

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

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO ARENOSO
REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS
SUBMETIDO A ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO
EM MÉDIA ESCALA**

LEILA MARIA COELHO DE CARVALHO

ORIENTADORA: MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DSc.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

BRASÍLIA/DF: MARÇO/2019

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

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO ARENOSO
REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS
SUBMETIDO A ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO
EM MÉDIA ESCALA

LEILA MARIA COELHO DE CARVALHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DSc. (UnB)
(ORIENTADORA)

GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

SILVRANO ADONIAS DANTAS NETO, DSc. (UFC)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 15 de MARÇO de 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

CARVALHO, LEILA MARIA COELHO DE

Comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras naturais submetido a ensaios de cisalhamento direto em média escala. [Distrito Federal] 2019

xv, 105 p., 297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2019)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Reforço de solo

2. Fibras naturais

3. Novos materiais geotécnicos

4. Cisalhamento direto

I. ENC/FT/UnB

II. Mestre

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARVALHO, L.M.C. (2019). Comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras naturais submetido a ensaios de cisalhamento direto em média escala. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-324/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105 p.

CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DO AUTOR: Leila Maria Coelho de Carvalho

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras naturais submetido a ensaios de cisalhamento direto em média escala.

GRAU/ANO: Mestre/2019

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

Leila Maria Coelho de Carvalho

Shin CA 2, Bloco A, Apto 220B.

CEP: 71.503-502, Lago Norte, Brasília/DF – Brasil

leila.mariacarvalho@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

Todas as conquistas são realizadas através de um longo e árduo trabalho, e a presente realização não teria sido possível sem a colaboração, o estímulo e o empenho de diversas pessoas que prestaram apoio e forças para que eu pudesse continuar em qualquer circunstância. Assim, nas linhas que se seguem, gostaria de expressar minha gratidão a todos aqueles que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para que esta missão se tornasse uma realidade.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, por serem guias e luzes. Se der certo, ele é Deus! E se não der certo, ele continua sendo Deus! A ti, Senhor, entrego o meu caminho!

Agradeço ao meu melhor amigo, namorado, noivo, Fernando, por estar sempre ao meu lado, ter me levantado quando caí e sempre acreditar em mim, mesmo quando tudo parecia perdido. Ao seu lado sou a minha melhor versão! Obrigada por tudo!

Agradeço a minha família: aos meus pais, Francisco Cavalcante e Conceição de Maria, que nunca pouparam esforços para que eu conquistasse todos os meus sonhos, sempre me apoiando em todos os momentos e nunca deixando de acreditar em meu potencial; aos meus irmãos, Clara, Ercília e Davi, pela amizade, pelo companheirismo e por tudo, pois esta temporada distante somente me mostrou o quanto amo vocês e o quanto vocês são importantes para mim.

Agradeço a minha orientadora, professora Michéle, pela oportunidade deste trabalho que, sem dúvida, me propiciou amadurecer tanto profissionalmente como pessoalmente. Muito Obrigada!

A todos os amigos que fiz aqui, pois nossa amizade ultrapassou os limites da Geotecnia e espero que ela continue para sempre: aos amigos da turma 2017.1 – Silvana, Mariana, Thame, Tânia, Leonardo, Felipe, Lucas e Luango; e, aos amigos queridos Ana Beatriz, Patrícia, Taís, Ronaldo. Esta vitória não teria o mesmo sabor se não fosse por vocês!

Em especial, agradeço aos professores que se tornaram amigos: Renato Cunha e Luís Fernando. Assim como minha família, vocês ofertaram todo tipo de apoio em todos os momentos desta fase. Esta vitória é de vocês também! Muito obrigada!

Um agradecimento em especial ao senhor Arthur, que me ajudou com os materiais utilizados na pesquisa; aos amigos Nelson e Ana Carolina, no apoio de montagem e na consolidação do equipamento; e, aos laboratoristas Rogério e Saimon, que me auxiliaram nos ensaios durante a pesquisa. Muito obrigada! Vocês foram demasiadamente perfeitos!

Por último, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – fundação vinculada ao Ministério da Educação – MEC; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq; e, ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília – PPG-UnB, pelo apoio financeiro.

RESUMO

O presente estudo teve por objetivo estudar o comportamento mecânico de compósitos solo-fibra através da inserção de fibras naturais de sisal, curauá e coco, em uma matriz de solo arenoso, com comprimentos e teores de fibras distintos, onde as fibras foram distribuídas aleatoriamente na massa de solo. O comportamento tensão *versus* deslocamento foi avaliado por meio de ensaios de cisalhamento direto em média escala, em amostras com dimensões 300 x 300 mm e 220 mm de altura. Os ensaios se deram fazendo uso de fibras com 25 e 50 mm de comprimento, nos teores de 0,5 e 0,75% de fibra (em relação ao peso seco do solo), em uma densidade relativa de 50% e 10% de umidade. Buscou-se estabelecer um padrão do comportamento para a explicação da influência do tipo de fibra vegetal, variação de comprimento e teor das fibras, comparando-as com os parâmetros de resistência do solo arenoso. A partir dos ensaios de cisalhamento direto, considerando os parâmetros de resistência, apresentou-se a mistura CC_0,75_50 (compósito solo-fibra de coco com comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra) como aquela que evidenciou os melhores resultados, com o ângulo de atrito e intercepto coesivo, quando comparado com os parâmetros de resistência do solo arenoso. Os resultados se mostraram satisfatórios para a inclusão das fibras vegetais de sisal, curauá e coco, como reforço de solos arenosos, com potencial aplicação em aterros sobre solos moles, taludes e fundações superficiais, dando um fim mais nobre a este material no âmbito técnico, atendendo a aspectos econômicos, sociais e ambientais.

Palavras-chave: Fibras naturais. Cisalhamento direto. Resistência ao cisalhamento. Parâmetros de resistência. Reforço de solo.

ABSTRACT

The present research has the aim to study the mechanical behavior of soil-fiber composites by insertion of natural fibers of sisal, curauá and coconut into a sandy soil matrix with different fiber lengths and contents, where the fibers were randomly distributed in the soil mass. The stress-displacement behavior was evaluated by direct shear tests of medium scale, in samples with dimensions of 300 x 300 mm and 220 mm in height. The tests were carried out using fibers with 25 and 50 mm length, in contents of 0.5 and 0.75% of fiber (in relation to the dry weight of the soil), in a relative density of 50% and 10% moisture content. It was tried to establish a behavior pattern so that the influence of the vegetal fiber type, length variation and fiber content can be explained, comparing them with the sandy soil shear strength parameters. From the direct shear tests, considering the shear strength parameters, the mixture CC_0.75_50 (soil-coconut fiber composite with 50 mm length and 0.75% fiber content) is presented as the mixture that presented the better results, when compared with the sandy soil shear strength parameters. The results were satisfactory for the inclusion of sisal, curauá and coconut fibers as reinforcement of sandy soils, with potential application in landfills on soft soils, slopes and superficial foundations, giving a better end to this material in the technical scope, economic, social and environmental aspects.

Keywords: Natural fibers. Direct shearing. Shear strength. Parameters of resistance. Reinforcement of soil.

ÍNDICE

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – OBJETIVOS	3
1.1.1 – OBJETIVO GERAL	3
1.1.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.2 – ESTRUTURA DA PESQUISA	3
2 – REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1 – MECANISMOS DE INTERAÇÃO SOLO-FIBRA	5
2.2 – REFORÇO DE SOLO COM FIBRAS VEGETAIS	14
2.2.1 – FIBRAS VEGETAIS	15
2.2.1.1 – FIBRA DE SISAL.....	17
2.2.1.2 – FIBRA DE CURAUÁ.....	18
2.2.1.3 – FIBRA DE COCO.....	20
2.2.2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MORFOLÓGICA DAS FIBRAS VEGETAIS.....	21
2.2.3 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS FIBRAS VEGETAIS.....	24
2.2.4 – REFORÇO DE SOLO COM FIBRAS VEGETAIS – ESTUDOS EXPERIMENTAIS	26
3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	30
3.1 – PROJETO EXPERIMENTAL.....	30
3.2 – VARIÁVEIS INVESTIGADAS.....	31
3.3 – MATERIAIS UTILIZADOS	32
3.3.1 – SOLO ARENOSO.....	32
3.3.2 – FIBRAS VEGETAIS	33
3.3.3 – ÁGUA	36
3.4 – MÉTODOS E PROCEDIMENTOS	36
3.4.1 – PROGRAMA DE ENSAIOS	36
3.4.2 – CISALHAMENTO DIRETO DE MÉDIAS DIMENSÕES	40
3.4.3 – PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS SOLO-FIBRA.....	45
3.4.4 – PREPARO DOS CORPO DE PROVA.....	46
3.4.5 – ANÁLISE DA RUPTURA E DO ALONGAMENTO DAS FIBRAS	47
4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	49
4.1 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO SOLO ARENOSO.....	49

4.2 – ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DE MÉDIAS DIMENSÕES.....	52
4.2.1 – CURVAS TENSÃO CISALHANTE <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO HORIZONTAL	52
4.2.1.1 – FIBRA VEGETAL DE SISAL	52
4.2.1.2 – FIBRA VEGETAL DE CURAUÁ	54
4.2.1.3 – FIBRA VEGETAL DE COCO	56
4.2.2 – ENVOLTÓRIAS E PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO ..	59
4.2.2.1 – FIBRA VEGETAL DE SISAL	59
4.2.2.2 – FIBRA VEGETAL DE CURAUÁ	61
4.2.2.3 – FIBRA VEGETAL DE COCO	63
4.2.3 – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE FIBRA VEGETAL	65
4.2.4 – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO TEOR DE FIBRA VEGETAL	67
4.2.5 – INFLUÊNCIA DO TIPO DE FIBRA VEGETAL.....	69
4.2.6 – ESTUDO DO ALONGAMENTO E DA RUPTURA DAS FIBRAS VEGETAIS.....	71
4.2.7 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM BASE NA LITERATURA EXISTENTE	73
5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	76
5.1 – CONCLUSÕES	76
5.2 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	78
APÊNDICES	85
A – APRESENTAÇÃO DE TODAS AS CURVAS DE DESLOCAMENTO VERTICAL VERSUS DESLOCAMENTO HORIZONTAL DOS ENSAIOS DE SOLO ARENOSO COM E SEM FIBRAS VEGETAIS, CONSTATADOS NOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO	86
B – DESCRIÇÃO DE TODOS OS VALORES NUMÉRICOS DE TENSÃO CISALHANTE, NOS DESLOCAMENTOS DE 20, 25, 30 E 35 MM, DO SOLO ARENOSO E COMPÓSITOS SOLO-FIBRA, DURANTE O ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray & Ohashi, 1983).....	7
Figura 2.2 – Disposição fibra-fissura idealizada (Taylor, 1994).....	11
Figura 2.3 – Desenho esquemático do reforço da fibra de sisal (Wei <i>et al.</i> , 2018).....	14
Figura 2.4 – Plantação de sisal (Santiago, 2011).....	17
Figura 2.5 – Plantação e fruto de curauá (Santiago, 2011; Pinto, 2007).....	19
Figura 2.6 – Corte longitudinal do coco (Bolaños, 2013).....	20
Figura 2.7 – Estrutura de uma fibra de sisal (Melo Filho, 2012).....	21
Figura 2.8 – Microestrutura da fibra de sisal: (a) Fibrocélulas com lúmen e lamela média; e, (b) Detalhe da lamela média e das paredes celulares (Silva <i>et al.</i> , 2008).....	22
Figura 2.9 – Morfologia das fibras vegetais (Pereira <i>et al.</i> , 2012).....	24
Figura 3.1 – Metodologia da pesquisa.....	31
Figura 3.2 – Fibras utilizadas na pesquisa: a) Sisal; b) Curauá; e, c) Coco.....	34
Figura 3.3 – Fibras de sisal, curauá e coco no comprimento de 50 mm.....	35
Figura 3.4 – Processos de preparação com limpeza: fibra de Sisal com 25 mm de comprimento.....	35
Figura 3.5 – Legenda dos ensaios.....	38
Figura 3.6 – Distribuição do corpo de prova na caixa de cisalhamento direto.....	39
Figura 3.7 – Representação do mecanismo de ruptura e alongamento das fibras vegetais submetidas à tensão cisalhante.....	40
Figura 3.8 – Visão geral do equipamento de cisalhamento direto: a) Sistema hidráulico para aplicação da força tangencial; e, b) Sistema hidráulico para aplicação da forma normal.....	41
Figura 3.9 – Esquema dos componentes da prensa de cisalhamento direto.....	42
Figura 3.10 – Detalhes dos trilhos de deslocamento da caixa (Souza, 2011).....	42
Figura 3.11 – Sistema de carregamento na vertical.....	43
Figura 3.12 – Aquisitor de dados – Spider 8.....	44
Figura 3.13 – Detalhes dos sensores de deslocamento.....	44
Figura 3.14 – Preparo das misturas do compósito solo-fibra.....	46

Figura 3.15 –	Altura das camadas, feitas com marcações, no interior da caixa de cisalhamento.....	47
Figura 3.16 –	Zona de cisalhamento do corpo de prova.....	48
Figura 4.1 –	Solo arenoso.....	49
Figura 4.2 –	Curva da análise granulométrica do solo arenoso.....	50
Figura 4.3 –	Curva tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para solo arenoso.....	51
Figura 4.4 –	Curva tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibra de sisal com comprimento de 25 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.....	53
Figura 4.5 –	Curva tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibra de sisal com comprimento de 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.....	54
Figura 4.6 –	Curva tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibra de curauá com comprimento de 25 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.....	55
Figura 4.7 –	Curva tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibra de curauá com comprimento de 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.....	56
Figura 4.8 –	Curva tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibra de coco com comprimento de 25 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.....	57
Figura 4.9 –	Curva tensão cisalhante <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibra de coco com comprimento de 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.....	58
Figura 4.10 –	Envoltórias de resistência para solo arenoso e misturas solo-fibra com fibras de sisal no comprimento de 25 e 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.....	60
Figura 4.11 –	Valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo arenoso e solo-fibra reforçados com fibra de sisal.....	60
Figura 4.12 –	Envoltórias de resistência para solo arenoso e misturas solo-fibra com fibras de curauá no comprimento de 25 e 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.....	62
Figura 4.13 –	Valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo arenoso e solo-fibra reforçados com fibra de curauá.....	62
Figura 4.14 –	Envoltórias de resistência para solo arenoso e misturas solo-fibra com fibras de coco no comprimento de 25 e 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.....	63

Figura 4.15 – Valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo arenoso e solo-fibra reforçados com fibra de coco.....	64
Figura 4.16 – Curva tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibras de sisal, curauá e coco, nos comprimentos de 25 e 50 mm e teor 0,50% de fibra.....	65
Figura 4.17 – Curva tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibras de sisal, curauá e coco, nos comprimentos de 25 e 50 mm e teor 0,75% de fibra.....	66
Figura 4.18 – Curva tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento horizontal para as fibras de sisal, curauá e coco com comprimentos de 50 mm e teor 0,750% de fibra.....	70
Figura 4.19 – Comprimento final das fibras <i>versus</i> porcentagem de fibras.....	72
Figura A.1 – Curva deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para solo arenoso.....	86
Figura A.2 – Curva deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibra de sisal com comprimento de 25 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.....	87
Figura A.3 – Curva deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibra de sisal com comprimento de 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.....	87
Figura A.4 – Curva deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibra de curauá com comprimento de 25 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra..	88
Figura A.5 – Curva deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibra de curauá com comprimento de 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra..	88
Figura A.6 – Curva deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibra de coco com comprimento de 25 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.....	89
Figura A.7 – Curva deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal para fibra de coco com comprimento de 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.....	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 –	Propriedades químicas das fibras vegetais (Pires, 2009).....	23
Tabela 2.2 –	Propriedades físicas das fibras vegetais.....	25
Tabela 2.3 –	Propriedades mecânicas das fibras vegetais.....	25
Tabela 3.1 –	Programa de ensaios – 2º Fase.....	37
Tabela 3.2 –	Programa de ensaios – 3º Fase.....	40
Tabela 4.1 –	Índices físicos do solo arenoso.....	50
Tabela 4.2 –	Tensões cisalhantes para diferentes deslocamentos no ensaio de cisalhamento direto – Fibras vegetais com comprimento de 25 e 50 mm e teor de 0,5% de fibra.....	67
Tabela 4.3 –	Tensões cisalhantes para diferentes deslocamentos no ensaio de cisalhamento direto – Fibras vegetais com comprimento de 25 e 50 mm e teor de 0,75% de fibra.....	68
Tabela 4.4 –	Análise estatística do alongamento e ruptura das fibras vegetais.....	73
Tabela 4.5 –	Quadro comparativo dos parâmetros de resistência entre pesquisas.....	74
Tabela B.1 –	Descrição de todos os valores numéricos de tensão cisalhante, nos deslocamentos de 20, 25, 30 e 35 mm, do solo arenoso e compósitos solo-fibra, durante o ensaio de cisalhamento direto.....	90

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
APAEB	- Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira
ASTM	- American Society for Testing and Materials
c	- Coesão do solo
c'	- Coesão efetiva do solo
Ca	- Cálcio
CA	- Solo arenoso reforçado com fibra de curauá
CC	- solo arenoso reforçado com fibra de coco
CC	- Coeficiente de Curvatura
CEPED	- Centro de Pesquisa e Desenvolvimento
cm	- Centímetro
CNU	- Coeficiente de Uniformidade
COMLURB	- Companhia Municipal de Limpeza Urbana
C_v	- Coeficiente de adensamento
D_{10}	- Diâmetro efetivo
D_{50}	- Diâmetro médio
d_f	- Deslocamento lateral relativo na ruptura
E	- Índice de Vazios
EUA	- Estados Unidos da América
F_a	- Resistência de aderência
FCA	- Faculdade de Ciências Agronômicas
F_t	- Resistência à tração da fibra
GPa	- Gigapascal
Gs	- Densidade Real dos Grãos
Hz	- Hertz
In	- Polegadas
K	- Potássio
kg	- Quilograma
kN	- QuiloNewton
kPa	- Quilopascal

L	- Litro
L/d	- Fator de forma
LM	- Lamela Média
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
Mg	- Magnésio
mm	- Milímetro
MPa	- Megapascal
NBR	- Norma Brasileira
RA	- Região Administrativa
SA	- Solo arenoso
SECONSERVA	- Secretaria de Conservação e Serviços Públicos
Si	- Silício
SS	- Solo arenoso reforçado com fibra de sisal
SUCS	- Sistema Unificado de Classificação de Solos
t_{50}	- Tempo necessário para a amostra alcançar 50% do adensamento
t_f	- Tempo estimado total para ruptura
UnB	- Universidade de Brasília
UNESP	- Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
$Emáx$	- Índice de Vazios Máximo
$Emín$	- Índice de Vazios Mínimo
σ'	- Tensão efetiva normal no plano de cisalhamento
τ	- Resistência ao cisalhamento do solo
ϕ	- Ângulo de atrito do solo
ϕ'	- Ângulo de atrito efetivo do solo

1 – INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de uma “tecnologia ecológica” tornou-se uma necessidade para a proteção ambiental em todo o mundo, onde se buscam novos materiais que sejam ecologicamente apropriados. Neste ínterim, o Brasil é destaque por ser um país com grande potencial de liderança da tecnologia de fabricação de compósitos reforçados com fibras vegetais para aplicação nas mais variadas áreas, uma vez que possui uma das maiores extensões territorial cultivável do mundo, sendo um dos maiores produtores mundiais de várias fibras vegetais.

A influência da adição de fibras ao solo proporciona o desenvolvimento de um novo material geotécnico com características próprias, com base na melhoria das propriedades mecânicas do novo material (Casagrande, 2005). Segundo Palacios (2014), atualmente, um grande número de novos materiais tem sido desenvolvido, em geral, com base em materiais tradicionais, mas incorporando, de algum modo, elementos de reforço. Para tanto, faz-se importante conhecer as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição e como eles podem ser combinados.

Diante do exposto, nas linhas que se seguem tem-se a apresentação da motivação da pesquisa, dos objetivos gerais e específicos e da estrutura do trabalho acadêmico outrora disposto.

Durante o último meio século, as fibras artificiais – acrílico, poliéster e polipropileno – foram bastante utilizadas em todo o mundo devido ao seu custo. Atualmente, tem-se observado alguns problemas com os materiais em questão, como, por exemplo, o uso e esgotamento dos seus recursos. Assim, faz-se importante o desenvolvimento de materiais alternativos como um novo caminho para sustentabilidade – o que acarreta no aumento das pesquisas com novos materiais, de origem natural, provenientes de fontes renováveis e menos poluentes.

Existem diversos tipos de fibras que são utilizadas no mundo, podendo-se considerar dois grandes grupos, quais sejam: 1) As fibras sintéticas, compostas por materiais artificiais, resultantes de processos industriais, que apresentam vantagens em suas propriedades mecânicas constantes, bem definidas, e maior resistência ao intemperismo; e, 2) As fibras naturais, em grande parte, de origem vegetal (orgânicas), que apresentam constância nas suas características físicas (diâmetro, e comprimento), mas que ainda apresentam bons resultados (reforço de solo, por exemplo), porém, com desvantagem para o fato de estarem sujeitas à

degradação biológica, mesmo sendo seu uso uma forma de reciclagem que contribui com a preservação do meio ambiente.

A aplicação de materiais alternativos para o reforço de solos é um tema crescente e de interesse nas diversas áreas da Engenharia. A técnica de melhorar as propriedades mecânicas dos solos com a adição de fibras há muito tempo é utilizada pela humanidade, mas somente depois da segunda metade do século XX é que vários trabalhos foram publicados com o interesse de analisar o efeito da adição de fibras vegetais na melhoria do comportamento mecânico dos solos.

Segundo Izquierdo (2011), o Brasil é o maior produtor de sisal do mundo, sendo o Estado de Bahia responsável por 80% da produção da fibra nacional. Algumas vantagens apresentadas pela fibra de sisal são: facilidade de cultivo; material biodegradável proveniente de fonte renovável; boas propriedades (isolante térmico e acústico, por exemplo); alta tenacidade; resistência à abrasão e baixo custo etc.

De modo pátrio, o consumo de água de coco tem crescido entre 10% e 20% ao ano. Segundo o Sindicato Nacional dos Produtores de Coco do Brasil – SINDCOCO (2017), anualmente é produzido um bilhão de cocos verdes (de onde é extraído a água) e um bilhão de cocos secos (matéria-prima de coco ralado e do leite de coco. As cascas do coco verde correspondem a 80% do peso bruto do fruto.

Em suma, o Brasil produz cerca de 8,1 bilhões de unidades de coco – material que vem sendo disposto em aterros e lixões, provocando enorme problema aos serviços municipais de coleta de lixo devido ao seu grande volume. Aqui é preciso destacar que o meio ambiente leva de oito a 12 anos para decompor o coco, sendo que o desenvolvimento de alternativas de aproveitamento da casca de coco verde possibilita reduzir a quantidade de resíduos sólidos nos aterros sanitários, além de proporcionar uma nova opção de rendimento.

O curauá é uma planta fibrosa da família das broméliceas, que pode ser utilizada nos mais variados produtos. Sua fibra é um produto altamente absorvente, resistente, macio e leve, que tem sido utilizada pela indústria automobilística, têxtil, farmacêutica e de celulose e papel (Cordeiro *et al.*, 2009).

Neste contexto, o presente trabalho teve por norte contribuir com as pesquisas que investigam o comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras vegetais (sisal, curauá e cocó), podendo potencializar o uso de misturas solo-fibra vegetal em obras de terra.

1.1 – OBJETIVOS

A seguir, tem-se a descrição dos objetivos gerais e específicos da presente pesquisa.

1.1.1 – OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras vegetais (sisal, curauá e coco), por meio da utilização do equipamento de cisalhamento direto de médias dimensões (300 mm de largura x 300 mm de comprimento x 220 mm altura).

1.1.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o comportamento mecânico do solo arenoso com e sem reforço, submetido a ensaios de cisalhamento direto de médias dimensões; e
- Avaliar a influência da adição de fibras vegetais distintas (sisal, curauá e coco), bem como as influências dos comprimentos de fibra (25 e 50 mm) e teores de fibra (0,5 e 0,75%), no ganho dos parâmetros de resistência dos compósitos reforçados estudados.

1.2 – ESTRUTURA DA PESQUISA

A presente Dissertação foi estruturada em cinco capítulos. Neste sentido, o capítulo em questão detalha os seguintes pontos: motivação da realização do trabalho; objetivos geral e específicos; e, organização da Dissertação.

No segundo capítulo tem-se a revisão bibliográfica, que fundamenta a base teórica relacionada ao mecanismo de interação solo-fibra, bem como o estudo da composição química, da morfologia, das propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais, e dos estudos experimentais de solos reforçados com fibras vegetais (sisal, curauá e coco).

A apresentação da metodologia utilizada no presente estudo se dá no terceiro capítulo, onde se tem: o programa experimental; as variáveis investigadas; os materiais utilizados; a preparação das misturas; e, a metodologia para a análise da ruptura e do alongamento das fibras.

No quarto capítulo têm-se os resultados obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto de médias dimensões (envoltórias e parâmetros de resistência ao cisalhamento), bem como a análise da influência da variação do comprimento, teor e tipo de fibra vegetal na resistência ao cisalhamento do compósito solo-fibra, além de tratar do alongamento e da ruptura das fibras vegetais após a realização do ensaio de cisalhamento direto para a tensão normal de 100 kPa.

No quinto e último capítulo têm-se as conclusões da pesquisa indicando os resultados obtidos e os objetivos alcançados, bem como as sugestões para pesquisas futuras.

2 – REVISÃO DA LITERATURA

No presente capítulo tem-se a revisão da literatura sobre os mecanismos de interação solo-fibra, com base no reforço de solo com fibras vegetais (sisal, curauá e coco), com suas características químicas, morfológicas, físicas e mecânicas, sendo apresentados os resultados de estudos documentados do efeito da interação solo-fibras vegetais como reforço, as alterações do comportamento do solo causadas pela adição de fibras e as mudanças acarretadas pela melhoria da resistência.

2.1 – MECANISMOS DE INTERAÇÃO SOLO-FIBRA

Os mecanismos de interação solo-fibra estão ligados a vários fatores que vêm sendo estudados na literatura, por diferentes autores, avaliando o comportamento dos solos reforçados, por meio dos parâmetros de resistência e deformabilidade. Neste sentido, no presente tópico, tem-se a apresentação dos mecanismos que regem o comportamento dos materiais compósitos, sem desprezar as consequências, pois estas permitem identificar mudanças nos mecanismos.

Segundo McGown *et al.* (1978), a adesão entre o solo e o reforço e as características de deformação do elemento de reforço são parâmetros importantes na definição do comportamento do material compósito. Neste sentido, aqueles autores observaram que o comportamento tensão *versus* deformação do solo reforçado depende fundamentalmente das características de resistência e deformabilidade dos elementos de reforço. Eles propuseram a divisão de reforço de solos, com base na deformabilidade do reforço, em inclusões extensíveis e inextensíveis. O elemento de reforço extensível apresenta deformação de ruptura maior que a máxima deformação de tração no solo sem reforço. Sua principal função é aumentar a ductilidade e diminuir a perda de resistência pós-pico, além de acrescentar resistência mecânica. Já o elemento de reforço inextensível possui deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem reforço, conferindo, portanto, ganho de resistência mecânica; porém, rupturas catastróficas podem ocorrer se o reforço apresentar algum tipo de ruptura.

As fibras transferem esforços para o solo quando submetidas a esforços de tração, provocando uma redistribuição de tensões e de deformações no interior do solo. Tal processo é controlado pelas características de deformabilidade e resistência tanto do solo como do

reforço, bem como pelos reforços de adesão que se desenvolvem na *interface* destas duas fases.

De fato, ao elevar a tensão efetiva média (ρ') atuante em um elemento de solo, eleva-se também a resistência ao cisalhamento, pois se tem o aumento do atrito entre as partículas. Do mesmo modo, aumenta-se o atrito entre o solo e o reforço para o caso de solos reforçados. Tal alteração no atrito entre os dois componentes (solo e reforço) pode provocar mudanças no mecanismo de interação solo-fibra. E ainda, acima de uma dada tensão efetiva média normal, as envoltórias tornam-se paralelas à envoltória de solo sem fibra (Feuerharmel, 2000). Vale destacar que os primeiros autores a observar tal comportamento foram Gray & Ohashi (1983), para fibras orientadas, e Gray & Alrefeai (1986), para fibras aleatoriamente distribuídas.

Gray & Ohashi (1983) executaram ensaios de cisalhamento direto com areia, reforçada com fibras vegetais, com mudanças na orientação do reforço. Nos resultados obtidos nos ensaios, aqueles autores observaram que a inclusão da fibra aumenta a resistência ao cisalhamento de pico e reduz a queda pós-pico, pois, as fibras de menor comprimento comportaram-se como uma inclusão extensível, ou seja, não se romperam durante o ensaio; o aumento do comprimento das fibras resultou em um aumento da resistência – verificado até certo limite, onde o efeito em questão não é mais observado; a orientação das fibras com relação à superfície de cisalhamento pode contribuir ou reduzir a resistência ao cisalhamento.

A Figura 2.1, a seguir, apresenta os resultados de ensaios de cisalhamento direto, realizados por Gray & Ohashi (1983), analisando o efeito da orientação do reforço. Ali é possível observar que a inclinação de 60° em relação ao plano de ruptura representa a maior contribuição em termos de resistência, e a inclinação de 120° representa a redução da resistência ao cisalhamento.

