



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANTONIO FELIPE DE SOUZA MACHADO REIS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO
REFORÇADO COM FIBRA DE COCO**

Salvador

2022

ANTONIO FELIPE DE SOUZA MACHADO REIS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO
REFORÇADO COM FIBRA DE COCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em engenharia civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Orientadora: Prof^a Dr^a Miriam de F. Carvalho

Agência Financiadora: CAPES

Salvador

2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**Divisão de Informação e Documentação**

Reis, Antonio Felipe de Souza Machado
Análise do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibra de coco / Antonio Felipe de Souza Machado Reis.
Salvador, 2022.
111f.

Dissertação de Mestrado – Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Área de Geotecnia – Universidade Federal da Bahia, 2022. Orientadora: Prof^ª Dr^ª Miriam de F. Carvalho.

1. Reforço de Solos. 2. Fibras de Coco. 3. Ensaio triaxial. I. Universidade Federal da Bahia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

REIS, Antonio Felipe de Souza Machado. **Análise do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibra de coco**. 2022. 111f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Bahia, Salvador.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Antonio Felipe de Souza Machado Reis

TÍTULO DO TRABALHO: Análise do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibra de coco.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2022

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

Antonio Felipe de Souza Machado Reis
Rua Saturnino Segura, 85
41.820-320 – Salvador – BA

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família por todo apoio e motivação.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelas oportunidades e por nunca me desamparar.

Agradeço a toda minha família pelo suporte. Em especial aos meus pais Sandra e Antônio e minha irmã Nina por todo amor, carinho, apoio e incentivo ao longo da minha trajetória. Aos meus queridos padrinhos Januzia e Carlos e meu primo Henrique pelo carinho, suporte e acolhimento ao longo dos últimos anos.

À Ana Luísa pelo companherismo, apoio e compreensão durante o mestrado.

Aos amigos e colegas de profissão Flávio e Vitor pela amizade e incentivo.

À minha Orientadora Professora Miriam Carvalho pela paciência, pelos conselhos, apoio e dedicação a esta pesquisa.

Ao Professor Sandro Machado pelos ensinamentos na realização da pesquisa.

Ao Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA, por tornar possível esta pesquisa. Em especial aos amigos Jeová e Ricardo pelo apoio, aprendizado e convivência.

Às colegas de pesquisa e grandes amigas Michelle e Thaís pela amizade, ensinamentos, companherismo e momentos de alegria durante todo o mestrado.

Aos amigos do GEOAMB Murilo, Camilla, Bruno, Érdeson e Leandro pela amizade, ensinamentos e convivência.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

EPÍGRAFE

Nenhum saber é saber completo.

— Galileu Galilei

RESUMO

O presente trabalho visa avaliar a aplicação de um material fibroso de coco como reforço de um solo areno siltoso recorrente na Região Metropolitana de Salvador. As fibras utilizadas não possuem comprimento pré definido, sendo realizada uma análise gravimétrica para identificação de intervalos mais comuns de comprimentos do reforço. O programa experimental consistiu na inserção do material fibroso, nas concentrações de 0; 0,5; 1,0 e 1,5% em relação ao peso seco de solo. Foram realizados ensaios de compactação, Índice de Suporte Califórnia e Triaxiais do tipo CD em três tensões confinantes (50, 100 e 200 kPa), sendo identificado o teor que promoveu maiores ganhos na tensão desviadora do compósito (1,0%). Após a definição deste teor, uma nova etapa de ensaios foi realizada, tratando as fibras com técnica de hornificação e mercerização. Notou-se que as fibras tratadas com a técnica de hornificação promoveu maiores ganhos na tensão desviadora quando comparado às fibras não tratadas. O tratamento das fibras pelo método da mercerização, por outro lado, provocou uma redução na tensão desviadora do compósito em relação à fibra não tratada. Por fim, de posse dos resultados experimentais, foi testado o modelo semi-empírico para solos reforçados com fibras, proposto por Machado et al. (2022), que prevê a tensão desviadora máxima do solo reforçado. O modelo constitutivo de Machado, Carvalho e Vilar (2002) modificado para solo-fibra também foi aplicado para simulação dos comportamentos tensão-deformação e deformação volumétrica vs deformação axial. Os resultados indicam a boa aderência entre os resultados experimentais e as simulações nos dois modelos testados, comprovando a boa capacidade de predição desses modelos.

Palavras-Chave: Reforço de Solos; Fibras de coco; Ensaio triaxial

ABSTRACT

This research addresses an experimental study with coir fibre as material as a reinforcement of a recurrent silty sandy soil in the Metropolitan Region of Salvador. The fibers used do not have a predefined length, and a gravimetric analysis is carried out to identify the most common intervals of reinforcement lengths. The experimental program consisted of inserting fibrous material at concentrations of 0; 0.5; 1.0 and 1.5% in relation to the dry weight of soil. Compaction, California Bearing Ratio and Triaxial tests CD were carried out at three confining stresses (50, 100 and 200 kPa), and the content that promoted the greatest gains in the deviator stress (1.0%) was identified. After the definition of this content, a new stage of tests was carried out, treating the fibers with the hornification and mercerization technique. It was noted that the fibers treated with the hornification technique promoted greater gains in the deviator stress when compared to the untreated fibers. The treatment of the fibers by the mercerization method, on the other hand, reduced the strength of the composite in relation to the untreated fiber. Finally, with the experimental results, a semi-empirical model for fiber reinforced soils, proposed by Machado et al. (2022), which predicts the maximum deviatoric stress of the reinforced soil, was tested. The constitutive model of Machado, Carvalho e Vilar (2002) modified for soil-fiber was also applied to simulate the stress-strain behavior and volumetric strain vs axial strain. The results indicate the good adherence between the experimental results and the simulations in the two tested models, proving the good predictive capacity of these models.

Keywords: Reinforced Soils; Coir fiber; Triaxial tests

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Formas de distribuição de fibras em solo.	8
Figura 2.2. Plano de ruptura idealizado para compósitos.	10
Figura 2.3. Tensão-deformação de um solo reforçado com fibras de coco em diferentes índices de aspecto.	11
Figura 2.4. Representação do mecanismo de alongamento e ruptura das fibras submetidas à compressão isotrópica.	12
Figura 2.5. Interação solo reforço.	12
Figura 2.6. Estrutura da parede celular de uma fibra natural.	17
Figura 2.7. Produção de coco no Brasil por estado.	20
Figura 2.8. Corte longitudinal do coco.	20
Figura 2.9. Estrutura de uma fibra natural (a) Antes do tratamento alcalino. (b) Após o tratamento alcalino.	26
Figura 2.10. Ensaio triaxiais em areia reforçada com fibras.	35
Figura 2.11. Comportamento de dilatação no modelo para areias densas.	45
Figura 3.1. Metodologia da pesquisa.	47
Figura 3.2. Fibroso de coco utilizado na pesquisa.	48
Figura 3.3. XMET 7500, Oxford Instruments.	49
Figura 3.4. Etapas para realização do ensaio de tração. a) Molde com fibra. b) Microscópio óptico. c) Superfície da fibra vista no microscópio. d) Fibra submetida ao ensaio de tração.	50
Figura 3.5. Picnômetro de Gás Hélio.	51
Figura 3.6. Ensaio de capacidade de absorção de água (a) Fibras submersas. (b) Fibras submetidas à centrífuga. (c) Centrífuga manual utilizada.	52
Figura 3.7. Solo Barreiras.	54
Figura 3.8. Ensaio de caracterização. (a) Sedimentação. (b) Peneiramento. (c) Limite de liquidez.	55
Figura 3.9. Preparação dos corpos de prova. (a) Molde bipartido. (b) Solo ensacado para compactação. (c) Corpo de prova compactado. (d) Corpo de prova na câmara triaxial	56
Figura 3.10. Sistema servo controlado. (a) Aplicação e medições das pressões (b) Parte elétrica (c) Sistema mecânico	57
Figura 3.11. Corpo de prova com teor de 1,5%. (a) Vista do corpo de prova em planta (b) Vista frontal.	61

Figura 3.12. Preparação dos corpos de prova. (a) Solo e fibras preparados para mistura. (b) Solo misturado às fibras. (c) Corpo de prova compactado pronto para ser retirado do molde. (d) Corpo de prova pronto para ensaio.	62
Figura 4.1. Ocorrência dos comprimentos das fibras de coco estudadas.	64
Figura 4.2. Ganho de massa em 24h após alguns ciclos de hornificação.	67
Figura 4.3. Ganho de massa da fibra em 24h após tratamentos.	68
Figura 4.4. Curva granulométrica do solo estudado.	70
Figura 4.5. Curva de compactação e resultados de I.S.C.	72
Figura 4.6. Curvas tensão - deformação e deformação volumétrica x axial para o solo compactado.	73
Figura 4.7. Forma de ruptura do solo estudado: (a) Amostras com 50 e 100 kPa de tensão confinante; (b) Amostras com 200 kPa de tensão confinante.	73
Figura 4.8. ISC dos compósitos em função do teor de fibra.	75
Figura 4.9. Curvas tensão deformação e variação de volume para compósitos com diferentes teores de fibra e diferentes confinantes.	78
Figura 4.10. Curvas tensão deformação e variação de volume para compósitos com 1% de fibras tratadas e diferentes tensões confinantes.	80
Figura 4.11. Influência da tensão confinante na tensão desviadora máxima dos compósitos reforçados com diferentes teores de fibra de coco.	83
Figura 4.12. Influência da tensão confinante na tensão desviadora dos compósitos com fibras tratadas.	84
Figura 4.13. Ensaio triaxial com trajetória de tensão $dq/dp -3$ para solo sem reforço e com 1% de fibra.	87
Figura 4.14. Dados experimentais e previsão do modelo de Machado et al. (2022)	88
Figura 4.15. CSL obtida para o solo não reforçado e reforçado ao fim dos ensaios triaxiais no plano q vs p' e no plano ν_{cr} vs p' apresentada junto à NCL.	89
Figura 4.16. Simulação do comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica para solo puro e reforçado com os três teores de fibra.	92
Figura 4.17. Simulação do modelo para amostras ensaiadas com trajetória $dq/dp -3$ com solo puro e reforçado com 1,0%.	93
Figura A.1. Envoltória de resistência do solo não reforçado.	108
Figura A.2. Envoltória do solo reforçado com 0,5% de fibra.	108
Figura A.3. Envoltória do solo reforçado com 1,0% de fibra.	109
Figura A.4. Envoltória do solo reforçado com 1,5% de fibra.	109
Figura A.5. Envoltória do solo reforçado com fibra tratada por hornificação.	110
Figura A.6. Envoltória do solo reforçado com fibra tratada com $NaOH$	110
Figura A.7. Envoltória do solo reforçado com fibra tratada com $NaOH$ e hornificação.	111

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1. Pesquisas envolvendo solo reforçado com diferentes tipos de fibras. . .	14
Tabela 2.2. Características físicas e propriedades de algumas fibras.	15
Tabela 2.3. Composição de fibras vegetais.	18
Tabela 2.4. Propriedades físicas e mecânicas de fibras de coco	21
Tabela 2.5. Pesquisas envolvendo solo reforçado com fibras de coco.	23
Tabela 2.6. Pesquisas com êxito na redução da capacidade de absorção de água de fibras naturais.	29
Tabela 2.7. Modelos de previsão de acréscimo de resistência para solos reforçados.	37
Tabela 3.1. Valores obtidos para massa específica dos sólidos dos compósitos e massa específica seca do compósito em função do teor de fibra estu- dado.	60
Tabela 4.1. Resultados dos ensaios de FRX da fibra de coco.	65
Tabela 4.2. Resultados dos ensaios de tração direta na fibra de coco com os seus respectivos desvios.	65
Tabela 4.3. Resultados médios dos ensaios de caracterização geotécnica	69
Tabela 4.4. Resultados dos ensaios de FRX do solo barreiras.	71
Tabela 4.5. Resultados dos ensaios de ISC.	71
Tabela 4.6. Valores de Índice de Suporte Califórnia do solo e material compósito. .	74
Tabela 4.7. Coeficiente de permeabilidade (cm/s) de CP moldados em diferentes teores de fibra.	76
Tabela 4.8. Coeficiente de permeabilidade (cm/s) de CP moldados com 1% de fibras tratadas e não tratadas.	76
Tabela 4.9. Parâmetros de resistência do solo e dos compósitos reforçados com diferentes teores.	81
Tabela 4.10 Parâmetros de resistência do solo e dos compósitos com 1% de fibras tratadas e não tratadas.	82
Tabela 4.11. Valores de tensão desviadora máxima para as tensões confinantes en- saiadas no compósito reforçado com diferentes teores.	83
Tabela 4.12. Valores de tensão desviadora para as tensões confinantes ensaiadas nos compósitos reforçados com fibras tratadas.	85
Tabela 4.13. Módulo de rigidez secante para solo sem reforço e reforçado com dife- rentes teores de fibra de coco.	86
Tabela 4.14. Módulo de rigidez secante dos compósitos reforçadas com 1% de fibras de coco tratadas.	86
Tabela 4.15. Parâmetros do modelo adotados para previsão do comportamento do solo.	90

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior
CD	Consolidado Drenado
CP	Corpo de prova
CV	Coefficiente de variação
CSL	Linha de Estados Críticos
CU	Consolidado não Drenado
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária
EPS	Poliestireno expandido
EPN	Energia do Proctor Normal
FRX	Fluorescência de Raio-X
GEOAMB	Laboratório de Geotecnia Ambiental
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LEDMa	Laboratório de Ensaios de Durabilidade dos Materiais
<i>NaCl</i>	Cloreto de sódio
<i>NaOH</i>	Hidróxido de sódio
NBR	Normas brasileiras
NCL	Linha de compressão isotrópica
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Pa	Pascal
pH	Potencial de hidrogênio
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SINDCOCO	Sindicato Nacional dos Produtores de Coco do Brasil
°C	Graus Celsius
UFBA	Universidade Federal da Bahia
USCS	Sistema unificado de classificação de solos
<i>a_{ff}</i>	Parâmetro da fibra
<i>a_d</i>	Parâmetro para modelagem da dilatância do solo
B	Parâmetro de poro-pressão de Skempton
<i>c</i>	Intercepto coesivo do solo

C_u	Coeficiente de Uniformidade
d	Diâmetro da fibra
D_{10}	Diâmetro efetivo do solo
D_{50}	Diâmetro médio do solo
dq	Incremento de tensão desviadora no compósito
dq_s	Parcela de tensão desviadora suportada pelas partículas sólidas
dq_f	Parcela de tensão desviadora suportada pelas fibras
E	Módulo de elasticidade
E_f	Módulo de elasticidade da fibra
E_u	Módulo de elasticidade da fibra na condição não confinada
e	Índice de vazios
e_{cr}	Índice de vazios crítico
e_s	Índice de vazios após o adensamento
F_a	Resistência de aderência
F_t	Resistência à tração da fibra
f_m	Função de mobilização do material fibroso
f_{mf}	Quantidade relativa de tensão desviadora suportada pelas fibras na ruptura
f_s	Superfície de plastificação do solo
f_f	Superfície de plastificação da fibra
G_f	Módulo de cisalhamento da fibra
G_s	Módulo de cisalhamento do solo
k	Coeficiente de Permeabilidade
l	Comprimento da fibra
M	Inclinação da linha de estados críticos
M_{pk}	M para o ângulo de atrito de pico
M_f	Massa da fibra após imersão na água
M_o	Massa da fibra antes da imersão na água
N	Volume específico para $p' = 1\text{kPa}$ no plano $ln(p) : \nu$
p_0	Tensão de pré-adensamento
p	Tensão normal média
P_f	Teor de fibras em massa
P_{vf}	Teor de fibras em volume
q	Tensão desviadora
T_f	Força de tração na fibra
V_s	Volume de solo
V_f	Volume de fibra
'	Relativo às tensões efetivas

ε	Deformação
ε_{sf}^e	Deformação cisalhante elástica da fibra
ε_{ss}^e	Deformação cisalhante elástica do solo
ε_{sf}^p	Deformação cisalhante plástica da fibra
ε_{vs}^p	Deformação volumétrica plástica do solo
η	q/p
η_s	q_s/p do solo sem reforço
η_{smax}	η_s na ruptura do compósito
η_{ng2}	Parâmetro que considera a influência da densidade relativa da areia
Γ	Volume específico para $p' = 1\text{kPa}$ na CSL no plano $\ln(p) : \nu$
γ_s	Peso específico dos sólidos
γ_f	Peso específico das fibras
γ_{sf}	Peso específico do compósito
κ	Coefficiente de descompressão
λ	Coefficiente de compressão da NCL
λ_*	Coefficiente de compressão da CSL
$\bar{\lambda}$	Parâmetro de endurecimento
ν_f	Coefficiente de Poisson da fibra
ν_s	Coefficiente de Poisson do solo
ν_{cr}	Volume específico no estado crítico
ϕ	Ângulo de atrito do solo
ϕ_{pk}	Ângulo de atrito de pico solo
ψ_{cr}	Variável de estado
ρ_s	Massa específica dos grãos
ρ_{dmax}	Massa específica seca máxima
σ_r	Tensão radial
σ_a	Tensão axial
σ_{atm}	Pressão atmosférica
σ_{df}	Tensão desviadora da amostra sem reforço
σ_{dff}	Tensão desviadora da amostra reforçada
σ_3	Tensão confinante

SUMÁRIO

	Pág.
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xiii
SUMÁRIO	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivo	4
1.2.1 Objetivo Geral	4
1.2.2 Objetivos Específicos	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Solo reforçado - Conceitos e interações	6
2.2 Fibras utilizadas na Engenharia	13
2.2.1 Fibras Vegetais	16
2.2.2 Estudos experimentais com fibras naturais, tratamento e durabilidade	22
2.3 Alterações no solo pela adição de fibras	32
2.4 Modelos de comportamento para solos reforçados	35
2.4.1 Modelo semi-empírico desenvolvido por Machado et al. (2022) . . .	38
2.4.2 Adaptação do modelo constitutivo proposto por Machado, Carvalho e Vilar (2002)	40
3 METODOLOGIA	47
3.1 Fibra de coco	48
3.1.1 Composição Gravimétrica	48
3.1.2 Caracterização química das fibras	49
3.1.3 Ensaio de tração direta	49
3.1.4 Ensaio de massa específica das fibras	50
3.1.5 Capacidade de absorção de água e Tratamento das fibras	51

3.2	Solo	53
3.2.1	Caracterização geotécnica do solo	54
3.2.2	Caracterização química do solo	54
3.2.3	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia- ISC	55
3.2.4	Ensaio triaxiais CD	55
3.2.5	Ensaio de compressão isotrópica	58
3.3	Estudo do comportamento mecânico dos compósitos	59
3.3.1	Preparação das misturas dos compósitos	59
3.3.2	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia.	61
3.3.3	Ensaio triaxiais CD	61
3.4	Aplicação do modelo semi-empírico de Machado et al. (2022)	62
3.5	Aplicação do modelo constitutivo de Machado, Carvalho e Vilar (2002) adaptado para solo reforçado	63
4	RESULTADOS	64
4.1	Fibras de coco	64
4.1.1	Composição gravimétrica	64
4.1.2	Caracterização química das fibras	64
4.1.3	Ensaio de tração direta	65
4.1.4	Ensaio de massa específica das fibras	67
4.1.5	Capacidade de absorção de água e Tratamento das fibras	67
4.2	Solo Barreiras	69
4.2.1	Ensaio de caracterização geotécnica	69
4.2.2	Caracterização química do solo	70
4.2.3	Ensaio de I.S.C.	70
4.2.4	Ensaio Triaxiais CD	71
4.2.5	Ensaio de Compressão Isotrópica	73
4.3	Material compósito	74
4.3.1	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia	74
4.3.2	Ensaio Triaxiais CD	75
4.4	Ensaio triaxiais realizados com diferentes trajetórias de tensões	86
4.5	Aplicação do modelo semi-empírico de Machado et al. (2022)	87
4.6	Aplicação do modelo constitutivo de Machado, Carvalho e Vilar (2002) modificado	87
5	CONCLUSÕES	94
6	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A – Apêndices	108

1 INTRODUÇÃO

O solo é um material de formação natural, de composição variável, abundante e de baixo custo, na maioria dos casos. Na Engenharia Civil pode ser utilizado como fundação e também como elemento construtivo, como é o caso de pavimentos flexíveis, nas camadas de base e cobertura de aterros sanitários ou em barragens.

