como para as amostras de fibras sem exposição e submetidas ao envelhecimento natural. Com os resultados obtidos nos ensaios torna-se possível entender e visualizar o comportamento mecânico dos compósitos solo-fibra e o efeito da degradação das amostras expostas nos parâmetros de resistência do solo.

4.2

Ensaio de caracterização física

São apresentados neste item os resultados dos ensaios de caracterização física realizados na areia pura. A curva granulométrica e os índices físicos são apresentados na Figura 4.1 e na Tabela 4.1, respectivamente. Trata-se de uma areia média, (NBR 6502 – ABNT, 1995). De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS, materiais arenosos com uma quantidade de finos inferior a 5% e $C_u < 6$ e/ou $1 > C_c$, como a areia utilizada no estudo experimental, é classificado como SP, uma areia mal graduada.

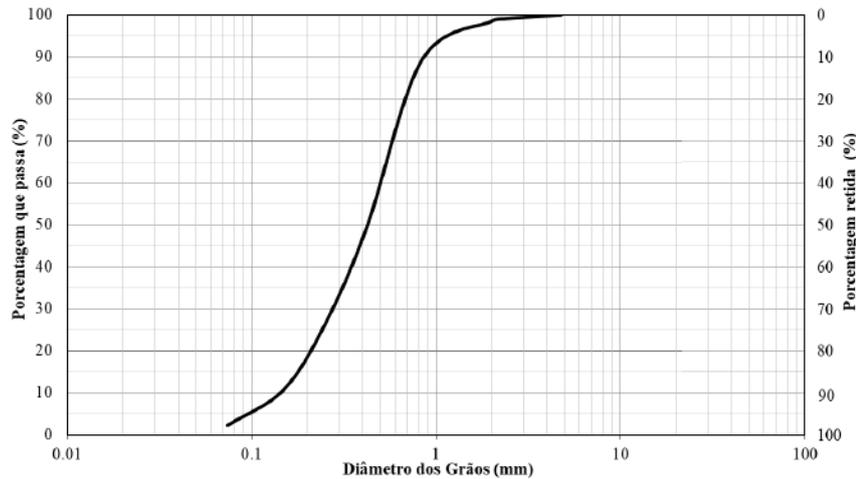


Figura 4.1: Curva granulométrica da areia (Silveira, 2018)

Tabela 4.1: índices físicos da areia

Índices Físicos	Valor
Densidade real dos grãos (G_s)	2,63
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,15mm
Diâmetro médio (D_{50})	0,43mm
Coefficiente de uniformidade (C_u)	3,33
Coefficiente de curvatura (C_c)	0,97
Índice de vazios máximo (e_{max})	0,98
Índice de vazios mínimo (e_{min})	0,71

4.3 Caracterização mecânica

4.3.1 Areia pura

Neste item são mostrados os resultados obtidos através dos ensaios triaxiais CID no solo arenoso em compressão axial, com três diferentes tensões confinantes: 50, 100 e 150kPa.

A Figura 4.2 apresenta as curvas tensão desviadora (q) e variação volumétrica (ϵ_v) vs deformação axial (ϵ_a) e tensão efetiva média (p') vs tensão desviadora (q).

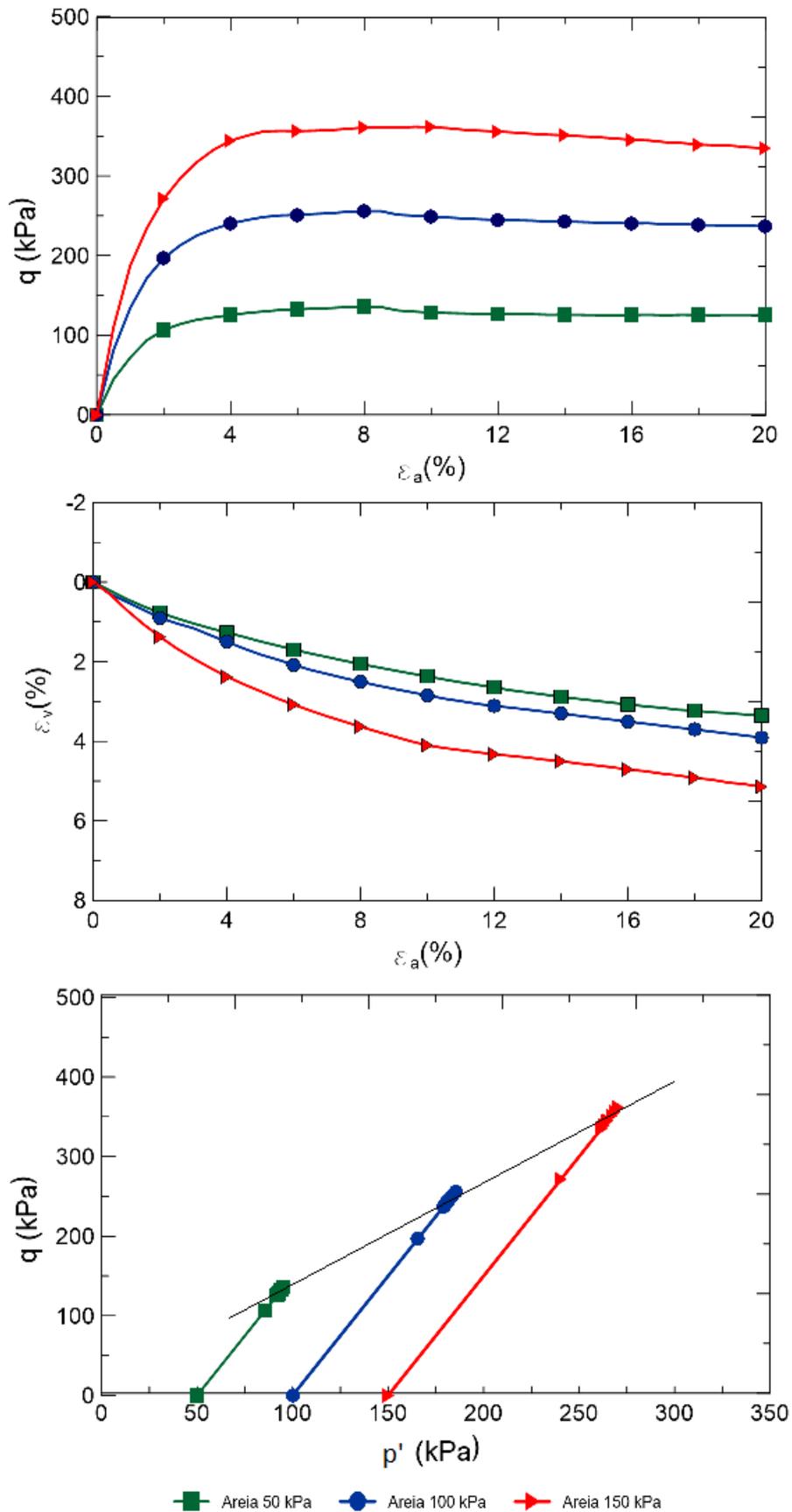


Figura 4.2: Resultados dos ensaios triaxiais nas amostras de solo arenoso

Os valores de índice de vazios após as etapas de adensamento e cisalhamento, além da umidade final estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Índices físicos após adensamento e cisalhamento das amostras de solo arenoso sem reforço

Amostra	σ'_3	Após o adensamento	Após o cisalhamento	
		e_{adens}	E_{final}	ω_{final} (%)
Areia	50	0,838	0,776	26,874
	100	0,832	0,760	26,313
	150	0,820	0,726	25,139

É possível observar um aumento da resistência com o aumento das tensões confinantes efetivas nas curvas q vs ϵ_a .

O solo arenoso utilizado neste estudo experimental apresenta um comportamento típico de solos arenosos no estado fofo, sem a presença de pico de resistência nas três diferentes tensões efetivas utilizadas. A tensão desviadora cresce lentamente com a deformação axial até que, para cada nível de tensão, a curva passa a ter um comportamento constante para diferentes níveis de deformações axiais (8-9%).

Nas curvas variação volumétrica (ϵ_v) vs deformação axial (ϵ_a), observa-se que as amostras sofreram contração em todas as tensões confinantes adotadas, sendo que, quanto maior o valor da tensão confinante, maior o nível de contração da amostra. A contração das amostras durante o carregamento axial é um comportamento típico de solos arenosos no estado fofo.

A Tabela 4.3 mostra os resultados obtidos para a tensão desviadora e deformação axial de ruptura, os parâmetros de resistência ao cisalhamento (c' e ϕ') das amostras de solo arenoso sem reforço e a capacidade de absorção de energia (E_{def}).

A capacidade de absorção de energia (E_{def}) é determinada pelo produto entre a tensão desviadora e a variação da deformação axial correspondente e avalia a capacidade de absorver energia do material durante a deformação.

Tabela 4.3: Valores das propriedades mecânicas e dos parâmetros de resistência para a amostra de areia sem reforço

Amostra	σ'_3 (kPa)	Tensão desviadora de ruptura (kPa)	Deformação axial (%)	E_{def} (kJ/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Areia	50	135,66	8,00	24,17	0,0	33,59
	100	255,92	8,00	46,12		
	150	361,64	9,50	65,86		

Os valores obtidos para o solo arenoso do ângulo de atrito interno e do intercepto coesivo estão de acordo com o intervalo de valores típicos para este tipo de material.

Nota-se um aumento da capacidade de absorção de energia com o aumento da tensão confinante.

4.3.2 Compósitos sem exposição

São mostrados, neste item, os resultados obtidos através dos ensaios triaxiais convencionais com tensões confinantes de 50kPa, 100kPa e 150kPa, executados em compósitos de areia com as fibras, no tempo zero (sem exposição), para avaliar o efeito gerado pela adição das fibras aleatoriamente distribuídas nas propriedades mecânicas de um solo arenoso.

A Figura 4.3 mostra as curvas obtidas (q vs ϵ_a , p' vs q , ϵ_v vs ϵ_a) para as séries de ensaios executados nas amostras de solo reforçado com as fibras no tempo zero nas fibras de coco e de polipropileno (sem exposição).

A Tabela 4.4 apresenta os valores de índice de vazios após as etapas de adensamento e cisalhamento, além da umidade final dos compósitos reforçados com fibra, no tempo zero.