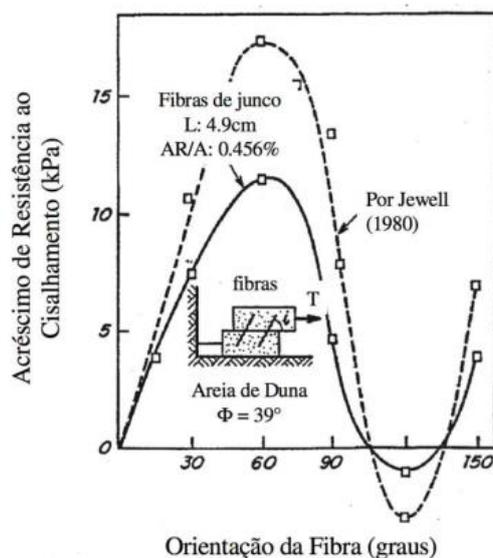


Figura 2.1 – Acréscimo de resistência em função da inclinação da fibra (Gray & Ohashi, 1983).

Os ensaios de cisalhamento direto com uma matriz arenosa reforçada com a inclusão de fibras vegetais, em geral, apresentam ganho de resistência com o acréscimo de deformação, não evidenciando comportamento de pico, independente da sua composição. Assim, os parâmetros de resistência são estimados em função da deformação admissível.

As características almejadas com a inclusão de fibras nem sempre dizem respeito ao aumento da capacidade de suporte do material. Vários outros aspectos, tais como: maior capacidade de absorção de energia (maior resistência ao impacto); queda na redução de resistência pós-pico (para o caso de materiais mais frágeis); maior capacidade de absorção de deformações, até atingir a resistência última, entre outros, são tidos como exemplos (Casagrande, 2001).

Freitag (1986) examinou os efeitos da inclusão de fibras na resistência à compressão simples de um solo residual de calcário compactado com base em uma larga faixa de teores de umidade. Ali foram utilizadas fibras sintéticas diferentes de 20 mm de comprimento, e o teor adicionado foi de 1% em volume. Os resultados indicaram aumento da resistência à compressão não confinada, principalmente para teores de umidade próximos à ótima e no ramo úmido da curva de compactação. As curvas tensão *versus* deformação apontaram que o solo reforçado rompe em uma deformação bem superior à do solo não reforçado, sendo capaz de absorver maior energia de deformação.

Gray & Maher (1989) analisaram a influência de diversos parâmetros das fibras e dos solos sobre o comportamento tensão-deformação das misturas. Na pesquisa em questão, as fibras foram distribuídas aleatoriamente dentro do solo. Neste ínterim, aqueles autores

verificaram a existência de uma tensão de confinamento crítica, onde o aumento do fator de forma na fibra (L/d) resultou na redução da tensão de confinamento crítica, tornando mais efetiva a contribuição da fibra no aumento da resistência ao cisalhamento.

Em relação aos parâmetros de resistência c' (coesão efetiva) e ϕ' (ângulo de atrito efetivo), para tensões confinantes baixas, a inclusão de fibras afeta a parcela friccional de resistência. Para tensões maiores tem-se um ponto que define uma clara mudança no mecanismo de interação solo-fibra, onde a parcela friccional atinge o mesmo patamar do solo sem reforço, correspondendo à alteração de comportamento somente à parcela coesiva (Feurharmel, 2000).

Shewbridge & Sitar (1989) estudaram o efeito da interação solo-fibra com base em ensaios de cisalhamento direto com dimensões maiores que as convencionais. Ali, para o solo reforçado, a zona de cisalhamento era mais larga e aumentava mediante a concentração, rigidez e aderência entre o solo e o reforço. Ao final do programa experimental, aqueles autores concluíram que o aumento da resistência se deu função das propriedades da areia (gradação, tamanho, forma das partículas e aumento do coeficiente de uniformidade da areia) e da fibra (teor, relação L/d e módulo de elasticidade).

De fato, as fibras somente passam a exercer uma ação efetiva dentro da massa de solo quando estas são submetidas a esforços externos, sofre deformação. Assim, seu funcionamento como elemento de reforço é comandado pelas características de deformabilidade do solo, bem como pela forma de distribuição das deformações, que dependem do tipo de solicitação sob o qual o material está sendo submetido (Feurharmel, 2000).

Para as matrizes frágeis reforçadas com fibras de baixo módulo de elasticidade, onde o arrancamento da fibra predomina sobre a ruptura, tem-se a aderência fibra-matriz como principal fator de influência sobre a tenacidade (energia total absorvida) do compósito (Savantano Junior, 2000).

Fatani *et al.* (1991) realizaram ensaios de cisalhamento direto buscando avaliar o comportamento de uma areia siltosa reforçada. Os elementos de reforço consistiam de fibras metálicas flexíveis, semirrígidas e rígidas. A influência da orientação das fibras, segundo o plano de cisalhamento, foi investigada. Ali se percebeu que os reforços posicionados a 90° em relação ao plano de cisalhamento e distribuídos aleatoriamente são mais efetivos no aumento da resistência.

A técnica de reforço adotada em grande parte dos trabalhos mais recentes é o emprego de fibras discretas aleatoriamente distribuídas, pois estas apresentam duas grandes vantagens em relação aos solos reforçados com inclusões orientadas, contínuas ou não, a saber: 1) Minimizam o surgimento de qualquer tipo de anisotropia; e, 2) Não induzem planos preferenciais de fraqueza (Maher & Gray, 1990).

Kumar & Sanjay (2018) assim destacam as vantagens das fibras serem distribuídas de forma aleatória na massa de solo:

- Aumento da resistência ao cisalhamento;
- Beneficiamento de todos os tipos de solo (por exemplo, areia, silte e argila);
- Redução da perda de resistência pós-pico;
- Aumento da ductibilidade;
- Aumento do desempenho sísmico; e
- Ausência de falhas catastróficas.

Maher & Ho (1994) estudaram as propriedades mecânicas e hidráulicas de um compósito caulinita/fibra por meio de ensaios de compressão não confinada, compressão diametral, flexão e condutividade hidráulica, fazendo uso de fibras de polipropileno, vidro e celulose (madeira). Aqueles autores concluíram que: a inclusão das fibras, de modo aleatório, aumentou significativamente a resistência e ductilidade do compósito, sendo o aumento mais visível em baixos teores de umidade; para os mesmos teores de reforços, fibras mais curtas são mais numerosas dentro da matriz do compósito, apresentando maior probabilidade destas estarem presentes na superfície de ruptura, contribuindo, assim, para o aumento da resistência; após a ruptura, as fibras mais curtas são arrancadas facilmente, denotando a importância de fibras mais longas quando se deseja melhorar a ductilidade e capacidade de absorção de energia; e, a adição de reforços fibrosos aumentou a permeabilidade da argila, sendo mais visível em maiores teores de fibra.

Taylor (1994) estabelece que as fibras não evitam a formação de fissuras (plano de ruptura), porém, sua inclusão aumenta a resistência do solo. Aquele autor relaciona os principais parâmetros de desempenho dos materiais compósitos reforçados com fibras. Estes são assim apresentados, assumindo que as variações das propriedades descritas são atingidas independentemente:

- Teor de fibra: um alto teor de fibras confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pela fissura;
- Módulo de elasticidade da fibra: um alto valor do módulo de elasticidade causaria um efeito similar ao teor de fibra, ou seja, quanto maior o módulo, maior a probabilidade do arrancamento das fibras;
- Aderência entre a fibra e a matriz: as características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos cimentados reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz; a alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito;
- Resistência da fibra: aumentando a resistência das fibras, tem-se o aumento da ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência; a resistência necessária dependerá, na prática, das características pós-fissuração necessárias, bem como do teor de fibra e das propriedades de aderência fibra-matriz; e
- Comprimento da fibra: quanto maior for o comprimento das fibras, menor será a possibilidade delas serem arrancadas; para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, esta trabalharia mais se o seu comprimento for suficientemente capaz de permitir que a tensão cisalhante desenvolva uma tensão que iguale à resistência à tração.

As Equações 1 e 2, a seguir, idealizadas por Taylor (1994), são verificadas no momento em que a fibra é solicitada no compósito (vide Figura 2.2, a seguir). A relação L/d (comprimento/diâmetro da fibra) ou o fator de forma é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra (F_t) e a resistência de aderência entre a fibra e a matriz (F_a). Logo, se a fibra possui alta resistência à tração, como, por exemplo, o aço, a resistência de aderência deverá ser alta para dificultar o arrancamento antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada.

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

$$\frac{1}{d} = \frac{F_t}{2 F_a} \quad [2]$$

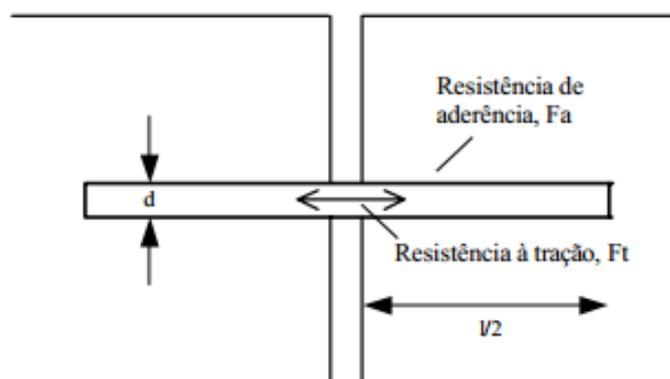


Figura 2.2 – Disposição fibra-fissura idealizada (Taylor, 1994).

Feuerharmel (2000) estudou a influência do tipo de solo no padrão de comportamento de solos reforçados. Em seu estudo foram executados ensaios triaxiais em três tipos de solo (argila, areia e areia siltosa), reforçados com fibras de polipropileno. Aquele autor concluiu que a adição de fibras de polipropileno provoca a redução do módulo de deformação inicial do solo, sendo que a intensidade das alterações depende do tipo e as características de cada solo. Assim, os solos com menor rigidez foram os mais afetados. Quanto à resistência ao cisalhamento, o comportamento dos solos reforçados pode ser dividido em três etapas, quais sejam: 1) Inicial, onde o comportamento é controlado basicamente pela matriz do solo; 2) Intermediária, onde o comportamento do material compósito é comandado conjuntamente pela matriz pelos elementos de reforço; e, 3) Final, onde o comportamento do material é comandado exclusivamente pelas fibras.

Casagrande (2001) analisou o comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras de polipropileno, distribuídas aleatoriamente na massa de solo, com ensaios triaxiais e ensaios de placa. Em seu estudo foram analisados a influência da variação das tensões confinantes durante o ensaio, o comprimento, o teor e o diâmetro das fibras. Aquela autora concluiu que os solos reforçados apresentaram um crescimento constante de resistência com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de enrijecimento. Assim, as fibras passam a contribuir mais significativamente para a resistência do material em aproximadamente 2,5% de deformação axial, identificando as deformações

plásticas na matriz não reforçada. Ali, a adição de fibras provocou aumento na coesão, mantendo seu ângulo de atrito praticamente inalterado, além do aumento do teor de fibra no solo (e, conseqüentemente, de sua resistência). E ainda, a influência do comprimento de fibra foi verificada a baixas tensões confinantes, sendo maior a resistência quanto maior for o comprimento das fibras; porém, para altas tensões confinantes, o comportamento resistente do solo reforçado com fibras foi praticamente inalterado.

Heineck (2002) afirmou existir uma bilinearidade na envoltória de ruptura de uma areia siltosa reforçada com fibras. A parte inicial da envoltória possui um intercepto coesivo quase inexistente, além de um ângulo de atrito que ultrapassa o dobro do valor correspondente ao do solo sem reforço. A partir da segunda parte da envoltória, acima da tensão confinante crítica, naquele estudo foi possível perceber que o ângulo de atrito é similar ao do solo sem reforço, porém, houve um acréscimo razoável do intercepto coesivo.

O efeito de bilinearidade nas envoltórias também foi observado por diversos autores (Casagrande, 2005; Teodoro, 1999; Stauffer & Holtz, 1995; Maher & Gray, 1990; Gray & Al-Refai, 1986; Gray & Ohashi, 1983). Teodoro & Bueno (1998) e Teodoro (1999), por exemplo, concluíram que as envoltórias tendem à bilinearidade quando do aumento do teor e do comprimento.

Vendruscolo (2003) avaliou as propriedades de resistência e deformabilidade de misturas solo-cimento-fibra. No estudo em questão, ensaios de resistência à compressão triaxial foram realizados para avaliar os efeitos de teor, comprimento e diâmetro das fibras. A influência da inclusão de fibras sobre as propriedades mecânicas do compósito dependeu fundamentalmente das propriedades da matriz; o efeito da inclusão de fibras mostrou-se mais evidente para maiores comprimentos e maiores teores de fibras, sendo este mais pronunciado para materiais compósitos com maiores densidades. Observou-se ainda que a influência das fibras na resistência de pico e última do material também depende do diâmetro das fibras e da distribuição granulométrica do solo, e que o comportamento carga *versus* recalque do solo cimentado é influenciado pela adição das fibras, alterando, principalmente, o comportamento pós-pico e o mecanismo de ruptura.

Casagrande (2005) estudou o comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras de polipropileno submetidos a grandes deformações, com a finalidade de avaliar os comportamentos tensão-deformação e carga-recalque dos compósitos. Aquela autora estabeleceu padrões de comportamento que explicam a influência da adição de fibras, relacionando-as com os parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformação do solo. As fibras de polipropileno provocaram um aumento da resistência com o aumento das

deformações distorcionais, evidenciando as deformações volumétricas de contração para as tensões efetivas médias iniciais mais altas. Nos ensaios *ring shear* constatou-se que o aumento da resistência ao cisalhamento com a inclusão de fibras se torna mais acentuado quando maior for o comprimento das fibras e o teor de fibras utilizado, e menor for o diâmetro destas, sendo mais efetivo para tensões efetivas médias iniciais baixas. E nos ensaios de prova de carga em placa, as fibras parecem inibir a propagação de fissuras, distribuindo as tensões em uma área maior; conseqüentemente, o acréscimo de resistência pela adição das fibras ao solo se deve à inibição da formação e propagação de possíveis bandas de cisalhamento.

Wei *et al.* (2018) analisaram o efeito da fibra de sisal no comportamento mecânico de um solo arenoso. Ensaio de compressão não confinados foram realizados com as fibras de sisal no comprimento de 18 mm e teores de 0.2, 0.4, 0.6 e 0.8% em relação à massa seca do solo. Aquele autor destacou que a interação solo-fibra depende do atrito, da força de intertravamento e da resistência nas *interfaces*. A Figura 2.3, a seguir, apresenta um desenho esquematizado, onde a fibra encontra-se perpendicular ao plano de ruptura do solo, de modo a esclarecer e simplificar o comportamento do composto. Devido à rotação e ao rearranjo das partículas de areia sob a tensão axial, a tensão de cisalhamento é aplicada, fazendo com que as fibras localizadas próximas ao plano de cisalhamento se dobrem, se deformem ou se quebrem, o que também mobiliza uma força de tração nas fibras incorporadas. Logo, com o desenvolvimento da fissura (plano de ruptura), as fibras existentes na abertura são submetidas a uma extensão elástica induzida pela força de tração, asseverando que a eficácia do reforço de fibras em testes de compressão não confinados pode ser melhorada como resultado das interações mecânicas interfaciais entre as fibras, a matriz de areia e a resistência à tração da fibra. Portanto, a resistência ao arrancamento condicionada pela força de adesão, fricção e força de intertravamento entre as fibras e a matriz de areia é parcialmente responsável pela melhora no comportamento à compressão, especialmente a resistência pós-pico – o que pode explicar a razão da força residual com um aumento crescente da quantidade de fibra. Sem dúvida, a inclusão de fibra diminui a rigidez e altera o comportamento frágil para um mais dúctil, melhorando, assim, a tolerância tensão e o comportamento de compressão do corpo de prova.

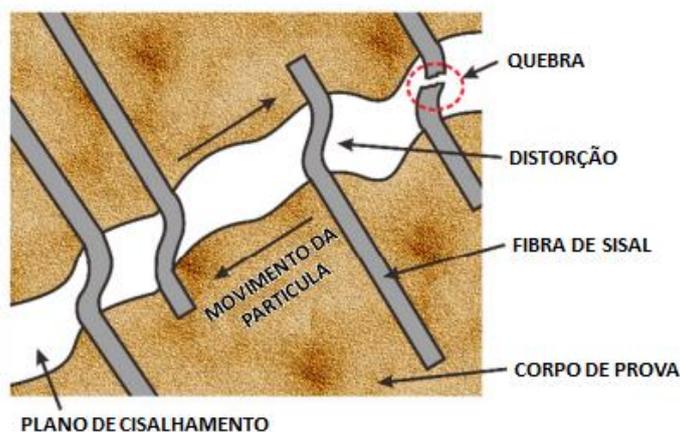


Figura 2.3 – Desenho esquemático do reforço da fibra de sisal (Wei *et al.*, 2018).

A aderência da *interface* fibra/matriz pode ser melhorada via: limpeza da superfície das fibras; eliminação de gorduras e camadas de restos de resinas e graxas; proteção das fibras vegetais com substâncias que proporcionem uma menor capacidade de absorção de água; e, aumento da rugosidade superficial das fibras (Pongrayoon *et al.*, 2008).

Nos estudos realizados por Toledo Filho (1997), Lima (2004), Silva (2009) e Silveira (2018) têm-se uma limpeza da superfície das fibras, eliminando as gorduras e camadas de restos de resinas e graxas, através da lavagem com água quente.

2.2 – REFORÇO DE SOLO COM FIBRAS VEGETAIS

O desenvolvimento de materiais compósitos reforçados por fibras de origem vegetal é, em grande parte, motivado por uma maior consciência ambiental, devido aos problemas de eliminação de resíduos e o esgotamento dos recursos petroquímicos (Dittenber & GangaRao, 2012). Neste sentido, o presente tópico buscou apresentar uma breve introdução sobre as fibras vegetais – sisal, curauá e coco – utilizadas na pesquisa em questão, observando sua composição química e morfológica, bem como suas propriedades físicas e mecânicas. Além disso, foram abordadas as conclusões de alguns autores relacionadas às mudanças que ocorrem no comportamento mecânico e nas propriedades dos solos reforçados com fibras, tais como: compactação; resistência; deformabilidade; modo de ruptura; variação volumétrica; rigidez inicial; e, condutividade hidráulica.

2.2.1 – FIBRAS VEGETAIS

As fibras naturais, também denominadas fibras lignocelulósicas ou vegetais, dividem-se em fibras de origem vegetal (fibras de madeira e bambu, sementes, fibras de frutas e fibras de folha), origem mineral (amianto, wollastonita) e origem animal (fibras de pelo, seda).

Na história da humanidade, os primeiros tipos de fibras utilizados como reforço de materiais de construção foram às fibras vegetais. No Brasil, a pesquisa pioneira coube ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento – CEPED – primeira instituição pública do Estado da Bahia certificada pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT –, com início em 1980. Porém, apesar do elevado número de pesquisas na área de reforço de solo afirmar a sua eficiência na melhoria das propriedades físicas e mecânicas, o seu emprego na produção industrial é ainda muito pequeno.

As fibras vegetais são classificadas de acordo com sua origem nas plantas e podem ser assim agrupadas: de caule; de folha; de semente; e, de fruto. Existem cerca de 250.000 espécies de plantas, mas menos de 0,1% são comercialmente importantes como fontes de fibras (Young, 1994). As fibras de sisal, curauá e banana, por exemplo, são provenientes da folha da planta. O algodão é um exemplo de fibra de sementes, e a fibra de coco é proveniente do fruto (Thomas, 2011).

As fibras que se originam das folhas são as de maior interesse para serem utilizadas como reforço, apesar de que fibras de talo, do caule e do fruto também podem ser utilizadas. Em geral, as fibras das folhas são mais grossas que as fibras dos talos, e são conhecidas como fibras “duras”, enquanto as fibras do talo são chamadas de fibras “macias”, sendo mais utilizadas para fins têxteis (Santiago, 2011).

Compósitos reforçados com fibras vegetais dependem de fatores importantes relacionados ao seu desempenho e aplicação. Neste sentido, escolher o tipo de fibra vegetal utilizada para reforço do solo dependerá das características desejadas no material compósito.

Tratando-se de fibras vegetais, são consideradas relevantes as seguintes características:

- Geometria: a relação de aspectos (comprimento/diâmetro) determina o montante de esforço transferido; é importante determinar o comprimento crítico da fibra, abaixo do qual a fibra escorregará dentro da matriz, ao invés de romper, quando submetida à tração; os aspectos superficiais da fibra (suas seções transversais, irregulares e fibrilas, por exemplo) podem contribuir para a ancoragem da fibra à matriz;

- Volume de vazios: característica importante no compósito com fibras vegetais, interferindo na relação fibra-matriz;
- Resistência à tração: deve garantir que o processo de arrancamento seja predominante em relação à ruptura da fibra, após a fissuração da matriz; e
- Módulo de elasticidade: considerado baixo (2 a 8 GPa) em relação aos módulos de matrizes cimentícias (entre 20 e 30 GPa).

Por serem materiais naturais, as fibras vegetais estão sujeitas à heterogeneidade causada pela diversidade das condições de vida do vegetal, dos métodos de extração, dos tratamentos, da variedade de espécies de um mesmo gênero e até em um mesmo exemplar, dependendo do local de onde foram extraídas as fibras. É frequente haver uma considerável dispersão dos valores obtidos que, segundo Savastano Jr. & Agopyan (1998), podem ter coeficiente de variação de até 50% (Sales, 2006).

A eficiência do reforço de fibras pode ser avaliada priorizando a resistência ou a tenacidade dos compósitos em relação à matriz. Tais efeitos dependem do comprimento da fibra, de sua orientação, e são muito dependentes do grau de aderência com a matriz. Assim, quanto maior a aderência, maior a resistência mecânica, porém, menor é a tenacidade à fratura – comportamento que resulta do aumento da incidência de fratura das fibras do compósito e a consequente diminuição na energia absorvida através do processo de arrancamento da fibra (Morrisey *et al.*, 1985).

Em geral, as fibras vegetais apresentam várias vantagens em comparação para fibras sintéticas. Levy Neto & Pardini (2006) e Silva (2007) descreveram algumas vantagens e desvantagens na utilização das fibras vegetais como reforço de solo, quais sejam:

- Vantagens: as fibras possuem boas propriedades mecânicas; capacidade de reciclagem e biodegradabilidade; não é prejudicial à saúde, têm emissão neutra de CO₂ e ausência de substâncias tóxicas; baixo custo e são abundantes; baixo consumo de energia de produção e condição de incremento na economia agrícola, sendo uma importante fonte de renda para a população que vive em áreas rurais;
- Desvantagens: as fibras possuem uma grande variedade em suas propriedades físicas e mecânicas; fraca adesão solo-fibra com a fibra em seu estado natural – as matrizes; durabilidade baixa, pois podem ser degradadas por fungos e micro-organismos; sensibilidade a efeitos ambientais (variação de temperatura e umidade); presença de

seções transversais de geometria complexa e não uniforme; propriedades mecânicas modestas quando comparadas às fibras sintéticas.

2.2.1.1 – FIBRA DE SISAL

As fibras de sisal (vide Figura 2.4, a seguir), da espécie *Agave sisalana* e da família *Agavaceae*, são derivadas da folha de uma planta considerada indígena na América Central e do Sul (Costa, 2013).



Figura 2.4 – Plantação de sisal (Santiago, 2011).

A cultura da plantação de sisal está presente no Brasil desde a década de 1940, quando foi trazida da região de Yucatan, México, para ser cultivado nos Estados da Bahia, Paraíba e Rio Grande do Norte – regiões de clima propício para seu desenvolvimento (Silva, 2007).

O Brasil é o maior produtor e exportador das fibras de sisal do mundo, seguido por Quênia e Tanzânia. Praticamente, 70% do sisal beneficiado brasileiro tem sua exportação para os mercados europeu e asiático. Em relação ao manufaturado, tem como principais destinos os Estados Unidos da América – EUA e o Canadá. E devido à grande oferta de fibras naturais, no Brasil, é possível afirmar que o sisal e a fibra de coco apresentam os maiores potenciais de

utilização tanto na obtenção direta das matérias primas, quanto no aproveitamento de resíduos gerados durante o processamento industrial (Silva, 2007).

As fibras de sisal são classificadas no grupo de fibras denominado estrutural, cuja função é dar sustentação e rigidez às folhas. Elas se dispõem longitudinalmente ao longo do comprimento da folha, sendo compreendidas por três tipos, a saber: 1) Mecânicas; 2) De fita; e, 3) De xilema. As fibras mecânicas estão presentes em maior número e dificilmente se dividem durante os processos de manufatura, o que lhes confere maior importância comercial (Leocádio, 2005). Cada fibra de sisal é constituída por uma centena de fibras elementares ligadas entre si, detentoras de alto teor de celulose, excelentes propriedades de resistência à ruptura e alongamento, e boa resistência à ação da água salgada (Santiago, 2011).

O sisal é uma fibra leve, atóxica, que apresenta alto módulo e resistência, e custa aproximadamente duas vezes menos que a fibra de vidro. Entre outras vantagens do sisal tem-se a facilidade de modificação superficial, sua abundância no Brasil e a facilidade de cultivo. Sua microestrutura helicoidal é responsável por um mecanismo de falha diferenciado de outras fibras vegetais, sendo que os compósitos reforçados por sisal apresentam trabalho de fratura similar ao de compósitos de polietileno de altíssimo peso molecular reforçado por fibras de vidro (Leocádio, 2005).

2.2.1.2 – FIBRA DE CURAUÁ

As fibras de curauá (vide Figura 2.5, a seguir), da espécie *Ananas erectifolius* e da família *Ananás comosus*, são extraídas a partir das folhas da planta de bromeliáceas de ocorrência natural da Amazônia (Santiago, 2011). Embora comestível, o interesse econômico pelo curauá está primordialmente associado às fibras extraídas de suas folhas (Pinto, 2007).



Figura 2.5 – Plantação e fruto de curauá (Santiago, 2011; Pinto, 2007).

A plantação de curauá está distribuída nos Estados do Pará, Acre, Mato Grosso, Goiás e Amazonas, sendo cultivada principalmente por pequenos produtores da região do Lago Grande do Curuaí, localizada em Santarém, Pará, abrangendo cerca de 100 ha (Tomczak *et al.*, 2007).

O curauá tem seu desenvolvimento em clima quente e úmido. Em geral, seu cultivo não provoca a degradação da mata nativa, contribui com a revitalização de terras desmatadas, não é exigente a fertilizantes químicos e pode ser consorciado com culturas alimentares, representando uma fonte alternativa de renda e garantindo a segurança alimentar ao pequeno agricultor da região amazônica (Santiago, 2011).

Aquela planta não necessita de solos muito ricos, podendo situar-se em solos de textura arenosa. Cada planta produz cerca de 24 folhas e o rendimento de fibra seca é de aproximadamente 6%. Um hectare, por exemplo, produz 3.600 quilos de fibra seca ao ano, embora os valores possam variar consideravelmente (Oliveira, 2010).

A crescente demanda de fibras de curauá para a indústria automobilística vem possibilitando o plantio de extensas áreas no Pará, além de pesquisas no desenvolvimento da cultura na Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FCA-UNESP. Somente para a Volkswagen do Brasil, o modelo Fox responde por 150 toneladas/mês, sendo aquelas fibras utilizadas em compósitos para forros laterais de portas, painéis e encostos de cabeça (Pires, 2009).

2.2.1.3 – FIBRA DE COCO

O coqueiro (*Cocos nucifera L.*) é uma das frutíferas mais difundidas naturalmente no globo terrestre, de ocorrência em todos os continentes. Em virtude da dispersão e adaptabilidade, seu cultivo e sua utilização se dão de forma expressiva em todo o mundo, com os mais variados produtos, tanto *in natura* quanto industrializada (Bolaños, 2013).

A planta em questão foi introduzida no Brasil no ano de 1553, no Estado da Bahia, provindo das ilhas de Cabo Verde. Sua origem remota seria a Índia ou o Sri Lanka, de onde os cocos teriam sido introduzidos em Moçambique (Nucé de Lamothe, 1983).

Há duas variedades de palmeira de coco, a saber: 1) Normal, que pode atingir até 30 metros, e, 2) Anã, que não ultrapassa 3 metros, ambas com as mesmas características. O tronco é cilíndrico e carrega no topo um tufo de folhas arqueadas com 3 a 6 metros, divididas em folíolos. Em cada fruto tem-se uma semente, onde no interior se encontra uma massa branca, adocicada, que se espessa à medida que o fruto amadurece (Aguilar, 2015).

Os componentes do coqueiro apresentam grande possibilidade de aproveitamento. Na Figura 2.6, a seguir, é possível observar o mesocarpo maduro (a casca) de onde são extraídas as fibras de coco, de diferentes comprimentos, que servem para a fabricação de diversos artigos, tais como: tapetes, sacarias, colchões, escovas, pincéis, capachos, cordas marítimas, cama de animais etc (Pires, 2009).

Vale destacar que o Brasil está entre os cinco maiores produtores mundial de coco, sendo que por aqui se tem cerca de 100 mil hectares de áreas plantadas, destinados à produção do fruto verde para o consumo da água de coco.