Apesar de ser um material abundante no planeta e com uma gama de possibilidades de uso, um solo nem sempre atende às necessidades impostas para uma determinada aplicação. Isso faz com que os construtores procurem jazidas com características adequadas para a substituição do material existente - o que nem sempre é viável devido aos elevados custos de aquisição/escavação e transporte, além de provocar impacto ambiental - ou limitem-se a trabalhar com as propriedades daquele solo. Outra alternativa é utilizar técnicas de estabilização ou reforço de solos, visando a melhoria de suas propriedades para aplicação em Engenharia.

Dentre as técnicas que o Engenheiro Geotécnico tem como alternativa para estabilização e reforço, é possível mencionar a estabilização física que se dá por meio de compactação mecânica e remoção/inserção de partículas (o que modifica o arranjo estrutural do solo), a estabilização química (que utiliza substâncias que reagem com solo) e a inserção de elementos de reforço no solo, como geotêxteis, geogrelhas, tiras ou fibras. As inserções resultam em materiais compósitos ou eco-compósitos de comportamento hidromecânico bem diferentes dos materiais originais, normalmente comandado pelas interações químicas e/ou físicas entre os elementos usados e que necessitam serem conhecidas e previstas (CASAGRANDE, 2005).

A técnica de utilizar fibra como reforço é, há muito tempo, empregada amplamente pela humanidade. Entretanto, apenas na segunda metade do século passado é que os princípios relativos a esta aplicação começaram a ser estudados e compreendidos (SILVEIRA, 2018).

Chama-se de material compósito aquele proveniente da mistura de dois ou mais materiais, onde o material resultante possui propriedades que não são encontradas nos materiais que lhe deram origem. Solos, cimentos e argamassas são denominadas de

matrizes e as fibras são os reforços, que podem ser de diferentes naturezas (sintéticas e naturais). Os compósitos utilizando solo e fibras têm ganhado notoriedade em várias partes do mundo. Em linhas gerais, as fibras contribuem na resistência da mistura, pois promovem aumento na tenacidade (capacidade de resistir à propagação de fissuras pré existentes), fazendo com que o compósito apresente ganho de resistência à tração e uma ruptura mais dúctil (CASTILHO, 2017; HALIP et al., 2018).

As fibras sintéticas, por serem resultantes de processos industriais, possuem propriedades bem definidas, fácil manuseio e maior resistência às intempéries, enquanto que as fibras naturais não apresentam regularidade quanto ao seu comprimento e seu diâmetro e são suscetíveis à decomposição e absorção de água. Por outro lado, podem ser proveniente de algum resíduo que seria descartado, permitindo a recuperação, reciclagem e reutilização, contribuindo para sustentabilidade ambiental.

Na segunda metade do século passado houve um avanço significativo nas pesquisas envolvendo solos reforçados com fibras sintéticas, como poliéster, polietileno e polipropileno, por conta do seu custo acessível e possibilidade de fornecimento em grande quantidade pela indústria, além de regularidade de suas propriedades. Entretanto, questões ambientais voltadas à preservação do ambiente e à valorização de resíduos têm contribuído para o surgimento de pesquisas com materiais alternativos, como as fibras vegetais. Nas últimas décadas, vários autores têm se dedicado ao estudo desse tema, tais como Leucádio (2005); Anggraini et al. (2015); Aguilar (2015); Diab et al. (2016); Peter et al. (2016); Ramkrishnan et al. (2018); Silveira (2018); Bernardina (2019).

No contexto das fibras naturais é possível mencionar o uso de fibras de coco como biomantas em coberturas vegetais de taludes, como analisado por Mariani (2016) e Oliveira, Lima e Oliveira (2018); como inclusão em solo compactado para melhoramento da resistência e capacidade de suporte, como as pesquisas de Ayininuola e Oladotun (2016), Peter et al. (2016) e Munirwan et al. (2020); e para redução da fissuração, como estudado por Sotomayor e Casagrande (2015).

Sabe-se que as fibras naturais sofrem uma maior ou menor degradação em função do seu percentual de lignina e uma redução na resistência em função das condições ambientais e de uso a que estão sujeitas (HEJAZI et al., 2012). Subaida, Chandrakaran e Sankar (2009) afirmam que o emprego das fibras de coco em obras temporárias tem

apresentado resultados eficientes e econômicos, porque elas degradam mais lentamente devido a seu alto teor de lignina, que varia entre 20 e 40%. Segundo Hejazi et al. (2012) a vida útil de uma fibra de coco está entre 4 e 10 anos em campo. Já Babu e Vasudevan (2008) afirmam que a vida útil dessas fibras está em torno de 2 e 3 anos. Esta durabilidade significativa encoraja o uso das fibras de coco em obras geotécnicas.

O presente trabalho visa a avaliar o efeito da adição de fibras de coco, distribuídas aleatoriamente, no comportamento mecânico de um solo areno-siltoso a curto prazo. Após os ensaios, foi possível identificar o padrão de comportamento do compósito e reproduzi-lo aplicando o modelo constitutivo de Machado, Carvalho e Vilar (2002) adaptado para solos reforçados com fibras e o modelo semi-empírico desenvolvido por Machado et al. (2022), que prevê a tensão desviadora máxima suportada por um solo reforçado.

1.1 Justificativa

O Sindicato Nacional dos Produtores de Coco - SINDICOCO (2014), afirma que o consumo de coco é muito significativo no nordeste do Brasil e cresce consideravelmente, ampliando suas exportações nos produtos elaborados pelas empresas associadas (leite de coco, coco ralado, água de coco, etc.). Já a EMBRAPA (2006) (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), afirma que a casca do coco representa 85% do peso bruto do fruto e que 70% do lixo gerado nas praias brasileiras é proveniente da casca de coco, transformando-se em um sério problema ambiental. A casca demora cerca de 8 a 10 anos para se decompor totalmente e da mesma maneira que qualquer matéria orgânica residual, ao serem dispostos em aterros, sob condições anaeróbias, geram chorume e emissão de metano, um dos gases mais relevantes de efeito estufa, responsável pelo aquecimento global. Além disso reduzem a vida útil dos aterros sanitários, onde são descartadas. Em síntese, ao descartar este resíduo alguns problemas vêm à tona, tais como: poluição ambiental; emissão de metano; diminuição da vida útil de aterros sanitários; focos de insetos; odor e risco de doenças; e alto custo com limpeza urbana (BOLANOS, 2013; DIAS; SILVA, 2012).

As cascas de coco verde têm um grande potencial de uso como matéria prima na produção de colchões, estofamentos de veículos, aglomerados, fios e palmilhas, biomantas usadas em revegetação de taludes e substrato para agronegócio. Entretanto, no Brasil

o aproveitamento deste material, ainda é reduzido, e uma boa parte é descartada no ambiente sem gerenciamento adequado ou vai para os aterros sanitários.

Na literatura é possível encontrar pesquisas recentes envolvendo fibras de coco como reforço de solos, com resultados promissores, tais como Bolanos (2013); Chaple e Dhattrak (2013); Subramani e Udayakumar (2016) e Oliveira (2018), que utilizaram fibras de coco como reforço em solos argilosos, ou autores que utilizaram esse material em solos arenosos, como Babu e Vasudevan (2008); Aguilar (2015); Carvalho (2019). Os resultados apontam melhorias do comportamento tensão deformação do compósito e maior resistência à tração. Por outro lado, tem-se como desvantagem a degradação da fibra ao longo do tempo e em função do meio em que está sendo usada. Apesar de ser um material biodegradável a fibra de coco em um compósito argiloso pode manter cerca de 80% da sua resistência após 6 meses e, mesmo molhada, essa fibra mantém grande parte da sua resistência à tração, possui baixa tenacidade, mas grande alongamento (HEJAZI et al., 2012; SAPUAN; ISMAIL; ZAINUDIN, 2018).

Essas características fazem da fibra de coco um material com potencial de aplicação em estruturas provisórias como as coberturas e acessos provisórios em aterros sanitários. O desenvolvimento de novas pesquisas envolvendo solo e fibras de coco e suas interações têm grande relevância para que seja possível ter conhecimento das propriedades físicas e mecânicas do compósito e permitir sua utilização com segurança na engenharia geotécnica, além de avaliar alternativas de tratamento para melhorar a durabilidade das fibras.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho visa avaliar a aplicabilidade de fibras de coco, tratadas e não tratadas, distribuídas de forma pretensamente aleatória, como material para reforço de um solo areno-siltoso, analisando o efeito a curto prazo do tratamento da fibra no comportamento mecânico do compósito.

1.2.2 Objetivos Específicos

Analisar de que forma a adição de fibras, nas concentrações de 0,5; 1,0 e 1,5%, interfere no Índice de Suporte Califórnia do solo;

Analisar a influência da adição de fibras, nas concentrações de 0,5; 1,0 e 1,5%, no comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial do compósito, definindo o teor que promoveu o melhor custo-benefício;

Avaliar a influência do tratamento das fibras, a curto prazo, no comportamento mecânico de compósitos produzidos no teor ótimo, do ponto de vista técnico e econômico.

Avaliar a adequabilidade do modelo semi-empírico de Machado et al. (2022) para o solo reforçado estudado.

Analisar a capacidade preditiva do modelo constitutivo Machado, Carvalho e Vilar (2002) com modificações para simular o comportamento tensão deformação obtido dos ensaios realizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solo reforçado - Conceitos e interações

O uso de processos físicos, químicos ou mecânicos que tenham o objetivo de promover a melhora de algumas propriedades do solo, tais como: resistência ao cisalhamento, compressibilidade e permeabilidade, é denominado de reforço ou estabilização de solo. O termo estabilização de solos está relacionado ao tratamento por meio de processos químicos. Já o termo reforço está ligado à utilização de inclusões de elementos como tiras, fibras ou geogrelhas no solo (PRABAKAR; SRIDHAR, 2002; CASAGRANDE, 2005).

O reforço de solos utilizando fibras não é uma técnica recente, sendo empregada desde as civilizações antigas, onde hastes de bambu já eram utilizadas no reforço de solos granulares para construção de diversas obras de terra. Há indícios de técnicas de reforço em partes da Muralha da China e em estradas desenvolvidas pelos povos Incas, com o uso de lãs de lhamas. Pode-se mencionar também as aplicações de mantas de folhas e galhos sobre camadas de solos moles antes da construção de aterros, tanto no interior do Brasil, como em outros países. A aplicação de fibras de algodão para produzir mantas, utilizada pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul, nos Estados Unidos, em 1926, foi uma das aplicações com maior similaridade com os geossintéticos utilizados atualmente (CASAGRANDE, 2005; SOTOMAYOR, 2014).

A inclusão de fibras no solo objetivando a melhoria das suas propriedades, o torna um material reforçado, conhecido na engenharia como compósito ou eco-compósito. Dessa forma, o solo representa a matriz que configura geometricamente o material compósito e distribui as tensões de uma fibra à outra e entre elas e à superfície adjacente. As fibras ganham a função de aumentar resistência e rigidez do material compósito, moderando a abertura e o espaçamento entre fissuras (CURCIO, 2008).

Como dito anteriormente, uma das maiores vantagens do uso de fibras no solo é que o reforço ajuda a inibir a fissuração por conta dos esforços de tração. Para Ghavami, Toledo e Barbosa (1999), os principais fatores que interferem na adesão entre o solo e o elemento de reforço referem-se às propriedades coesivas do solo, às forças de atrito por compressão que surgem na superfície da fibra por conta da retração do solo e à

resistência ao cisalhamento do solo, por conta da forma superficial e rugosidade das fibras.

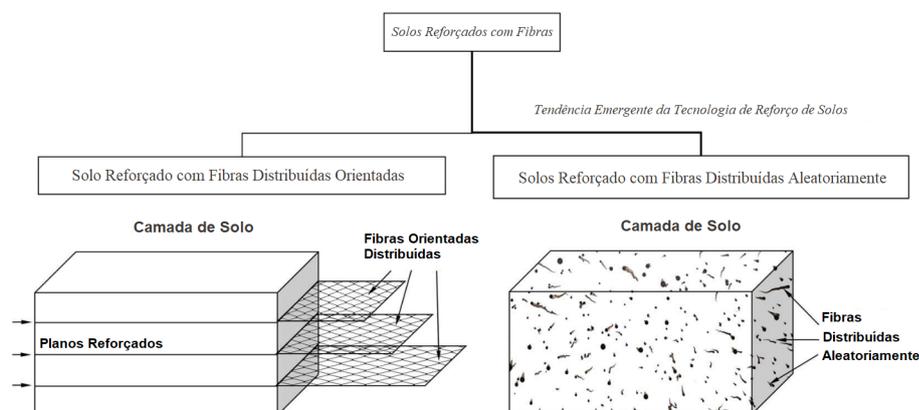
A adição de um reforço no solo pode ser definido como idealmente extensível (deformação de ruptura maior que a máxima deformação de tração no solo) ou inextensível (deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração do solo). Os solos reforçados com material extensível apresentam maior ductilidade e menor perda de resistência pós pico em relação ao reforço inextensível. Apesar dessas diferenças, ambos melhoram o comportamento do solo, inibindo deformações internas na massa de solo, desenvolvendo tensões de tração no reforço (SHUKLA, 2017).

Ao se reforçar o solo de forma aleatória, uma das técnicas mais recentes de melhoria, as fibras são acrescentadas e misturadas ao solo de forma randômica, sendo o solo, posteriormente, compactado, formando assim uma massa mais homogênea, mantendo a isotropia no compósito. Como vantagem para esse método de inclusão é possível citar, o aumento da resistência ao cisalhamento com manutenção da isotropia da resistência, sem planos de fraqueza, a aplicação vantajosa para qualquer solo (areias, siltes ou argilas), a redução da resistência pós pico, a maior ductilidade e o melhor desempenho sísmico. (PRABAKAR; SRIDHAR, 2002; ANGGRAINI et al., 2016; SHUKLA, 2017; KUMAR; SANJAY, 2018; GOWTHAMAN; NAKASHIMA; KAWASAKI, 2018). Apesar da distribuição aleatória ter ganhado notoriedade nos últimos anos pelos fatores citados acima, é válido salientar que ainda assim pode ocorrer anisotropia na amostra, por conta de processos como compactação ou vibração, que podem provocar uma tendência de orientação horizontal da fibra (DIAMBRA et al., 2010); (GAO; DIAMBRA, 2020). Compatibilizar a espessura da camada compactada com o comprimento da fibra pode minimizar sua orientação e dobras. A Figura 2.1 ilustra as formas de distribuição das fibras.

Mostra-se a seguir algumas conclusões sobre autores que utilizaram fibras como reforço de solos, pontuando os principais fatores que influem no comportamento do compósito. É notório que há controvérsias em resultados obtidos, devendo ser levado em consideração o tipo de solo, tipo da fibra e ensaio realizado.

a) Teor de fibras: teores mais elevados de fibras colaboram para uma maior resistência do compósito até um certo limite, existindo então um teor ideal de fibras. Após este

Figura 2.1 – Formas de distribuição de fibras em solo.