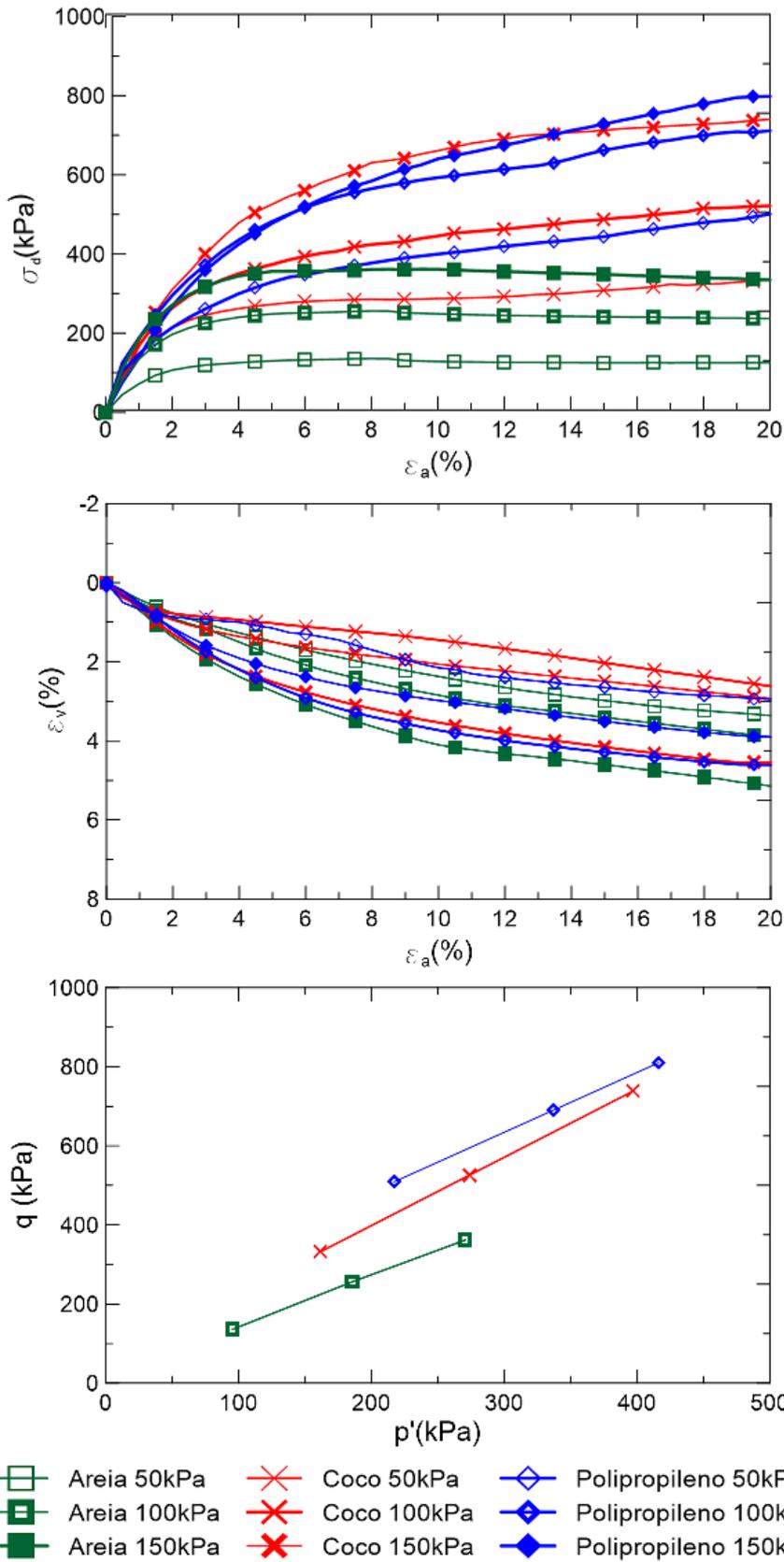


Figura 4.3: Resultados dos ensaios triaxiais convencionais nas amostras de controle reforçadas com fibras de coco e de polipropileno

É possível analisar nas curvas q vs ε_a que, com o acréscimo das fibras, a resistência aumenta com o acréscimo da tensão confinante efetiva. Há um acréscimo na resistência ao cisalhamento sem a formação de pico, em função do acréscimo de fibras em comparação com o material não reforçado. Nota-se, a partir de 3% de deformação axial, em média, a contribuição das fibras nas amostras. A partir desta deformação há uma diferença no comportamento das curvas, que permanece visível até a deformação axial limite determinada (20%).

Tabela 4.4: Índices físicos após o adensamento e cisalhamento, das amostras de controle, no tempo zero

Amostra	σ'_3 (kPa)	Após o cisalhamento			Referência
		Após o adensamento e_{adens}	e_{final}	ω (%)	
Areia-coco	50	0,840	0,792	26,523	-
	100	0,821	0,768	25,647	
	150	0,803	0,721	24,932	
Areia-poli-propileno	50	0,837	0,783	25,781	-
	100	0,808	0,725	25,649	
	150	0,83	0,759	24,18	

Os valores obtidos para tensão desviadora e deformação axial de ruptura, o ganho de resistência gerado pelo acréscimo de fibras, a capacidade de absorção de energia (E_{def}), os valores da coesão (c') e do ângulo de atrito (ϕ') são apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5: Valores das tensões de ruptura nas amostras de controle, com acréscimo de fibras, sem exposição

Amostra	σ'_3 (kPa)	Tensão desviadora de ruptura (kPa)	Deformação axial (%)	Acréscimo de resistência de pico (%)	Referência
Areia-coco	50	334,26	20,00	146,39	-
	100	521,55	20,00	103,79	
	150	740,15	20,00	104,66	
Areia-poli-propileno	50	500,98	20,00	269,28	-
	100	711,33	20,00	177,95	
	150	798,20	20,00	120,71	
Areia-sisal	50	254,67	20,00	87,73	Silveira (2018)
	100	513,41	20,00	100,61	
	150	789,39	20,00	118,28	
Areia-curauá	50	318,82	20,00	135,01	Silveira (2018)
	100	585,25	20,00	128,68	
	150	854,56	20,00	136,30	

Tabela 4.6: Valores dos parâmetros de resistência das amostras de controle, com acréscimo de fibras, sem exposição

Amostra	σ'_3 (kPa)	E_{def} (kJ/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	Referência
Areia-coco	50	55,16	27,92	42,08	-
	100	82,33			
	150	117,53			
Areia-polipropileno	50	74,24	90,46	37,20	-
	100	108,63			
	150	115,35			
Areia-sisal	50	40,50	0,00	46,29	Silveira (2018)
	100	75,48			
	150	112,32			
Areia-curauá	50	48,14	10,00	46,73	Silveira (2018)
	100	86,51			
	150	118,34			

Houve alteração no mecanismo de ruptura devido ao acréscimo de fibras. É possível observar um comportamento elasto-plástico de endurecimento (*strain-hardening*) nos compósitos reforçados com fibras de coco e de polipropileno, que seria o aumento constante da resistência com o acréscimo de deformação axial em todas as amostras de solo reforçado ensaiadas. Comparando os resultados obtidos através dos ensaios executados nas amostras reforçadas com fibra de coco e de polipropileno, com os dados coletados por Silveira (2018) nas amostras reforçadas com fibras de sisal e curauá, de acordo com as tensões efetivas aplicadas, as amostras reforçadas com fibra de polipropileno apresentaram as maiores resistências ao cisalhamento nas tensões efetivas de 50 e 100kPa. A fibra de curauá atribuiu maiores resistências na tensão efetiva de 150kPa.

Gray & Maher (1989); Michalowski & Cermák (2003); Festugato (2008); Ibraim *et al.* (2010) afirmaram que o fator de forma (L/D) das fibras contribui significativamente na resistência ao cisalhamento das fibras. Quanto maior o fator de forma, maior será a resistência ao cisalhamento. Dentre as quatro fibras comparadas, a de polipropileno apresenta o maior fator de forma, já que é que apresenta o menor diâmetro e todas as fibras possuem comprimento de 25 mm.

A fibra que apresenta o menor fator de forma é a de coco. O compósito reforçado com fibra de coco submetida a uma tensão confinante efetiva de 150kPa apresentou a menor resistência dentre as amostras ensaiadas sob mesma tensão, o que

está de acordo com a literatura. A resistência obtida a 100kPa foi menor do que a amostra reforçada com fibra de curauá e polipropileno e bem próxima da com fibra de sisal. A 50kPa, o corpo de prova reforçado com fibra de coco apresentou a maior tensão entre as fibras vegetais utilizadas como reforço de solo.

Segundo Qu & Sun (2016), quanto maior o fator de forma, maior a quantidade total de fibras (volume), no mesmo teor em massa de fibras. Logo, a área de contato entre as fibras e a matriz de solo torna-se maior, gerando maior atrito.

É possível observar, nas curvas ϵ_v vs ϵ_a , uma tendência de contração para todos os corpos de prova ensaiados, para todas as tensões confinantes empregadas.

Pela Tabela 4.5 é possível observar que a adição de fibras de coco aleatoriamente distribuídas na matriz de solo arenoso promove um acréscimo de resistência de pico de 103-146%, enquanto as fibras de polipropileno geram um aumento de 120-269%. Nota-se que, tanto nas amostras reforçadas com fibra de coco quanto nas com fibra de polipropileno, a capacidade de absorção de energia cresceu com o aumento da tensão confinante, chegando a atingir o dobro e, como no caso da amostra reforçada com fibra de polipropileno a uma tensão confinante de 100kPa, atingindo o triplo.

Silveira (2018) apresentou que o acréscimo de fibras de sisal aleatoriamente distribuída na matriz de solo arenoso gerou um aumento de resistência de 87-118%, enquanto o acréscimo de fibras de curauá provocou um aumento de resistência de 128-136%. A capacidade de absorção de energia aumentou com o aumento das tensões confinantes, passando a apresentar praticamente o dobro da capacidade de absorção de energia das amostras de areia não reforçadas.

A fibra de polipropileno foi a que proporcionou o maior ganho de resistência entre as quatro fibras comparadas, nas tensões confinantes efetivas de 50kPa e 100kPa. A fibra de curauá ofereceu maior resistência ao compósito na tensão confinante de 150kPa.

Houve aumento do ângulo de atrito e do intercepto coesivo de todas as amostras analisadas. Vale ressaltar o grande aumento do intercepto coesivo gerado pelo acréscimo de fibras de polipropileno na amostra de solo arenoso. Durante o processo de mistura da matriz de solo arenoso com as fibras, foi observado um entrelaçamento maior quando eram utilizadas fibras de polipropileno. A homogeneização era, de certa forma, um pouco mais complicada, em relação às outras fibras trabalhadas.

Segundo Silveira (2018) houve, também, um aumento no ângulo de atrito das amostras (ϕ') gerado pelo acréscimo de fibras de sisal e de curauá no solo arenoso. Foi possível observar um entrelaçamento entre as fibras aleatoriamente distribuídas e os grãos do solo durante o processo de mistura. As alterações obtidas nos parâmetros de resistência estão de acordo com a mudança no comportamento tensão desviadora vs deformação axial, gerado pela adição de fibras no solo arenoso no ensaio triaxial.

O aumento da resistência ao cisalhamento da areia através da adição de fibras distribuídas aleatoriamente é gerado pela distribuição de carga em toda a massa de solo por meio da malha interligada de fibras criada e do atrito entre fibras/partículas de areia, provocando um aumento na tensão confinante efetiva e, portanto, maior resistência ao cisalhamento.