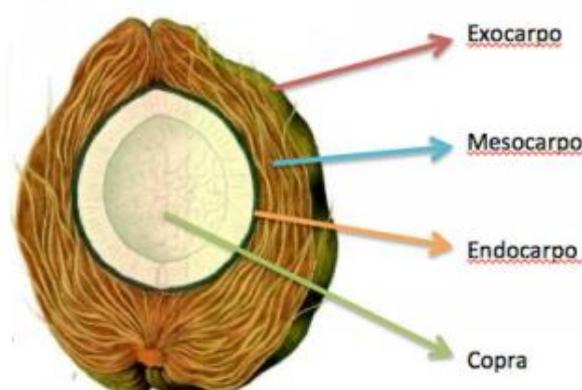


Figura 2.6 – Corte longitudinal do coco (Bolaños, 2013).

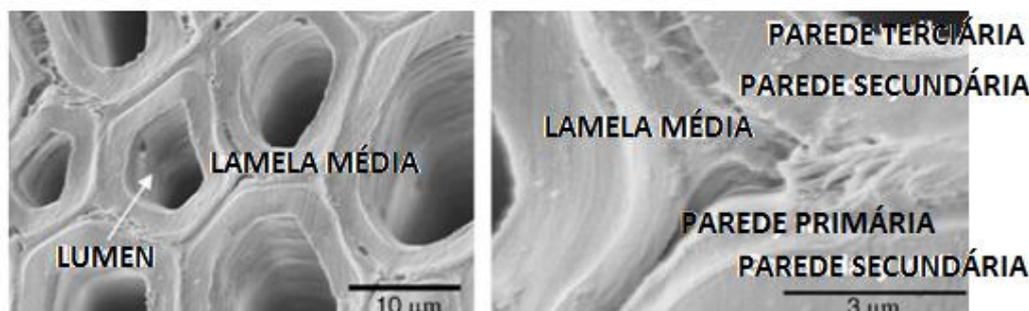


Figura 2.8 – Microestrutura da fibra de sisal: (a) Fibrocélulas com lúmen e lamela média; e, (b) Detalhe da lamela média e das paredes celulares (Silva *et al.*, 2008).

As fibrocélulas individuais estão ligadas entre si por meio da lamela média, que consistem principalmente de hemicelulose e lignina. As paredes possuem várias camadas de estrutura fibrilar, constituídas por fibrilas ligadas entre si através da hemicelulose e lignina (Lewin & Pardini, 2006). A composição química varia ligeiramente conforme a região de cultivo, o tipo de solo e as condições climáticas (Leocádio, 2005).

Para melhor compreensão das propriedades químicas e morfológicas das fibras, vale destacar seus principais componentes estruturais, quais sejam: celulose, hemicelulose e lignina.

A celulose é o principal componente polissacarídeo da parede celular das plantas, responsável pela resistência mecânica, sendo o mais abundante composto orgânico conhecido. Suas moléculas formam as partes fibrosas tem relação com a organização das cadeias poliméricas, afetando as propriedades mecânicas (rigidez e resistência, por exemplo). Assim, quanto maior o grau de cristalinidade, melhor o alinhamento das cadeias e, portanto, maior a resistência à tração (Canevarolo, 2006).

A hemicelulose se faz presente na parede primária das fibras naturais (Tolêdo Filho, 1997). É um polímero constituído de vários tipos de unidades de açúcares, possui grande capacidade de absorção de água, além da ausência de cristalinidade e baixa massa molecular, entre outros fatores. Ele pouco contribui na resistência mecânica das fibras (Perissoto, 2005).

A lignina também se faz presente na parede celular, sendo detentora de resistência à compressão e rigidez (Tolêdo Filho, 1997). É um polímero totalmente amorfo (não cristalino). Uma de suas funções, juntamente com a hemicelulose, é agir como barreira à degradação causada por microrganismos, além de conferir rigidez à fibra (Perissoto, 2005).

Pires (2009), ao determinar as propriedades químicas de plantas fibrosas cultivadas no Brasil, denomina holocelulose a porção da parede celular formada pelos polissacarídeos

celulose e hemicelulose. A Tabela 2.1, a seguir, serve como base para estudos científicos e tecnológicos com fibras vegetais.

Tabela 2.1 – Propriedades químicas das fibras vegetais (Pires, 2009).

Características	Fibras		
	Sisal	Curauá	Coco
Umidade (%)	10,39	7,79	9,19
Cinzas (%)	1,87	2,91	1,35
Celulose (%)	59,50	61,94	47,63
Hemicelulose (%)	24,91	3,04	27,38
Lignina (%)	8,88	6,50	31,52
Holocelulose (%)	84,41	64,98	75

A determinação do teor de cinzas refere-se à porção inorgânica da fibra, ou seja, componentes como K, Ca, Si e Mg. A quantidade de cinzas é inversamente proporcional à quantidade de matéria orgânica combustível (Pires, 2009).

Salazar (2005) afirma que o teor de umidade tem relação direta com a biodegradação das fibras, uma vez que microorganismos deteriorantes necessitam de água livre para a realização de suas atividades metabólicas.

Fidelis *et al.* (2013) afirmam que não somente a morfologia pode influenciar nos resultados de ensaios de tração, mas também a composição química das fibras. Logo, se uma fibra possui maior resistência à tração, pode ser tanto pelo aspecto de morfologia ou de composição química, como de maior quantidade de celulose. Aqueles autores ainda asseveram que as diferenças entre os vários tipos de fibras se dão no número de fibrocélulas, na espessura das paredes celulares e na área da secção transversal da fibra – fatores que afetam a resistência mecânica das fibras.

A Figura 2.9, a seguir, apresenta micrografias de fibras vegetais para observação da morfologia supramencionada. Neste sentido, apesar das fibras vegetais apresentarem uma mesma estrutura celular (paredes celulares, lamela média e lumens), é possível observar algumas diferenças quanto à área transversal total da espessura das paredes celulares, quantidade e área de lumens – fatores que também afetam a resistência mecânica das fibras.

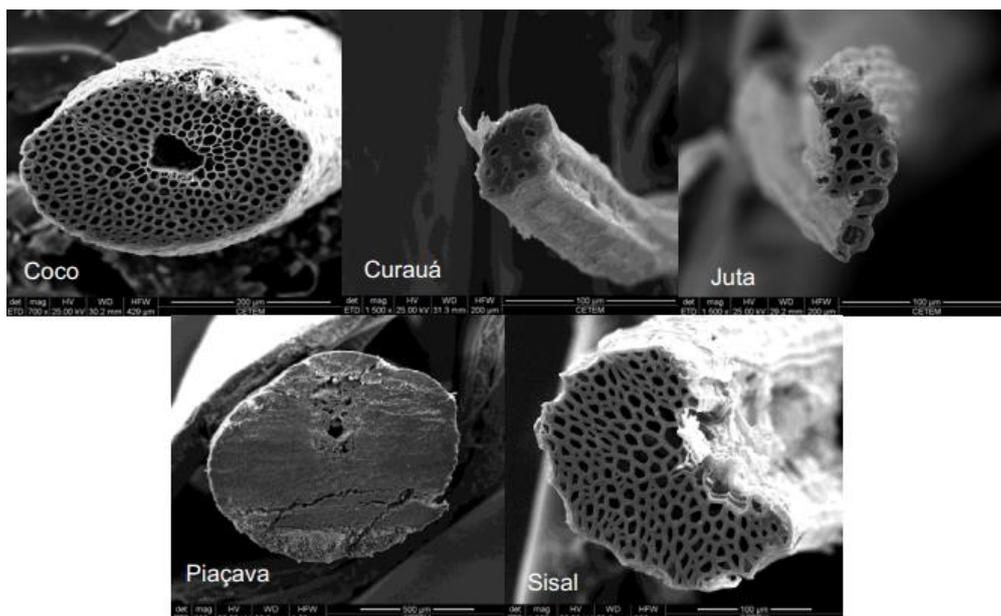


Figura 2.9 – Morfologia das fibras vegetais (Pereira *et al.*, 2012).

2.2.3 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS FIBRAS VEGETAIS

As propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais são influenciadas por vários fatores, tais como: local de origem (clima), maturação (idade), espécie, método de extração, tipo de celulose (α -celulose, β -celulose), quantidade de celulose e ângulo helicoidal (Tomczak, 2010) – propriedades que apresentam grande variabilidade (cerca de 40%), afetando a reprodutibilidade dos compósitos, a susceptibilidade de degradação em ambientes alcalinos e em ambientes naturais, as variações dimensionais por mudanças de teor de umidade e/ou temperatura e a *interface* fibra-matriz com baixa aderência quando o solo é não cimentado (Ghavami *et al.*, 1999).

Diversas pesquisas foram realizadas com diferentes fibras vegetais com o objetivo de avaliar as propriedades físicas e mecânicas, além de fatores que influenciam no seu comportamento. Nas Tabelas 2.2 e 2.3, a seguir, tem-se uma descrição das propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais de sisal, curauá e coco.

Tabela 2.2 – Propriedades físicas das fibras vegetais.

Tipo de Fibra	Diâmetro (mm)	Área (mm²)	Densidade (g/cm³)	Cristalinidade (%)	Referencia
Sisal	0,08 – 0,30	-	0,75 – 1,07	-	Tôledo Filho (1997)
	0,22	-	1,13	-	Pinto (2007)
	0,15	-	-	-	Santiago (2011)
	0,17	-	-	-	Martins (2014)
	-	0,023	-	76,3	Fidelis (2014)
Curauá	0,09 – 0,12	-	1,34	-	Picanço (2005)
	0,15	-	1,29	-	Pinto (2007)
	-	0,004	-	80,1	Fidelis (2014)
Coco	0,25	-	0,8	-	Tôledo Filho (1997)
	0,1 – 0,45	-	1,15	-	Tomczak (2010)

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas das fibras vegetais.

Tipo de Fibra	Resistencia a Tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação na Ruptura (%)	Referência
Sisal	227,8 – 1002,3	10,9 – 26,7	2,8 – 4,2	Tôledo Filho (1997)
	568 – 640	9,4 – 15,8	3 – 7	Tomczak (2010)
	340	12	3,3	Santiago (2011)
	484	19,5	3,3	Fidelis (2014)
Curauá	492,6	11,5	3	Picanço (2005)
	700 – 1100	26 – 46	2 – 4	Tomczak (2010)
	605	23	2,5	Santiago (2011)
	543	63,7	1	Fidelis (2014)
Coco	174	3,5	25	Tôledo Filho (1997)
	95 – 149	2,8 – 13,7	10 – 25	Neto & Pardini (2006)
	106 – 175	4 – 6	17 – 47	Tomczak (2010)

Valores de deformação na ruptura possuem grande importância nas características das propriedades mecânicas das fibras naturais. Neste sentido, observar o comportamento das propriedades variando o comprimento da fibra fornece informações sobre o número de defeitos e imperfeições na fibra (Tomczak, 2010).

A estrutura cristalina dos polímeros tem relação com a organização das cadeias poliméricas e afeta as propriedades mecânicas (rigidez e resistência, por exemplo). Assim, quanto maior o grau de cristalinidade, melhor o alinhamento das cadeias e, portanto, maior a resistência (Canevarolo, 2006).

A influência do diâmetro da fibra pode ser explicada em termos de propriedades estruturais das fibras. Com o aumento do diâmetro, têm-se variações no número de células constituintes, alterando outros parâmetros estruturais, tais como: ângulo helicoidal, volume das células constituintes e número de defeitos – fatores que influem diminuindo ou aumentando a resistência das fibras.

2.2.4 – REFORÇO DE SOLO COM FIBRAS VEGETAIS – ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Tomczak *et al.* (2007) correlacionaram as propriedades mecânicas de fibra de curauá com o diâmetro, o comprimento e a taxa de deformação. Uma análise morfológica foi realizada via Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV. Fibras com diferentes diâmetros e comprimento de 20 mm foram testadas sob carga de tração a uma taxa de deslocamento de 5mm/min. Neste sentido, aqueles autores comprovaram que a resistência à tração e o módulo de elasticidade decresceram, enquanto a deformação permaneceu constante à medida que o diâmetro aumentou. Com o aumento do comprimento, a resistência à tração e a deformação diminuíram, acarretando no aumento do módulo. E quando do aumento na taxa de deformação, os valores de resistência à tração aumentaram, porém, o módulo e a deformação não sofreram alterações.

Defoirdt *et al.* (2010) investigaram a resistência à tração da fibra de coco (branco e marrom), do bambu e da fibra de juta. As fibras eram testadas em uma mini máquina de ensaio de tração em um deslocamento taxa de 0,1, 1 e 5 mm/min para juta, bambu e fibra de coco, respectivamente. Os testes se deram em diferentes comprimentos de medição, a fim de avaliar a influência do comprimento na resistência à tração. As fibras de coco apresentaram baixa resistência mecânica, baixo módulo de elasticidade e alta deformação da capacidade instalada, ou seja, grande capacidade de energia absorção – fato explicado devido à baixa celulose e ao ângulo microfibrilar elevado.

Silva *et al.* (2010) avaliaram o comportamento mecânico de fibras de sisal. Testes de tração foram realizados para comprimentos de 10 a 40 mm, a uma taxa de deslocamento de 0,1 mm/min. O verdadeiro módulo de elasticidade foi calculado levando em conta a conformidade da máquina. Aqueles autores também analisaram a fratura do modo da fibra em termos de microestrutura e defeitos. A tensão para falha diminuiu de aproximadamente 5,2 a 2,6% quando o comprimento do medidor foi aumentado de 10 para 40 mm. A resistência à tração, por outro lado, foi considerada independente do comprimento do medidor. A resistência à tração e o módulo médio de elasticidade foram relatados como 400 MPa e 19 GPa, respectivamente. O módulo de Weibull diminuiu de 4,6 para 3 quando o comprimento foi aumentado de 10 para 40 mm, respectivamente.

Fidelis *et al.* (2013) estudaram o efeito da morfologia de diferentes fibras naturais na sua resistência à tração, concluindo que cada fibra possui uma morfologia característica, que deve ser considerada na análise dos ensaios de tração. Os resultados dos ensaios à tração apontaram que as fibras podem ser divididas em dois grupos distintos, quais sejam: 1) Alto desempenho (curauá, sisal e jutá, por exemplo); e, 2) Baixo desempenho (fibras de coco e piaçava, por exemplo). Neste íterim, nas análises morfológicas, foi possível verificar que à medida que a área interna dos lúmens diminui e a espessura da parede celular aumenta, a resistência da fibra e o módulo de Young também aumenta.

Bolanõs (2013) estudou o comportamento de um solo argiloso reforçado e não reforçado com fibras de coco verde por meio de ensaios de caracterização, mecânicos de compactação e triaxiais. Tais ensaios foram realizados 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. Aquele autor comprovou um incremento na resistência ao cisalhamento das misturas solo-fibra, quando de um discreto aumento do ângulo de atrito e em um expressivo aumento da coesão das misturas reforçadas, em comparação aos dados obtidos para o solo puro.

Aguilar (2015) avaliou o comportamento da inclusão de fibra de coco em um solo arenoso, através da realização de ensaios triaxiais. Os ensaios foram realizados com fibras nos comprimentos 25 e 50 mm e teores de fibra 0.25, 0.50 e 0.75% em relação ao peso seco do solo. Aquele autor observou que a inclusão da fibra de coco na matriz arenosa provocou um incremento na resistência ao cisalhamento em todas as misturas solo-fibra, quando de um expressivo aumento do intercepto coesivo das misturas, além de um discreto aumento do ângulo de atrito, em comparação aos resultados obtidos para a areia pura.

Silveira (2018) estudou o comportamento e a durabilidade de solos reforçados com fibras vegetais (sisal e curauá) aleatoriamente distribuídas, submetidos ao envelhecimento natural por exposição às condições ambientais diversas (vento, sol, chuva etc.). Aquela autora realizou ensaios triaxiais no tempo zero (de controle) e após oito meses. Também foi avaliado o comportamento mecânico das fibras vegetais tratadas por impermeabilização superficial, com sílica coloidal e com polímero estireno butadieno, visando melhorar a durabilidade dos compósitos. Diante do exposto, tal pesquisa apresentou como destaque: os compósitos com fibra de curauá perdem resistência e tenacidade com maior rapidez e maior magnitude do que o compósito com fibra de sisal, reforçando que a fibra de curauá é mais susceptível à degradação em ambientes naturais do que a fibra de sisal; a maior perda de resistência se deu nos primeiros quatro meses de exposição para as duas fibras, sendo que de quatro para oito meses, os valores se mantiveram constantes; as fibras vegetais continuavam contribuindo como elementos de reforço da matriz arenosa mesmo após oito meses de envelhecimento natural, e mesmo após o período em questão, a máxima tensão desviadora dos compósitos permanece, aproximadamente, 30% superior que a da amostra arenosa.

Silveira (2018) asseverou as variações nos resultados com a ajuda de MEV das fibras estudadas, justificando sua conclusão. Dali, a menor área de seção transversal da fibra de curauá em relação à da fibra de sisal seria a justificativa tanto do porque da adição de fibras de curauá na matriz arenosa ter contribuído mais para a melhoria do comportamento mecânico no tempo zero, quanto a sua maior susceptibilidade à degradação em ambientes naturais, a ponto de ao final de oito meses de exposição, seus valores de resistência ao cisalhamento e à capacidade de absorção de energia de deformação fossem similares aos do compósito com fibras de sisal.

Bernardina (2019) estudou o comportamento mecânico e a durabilidade de compósitos de solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno e fibras vegetais de sisal, curauá e coco. Aquela autora realizou ensaios triaxiais nas amostras com e sem reforço, além de ensaios de tração nas fibras, ambos antes e após exposição a agentes externos (vento, água e sol), com o objetivo de avaliar a durabilidade das fibras, concluindo que todos os compósitos solo-fibra expostos aos agentes climáticos apresentaram uma queda na resistência ao cisalhamento, em relação à amostra de controle, inclusive, os reforçados com fibra de polipropileno. Porém, os compósitos solo-fibra de coco apresentaram a menor taxa de degradação, quando comparado com os compósitos solo-fibra de sisal e curauá. E no que se refere aos ensaios de tração, as fibras de curauá foram aquelas que apresentaram a maior resistência à tração inicial, sendo que após a exposição aos agentes externos no tempo de oito

meses, ela permaneceu com a maior resistência entre as fibras analisadas, porém, foi a que mais sofreu degradação (maior queda de resistência).

No estudo em questão, Bernardina (2019) justificou os comportamentos dos compósitos solo-fibra expostos aos agentes externos com as características físicas e morfológicas particular de cada tipo de fibra analisada, tendo como exemplo o compósito solo-fibra de coco, que apresentou os melhores resultados em relação à perda de resistência nos ensaios triaxiais após a fibra ter sido exposta, sendo menos susceptível à degradação. O alto teor de lignina seria a justificativa – é o componente responsável por agir contra o ataque de microorganismos.

Diante do exposto, ara a elaboração da presente pesquisa, foi importante o conhecimento de todas as referências sobre a interação dos compósitos solo-fibras e os diversos fatores que os compreendem. As características particulares de cada fibra (propriedades físicas, mecânicas, químicas e morfológicas, por exemplo) foram importantes para entender e justificar os mecanismos e as alterações dos resultados com a inclusão das fibras no solo arenoso.

3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

No presente capítulo têm-se os principais materiais e métodos de ensaios utilizados na pesquisa empreendida, denotando a avaliação do melhoramento que a adição de fibras de sisal, curauá e coco exercem nas propriedades de resistência mecânica de um solo arenoso.

3.1 – PROJETO EXPERIMENTAL

O projeto experimental da presente pesquisa foi dividido em etapas, realizadas no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília – UnB. A Figura 3.1, a seguir, apresenta um fluxograma que resume as fases do programa experimental.

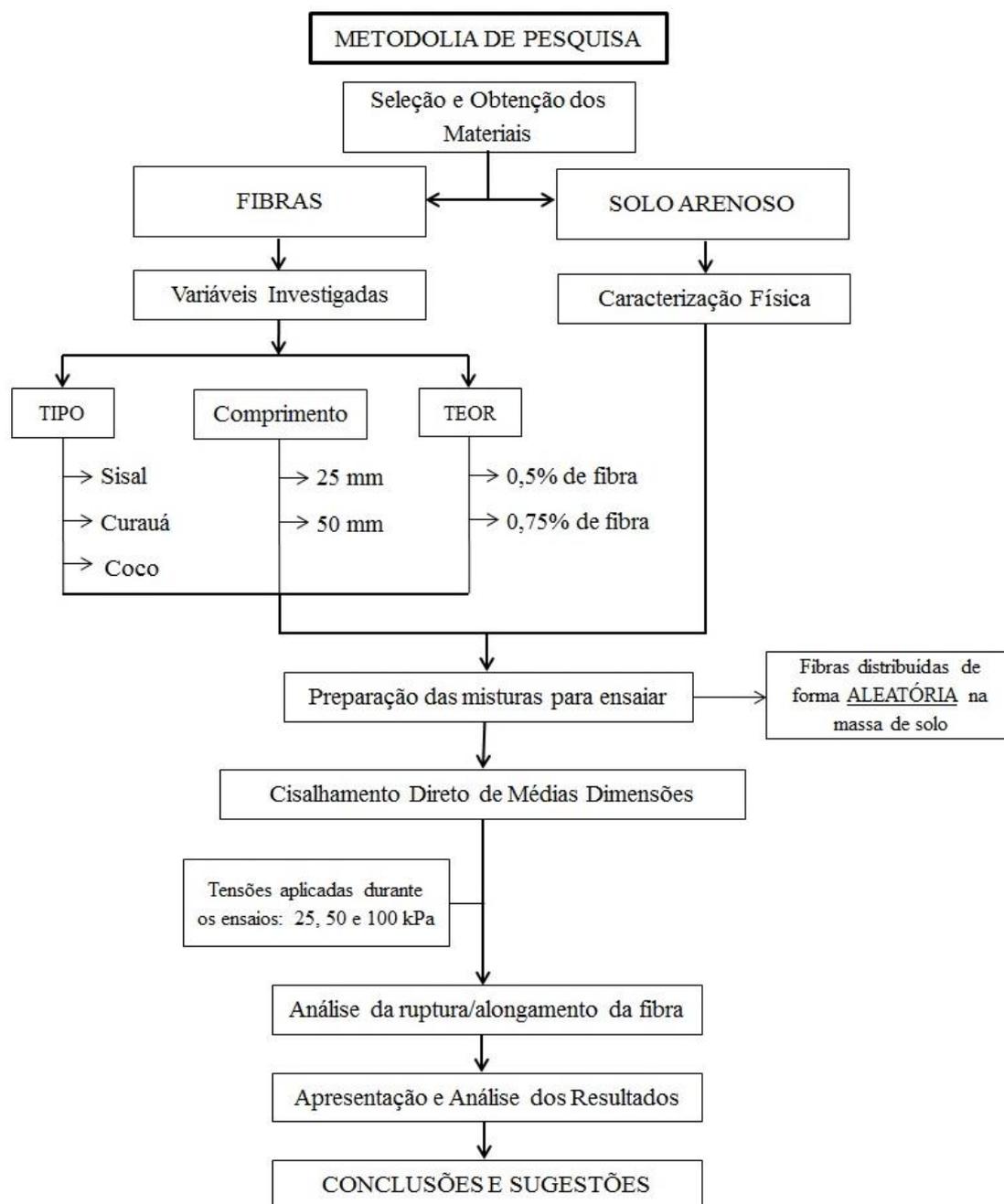


Figura 3.1 – Metodologia da pesquisa.

3.2 – VARIÁVEIS INVESTIGADAS

Diferentes autores verificaram o comportamento tensão-deformação de compósitos reforçados com fibras através de fatores relacionados à matriz (granulometria, índice de vazios, umidade etc.) quanto ao reforço (módulo, comprimento, espessura, rugosidade, orientação, teor e formato).

A presente pesquisa se restringiu ao estudo da influência do tipo de fibra vegetal, comprimento e do teor de fibra, nos parâmetros de resistência do solo (ângulo de atrito e coesão), fazendo uso de ensaios de cisalhamento direto de médias dimensões. Neste ínterim, a escolha das variáveis, bem como da sua faixa de variação, decorreu da necessidade de delimitação do trabalho, tendo por base estudos já realizados e supramencionados (Silveira, 2018; Aguilar, 2015; Sotomayor, 2014; Bolanões, 2013; Fidelis *et al.*, 2013; Casagrande, 2005).

3.3 – MATERIAIS UTILIZADOS

Na primeira fase do presente estudo foram concretizadas as seguintes ações: seleção, obtenção e caracterização dos materiais utilizados. O programa de ensaios foi executado com os materiais compósitos, que são compostos de uma matriz (solo arenoso) e um elemento de reforço (fibra). Neste sentido, fez-se importante identificar e analisar as propriedades mecânicas de cada um dos materiais aqui utilizados.

3.3.1 – SOLO ARENOSO

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

Os ensaios de caracterização física do solo arenoso se deram no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília – UnB, sendo determinados conforme os seguintes métodos e procedimentos:

- Solo – Análise granulométrica, NBR-7181 (ABNT, 2016);
- Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água, NBR-6458:2016 (ABNT, 2016);
- Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos – Método de ensaio, NBR12051 (ABNT, 1991); e

- Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos – Método de ensaio, NBR-12004 (ABNT, 1990).

3.3.2 – FIBRAS VEGETAIS

As fibras vegetais utilizadas na presente pesquisa como elemento de reforço do solo arenoso foram as de sisal (*Agave sisalana*), curauá (*Ananás erectifolius*) e coco (*Cocus nucifera*). As fibras vegetais de sisal (vide Figura 3.2, a seguir) foram adquiridas comercialmente pela Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira – APAEB, de Valente, Bahia. As fibras vegetais de curauá (vide Figura 3.2, a seguir) foram adquiridas comercialmente pela empresa Pematec Triangel do Brasil, de Santarém, Pará. E as fibras de coco (vide Figura 3.2, a seguir) foram cedidas por uma parceria da Companhia Municipal de Limpeza Urbana – COMLURB e da Secretaria de Conservação e Serviços Públicos – SECONSERVA, oriundas do Estado do Rio de Janeiro. Diante do exposto, foram utilizados aproximadamente cerca de 3 kg de cada fibra supramencionada para a realização de todos os ensaios.

Tais fibras vegetais foram escolhidas por apresentarem boas propriedades mecânicas e por serem estudadas na literatura como fibras para reforço de solo (Aguilar, 2015; Sotomayor, 2014; Bolaños, 2013; Melo Filho, 2012; Pinto, 2007).

Faz-se importante destacar que partes desgastadas, com sujeiras mais difíceis de retirar ou danificadas das fibras vegetais, foram descartadas antes do processo de preparação das fibras no tamanho de trabalho. Assim, fez-se a seleção e utilização apenas das partes mais homogêneas das fibras.



Figura 3.2 – Fibras utilizadas na pesquisa: a) Sisal; b) Curauá; e, c) Coco.

As fibras de sisal e curauá foram compradas em formas de fardos e em comprimentos de aproximadamente de 1,2 m. As fibras de coco cedidas para a presente pesquisa apresentam tamanhos bem distintos, variando de 80 até 250 mm.

No preparo das misturas solo-fibra, as fibras vegetais foram cortadas nos comprimentos de 25 e 50 mm (vide Figura 3.3, a seguir). Tal comprimento padrão foi estabelecido devido à realização de pesquisas anteriores, onde se verificou uma mudança expressiva no comportamento do compósito solo-fibra, quando avaliados os comprimentos de 25 e 50 mm (Aguilar, 2015; Sotomayor, 2014; Melo Filho, 2012).



Figura 3.3 – Fibras de sisal, curauá e coco no comprimento de 50 mm.

Para a definição dos teores de fibra a serem incorporados no solo arenoso, foram adotados os valores empregados na literatura (Silveira, 2018; Aguilar, 2015; Sotomayor, 2014; Melo Filho, 2012; Pinto, 2007). Em geral, os teores adotados em pesquisas acadêmicas na área de reforço de solo com fibras são pequenos, da ordem de até 1% em função da massa seca de solo. Assim, com base em estudos anteriores (Silveira, 2018; Aguilar, 2015; Sotomayor, 2014; Melo Filho, 2012; Pinto, 2007), optou-se em analisar os compósitos de solo-fibra com teores de fibras vegetais de 0,5 e 0,75%, calculado em relação à massa seca de solo.

Devido à presença de resíduos aglutinados na superfície das fibras (graxas e resinas naturais), provenientes de sua armazenagem, as mesmas foram submetidas a um processo de preparação com limpeza, que consistiu de lavagem em água quente (100°C) por 30 minutos e secagem ao ar livre. Após a secagem, as fibras foram armazenadas em sacos plásticos vedados, até serem utilizadas nos ensaios. A Figura 3.4, a seguir, apresenta tais processos detalhadamente. Vale destacar que as fibras submetidas ao processo de limpeza já estavam cortadas no comprimento de trabalho (25 e 50 mm).



A – Seleção e cortagem das fibras no comprimento de trabalho.



B – Lavagem em água quente (100°C) durante 30 minutos.



C – Secagem ao ar livre.



D – Armazenamento da fibra.

Figura 3.4 – Processos de preparação com limpeza: fibra de Sisal com 25 mm de comprimento.

3.3.3 – ÁGUA

A água utilizada nos ensaios necessários ou no preparo dos corpos de prova, solo arenoso e misturas era destilada, sendo sua destilação realizada no Laboratório de Geotecnia da UnB.

3.4 – MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

A seguir tem-se o detalhamento do programa de ensaios, bem como a descrição do equipamento de cisalhamento direto de médias dimensões, a preparação das misturas para o ensaio e a descrição e montagem do corpo de prova. Por fim, tem-se a descrição do método de análise da ruptura e do alongamento das fibras após a execução dos ensaios.