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

teor, o ganho não será observado. Comportamento reportado por: Vendruscolo (2003); Kar, Pradhan e Naik (2014); Peter et al. (2016); Yixian et al. (2016); Tran, Satomi e Takahashi (2018); Menezes et al. (2019). Este comportamento pode ser atribuído ao grande aumento do volume de fibras, sendo assim, as interações fibra-fibra ocorrem em maior quantidade que as interações fibra-solo, diminuindo a adesão (DIAB et al., 2018). Gray e Ohashi (1983), Consoli, Prietto e Ulbrich (1998) afirmam que a inclusão de fibras aumenta a capacidade de absorção de energia e diminui o índice de fragilidade.

b) Comprimento das fibras: o aumento do comprimento da fibra é diretamente proporcional ao ganho de resistência até um certo limite, a partir do qual o aumento do comprimento não promove melhoria significativa, resultados encontrados por Heineck (2002); Trindade et al. (2006); Maliakal e Thiyyakkandi (2012); Claria e Vettorelo (2016); Silveira et al. (2018); Gray e Ohashi (1983). Yixian et al. (2016), realizando ensaios triaxiais CU em amostras de 40 mm x 80 mm, afirmam que fibras com comprimentos moderados (cerca de 12 mm) podem reforçar o solo por meio das interações das fibras, enquanto comprimentos maiores levam a uma certa aglomeração e dobras nas fibras, reduzindo a uniformidade da fibra distribuída no compósito. Ressalta-se que o comprimento aceitável para uma fibra depende, entre outros fatores, do tamanho da amostra analisada.

c) Módulo de elasticidade: Fibras com maior módulo, como as de aço por exemplo, são mais facilmente arrancadas, enquanto que as com menor módulo de elasticidade

se comportam como reforço idealmente extensíveis (GRAY; OHASHI, 1983; SPECHT, 2000; SHUKLA, 2017).

d) Resistência das fibras e aderência entre matriz e reforço: Com o aumento da resistência das fibras, aumenta, também, a ductilidade do compósito, assumindo que não ocorra o rompimento das ligações de aderência, visto que as propriedades de resistência, deformação e padrões de ruptura de materiais compósitos reforçados com fibras dependem principalmente da aderência entre matriz e reforço. Uma boa aderência entre fibra e matriz reduz as dimensões das fissuras e homogeniza sua distribuição pelo compósito. A resistência necessária para o reforço atender às aplicações dependerá do teor de fibras incorporado e das condições de aderência entre matriz e fibra. (CASAGRANDE, 2005).

e) Tensão confinante: Existe uma tensão de confinamento crítica, onde, com valores inferiores a esta, os elementos de reforço são arrancados e acima disto, são alongados (GRAY; OHASHI, 1983; TEODORO, 1999; HEINECK, 2002).

O reforço comporta-se como um elemento passivo, ou seja, necessita que a matriz sofra um certo nível de deformação para que o solo possa transmitir o carregamento até a fibra, fazendo com que tanto a matriz quanto o reforço contribuam simultaneamente na resistência ao cisalhamento do compósito.

Um compósito solo fibra pode colapsar pela ruptura da fibra (por esforços de tração) ou pelo seu deslizamento. No entanto, mesmo que a causa do colapso seja ruptura por tração, as extremidades das fibras deslizarão, visto que a resistência à tração não se mobiliza em todo o comprimento da fibra (CURCIO, 2008). A Figura 2.2 mostra um modelo idealizado para a ruptura de um compósito.

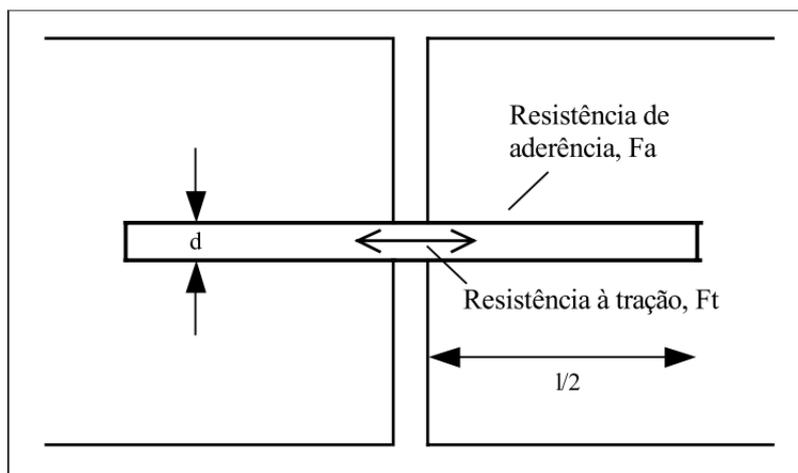
$$\frac{\pi d^2 F_t}{4} = \frac{\pi d F_a l}{2} \quad (2.1)$$

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

Observando as equações 2.1 e 2.2 é possível notar que mais um parâmetro entra em questão: o diâmetro da fibra, sendo possível obter o fator de forma (l/d) também

conhecido como índice de aspecto. O fator de forma é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra (F_t) e a resistência de aderência (F_a), ou seja, se a fibra possui alta resistência à tração, deve existir uma alta resistência de aderência para que a fibra não seja arrancada antes que a resistência à tração seja totalmente mobilizada.

Figura 2.2 – Plano de ruptura idealizado para compósitos.



Fonte: Casagrande (2005).

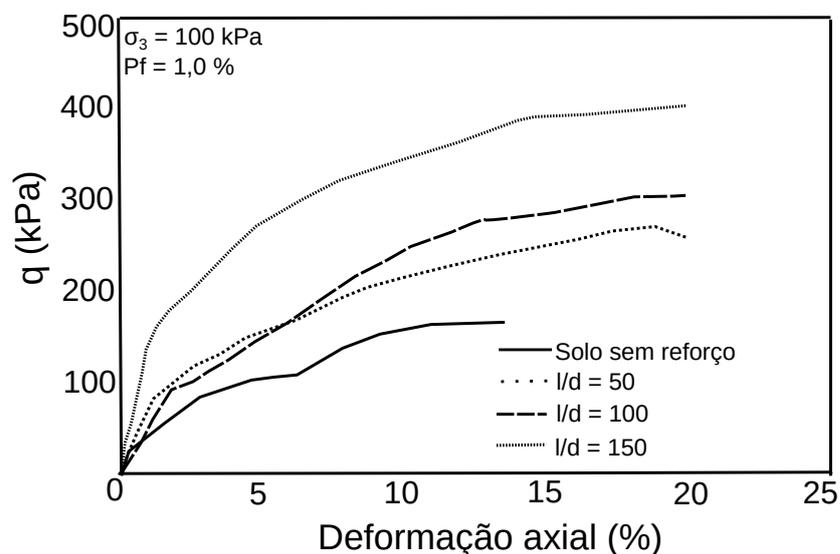
Festugato (2008) em uma pesquisa envolvendo fibras de polipropileno em um solo arenoso notou que o fator de forma da fibra influenciou diretamente no intercepto coesivo da amostra, enquanto o valor do ângulo de atrito não foi influenciado. A pesquisa indicou que quanto maior o fator de forma, maior o intercepto coesivo obtido. Mesmo comportamento foi observado por Santiago (2011) estudando um solo arenoso e fibras de cuaruá e sisal.

Maliakal e Thiyyakkandi (2012) estudando um solo argiloso reforçado com fibras de coco, com teor de 1,0%, com ensaios triaxiais CU notaram que o aumento do índice de aspecto da fibra influi diretamente na tensão desviadora máxima da amostra, como mostrado na Figura 2.3.

A aderência entre matriz e reforço é extremamente importante no comportamento mecânico do compósito. A interface fibra/matriz é o local onde ocorre contato entre os componentes do compósito, é a região interfacial onde ocorre a transferência de tensões entre matriz e fibra. A aderência não adequada nos contatos solo-fibra pode causar o início de falhas, prejudicando o desempenho do compósito. Além das propriedades

individuais de matriz e reforço, a interface deve ser adequada para que se obtenha o melhor comportamento possível (IOZZI et al., 2010; HALIP et al., 2018).

Figura 2.3 – Tensão-deformação de um solo reforçado com fibras de coco em diferentes índices de aspecto.

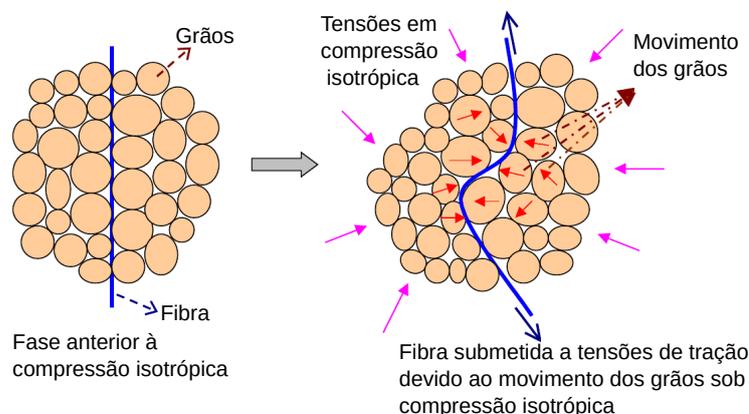


Fonte: Modificado de Maliakal e Thiyyakkandi (2012).

A Figura 2.4 ilustra o mecanismo de interação solo/fibra para uma situação de carregamento por compressão isotrópica. O movimento relativo entre partículas do solo acarreta o aparecimento de tensões de tração nas fibras, que se alongam durante a absorção dos esforços podendo atingir a ruptura.

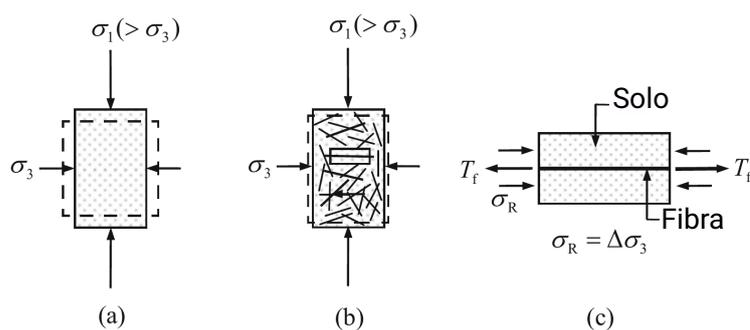
A Figura 2.5 ilustra de forma simplificada o carregamento triaxial. Para um solo não coesivo, no momento em que o material é carregado pela tensão principal menor (σ_3) surgem tensões normais no contato superficial entre o reforço e a matriz. Quando os acréscimos ocorrem na tensão principal maior (σ_1), as forças normais atuantes crescem, resultando em uma maior aderência entre a fibra e o solo, tracionando a fibra. Com a fibra tracionada por uma força T_f , o solo será comprimido como resposta às forças de tração. Assim, surge um acréscimo de tensão confinante entre os grãos do solo, como mostrado na Figura 2.5 (c). Isto é, o estado de tensão no interior das partículas do solo da Figura 2.5 (a) não é o mesmo no interior do compósito da Figura 2.5 (b) para uma mesma tensão confinante aplicada (CASTILHO, 2017); (SHUKLA, 2017).

Figura 2.4 – Representação do mecanismo de alongamento e ruptura das fibras submetidas à compressão isotrópica.



Fonte: Modificado de Casagrande (2005).

Figura 2.5 – Interação solo reforço.



Fonte: Modificado de Shukla (2017).

Em tensões confinantes baixas, a adição de fibras tende a afetar especialmente a parcela friccional da resistência. Já nas tensões de confinamento mais elevadas o ganho de resistência ocorre principalmente na parcela coesiva. A tensão de confinamento que corresponde a esta mudança no mecanismo de interação é denominada como tensão crítica de confinamento (CASAGRANDE, 2005; DONATO, 2007).

Gray e Ohashi (1983) observaram a existência da mudança do mecanismo de ruptura com o aumento da tensão confinante. Para valores de confinante inferiores à tensão crítica o mecanismo de ruptura possivelmente ocorre por meio do deslizamento da fibra. Em tensões maiores que a tensão crítica, a ruptura pode ser regida pela resistência à tração da fibra. Casagrande (2005) constatou que a tensão crítica para uma areia

reforçada com fibras de polipropileno é de aproximadamente 400 kPa e para um solo residual de arenito (areia siltosa) esta tensão é da ordem de 300 kPa.

Maher e Gray (1990) e Ranjan, Vasan e Charan (1996) observaram que o aumento do índice de aspecto da fibra resulta em uma menor tensão confinante crítica, enquanto o aumento do teor de fibras não causa interferência.

Para Ventura (2009) a boa interação entre matriz e reforço pode ser assegurada pela criação de uma interface entre as fases do compósito com condições de adequar a ductilidade da matriz com a rigidez do reforço.

2.2 Fibras utilizadas na Engenharia

Atualmente há uma grande variedade de fibras sendo utilizadas para reforço de solo ao redor do mundo, de fibras sintéticas às naturais. A Tabela 2.1 apresenta algumas pesquisas desenvolvidas com diferentes tipos de solo, fibra, seus teores e comprimentos. Com pesquisas envolvendo cada tipo de fibra, é possível caracterizar suas propriedades mecânicas, seu comportamento e aplicações. A Tabela 2.2 apresenta um sumário de propriedades de diferentes tipos de fibras. Conforme já ressaltado, essas propriedades interferem diretamente no comportamento do compósito. As fibras comumente utilizadas são as minerais (vidro, carbono e amianto), metálicas, poliméricas (polietileno, polipropileno, poliamida) e vegetais (coco, juta, sisal, dentre outras).

Características físicas, mecânicas e químicas das fibras resultante de composição e processo de fabricação ou obtenção diversos, associados às propriedades de interface solo/fibra interferem no comportamento mecânico do compósito. No que se refere às propriedades da interface fibra-matriz tem-se três fatores primordiais, são eles: a diferença entre os módulos de elasticidade da fibra e do solo; a compatibilidade química entre eles, visto que a fibra deve ser preferencialmente neutra e não deteriorável; a diferença de expansão térmica entre fibra e matriz (DONATO, 2007; CURCIO, 2008).

Analisando a Tabela 2.1 nota-se que o teor de fibras normalmente não ultrapassa 2% em relação à massa seca de solo, visto que maiores teores resultam em aglomeração das fibras. O seu comprimento não costuma ser superior a 50 mm. Isto porque o aumento do comprimento em algum momento deixa de implementar resistência ao compósito. Além disso há limitações por conta das dimensões dos corpos de prova analisados.

Tabela 2.1 – Pesquisas envolvendo solo reforçado com diferentes tipos de fibras.

Referência	Solo	Fibra	Teor (%)	Comprimento (mm)
Al-Refeai (1991)	Arenoso	Polipropileno e Vidro	0,5	10; 25; 50; 75 e 100
Nataraj e McManis (1997)	Arenoso e Argiloso	Polipropileno	0,1; 0,2 e 0,3	25
Feuerharmel (2000)	Areia, Argila e Areia Siltosa	Polipropileno	0,5	12 e 36
Murray, Frost e Wang (2000)	Areno siltoso	Resíduo de carpete(nylon e polipropileno)	1; 2 e 3	17
Consoli et al. (2002)	Arenoso	Polietileno	0,5	12 e 36
Michalowski e Čermák (2003)	Arenoso	Poliamida, aço e polipropileno	0,5; 1,5 e 2 (em volume)	25
Casagrande (2005)	Arenoso	Polipropileno	0,5	24
Santiago (2011)	Areia	Sisal e Curauá	0,5	24, 36 e 50
Sales (2011)	Argiloso com adição de areia	Cabelo humano	0,25 e 0,5	Entre 10 e 15
Aguilar (2015)	Areia	Coco	0,25; 0,50; 0,75	25 e 50
Diab et al. (2016)	Argiloso	Canhamo	0,5; 0,75; 1; 1,25 e 1,5	40
Paul e Sneha (2016)	Argila Mole	Bambu	0,25; 0,5; 0,75; 1 e 1,25	25
Silveira et al. (2018)	Arenoso	Polietileno	1,0; 1,5 e 2	10; 15; 20 e 30
Tran, Satomi e Takahashi (2018)	Siltoso	Casca de milho	0.5, 1, 1.5, e 2	10; 30 e 50
Lopes e Casagrande (2019)	Argila laterítica	Açaí	0,5 e 1	15 - 18
Menezes et al. (2019)	Areia argilosa	Coco	0.25; 0.5; 0.75; e 1	20

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 2.2 – Características físicas e propriedades de algumas fibras.

Fibra	Diâmetro (μm)	Massa específica (g/cm ³)	Mod. Elasticidade (GPa)	Res. à tração (GPa)	Def. na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Polipropileno	20-200	0,9	1-7,7	0,5-0,75	8
Polietileno	-	0,95	0,3	0,7	10
Coco	100-300	1,25-1,5	4-6	0,175	23,9-51,4
Sisal	100-300	1,5	9,4-22	0,51-0,63	2-2,5
Juta	26,5	1,3	10-30	0,4-0,8	1,5-1,8

Fonte: Adaptado de Bledzki e Gassan (1999).

Da Tabela 2.2, pode-se observar que as fibras poliméricas e as vegetais apresentam baixo módulo de elasticidade, grande deformação e tenacidade em comparação com as de vidro e aço. Além disso, as fibras poliméricas apresentam maior sensibilidade à luz solar, reduzida aderência à matriz de solo e maior resistência ao ataque químico e a álcalis que as vegetais, que são muito atacadas pelo processo de degradação e variação de umidade. No caso das fibras vegetais, suas propriedades variam em função da quantidade de lignina e celulose que possuem, como será detalhado posteriormente.

As fibras metálicas mais empregadas no reforço de materiais compósitos são as fibras de aço. Normalmente a ruptura do compósito não ocorre pela ruptura da fibra, mas sim devido ao seu arrancamento. Essas fibras podem também sofrer com corrosão, entretanto, isso pode ser amenizado com um tratamento com banho de níquel (VENDRUSCOLO, 2003; DONATO, 2007; CURCIO, 2008).

As fibras poliméricas mais usadas em aplicações geotécnicas são as de polipropileno, que apresentam como vantagem serem quimicamente neutras, contudo são vulneráveis à radiação ultravioleta. Os polímeros, apesar de se mostrarem eficientes em alternativas tecnológicas, seu uso contínuo pode trazer algumas preocupações ambientais, possuem baixa biodegradabilidade e são provenientes de petróleo (não renovável) (VENDRUSCOLO, 2003; SOTOMAYOR; CASAGRANDE, 2018).