A partir dos resultados obtidos, torna-se claro que as fibras desempenham um papel fundamental no reforço de solo em obras de terra submetidas a cargas estáticas e, em alguns casos, as fibras vegetais se mostraram tão eficientes quanto à fibra sintética e sua aplicação pode depender do custo da obra, tempo e disponibilidade de fibras.

4.3.3

Compósitos submetidos ao envelhecimento natural

Neste item são mostrados os resultados obtidos a partir de ensaios triaxiais convencionais, a tensões confinantes efetivas de 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa, efetuados em compósitos de solo arenoso reforçado com fibras aleatoriamente distribuídas de coco e de polipropileno, e expostos a agentes climáticos por um período máximo de 8 meses. O objetivo desses ensaios é de investigar e analisar o efeito do envelhecimento natural nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Os resultados obtidos a partir dos compósitos reforçados com fibras de coco e de polipropileno serão comparados com os resultados de ensaios executados por Silveira (2018) em amostras com a mesma matriz de solo arenoso reforçado com fibras vegetais aleatoriamente distribuídas de sisal e de curauá, por um período máximo de 8 meses.

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam, respectivamente, os gráficos obtidos para as séries de ensaios triaxiais convencionais realizados nos compósitos com as fibras

de coco e polipropileno expostos aos agentes climáticos e ao tempo (q vs ε_a , p' vs q , ε_v vs ε_a).

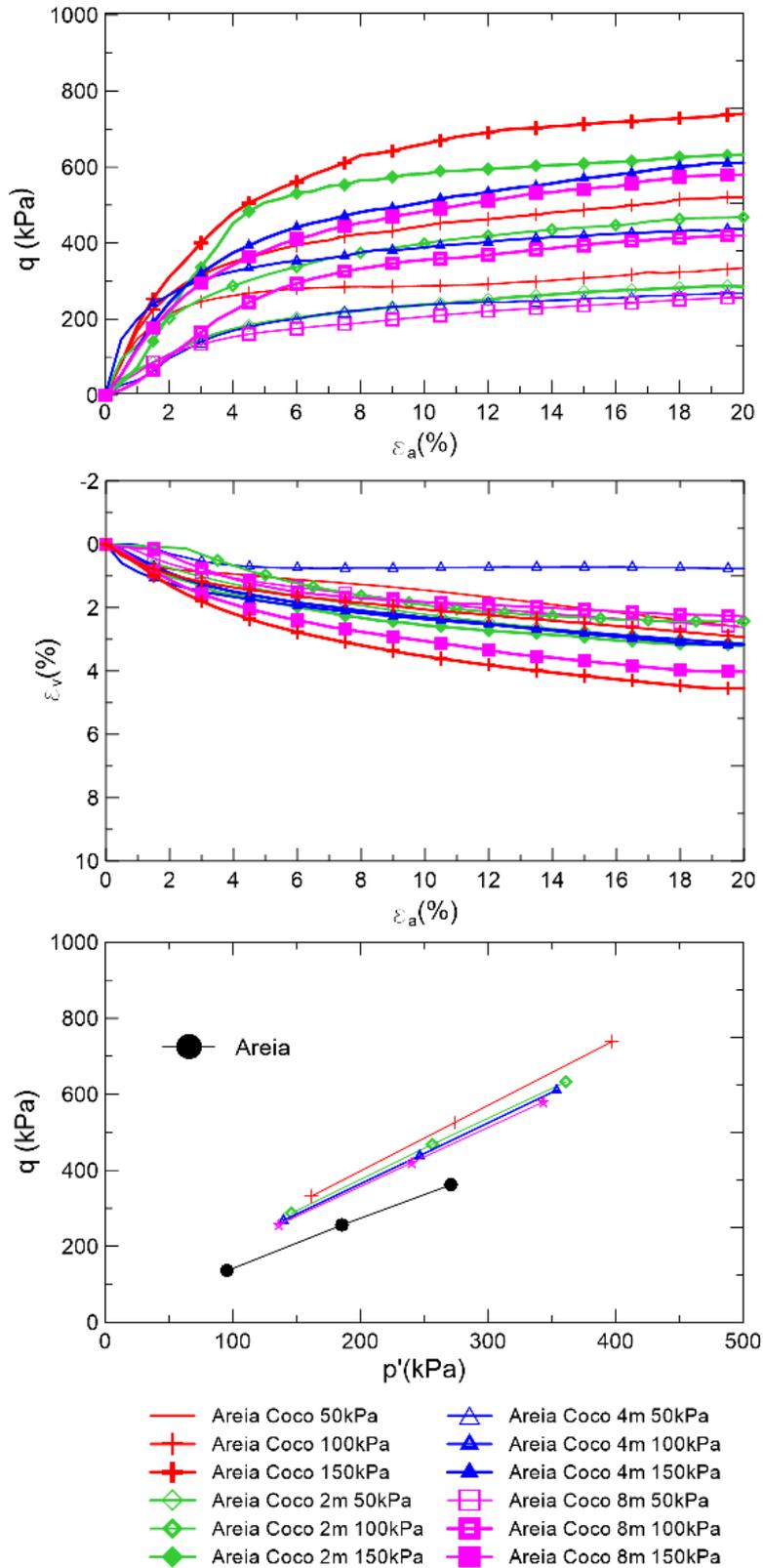


Figura 4.4: Resultado dos ensaios triaxiais convencionais nos compósitos areia-coco expostos ao intemperismo e ao tempo

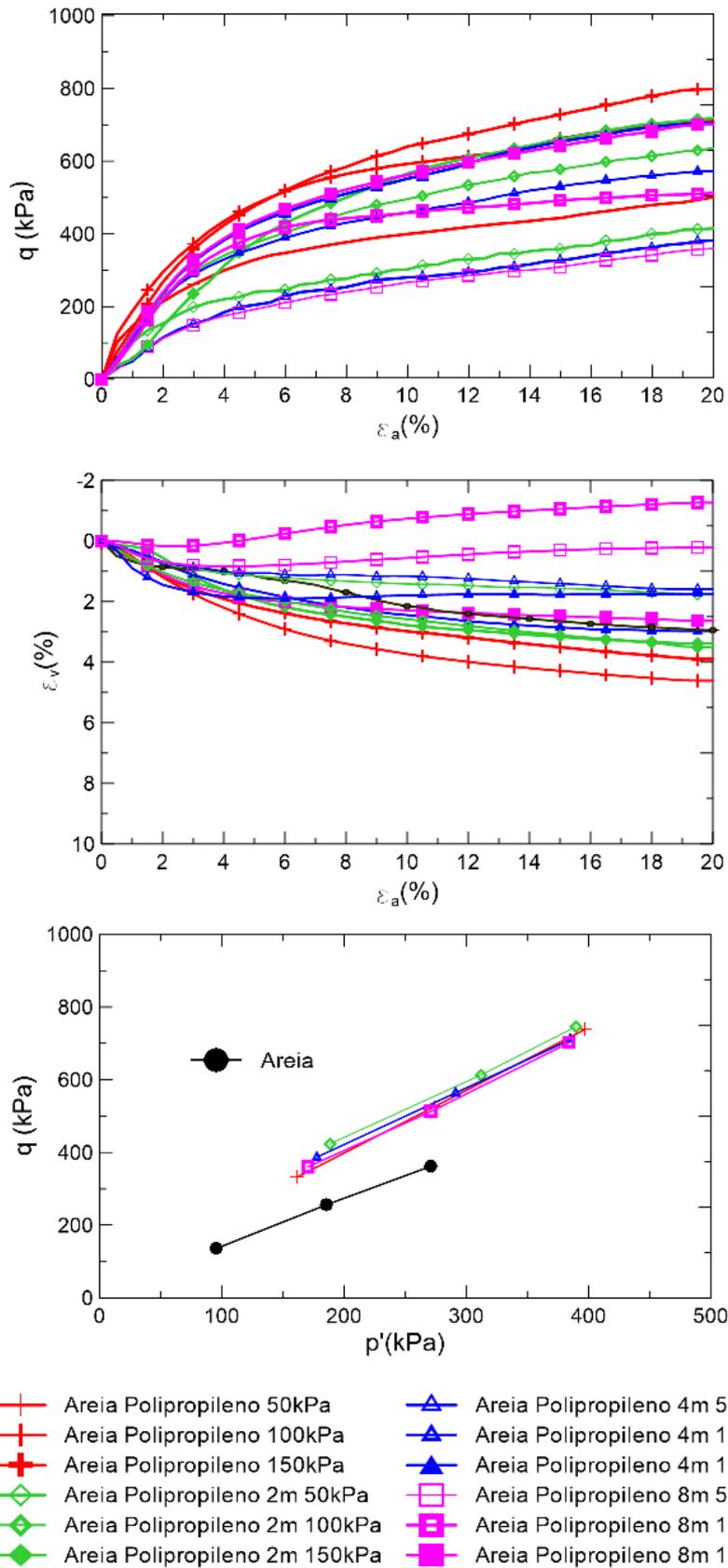


Figura 4.5: Resultado dos ensaios triaxiais convencionais nos compósitos areia-polipropileno expostos ao intemperismo e ao tempo

Após analisar as curvas q vs ϵ_a pode-se afirmar que a exposição da amostra aos agentes climáticos alterou o mecanismo de ruptura dos compósitos reforçados com as fibras expostos aos agentes climáticos.

A perda do comportamento de endurecimento foi pouco evidenciada nas fibras de coco e de polipropileno, mas ao analisar as curvas q vs ϵ_a dos compósitos reforçados com essas fibras, observa-se que houve perda de resistência ao cisalhamento com o aumento do tempo de exposição, inclusive nas amostras reforçadas com fibras de polipropileno.

Apesar da perda de resistência, as fibras continuaram contribuindo como reforço, conservando a resistência das amostras reforçadas degradadas acima das amostras de solo arenoso sem adição de fibras, até a deformação axial limite medida de 20%.

Nas curvas ϵ_v vs ϵ_a , observa-se uma tendência a contração na grande maioria das amostras ensaiadas. Nas amostras reforçadas com fibra de polipropileno, nota-se que a contração diminui com o aumento do tempo de exposição dos compósitos, o que está de acordo com a literatura. Houve expansão apenas na amostra de 8 meses, a uma tensão confinante de 100 kPa. Todas as amostras reforçadas com fibra de coco sofreram contração, porém não seguiu a mesma tendência que as amostras reforçadas com fibras de polipropileno.

A Tabelas 4.7 a 4.8 apresentam os valores dos índices de vazios após o adensamento e cisalhamento, assim como a umidade final das amostras de coco e polipropileno, respectivamente. A seguir, as Tabelas 4.9 a 4.12 mostram, respectivamente, o acréscimo de resistência gerado pelo acréscimo de fibras de coco, polipropileno, sisal e curauá com relação a mostra de solo arenoso. A capacidade de absorção de energia (E_{def}) e os parâmetros de resistência ao cisalhamento (c' e ϕ') são detalhados na Tabela 4.13 a 4.16 para as fibras de coco, polipropileno, sisal e curauá, respectivamente.