3.4.1 – PROGRAMA DE ENSAIOS

Em detalhamento do programa de ensaios e da descrição dos equipamentos e procedimentos de ensaio, para a obtenção da envoltória de resistência do solo arenoso e compósitos solo-fibra, foram utilizadas as tensões de 25, 50 e 100 kPa – tensões escolhidas em função do estado de tensões que se dão em algumas obras geotécnicas, bem como devido à limitação de tensões máxima aplicada do equipamento (100 kPa). A Tabela 3.1, a seguir, demonstra a segunda fase da pesquisa, ou seja, os ensaios do solo arenoso e do compósito solo-fibra, com as fibras distribuídas de forma aleatória na massa de solo.

Tabela 3.1 – Programa de ensaios – 2º Fase (continua).

Mistura	Solo Arenoso (%)*	Fibra			Legendas	Período (Mês e Ano)
		Tipo	Teor (%)*	Comprimento (mm)		
1	100	-	-	-	SA_25	Fevereiro/2018
					SA_50	Março/2018
					SA_100	
2	99,5	Sisal	0,5	25	SS_0,5_25_25	Abril/2018
					SS_0,5_25_50	
					SS_0,5_25_100	
3	99,25	Sisal	0,75	25	SS_0,75_25_25	Abril/2018
					SS_0,75_25_50	
					SS_0,75_25_100	
4	99,5	Sisal	0,5	50	SS_0,5_50_25	Maio/2018
					SS_0,5_50_50	
					SS_0,5_50_100	
5	99,25	Sisal	0,75	50	SS_0,75_50_25	Junho/2018
					SS_0,75_50_50	
					SS_0,75_50_100	
6	99,5	Curauá	0,5	25	CA_0,5_25_25	Junho/2018
					CA_0,5_25_50	
					CA_0,5_25_100	
7	99,25	Curauá	0,75	25	CA_0,75_25_25	Julho/2018
					CA_0,75_25_50	
					CA_0,75_25_100	
8	99,5	Curauá	0,5	50	CA_0,5_50_25	Julho/2018
					CA_0,5_50_50	
					CA_0,5_50_100	
9	99,25	Curauá	0,75	50	CA_0,75_50_25	Agosto/2018
					CA_0,75_50_50	
					CA_0,75_50_100	
10	99,5	Coco	0,5	25	CC_0,5_25_25	Agosto/2018
					CC_0,5_25_50	
					CC_0,5_25_100	
11	99,25	Coco	0,75	25	CC_0,75_25_25	Setembro/2018
					CC_0,75_25_50	
					CC_0,75_25_100	

Tabela 3.1 – Programa de ensaios – 2º Fase (conclusão).

Mistura	Solo Arenoso (%)*	Fibra			Legendas	Período (Mês e Ano)
		Tipo	Teor (%)*	Comprimento (mm)		
12	99,5	Coco	0,5	50	CC_0,5_50_25 CC_0,5_50_50 CC_0,5_50_100	Setembro/2018
13	99,25	Coco	0,75	50	CC_0,75_50_25 CC_0,75_50_50 CC_0,75_50_100	Outubro/2018

* % referente ao peso seco do solo arenoso.

As legendas utilizadas durante os ensaios supramencionados foram divididas em quatro grupos. No primeiro grupo, as letras SA, SS, CA e CC representam o tipo de mistura (SA: Solo Arenoso; SS: Solo Arenoso + Sisal); CA: Solo Arenoso + Curauá; CC: Solo Arenoso + Coco). No segundo grupo, os números representam o teor de fibra utilizado na mistura (para 0,5% de fibra, tem-se 0,5; para 0,75% de fibra, tem-se 0,75). O terceiro grupo simboliza o comprimento da fibra utilizada (para 25 mm de comprimento, tem-se 25; para 50 mm de comprimento, tem-se 50). Por último, o quarto grupo simboliza a tensão aplicada durante o ensaio de cisalhamento direto (25, 50 e 100 kPa). A Figura 3.5, a seguir, apresenta, de forma geral, a legenda utilizada para diferenciar os ensaios.

A densidade relativa e a umidade do solo arenoso, 50% e 10%, respectivamente, foram mantidas constantes em todos os ensaios. Tais valores foram escolhidos por permitirem uma melhor visualização do efeito da interação solo-fibra (Casagrande, 2005). Segundo Casagrande (2005), quanto maior for a densidade relativa da mistura, mais rapidamente as fibras são mobilizadas dentro da massa de solo, apresentando melhor intertravamento entre as fibras e a matriz de solo.

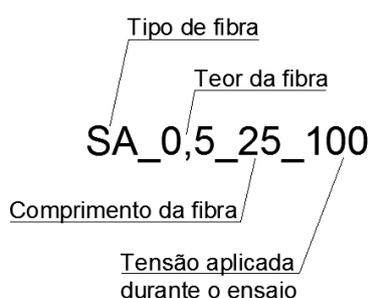


Figura 3.5 – Legenda dos ensaios.

As misturas de solo-fibra foram moldadas manualmente até que ocorresse a homogeneização dos componentes, sendo esta verificada visualmente. Na Figura 3.6, a seguir, é possível observar a subdivisão do corpo de prova, realizada em cinco camadas, para assegurar que, em cada camada de solo, houvesse a densidade relativa de trabalho (50%).

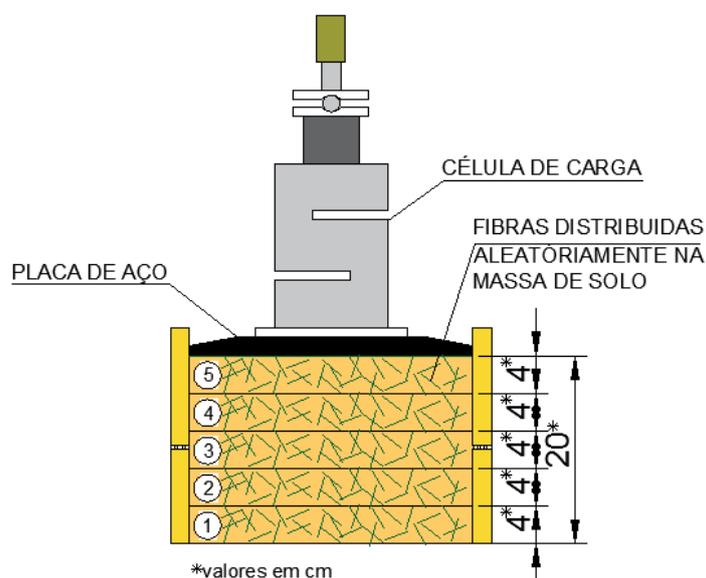


Figura 3.6 – Distribuição do corpo de prova na caixa de cisalhamento direto.

A terceira fase da pesquisa foi definida pelo programa de ensaios para analisar a ruptura e o alongamento das fibras na zona de cisalhamento da caixa, após o ensaio de cisalhamento direto. Tal fase mostrou-se importante para melhor explicação da interação solo-fibra e entender como as fibras atuam dentro do corpo de prova quando submetidas a uma tensão cisalhante. Na Figura 3.7, a seguir, é possível observar o mecanismo da interação do compósito solo-fibra quando submetido à tensão cisalhante, acarretando em movimento de rotação e rearranjo das partículas de solo e, conseqüentemente, contra as fibras vegetais, que podem se alongar ou romper durante o processo.

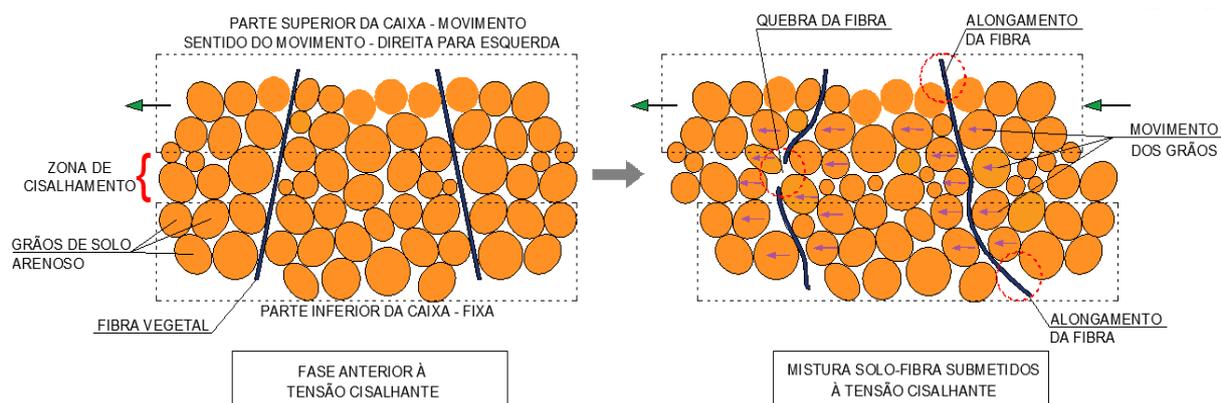


Figura 3.7 – Representação do mecanismo de ruptura e alongamento das fibras vegetais submetidas à tensão cisalhante.

Nesta etapa da pesquisa foram utilizadas as misturas que apresentaram os melhores resultados em relação ao ganho dos parâmetros de resistência (ângulo de atrito e coesão) com a inclusão de fibra na matriz de solo arenoso. Os ensaios foram realizados para a máxima tensão normal aplicada (100 kPa), simulando, assim, a máxima sollicitação que o compósito foi aqui submetido. A Tabela 3.2, a seguir, apresenta a terceira fase de ensaios.

Tabela 3.2 – Programa de ensaios – 3º Fase.

Mistura	Solo Arenoso (%) *	Fibra			Legendas	Período (Mês e Ano)
		Tipo	Teor (%)*	Comprimento (mm)		
5	99,25	Sisal	0,75	50	SS_0,75_50_100	Outubro/2018
9	99,25	Curauá	0,75	50	CA_0,75_50_100	Outubro/2018
13	99,25	Coco	0,75	50	CC_0,75_50_100	Outubro/2018

* % referente ao peso seco do solo arenoso.

3.4.2 – CISALHAMENTO DIRETO DE MÉDIAS DIMENSÕES

O equipamento de cisalhamento direto de médias dimensões (300 mm de largura x 300 mm de comprimento x 220 mm profundidade) desenvolvido por Palmeira (1998) no Laboratório de Geotecnia da UnB, inicialmente, foi utilizado por Martins (2000), Matheus (2002) e Mendes (2006), passando por sua primeira adaptação com Souza (2011) e sendo novamente utilizado por Chrusciak (2013), Gongora (2014), Moreno (2016), Ante (2016) e Fonseca (2017). Sua segunda adaptação se deu por Sanchez (2018). A **Erro! Fonte de**

referência não encontrada.8, a seguir, apresenta uma visão geral do equipamento de cisalhamento direto.

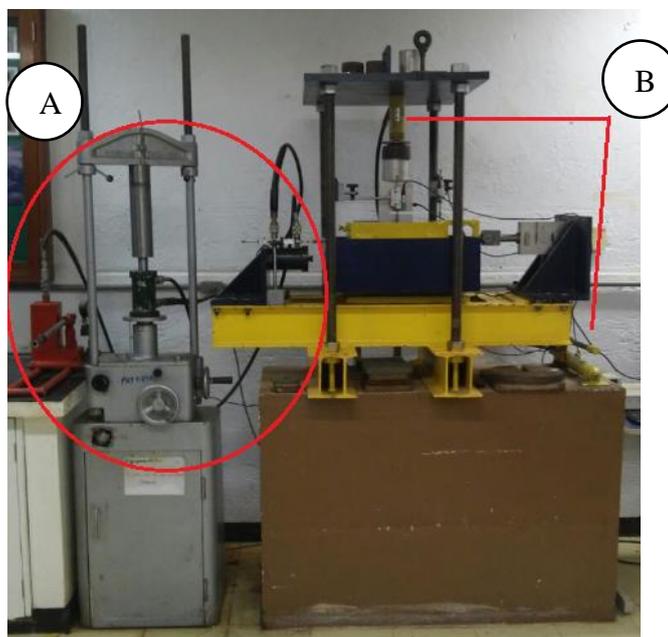


Figura 3.8 – Visão geral do equipamento de cisalhamento direto: a) Sistema hidráulico para aplicação da força tangencial; e, b) Sistema hidráulico para aplicação da forma normal.

O sistema de cisalhamento é composto por dois circuitos hidráulicos, equipados com dois macacos hidráulicos ligados com auxílio de mangueiras a cilindros hidráulicos com capacidade de até 100 kN. A Figura 3.9, a seguir, indica o sistema de reação na parte superior da caixa e a aplicação da força tangencial na parte inferior da caixa. Ali é possível observar o sistema hidráulico para a aplicação da força tangencial, cujo funcionamento se dá com o auxílio de uma prensa convencional de ensaios triaxiais, no qual trabalha com o amparo do conjunto de engrenagens dispostas de acordo com a velocidade solicitada. O funcionamento do equipamento é acionado por meio de ligações de mangueiras hidráulicas, permitindo, assim, a transferência de carga constante e preestabelecida. O sistema hidráulico para a aplicação da força normal é manipulado manualmente, buscando manter a carga constante durante todo o ensaio.

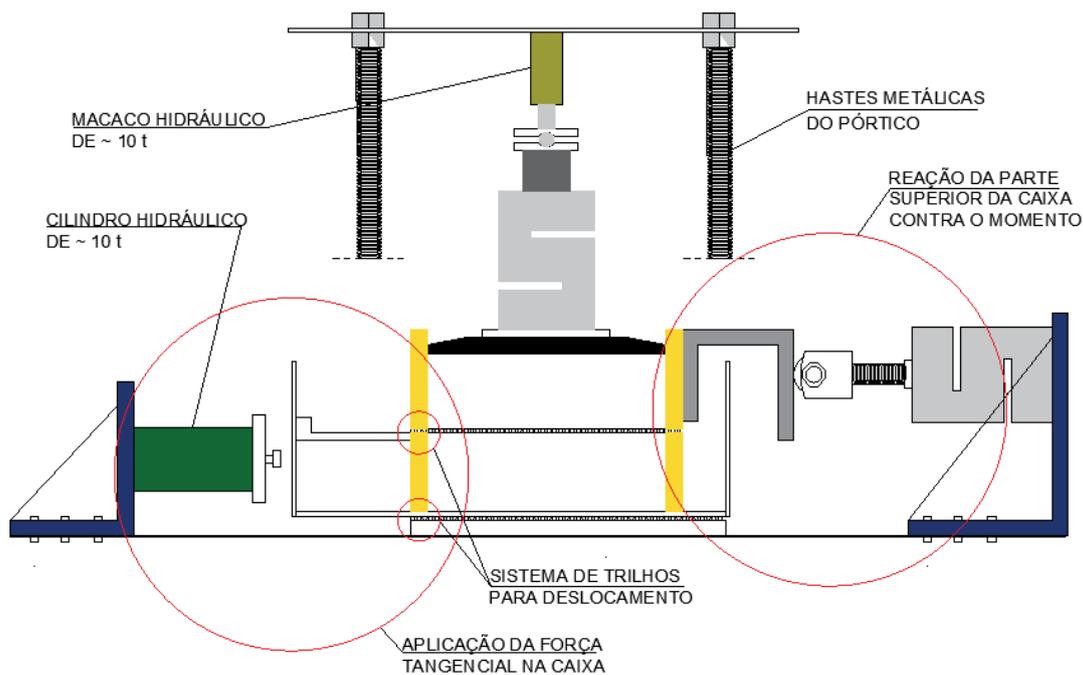


Figura 3.9 – Esquema dos componentes da prensa de cisalhamento direto.

O equipamento de cisalhamento direto consta de uma caixa bipartida de formato quadrada, com 300 mm de lado, sendo a parte inferior com 100 mm de altura, e a superior com 120 mm de altura e um conjunto de trilhos projetados para certificar um espaçamento entre as partes superior e inferior da caixa de cisalhamento, garantindo a redução do atrito entre elas. Os trilhos são estruturas metálicas prismáticas (vide Figura 3.10, a seguir). E para reduzir o atrito, antes de cada ensaio, as esferas metálicas são envoltas em uma fina camada de graxa.

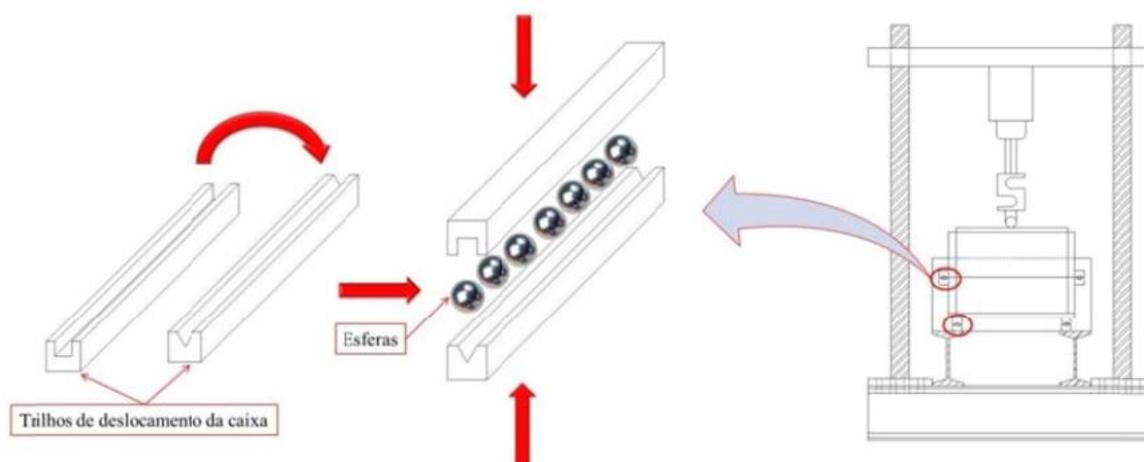


Figura 3.10 – Detalhes dos trilhos de deslocamento da caixa (Souza, 2011).

As duas células de carga possuem capacidade de 100 kN, sendo uma para medir a força cisalhante e a outra para medir a força normal, com resolução de medida de 0,001 kN. Sanchez (2018), em sua última modificação no equipamento, eliminou o registro de atritos indesejáveis durante o ensaio, mudando a posição da célula de carga horizontal e adicionando um rolamento que transmite a força tangencial à célula de carga horizontal. Tal ação permitiu o livre movimento vertical da caixa superior. Assim, foi possível a célula de carga na horizontal registrar a força cisalhante durante o ensaio em até 100 kN, com o deslocamento horizontal máximo de até 40 mm, devido às limitações do equipamento. A Figura 3.11, a seguir, apresenta a disposição dos elementos de distribuição de carga na vertical.

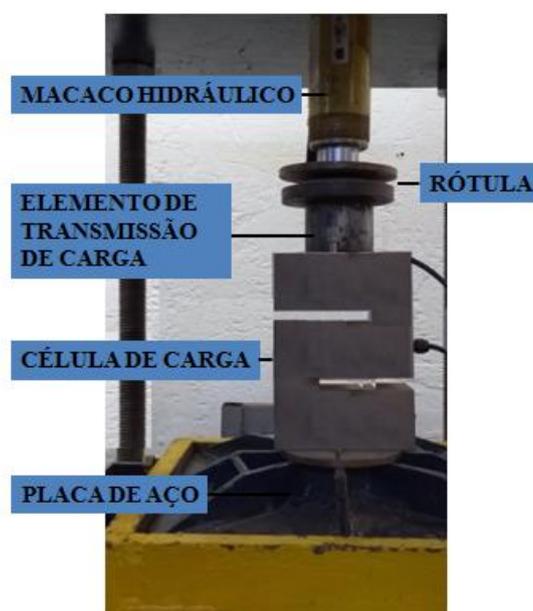


Figura 3.11 – Sistema de carregamento na vertical.

Vale destacar que o sistema de instrumentação do equipamento em questão consiste em: duas células de carga, sendo uma para medir a força de reação de cisalhamento e a outra para medir a força normal, ambas com capacidade de até 100 kN; três transdutores de deslocamento, sendo um para medir o deslocamento da caixa inferior (horizontal) e outros dois verticais para verificar o deslocamento na tampa da caixa e o outro para a análise da rotação do topo da caixa durante a aplicação da força normal. Os sensores estão todos ligados a um sistema de aquisição de dados denominado *Spider 8*, com frequência de aquisição de 1 Hz e *software* *Catman v 2.0®* (vide Figura 3.12, a seguir). A Figura 3.12, a seguir, apresenta alguns detalhes dos sensores de deslocamento.



Figura 3.12 – Aquisitor de dados – Spider 8.

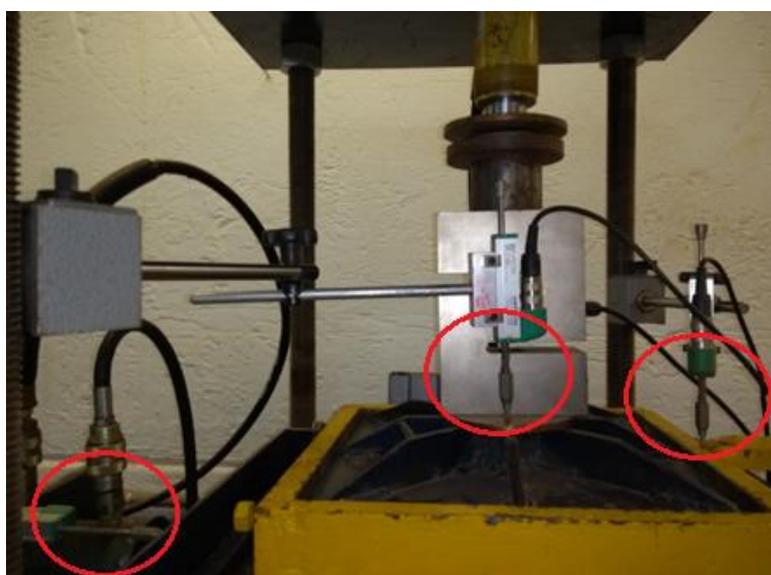


Figura 3.13 – Detalhes dos sensores de deslocamento.

A fase de adensamento da amostra era rápida, devido o solo ser arenoso, sendo verificada após alguns minutos pelo transdutor de deslocamento acima da tampa da caixa, que parava de medir os deslocamentos. Por conseguinte, deu-se início ao ensaio de cisalhamento direto, aplicando a tensão normal manualmente e a força cisalhante estabelecida com o auxílio de uma prensa triaxial até o limite de deslocamento horizontal máximo do equipamento (40 mm). O ensaio foi finalizado antes de se atingir um deslocamento de 40 mm, para evitar qualquer dano ao equipamento.

Para o cálculo da velocidade de cisalhamento durante os ensaios, fez-se uso da norma da D3080 (ASTM, 2011), que determina o método de cálculo da velocidade do deslocamento lateral relativo para cisalhar o corpo de prova durante o ensaio de cisalhamento direto. A partir dos dados disponibilizados na norma em questão e dos cálculos desenvolvidos, a

velocidade do carregamento adotada para a fase de cisalhamento foi de 0,508 mm/min em todos os ensaios de cisalhamento direto. Como resultado, obtiveram-se as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal e o deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal, sendo que a partir das curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal foi possível obter a envoltória de resistência ao cisalhamento.

3.4.3 – PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS SOLO-FIBRA

Minutos antes do começo de cada ensaio, os compósitos solo-fibra eram preparados. Inicialmente, calculou-se a massa de solo arenoso, fibra e água necessárias para a realização do ensaio, conforme os parâmetros adotados para cada compósito. A densidade relativa e umidade utilizada nas misturas foram, respectivamente, de 50% e 10%, definidas anteriormente. Os componentes foram adicionados em um recipiente na seguinte sequência: solo, fibras e água, que permitiu a homogeneização dos componentes. A mistura se deu manualmente, até ser obtida a homogeneização, verificada visualmente. Vale destacar que na presente pesquisa não houve o reuso dos materiais estudados. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a seguir, ilustra os procedimentos adotados na preparação das misturas utilizadas nos ensaios.



A – Pesagem da quantidade de solo arenoso necessária para o ensaio.



B – Disposição das fibras de forma aleatória na massa de solo.



C – Adição de água.



D – Homogeneização.

Figura 3.14 – Preparo das misturas do compósito solo-fibra.

3.4.4 – PREPARO DOS CORPO DE PROVA

A moldagem dos corpos de prova de solo arenoso e dos compósitos solo-fibra foi realizada por compactação na caixa bipartida do ensaio de cisalhamento direto. As amostras foram compactadas manualmente, simplesmente aplicando-se uma carga vertical com o auxílio de um soquete de aço, até que a amostra atingisse a altura desejada (40 mm por camada). O corpo de prova foi dividido em cinco camadas, controlando o peso da mistura adicionada e a altura das camadas, de modo a alcançar a densidade relativa definida. A Figura 3.15, a seguir, apresenta uma visão geral no interior da caixa de cisalhamento direto com as marcações feitas na parte interna do equipamento para auxiliar a moldagem do corpo de prova.



Figura 3.15 – Altura das camadas, feitas com marcações, no interior da caixa de cisalhamento.

A quantidade de fibras adicionadas à mistura foi determinada em relação à massa de solo seco da matriz. A mistura dos componentes foi descrita no presente Item 3.4.3. Cada corpo de prova teve sua mistura preparada separadamente antes do início do ensaio. Durante tal processo, todas as precauções foram tomadas no sentido de se evitar as perdas de umidade por evaporação. Todos os materiais foram pesados em uma balança com resolução de 0,01 g.

Antes de iniciar o processo de moldagem dos corpos de prova, o interior da caixa bipartida passou por um processo de limpeza, que consiste da raspagem das paredes, fazendo uso de uma lixa, com o objetivo de diminuir o atrito da parede com os grãos de sólido. Em seguida, fez-se uso de um aspirador de pó para remover qualquer tipo de resíduo dentro do equipamento.

3.4.5 – ANÁLISE DA RUPTURA E DO ALONGAMENTO DAS FIBRAS

As análises do comportamento das fibras após os ensaios na zona de cisalhamento da caixa bipartida foram verificadas quanto ao alongamento e ruptura das fibras, após os ensaios de cisalhamento direto, sendo importantes para uma melhor definição do comportamento do compósito solo-fibra e uma compreensão mais adequada da atuação da fibra no interior da massa de solo.

A análise do alongamento e das rupturas das fibras se deu na terceira fase do programa de ensaios, com as misturas 5, 9 e 13 e compósitos de solo-fibra no teor de 0,75% de fibra, com relação à massa seca de solo, e 50 mm de comprimento de fibra. Em todos os ensaios, a tensão normal aplicada foi à máxima (100 kPa).

Para a obtenção dos resultados, foram executados os seguintes procedimentos:

- Após o ensaio de cisalhamento direto ser finalizado, retirava-se o material do corpo de prova até chegar à zona de cisalhamento da caixa bipartida; a partir daí, tomaram-se amostras do compósito solo-fibra em porções situadas na zona de cisalhamento (**Erro! fonte de referência não encontrada.**);
- As amostras foram lavadas com água para possibilitar a separação das fibras com o solo arenoso; e
- As fibras foram secadas ao ar e medidas no comprimento com uma régua comum, em um total de 100 unidades de fibras para cada amostra (com $\pm 2,5$ mm de tolerância).



Figura 3.16 – Zona de cisalhamento do corpo de prova.

4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo têm-se os resultados e as análises dos ensaios aqui executados, para as amostras de solo arenoso e solo-fibra. A partir dos resultados foi possível interpretar e melhor identificar o comportamento mecânico do solo arenoso com e sem reforço das fibras vegetais, além das mudanças nos parâmetros de resistência do solo.

4.1 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO SOLO ARENOSO

O solo arenoso foi obtido em estabelecimento comercial, localizado na Região Administrativa do Guará – RA X, Distrito Federal, e selecionado em laboratório dentro de um intervalo granulométrico (vide Figura 4.1, a seguir). O material utilizado foi passado na peneira de n. 16, sendo o retido descartado.

O objetivo da operação em questão foi a obtenção de um material uniforme com comportamento mecânico bem definido e estável, visando proporcionar a melhor interpretação dos efeitos provocados pela adição das fibras vegetais.



Figura 4.1 – Solo arenoso.

A Tabela 4.1, a seguir, apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do solo arenoso utilizado na presente pesquisa.

Tabela 4.1 – Índices físicos do solo arenoso.

Índices Físicos	Solo Arenoso
Densidade Real dos Grãos (Gs)	2,68
Índice de Vazios Máximo (Emax)	0,894
Índice de Vazios Mínimo (Emin)	0,586
Índice de Vazios (Eo)	0,740
Coeficiente de Uniformidade (CNU)	2,40
Coeficiente de Curvatura (Cc)	1,06
Diâmetro efetivo (D_{10})	0,18 mm
Diâmetro médio (D_{50})	0,39 mm

O solo arenoso é classificado como uma areia média (NBR 6502 – ABNT, 1995) e, conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS, uma areia bem graduada (SW), sem características plásticas. A Figura 4.2, a seguir, apresenta as curvas granulométricas obtidas para o solo arenoso com o uso de defloculante.