2.2.1 Fibras Vegetais

As fibras vegetais como elementos de reforço são empregadas pela humanidade há milênios. Merece destaque o uso de fibras de coco, juta, sisal, bambu e linho. No Brasil, devido à grande disponibilidade, as pesquisas se direcionaram ao uso de fibras de coco e sisal.

Essas fibras podem ser divididas conforme o local de extração na planta, sendo normalmente retiradas do caule, da folha, do fruto ou semente. Há métodos manuais e mecânicos para retirar a fibra de uma planta, sendo que a forma de extração está relacionada ao tipo de vegetal e onde está localizada a fibra. Os métodos manuais de extração são utilizados na maior parte dos casos. O método mecânico normalmente utiliza uma máquina chamada "decortificador", usada para retirar fibras como banana, sisal, linho e juta (TOMCZAK, 2010; SAPUAN; ISMAIL; ZAINUDIN, 2018).

As fibras vegetais podem ser aplicadas na elaboração de diversos compósitos, entretanto, podem sofrer ações de fungos e micro-organismos, tornando a durabilidade uma pauta relevante a ser abordada em pesquisas. Este assunto será abordado na Subseção 2.2.2.

As fibras vegetais são compostas essencialmente por celulose, hemicelulose, lignina e pectina, sendo os três primeiros responsáveis pelas propriedades físicas das fibras. São chamadas também de fibras celulósicas ou lignocelulósicas. A quantidade desses componentes depende da idade da fibra, fonte da fibra e condições de extração para obtenção dessas (PEREIRA et al., 2015).

A celulose, um polissacarídeo linear, com alto peso molecular, formado por moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio ($C_6H_{10}O_5$) é o principal constituinte das fibras vegetais, sendo responsável pela sua estabilidade e resistência. Contudo, não se deve avaliar somente o teor de celulose das fibras, sendo necessário também avaliar o tipo de celulose e sua geometria celular (que determinam suas propriedades mecânicas), além do uso das fibras (BLEDZKI; GASSAN, 1999; PASSOS, 2005).

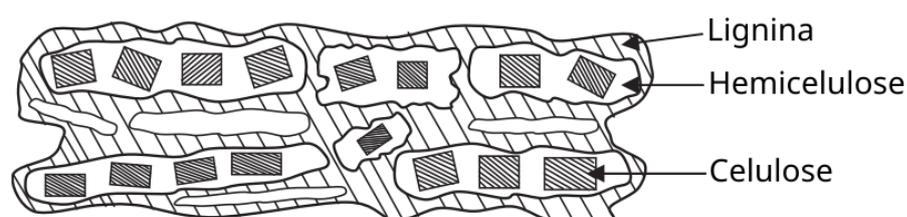
A hemicelulose é um polímero composto por vários açúcares, apresenta grande capacidade de absorção de água, não apresenta cristalinidade e tem baixa massa molecular. Além disso, tem pouca influência na resistência mecânica das fibras. A depender da espécie vegetal estes açúcares podem se associar com a celulose ou lignina (PASSOS,

2005; BOLANOS, 2013). Martins (2014) afirma que a alta capacidade de absorção de água de uma fibra vegetal é proveniente também da sua estrutura porosa.

A lignina é um polímero complexo de estrutura amorfa, menos polar que a celulose e que atua como adesivo químico. Proporciona resistência à compressão ao tecido celular e às fibras, tornando a parede celular mais rígida. Uma das funções principais da lignina é agir como barreira à degradação causada por microorganismos. A concentração de lignina nas fibras interfere na estrutura, na morfologia e flexibilidade (PASSOS, 2005; TOMCZAK, 2010; GOWTHAMAN; NAKASHIMA; KAWASAKI, 2018). Lignina, hemicelulose e pectina funcionam em conjunto como um "adesivo" para ligar a estrutura celulósica da fibra natural (SAPUAN; ISMAIL; ZAINUDIN, 2018).

A pectina é um polissacarídeo, com boa quantidade de ácido galacturônico, presente nas paredes celulares, tendo função aglutinante. Por fim, os componentes minerais são responsáveis pela formação de cinzas após a incineração das fibras. As fibras naturais, apesar de possuírem uma morfologia similar, diferem-se por aspectos como área da seção transversal, número de células de fibra e dimensões das paredes celulares (PASSOS, 2005); (FIDELIS et al., 2013). Por isso cada fibra apresenta características que interferem em seu comportamento mecânico. A Figura 2.6 ilustra a estrutura de uma fibra natural.

Figura 2.6 – Estrutura da parede celular de uma fibra natural.



Fonte: Adaptado de Kabir et al. (2012).

Fibras como juta e sisal, que apresentam altas concentrações de celulose, são recomendadas para uso como elemento de reforço em materiais compósitos como solo. O alto percentual de lignina em fibras de coco, juta e sisal faz com que essas tenham um fortalecimento extra das ligações internas, de forma que fibras com maior teor de lignina são flexíveis e de excelente qualidade quanto a durabilidade. A Tabela 2.3 mostra a composição química de algumas fibras vegetais assim como o seu local de origem na

planta. A fibra de coco tem um alto teor de lignina, de 2 a 4 vezes superior a de sisal e juta, sendo assim mais resistente à degradação.

Tabela 2.3 – Composição de fibras vegetais.

Fibra	Origem	Celulose (%)	Hemi-celulose(%)	Lignina (%)	Cinzas(%)
Abacaxi	Folhas	80 - 83	-	12	0,1-1
Açaí	Frutos	26,1 - 28,9	12,3 - 15,5	37,9 - 40,3	1,6 - 2,1
Bagaço de Cana	Caule	54,3 - 55,2	16,8 - 29,7	24 - 25	1,1
Bambu	Capim	33 - 45	30	20-25	-
Banana	Folhas	60 - 65	6-8	5 - 10	1,2
Coco	Frutos	43,4 - 53	14,7	38,3 - 40,77	-
Curauá	Folhas	70,7 - 73,6	21,1	7,5 - 11,1	0,79 - 0,9
Juta	Caule/talho	60	22,1	15,9	1,0
Piassava	Folhas	31,6	-	48,4	-
Sisal	Folhas	60 - 75,2	10 - 15	7,6 - 7,98	-

Fonte: Satyanarayana, Guimarães e Wypych (2007), Tomczak (2010), Gehlen (2014).

A principal desvantagem do uso de fibras vegetais como reforço de solos está na perda de resistência à tração ao longo do tempo. Essa perda de resistência pode ocorrer por efeitos físicos, químicos, biológicos ou uma combinação desses. O dano físico pode ser definido como a deterioração da lignina que mantém as fibras individuais em conjunto para formar a cadeia de fibra longa. O dano químico acontece quando as cadeias moleculares das fibras começam a quebrar. Os danos biológicos ocorrem quando bactérias começam a consumir as fibras. O principal fator que deve ser levado em consideração para determinar a taxa de degradação da fibra é o teor de lignina, que além de resistir à degradação ainda diminui a degradação dos outros componentes celulares (SHUKLA, 2017; SILVEIRA, 2018).

Em um estudo realizado por Bernardina (2019), analisou-se a resistência de fibras de sisal, curauá e coco, trazendo resultados relevantes: As duas primeiras apresentaram maior valor de resistência à tração e baixa capacidade de deformação (270 MPa e 5,21% sisal; 464 MPa e 4,53% curauá), devido ao alto valor de celulose (60 a 74%) dessas fibras comparado à fibra de coco (43 a 53%). Essa apresentou resistência à tração inferior (150

MPa), entretanto, maior deformação de ruptura (45%).

Fibras de coco

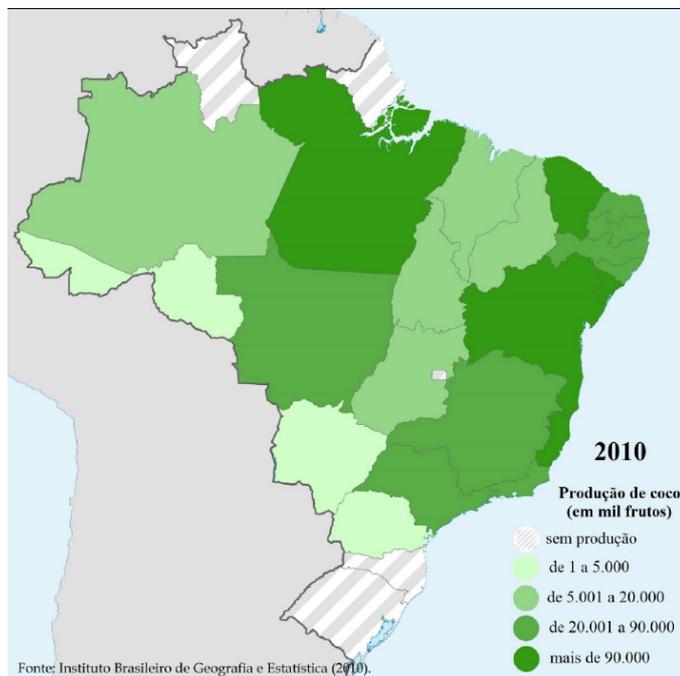
O coqueiro (*Cocos Nucífera*) é uma das plantas mais presentes e cultivadas no planeta. São supostamente oriundos do sudoeste do Oceano Pacífico, introduzidos no Brasil pelos portugueses, ainda no século XVI, no estado da Bahia. Crescem especialmente em regiões de clima tropical e subtropical, no intervalo de latitude de 20 "N a 20"S, onde encontram condições ideais de solo e clima para crescimento das plantas e maturação dos frutos. Do coqueiro é possível retirar madeira, óleo, produtos cosméticos, além dos alimentos (GHAVAMI; TOLEDO; BARBOSA, 1999; BOLANOS, 2013). Apresenta grande potencial para exploração, visto que se adapta a diferentes condições climáticas e de solo (EMBRAPA, 2006).

A produção de coco ocupa tradicionalmente o litoral do nordeste, mas tem se espalhado por todo território brasileiro. Nota-se um crescimento significativo na produção e área plantada desde o fim do último século, crescendo também a produção nas regiões norte e sudeste (EMBRAPA, 2006). O Brasil possui atualmente 240 mil hectares de área plantada, atingindo em 2015 a marca de 1,9 bilhão de cocos colhidos, o dobro da quantidade de vinte anos antes (SINDICOCO, 2017). A Figura 2.7 mostra a produção de coco por estado no Brasil no ano de 2010.

Pode-se observar da Figura 2.8, que a amêndoa (corpa), parte comestível do coco, é revestida pelo endocarpo (uma casca rígida com cerca de 5 mm de espessura) e recoberta pelo mesocarpo, que é a parte fibrosa do fruto de onde obtém-se as fibras adequadas para cordoaria naval, tapetes, escovas, geomantas, entre outros e de interesse neste trabalho. Os mesocarpos dos frutos maduros possuem fibra lenhosa e dura, enquanto os cocos verdes fornecem a melhor fibra celulósica. O exocarpo ou epicarpo têm uma superfície rígida e brilhante que impede a perda de umidade das fibras (GHAVAMI; TOLEDO; BARBOSA, 1999; BOLANOS, 2013; ADENIYI et al., 2019).

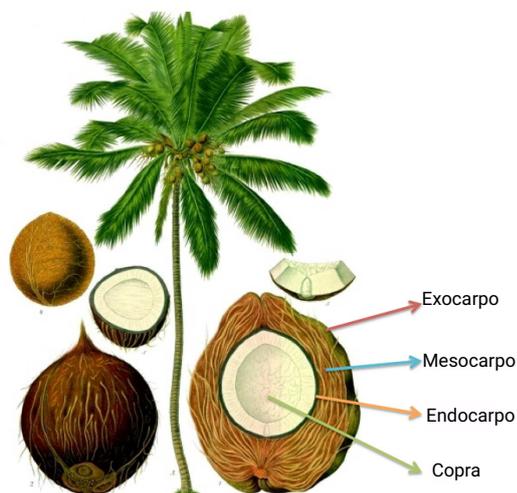
A superfície das fibras de coco apresenta rugosidade em forma de saliência arranjadas com pequenos nódulos que influenciam na resistência ao cisalhamento da interface com matriz de compósitos reforçados com essas fibras. Essa rugosidade contribui também na aderência entre matriz e reforço (MONTEIRO et al., 2006).

Figura 2.7 – Produção de coco no Brasil por estado.



Fonte: Cavalcante (2015).

Figura 2.8 – Corte longitudinal do coco.



Fonte: Bolanos e Casagrande (2014).

Na pesquisa realizada por Carvalho (2019), ao comparar as fibras de coco com fibras de curauá e sisal, percebeu-se que a primeira apresenta maior potencial para aplicação como material geotécnico. Segundo a autora, a fibra de coco apresenta menor custo (cerca de 10 vezes mais barata que a fibra de sisal) e é mais viável ambientalmente

(devido ao alto volume de lixo, principalmente no litoral). Além disso, nos ensaios realizados foi a fibra com melhor desempenho mecânico dos compósitos estudados.

As fibras naturais, em geral, apresentam grande variação das suas propriedades físicas e mecânicas, estando esses parâmetros associados ao clima e solo do local onde a fruta foi cultivada, sua idade, época de colheita, processos de separação, condições de armazenamento, comprimento da amostra e método de teste (PEREIRA et al., 2015).

Segundo Silveira (2018) diâmetros variáveis e irregulares das fibras vegetais, diferentes distâncias nas garras utilizadas nos equipamentos para ensaios de tração, velocidade de ensaio, forma de fixação dos corpos de prova são fatores que interferem na dispersão dos resultados encontrados na literatura. A Tabela 2.4 apresenta dados da literatura referentes às propriedades físicas e mecânicas das fibras de coco.

Tabela 2.4 – Propriedades físicas e mecânicas de fibras de coco

Referência	Diâmetro (μm)	Massa específica (g/cm^3)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tração (MPa)	Alongamento (%)
Bledzki e Gassan (1999)	-	1,2	4 - 6	175	30
Savastano e Agopyan (1999)	-	1,117	2,8	107	37,7
Toledo et al. (2005)	110 - 530	1,0	2,5 - 4,5	108 - 252	13,3
Brahmakumar, Pavithran e Pillai (2005)	-	-	3 - 5	140 - 225	25 - 40
Li, Wang e Wang (2007)	270	-	2,0	106 - 178	14 - 34
Motta e Agopyan (2007)	333	1,289	1,9	106	32
Tomczak (2010)	130 - 230	-	3	100 - 250	30
Kar, Pradhan e Naik (2014)	200	-	2,1	128	-
Anggraini et al. (2015)	200 - 300	1,4	6	-	-
Anggraini et al. (2016)	-	1,4	-	60 - 90	30
Oliveira (2018)	250	1,27	2,5	110	-
Bernardina (2019)	-	-	1,62	151	45

Fonte: Autor, 2022.

Analisando a Tabela 2.4 é possível notar que as fibras de coco possuem baixo módulo de elasticidade em comparação com as outras fibras normalmente utilizadas no reforço de solos. Fibras desse tipo se comportam como reforços extensíveis, não se rompendo

durante o cisalhamento, e quando usada em compósito promove ainda maior ductilidade e menor perda de resistência pós pico.

Ainda em relação a variação dos dados em ensaios de tração em fibras naturais, como mostrado na Tabela 2.4 para as fibras de coco, a pesquisa realizada por Tomczak, Satyanarayana e Sydenstricker (2007), com ensaios de tração feitos com fibras de curauá pode auxiliar na explicação da variabilidade encontrada. Os autores mantiveram o diâmetro constante e variaram o comprimento das fibras e notaram que, para um mesmo método de ensaio, o aumento do comprimento da fibra (entre 5 e 25 mm) diminuiu sua resistência à tração de 223 para 173 MPa, enquanto o módulo de elasticidade aumentou de 26,6 para 52,9 GPa. Segundo os autores, este comportamento ocorreu por conta do número de defeitos existentes nas fibras maiores. As fibras naturais possuem irregularidades relacionadas a defeitos que podem interferir na suas propriedades mecânicas, ou seja, quanto maior o comprimento, maior a chance de defeitos nessas fibras. O uso de métodos padronizados, que adotam sempre a região de menor diâmetro da fibra, pode ser uma alternativa razoável para reduzir a dispersão nesses ensaios.

O número de pesquisas envolvendo solos reforçados com fibras de coco cresceu na última década. A Tabela 2.5 apresenta os principais resultados de algumas pesquisas sobre esse assunto.

Com base na literatura citada, nota-se que na maior parte dos trabalhos usaram teores de fibra na faixa de 0,5 a 1,5%, com comprimentos variáveis, chegando a no máximo 50 mm. Merece destaque a versatilidade dessa fibra em aplicações geotécnicas, que melhora a resistência ao cisalhamento do compósito e melhora também suas propriedades quanto a fissuração.

2.2.2 Estudos experimentais com fibras naturais, tratamento e durabilidade

Neste tópico serão apresentados alguns estudos experimentais com fibras naturais, mencionando técnicas de tratamento e de que forma o tratamento e/ou a degradação das fibras interferiu nas suas propriedades e no comportamento do compósito.

Degradação de fibras naturais

A degradação de uma fibra de origem vegetal é a principal desvantagem deste material

como reforço de materiais compósitos. Por isso é relevante conhecer quais os principais fatores que interferem na perda de resistência ao longo do tempo e como os tratamentos interferem na sua durabilidade e na adesão entre matriz e reforço.

Tabela 2.5 – Pesquisas envolvendo solo reforçado com fibras de coco.