Tabela 4.7: Índices físicos após o adensamento e cisalhamento, das amostras reforçadas com fibras de coco, expostas ao intemperismo e ao tempo

Amostra	Tempo de exposição (meses)	σ'_3 (kPa)	Após o adensamento	Após o cisalhamento	
			e_{adens}	e_{final}	ω (%)
Areia-coco	2	50	0,843	0,785	25,20
		100	0,831	0,786	22,13
		150	0,803	0,745	21,56
	4	50	0,841	0,827	26,49
		100	0,817	0,760	26,63
		150	0,825	0,767	25,67
	8	50	0,840	0,792	25,03
		100	0,833	0,791	24,33
		150	0,815	0,742	24,25

Tabela 4.8: Índices físicos após o adensamento e cisalhamento, das amostras reforçadas com fibras de polipropileno, expostas ao intemperismo e ao tempo

Amostra	Tempo de exposição (meses)	σ'_3 (kPa)	Após o adensamento	Após o cisalhamento	
			e_{adens}	e_{final}	ω (%)
Areia-polipropileno	2	50	0,838	0,805	26,85
		100	0,815	0,751	26,35
		150	0,802	0,741	24,30
	4	50	0,840	0,811	25,40
		100	0,808	0,777	24,14
		150	0,780	0,727	22,36
	8	50	0,838	0,834	22,09
		100	0,835	0,858	21,92
		150	0,765	0,719	24,48

Tabela 4.9: Valores da máxima tensão desviadora obtidos nas amostras reforçadas com fibras de coco, expostas ao intemperismo e ao tempo

Amostra	Tempo em exposição	σ'_3	Tensão desviadora de ruptura	Deformação axial	Acréscimo na resistência de pico
	(meses)				
Areia-coco	2	50	286,93	20,00	111,51
		100	468,12	20,00	82,92
		150	632,69	20,00	74,95
	4	50	268,18	20,00	97,69
		100	438,18	20,00	71,22
		150	611,2	20,00	69,01
	8	50	257,07	20,00	89,50
		100	420,1	20,00	64,15
		150	580,01	20,00	60,38

Tabela 4.10: Valores da máxima tensão desviadora obtidos nas amostras reforçadas com fibras de polipropileno, expostas ao intemperismo e ao tempo

Amostra	Tempo em exposição	σ'_3	Tensão desviadora de ruptura	Deformação axial	Acréscimo na resistência de pico
	(meses)				
Areia-poli-propileno	2	50	415,02	20,00	205,93
		100	635,14	20,00	148,18
		150	718,53	20,00	98,69
	4	50	382,04	20,00	181,62
		100	573,02	20,00	123,91
		150	705,2	20,00	95,00
	8	50	360,17	20,00	165,49
		100	512,44	20,00	100,23
		150	701,95	20,00	94,10

Tabela 4.11: Valores da máxima tensão desviadora obtidos nas amostras reforçadas com fibras de sisal, expostas ao intemperismo e ao tempo (Silveira, 2018)

Amostra	Tempo em exposição	σ'_3	Tensão desviadora de ruptura	Deformação axial	Acréscimo na resistência de pico
	(meses)				
Areia-sisal	2	50	263,40	20,00	94,16
		100	493,88	20,00	92,98
		150	694,27	19,00	91,98
	4	50	204,39	17,50	50,66
		100	413,68	20,00	61,64
		150	548,82	19,00	51,76
	8	50	186,00	18,00	37,10
		100	344,44	16,50	34,59
		150	478,76	16,00	33,38

Tabela 4.12: Valores da máxima tensão desviadora obtidos nas amostras reforçadas com fibras de curauá, expostas ao intemperismo e ao tempo (Silveira, 2018)

Amostra	Tempo em exposição	σ'_3	Tensão desviadora de ruptura	Deformação axial	Acréscimo na resistência de pico
	(meses)				
Areia-curauá	2	50	290,99	20,00	114,49
		100	413,66	19,50	61,64
		150	525,40	16,50	45,28
	4	50	233,17	20,00	71,87
		100	376,69	19,50	47,19
		150	484,96	16,00	34,10
	8	50	181,35	13,00	33,68
		100	358,22	14,50	39,97
		150	458,69	13,00	26,83

Tabela 4.13: Parâmetros de resistência para os compósitos reforçados com fibra de coco, expostos ao intemperismo e ao tempo

Amostra	Tempo em exposição	σ'_3 (kPa)	E_{def} (kJ/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
	(meses)				
Areia-coco	2	50	43,56	27,63	39,32
		100	72,64		
		150	101,81		
	4	50	41,61	22,84	39,18
		100	73,01		
		150	92,78		
	8	50	38,24	23,37	38,14
		100	61,74		
		150	87,78		

Tabela 4.14: Parâmetros de resistência para os compósitos reforçados com fibra de polipropileno, expostos ao intemperismo e ao tempo

Amostra	Tempo em exposição	σ'_3 (kPa)	E_{def} (kJ/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
	(meses)				
Areia-polipropileno	2	50	57,81	67,77	37,65
		100	91,35		
		150	98,96		
	4	50	51,44	55,40	38,25
		100	84,76		
		150	102,07		
	8	50	48,85	43,34	39,15
		100	82,39		
		150	102,26		

Tabela 4.15: Parâmetros de resistência para os compósitos reforçados com fibra de sisal, expostos ao intemperismo e ao tempo (Silveira, 2018)

Amostra	Tempo em exposição	σ'_3	E_{def}	c'	ϕ'
	(meses)				
Areia-sisal	2	50	40,34	4,68	43,31
		100	75,25		
		150	102,88		
	4	50	35,32	9,86	39,39
		100	68,01		
		150	87,54		
	8	50	33,2	10,92	36,47
		100	60,48		
		150	81,32		

Tabela 4.16: Parâmetros de resistência para os compósitos reforçados com fibras de curauá, expostos ao intemperismo e ao tempo (Silveira, 2018)

Amostra	Tempo em exposição	σ'_3	E_{def}	c'	ϕ'
	(meses)				
Areia-curauá	2	50	41,37	47,99	32,66
		100	71,82		
		150	91,03		
	4	50	38,10	29,93	33,92
		100	65,31		
		150	82,95		
	8	50	32,58	13,33	35,72
		100	62,56		
		150	78,53		

É possível observar a contribuição gerada pelas fibras na resistência da amostra, em relação à amostra de solo arenoso, mesmo degradadas. Comparando esses

resultados com os obtidos a partir de ensaios realizados nos compósitos sem degradação, verifica-se que a fibra de polipropileno foi a que mais contribuiu no acréscimo de resistência, mesmo após 8 meses de exposição. Apesar disto, houve perdas consideráveis em sua resistência e, em alguns casos, superiores às das fibras de sisal, coco e curauá. Por se tratar de uma fibra sintética, não era o comportamento esperado para este tipo de fibra

Dentre as fibras vegetais comparadas, destaque-se a fibra de coco como a menos passível a degradação, a explicação seria o seu menor fator de forma (L/D) e o alto teor de lignina. Apesar da maioria das amostras sem exposição apresentarem resistências inferiores às amostras sem degradação reforçadas com fibras de sisal e de curauá, o que pode ser explicado pelo fator de forma da fibra, a partir do segundo mês de exposição, observa-se que a perda de resistência das amostras reforçadas com fibra de coco foi inferior em relação às amostras reforçadas com as outras fibras vegetais. O acréscimo de resistência das fibras de coco caiu de 146, 104 e 105% para 89, 64 e 60%, as tensões efetivas de 50, 100 e 150kPa, respectivamente. A contribuição das fibras de sisal caiu de 88, 101 e 118% para 37, 35 e 33%. Para as fibras de curauá, a queda no acréscimo de resistência foi de 135, 128 e 136% para 34, 40, e 27%, a tensões efetivas de 50, 100 e 150kPa, respectivamente.

A fibra que apresentou a maior susceptibilidade a degradação foi a fibra de curauá, apesar de ter sido a fibra vegetal que mais contribuiu no aumento da resistência da matriz arenosa nas amostras de controle. Silveira (2018) afirmou que após o período de exposição, sua contribuição passou a ser semelhante à do compósito exposto de fibra de sisal. Sua grande contribuição na resistência inicial é devido ao fator de forma da fibra, que também é usado para justificar a sua maior susceptibilidade à degradação. Observa-se um efeito considerável do envelhecimento natural nos compósitos reforçados com fibra de curauá nos 2 primeiros meses de exposição, com perdas significativas nos valores da máxima tensão desviadora e capacidade de absorção de energia, enquanto tais efeitos foram observados após 4 meses de exposição nos compósitos com fibras de sisal.

Os parâmetros de resistência das amostras também foram afetados. Nas amostras reforçadas com fibra de coco, houve redução no ângulo de atrito e manifestação do intercepto coesivo. Em contrapartida, os compósitos areia-polipropileno sofreram aumento gradativo no ângulo de atrito e redução no intercepto coesivo.

As amostras areia-coco sofreram quedas significativas no ângulo de atrito durante os primeiros 2 meses de exposição, período em que a perda de resistência foi mais acentuada, seguidas por quedas menos acentuadas. O intercepto coesivo sofreu oscilações de valores ao longo do período. Essas oscilações ocorreram porque a perda de resistência ocorreu em magnitudes diferentes nas tensões confinantes trabalhadas. No primeiro mês, a perda de resistência maior ocorreu na tensão confinante de 50kPa. Já entre o mês 1 e 2, a maior perda de resistência foi observada na tensão de 150kPa. Entre o mês 2 e 4, novamente, a perda de resistência mais significativa ocorreu na tensão de confinamento de 50kPa. Entre os meses 4 e 8, a queda na resistência ocorreu de forma simétrica em todas as três tensões confinantes trabalhadas.

Os compósitos areia-polipropileno apresentaram uma grande perda no intercepto coesivo durante o primeiro mês de exposição. Isso pode ser explicado pela acentuada perda de resistência durante o primeiro mês de exposição. Nos meses seguintes foi observado queda na resistência, porém não na mesma magnitude. A partir do primeiro mês, o intercepto coesivo continuou em queda, mas de forma menos acentuada. Em todos os meses foi observado uma grande redução na resistência ao cisalhamento na tensão de confinamento de 50kPa, em relação às outras tensões de confinamentos trabalhadas. Isso explica o fato do aumento do ângulo de atrito.

Silveira (2018) observou que os compósitos de área-sisal sofreram um aumento do intercepto coesivo e diminuição do ângulo de atrito ao longo do tempo de exposição devido a maior perda de resistência ocorrida na tensão confinante de 150kPa. Ocorreram perdas nas outras tensões de confinamento trabalhadas, mas não na mesma magnitude, o que gerou o aumento do intercepto coesivo.