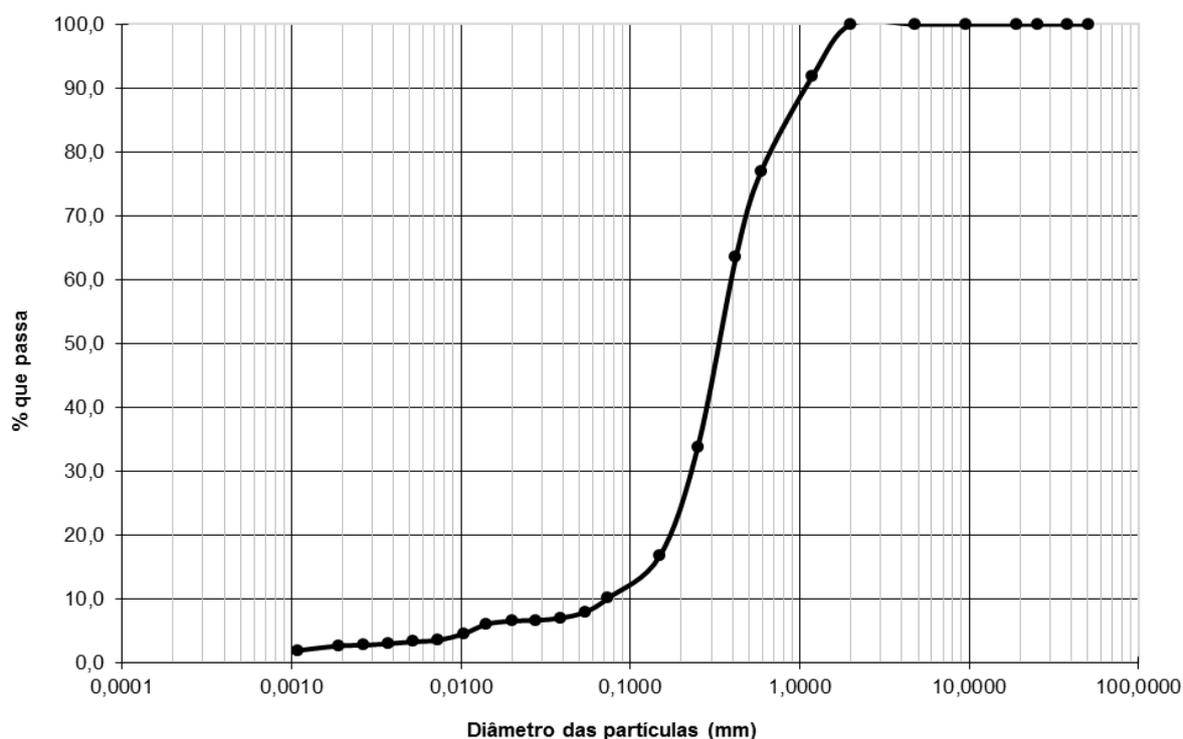


Figura 4.2 – Curva da análise granulométrica do solo arenoso.

O solo arenoso é composto por 1,5% de argila (<0,002mm), 2,6% de silte (0,002 – 0,06mm) e 95,9% de areia, sendo que da porcentagem em questão, 20,4% é de areia fina (0,06 – 0,2mm), 52,7% de areia média (0,2 – 0,6mm) e 22,9% de areia grossa (0,6 – 2,0mm).

Para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo arenoso foram realizados ensaios de cisalhamento em média escala, com a utilização do deslocamento de 35 mm como critério de ruptura. A Figura 4.3, a seguir, expressa curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para a matriz de solo arenoso, correspondendo a um ângulo de atrito de 34° com uma coesão de 6 kPa. Os resultados foram utilizados como controle para avaliar o efeito da adição de fibras vegetais nos parâmetros de resistência do solo.

No Apêndice A tem-se a apresentação de todas as curvas deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal dos ensaios de solo arenoso com e sem fibras vegetais, constatados nos ensaios de cisalhamento direto. Durante o ensaio foi possível perceber uma pequena variação dos sensores que medem o deslocamento vertical, ocorrida pela acomodação do próprio equipamento e/ou dos grãos de solo dentro do corpo de prova.

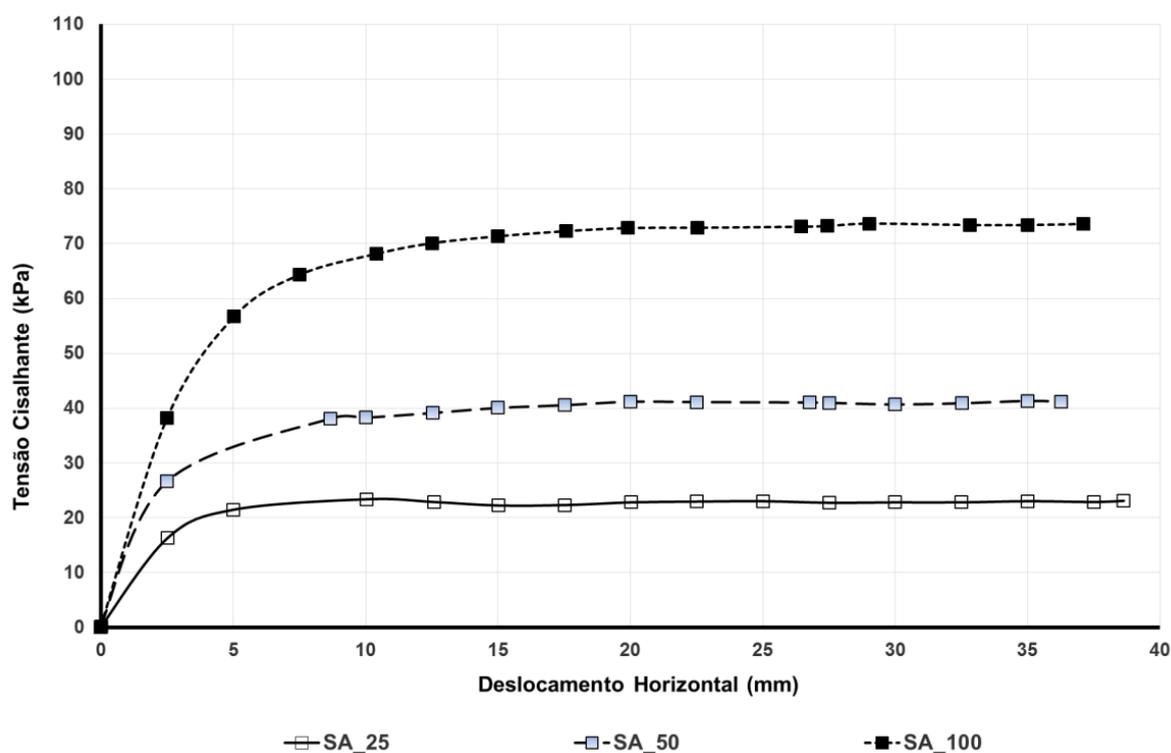


Figura 4.3 – Curva tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para solo arenoso.

Na Figura 4.4, a seguir, evidencia-se que o comportamento do solo arenoso nas três curvas tensão-deslocamento apresentou um aspecto similar, ou seja, quanto maior a tensão normal aplicada, maior a resistência ao cisalhamento, sem apresentar resistência de pico. Também se pode observar que a partir do deslocamento de 15 mm, as três curvas apresentaram uma regularização da sua resistência.

4.2 – ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DE MÉDIAS DIMENSÕES

No presente item tem-se a apresentação dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto de médias dimensões para as amostras de solo arenoso e compósitos solo-fibras vegetais de sisal, curauá e coco. Vale destacar que os ensaios das amostras de solo arenoso com e sem reforço foram realizadas nas mesmas condições; logo, todo acréscimo gerado nos compósitos solo-fibra se deu por conta da adição da fibra no corpo de prova.

Neste ínterim, a presente pesquisa buscou avaliar a influência das variáveis investigadas (tipo de fibra, comprimento e teor de fibra) no ganho dos parâmetros de resistência do solo arenoso reforçado com as fibras vegetais.

4.2.1 – CURVAS TENSÃO CISALHANTE *VERSUS* DESLOCAMENTO HORIZONTAL

No presente item tem-se a amostragem e interpretação das curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal de cada uma das misturas dos compósitos solo-fibras vegetais avaliadas nas três tensões normais aplicadas (25, 50 e 100 kPa), comparadas com os resultados de solo arenoso.

4.2.1.1 – FIBRA VEGETAL DE SISAL

A Figura 4.4, a seguir, apresenta as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal dos compósitos solo-fibras de sisal com o comprimento de 25 mm e nos teores de 0,5 e 0,75% de fibra, em relação à massa seca de solo. Aqui foi possível notar que as fibras passaram a contribuir no acréscimo de resistência do material logo no início do ensaio, quando do deslocamento horizontal de aproximadamente 5 mm. A partir daí tornou-se evidente a diferença de comportamento entre as curvas tensão-deslocamento do solo reforçado e do solo não reforçado. O comportamento das misturas nas curvas tensão-deslocamento apresentou um aspecto similar aos do solo arenoso, ou seja, quanto maior a tensão normal aplicada, maior o aumento do ganho da tensão cisalhante, sem apresentar resistência de pico.

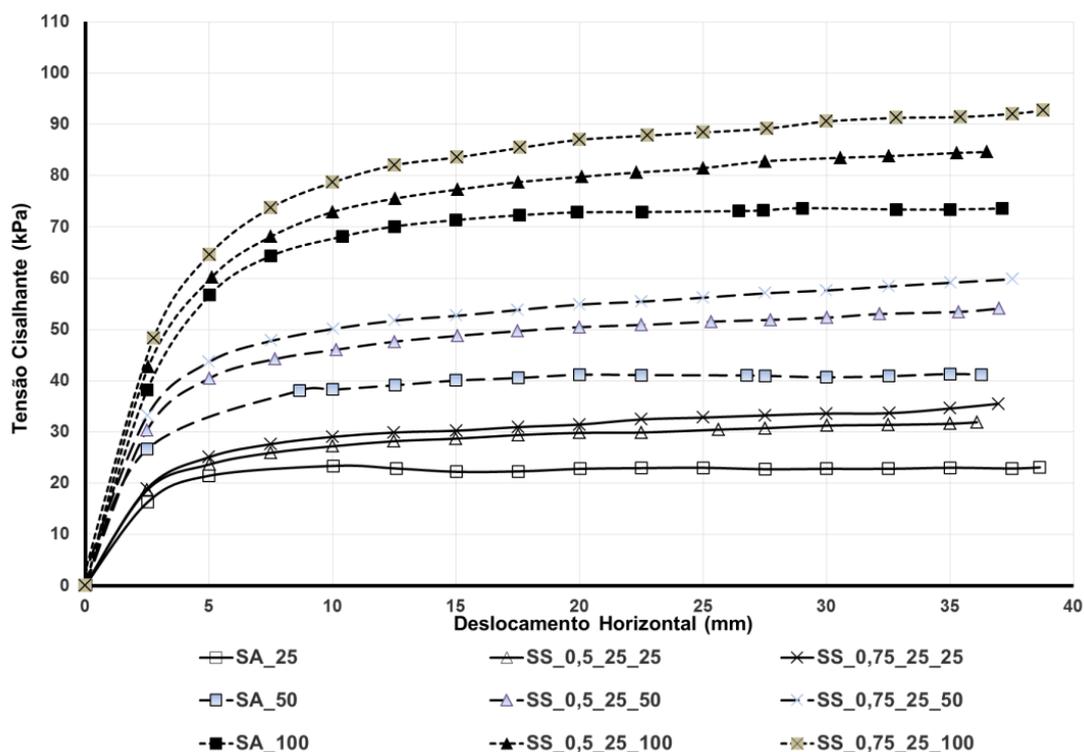


Figura 4.4 – Curva tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para fibra de sisal com comprimento de 25 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

A Figura 4.5, a seguir, apresenta as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal dos compósitos solo-fibras de sisal com o comprimento de 50 mm e nos teores de 0,5 e 0,75% de fibra, em relação à massa seca de solo. Aqui foi possível constatar que as fibras passaram a contribuir no acréscimo de resistência do material quando do início do ensaio, antes do deslocamento horizontal atingir 5 mm, sendo evidente a diferença de comportamento entre as curvas tensão-deslocamento do solo reforçado e do solo não reforçado. As misturas tiveram comportamentos distintos para as curvas tensão-deslocamento. E ainda, na tensão normal aplicada de 25 kPa, o acréscimo no teor de fibra não apresentou ganho de resistência durante todo o ensaio; e para a tensão normal aplicada de 50 kPa, o acréscimo de fibra apresentou maior ganho de resistência quando comparado com os ensaios de fibra de menor comprimento – 25 mm. Por fim, para a tensão normal aplicada de 100 kPa até o deslocamento de 20 mm não foi observada no ganho de resistência com o aumento do teor de fibra, pois nenhuma das curvas apresentaram resistência de pico.

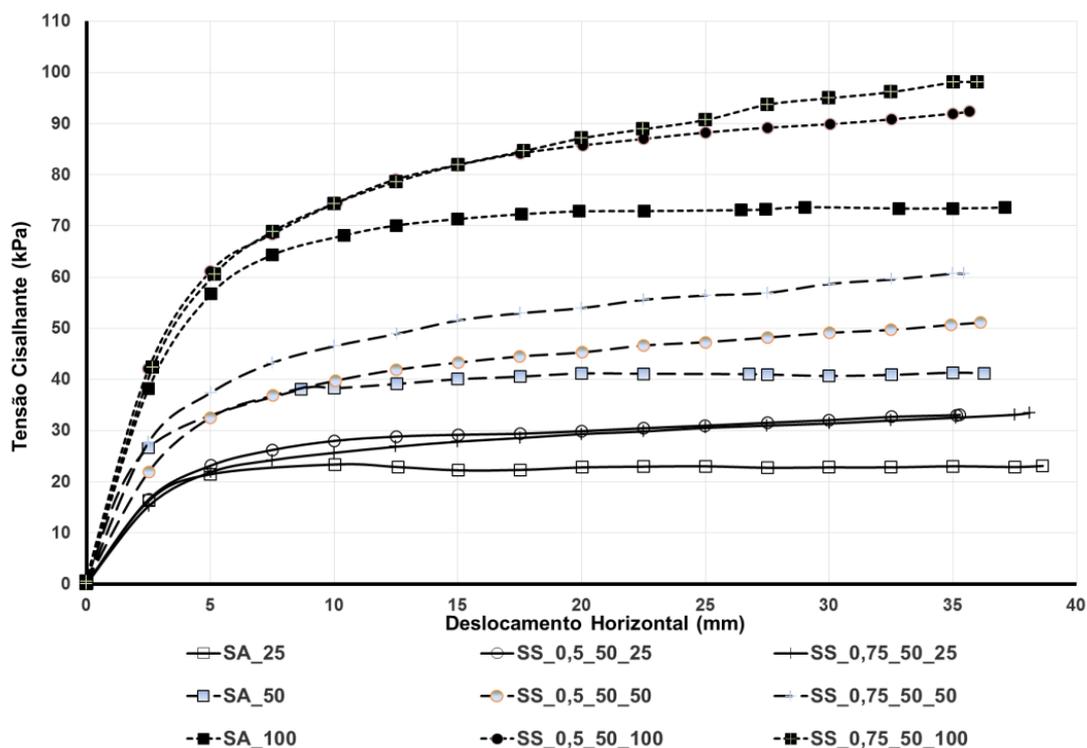


Figura 4.5 – Curva tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para fibra de sisal com comprimento de 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

A mistura que apresentou maior ganho de resistência com a adição da fibra de sisal foi a SS_0,75_25 (compósito solo-fibra de sisal de comprimento de 25 mm e teor de 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo), melhorando a resistência em mais de 50% em relação à resistência do solo arenoso.

4.2.1.2 – FIBRA VEGETAL DE CURAUÁ

A Figura 4.6, a seguir, identifica as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal dos compósitos solo-fibras de curauá com o comprimento de 25 mm e nos teores de 0,5 e 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo. As fibras no corpo de prova passaram a contribuir no ganho de resistência do compósito no início do ensaio, quando do deslocamento horizontal de aproximadamente 5 mm. A partir daí mostrou-se evidente a diferença de comportamento entre as curvas tensão-deslocamento do solo reforçado e do solo não reforçado. O desempenho das curvas tensão-deslocamento nas misturas apresentou um aspecto similar aos do solo arenoso, ou seja, quanto maior a tensão normal aplicada, maior o aumento do ganho da tensão cisalhante, sem apresentar resistência de pico.

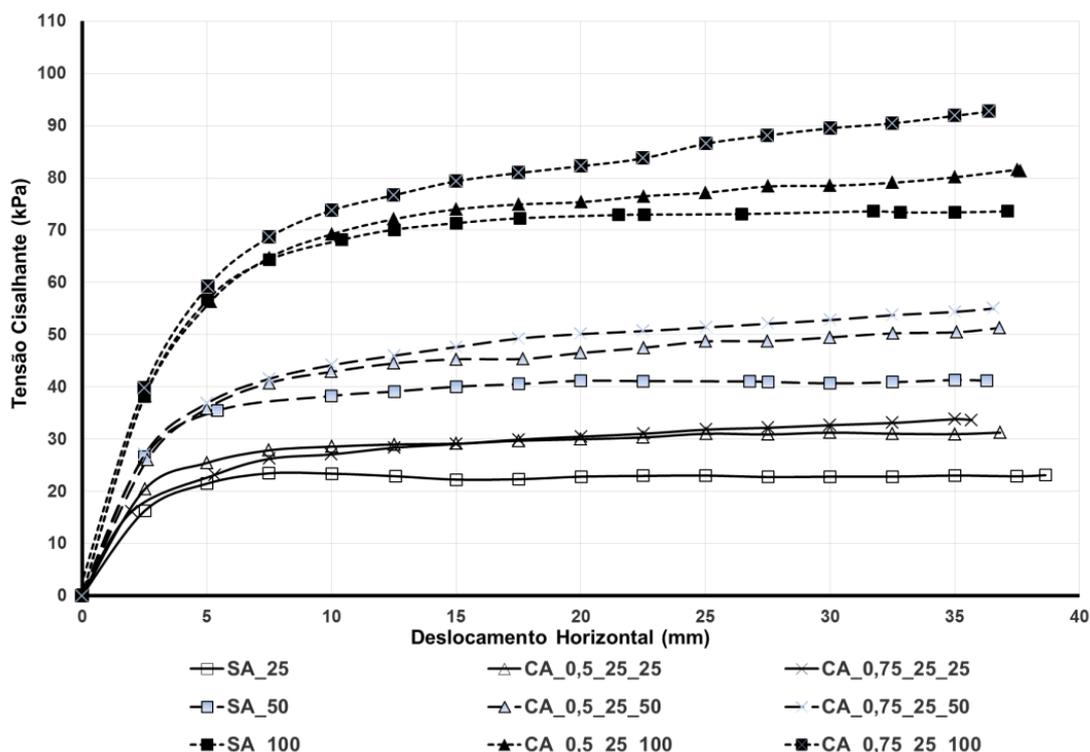


Figura 4.6 – Curva tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para fibra de curauá com comprimento de 25 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

A Figura 4.7, a seguir, apresenta as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal dos compósitos solo-fibras de curauá com o comprimento de 50 mm e nos teores de 0,5 e 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo. O mesmo efeito foi observado nas misturas das fibras – prova de que passaram a contribuir no ganho de resistência do compósito no início do ensaio, quando do deslocamento horizontal de aproximadamente 5 mm. A partir daí mostrou-se evidente a diferença de comportamento entre as curvas tensão-deslocamento do solo reforçado e do solo não reforçado. As misturas tiveram comportamentos distintos para as curvas tensão-deslocamento. Na tensão normal aplicada de 25 kPa, o acréscimo no teor de fibra não apresentou ganho de resistência durante todo o ensaio. E para a tensão normal aplicada de 50 kPa, o acréscimo de fibra teve um ganho maior de resistência quando comparado com os ensaios de fibra de menor comprimento – 25 mm –, sendo a diferença de aproximadamente 20%. Por fim, para a tensão normal aplicada de 100 kPa, as fibras de maior comprimento trabalharam melhor no ganho de resistência quando comparadas com as fibras de menor comprimento, pois nenhuma das curvas apresentaram resistência de pico.

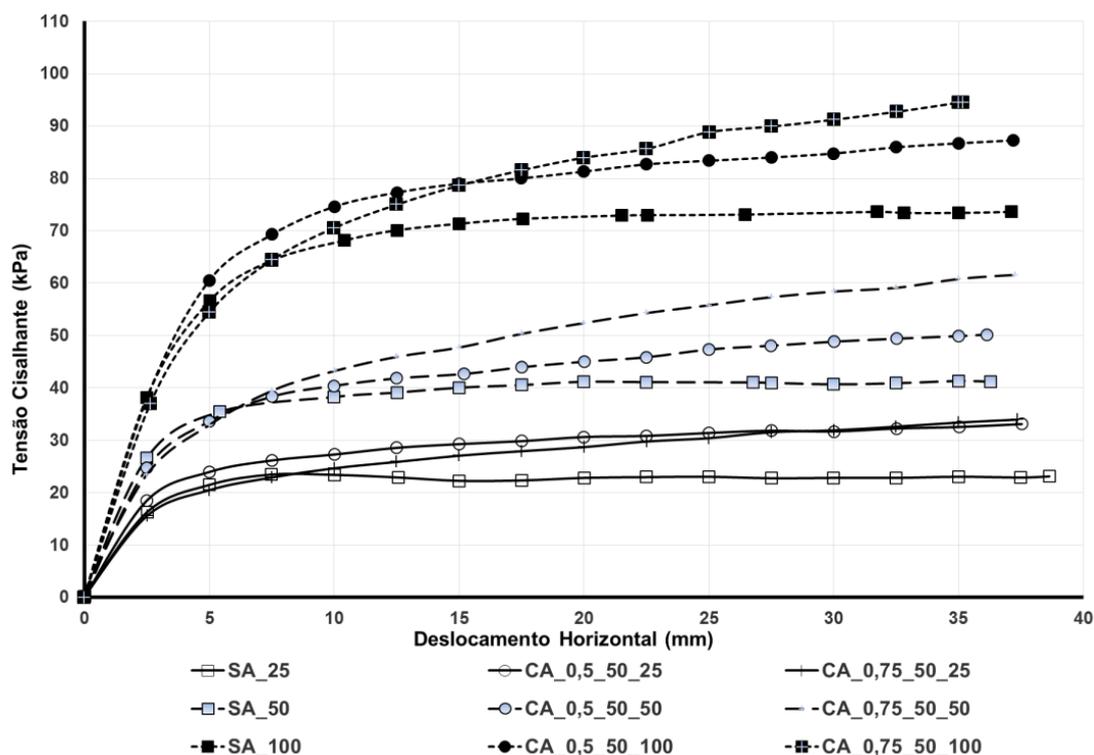


Figura 4.7 – Curva tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para fibra de curauá com comprimento de 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

A mistura que apresentou maior ganho de resistência com a adição da fibra de curauá foi a CA_0,75_50 (compósito solo-fibra de curauá com o comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo), melhorando a resistência em mais de 47% em relação à resistência do solo arenoso.

4.2.1.3 – FIBRA VEGETAL DE COCO

A Figura 4.8, a seguir, apresenta as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal dos compósitos solo-fibras de coco com o comprimento de 25 mm e nos teores de 0,5 e 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo. Ali foi possível constatar que as fibras passaram a contribuir no acréscimo de resistência do material logo no começo do ensaio, antes do deslocamento horizontal atingir 5 mm, sendo evidente a diferença de comportamento entre as curvas tensão-deslocamento do solo reforçado e do solo não reforçado. As curvas tensão-deslocamento tiveram comportamentos diferentes. Neste sentido, nas tensões normais aplicadas de 25 e 50 kPa, apenas a partir do deslocamento de 25 mm foi possível observar o ganho de resistência com o aumento do teor de fibra. Porém, na tensão normal aplicada de 100 kPa, o ganho de resistência com o acréscimo de fibra se deu a partir do deslocamento de

15 mm. Vale destacar que todas as misturas dos compósitos solo-fibra apresentaram resistências maiores quando comparadas com o ensaio de solo arenoso, sem apresentar resistência de pico.

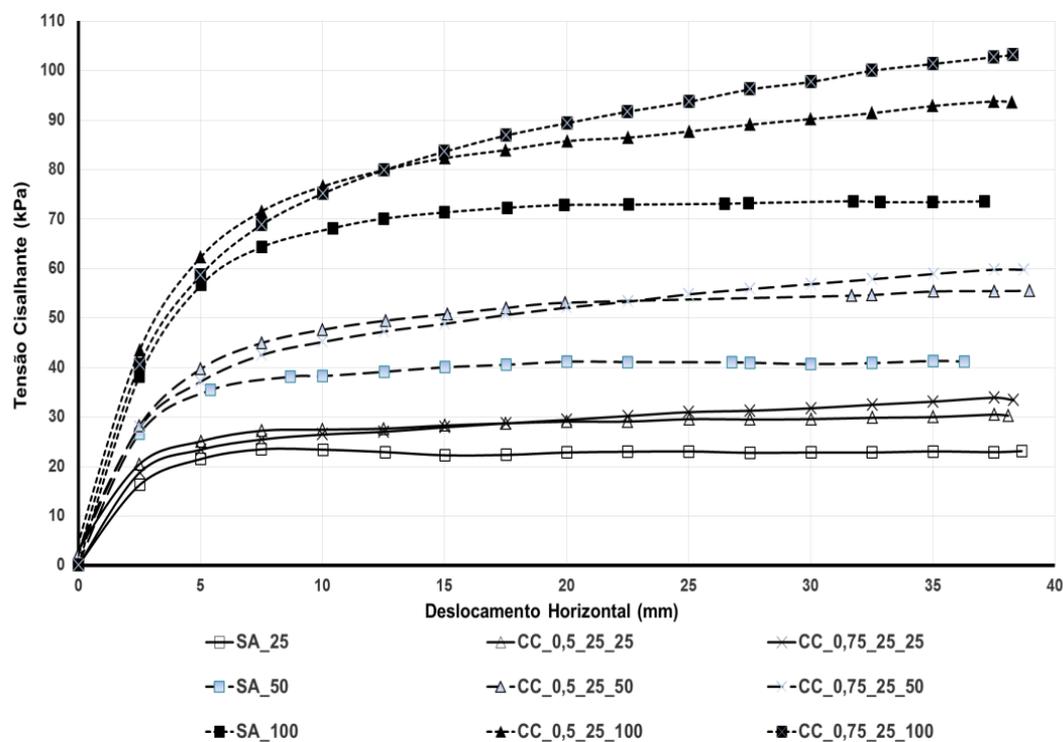


Figura 4.8 – Curva tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para fibra de coco com comprimento de 25 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

A Figura 4.9, a seguir, apresenta as curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal dos compósitos solo-fibras de coco com o comprimento de 25 mm e nos teores de 0,5 e 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo. O mesmo efeito foi observado nas misturas de fibras em questão – prova de que passaram a contribuir no ganho de resistência do compósito no início do ensaio, quando do deslocamento horizontal de aproximadamente 5 mm. A partir daí tornou-se evidente a diferença de comportamento entre as curvas tensão-deslocamento do solo reforçado e do solo não reforçado. O comportamento das misturas nas curvas tensão-deslocamento apresentou um aspecto similar. Para todas as tensões normais aplicadas – 25, 50 e 100 kPa –, as misturas não tiveram ganho de resistência com o aumento do teor de fibra. Logo, para os compósitos de solo-fibra de coco no comprimento de 50 mm não existe influencia com a variação do teor de fibra, pois estas contribuíram de modo semelhante no ganho da resistência quando comparadas com o solo arenoso. Por fim, todas as

misturas dos compósitos solo-fibra apresentaram resistências maiores quando comparadas com o ensaio de solo arenoso, sem apresentar resistência de pico.

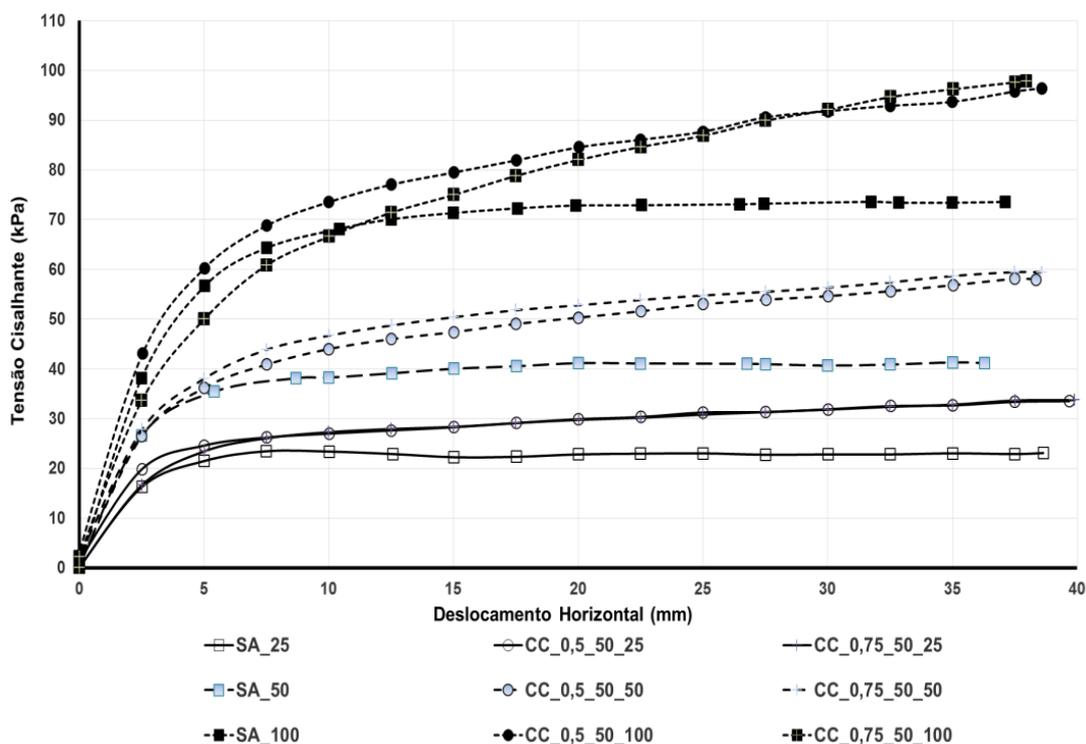


Figura 4.9 – Curva tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para fibra de coco com comprimento de 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

A mistura que apresentou o maior ganho de resistência com a adição da fibra de coco foi a CC_0,75_50 (compósito solo-fibra de coco com o comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo), melhorando a resistência em mais de 43% em relação à resistência do solo arenoso.