Referência	Solo	Teor (%)	Comprimento	Principais resultados
Maliakal e Thiyyakkandi (2012)	Argiloso	0,5; 1 e 2	12, 24 e 36 mm	O aumento do comprimento influenciou positivamente no aumento da resistência.
Bolanos (2013)	Argiloso	0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5	20 mm	Redução do peso específico seco máximo, aumento da umidade ótima, aumento da coesão em até 46 kPa e 4° de ângulo de atrito.
Aguilar (2015)	Arenoso	0,25; 0,5; 0,75	25 e 50 mm	Aumento da coesão em até 50 kPa e 7° de ângulo de atrito; aumento da permeabilidade.
Sotomayor e Casagrande (2015)	Arenoso	0,5	50 mm	Diminuição das fissuras, aumento da resistência e redução dos recalques em até 50%.
Oliveira (2018)	Argiloso	0,5; 1 e 2	gravimetria que varia de pó a 10 cm	Redução do peso específico seco máximo, aumento da umidade ótima, da permeabilidade, compressibilidade e ductilidade.
Bernardina (2019)	Arenoso	0,5	25 mm	Aumento da resistência ao cisalhamento, com aumento de até 9° no ângulo de atrito e 28 kPa de coesão
Carvalho (2019)	Arenoso	0,5; 0,75	25 e 50 mm	Aumento da resistência ao cisalhamento em até 43%.
Menezes et al. (2019)	Areno argiloso	0,25; 0,5; 0,75 e 1	20 mm	Aumento da ductilidade e da compressão não confinada em até 51%.
Gusmão (2020)	Argiloso	1,0	gravimetria que varia de pó a 7 cm	Após ciclos de molhagem e secagem, a presença de fibras atenuou a formação de fissuras.

Fonte: Autor, 2022.

A hidroxila livre nos grupos de fibras lignocelulósicas traz uma tendência para atrair moléculas de água através de ligações de hidrogênio, fazendo com que as fibras expandam. Como a água é uma espécie de catalizador universal das reações de biodecomposição, as moléculas de celulose são expostas a ataques microbianos que as degradam e causam perda de resistência. Além disso, as fibras sofrem uma série de ataques químicos que promovem perda de resistência à tração devido às reações de hidrólise, oxidação e desidratação (SAHA et al., 2012a).

Fungos e bactérias são os principais microrganismos responsáveis pela degradação

microbiana de materiais têxteis naturais. Comparadas aos fungos, as bactérias necessitam de um maior teor de umidade para seu crescimento, sendo assim, não causam deterioração com tanta frequência como os fungos (JOY; BALAN; JAYASREE, 2011).

Os fungos se desenvolvem em solos com pH inferiores a 5,0 e as bactérias com valores entre 6,0 e 8,0. A maioria dos solos têm pH entre 4,0 e 8,5. Os horizontes superficiais em locais com clima úmido têm normalmente pH mais ácidos por conta da lixiviação de bases. Já nas regiões secas e semi-áridas os solos normalmente são alcalinos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

A exposição de fibras vegetais a locais alcalinos ocasiona degeneração em um menor período. Como exemplo disso pode-se citar o uso de fibras vegetais como elemento de reforço em compósitos com cimento Portland comum. Nesse caso, como a degradação ocorre rapidamente, seu uso é adequado em peças que a ductilidade e resistência ao impacto são essenciais por um curto período (TEODORO, 1999). Outra alternativa é adotar medidas de controle de degradação, tais como: uso de matrizes de baixa alcalinidade; proteger ou tratar as fibras para torná-las menos hidrofílicas; aplicação dos compósitos em locais permanentemente secos.

Tratando-se de um solo reforçado com fibras naturais, nem todas as alternativas acima podem ser adotadas. Das soluções apontadas, a proteção das fibras através de materiais que a impermeabilize ou alguma técnica que diminua a absorção de água torna-se uma solução razoável para aplicação em obras geotécnicas. É necessário também adotar uma alternativa que não prejudique a adesão entre matriz e reforço, para que o compósito tenha um comportamento satisfatório.

A biodegradação das fibras naturais sofre influência de alguns parâmetros: temperatura, tipo de fibra, teor de matéria orgânica e teor de umidade do solo. Dessa forma, conhecer estas condições é essencial para avaliar o quão suscetível as fibras estão à biodegradação (COSTA, 2013; SILVEIRA, 2018).

Conhecer a estrutura interna (anatomia) das fibras é muito relevante, pois além de contribuir na identificação de espécies, na compreensão dos processos fisiológicos e na percepção dos mecanismos de adaptação dos vegetais em diversos ambientes, provê dados como rugosidade, dimensão dos poros (vasos) e comprimento das fibras (MARINELLI et al., 2008). Esses parâmetros estão diretamente ligados à capacidade de

adesão na interface fibra/matriz e capacidade de homogeneização e por consequência, às propriedades mecânicas finais do compósito.

Tratamento de fibras naturais

Tem sido comum o uso de tratamento de fibras visando à melhoria na durabilidade e na adesão fibra/matriz, como Aguilar (2015), Anggraini et al. (2016) e Silveira (2018). A escolha do tratamento adequado deve ser pautada nas propriedades adesivas da substância a ser utilizada e sua capacidade de repelir água, na exequibilidade do processo, na disponibilidade local e na acessibilidade econômica.

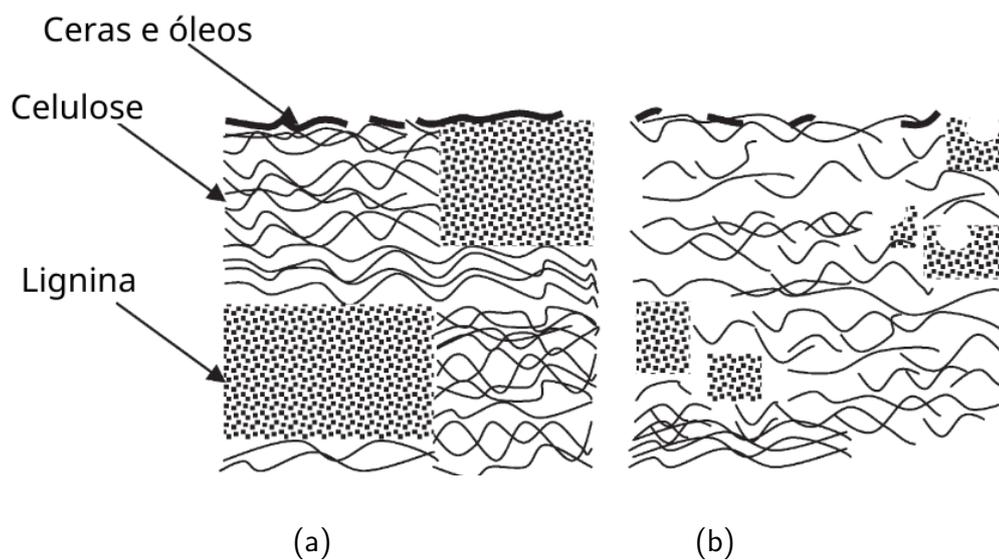
Ghavami, Toledo e Barbosa (1999) realizaram uma pesquisa utilizando fibras de coco e sisal em um solo arenoso. Os autores analisaram a absorção de água das fibras em estado natural e impermeabilizadas com materiais betuminosos, o primeiro denominado como "piche" e o segundo "ciplá". Eles perceberam que os dois produtos diminuiram a capacidade de absorção de água da fibra de sisal. Já para a fibra de coco, somente o primeiro produto melhorou este parâmetro da fibra, enquanto o segundo produto não promoveu variações significativas no quesito abordado. Ramesh, Manoj e Mamatha (2010) também observaram efeito positivo quanto a diminuição da capacidade de absorção de água de uma fibra de coco tratada com material betuminoso. Os autores ainda analisaram o efeito do período de 180 dias de cura nas amostras. Após o período analisado os compósitos de fibras sem tratamento apresentaram fungos brancos ao longo da amostra, enquanto os corpos de prova das fibras impermeabilizadas se mostraram livres desses fungos.

As pesquisas de Leucádio (2005) com um solo laterítico e Santiago (2011) com um solo arenoso indicam que o tratamento de fibras de sisal com poliestireno expandido (EPS) é positivo no que diz respeito à impermeabilização das fibras. Por outro lado, este tratamento pouco influi no ganho de resistência do compósito, ou seja, as fibras com e sem tratamento promovem ganhos similares de resistência.

Estudos indicam que impurezas naturais e artificiais na superfície das fibras, proveniente do beneficiamento, diminuem a adesão quando as fibras são utilizadas em compósitos. Um método eficiente para melhorar as propriedades adesivas da superfície retirando as impurezas da fibra é a mercerização, (solução de $NaOH$), sendo utilizado

com frequência para o tratamento de fibras celulósicas. A mercerização remove ceras, grupos de carbonila, associados a remoção de lignina e hemicelulose, como ilustra a Figura 2.9. Esse tratamento promove o desfibrilamento das fibras, transformando-as em microfibras aumentando assim seu índice de aspecto ou fator de forma (l/d). Sua rugosidade também aumenta, o que melhora a transferência de cargas da matriz para fibra. Este tratamento também atua reduzindo a absorção de água da fibra e possui como vantagem a sua praticidade e baixo custo (MARINELLI et al., 2008; CARDOSO, 2014; HALIP et al., 2018; ADENIYI et al., 2019).

Figura 2.9 – Estrutura de uma fibra natural (a) Antes do tratamento alcalino. (b) Após o tratamento alcalino.



Fonte: Adaptado de Kabir et al. (2012).

Almeida et al. (2005) recomendam o uso de soluções aquosas com concentrações entre 0,5 e 10% de $NaOH$. Esses autores realizaram tratamento alcalino com fibras de curauá e notaram que as fibras tratadas com soluções acima de 10% de $NaOH$ se mostram quebradiças após o tratamento. Através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) os pesquisadores perceberam que após o tratamento, dentro da faixa de concentração indicada, as fibras apresentaram superfície mais rugosa, que conforme comentado, aumenta aderência entre matriz e reforço. De forma similar, Jairaj, Kumar e Raghunandan (2018) utilizando o tratamento com $NaOH$ a 6% de concentração em fibras de coco, também notaram que a superfície das fibras tratadas ficaram mais rugosas após

a mercerização. Além disso, os autores imergiram as fibras na água por noventa dias e constataram que este tratamento diminuiu a capacidade de absorção de água das fibras de 90% para 40%.

Saha et al. (2012b) realizaram um estudo experimental com geotêxteis feitos com fibras de juta, tratando-os com uma emulsão a base de hidróxido de sódio, e submeteram estes a uma solução aquosa com *NaCl*, com pH de 3, 4, 7, 9 e 10 por 120 dias. Os autores constataram que as amostras tratadas mantiveram pelo menos 50% da sua resistência à tração quando o pH variou entre 4 e 9, enquanto a amostra não tratada manteve apenas 15% da sua resistência inicial. Além disso, os autores constataram que a maior queda de resistência ocorreu nos primeiros 60 dias. Enquanto os geotêxteis não tratados tiveram vida útil de serviço menor que um ano, os tratados tiveram vida útil entre 4 e 5 anos. Os autores complementaram ainda que os geotêxteis tratados perderam metade de sua resistência à tração em um período de 3 a 5 vezes maior que os geotêxteis não tratados.

Outra forma de tratamento de fibras vegetais que vem ganhando espaço nas pesquisas é a hornificação. Nesta técnica, a fibra é submetida a ciclos de molhagem e secagem, provocando uma redução na sua espessura. Este tratamento proporciona enrijecimento da estrutura polimérica presente nos materiais lignocelulósicos da fibra e por isso uma perda permanente na capacidade de absorção de água. O tratamento promove melhoria na adesão entre matriz e reforço, possibilitando a produção de compósitos de comportamento superior quando comparados a compósitos produzidos com fibras não hornificadas (CLARAMUNT et al., 2011; SANTOS, 2020).

Ferreira (2012) e Santos (2020) constataram que a hornificação foi um processo eficiente no tratamento de fibras de sisal. Ambos analisaram as seções transversais das fibras e realizaram ensaios de capacidade de absorção de água e tração direta. Após o tratamento notou-se que as fibras apresentaram redução da sua seção transversal, diminuição da capacidade de absorção de água, e aumento da sua resistência à tração.

Na pesquisa de Claramunt et al. (2011), os autores utilizaram a hornificação em fibras de polpa de celulose e de algodão, utilizando-as como reforço de uma matriz cimentícia. Através de ensaios de flexão os autores notaram que compósitos com fibras tratadas obtiveram maior resistência (8% para polpa e 16% para fibra de algodão) quando

comparado aos compósitos com fibras não tratadas. O módulo de elasticidade dos compósitos com fibras tratadas também foi superior, cerca de 20% maior nas fibras de polpa de celulose e 5% na de algodão. Após o envelhecimento, as fibras tratadas de algodão e polpa reduziram sua resistência em 5% e 24%, enquanto as fibras não tratadas reduziram 44% e 47%, respectivamente.

Em sua pesquisa com fibras de coco em um solo arenoso, Aguilar (2015) realizou a impermeabilização das fibras de coco utilizando sílica coloidal por impregnação. Quando comparada a amostra reforçada sem tratamento, notou-se que a impermeabilização das fibras diminuiu a permeabilidade da amostra em 58%, indicando que a sílica coloidal reage internamente, fechando os condutos que permitiam passar água. No que tange aos ensaios triaxiais realizados, a areia pura possuía ângulo de atrito de 32° e coesão nula; o solo reforçado com fibras sem tratamento atingiram coesão de 50 kPa e ângulo de atrito de 39°. As amostras reforçadas com fibras tratadas apresentaram coesão de 41 kPa e 41° de ângulo de atrito, o que indica que o tratamento da fibra não afetou de forma significativa a resistência do compósito.

A absorção de água de fibras naturais está diretamente ligada à sua degradação ao longo do tempo. Por conta disso, o uso de tratamentos em fibras naturais visando à redução da absorção de água vem ganhando notoriedade nos últimos anos. Alguns autores que obtiveram sucesso diminuindo esta propriedade das fibras estão apresentados na Tabela 2.6.

Os estudos realizados por Leucádio (2005) com fibras de sisal; Ramesh, Manoj e Mamatha (2010) e Khatri et al. (2016), com fibras de coco comprovaram a redução da capacidade de absorção de água de fibras tratadas por meio da redução do teor de umidade ótima da mistura compactada quando comparado à fibra natural.

A pesquisa realizada por Ghavami, Toledo e Barbosa (1999) indicou que a adição de impermeabilizantes feitos de materiais betuminosos não melhorou a interação entre solo e fibra, mas promoveu uma maior durabilidade nas amostras. A adição de betume como impermeabilizante também afetou negativamente a interação entre matriz e reforço nas pesquisas de Sarbaz, Ghiassian e Heshmati (2014), com fibras de palmeiras em um solo arenoso e Ramesh, Manoj e Mamatha (2010), com fibras de coco em um solo mole. Nos casos mencionados, apesar da positiva impermeabilização e aumento da durabilidade

causada pelo tratamento, a perda de adesão entre matriz e reforço inviabiliza o uso desta técnica em obras geotécnicas.

O trabalho realizado por Fidelis (2014) constatou que o tratamento com polímero estireno butadieno diminuiu a absorção de água do tecido de fibra de juta, por conta do comportamento hidrofóbico, o que é vantajoso para o comportamento da interface, visto que diminui a variação volumétrica da fibra. Segundo a autora, o polímero forma um filme que protege a fibra, impedindo o contato com produtos de hidratação. O polímero aumentou em 22% a resistência à tração do tecido.

Tabela 2.6 – Pesquisas com êxito na redução da capacidade de absorção de água de fibras naturais.

Referência	Fibra	Tratamento adotado
Ghavami, Toledo e Barbosa (1999)	Sisal e coco	Uso de materiais betuminosos "piche" e "ciplá"
Leucádio (2005)	Sisal	Solução de EPS (poliestireno expandido) reciclado
Ramesh, Manoj e Mamatha (2010)	Coco	Uso de Betume
Claramunt et al. (2011)	Algodão e celulose	Hornificação
Ferreira (2012)	Sisal	Hornificação
Fidelis (2014)	Tecido de juta	Uso de polímero estireno butadieno
Khatri et al. (2016)	Coco	Hidróxido de Sódio e Tetracloreto de carbono
Jairaj, Kumar e Raghunandan (2018)	Coco	Hidróxido de Sódio, Resina epóxi e pó de pedra
Silveira (2018)	Sisal e curauá	Uso de Sílica e Copolímero de estirenobotadieno carboxilado
Santos (2020)	Sisal	Hornificação e uso de hidróxido de cálcio

Fonte: Autor, 2022.

Envelhecimento de fibras naturais

A degradação de uma fibra natural é inerente às propriedades do material. Por conta disso, alguns estudos são realizados com o intuito de entender como o tempo influi nas propriedades mecânicas do reforço e do material compósito.

Joy, Balan e Jayasree (2011), em um estudo envolvendo a durabilidade de geotêxteis feitos de fibras de coco, realizou experimentos adicionando o geotêxtil em poços de 1 m x 1 m x 1m, em diferentes profundidades do solo (15, 45, 75 e 100 cm), por períodos de 30, 60, 75, 105 e 120 dias. Os autores notaram que o decréscimo de resistência cresceu ao longo do tempo e a maior queda de resistência foi encontrada na profundidade de 75 cm. Nota-se a complexidade do comportamento, que conforme mencionado anteriormente, pode variar em função da umidade do solo, seu pH e temperatura.

Bernardina (2019) avaliou o efeito do envelhecimento de fibras de curauá, sisal e coco em tempos de exposição de 60, 120 e 240 dias, com as fibras colocadas em profundidades de 75 e 125 cm. Constatou-se que o envelhecimento influenciou diretamente o comportamento das fibras, com diminuição da resistência à tração, do módulo de elasticidade e da capacidade de deformação. As maiores perdas ocorreram na profundidade de 75 cm em todas as amostras estudadas. O decréscimo de resistência mais acentuado ocorreu nos primeiros dois meses de exposição em todas as fibras. Após os oito meses de exposição as fibras de sisal perderam boa parte da sua resistência (diminuiu de 270 para 116 MPa) enquanto as fibras de curauá tiveram um decréscimo maior, de 464 para 105 MPa. Por outro lado, as fibras de coco perderam, na pior situação, 21% de sua resistência, saindo de 150 MPa no tempo zero para 118 MPa em oito meses de exposição. Assim a fibra de coco após a exposição apresentou praticamente a mesma resistência da fibra de sisal, que no tempo zero apresentava quase o dobro da resistência da fibra de coco.