Nos compósitos areia-curauá, Silveira (2018) afirma que o aumento significativo do intercepto coesivo e a perda do ângulo de atrito após 2 meses de exposição estão relacionados à grande mudança no comportamento tensão vs deformação. Após esse período, não houve alterações de grande magnitude na tensão de confinamento de 150kPa. Logo, os efeitos do envelhecimento passaram a refletir na tensão de confinamento de 50kPa.

Na Figura 4.6 fica em evidência os efeitos do envelhecimento natural provocados nos compósitos reforçados com fibras. Esta figura foi criada para uma melhor visualização da redução das tensões de ruptura de cada compósito e da capacidade

de absorção de energia de acordo com o tempo. Os dados referentes aos compósitos reforçados com fibras de sisal e de curauá foram coletados por Silveira (2018).

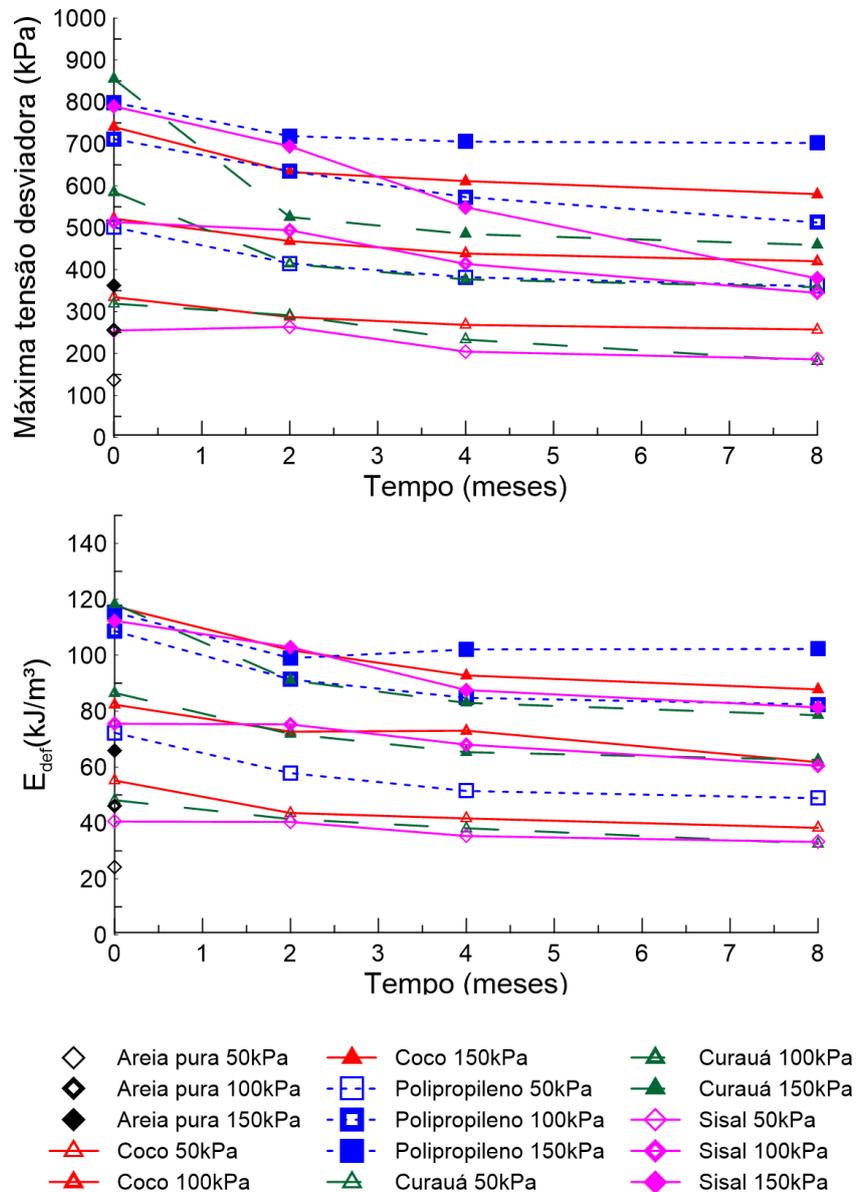


Figura 4.6: Máxima tensão desviadora e capacidade de absorção de energia (E_{def}) dos compósitos areia-fibra expostos ao intemperismo

Observa-se que os compósitos areia-coco e areia-polipropileno sofreram grandes perdas até 2 meses de exposição e, após esse período, continuou havendo degradação, mas de forma menos significativa. É importante salientar que, mesmo com 8 meses de exposição, as fibras desempenham um papel fundamental na tensão de ruptura e na capacidade de absorção de energia de deformação das amostras, que são superiores se comparadas às amostras de solo arenoso, sem reforço.

Silveira (2018) concluiu que tanto as fibras de sisal quanto as de curauá sofreram grandes perdas até os 4 meses de exposição, e permaneceram estáveis entre 4 e 8 meses. Mesmo sofrendo degradação, os compósitos areia-sisal e areia-curauá mantiveram resistência e capacidade de absorção de energia de deformação superiores aos da amostra sem reforço.

Para melhor visualização dos parâmetros de resistência dos compósitos reforçados com fibras vegetais e sintéticas e dos efeitos do envelhecimento, foi criada a Figura 4.7, onde consta os valores dos parâmetros encontrados nas amostras solo-fibras. Os valores dos compósitos areia-sisal e areia-curauá foram obtidos por Silveira (2018).

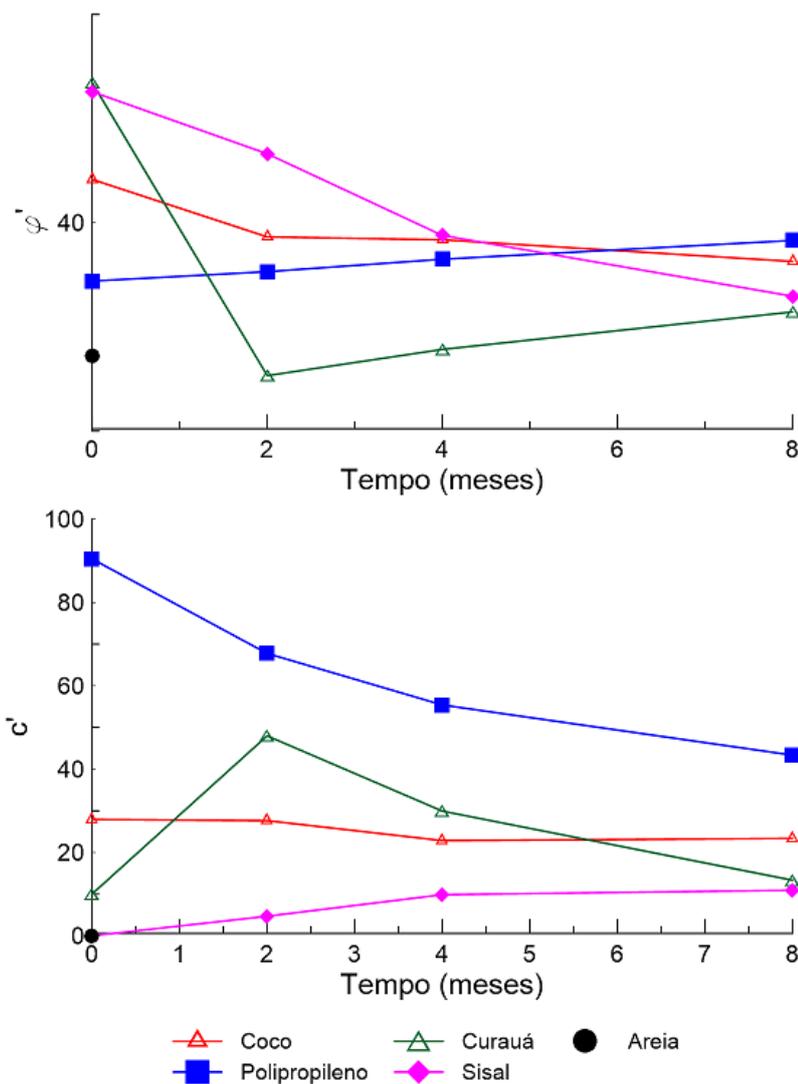


Figura 4.7: Parâmetros de resistência da areia a dos corpos de prova reforçados com fibras, submetidos ao envelhecimento natural

Mesmo após os 8 meses de exposição, sujeitas às diversas condições climáticas, as fibras desempenharam um papel fundamental como reforço de solo nos compósitos analisados. Os valores do intercepto coesivo e ângulo de atrito foram superiores aos valores do solo arenoso puro, sem acréscimo de fibras, em todas as amostras analisadas.

As etapas utilizadas neste estudo experimental para as análises do comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibras, sujeitos ao envelhecimento natural simularam as piores condições para as amostras. Em uma situação de campo, a densificação de um aterro aconteceria com as fibras intactas, com todas as suas propriedades mecânicas, físicas e químicas preservadas, proporcionando uma maior proteção ao atrito gerado entre as partículas de solo no decorrer desta etapa. No laboratório, a densificação ocorreu durante a etapa de adensamento no ensaio triaxial convencional, com as amostras já submetidas ao envelhecimento natural, tendo suas propriedades mecânicas, físicas e químicas afetadas.

A densidade relativa adotada para o estudo também proporcionou às amostras piores condições em relação ao campo. A densidade de 50% promove uma maior permeabilidade de água, gerando um aumento da umidade e alto grau de oxigenação, que são condições ideais para a proliferação de microorganismos responsáveis pela degradação de fibras. Em uma situação de obra, a densidade relativa é maior para evitar estes tipos de problemas, além da existência de um sistema de drenagem para coleta e transporte de água.

4.4 **Ensaio de tração direta**

Neste item são mostrados os resultados dos ensaios de tração direta, realizados nas fibras vegetais sem exposição e nas fibras submetidas ao envelhecimento natural.

4.4.1 Fibras vegetais sem exposição

Como método de caracterização, a fibra de coco utilizada neste estudo experimental passou por ensaios de tração direta, como forma de obter parâmetros, como a resistência à tração, módulo de elasticidade e capacidade de deformação.

Silveira (2018) realizou uma série de ensaios de tração em fibras de sisal e curauá sem exposição. A Tabela 4.17 apresenta os resultados dos ensaios de tração para as fibras vegetais utilizadas. Os valores encontrados de resistência à tração, deformação na ruptura e módulo de elasticidade estão de acordo com os publicados na literatura.

Devido à sua grande capacidade de deformação de ruptura, a fibra de polipropileno não foi submetida ao ensaio de tração direta, devido à limitação do equipamento utilizado nos ensaios do Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio.