No processo de mistura dos compósitos solo-fibras, distribuída de forma aleatória na massa de solo, foi possível notar que as fibras proporcionavam um emaranhado que envolvia e, de certo modo, “vinculava” os grãos do solo, promovendo um efeito de ancoragem. Tal observação foi traduzida no aumento da resistência das misturas em relação ao ensaio de solo arenoso e comprovada pelos valores obtidos.

4.2.2 – ENVOLTÓRIAS E PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

No presente item tem-se a apresentação das envoltórias de resistência ao cisalhamento das misturas solo-fibra nos diferentes comprimentos e teores, comparadas com a trajetória de resistência do solo arenoso.

Tendo em vista que as curvas tensão *versus* deslocamento não apresentaram resistência de pico para todos os ensaios, adotou-se como critério de ruptura o deslocamento máximo de 35 mm, considerando que o equipamento possui limite de deslocamento máximo de 40 mm.

4.2.2.1 – FIBRA VEGETAL DE SISAL

A Figura 4.10, a seguir, apresenta as envoltórias de resistência obtidas para o solo arenoso e compósitos solo-fibra de sisal, considerando as misturas reforçadas com fibras nos comprimentos de 25 e 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra. Os parâmetros de resistência (ângulo de atrito e coesão) são diferentes para todas as misturas – resultados que podem ser observados numericamente na Figura 4.11, a seguir.

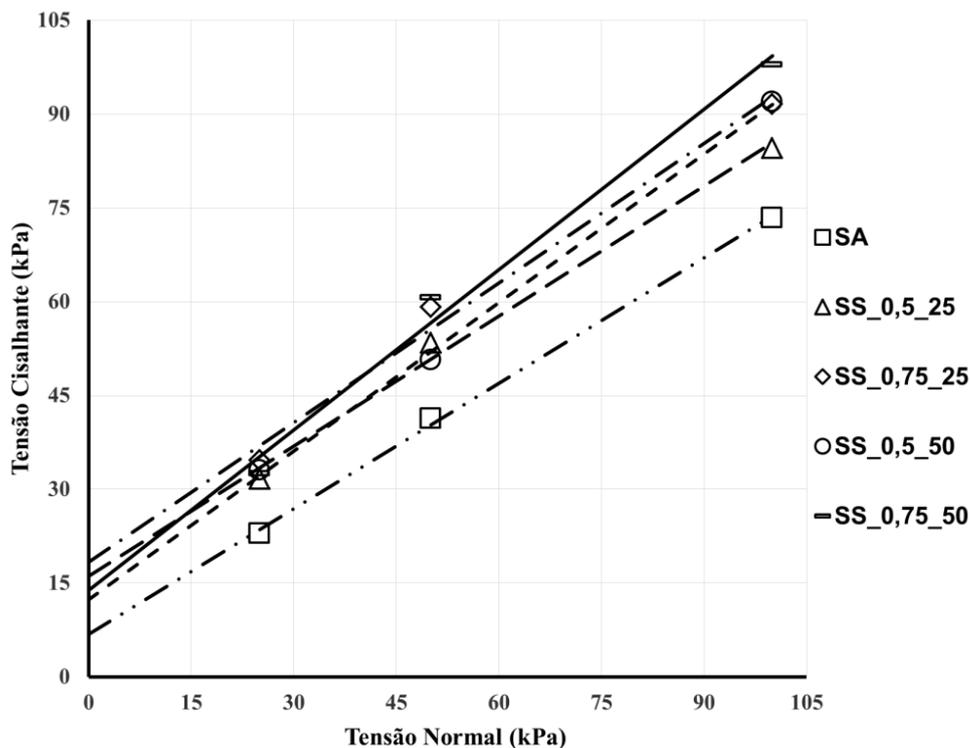


Figura 4.10 – Envoltórias de resistência para solo arenoso e misturas solo-fibra com fibras de sisal no comprimento de 25 e 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

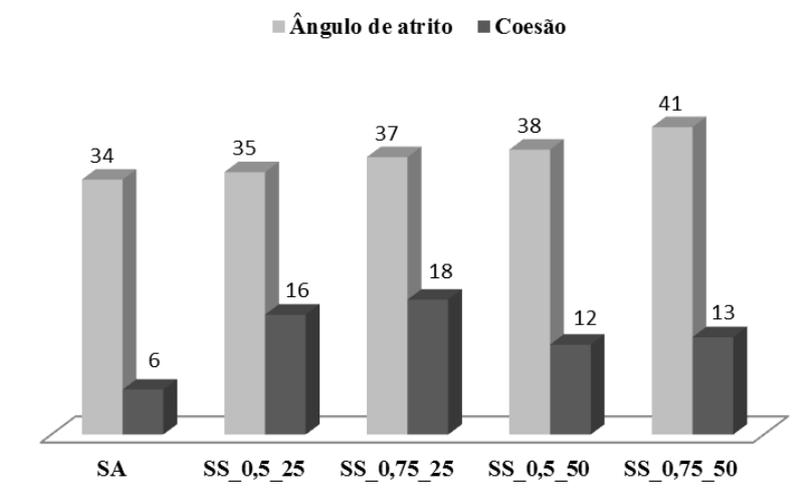


Figura 4.11 – Valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo arenoso e solo-fibra reforçados com fibra de sisal.

A partir das envoltórias de resistência foi possível observar que a adição de fibra de sisal em todas as misturas dos compósitos solo-fibra apresentou um ganho da resistência cisalhante, para todas as tensões normais aplicadas, aumentando discretamente a inclinação das trajetórias de resistência em relação à trajetória do solo arenoso – o que pode ser observado numericamente no aumento do ângulo de atrito e intercepto coesivo.

A mistura SS_0,75_50 (compósito solo-fibra de sisal com o comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo) apresentou o resultado mais satisfatório, quando avaliada a melhoria do ângulo de atrito. Ao passo que para o intercepto coesivo foi possível verificar que a mistura SS_0,75_25 (compósito solo-fibra de sisal com o comprimento de 25 mm e teor de 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo) apresentou o aprimoramento mais significativo. Assim, as fibras de sisal de menor comprimento denotaram efeito de ancoragem mais significativo com maiores valores no intercepto coesivo. Contudo, as fibras de maior comprimento preencheram melhor os espaços vazios, acarretando em melhor efeito de aderência do grão de solo com a fibra – resultado dos maiores ângulos de atrito. Porém, em ambos os casos, quanto maior o teor de fibra, maior se tem o ganho de resistência.

4.2.2.2 – FIBRA VEGETAL DE CURAUÁ

A Figura 4.12, a seguir, apresenta as envoltórias de resistência obtidas para o solo arenoso e compósitos solo-fibra de curauá, considerando as misturas reforçadas com fibras nos comprimentos de 25 e 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra. Os parâmetros de resistência podem ser observados numericamente na Figura 4.13, a seguir.

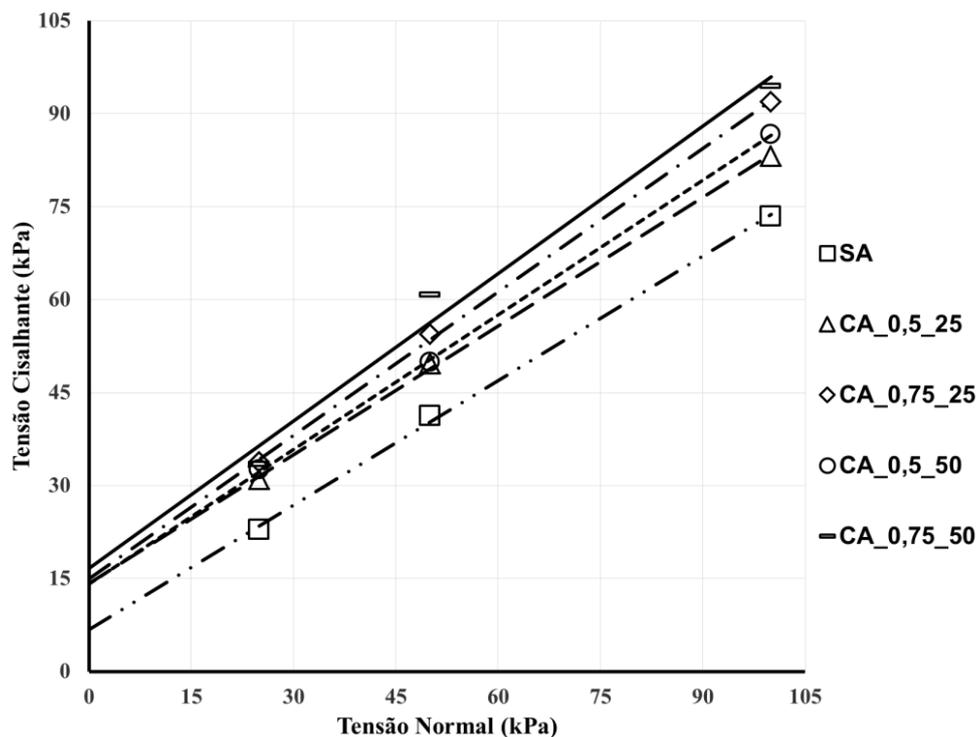


Figura 4.12 – Envoltórias de resistência para solo arenoso e misturas solo-fibra com fibras de curauá no comprimento de 25 e 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

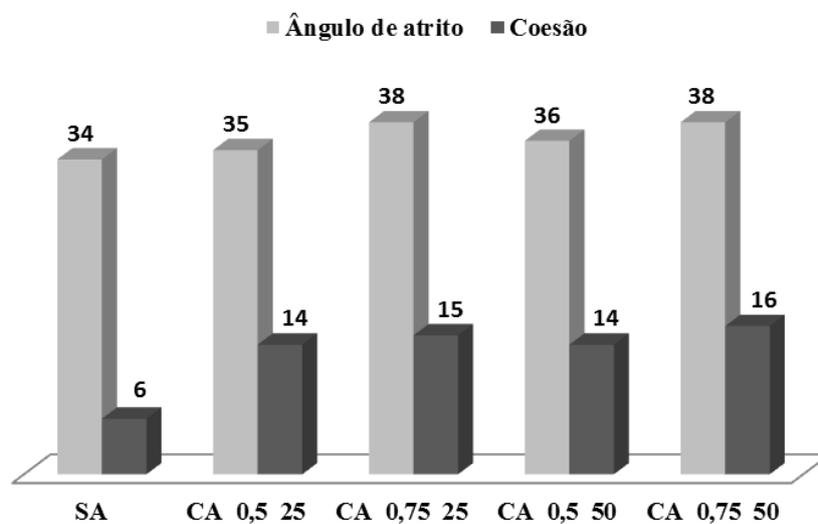


Figura 4.13 – Valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo arenoso e solo-fibra reforçados com fibra de curauá.

Com base nas envoltórias de resistência à adição de fibra de curauá em todas as misturas dos compósitos solo-fibra foi possível observar um ganho da resistência cisalhante, para todas as tensões normais aplicadas, acarretando em aumento da inclinação das trajetórias de resistência em relação à trajetória do solo arenoso – fato que foi possível perceber numericamente no aumento do ângulo de atrito e intercepto coesivo.

A mistura CA_0,75_50 (compósito solo-fibra de curauá com o comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo) apresentou o resultado mais satisfatório, quando avaliada a melhoria do ângulo de atrito e intercepto coesivo, evidenciando que os compósitos reforçados com fibras de curauá de maior comprimento e teor apresentaram efeitos de ancoragem e atritos entre o grão de solo e fibras, superiores as outras misturas de curauá.

4.2.2.3 – FIBRA VEGETAL DE COCO

A Figura 4.14, a seguir, apresenta as envoltórias de resistência obtidas para o solo arenoso e compósitos solo-fibra de coco, considerando as misturas reforçadas com fibras nos comprimentos de 25 e 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra. Os parâmetros de resistência podem ser considerados numericamente n Figura 4.15, a seguir.

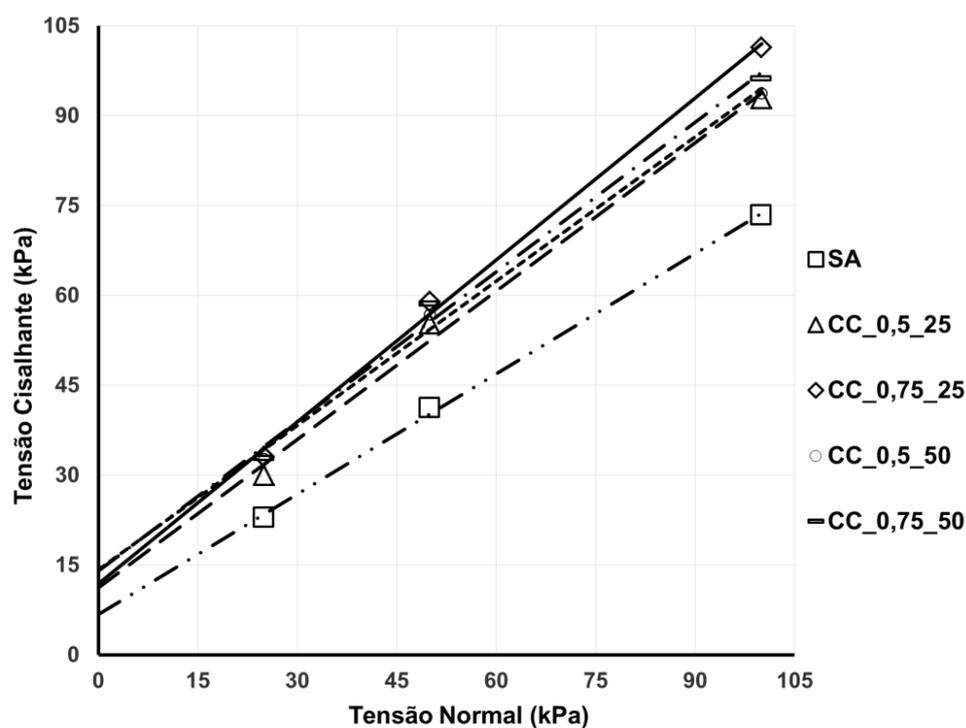


Figura 4.14 – Envoltórias de resistência para solo arenoso e misturas solo-fibra com fibras de coco no comprimento de 25 e 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

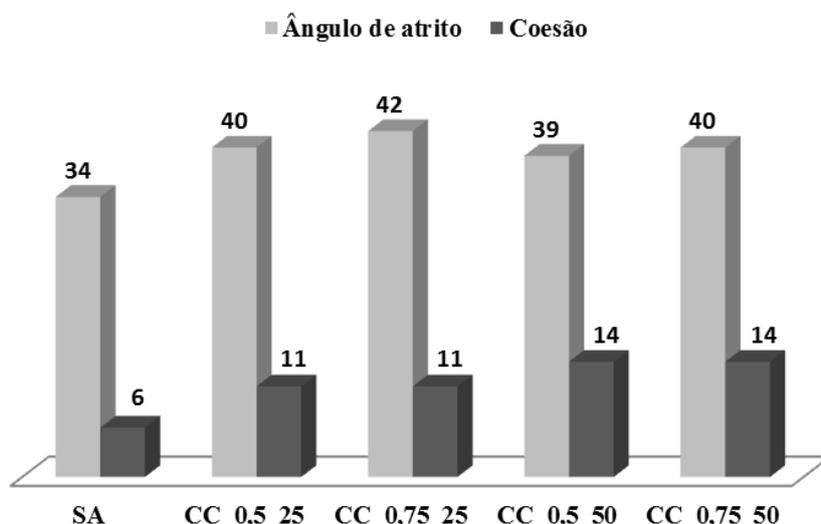


Figura 4.15 – Valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para o solo arenoso e solo-fibra reforçados com fibra de coco.

A partir das envoltórias de resistência foi possível verificar que a adição de fibra de coco em todas as misturas dos compósitos solo-fibra apresentou um ganho da resistência cisalhante, para todas as tensões normais aplicadas, aumentando a inclinação das trajetórias de resistência em relação à trajetória do solo arenoso – o que pode ser observado numericamente no aumento do ângulo de atrito e intercepto coesivo.

A mistura CC_0,75_25 (compósito solo-fibra de coco com o comprimento de 25 mm e teor de 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo) apresentou o resultado mais satisfatório, quando avaliado a melhoria do ângulo de atrito, enquanto que a mistura CC_0,75_50 (compósito solo-fibra de coco com o comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo) apresentou o maior aumento quanto ao intercepto coesivo, quando comparado com o solo arenoso. Assim, averiguou-se que as fibras de coco de maior comprimento possuem um efeito de ancoragem mais significativo com maiores valores no intercepto coesivo, independente do teor de fibra. Contudo, as fibras de menor comprimento preencheram melhor os espaços vazios, acarretando em um melhor efeito de aderência do grão de solo com a fibra, resultando maiores ângulos de atrito. Entretanto, o aumento do teor de fibra, para ambos os comprimentos, não teve ganho do intercepto coesivo, mas apenas do ângulo de atrito.

4.2.3 – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE FIBRA VEGETAL

No presente item foram avaliados os comportamentos das curvas tensão-deslocamento dos compósitos solo-fibras em relação aos comprimentos das fibras (25 e 50 mm) nas diferentes tensões normais aplicadas. Neste sentido, as Figuras 4.16 e 4.17, a seguir, identificam a influência dos comprimentos de fibra em cada mistura.

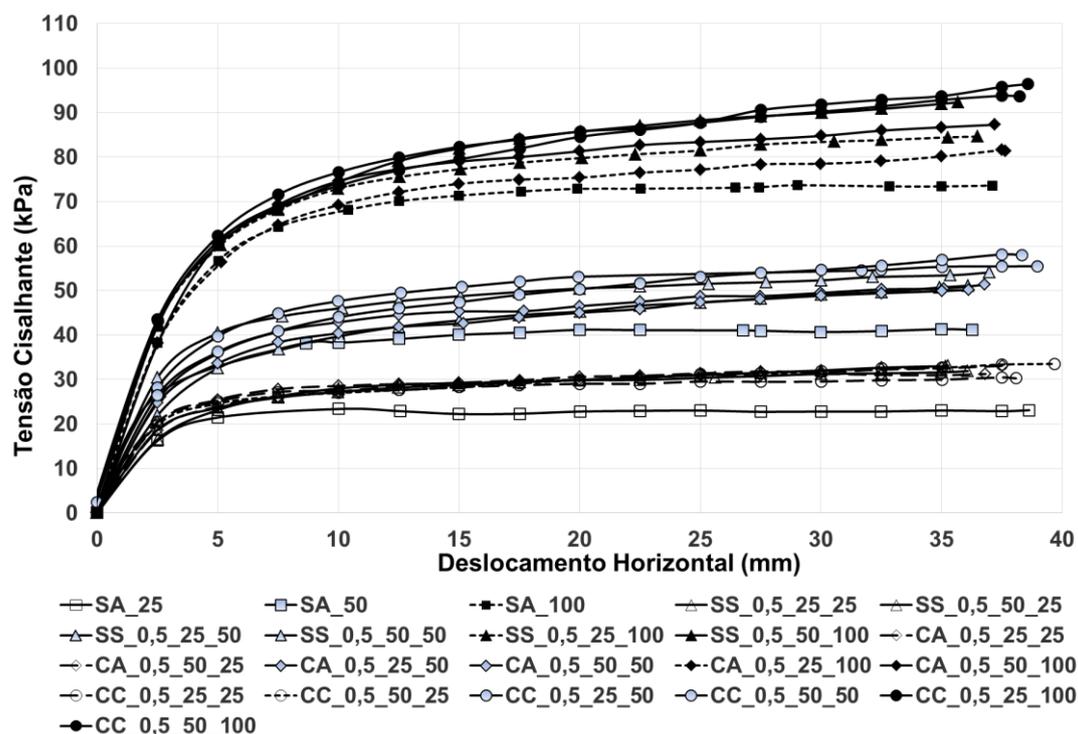


Figura 4.16 – Curva tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal para fibras de sisal, curauá e coco, nos comprimentos de 25 e 50 mm e teor 0,50% de fibra.

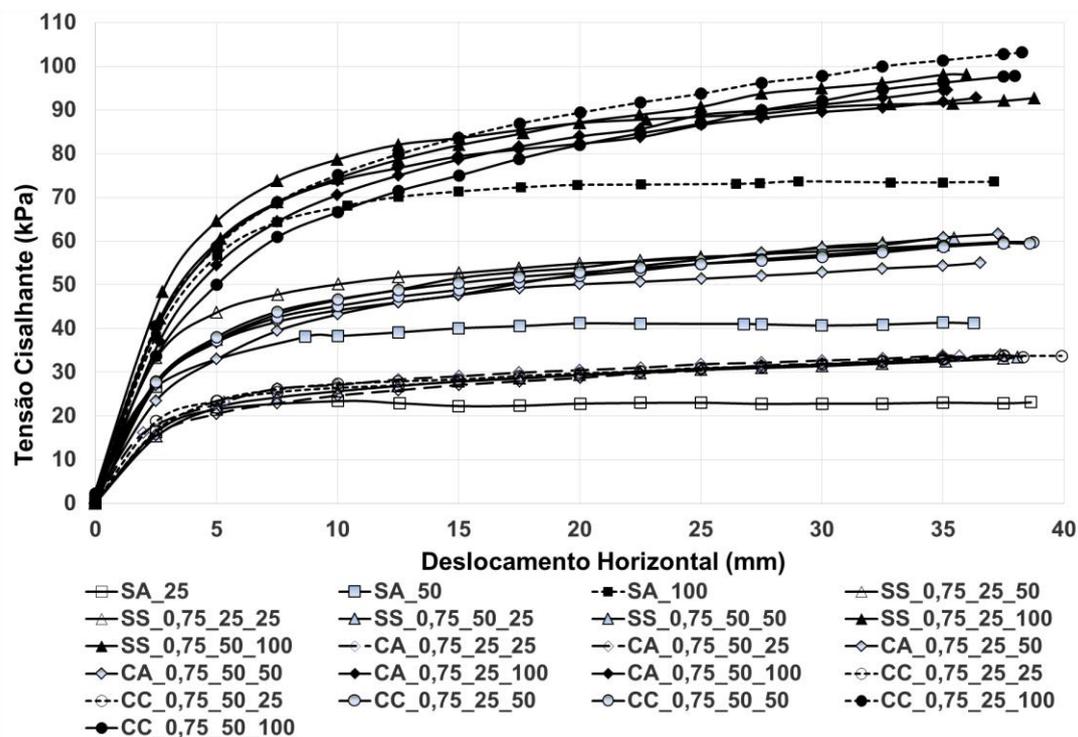


Figura 4.17 – Curva tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal para fibras de sisal, curauá e coco, nos comprimentos de 25 e 50 mm e teor 0,75% de fibra.

Nos compósitos de solo-fibra com teor de 0,5% de fibra em relação à massa seca de solo, com o aumento do comprimento de fibra de 25 mm para 50 mm, foi possível observar um ganho de resistência em todas as tensões normais aplicadas com variação em até 41%. Já para os compósitos de solo-fibra com teor de 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo, a extensão das fibras de 25 mm para 50 mm obteve um ganho de resistência em todas as tensões mais aplicadas, variando em até 43%.

Nos ensaios com a da tensão normal de 25 kPa, o efeito do aumento do comprimento das fibras (de 25 mm para 50 mm) dos compósitos solo-fibra foram os que apresentaram o menor ganho de resistência, quando comparados a outros ensaios, sendo a mistura CC_0,5_50 e CC_0,75_50 aquelas que apresentaram os melhores resultados.

Já nos ensaios com as tensões normais aplicadas de 50 e 100 kPa, foi significativa a influência do aumento do comprimento das fibras (de 25 mm para 50 mm), aumentando a resistência dos compósitos solo-fibra em até 11%, pois devido às altas tensões, o maior comprimento de fibra possui uma área de contato maior (maior interação solo-fibra). Portanto, tem-se uma acomodação dos grãos de solo com as fibras – menos espaços vazios dentro da massa de solo –, resultando na interação solo-fibra, bem como em fortes e estáveis efeitos de ancoragem.

Logo, os compósitos que apresentaram os maiores aumentos da resistência com o aumento do comprimento de fibra (de 25 mm para 50 mm) foram as misturas CC_0,5_50 (compósito solo-fibra de coco com comprimento de 50 mm e teor de 0,5% de fibra) e CC_0,75_50 (compósito solo-fibra de coco com comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra).

4.2.4 – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO TEOR DE FIBRA VEGETAL

No presente item tem-se uma análise dos parâmetros de resistência dos compósitos solo-fibra fazendo uso de critérios de ruptura nos deslocamentos de 20, 25, 30 e 35 mm. Neste ínterim, foi avaliado o aumento dos parâmetros em questão (ângulo de atrito e coesão) quando aumentado o teor de fibra – de 0,5% para 0,75%, nas misturas. No Anexo B tem-se a descrição de todos os valores numéricos de tensão cisalhante, nos deslocamentos de 20, 25, 30 e 35 mm, do solo arenoso e compósitos solo-fibra, durante o ensaio de cisalhamento direto.

A Tabela 4.2, a seguir, apresenta os valores dos parâmetros de resistência do solo arenoso e compósitos solo-fibra de sisal, curauá e coco nos comprimentos de 25 e 50 mm e teor de 0,5% em relação à massa seca de solo.

Tabela 4.2 – Tensões cisalhantes para diferentes deslocamentos no ensaio de cisalhamento direto – Fibras vegetais com comprimento de 25 e 50 mm e teor de 0,5% de fibra.

Misturas	Deslocamento							
	D = 20 mm		D = 25 mm		D = 30 mm		D = 35 mm	
	ϕ^*	c^{**}	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	c
AS	34°	6	34°	6	34°	6	34°	6
SS_0,5_25	34°	15	34°	15	34°	15	35°	16
SS_0,5_50	37°	9	38°	10	38°	11	38°	12
CA_0,5_25	31°	15	31°	16	32°	16	35°	14
CA_0,5_50	34°	12	35°	13	35°	13	36°	14
CC_0,5_25	37°	12	37°	12	38°	11	40°	11
CC_0,5_50	36°	12	37°	13	38°	13	39°	14

* Parâmetro de resistência do solo = ângulo de atrito.

** Parâmetro de resistência do solo = intercepto coesivo.

A Tabela 4.3, a seguir, apresenta os valores dos parâmetros de resistência do solo arenoso e compósitos solo-fibra de sisal, curauá e coco nos comprimentos de 25 e 50 mm e teor de 0,5% em relação à massa seca de solo.

Tabela 4.3 – Tensões cisalhantes para diferentes deslocamentos no ensaio de cisalhamento direto – Fibras vegetais com comprimento de 25 e 50 mm e teor de 0,75% de fibra.

Misturas	Deslocamento							
	D = 20 mm		D = 25 mm		D = 30 mm		D = 35 mm	
	ϕ^*	C**	ϕ	C	ϕ	C	ϕ	C
SA	34°	6	34°	6	34°	6	34°	6
SS_0,75_25	36°	15	36°	16	37°	17	37°	18
SS_0,75_50	37°	12	38°	13	40°	13	41°	13
CA_0,75_25	34°	14	36°	14	37°	14	38°	15
CA_0,75_50	36°	12	37°	13	38°	15	38°	16
CC_0,75_25	38°	10	40°	10	41°	11	42°	11
CC_0,75_50	34°	15	36°	14	38°	13	40°	14

* Parâmetro de resistência do solo = ângulo de atrito.

** Parâmetro de resistência do solo = intercepto coesivo.

Em geral, os compósitos solo-fibra de sisal apresentaram um ganho dos parâmetros de resistência com o aumento do teor de fibra em todos os pontos de deslocamentos analisados. O maior acréscimo foi do ângulo de atrito, chegando a 20% em relação ao solo arenoso.

Para os compósitos solo-fibras de curauá, as misturas apresentaram resultados diferentes quando do aumento dos parâmetros de resistência com o acréscimo do teor de fibra. Neste ínterim, no deslocamento de 35 mm, os resultados foram positivos, aumentando o ângulo de atrito e intercepto coesivo com a inclusão de mais fibras no corpo de prova. Porém, para os demais deslocamentos (20, 25 e 30 mm), o acréscimo dos parâmetros de resistência, foi observado apenas para o ângulo de atrito, melhorando em até 24% em relação ao solo arenoso. O acréscimo de teor de fibra resultou em uma queda do intercepto coesivo, para pequenos deslocamentos, por efeito do alto teor de fibra, que impedia a união do grão de solo com a fibra, formando um aglomerado de fibras, acarretando em maiores vazios no corpo de prova.

Já nos compósitos solo-fibra de coco, a influência do acréscimo do teor da fibra (de 0,5% para 0,75% de fibra) para os pequenos deslocamentos (20 e 25 mm) manteve os parâmetros de resistência dos compósitos sem alteração. Porém, para os maiores

deslocamentos (30 e 35 mm), foi possível notar que as fibras começaram a trabalhar mais na resistência do compósito, aumentando os parâmetros de resistência, o ângulo de atrito e o intercepto coesivo em até 18% e 133%, respectivamente, em relação ao solo arenoso.