Em sua tese de doutorado, Silveira (2018) avaliou a influência do envelhecimento de fibras de sisal e curauá no reforço de um solo arenoso. A autora constatou na pesquisa que, além da perda de massa das fibras, esse acontecimento governou o comportamento mecânico do compósito. A fibra de sisal se mostrou mais resistente à degradação que as fibras de curauá, onde o reforço apresentou maior perda de resistência ao longo do tempo. A autora justifica este acontecimento relatando a menor seção transversal da fibra de

curauá, que se por um lado favorece o acréscimo de resistência no tempo zero, torna também a fibra mais suscetível à degradação de ataques ambientais. A justificativa da autora torna-se plausível, visto que as duas fibras apresentam teor semelhante de lignina e celulose, principalmente a lignina, uma das variáveis mais importantes na prevenção da degradação das fibras naturais, como foi detalhado na seção anterior.

Ainda na pesquisa de Silveira (2018), a autora utilizou copolímero de estireno-butadieno carboxilado e sílica por impregnação superficial nas fibras naturais. Todos os compósitos areia-fibra utilizando as fibras tratadas apresentaram maior resistência ao cisalhamento e capacidade de absorção de energia superiores que as amostras com fibras não tratadas. Apesar da perda de resistência ao longo do tempo, o solo reforçado apresentou resistência superior ao material não reforçado em todos os intervalos de tempo observados, de até 240 dias. Todas as fibras vegetais tratadas apresentaram menor perda de massa quando comparado às fibras não tratadas.

Bernardina e Casagrande (2018) em um estudo experimental com fibras de coco e fibras de polipropileno, com teor de 0,5% em relação ao peso seco, em um solo arenoso, avaliaram a resistência ao cisalhamento dos corpos de prova submetidos a envelhecimento natural por período de um a oito meses, onde quanto maior o tempo de exposição, menor a eficiência do reforço. A areia pura possuía ângulo de atrito 32° e intercepto coesivo nulo. A areia reforçada com fibra de coco sem envelhecimento, 42° e 28 kPa para ângulo de atrito e coesão, respectivamente. Após o envelhecimento de oito meses, este valor diminuiu para 38° e 23 kPa. Já o compósito com fibras de polipropileno possuía 37° e 89 kPa para ângulo de atrito e intercepto coesivo. Após o envelhecimento de oito meses este valor decresceu para 39° e 42 kPa. Ao contrário do esperado, os compósitos reforçados com fibras sintéticas também perderam parte da resistência ao longo do tempo.

Analisando os resultados das pesquisas de Silveira (2018) e Bernardina e Casagrande (2018) observou-se que para qualquer tempo de envelhecimento analisado, as amostras reforçadas com ambas as fibras apresentam melhor comportamento que o solo puro. Isto indica que o uso de fibras naturais como reforço de solos pode ser uma alternativa razoável ao longo do tempo, especialmente se o reforço passar por algum tipo de tratamento.

2.3 Alterações no solo pela adição de fibras

Sabe-se que o implemento de fibras pode incrementar a resistência ao cisalhamento dos solos e também pode provocar algumas alterações em outros parâmetros do material. Uma síntese sobre o efeito da adição de fibras como elemento de reforço em solos é apresentada a seguir.

a) Compactação: A inclusão de fibras naturais no solo interfere nos parâmetros de compactação. Quando comparado ao solo natural, se compactados na mesma energia, o material reforçado com fibras naturais normalmente apresenta menor peso específico seco máximo e o teor de umidade ótima tende a aumentar. Isso pode ser explicado por conta da capacidade de absorção de água pelas fibras e seu baixo peso específico. Esse comportamento foi observado experimentalmente por Ramesh, Manoj e Mamatha (2010); Chaple e Dhatrak (2013); Bolanos (2013); Sarbaz, Ghiassian e Heshmati (2014); Jairaj, Kumar e Raghunandan (2018); Ayininuola e Oladotun (2016); Butt, Mir e Jha (2016); Khatri et al. (2016); Subramani e Udayakumar (2016); Oliveira (2018); Lopes e Casagrande (2019).

Alguns autores, ao utilizarem fibras sintéticas como reforço, observaram comportamento similar entre as curvas de compactação do solo reforçado e não reforçado, Nataraj e McManis (1997), Feuerharmel (2000), Casagrande (2001), Heineck (2002), Costa (2015), Curcio (2008), Gomes (2018)

b) Índice de Suporte Califórnia: Observa-se aumento de até 50% na capacidade de suporte de solos reforçado com fibras, nas pesquisas de: Nataraj e McManis (1997); Kar, Pradhan e Naik (2014); Ayininuola e Oladotun (2016); Butt, Mir e Jha (2016); Peter et al. (2016). aaaaaaa

c) Resistência de pico: Observa-se aumento da resistência ao cisalhamento de pico em solos reforçados com fibras, como reportado em Teodoro (1999); Consoli et al. (2002); Casagrande (2005); Trindade et al. (2006); Festugato (2008); Diambra et al. (2010); Santiago (2011); Bolanos (2013); Kar, Pradhan e Naik (2014); Aguilar (2015); Kutanaei e Choobasti (2016); EsmailpourShirvani et al. (2019); Gusmão (2020).

d) Resistência residual: A maioria dos trabalhos estudados apresentam redução na queda de resistência pós pico do solo reforçado com fibras, como Consoli, Prietto e Ulbrich (1998), Feuerharmel (2000), Consoli et al. (2002), Casagrande (2005), Trindade

et al. (2006), Tang et al. (2007), Martins (2014), Kutanaei e Choobbasti (2016), Tang et al. (2016), Oliveira (2018).

e) Modo de ruptura: A adição de fibras no solo promove aumento da ductilidade. Este comportamento é encontrado vastamente na literatura, como por exemplo: Consoli, Prietto e Ulbrich (1998); Murray, Frost e Wang (2000); Leucádio (2005); Tang et al. (2007); Mirzababaei et al. (2013); Bolanos e Casagrande (2014); Claria e Vettorelo (2016); Tang et al. (2016); Kutanaei e Choobbasti (2016); Oliveira (2018); Abbaspour, Aflaki e Nejad (2019); Menezes et al. (2019). A adição de fibras rígidas com alto módulo de elasticidade, como a PET, tendem a ser retiradas da matriz, resultando numa ruptura de comportamento menos dúctil (CONSOLI et al., 2002).

Por meio de ensaios triaxiais, Feuerharmel (2000) constatou que o comportamento de solos reforçados pode ser dividido em três fases: uma etapa inicial, comandada apenas pelo solo; a segunda etapa, em que o comportamento do compósito é regido pelo conjunto matriz e reforço; e a terceira fase, onde o comportamento é comandado pela ação das fibras.

f) Permeabilidade: Em geral, a adição de fibra promove aumento da permeabilidade da mistura, pois as fibras atuam criando vazios e caminhos preferenciais de fluxo, o que aumenta a condutividade hidráulica. Conforme comentado anteriormente, maiores teores de fibras no compósito podem promover uma perda de adesão entre matriz e reforço, independentemente do tipo de solo estudado, gerando mais contatos fibra-fibra, o que justifica a tendência de elevação de condutividade hidráulica em teores mais elevados. Feuerharmel (2000); Curcio (2008); Aguilar (2015); Costa (2015); Oliveira (2018) encontraram valores mais altos de permeabilidade com o implemento de fibras. No caso de pesquisas em que os compósitos são preparados com índice de vazios constante, a permeabilidade tende a não variar de forma significativa, como as pesquisas de Conceição (2021) e Pinto (2021).

g) Sucção-umidade: Por conta da sua natureza hidrofílica, as fibras naturais no solo favorece a retenção de água para uma mesma sucção do compósito quando comparado ao solo puro. Este comportamento foi observado experimentalmente, em solos argilosos, por: Sales (2011), com fibras de cabelo humano; Oliveira (2018) e Gusmão (2020), com fibras de coco. Tratando-se de fibras sintéticas, Costa (2015) notou que o uso de

fibras de PET diminuiu a capacidade de retenção de água do compósito, que pode ser explicado pela natureza hidrofóbica dessas fibras, promovendo menor retenção de água pelo conjunto quando comparado ao solo puro.

h) Compressibilidade: Alguns autores notaram aumento da compressibilidade com o aumento de teor de fibras. Quanto maior a concentração de fibras, maior a inclinação da reta de compressão virgem. Isto pode estar atrelado ao fato de que a adição de fibras promove aumento do índice de vazios do material, o que gera aumento da compressibilidade. Este comportamento foi reportado nas pesquisas de Feuerharmel (2000); Curcio (2008); Morandini e Schneider (2017); Gomes (2018); Oliveira (2018).

Por outro lado, Babu, Vasudevan e Sayida (2008) estudando um solo expansivo localizado na Índia notaram redução da compressibilidade ao adicionar fibras de coco no solo. Os autores constataram que a adição no percentual de 1,5% reduziu o índice de compressibilidade em até 38%.

i) Comportamento volumétrico no cisalhamento: O comportamento volumétrico do solo reforçado com fibras possui relatos divergentes na literatura. Autores como Aguilar (2015), Bernardina (2019) e Conceição (2021), estudando areias reforçadas por meio de ensaios triaxiais, não observaram relação significativa entre o comportamento volumétrico do solo com e sem reforço. Autores como Michalowski e Čermák (2003) relatam que a adição de fibras atenuou a dilatância de areias reforçadas com fibras de aço, especialmente para baixo valores de tensão confinante. Em contrapartida, Diambra et al. (2010) observaram redução na compressão inicial com maior dilatância, principalmente para maiores concentrações de fibras.

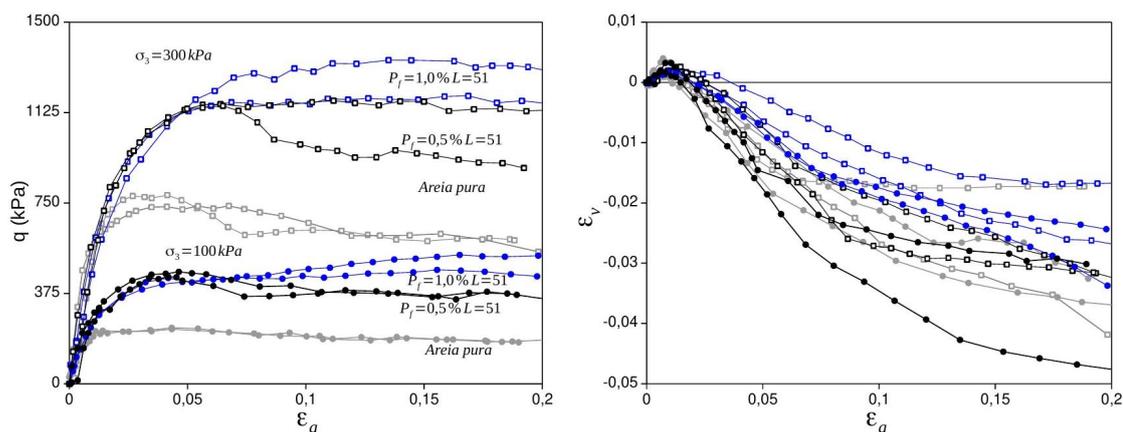
As diferenças podem estar associadas à interação entre matriz e reforço, que varia conforme o tipo de solo, tipo da fibra, seu teor, comprimento e índice de vazios do ensaio.

j) Rigidez inicial: A influência do reforço na rigidez inicial do compósito depende das características do mesmo, como encontrado nos trabalhos de Michalowski e Čermák (2003), que utilizaram fibras de aço e poliamida; Bernardina e Casagrande (2018), que trabalharam com fibras de coco e polipropileno; Tran, Satomi e Takahashi (2018) com uma pesquisa envolvendo fibras de milho.

Ensaio triaxiais em uma areia de duna reforçada com fibras de polipropileno, realiza-

dos por Conceição (2021), apresentados na Figura 2.10, ilustra como a adição de fibras no compósito influi positivamente no comportamento tensão-deformação do material. Na figura, percebe-se que há um aumento gradual na tensão desviadora com acréscimo no teor de fibras (de 0,5 até 1,0%), para um mesmo comprimento (51 mm). Observa-se que no solo reforçado nos dois teores, nas confinantes analisadas (100 e 300 kPa) há valores semelhantes de tensão desviadora até a deformação axial de 5%. Após esse ponto a amostra com teor de 1,0% apresentou um leve aumento de tensão desviadora, que pode estar associado ao maior volume de fibras, que ao se mobilizarem, promovem maior resistência no compósito. Em relação às deformações volumétricas, não houve grande diferença entre o solo com e sem reforço nesse estudo.

Figura 2.10 – Ensaio triaxiais em areia reforçada com fibras.



Fonte: Conceição (2021).

2.4 Modelos de comportamento para solos reforçados

A modelagem do comportamento mecânico tensão-deformação de solos e compósitos é desafiadora devido à sua não linearidade e à ocorrência de deformações plásticas imediatas e diferidas no tempo.

Pode-se dizer que um modelo constitutivo ideal é aquele que representa o mais próximo possível o comportamento mecânico real do solo, necessitando de poucos parâmetros. Além disso, é de grande importância em um modelo que os seus parâmetros possuam significado físico claro. Entretanto, é difícil atender simultaneamente a esses

requerimentos, ressaltando-se ainda que para se conhecer o comportamento mecânico generalizado do solo ensaios em diferentes trajetórias de tensões devem ser realizados (LODI, 1998).

Se tratando de solos reforçados com fibras, um novo material surge e devido às diferenças do comportamento das fases, matriz e reforço, com peculiaridades no seu comportamento tensão-deformação e pela interação entre elas, o processo de modelagem se torna ainda mais desafiador.

Boa parte dos modelos propostos para a previsão do comportamento de solos reforçados com fibras concentram-se na previsão da contribuição da fibra na resistência ao cisalhamento e baseiam-se no equilíbrio de forças (GRAY; OHASHI, 1983; MAHER; GRAY, 1990) ou em abordagens estatísticas como em Ranjan, Vasan e Charan (1996). Mais recentemente, Zornberg (2002) propôs um modelo para diferentes solos reforçados a partir da superposição dos efeitos da areia e da fibra.

Gray e Ohashi (1983) propuseram um modelo para previsão do comportamento de uma areia (estado denso e fofo) reforçada com fibras (metálicas, naturais e sintéticas). Os autores consideraram o ângulo de orientação das fibras em relação à superfície de cisalhamento e constataram que a inclinação de 60° em relação ao plano de ruptura promove maior contribuição da fibra em comparação à inclinação de 120° .

Maher e Gray (1990) propuseram um modelo que baseia-se na análise, por meio de ensaios triaxiais, do comportamento mecânico de areias reforçadas com fibras. Constatou-se que há um comportamento bilinear na tensão desviadora e essa transição acontece para a tensão crítica de confinamento. Como relatado anteriormente, a partir do valor de tensão de confinamento crítica as fibras se alongam ou rompem, abaixo dessa, deslizam durante a deformação.

Ranjan, Vasan e Charan (1996) realizaram uma série de ensaios triaxiais em solos reforçados com fibras (sintéticas e naturais) e avaliaram a influência de características da fibra, como resistência, índice de aspecto; e do solo, como densidade e tensão confinante. Os autores empregaram uma análise de regressão com os resultados obtidos e desenvolveram um modelo empírico para previsão do comportamento do compósito.

Zornberg (2002) apresentou algumas equações para previsão da coesão e ângulo de atrito de solos reforçados. Para isso, o autor utilizou dados de ensaios triaxiais de solos

não reforçados e ensaios de resistência à tração das fibras.

A Tabela 2.7 apresenta as equações propostas por Ranjan, Vasan e Charan (1996), Zornberg (2002) e Machado et al. (2022). A formulação de Machado et al. (2022) será detalhada na Subseção 2.4.1, pois ela será aplicada neste trabalho. Na Tabela 2.7 (l/d) é o índice de aspecto da fibra; σ_{1f} é a tensão principal maior do compósito na ruptura; P_f e P_{vf} são os percentuais em massa e volume de fibra, respectivamente; f e f^* são coeficientes relacionados à superfície de atrito entre fibra e solo, respectivamente e c_{eq} e $tg\phi_{eq}$ são a coesão e ângulo de atrito equivalentes do solo reforçado com fibras.

Tabela 2.7 – Modelos de previsão de acréscimo de resistência para solos reforçados.

Referência	Condição	Equação
Ranjan, Vasan e Charan (1996)	$\sigma_3 < \sigma_{critc}$	$\sigma_{1f} = 12,3 (P_f)^{0,4} \cdot (l/d)^{0,28} (f^*)^{0,27} (f)^{1,1} (\sigma_3)^{0,68}$
	$\sigma_3 > \sigma_{critc}$	$\sigma_{1f} = 8,78 (P_f)^{0,35} \cdot (l/d)^{0,26} (f^*)^{0,06} (f)^{0,84} (\sigma_3)^{0,73}$
Zornberg (2002)	$\sigma_3 < \sigma_{critc}$	$c_{eq} = c \cdot (1 + \alpha ((l/d) P_{vf} \cdot c_{ic}))$ $tg\phi_{eq} = tg\phi [1 + \alpha ((l/d) P_{vf} \cdot c_{i\phi})]$
	$\sigma_3 > \sigma_{critc}$	$c_{eq} = (1 + \alpha ((l/d) P_{vf} \cdot \sigma_f))$ $tg\phi_{eq} = tg\phi$
Machado et al. (2022)	-	$f_{mf} = a \cdot P_f(\%) / G_{sf} \cdot f_{bd} + b((l - 9mm) N_\phi)^{1/3}$

Fonte: Autor, 2022.