Tabela 4.17: Resultados médios e desvios-padrões obtidos através dos ensaios de tração nas fibras vegetais

Fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação de ruptura (%)	Área adotada (mm ²)	Referência
Coco	150,69 (41,77)	1,62 (0,52)	45,07 (9,00)	0,052	-
Curauá	464,81 (133,92)	10,00 (2,26)	4,53 (0,62)	0,004	Silveira (2018)
Sisal	270,86 (58,47)	5,51 (1,34)	5,21 (0,81)	0,023	Silveira (2018)

O comportamento de tração das fibras é investigado por vários autores, e há grandes discrepâncias entre os resultados de resistência à tração e módulo de Yang na literatura. Tais diferenças estão relacionadas a vários fatores: diâmetros variáveis e irregulares das fibras vegetais, diferentes distâncias utilizadas entre as garras do equipamento, velocidade de ensaio, forma de fixação dos corpos de prova no equipamento, a resolução da precisão da célula de carga e do atuador (Fidelis, 2014; Silveira, 2018).

Como pode ser verificado na Tabela 4.17, as fibras de curauá e de sisal possuem uma alta resistência à tração, mas baixa capacidade de deformação. De acordo com a literaturas, essas características podem ser explicadas devido ao elevado teor de celulose (60%-74%) existente nas fibras (Silveira, 2018).

O melhor comportamento mecânico evidenciado pela fibra de curauá pode ser justificado tanto pela sua morfologia quanto pela sua composição química. Quanto à morfologia, por possuir um menor diâmetro em relação às outras fibras vegetais utilizadas neste estudo experimental, pela presença de uma pequena área interna dos lumens e maior espessura da parede secundária em sua microestrutura. Quanto à composição química, se deve pelo maior teor de celulose (Silveira, 2018).

A fibra de coco apresentou resistência à tração inferior às fibras de sisal e de curauá, porém a sua deformação de ruptura foi elevada. Além da fibra de coco possuir uma quantidade menor de celulose (43%-54%), o seu diâmetro contribui nas propriedades estruturais da fibra. Quanto maior o diâmetro, há mais variações no número de células constituintes, o que altera outros parâmetros estruturais (número de defeitos, volume de células constituintes, ângulo helicoidal), e todos esses parâmetros afetam diminuindo a resistência das fibras (Tomczak, 2010).

O módulo de elasticidade é proporcional ao teor de celulose e inversamente proporcional ao ângulo microfilar (Kulkarni *et al* 1981; Defoirdt *et al.* 2010).

A fibra de coco possui baixo teor de celulose e alto valor de ângulo microfilar (30-49°), o que justifica a baixa resistência à tração (150,69 MPa) e módulo de elasticidade (0,62 GPa) e grande capacidade de deformação (45,07%) (Kulkarni *et al.* 1981; Defoirdt *et al.* 2010, Fidelis 2014).

As fibras de sisal e curauá possuem alto teor de celulose e ângulo microfilar de 20° e 15°, respectivamente, o que justifica os maiores valores encontrados nas fibras de curauá (Bledzki e Gassan, 1999; Tomczak 2010; Fidelis 2014).

Segundo Tomczak (2010) não há relação entre o diâmetro da fibra com a deformação na ruptura.

4.4.2 Fibras submetidas ao envelhecimento natural

Após cada intervalo de tempo definido de exposição, os corpos de prova eram retirados do ambiente externo e, com o auxílio de um cortador de tubo, foram cortados em pedaços de 25cm de comprimento, para facilitar o processo de secagem na estufa, a 60°C e a coleta das fibras nas profundidades de 75cm e 125cm para a execução dos ensaios de tração.

Foi observado que, quanto maior o tempo de exposição, mais fácil de identificar, visualmente, os efeitos do envelhecimento natural sobre as fibras. As fibras de sisal, curauá e de coco, expostas por 8 meses ficaram escurecidas e foi possível observar uma perda de massa nas fibras de curauá e sisal. Devido aos efeitos da degradação, houve uma certa dificuldade para a selecionar as fibras de sisal e curauá que seriam submetidas ao ensaio de tração direta.

Foi possível observar, também, o efeito do envelhecimento natural durante a moldagem e nos ensaios dos corpos de prova, principalmente nas fibras de sisal e curauá. Elas se rompiam mais facilmente ao manuseio. Algumas fibras expostas por 8 meses rompiam no momento do posicionamento nas garras de tração ou até mesmo durante a preparação das amostras.

Os efeitos do envelhecimento também puderam ser identificados nas fibras de coco, principalmente as expostas por 8 meses. Foi possível observar o escurecimento das fibras, mas, apesar de estarem mais frágeis, elas não se rompiam durante a preparação das amostras, ou o posicionamento nas garras de tração, efeitos que foram observados nas outras fibras vegetais utilizadas neste estudo experimental.

A Tabelas 4.18 a 4.20 mostram, respectivamente, os resultados dos ensaios de tração direta para as fibras de coco, curauá e sisal, nas profundidades de 75cm e 125cm, expostas por 2, 4 e 8 meses. As áreas adotadas das fibras de coco, sisal e de curauá foram, respectivamente, 0,052mm²; 0,023mm²; 0,004mm².

Tabela 4.18: Resultados médios e desvios-padrões dos ensaios de tração realizados nas fibras de coco em exposição

Fibra	Tempo de exposição (meses)	Profundidade (cm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Capacidade de deformação (%)
Coco	2	75	136,06 (57,01)	1,04 (0,43)	36,12 (6,79)
		125	141,79 (53,17)	1,59 (0,75)	30,69 (9,34)
	4	75	122,95 (37,22)	0,82 (0,38)	38,71 (12,61)
		125	125,37 (25,72)	1,22 (0,83)	34,14 (6,35)
	8	75	118,58 (25,30)	0,53 (0,24)	46,59 (9,75)
		125	122,39 (28,31)	1,20 (0,73)	39,10 (8,20)

Tabela 4.19: Resultados médios e desvios-padrões dos ensaios de tração realizados nas fibras de curauá em exposição

Fibra	Tempo de exposição (meses)	Profundidade (cm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Capacidade de deformação (%)
Curauá	2	75	263,84 (104,17)	9,97 (2,99)	2,27 (0,62)
		125	307,74 (181,35)	12,90 (5,49)	2,22 (1,25)
	4	75	186,46 (88,41)	10,3 (3,99)	1,60 (0,43)
		125	222,31 (86,91)	10,15 (5,05)	1,97 (0,67)
	8	75	159,40 (60,91)	10,71 (6,68)	1,46 (0,47)
		125	105,13 (49,41)	7,87 (4,38)	1,23 (0,58)

Tabela 4.20: Resultados médios e desvios-padrões dos ensaios de tração realizados nas fibras de sisal em exposição

Fibra	Tempo de exposição (meses)	Profundidade (cm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Capacidade de deformação (%)
Sisal	2	75	147,47 (56,40)	4,85 (1,33)	2,86 (0,86)
		125	171,66 (61,88)	6,49 (2,37)	2,55 (0,69)
	4	75	122,36 (71,61)	6,28 (2,81)	1,87 (0,65)
		125	136,87 (50,10)	5,81 (1,62)	1,55 (0,59)
	8	75	116,10 (64,21)	7,54 (2,55)	1,44 (0,48)
		125	46,70 (16,03)	4,56 (1,25)	1,16 (0,67)

Para uma melhor visualização dos efeitos do envelhecimento natural no comportamento mecânico da fibra, foi elaborada a Figura 4.8, que apresenta a média de

15 bons resultados obtidos através dos ensaios de tração direta nas fibras, de acordo com a profundidade, a fibra e o tempo de exposição.

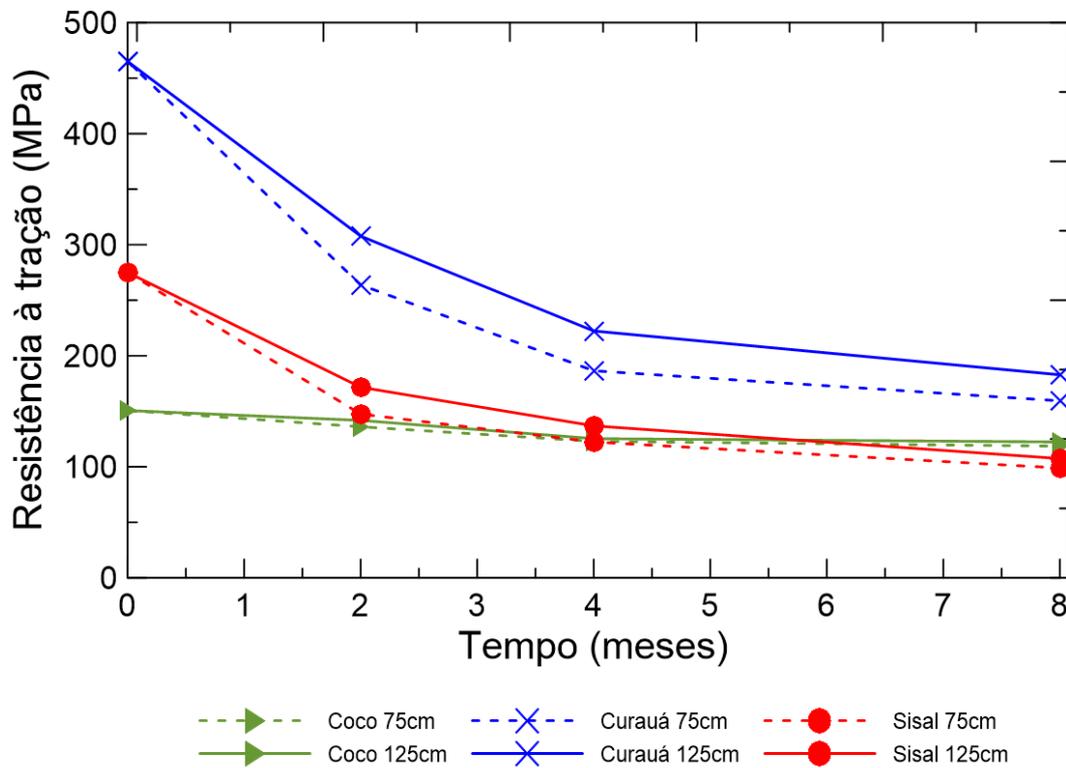


Figura 4.8: Resistência à tração das fibras vegetais expostas ao tempo

É possível observar que o envelhecimento natural influencia consideravelmente no comportamento mecânico das fibras, principalmente nas fibras de sisal e de curauá. Houve perdas na resistência à tração, no módulo de elasticidade e na capacidade de deformação. Observa-se que as maiores perdas de resistência ocorreram na profundidade de 75 cm.

Nos dois primeiros meses, as fibras de sisal perderam 46,37% e 37,58% de sua resistência, nas profundidades de 75 cm e 125 cm, respectivamente. As perdas nas fibras de curauá foram semelhantes, sendo de 43,26% e 33,81%, nas profundidades de 75 cm e 125 cm, respectivamente.