No deslocamento de 20 mm foi possível a obtenção de um total de 65% dos compósitos solo-fibra com resultados superiores, dos parâmetros de resistência, quando comparados ao solo arenoso, com o aumento do teor de fibra (de 0,5% para 0,75%). Já no deslocamento de 25 mm foi possível verificar um total de 75% dos compósitos solo-fibra com resultados superiores, dos parâmetros de resistência, quando comparados ao solo arenoso, com o aumento de fibra. Por fim, nos deslocamentos de 30 e 35 mm, os resultados foram semelhantes, com 91% dos compósitos solo-fibra com resultados superiores, dos parâmetros de resistência, quando comparados ao solo arenoso, com o aumento de fibra (de 0,5% para 0,75%).

Em geral, a adição do teor de fibra apresentou maior manifestação de trabalhabilidade com o grande aumento do intercepto coesivo, mantendo o ângulo de atrito com uma leve melhora. Tal fenômeno foi observado desde o processo de preparação dos corpos de prova, quando se mistura a fibra com o solo arenoso, uma vez que as fibras proporcionaram uma agregação com os grãos do solo, promovendo um efeito de ancoragem. A partir daí foi possível justificar o notório acréscimo do intercepto coesivo.

4.2.5 – INFLUÊNCIA DO TIPO DE FIBRA VEGETAL

A partir das análises realizadas nos itens anteriores, os compósitos solo-fibra com o maior comprimento (50 mm) e teor (0,75%) de fibra apresentaram, em geral, os melhores acréscimos nos parâmetros de resistência do solo. Neste íterim, a Figura 4.18, a seguir, evidencia as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal para o solo arenoso e compósitos de solo-fibra de sisal, curauá e coco, com comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra.

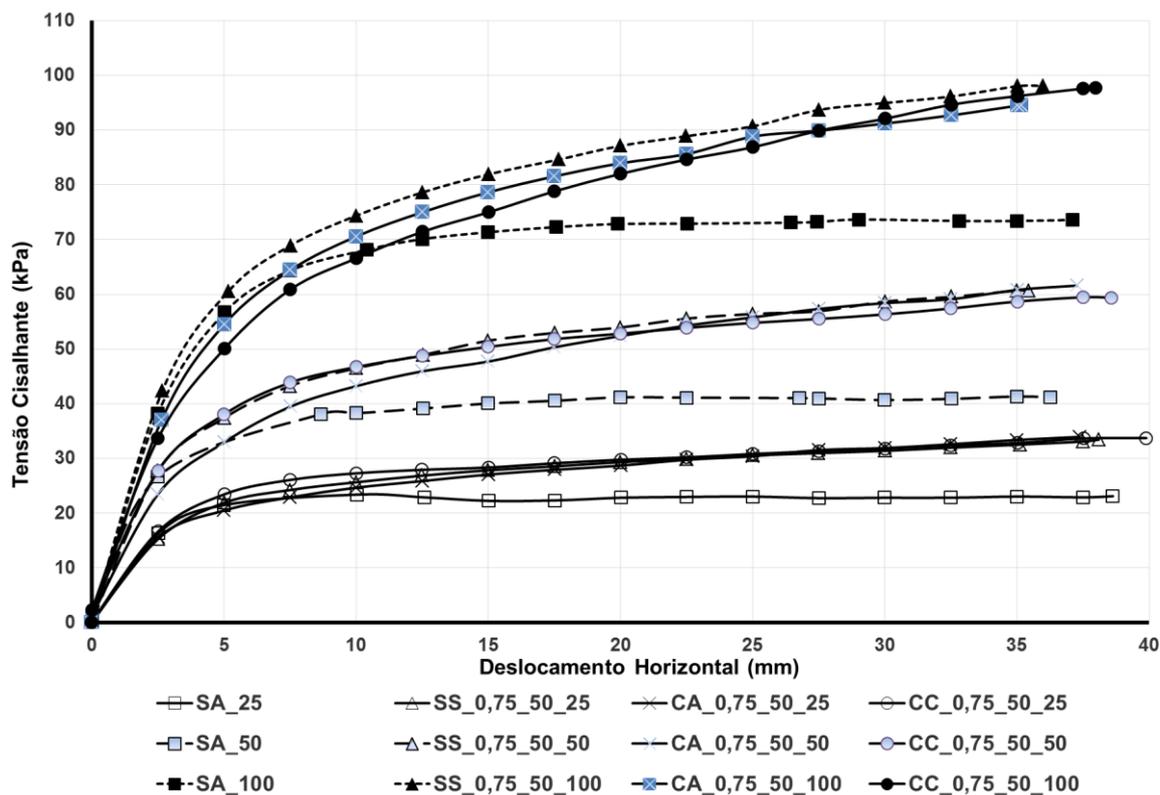


Figura 4.18 – Curva tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal para as fibras de sisal, curauá e coco com comprimentos de 50 mm e teor 0,750% de fibra.

A influência da inclusão de fibras vegetais dentro da massa de solo, como reforço, teve sua constatação quando o material foi submetido a esforços externos, sofrendo deslocamento. Assim, foi possível afirmar que o elemento de reforço (fibra) foi controlado pelos parâmetros de resistência do solo, que dependem do estado de tensão aplicado no material. As fibras vegetais de sisal, curauá e coco, no comprimento de 50 mm e teor de 0,75%, trabalharam de modo semelhante no corpo de prova, apresentando efeitos de ancoragem e atuando no ganho de resistência do material. O aumento dos parâmetros de resistência dos compósitos solo-fibra foi de até 20% no ângulo de atrito e até 166% do intercepto coesivo, quando comparados com a resistência do solo arenoso.

Com base na literatura e nos estudos realizados, considerando a morfologia da fibra de sisal, esta possui maior área total, sendo composta por um número maior de lumens. Suas paredes celulares são mais espessas quando comparadas com as fibras de curauá e coco. Neste ínterim, a fibra de curauá, analisando a morfologia da fibra, apresentou uma área total menor com poucas fibrocélulas, sendo suas paredes celulares maiores quando comparadas com as fibras de sisal e coco. Logo, a fibra de coco exibe na sua morfologia uma grande área total com maior quantidade de fibrocélulas, tendo como principal característica a grande

capacidade de deformação de suas paredes celulares – mais finas quando comparadas com as fibras de sisal e curauá. Assim, com o aumento do comprimento e teor de fibra, foi possível verificar a quantidade elevada de fibras trabalhando no efeito de ancoragem entre solo-fibra e preenchendo espaços vazios do interior do corpo de prova.

Para determinar qual o melhor tipo de fibra vegetal (sisal, curauá ou coco) para o reforço de um solo arenoso, além do estudo mecânico, fez-se importante a análise financeira e ambiental. Assim, com base em uma breve análise financeira do custo (valor unitário) de um quilo de fibra de sisal, tem-se que este é quase três vezes mais caro que a fibra de curauá, sendo a fibra de coco dez vezes mais caro – que além de ser a mais barata, detém o melhor comportamento mecânico dos compósitos analisados. Logo, ao avaliar o quesito ambiental, de modo isolado, foi possível perceber melhor viabilidade no emprego de fibras de coco para o reforço de solo, tendo em vista a melhor destinação para a casca do fruto do coco – resultado de grandes volumes de lixo em todo o Brasil inteiro, principalmente, no litoral.

Em geral, analisando os ensaios mecânicos e as características particulares de cada fibra vegetal, a fibra mais recomendada para emprego como reforço de um solo arenoso, visando o aprimoramento dos parâmetros de resistência do solo, é a CC_0,75_50 (solo arenoso reforçado com a fibra de coco no comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra).

4.2.6 – ESTUDO DO ALONGAMENTO E DA RUPTURA DAS FIBRAS VEGETAIS

A análise do alongamento e da ruptura das fibras vegetais é importante para um melhor entendimento do mecanismo quando da adição de fibras vegetais nos ensaios de cisalhamento direto com as misturas solo-fibra.

Após as análises dos ensaios de cisalhamento direto com as misturas solo-fibra, foram escolhidos os compósitos que apresentaram os melhores resultados quanto ao ganho de resistência mecânica. Tais misturas de solo-fibra tiveram como características o comprimento e teor dos três tipos de fibras, no caso, 50 mm e 0,75%, respectivamente. Os ensaios foram repetidos, para a máxima tensão normal aplicada (100 kPa) e, ao final, foram coletadas amostras na zona de cisalhamento para a análise do alongamento e da ruptura das fibras. A Figura 4.19, a seguir, apresenta os comprimentos medidos das fibras após a realização do ensaio.

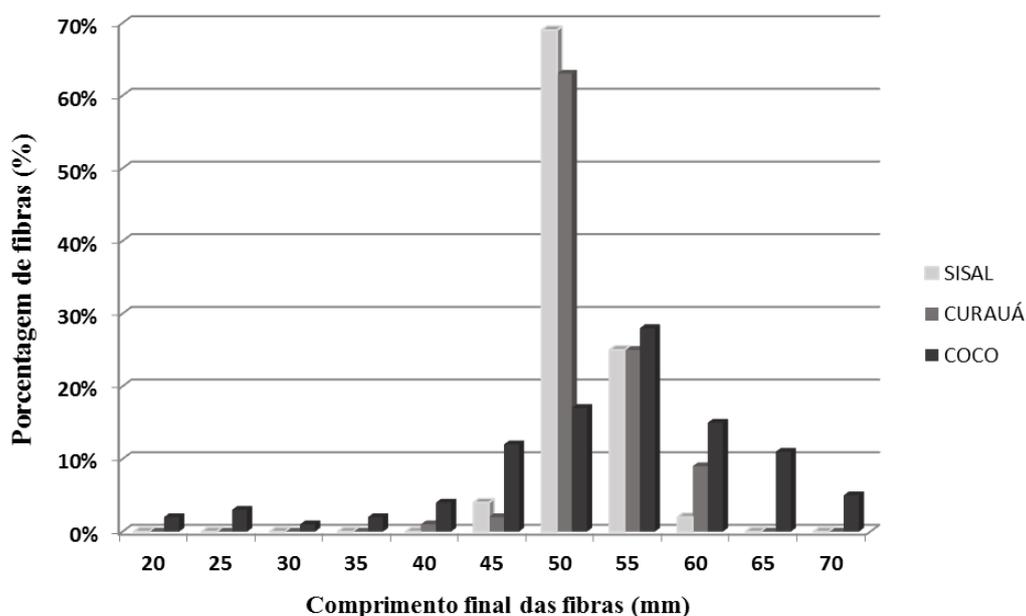


Figura 4.19 – Comprimento final das fibras *versus* porcentagem de fibras

Diante do exposto, os resultados evidenciaram uma ampla faixa de trabalhabilidade da fibra, sendo as fibras de coco aquelas que mais trabalharam no corpo de prova, variando de 20 a 70 mm; porém, nas misturas de solo-fibra de sisal e curauá variaram de 40 a 60 mm de comprimento após os ensaios de cisalhamento direto.

No comportamento das fibras de coco foi possível observar a existência de uma maior variedade e quantidade de fibras alongadas sem romper. Em contrapartida também foi possível verificar a presença de fibras quebradas, alcançando uma porcentagem total de aproximadamente 20% – comportamento que indica que as fibras trabalharam na resistência ao cisalhamento, esticando e rompendo-se devido ao alto valor de carregamento aplicado durante o ensaio.

Já para os compósitos solo-fibra de sisal e curauá não foram verificadas amostras nos comprimentos de 20 a 35 mm; porém, ambas apresentaram 25% de fibras com comprimento de 55 mm – desempenho que indica que as fibras atuaram nos ensaios de cisalhamento direto. Neste ínterim, a Tabela 4.4, a seguir, apresenta uma análise estatística do alongamento e da ruptura das fibras vegetais.

Tabela 4.4 – Análise estatística do alongamento e ruptura das fibras vegetais.

Fibra Vegetal	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de Variação (%)
Sisal	51,25	2,79	5,4
Curauá	51,95	3,62	7,0
Coco	52,7	10,62	20,2

As fibras de coco apresentaram nos resultados da análise estatística maior coeficiente de variação. Neste sentido, foi possível afirmar que tais fibras trabalharam de modo mais ativo no compósito solo-fibra.

E ainda, as fibras de coco apresentaram como características uma grande capacidade de deformação e módulo de elasticidade. Como características de morfologia, estas evidenciara, em geral, maior área total, grande numero de fibrocélulas e paredes celulares mais finas quando comparadas com as fibras de sisal e curauá, sendo as fibras de coco com menor diâmetro quando comparadas com as demais fibras vegetais, pois tais fibras, além de espessas, apresentaram grande rigidez.

4.2.7 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM BASE NA LITERATURA EXISTENTE

Dos estudos apresentados na revisão bibliográfica que pesquisaram sobre o reforço de solo com fibras vegetais, as pesquisas de Aguilar (2015) e Silveira (2018) são aquelas que mais se assemelham com a presente pesquisa, com informações que podem ser utilizadas para a comparação de resultados.

Aguilar (2015) avaliou a melhora do comportamento mecânico do compósito solo-fibra de coco fazendo uso de fibras nos comprimentos de 25 e 50 mm, variando os teores de fibra na proporção de 0.25, 0.50 e 0.75%, em relação ao peso seco do solo em ensaios triaxiais.

Silveira (2018) analisou a durabilidade de compósitos solo-fibra com sisal e curauá submetidos ao envelhecimento natural por exposição às condições naturais diversas (sol, chuva e outros), avaliando parâmetros de resistência através de ensaios triaxiais convencionais, com as fibras no comprimento de 25 mm e teor de 0,5% de fibra. Ambos os ensaios utilizaram o equipamento triaxial com tensões confinantes de 50, 100 e 150 kPa.

Antes de realizar as devidas comparações entre os resultados dos estudos supramencionados, faz-se importante destacar as semelhanças entre os mesmos e a presente pesquisa. Assim, as principais variáveis que influenciam nos resultados de uma pesquisa experimental sobre o reforço de solo são: 1) Tipo de resultado, parâmetros de resistência do solo e mistura; 2) Tipo de reforço, fibras vegetais nos comprimentos de 25 e 50mm e teor de 0,5 e 0,75% de fibra; e, 3) Tipo de solo utilizado. Neste ínterim, a Tabela 4.5, a seguir, apresenta o quadro comparativo dos parâmetros de resistência entre os trabalhos em questão.

Tabela 4.5 – Quadro comparativo dos parâmetros de resistência entre pesquisas.

Estudo	Parâmetros da Fibra			Parametros de Resistência do Solo	
	Tipo de fibra	Comprimento da fibra (mm)	Teor de fibra (%)	ϕ	c (kPa)
Silveira (2018)	-*	-*	-*	32,54	0
Nesta pesquisa (2019)	-*	-*	-*	34	6
Silveira (2018)	Sisal	25	0,5	40,56	0
Nesta pesquisa (2019)	Sisal	25	0,5	35	16
	Curauá	25	0,5	44,7	10
Nesta pesquisa (2019)	Curauá	25	0,5	35	14
Aguilar (2015)	Coco	50	0,75	40,8	26,5
Nesta pesquisa (2019)	Coco	50	0,75	40	14

* resultado de referência, solo arenoso.

Em suma, os resultados denotam que o ganho de resistência nos trabalhos supramencionados foram semelhantes aos resultados dos ângulos de atrito, variando muito pouco, uma vez que os valores de intercepto coesivo apontaram resultados bem distintos.

E ainda, os resultados também evidenciaram que as melhorias nos parâmetros de resistência são semelhantes, e que as diferenças nos resultados tem relação com o equipamento (tipo e tamanho) e as propriedades próprias de cada solo. Também foi possível notar que para as maiores tensões efetivas, o ganho de resistência é maior quando comparada com tensões mais baixas.

No trabalho de Aguilar (2015), por exemplo, os resultados mais expressivos foram do acréscimo do intercepto coesivo nos compósitos solo-fibra de coco, que ocorre devido ao ensaio ter sido executado em altas tensões de confinamento, dando efeito maior da interação solo-fibra.

De fato, os resultados aqui expressos permitem recomendar o uso das fibras de sisal, curauá e coco como material de reforço em uma matriz de solo arenosa, pois tem-se aí um material que agrega um incremento significativo na resistência mecânica de solos arenosos.

5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 – CONCLUSÕES

Diante do exposto, a seguir, têm-se as conclusões apresentadas, sendo algumas supramencionadas nas linhas que se seguiram.

Na presente pesquisa, a análise da inclusão de fibras vegetais de sisal, curauá e coco como reforço em uma matriz de solo arenoso conferiu acréscimo aos parâmetros de resistência do solo, originando um novo material geotécnico com características próprias.

Neste sentido tem-se que:

- O acréscimo de fibras vegetais de sisal, curauá e coco em uma matriz arenosa produziu o aumento dos parâmetros de resistência dos compósitos, quando comparados com o solo arenoso;
- Os compósitos que apresentaram o maior ganho de resistência com a adição das fibras vegetais foram SS_0,75_25 (compósito solo-fibra de sisal com o comprimento de 25 mm e teor de 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo), CA_0,75_50 (compósito solo-fibra de curauá com o comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo) e CC_0,75_50 (compósito solo-fibra de coco com o comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra em relação à massa seca de solo), melhorando os parâmetros de resistência em até 50% em relação aos parâmetros do solo arenoso;
- Quanto à influência do aumento do comprimento das fibras (de 25 mm para 50 mm) nos parâmetros de resistência dos compósitos, em geral, as fibras de maiores comprimentos (50 mm) tiveram o maior ganho de resistência, que se deve ao fato de que com o maior comprimento de fibra, a mistura será detentora de maior quantidade de grãos de solo interagindo com as fibras, com efeitos de ancoragens mais acentuados;
- Quanto à influência do aumento do teor de fibras (de 0,5% para 0,75%) nos parâmetros de resistência dos compósitos, as misturas com o maior teor de fibra (0,75%) tiveram os maiores ganhos de resistência; ou seja, a adição do teor de fibra apresentou maior manifestação de trabalhabilidade com o grande aumento do intercepto coesivo, mantendo o ângulo de atrito com uma leve melhora; e

- Das fibras vegetais estudadas, a mais recomendada para o emprego como reforço de um solo arenoso é a fibra de coco, no comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra – compósito que evidenciou parâmetros de resistência superiores devido ao fato desta apresentar diâmetros menores, resultando em maior quantidade de fibras na matriz, bem como em alongamento mais efetivo após o ensaio (cerca de 40% maiores do que o comprimento inicial).

Com base nas análises e nos resultados alcançados, foi possível afirmar que as fibras vegetais de sisal, curauá e coco apresentaram resultados satisfatórios quanto ao melhoramento dos parâmetros de resistência do solo, produzindo informações significativas no estudo da resistência mecânica de um solo arenoso reforçado com fibras vegetais. Assim, tais fibras são detentoras de grande potencial para serem utilizadas como reforço geotécnico de baixo custo e com aspectos ambientais relevantes, uma vez que representam um material em abundância no Brasil.

5.2 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

No desenvolvimento da presente pesquisa e durante a execução dos ensaios foram surgindo diferentes situações que exigiram certa mudança no programa experimental, com o objetivo de cumprir as metas e alcançar bons resultados. Assim, as ideias sugeridas no início do estudo tiveram que ser canceladas – motivo que permite a sugestão de temas para pesquisas futuras que ajudarão a continuar com a ampliação do conhecimento das mudanças nos parâmetros de resistência de um solo arenoso reforçado com fibras vegetais de sisal, curauá e coco.

Neste sentido, tem-se como sugestão a avaliação das seguintes características e suas respectivas influências nos parâmetros de resistência do solo:

- Analisar a influência da disposição do reforço, na forma aleatória e na forma de manta;
- Avaliar a influência da variação de fatores como, por exemplo, a densidade relativa do solo e compósitos e os teores e comprimentos de fibra;
- Estudar o efeito da degradação das fibras, bem como o uso de impermeabilizantes nestas; e
- Avaliar a influência da sucção nos compósitos de solo-fibra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1990). Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos - Método de ensaio. NBR ISO 12004. ABNT, Rio de Janeiro, 6p.

ABNT (1991). Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos - Método de ensaio. NBR ISO 12051. Rio de Janeiro, 15p.

ABNT (1995). Solo - Rochas e solos. NBR ISO 6502. Rio de Janeiro, 18p.

ABNT (2016). Solo - Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. NBR ISSO 6458. Rio de Janeiro, 10p.

ABNT (2016). Solo - Análise granulométrica de solos. NBR ISSO 7181. Rio de Janeiro, 7p.

AGUILAR, J.R.T. (2015). Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Reforçado com Fibras de Coco. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro. Brasil. 114p.

ANTE, J.R.O. (2016). Desempenho de misturas asfálticas reforçadas com geossintéticos. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Brasília. Brasil. 175p.

ASTM (2011). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Philadelphia. American Society for Testing and Materials D3080, 9p.

AZZINI, A., TOMAZ, R.M.A.G., ERISMANN, N.M., COSTA, A.A.C., BENATTI JUNIOR, R. (1998). Caracterização tecnológica de híbridos de agave. *Bragantia*. Vol. 57, n.1

BERNARDINA, F.P.D. (2019). Influência da Degradação de Fibras no Comportamento Mecânico de Solos Reforçados. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro. Brasil. 126p.

BOLAÑOS, R.E.Z. (2013). Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Reforçado com Fibras de Coco. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro. Brasil. 143p.

CANEVAROLO, S.V. (2006). *Ciência dos Polímeros*. Artliber Editora Ltda.

CASAGRANDE, M.D.T. (2001). Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Brasil. 95p.

CASAGRANDE, M.D.T. (2005). Comportamento de solos reforçados com fibras submetidas a grandes deformações. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Brasil. 219p.

CHRUSCIAK, M.R. (2013). Análise da melhoria de solos utilizando fragmentos de borracha. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília. Brasil. 91p.

CORDEIRO, I.C., SANTANA, A.C., LAMEIRA, O.A. & DA SILVA, I.M. (2009). Análise econômica dos sistemas de cultivo com *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby (Paricá) e *Ananas comosus* var. *erectifolius* (L. B. Smith) Coppus & Leal (Curauá) no município de Aurora do Pará, Brasil. *Revista de la facultad de Agronomia Universidad del Zulia*, 26: 243-265p.

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

DEFOIRDT, N., BISWAS, S., VRIESE, L., TRAN, L.Q.N., ACKER, J.V., AHSAN, Q., GORBATIKH, L., VUURE, A.V. & VERPOEST, I. (2010). Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, Elsevier, v. 41, n. 5, 588–595p.

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

DUARTE, D. (2009). Fibras naturais e sua aplicação na arquitetura. São Paulo-USP

FATANI, M.N., BAUER, G.E. & AL-JOULANI, N. (1991). Reinforcing soil with aligned and randomly oriented metallic. *Geotechnical Testing Journal*. Philadelphia. v.14, n.1, 78-87p.

FEUERHARMEL, M.R. (2000). Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Brasil. 131p.

FIDELIS, M.E.A., PEREIRA, T.V.C., GOMES, O.F.M., SILVA, F.A.S. & TOLEDO FILHO, R.D. (2013). The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology*. Elsevier. v. 2, n. 2. 149–157p.

FIDELIS, M.E.A. (2014). Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE. Rio de Janeiro. Brasil. 266p.

FONSECA, E.C.A. (2017). Estudo experimental do comportamento de aterros estacados reforçados com geossintéticos. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Brasília. Brasil. 147p.

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

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

GONGORA, I.A.M.G. (2014). Estradas não pavimentadas reforçadas com geossintéticos: Influência de propriedades físicas e mecânicas do reforço. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Brasília. Brasil. 96p.

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

GRAY, D.H. & AL-REFEAI, T. (1986). Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*. New York. v.112, n.8, 804-820p.

GRAY, D.H. & MAHER, M.H. (1989). Admixture stabilization of sands with random fibers. *International conference on soil mechanics and foundation engineering*. Rio de Janeiro, Brasil. v.2, 1363-1366p.

GOVERNO DO ESTADO DO AMAZONAS (2010). Indústria do coco cresce, mas alto desperdício gera desafio tecnológico. Disponível em <<http://www.amazonas.am.gov.br/2010/04/planta-amaznica-pode-substituir-a-fibra-de-vidro/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

IZQUIERDO, I.S. (2011). Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural. Dissertação de Mestrado. Curso de Engenharia de Estruturas. Departamento de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. SP, 121p.

KUMAR, H.B.T. & SANJAY, S.J. (2018). Study on effect of different sizes of footings resting on treated coir mat and coir fibre reinforced sand. *International Journal of Science Technology & Engineering – IJSTE*. v. 4, n. 11, 12-17p.

LAMBE, T.W. (1951). *Soil testing for Engineers*. Technology & Engineering. 165p.

LEOCÁRDIO, G. (2005). Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Brasil. 84p.

LEVY NETO, F. & PARDINI, L.C. (2006). *Compósitos Estruturais Ciências e Tecnologia*. Editora Edgard Blucher. Brasil. 336p.

LIMA, P.R.L. (2004). Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. Rio de Janeiro. Brasil. 263p.

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

- MAHER, M. & HO, Y. (1994). Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. *Journal of Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers. v. 120, n. 8, 1381–1393p.
- MARTINS, C.C. (2000). Análise e reavaliação de estruturas em solos reforçados com geotêxteis. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Área de Concentração Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Ouro Preto. Brasil. 207p.
- MARTINS, A. (2014). Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. Rio de Janeiro. Brasil. 267p.
- MATHEUS, E. (2002). Efeitos do envelhecimento acelerado e do dano mecânico induzido no desempenho e durabilidade de alguns geossintéticos. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Brasília. Brasil. 284p.
- MCGOWN, A., ANDRAWES, K.Z. & AL-HASANI, M.M. (1978). Effect of inclusion properties on the behavior of sand. *Géotechnique*, London, 28 (3): 327- 346p.
- MELO FILHO, J.A. (2012). Durabilidade Química e Térmica e Comportamento Mecânico de Compósitos de Alto Desempenho Reforçados com Fibras de Sisal. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. Rio de Janeiro. Brasil. 161p.
- MENDES, M.J.A. (2006). Comportamento carga-alongamento de geotêxteis não tecidos submetidos à tração confinada. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Brasília. Brasil. 152p.
- MORRISSEY, F.E. & COUTTS, R.S.P. (1985). Bond between cellulose fibres and cement. *The International Journal of Composites and Lightweight Concrete*, London, v.7, n.2, May, 73-80p.
- NETO, F.L. & PARDINI, L.C. (2006). Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. Ed. Edgard Blucher. São Paulo. Brasil. 98-100p.
- NUCÉ DE LAMOTHE, M. (1983). Melhoramento do Coqueiro. Montpellier: IRHO, Relatório da Missão Realizada nas plantações de Embrapa.
- OLIVEIRA, A.F.D. (2010). Avaliação de desempenho de fibras lignocelulósicas na sorção de óleos diesel e biodiesel. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp. Botucatu. Brasil. 98p.
- PALACIOS, M.A.P. (2014). Análise do comportamento de uma areia reforçada com fibras de polipropileno submetida a ensaios triaxiais de extensão. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Goiânia, Brasil, 8p.
- PALMEIRA, E.M. (1987). The study of soil-reinforcement interaction by means of large scale laboratory tests. Thesis. University of Oxford. 237p.

- PALMEIRA, E.M. (1998). Equipamento Para Ensaio de Tração Confinada de Geotêxteis em Solos – Versão 2. Relatório de Pesquisa. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília
- PALMEIRA, E.M. (2018). Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente. Oficina de textos. São Paulo.
- PEREIRA, T.V.C., FIDELIS, M.E.A., GOMES, O.F.M., SILVA, F.A. & TOLEDO FILHO, R.D. (2012). Investigação da influência morfológica via análise de imagens da resistência à tração de fibras naturais. 67th ABM international congresso. Rio de Janeiro. Brasil. 4172-4184p.
- PERISSOTTO, D. (2005). Estudo Comparativo das Propriedades Químicas de Polpas Kraft Convencionais e MCC de Eucalipto. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. Brasil. 108p.
- PINTO, A.R.A.G. (2007). Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro. Brasil. 103p.
- PICANÇO, M.D.S. (2005). Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá. Dissertação de Mestrado. Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Brasil. 101p.
- PIRES, J.S.C. (2009). Fibras naturais: Características químicas e potenciais aplicações. Trabalho de conclusão de curso. Ciências Biológicas. Campus Botucatu. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu. Brasil. 60p.
- PONGPRAYOON, T., YANUMET, N. & SANGTHONG, S. (2008). Surface behavior and film formation analysis of sisal fiber coated by poly (methyl methacrylate) ultrathin film. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 320, 130–137p.
- RAVEN, P.H., EVERT, R.F. & EICHCHORN, S.E. (2001). *Biologia Vegetal*. 6ª. ed. Guanabara Koogan. Rio de Janeiro.
- RODRIGUES, B.S. (2016). Fabricação e caracterização de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de curauá tratadas com hidróxido de potássio (KOH). Monografia de graduação em Engenharia Automotiva. Universidade de Brasília. Brasília. Brasil. 63p.
- SALAZAR, V.L.P. (2005). Estudo da Biodegradação das Fibras de Coco e de Sisal Visando às Aplicações na Indústria Automotiva. Tese de Doutorado em Agronomia (Energia na Agricultura). Botucatu. São Paulo. Brasil. 106p.
- SALES, A.T.C. (2006). Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro. Brasil. 273p.
- SÁNCHEZ, N.P. (2018). Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Brasília. Brasil. 168p.

SANTIAGO, G.A. (2011). Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Brasil. 130p.

SAVASTANO JUNIOR, H. & AGOPYAN, V. (1998). Fibras naturais para produção de componentes construtivos. Curso Internacional Materiales Compuestos Fibro reforzados, Universidad Del Valle/Cyted Proyecto, Cali, Colombia.

SAVASTANO JUNIOR, H. (2000). Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. Brasil. 152p.

SHEWBRIDGE, E. & SITAR, N. (1989). Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear. *Journal of Geotechnical Engineering*. New York. v.115, n.8, 1134-1147p.