Alguns autores como Machado, Carvalho e Vilar (2002), Diambra et al. (2010) e Gao e Diambra (2020) têm desenvolvido modelos constitutivos para a reprodução do comportamento mecânico de materiais reforçados.

No trabalho realizado por Diambra et al. (2010) os autores propuseram um modelo constitutivo para previsão do comportamento de uma areia reforçada com fibras em ensaios de compressão e de extensão triaxial. O modelo parte da premissa que as fibras trabalham no seu domínio elástico enquanto o solo segue o modelo Mohr-Coulomb, elástico linear/perfeitamente plástico. O modelo foi calibrado utilizando dados de ensaios triaxiais CD em amostras reforçadas e não reforçadas. Por se tratar de um modelo baseado na superposição dos efeitos, matriz e reforço foram calibrados separadamente.

O modelo de Machado, Carvalho e Vilar (2002) foi proposto para previsão de comportamento tensão deformação de resíduos sólidos urbanos (RSU) e recentemente foi modificado para prever o comportamento de solo reforçado. O modelo modificado foi

capaz de prever com satisfatória aderência o comportamento tensão deformação de compósitos de areia/fibra, bem como seu comportamento dilatante, como observado nas pesquisas de Conceição (2021) e Pinto (2021). As adaptações implementadas serão apresentadas na Subseção 2.4.2.

2.4.1 Modelo semi-empírico desenvolvido por Machado et al. (2022)

Machado et al. (2022) desenvolveram um modelo semi-empírico para previsão da resistência ao cisalhamento de solos reforçados. Os autores utilizaram dados de ensaios triaxiais de diversas pesquisas, diferentes tipos de solos, reforçados com fibras naturais e sintéticas. Para o uso do modelo são necessários alguns dados do reforço: teor, módulo de elasticidade, resistência à tração, comprimento, diâmetro e densidade; e dados do solo: D_{50} ; C_u , ϕ' , c' e índice de vazios após a consolidação.

No modelo desenvolvido por Machado et al. (2022), a variável $f_{m,f}$ representa a quantidade relativa de tensão desviadora suportada pelas fibras na condição de ruptura do compósito e é determinada pela Equação 2.3.

$$f_{m,f} = \frac{\sigma_{dff} - \sigma_{df}}{\sigma_{dff}} \quad (2.3)$$

Onde σ_{dff} corresponde à tensão desviadora máxima do solo reforçado e σ_{df} é a tensão desviadora máxima do solo sem reforço.

Após tentativas e agrupamento de dados, os autores definiram uma formulação empírica para obtenção da quantidade relativa da tensão desviadora suportada pelas fibras na condição de ruptura, apresentada na Equação 2.4. Onde P_f é o teor de fibras, l é o comprimento da fibra, N_ϕ está relacionado ao ângulo de atrito do solo (Equação 2.5), a e b são parâmetros de ajuste. Uma função logística f_{bd} (Equação 2.6) foi adotada para modificar valores de P_f , considerando parâmetros que influenciam na ancoragem da fibra. Valores de $l < 9$ mm zeram o segundo termo da Equação 2.4. Portanto, fibras com comprimentos inferiores a 9 mm não influenciam nos valores de $f_{m,f}$. A variável a_f controla a inclinação da função logística, b_f define o ponto de inflexão da curva, em que $f_{bd} = 0.5$. a_f , b_f , c_f e d_f são parâmetros de ajuste. x_f (Equação 2.7) é uma

variável que relaciona-se com a interação solo-fibra; C_u é o coeficiente de uniformidade do solo. C_u e e são parâmetros dependentes: quanto maior o valor de C_u , menor é o valor esperado de e para a mesma densidade relativa. D_{50} é o diâmetro equivalente da partícula em que tem-se 50% do solo passando; E_f é o módulo de elasticidade da fibra; o uso de P_f/G_{sf} inclui na equação a influência da concentração volumétrica de fibra, resultando numa menor dificuldade de modelar o comportamento de fibras com valores de densidade mais elevados, como aço e vidro. O segundo termo da Equação 2.7 inclui a influência da rigidez das fibras com a textura do solo. Para fibras com seções circulares, considera-se $d = t$. A importância dessa relação se dá principalmente por incorporar a possibilidade da fibra dobrar em torno da partícula do solo em alguma extensão para adquirir melhores condições de ancoragem. E_{ref} é um valor de referência para o módulo de elasticidade das fibras (1 GPa).

$$f_{mf} = a.P_f(\%)/G_{sf}.f_{bd} + b((l - 9mm)N_\phi)^{1/3} \quad (2.4)$$

$$N_\phi = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.5)$$

$$f_{bd} = \frac{1}{1 + e^{-a_f(x_f - b_f)}} \quad (2.6)$$

$$x_f = \left(\frac{C_u e^3}{(P_f(\%)/G_{sf})^{3/4}}\right)^{c_f} \left(\frac{D_{50}^2 E_{ref}}{E_f \cdot d_t}\right)^{d_f} \quad (2.7)$$

Conceição (2021) e Pinto (2021), com pesquisas experimentais em compósitos de areias uniformes e bem graduada, respectivamente, reforçadas com fibras de polipropileno, aplicaram seus dados no modelo proposto por Machado et al. (2022). Houve uma adesão satisfatória entre os resultados previstos e experimentais, com o ajuste apresen-

tando coeficiente de determinação de $R^2 = 0,912$. Na pesquisa de Conceição (2021), apenas 6,25% dos dados previstos para areia apresentaram erros relativos superiores a 25%, sendo todos inferiores a 30%.

2.4.2 Adaptação do modelo constitutivo proposto por Machado, Carvalho e Vilar (2002)

Machado, Carvalho e Vilar (2002) desenvolveram, a partir de uma série de ensaios de compressão triaxial e compressão confinada em RSU, um modelo constitutivo para resíduos sólidos urbanos. O modelo baseia-se em conceitos da Mecânica dos Solos dos Estados Críticos e da elasto-plasticidade.

Recentemente, a equipe do Laboratório de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal da Bahia tem feito adaptações no modelo inicialmente proposto, visando à criação de um novo modelo constitutivo (*ainda em processo de publicação*) para solos reforçados com fibras. O modelo possui algumas premissas, a maioria delas derivadas do modelo de Machado, Carvalho e Vilar (2002), as quais são apresentadas a seguir:

a) O comportamento mecânico do compósito é regido simultaneamente pela ação das fibras e das partículas sólidas. Cada componente do solo reforçado possui um modelo constitutivo próprio;

b) A tensão desviadora (q) é parcialmente resistida pela fibra e parcialmente pela estrutura do solo. A tensão efetiva média (p) é assumida igual para ambos os componentes.

c) O índice de vazios está relacionado somente às partículas sólidas. A deformação volumétrica da fibra não é levada em consideração, ou seja, toda variação volumétrica é controlada pela estrutura do solo e seus vazios.

A seguir, algumas equações propostas pelo modelo adaptado de Machado, Carvalho e Vilar (2002) são apresentadas.

O incremento de tensão desviadora no compósito, dq , é dado pela Equação 2.8. Nesse caso, o reforço dado pela fibra é considerado pelo termo dq_f

$$dq = dq_s V_s + dq_f V_f \quad (2.8)$$

Onde dq_s corresponde à parcela de tensão desviadora suportada pelas partículas sólidas e V_f e V_s correspondem ao volume de fibra e solo (partículas sólidas + vazios, sem o reforço), respectivamente.

A função f_m (Equação 2.9) representa os estágios de mobilização da fibra e correlaciona as deformações elásticas cisalhantes da fibra, $d\epsilon_{sf}^e$, e solo, $d\epsilon_{ss}^e$ (Equação 2.10). O valor de f_m tende a 1 para altos valores de $\eta = q/p$. Uma vez que os valores de dq_f e dq_s para um certo dq são calculados (Equação 2.11) a resposta mecânica da parte não reforçada é calculada por meio do Cam-Clay modificado.

$$f_m = \frac{2}{\pi} \tan^{-1}\left[\left(\frac{q}{p}\right)^2\right] \quad (2.9)$$

$$d\epsilon_{sf}^e = f_m d\epsilon_{ss}^e \quad (2.10)$$

$$dq = 3G_s d\epsilon_{ss}^e V_s + 3f_m d\epsilon_{ss}^e G_f V_f \quad (2.11)$$

Onde G_f e G_s correspondem ao módulo cisalhante da fibra e do solo, respectivamente e são calculados pelas equações 2.12 e 2.13.

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} \quad (2.12)$$

$$G_s = \frac{3(1 - 2\nu_s)p}{2(1 + \nu_s)k} \quad (2.13)$$

Onde ν_f e ν_s correspondem ao coeficiente de Poisson da fibra e do solo, respectivamente.

O modelo considera a influência da tensão confinante na ancoragem das fibras fa-

zendo a sua rigidez (E_f) dependente da tensão radial (σ_r), a qual corresponde uma das componentes da tensão octaédrica média (Equações 2.14 e 2.15). E_u representa a rigidez da fibra na condição não confinada ($\sigma_r = 0$) e a_{ff} é a taxa de aumento de E_f com a tensão confinante. Nesse modelo, a_{ff} e a função f_m são os principais parâmetros para representar a interação solo-fibra.

$$E_f = E_u + a_{ff} \sigma_r \quad (2.14)$$

$$p = \frac{\sigma_a + 2\sigma_r}{3} \quad (2.15)$$

O solo não reforçado é modelado utilizando a mecânica dos solos dos estados críticos. As fibras são consideradas como um material elástico, perfeitamente plástico (critério de Von Mises). O solo não reforçado possui uma lei de endurecimento e uma lei de fluxo, dadas, respectivamente, pelas equações 2.16 e 2.17:

$$d\varepsilon_{vs}^p = (\lambda - \kappa) dp_o/p_o \quad (2.16)$$

$$d\varepsilon_{vs}^p/d\varepsilon_{ss}^p = \left(\frac{n}{1+n}\right) \left[\frac{M^{1+n} - \eta_s^{1+n}}{\eta_s^n} \right] \left\{ 1 + \sin \left(\frac{\pi}{2\psi^\beta} \left(\frac{p}{p_o} \right)^\beta \right) 2n \right\}^{-1} \quad (2.17)$$

A superfície de plastificação do solo é dada pela Equação 2.18 e da fibra pela Equação 2.19

$$f_s = q_s - M[p^n(p_o - p)]^{\left(\frac{1}{1+n}\right)} n^{\left(\frac{1}{1+n}\right)} = 0 \quad (2.18)$$

$$f_f = q_f - q_{fmax} = 0 \quad (2.19)$$

Onde λ e κ correspondem à inclinação dos trechos elastoplástico e elástico na NCL (*normal consolidation line*), respectivamente. M (Equação 2.20) corresponde à inclinação da Linha dos Estados Críticos (CSL - *critical state line*) do solo sem reforço, p_o é a tensão de pré-adensamento hidrostática do solo e n é um parâmetro de ajuste da superfície de plastificação, assumido como $n = 2$. Na lei de fluxo, $\beta = \ln(0,5)/\ln(\psi)$ garante deformação cisalhante nula quando $p = p_o$. $\psi = n/(1 + n)$ corresponde ao índice p/p_o quando a superfície de plastificação toca a CSL. η_s corresponde a q_s/p do solo sem o reforço.

$$M = \frac{6 \cdot \sin(\phi)}{3 - \sin(\phi)} \quad (2.20)$$

Detalhamento das Modificações no modelo de Machado, Carvalho e Vilar (2002)

O modelo de Machado, Carvalho e Vilar (2002) foi modificado de forma a incorporar a dilatância de areias compactas e reproduzir o comportamento de areias e solos arenos-argilosos reforçados com fibras. Para isso, no modelo proposto a CSL torna-se referência (ver Equação 2.21 proposta por Balmaceda, Gens e Alonso (1992)). A variável de estado ψ_{cr} relaciona o índice de vazios do compósito após a consolidação (e_s) com o índice de vazios no estado crítico (e_{cr}) para um mesmo valor de p (Equação 2.22).

$$\nu_{cr} = \frac{\Gamma}{p^{\lambda*}} \quad (2.21)$$

$$\psi_{cr} = e_s - e_{cr} \quad (2.22)$$

Onde λ^* é a inclinação na CSL em $\ln(\nu_{cr}) \times \ln(p)$ e ν_{cr} é o volume específico do

compósito na CSL. Γ é o volume específico para $p = 1$ na CSL e correlaciona-se com N pela Equação 2.23.

$$N = \Gamma \left(\frac{1+n}{n} \right)^{\lambda^*} \quad (2.23)$$

O modelo introduz um novo parâmetro de endurecimento, $\bar{\lambda}$, apresentado na Equação 2.24, que auxilia na modelagem do comportamento do solo reforçado. Este valor é atualizado em cada etapa de carregamento, e é calculado utilizando uma trajetória partindo do estado de tensão inicial da CSL para prever a posição final da superfície de plastificação onde p_{of}/p_o é determinado pela Equação 2.25 (ver Figura 2.11).

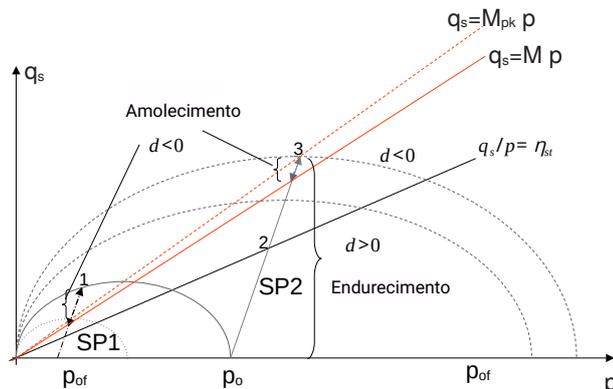
$$\bar{\lambda} = - \frac{\ln(1 - \psi_{cr}/v)}{\ln(p_{of}/p_o)} \quad (2.24)$$

$$\frac{p_{of}}{p_o} = \frac{1 - p/p_o}{\left(\frac{\eta_s + 0.001}{M} \right)} + p/p_o \quad (2.25)$$

Em amostras densas, $\psi_{cr} < 0$, o que torna $\bar{\lambda} < 0$ no lado úmido da CSL. O primeiro termo da Equação 2.26 fornece a transição entre comportamento dilatante ou compressivo e esse termo é zero em caso de amolecimento. A transição ocorre pelo índice η_{st} , por meio da Equação 2.27. O parâmetro a_d é necessário para modelagem de amostras densas.

$$\lambda = \bar{\lambda} \frac{\eta_s/M_{pk}}{a_d + \eta_s/M_{pk}} \frac{1 + \text{sgn}(\dot{p}_o)}{2} + \bar{\lambda} \frac{(\eta_{smax} - \eta_s)/(\eta_s/M - 1)}{1 + (\eta_{smax} - \eta_s)/(\eta_s/M - 1)} \frac{1 - \text{sgn}(\dot{p}_o)}{2} + \lambda^* \quad (2.26)$$

Figura 2.11 – Comportamento de dilatância no modelo para areias densas.



Fonte: Autor, 2022.

$$\eta_{st}/M_{pk} = \frac{-a_d}{1 + \bar{\lambda}/\lambda^*} \quad (2.27)$$

M_{pk} é o valor de M para o ângulo de atrito de pico ϕ_{pk} . Descreve-se na Equação 2.28 a transição entre ϕ e ϕ_{pk} , onde ψ_{cro} é o valor inicial do parâmetro de estado ψ_{cr} , proposto em Jefferies e Been (2016). Em amostras fofas, $\psi_{cro} > 0$ e $\phi = \phi_{pk}$ ou $M = M_{pk}$. $\bar{\lambda}$ auxilia na convergência das trajetórias de tensão no plano $p \times \nu$ para CSL. O segundo termo da Equação 2.26 é usado para modelar o comportamento de amolecimento do compósito, ou seja para o caso de trajetórias de tensão que atinjam a superfície de plastificação à esquerda da CSL. O valor de η_{smax} corresponde a η_s na ruptura do compósito, a qual neste caso ocorre quando a trajetória de tensões atinge a superfície de plastificação.