Houve, também, perdas consideráveis nas duas fibras submetidas ao envelhecimento natural por um período de 4 meses, porém observa-se que foram menos acentuadas, se comparadas aos dois primeiros meses. As fibras de sisal, nas profundidades de 75 cm e 125 cm apresentaram, respectivamente, 55,5% e 50,22% de perda na resistência à tração. As fibras de curauá tiveram perdas de 59,9% e 52,19%, nas profundidades de 75 cm e 125 cm, respectivamente.

Observa-se que a perda da resistência nas fibras de sisal e curauá ocorre até o tempo máximo de exposição (8 meses), porém de uma forma menos acentuada à medida que o tempo de exposição aumenta.

A fibra de coco também degradou mais na profundidade de 75 cm. Apesar de também ter apresentado uma maior degradação nos períodos iniciais de exposição, a perda de resistência foi relativamente baixa. Apresentou perda máxima de 21,31% para a profundidade de 75 cm e 18,79% para 125 cm, no tempo de exposição máximo (8 meses). Sua resistência final foi semelhante à resistência final da fibra de sisal, sendo que esta última possui praticamente o dobro da resistência à tração inicial em relação à fibra de coco.

Visualmente, na moldagem dos corpos de prova, as fibras de coco aparentavam estar mais resistentes em relação às outras fibras vegetais. Dificilmente se rompiam nessa etapa de moldagem, o que ocorria com as fibras de sisal e curauá. Pelo fator de forma da fibra (L/D), sua resistência à tração foi menor em relação às fibras de sisal e de curauá.

O comportamento das fibras está de acordo com os relatos da literatura. Silveira (2018), Carvalho *et al.* (2015) e Costa (2013) demonstraram que as fibras vegetais são severamente agredidas quando expostas e ocorre uma acentuada degradação nas propriedades mecânicas nas primeiras semanas de exposição no solo e que, após essa perda inicial, há uma tendência de estabilização da resistência.

A baixa degradação da fibra de coco em relação às fibras de sisal e curauá pode ser explicada pelo seu menor fator de forma e elevado teor de lignina em sua composição química. A lignina é o componente químico mais difícil de degradar, devido a sua complexa estrutura (Silva *et al.*, 2000; D'Almeida *et al.*, 2006). A alta concentração de lignina é a principal responsável pela lenta degradação das fibras de coco. A lignina oferece resistência às fibras naturais à radiação ultra-violeta (Carvalho *et al.*, 2014)

A maior degradação das fibras a 75cm também foi evidenciada por Joy *et al.* (2011). Apesar da severa degradação de materiais celulósicos pela atividade microbiana em profundidades rasas, é provável que a degradação em profundidades maiores ocorra devido ao ambiente alcalino.

5 Considerações finais

5.1 Conclusões

Serão apresentadas, neste capítulo final, as conclusões obtidas por meio dos ensaios realizados neste estudo experimental. Vale ressaltar que algumas delas já foram citadas anteriormente, neste trabalho.

Em geral, a adição de fibras de coco, polipropileno, sisal e curauá criou um novo material geotécnico, com características próprias, gerando melhorias no comportamento da matriz arenosa.

Além dessas melhorias, foram analisados o comportamento mecânico e a durabilidade de compósitos reforçados com fibras vegetais e sintéticas expostos, submetidos ao envelhecimento natural por um período máximo de 8 meses. Para a matriz do compósito, foi utilizado um solo arenoso.

Os ensaios triaxiais para a avaliação do comportamento mecânico e durabilidade foram executados nos compósitos reforçados com fibras de coco e polipropileno, e comparados com os resultados obtidos por Silveira (2018) nos compósitos reforçados com fibras de sisal e curauá, em uma mesma matriz arenosa.

Os ensaios de tração foram realizados para a avaliação da durabilidade das fibras vegetais utilizadas como reforços em compósitos com matriz de solo arenoso, expostas e submetidas ao envelhecimento natural por até 8 meses, nas profundidades de 75 e 125 cm, com o objetivo de avaliar a profundidade que mais sofreu degradação e comparar os resultados das fibras.

Os ensaios triaxiais nos compósitos solo-fibra e os de tração direta nas fibras vegetais foram realizados após 60, 120 e 240 dias de exposição.

- O acréscimo de fibras de coco e polipropileno na matriz arenosa provocou aumento da resistência ao cisalhamento, do intercepto coesivo e do ângulo de atrito das amostras, em relação a areia pura;

- A exposição dos compósitos solo-fibra aos diversos agentes climáticos e ao tempo causou perda no comportamento mecânico. Houve redução da tensão desviadora de ruptura e da capacidade de energia de absorção, e a taxa de redução foi diferente entre os compósitos reforçados com fibras de coco e polipropileno.
- Apesar de haver perda de resistência ao cisalhamento, o envelhecimento natural não afetou o comportamento ‘*strain-hardening*’ apresentado com o acréscimo de fibras, mesmo após o tempo máximo de exposição (8 meses). Isso se deve ao fato de que as fibras de coco e de polipropileno não são susceptíveis a degradação como fibras de sisal ou curauá, onde a perda do *strain-hardening* foi constatada.
- Após 8 meses sendo submetidas ao envelhecimento natural, as fibras ainda contribuíram como reforço do solo. Os valores obtidos de resistência ao cisalhamento, intercepto coesivo e ângulo de atrito são superiores ao da areia pura;
- A fibra de coco é mais susceptível à degradação em relação à fibra de polipropileno. Diferente do esperado, a fibra sintética também sofreu degradação;
- Pelos dados obtidos através dos ensaios de tração direta, entre as profundidades analisadas, a maior degradação ocorreu a 75 cm de profundidade, o que está de acordo com a literatura. A justificativa seria o ambiente alcalino que se encontra nessa profundidade, e não a presença de microorganismos;
- Além da fibra de curauá ter apresentado a maior resistência à tração inicial, após os 8 meses em exposição, ela permaneceu com a maior resistência entre as fibras analisadas, porém foi a que mais sofreu degradação, a queda da resistência foi maior;
- O fato da fibra de curauá ter a menor área de seção transversal justifica a elevada resistência ao cisalhamento ao acrescentá-la na matriz arenosa e resistência à tração no tempo zero, assim como a sua maior susceptibilidade à degradação;

- Em contrapartida, a fibra de coco possui a maior área de seção transversal e apresentou a menor resistência à tração inicial. Foi a fibra que mostrou a menor queda na resistência à tração;
- Entre as fibras vegetais analisadas, a fibra de coco foi a que mostrou menos susceptível à degradação. O seu alto teor de lignina e o seu menor fator de forma (L/D) seriam as justificativas, pois é o componente responsável por agir contra o ataque de microorganismos;
- Os resultados obtidos mostram 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, aterros. Além do baixo custo, trata-se de uma alternativa sustentável;
- Para obras de longo prazo, a fibra de polipropileno se mostrou como a melhor alternativa. Foi a que ofereceu a maior contribuição na resistência ao cisalhamento do compósito, além de ter sofrido a menor degradação;
- Apesar de todos os compósitos terem sofrido perdas de resistência e apresentado comportamento mecânico diferente, o comportamento dos solos reforçados se mostrou superior ao do solo puro. Sendo assim, os compósitos solo-fibras podem ser aplicado em obras geotécnicas como taludes, aterros e fundações superficiais.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

No desenvolvimento do trabalho, conforme o avanço dos ensaios, novas ideias surgiram, mas devido ao cronograma de ensaios estipulado, algumas limitações e imprevistos, não foi possível executar essas novas ideias.

Portanto, serão apresentadas algumas sugestões para futuras pesquisas, com o intuito de ampliar o conhecimento, dar continuidade dos estudos sobre o uso de fibras como um reforço de solo, citando-as a seguir:

- Avaliar os efeitos do envelhecimento natural em outros tipos de solo, reforçado com fibras de coco ou polipropileno;

- Avaliar os efeitos do envelhecimento natural em outros tipos de fibra;
- Analisar o efeito da densidade relativa em solos reforçados com fibra;
- Realizar ensaios de tração direta nas fibras localizadas em diferentes profundidades, inclusive no topo.

6

Referências bibliográficas

AGUILAR, J. R. T. **Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Reforçado com Fibras de Coco**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2015.

AL WAHAB, R. M.; EL-KEDRAH, M. A. Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay. **Geoenvironment 2000 – Characterization, Containment, Remediation And Performance In Environmental Geotechnics**, 1995, New Orleans. Proceedings... ASTM STP n. 46, ASTM, v.1, 2v, p.791-805, 1995.

AL WAHAB, R.M.; AL-QURNA, H.H. Fiber Reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures. **Geosynthetics'95 Conference**. 1995, Nashville. Proceedings ... v.2, p.433-466, 1995.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers: ASTM C1557**. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.: [s.n.], 2008.

ANANDJIWALA, R. D.; JOHN, M. Sisal-cultivation, processing and products. **Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications**, John Wiley & Sons, Ltd, p. 181–95, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Análise granulométrica: NBR 7181**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grãos de Solo que passam na peneira de 4.8mm – Determinação da massa específica: NBR 6508**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solos – determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos: NBR 12004**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solos – determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos: NBR 12051**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1991.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2ed. London: Elsevier, 1990.

BISHOP, A.; HENKEL, D. J. **The measurement of soil properties in the triaxial test**. [S.l.]: Edward Arnold (Publishers) Ltd; London, 1962.

BOLAÑOS, R. E. Z. **Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Reforçado com Fibras de Coco**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

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

CASAGRANDE, M. **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, 2001.

CASAGRANDE, M. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) — Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2005.

CASAGRANDE, M.; CONSOLI, N. Estudo do comportamento de um solo residual areno-siltoso reforçado com fibras de polipropileno. **Solos e Rochas. Revista Latino-Americana de Geotecnia**, v. 25, n. 3, p. 223–230, 2002.

CHEN, C. Triaxial compression and extension tests for fiber-reinforced silty sand. In: GEOSHANGHAI INTERNATIONAL CONFERENCE 2010. **Ground Improvement and Geosynthetics**. [S.l.]: American Society of Civil Engineers, 2010. p. 367–376.

CHESSON, A. Plant degradation by ruminants: parallels with litter decomposition in soils. **Driven by nature: plant litter quality and decomposition**, Wallingford: CAB International, c1997., 1997.

CONSOLI, N.; CASAGRANDE, M.; COOP, M. Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. **Géotechnique**, Thomas Telford Ltd, v.7, n. 9, p. 751–756, 2007.

CONSOLI, N. *et al.* Effect of relative density on plate loading tests on fibre-reinforced sand. **Géotechnique**, Thomas Telford Ltd, v. 59, n. 5, p. 471–476, 2009a.

CONSOLI, N. *et al.* 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, 2004.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; ULBRICH, L. A. The behavior of a fiber-reinforced cemented soil. **Ground Improvement**, London, v. 3, n. 1, p. 21–30, 1999.