SILVA, A.C. (2007). Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose. Tese de Doutorado. Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo. São Paulo. Brasil. 145p.

SILVA, I.I.S.A., LAGO, L.B., SOARES, J.P. & SOUZA, P.S.L. (2008). Avaliação do uso de fibra de coco em compósitos cimentícios. Congresso brasileiro do concreto. Salvador. IBRACON, 17p.

SILVA, F. (2009). Durabilidade e Propriedades Mecânicas de Compósitos Cimentícios Reforçados por Fibras de Sisal. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. Rio de Janeiro. Brasil. 243p.

SILVA, F.A., CHAWLA, N. & TOLEDO FILHO, R.D. (2010). Mechanical behavior of natural sisal fibers. *J Biobased Mater Bioenergy* 4:106–13

SILVEIRA, M.V. (2018). Análise do Comportamento Mecânico e da Durabilidade em Compósitos de Areia Reforçada com Fibras Naturais de Curauá e Sisal. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro. Brasil. 148p.

SINDCOCO (2017). Indústria do coco cresce, mas alto desperdício gera desafio tecnológico. Disponível em <<https://economia.uol.com.br/noticias/bbc/2014/02/17/industria-do-coco-cresce-mas-alto-desperdicio-gera-desafio-tecnologico.htm>>. Acesso em: 18 mar. 2018.

SOTOMAYOR, J.M.G. (2014). Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibras de coco submetidos a ensaios de placa em verdadeira grandeza. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro. Brasil. 132p.

SOUZA, M.V.R. (2011). Relatório cisalhamento Direto, concepção e dimensionamento da prensa de cisalhamento de grande escala do PPG-UNB. Relatório, Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 29 p.

STAUFFER, S., HOLTZ, R. (1995). Stress-strain and strength behavior of staple fiber and continuous filament-reinforced sand. *Transportation research record*, n. 1474.

TAYLOR, G.D. (1994). *Materials in construction*. Longman Scientific & Technical.

TEODORO, J., BUENO, B. (1998). Estudo do comportamento dos solos reforçados com fibras plásticas de polipropileno. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. v. 11, p. 1093–1100.

TEODORO, J. M. (1999). Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas. *Dissertação (Mestrado) — Escola de São Carlos/ USP, São Paulo*.

THOMAS, S. (2011). Natural fibres: structure, properties and applications. In: *Cellulose fibers: bio-and nano-polymer composites*. 3–42p.

TOLÊDO FILHO, R.D. (1997). *Materiais Compósitos Reforçados com Fibras Naturais: Caracterização Experimental*. Tese de Doutorado. Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Brasil. 483p.

TOMCZAK, F., SATYANARAYANA, K.G. & SYDENSTRICKER, T.H.D. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of brazil: Part iii—morphology and properties of Brazilian curauá fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Elsevier. v. 38, n. 10, 2227–2236p.

TOMCZAK, F. (2010). Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE da Universidade Federal do Paraná. Curitiba. Brasil. 150 p.

VENDRUSCOLO, M. (2003). Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Porto Alegre. Brasil. 243p.

WEI, J., KONG, F., LIU, J., CHEN, Z., KANUNGO, D. P., LAN, X., JIANG, C. & SHI, X. (2018). Effect of Sisal Fiber and Polyurethane Admixture on the Strength and Mechanical Behavior of Sand. *Polymers*, v. 10, 1-15p.

YOUNG, R.A. (1994). Fibers (Vegetable). In: *Kirk-Otthmer encyclopedia of chemical Technology*. Hoboken: J. Wiley & Sons. 4. Ed. V. 10, 727- 744p.

APÊNDICES

**A – APRESENTAÇÃO DE TODAS AS CURVAS DE
DESLOCAMENTO VERTICAL VERSUS DESLOCAMENTO
HORIZONTAL DOS ENSAIOS DE SOLO ARENOSO COM E
SEM FIBRAS VEGETAIS, CONSTATADOS NOS ENSAIOS DE
CISALHAMENTO DIRETO**

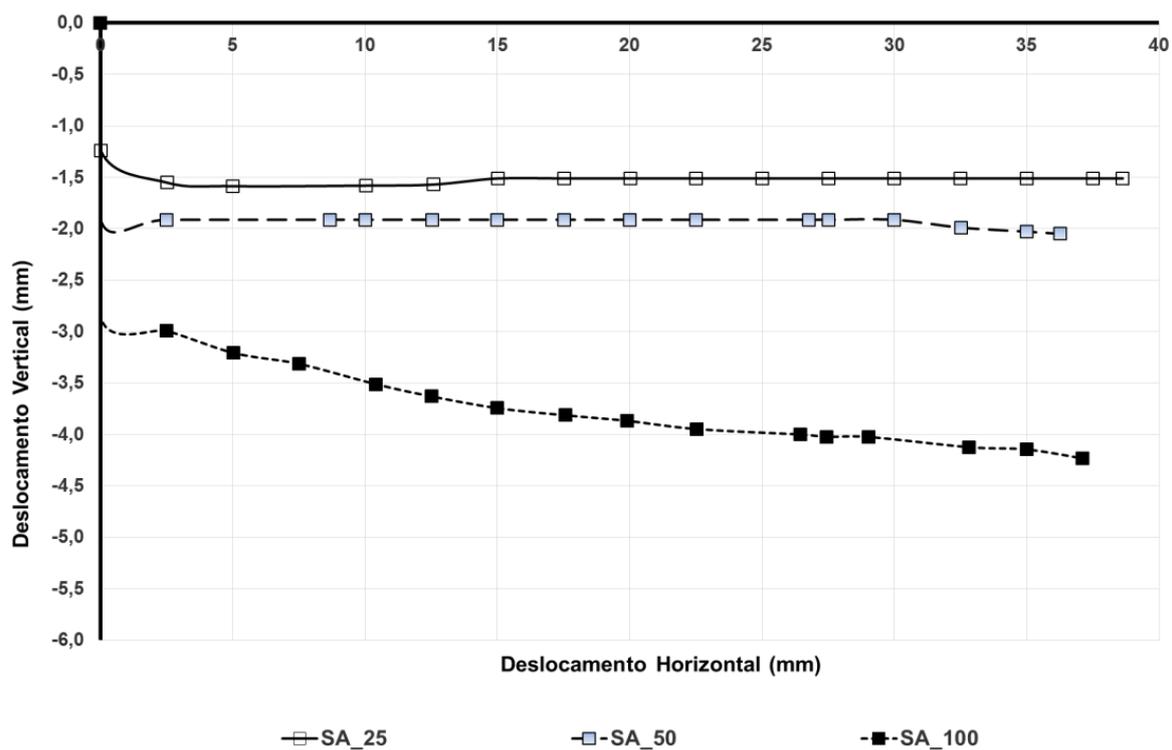


Figura A.1 – Curva deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para solo arenoso.

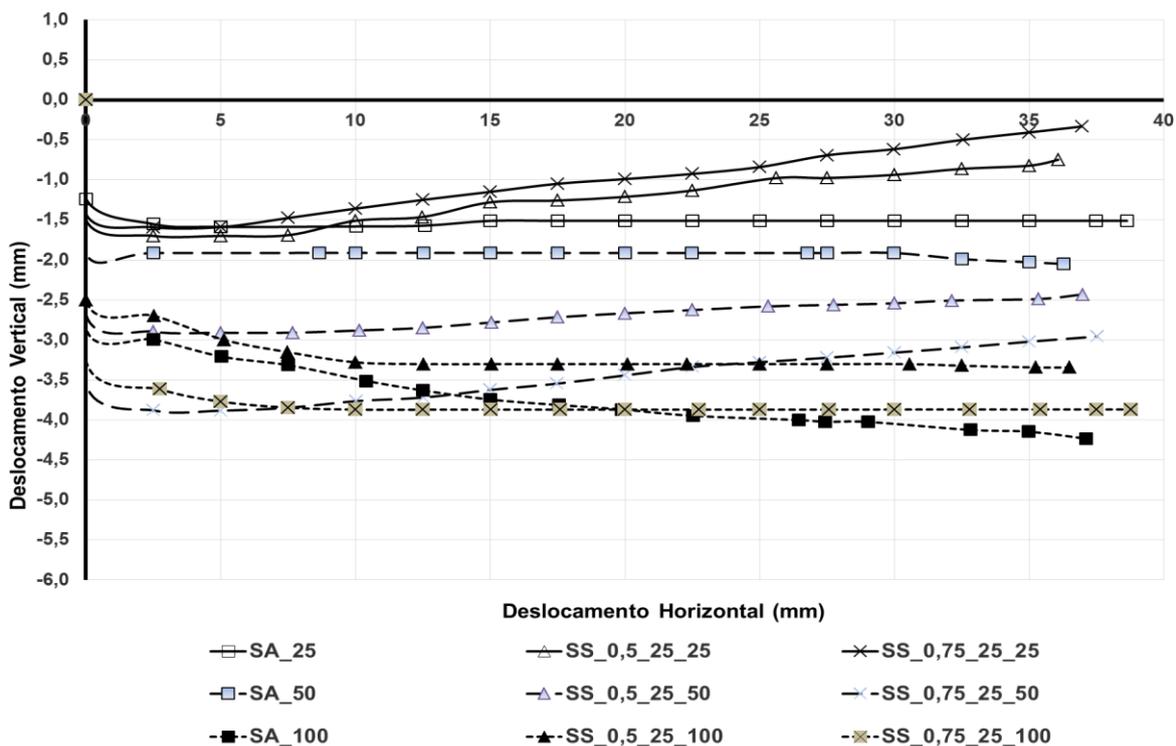


Figura A.2 – Curva deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para fibra de sisal com comprimento de 25 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

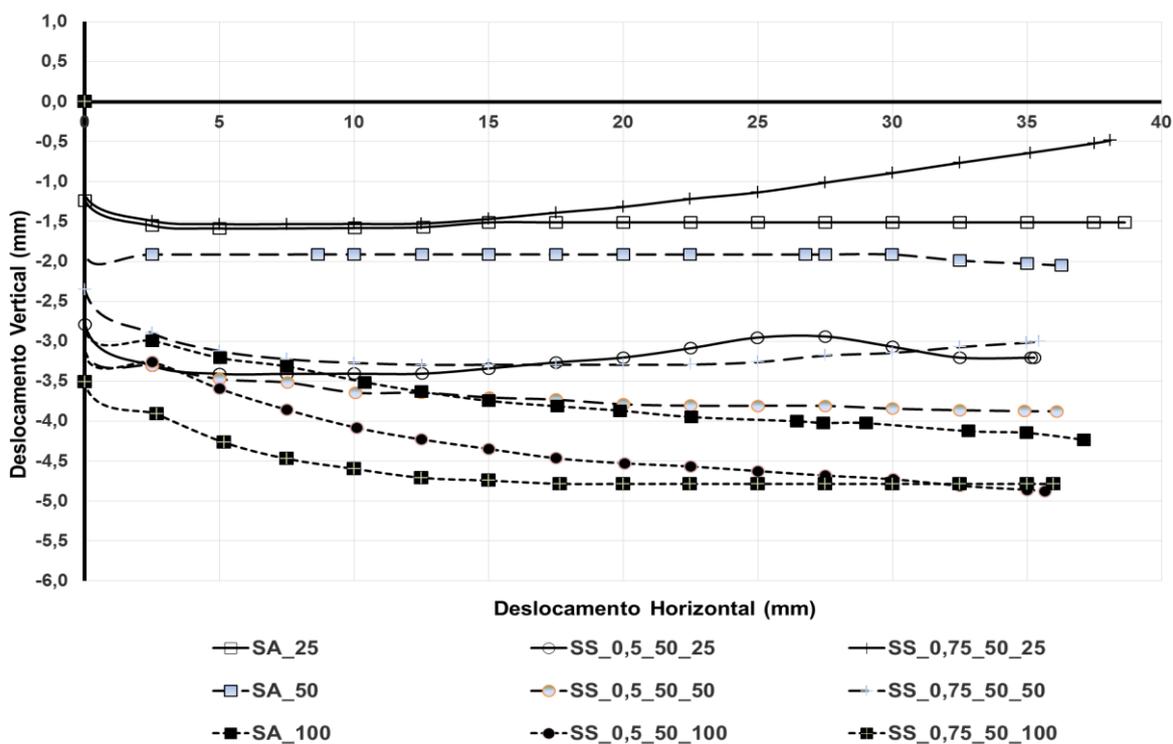


Figura A.3 – Curva deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para fibra de sisal com comprimento de 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

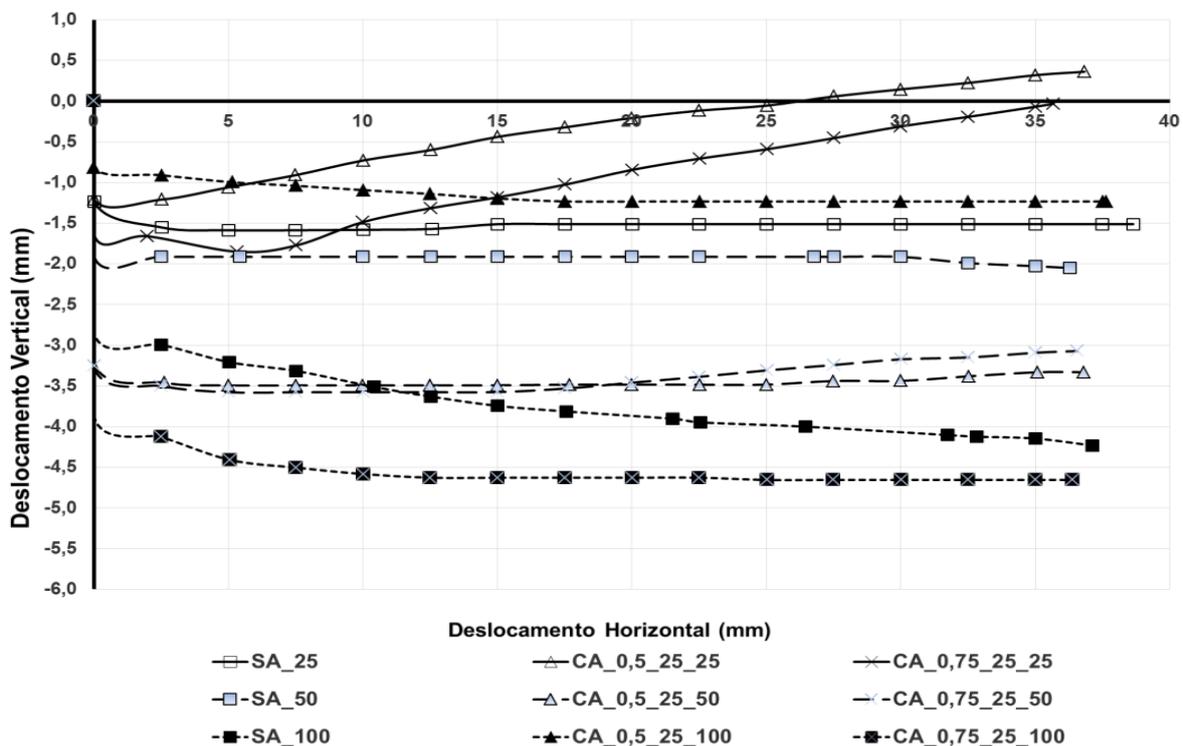


Figura A.4 – Curva deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para fibra de curauá com comprimento de 25 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

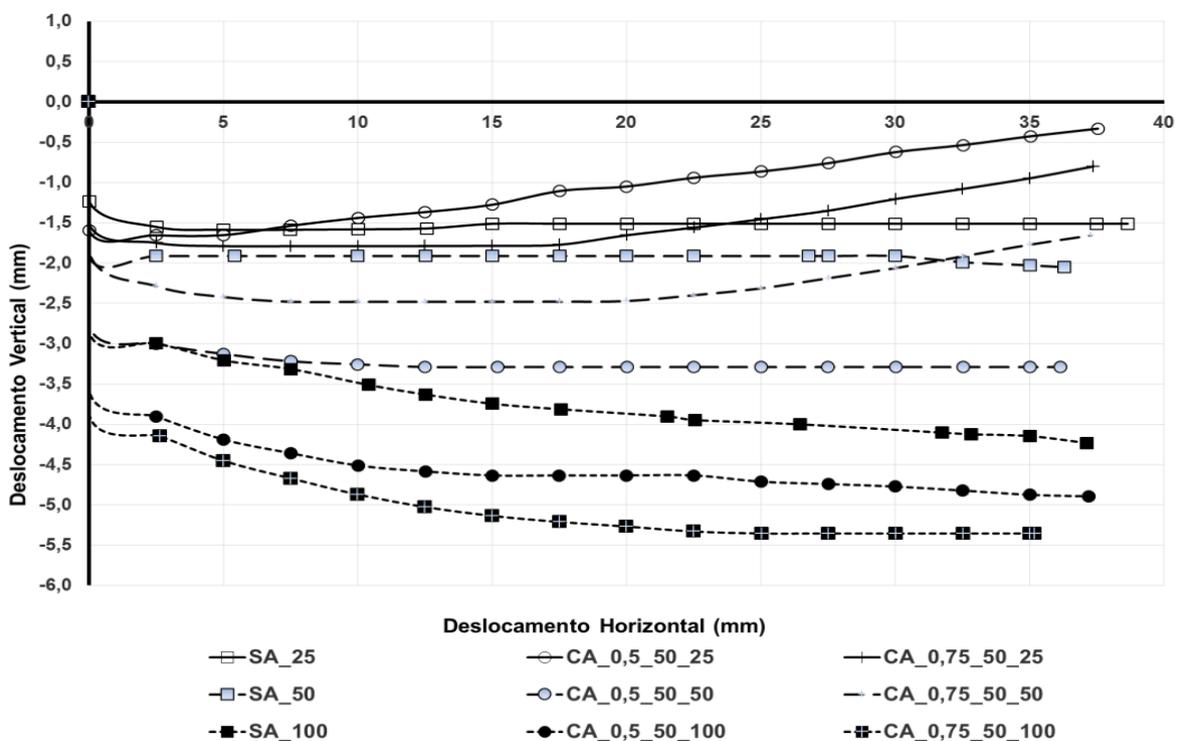


Figura A.5 – Curva deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para fibra de curauá com comprimento de 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

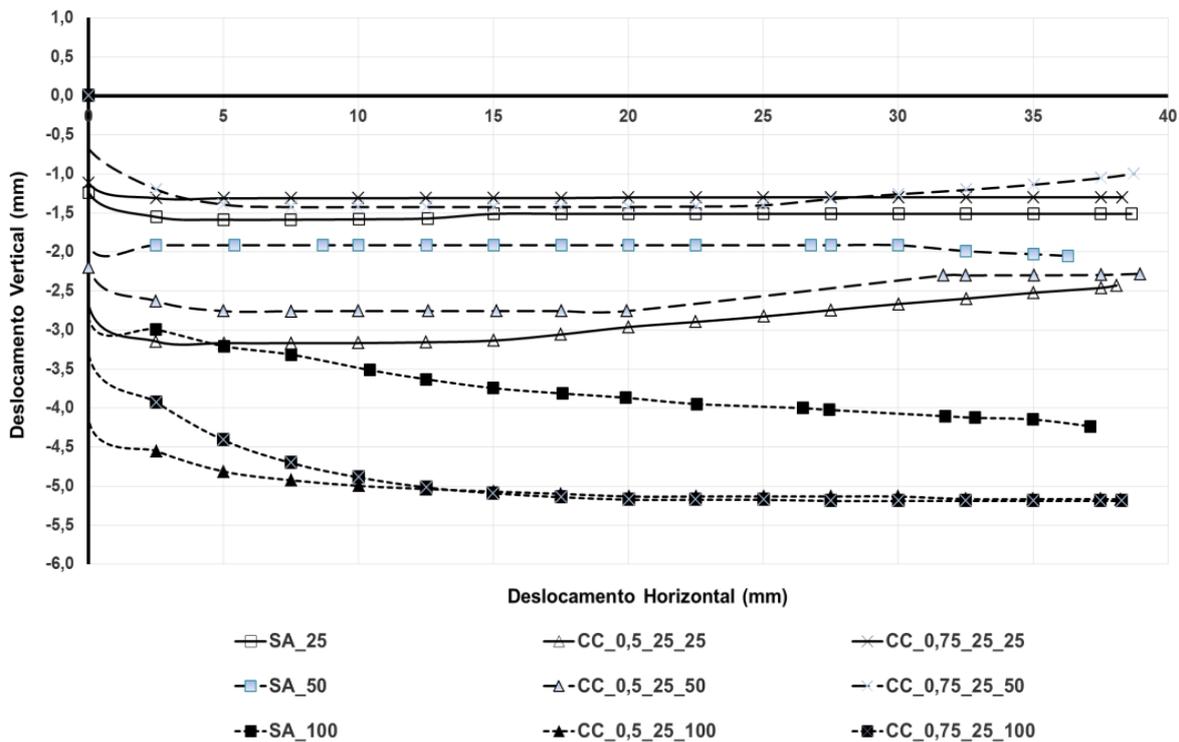


Figura A.6 - Curva deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para fibra de coco com comprimento de 25 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

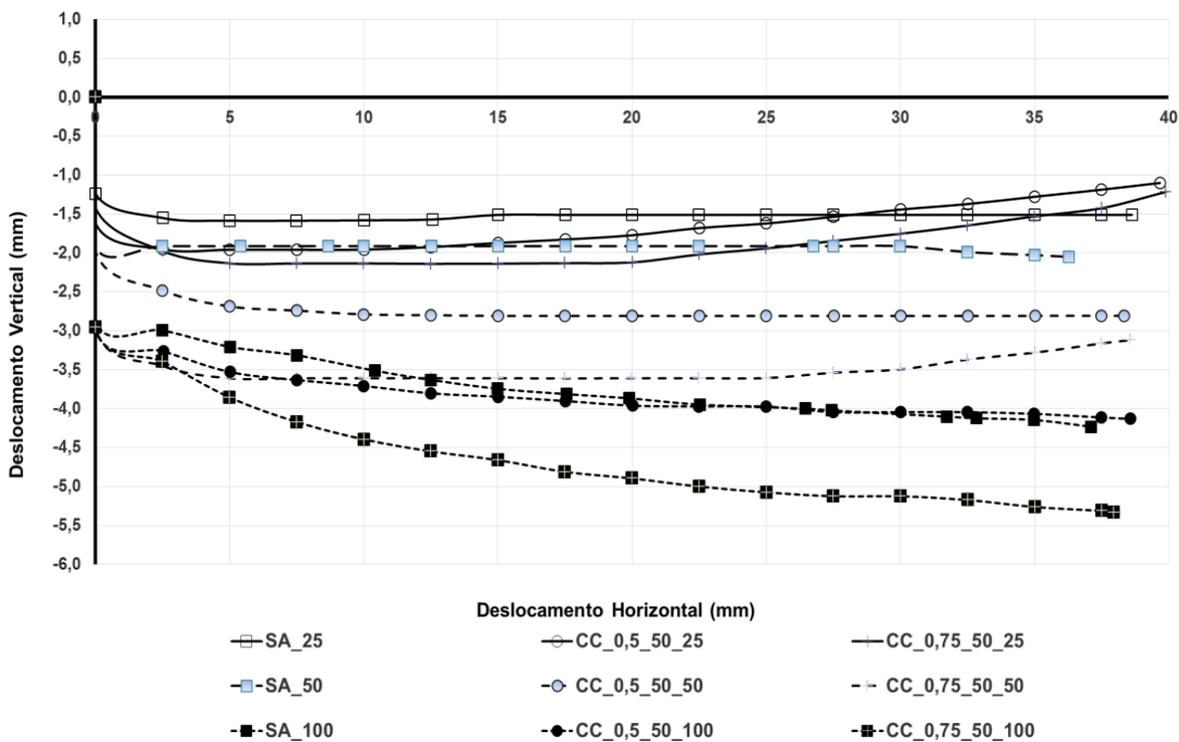


Figura A.7 – Curva deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para fibra de coco com comprimento de 50 mm e teores de 0,5 e 0,75% de fibra.

B – DESCRIÇÃO DE TODOS OS VALORES NUMÉRICOS DE TENSÃO CISALHANTE, NOS DESLOCAMENTOS DE 20, 25, 30 E 35 MM, DO SOLO ARENOSO E COMPÓSITOS SOLO-FIBRA, DURANTE O ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Tabela B.1 – Descrição de todos os valores numéricos de tensão cisalhante, nos deslocamentos de 20, 25, 30 e 35 mm, do solo arenoso e compósitos solo-fibra, durante o ensaio de cisalhamento direto (continua).

		Tensão Cisalhante nos Deslocamentos*							
		20 mm	$\Delta \tau$	25 mm	$\Delta \tau$	30 mm	$\Delta \tau$	35 mm	$\Delta \tau$
Tensão Normal Aplicada de 25 kPa	SA_25	22,82	0,00%	22,82	0,00%	23,04	0,00%	23,04	0,00%
	SS_0,5_25	29,84	30,76%	30,48	33,57%	31,26	35,68%	31,62	37,24%
	SS_0,5_50	29,91	31,07%	30,97	35,71%	32,04	39,06%	33,03	43,36%
	CA_0,5_25	29,98	31,38%	30,97	35,71%	31,26	35,68%	31,26	35,68%
	CA_0,5_50	30,62	34,18%	31,40	37,60%	31,68	37,50%	32,53	41,19%
	CC_0,5_25	29,06	27,34%	29,56	29,54%	29,56	28,30%	29,98	30,12%
	CC_0,5_50	29,91	31,07%	31,26	36,99%	31,90	38,45%	32,67	41,80%
	SS_0,75_25	31,47	37,91%	32,82	43,82%	33,60	45,83%	34,59	50,13%
	SS_0,75_50	29,34	28,57%	30,55	33,87%	31,40	36,28%	32,53	41,19%
	CA_0,75_25	30,48	33,57%	31,82	39,44%	32,67	41,80%	33,81	46,74%
	CA_0,75_50	28,71	25,81%	30,41	33,26%	31,90	38,45%	33,38	44,88%
	CC_0,75_25	29,41	28,88%	30,97	35,71%	31,75	37,80%	33,10	43,66%
CC_0,75_50	29,77	30,46%	30,83	35,10%	31,82	38,11%	32,82	42,45%	
Tensão Normal Aplicada de 50 kPa	SA_50	41,04	0,00%	41,18	0,00%	41,18	0,00%	41,32	0,00%
	SS_0,5_25	50,46	22,95%	51,53	25,13%	52,31	27,03%	53,44	29,33%
	SS_0,5_50	45,29	10,36%	47,28	14,81%	49,12	19,28%	50,68	22,65%
	CA_0,5_25	46,50	13,30%	48,69	18,24%	49,47	20,13%	50,46	22,12%
	CA_0,5_50	45,01	9,67%	47,35	14,98%	48,83	18,58%	49,90	20,76%
	CC_0,5_25	52,09	26,92%	53,09	28,92%	54,51	32,37%	55,36	33,98%
	CC_0,5_50	50,32	22,61%	53,02	28,75%	54,65	32,71%	56,84	37,56%
	SS_0,75_25	54,86	33,67%	56,21	36,50%	57,62	39,92%	59,11	43,05%
	SS_0,75_50	53,94	31,43%	56,42	37,01%	58,69	42,52%	60,67	46,83%
	CA_0,75_25	50,11	22,10%	51,39	24,79%	52,80	28,22%	54,36	31,56%
	CA_0,75_50	52,38	27,63%	55,78	35,45%	58,40	41,82%	60,81	47,17%
	CC_0,75_25	52,10	26,95%	53,02	28,75%	56,84	38,03%	58,90	42,55%
CC_0,75_50	52,80	28,65%	54,79	33,05%	56,35	36,84%	58,69	42,04%	

Tabela B.1 – Descrição de todos os valores numéricos de tensão cisalhante, nos deslocamentos de 20, 25, 30 e 35 mm, do solo arenoso e compósitos solo-fibra, durante o ensaio de cisalhamento direto (conclusão).

		Tensão Cisalhante nos Deslocamentos*							
		20 mm	$\Delta \tau$	25 mm	$\Delta \tau$	30 mm	$\Delta \tau$	35 mm	$\Delta \tau$
Tensão Normal Aplicada de 100 kPa	SA_100	72,92	0,00%	73,11	0,00%	73,42	0,00%	73,61	0,00%
	SS_0,5_25	79,81	9,45%	81,50	11,48%	83,50	13,73%	84,44	14,71%
	SS_0,5_50	85,76	17,61%	88,27	20,74%	89,90	22,45%	91,96	24,93%
	CA_0,5_25	75,38	3,37%	77,19	5,58%	78,51	6,93%	80,14	8,87%
	CA_0,5_50	81,32	11,52%	83,38	14,05%	84,76	15,45%	86,70	17,78%
	CC_0,5_25	85,76	17,61%	87,70	19,96%	90,21	22,87%	92,84	26,12%
	CC_0,5_50	84,56	15,96%	87,70	19,96%	91,84	25,09%	93,72	27,32%
	SS_0,75_25	87,01	19,32%	88,45	20,98%	90,58	23,37%	91,45	24,24%
	SS_0,75_50	87,14	19,50%	90,71	24,07%	94,97	29,35%	98,04	33,19%
	CA_0,75_25	82,27	12,82%	86,59	18,44%	89,53	21,94%	91,91	24,86%
	CA_0,75_50	83,96	15,14%	88,84	21,52%	91,22	24,24%	94,48	28,35%
	CC_0,75_25	89,39	22,59%	93,71	28,18%	97,72	33,10%	101,35	37,69%
	CC_0,75_50	82,01	12,47%	86,90	18,86%	92,10	25,44%	96,23	30,73%

* Tensão Cisalhante em kPa.