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

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

DE CAMPOS, T.; CARRILLO, C. Direct shear testing on an unsaturated soil from Rio de Janeiro. In: **Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils/UNSAT'95/Paris/France/6-8 september 1995. Volume 1**. [S.l.: s.n.], 1995.

DE CAMPOS, T. M. P. **Características de Projeto e Dimensionamento de um Transdutor de Variação de Volume. Relatório Interno, RI 07/85**. [S.l.], 1985.

DEFOIRDT, N. *et al.* 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, 2010.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E. Fibre-reinforced sand: interaction at the fibre and grain scale. **Géotechnique**, ICE Publishing, v. 65, n. 4, p. 296–308, 2015.

DIAMBRA, A. *et al.* Fiber reinforced sands: experiments and modelling. **Geotextiles and geomembranes**, Elsevier, v. 28, n. 3, p. 238–250, 2010.

DITTENBER, D. B.; GANGARAO, H. V. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Elsevier, v. 43, n. 8, p. 1419–1429, 2012.

DONATO, M. **Medidas Diretas de Tensão em Solo Reforçado com Fibras de Polipropileno**. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Porto Alegre, 2007.

FATANI, M.; BAUER, G.; AL-JOULANI, N. Reinforcing soil with aligned and randomly oriented metallic fibers. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM International, v. 14, n. 1, p. 78–87, 1991.

FERREIRA, S. **Influência do Tratamento de Molhagem e Secagem na Aderência Fibra-Matriz e no Comportamento Mecânico de Compósitos Cimentícios Reforçados Randomicamente com Fibras de Sisal**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UEFS, Bahia, 2012.

FERREIRA, S. R. *et al.* Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 139, p. 551–561, 2017.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS., 2008.

FEUERHARMEL, M. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS., Porto Alegre, 2000.

FIDELIS, M. **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, 2014.

FIDELIS, M. E. A. *et al.* 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, 2013.

FREITAG, D. R. Soil randomly reinforced with fibers. **Journal of Geotechnical Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 112, n. 8, p. 823–826, 1986.

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

GIRARDELLO, V. **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, 2010.

GRAY, D.; AL-REFAI, T. Behaviour of fabric versus fibre-reinforced sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 112, n. 8, p. 804–826, 1986.

GRAY, D.; MAHER, M. Admixture stabilization of sand with discrete randomly distributed fibers. In: **Proceedings of XII international conference on soil mechanics and foundation engineering, Rio de Janeiro, Brazil**. [S.l.: s.n.], 1989. v. 2, p. 1363–1366.

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

HANNANT, L. Polymers and polymers composites. **Construction materials: their nature and behavior**. 2ed., JM Illston/E & FN Spon, p. 359–403, 1994.

HEAD, K. **Manual of soil laboratory testing: Effective stress tests**. [S.l.]: John Wiley & Sons, USA, 1998. 227 p.

HEINECK, K. *et al.* 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, 2003.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras impermeáveis horizontais**. Tese (Doutorado) — PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2002.

HEJAZI, S. *et al.* A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Construction and building materials**, Elsevier, v. 30, p. 100–116, 2012.

HOLLOWAY, L. Polymers and polymers composites. In: J. M. ILLSTON. **Construction Materials; their nature and behavior**. 2ed., London: J. M. Illston/E & FN Spon, 1994.

HOMEM, T. R. **Comportamento de Misturas Asfálticas Porosas com Ligantes Modificados por Polímeros e Adição de Fibra**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS., Porto Alegre, 2002.

ISAAC, S. R.; NAIR, M. A. Biodegradation of leaf litter in the warm humid tropics of kerala, india. **Soil Biology and Biochemistry**, Elsevier, v. 37, n. 9, p. 1656–1664, 2005.

IBRAIM, E. *et al.* Assessment of laboratory sample preparation for fibre reinforced sands. **Geotextiles and Geomembranes**, Elsevier, v. 34, p. 69–79, 2012.

IBRAIM, E. *et al.* Static liquefaction of fibre reinforced sand under monotonic loading. **Geotextiles and Geomembranes**, Elsevier, v. 28, n. 4, p. 374–385, 2010.

JOHNSTON, C. **Advances in Concrete Technology**. [S.l.]: Ottawa: National Resources Canada) Fiber-Reinforced Cement and Concrete, 1994.

JOY, S. *et al.* Biodegradation of coir geotextile in tropical climatic conditions. In: **Proceedings of the golden jubilee Indian geotechnical conference, Kochi, India**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 604–606.

KUGAN, R.; SARSBY, R. **In-soil biodegradation of palm mat geotextiles**. Land Degradation & Development, Wiley Online Library, v. 22, n. 5, p. 463–471, 2011.

LEOCÁDIO, G. **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., 2005.

LIRER, S.; FLORA, A.; CONSOLI, N. C. **Experimental evidences of the effect of fibres in reinforcing a sandy gravel**. Geotechnical and Geological Engineering, Springer, v. 30, n. 1, p. 75–83, 2012.

LOUZADA, N. S. **Experimental Study of Soils Reinforced with Crushed Polyethylene Terephthalate (PET) Residue**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

LUCENA, J. C. T. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

MAHER, M.; GRAY, D. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 116, n. 11, p. 1661–1677, 1990.

MAHER, M.; HO, Y. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. **Journal of Geotechnical Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 120, n. 8, p. 1381–1393, 1994.

MARTINS, A. **Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal**. Tese (Doutorado) — UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, 2014.

MATTOSO, L.; FERREIRA, F.; CURVELO, A. Sisal fiber: morphology and applications in polymer composites. In: **international symposium on**. [S.l.: s.n.], 1997.

MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.; AL-HASANI, M. Effect of inclusion properties on the behaviour of sand. **Geotechnique**, Thomas Telford Ltd, v. 28, n. 3, p. 327–346, 1978.

MELO FILHO, J. A. **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, 2012.

METHACANON, P. *et al.* Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life geotextiles. **Carbohydrate Polymers**, Elsevier Ltd., v. 82, p. 1090–1096, 2010.

MICHALOWSKI, R. L.; CERMÁK, J. 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, 2003.

MONTARDO, J. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. Dissertação (Mestrado) — CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 1999.

MONTARDO, J. P.; CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M. 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, 2002.

MORASSI, O.J. (1994). Fibras Naturais – aspectos e aplicações na indústria automobilística. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais**, 11., 1994, Águas de São Pedro. Anais.

MOREL, J. C. & GOURC, J. P. (1997). Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements. **Geosynthetics Int.** 4, No. 5.

NATARAJ, M.; ADDULA, H.; MCMANIS, K. Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils. In: **International Symposium on Environmental Geotechnology**. [S.l.: s.n.], 1996. v. 3

PALACIOS, M. **Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de Polipropileno Submetida a Ensaio Triaxiais de Extensão**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PALMEIRA, E. Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos. In: SÃO PAULO: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **1º Simpósio Brasileiro Sobre Geossintéticos - Geossintéticos'92**. Brasília, 1992. p. 1–20.

PERISSOTTO, D. **Estudo Comparativo das Propriedades Químicas de Polpas Kraft Convencionais e MCC de Eucalipto**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

PICANÇO, M. d. S. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá**. 2005. Dissertação (Mestrado) — Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PINTO, A. R. A. G. **Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo**. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.

PRABAKAR, J.; SRIDHAR, R. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 16, n. 2, p. 123–131, 2002.

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

SANTIAGO, G. A. **Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, 2011.

SANTONI, R. L.; TINGLE, J. S.; WEBSTER, S. L. Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction. **Journal of geotechnical and environmental engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 127, n. 3, p. 258–268, 2001.

SANTOS, A.P.S. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra sob compressão confinada com medição de tensão lateral**. Porto Alegre, 2004. 125p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

SANTOS, P. A. *et al.* Efeito da forma de processamento e do tratamento da fibra de curauá nas propriedades de compósitos com poliamida-6. **Polímeros: Ciência e tecnologia**, Associação Brasileira de Polímeros, v. 19, n. 1, 2009.

SENEZ, P. C. **Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET)**. Dissertação (Mestrado) — PUC-Rio, 2016.

SHEWBRIDGE, S. E.; SITAR, N. Deformation-based model for reinforced sand. **Journal of geotechnical engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 116, n. 7, p. 1153–1170, 1990.

SILVA, F. **Durabilidade e Propriedades Mecânicas de Compósitos Cimentícios Reforçados por Fibras de Sisal**. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) — COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, F. d. A.; CHAWLA, N.; FILHO, D. T. R. Mechanical behavior of natural sisal fibers. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, American Scientific Publishers, v. 4, n. 2, p. 106–113, 2010.

SILVA, O. R. R. F. *et al.* Cultivo do sisal no nordeste brasileiro. **Embrapa Algodão. Circular Técnica**, Campina Grande: Embrapa Algodão, 2008.

SILVEIRA, M. V. **Análise do comportamento mecânico e da durabilidade em compósitos de areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal**. Tese (Tese de Doutorado em Geotecnia) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SOTOMAYOR, J. M. G. **Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibra de coco submetida a ensaios de placa em verdadeira grandeza**. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Geotecnia) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SOTOMAYOR, J. M. G. **Avaliação do comportamento mecânico drenado e não drenado de rejeitos de minérios de ferro e ouro reforçados com fibras de polipropileno**. Tese (Tese de Doutorado em Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SOTOMAYOR, J.M.G; CASAGRANDE, M.D.T. The Performance of a Sand Reinforced with Coconut Fiber Through Plate Load Tests on a True Scale Physical Model. **Soils and Rocks**, São Paulo, 2018.

SPECHT, L. **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, 2000.

TANG, C. *et al.* 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, 2007.

TAYLOR, G. D. **Materials in construction**. [S.l.]: Longman Scientific & Technical, 1994.

TEODORO, J.; BUENO, B. 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.], 1998. v. 11, p. 1093–1100.

THOMAS, S. *et al.* Natural fibres: structure, properties and applications. In: **Cellulose fibers: bio-and nano-polymer composites**. [S.l.]: Springer, 2011. p. 3–42.

TOLÊDO FILHO, R. **Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental**. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1997.

TOMCZAK, F. **Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2011.

TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K. G.; SYDENSTRICKER, T. H. D. 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, 2007.

ULBRICH, L. **Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras**. Porto Alegre, 1997. 122p. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia)—Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1997.

VAN IMPE, W. **Soil improvement techniques and their evolution**. [S.l.]: CRC Press, 1989.

VENDRUSCOLO, M. **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, 2003.

VIDAL, H. The principle of reinforced earth. **Highway Research Record**, n. 282, 1969.

YANG, H. *et al.* Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, Elsevier, v. 86, n. 12-13, p. 1781–1788, 2007.

YANG, X.; XIN, D. Prediction of outdoor weathering performance of polypropylene filaments by accelerated weathering tests. **Geotextiles and Geomembranes**, Elsevier, v. 26, p. 103-109, 2006.