A Equação 2.29 é usada para transição de M e M_{pk} a qual ocorre assim que a amostra atinge o valor de $\eta_s = M_{pk}$ pelo lado úmido da CSL. Nessa equação, M_i assume o valor de M_{pk} no início do amolecimento e converge para o valor de M em grandes deformações. É através deste mecanismo que o modelo representa o comportamento de amostras compactas do lado direito da linha de estados críticos.

$$\phi_{pk} - \phi = -49.3 \psi_{cro} \quad (2.28)$$

$$M_i = (\eta_s - M) [1 + 1.25 (M - \eta_s) M_{pk}/\eta_{smax}] + M \quad (2.29)$$

Dados experimentais de Ranjan, Vasan e Charan (1994) e Diambra et al. (2010) sugerem que a efetividade das fibras tendem a reduzir com P_f/G_{sf} , que é proporcional ao volume de fibras e aumenta com a tensão média. Por conta disso, na modificação do modelo de Machado, Carvalho e Vilar (2002), o valor de f_m é dado pela Equação 2.30.

$$f_m = \frac{2}{(1 + P_f(\%)/G_{sf} (\sigma_{atm}/p)^{0.5})\pi} \tan^{-1} \left[\left(\frac{q}{p} \right)^2 \right] \quad (2.30)$$

A rigidez da fibra depende de p por meio da Equação 2.31, onde σ_{atm} é a pressão atmosférica. Com isso, a relação entre E_f e a tensão confinante é dependente do produto $E_u a_{ff}$ o qual pode ser representado por um único parâmetro.

$$E_f = E_u a_{ff} \left(\frac{p + \sigma_{atm}}{\sigma_{atm}} \right) \quad (2.31)$$

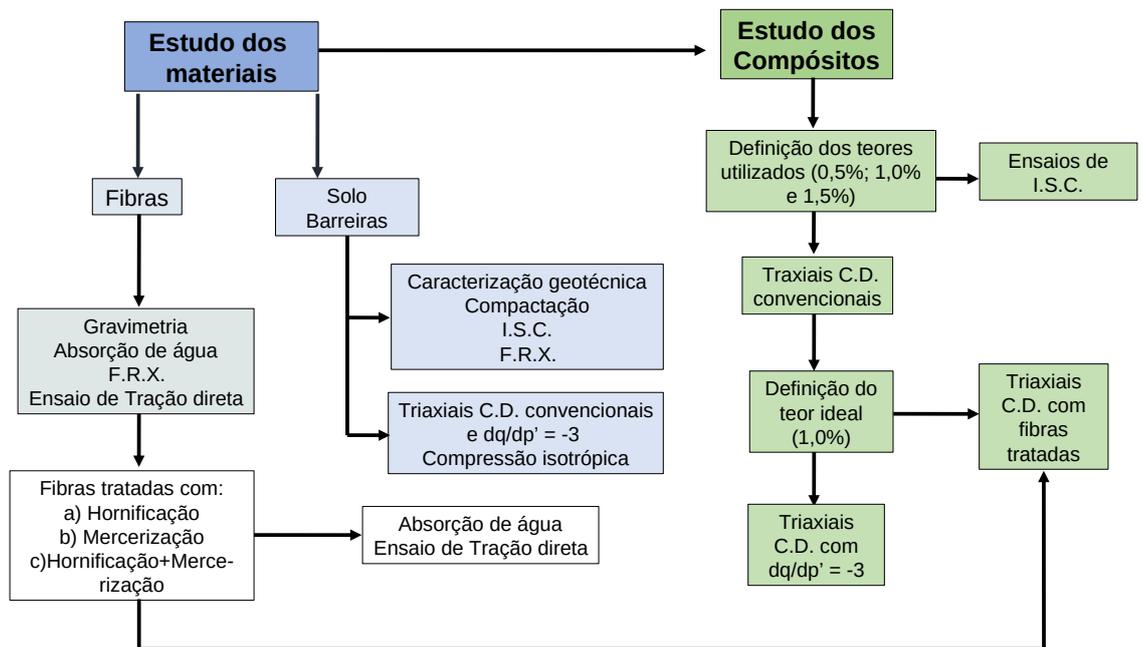
De acordo com os autores uma maior aderência aos dados experimentais foi obtida fazendo-se $n = 1$ na equação da superfície de plastificação, resultando na superfície de plastificação do Cam-Clay modificado. A lei de de fluxo foi simplificada, resultando na Equação 2.32. n_{g2} é um parâmetro não associado relacionado ao índice de densidade (ID) das amostras. Assumindo $n = 1$, $M_i = M$ e $n_{g2} = 1$ conduz ao uso do Cam-Clay modificado para a porção sem reforço do compósito.

$$d\varepsilon_{vs}^p/d\varepsilon_{ss}^p = \frac{n}{1+n} \left[\frac{M_i^{1+n} - \eta_s^{1+n}}{\eta_s^n} \right] n_{g2}^{-1} \quad (2.32)$$

3 METODOLOGIA

O programa experimental desta pesquisa foi dividido em duas etapas, sendo a primeira destinada ao estudo dos materiais usados, fibra e solo, e a segunda, destinada ao estudo do comportamento mecânico dos compósitos a curto prazo, com e sem tratamento. A Figura 3.1 ilustra as etapas metodológicas adotada neste trabalho. Como este estudo está inserido num projeto maior, que avalia o comportamento a curto e longo prazo de compósitos de solo reforçado com fibra de coco natural e tratadas, na Figura 3.1 as atividades referentes ao estudo e definição do tratamento das fibras (caixas com fundo branco) foram desenvolvidas no Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA (GEOAMB) por Freitas (2022).

Figura 3.1 – Metodologia da pesquisa.



Fonte: Autor, 2022.

3.1 Fibra de coco

A fibra de coco utilizada na pesquisa foi fornecida pela Saturno Fibras. A empresa fica localizada no litoral norte da Bahia, cerca de 150 km de Salvador e comercializa as fibras de coco de três formas: fibras longas, fibroso e granulado. Nesta pesquisa, foi utilizado o fibroso, que é um material com fibras de vários tamanhos, conforme mostra a Figura 3.2. O material fibroso foi submetido a secagem ao ar para evitar a deterioração e depois submetido a alguns ensaios de caracterização física e química e preparação dos compósitos com fibras sem tratamento e tratadas.

3.1.1 Composição Gravimétrica

Como foi abordado no capítulo anterior, o comprimento das fibras interfere diretamente no comportamento do compósito. Na impossibilidade de usar separação por peneiramento, o material fibroso foi separado manualmente em três tamanhos correspondentes a pó e fibras curtas (menor que 1 cm), fibras médias (entre 1 e 5 cm) e fibras longas (maiores que 5 cm), medidas com um paquímetro. Foram realizados ensaios em três amostras de cerca de 10 g, selecionadas aleatoriamente de um total de 10 kg de fibras espalhadas numa superfície. Após a medição, cada grupo foi pesado em uma balança de precisão (0,001 g), calculando o percentual correspondente de cada intervalo de comprimento, sendo possível construir um gráfico de frequência.

Figura 3.2 – Fibroso de coco utilizado na pesquisa.



Fonte: Autor, 2022.

3.1.2 Caracterização química das fibras

Para a caracterização química da fibra foram realizados três ensaios de Fluorescência de Raios-X, usando um espectrômetro portátil (XMET 7500, Oxford Instruments, Reino Unido), do GEOAMB, mostrado Figura 3.3. Cerca de 10 g de amostra seca ao ar, inserida num porta-amostra, foi mantida em contato com o aparelho por 15 segundos, tempo em que dispara um feixe de Raio-X na amostra e obtém os elementos predominantes do material e suas respectivas concentrações. Para cada amostra foram realizadas dez leituras, adotando os valores médios encontrados.

Figura 3.3 – XMET 7500, Oxford Instruments.



Fonte: Autor, 2021.

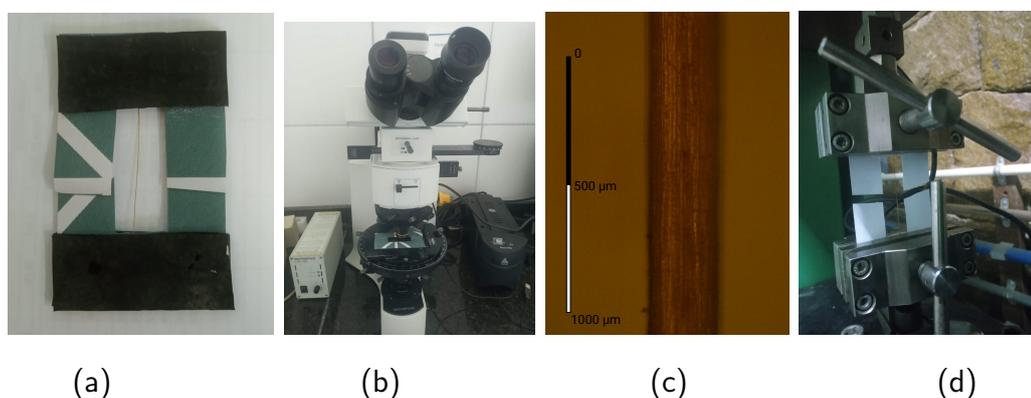
3.1.3 Ensaio de tração direta

Ensaios de tração direta nas fibras foram usados para conhecer a resistência à tração, módulo elasticidade e alongamento na ruptura. Para tanto seguiu-se as recomendações de Motta e Agopyan (2007) e foi usada uma prensa universal (Materialprüfung 1445, Zwick, Alemanha), do Laboratório de Geotecnia da UFBA, uma célula de carga de 10 kgf e velocidade de ensaio de 2 mm/min.

As fibras selecionadas para ensaio, com comprimento de aproximadamente 30 mm foram coladas em um molde de papel com gramatura de 180g/m², utilizando uma cola instantânea de alta resistência (da marca *superbonder*). Os moldes para as fibras têm

dimensões de 65 mm x 25 mm, com uma janela recortada (15 mm x 15 mm) no centro da sua altura e tiras de borracha nas extremidades a fim de evitar o esmagamento da fibra com a pressão da garra da máquina Figura 3.4 (a). Antes de proceder a ruptura, as fibras já inseridas nos moldes de papel foram observadas em um microscópio óptico (BX 41, Olympus, Japão), do Núcleo de Tecnologia da Preservação e Restauração (NTPR) da UFBA, Figura 3.4 (b) para determinação das dimensões das fibras, Figura 3.4 (c), e em seguida essas foram levadas à prensa para ruptura Figura 3.4 (d). Foram realizados ensaios em seis amostras para cada condição de fibra natural e tratada.

Figura 3.4 – Etapas para realização do ensaio de tração. a) Molde com fibra. b) Microscópio óptico. c) Superfície da fibra vista no microscópio. d) Fibra submetida ao ensaio de tração.



Fonte: Autor, 2022.

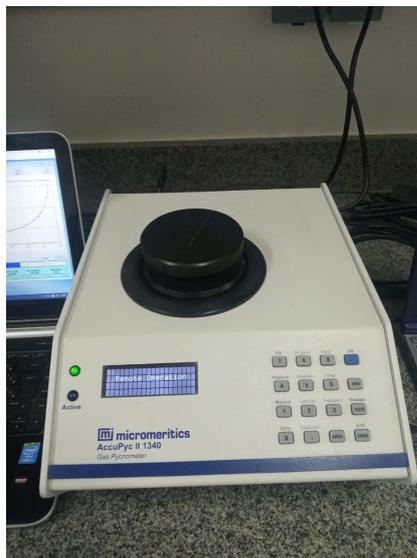
3.1.4 Ensaio de massa específica das fibras

O ensaio de massa específica das fibras foi realizado no Laboratório de Ensaio de Durabilidade dos Materiais (LEDMA) da Universidade Federal da Bahia, por meio de um picnômetro de Gás Hélio (AccuPyc II 1340, Micromeritics, Estados Unidos), Figura 3.5.

O picnômetro mede a densidade ou volume do material através da técnica do deslocamento de gases inertes (hélio ou nitrogênio). A amostra é inserida no compartimento de volume predefinido e uma quantidade específica do gás é inserida. Cinco estimativas são realizadas para se calcular o valor médio de densidade pelo volume do gás deslocado e a massa (base seca) da amostra. Três amostras com 10 g de fibras secas, em estufas a 70°C por 24 horas (para retirada da água higroscópica) foram ensaiadas.

3.1.5 Capacidade de absorção de água e Tratamento das fibras

Figura 3.5 – Picnômetro de Gás Hélio.



Fonte: Autor, 2022.

Capacidade de Absorção de água

As fibras, tanto as naturais quanto as tratadas com diferentes ciclos, foram submetidas a ensaios de capacidade de absorção de água. Este procedimento foi realizado em triplicata utilizando amostras de 10 g de fibras secas ao ar e seguiu as propostas de Silveira (2018).

As fibras foram imersas em água destilada e retiradas após 5, 10, 15, 30 e 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480 e 1440 minutos. Antes de serem pesadas, foram submetidas a uma centrífuga manual revestida com um tecido permeável, com malha fina, por três minutos. Posteriormente as fibras foram secas em papel toalha, a fim de retirar toda água ainda presente entre elas e em sua superfície. A Figura 3.6 ilustra alguns procedimentos realizados neste ensaio. O ganho de massa das fibras nas diferentes condições, em porcentagem, foi obtido através da Equação 3.1 e foi apresentado em função do tempo, permitindo determinar o tempo de saturação das fibras, o qual foi usado para definir os ciclos de umedecimento e secagem empregados nos processos de tratamento das fibras.

$$\text{Ganho de massa (\%)} = \frac{M_f - M_o}{M_o} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Onde: M_f : massa da fibra após imersão (g); M_o : massa inicial (g).

Além da fibra natural esta pesquisa empregou fibras tratadas, objetivando reduzir o processo de degradação devido as condições ambientais e de tempo. A escolha dos tipos e dos procedimentos de tratamento pode ser encontrado em detalhes em Freitas (2022), e consta de hornificação, de mercerização e tratamento misto de hornificação seguida da mercerização.

Figura 3.6 – Ensaio de capacidade de absorção de água (a) Fibras submersas. (b) Fibras submetidas à centrifuga. (c) Centrifuga manual utilizada.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autor, 2022.

Hornificação

A hornificação é um processo amplamente utilizado em pesquisas com fibras naturais e consiste em ciclos de molhagem e secagem da fibra, com tempo de duração e número de ciclos definidos em função dos resultados de ensaios de absorção de água. As fibras foram submersas em água deionizada na temperatura ambiente (25°C) por um período de 4 h, tempo suficiente para atingir a saturação (definido no ensaio de absorção de água). Após o excesso de água ser retirado por escoamento, as fibras foram levadas à estufa a 70°C por um período de 16 h, para completa secagem. Após este tempo, a fibra era retirada da estufa e deixada esfriar até a temperatura ambiente, concluindo um ciclo. Para determinação do número de ciclos adotados para pesquisa, testou-se a absorção de

água da fibra natural após quatro, seis, oito e dez ciclos. Com os resultados obtidos, a quantidade de dez ciclos foi definida para a continuação da pesquisa.

Mergerização

A mergerização consistiu em submeter as fibras em solução alcalina de NaOH, com concentração de 1% por um período de 60 minutos. Após a imersão na solução, as fibras foram colocadas em estufa 70° C por 16h. A concentração da solução e o tempo de imersão das fibras foram definidos por Freitas (2022).

Hornificação + Mergerização

O tratamento misto seguiu a metodologia descrita anteriormente, iniciando com os 10 ciclos de molhagem e secagem (hornificação), e posteriormente a mergerização, com solução de *NaOH*, com 1% de concentração por 1 hora.

3.2 Solo

O solo usado no estudo foi coletado em um talude de bota fora do Aterro Metropolitan Centro, localizado no Km 6,5 da rodovia BA-526 (coordenadas 12° 51' 30" S 38° 22' 14" E). Este material, denominado neste trabalho como Solo Barreiras, é proveniente dos Sedimentos Terciários da Formação Barreiras, areno-argilosos com argilas caulínicas (bilaminares, não expansivas), de ocorrência comum na capital e Região Metropolitana. Após a determinação da quantidade de solo necessária para realização de todos os ensaios previstos nesta pesquisa, o material foi coletado, em estado deformado, e levado ao laboratório de Geotecnia Ambiental (GEOAMB) da Universidade Federal da Bahia, destorroado e homogenizado. A Figura 3.7 apresenta o solo utilizado na pesquisa.

Figura 3.7 – Solo Barreiras.



Fonte: Autor, 2022.

3.2.1 Caracterização geotécnica do solo

O solo após secagem ao ar foi destorroado e submetido aos ensaios de caracterização geotécnica e de compactação, em quadruplicata, seguindo as normas brasileiras vigentes.

Solo - Análise granulométrica - Método de ensaio ABNT NBR 7181 (2016);

Grãos que passam na peneira 4,8mm - Determinação da Massa específica - Método de ensaio ABNT NBR 6508 (2017);

Solo - Determinação do Limite de liquidez - Método de Ensaio ABNT NBR 6459 (2016);

Solo - Determinação do Limite de plasticidade - Método de Ensaio ABNT NBR 7180 (2016).

Solo - Ensaio de compactação ABNT NBR 7182 (2016).

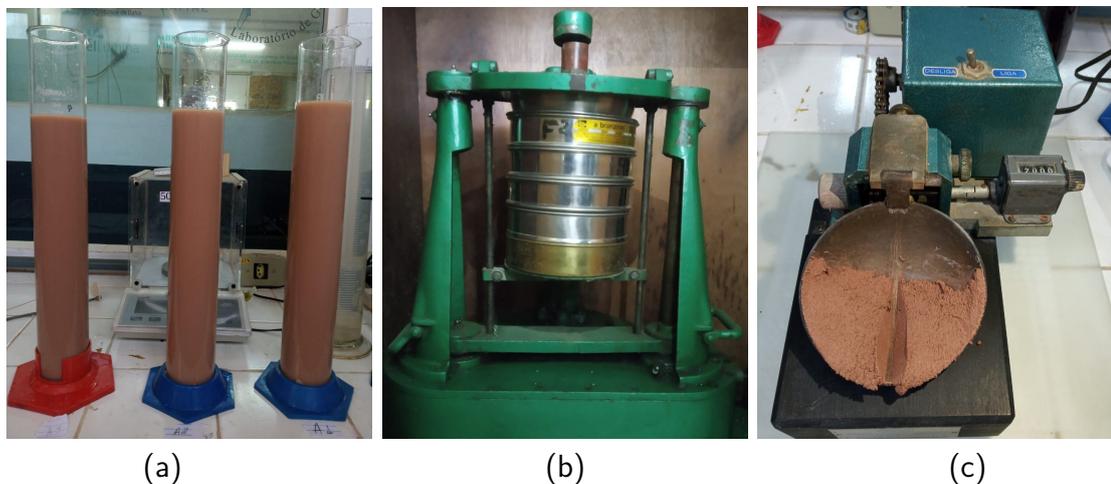
O ensaio de compactação foi realizado na energia do Proctor Normal (EPN), sem reúso de material.

A Figura 3.8 ilustra as etapas dos ensaios de caracterização realizados.

3.2.2 Caracterização química do solo

A caracterização química do solo foi feita por meio de FRX, de forma análoga à descrita em Subseção 3.1.2. Para maior confiabilidade dos resultados, foram utilizadas três amostras com cerca de 30 g de solo seco ao ar.

Figura 3.8 – Ensaios de caracterização. (a) Sedimentação. (b) Peneiramento. (c) Limite de liquidez.



Fonte: Autor, 2022.

3.2.3 Ensaios de Índice de Suporte Califórnia- ISC

Os ensaios de ISC foram realizados seguindo as diretrizes da ABNT NBR 9895 (2016), usando corpos de prova moldados na massa específica seca máxima e na umidade ótima obtida da EPN e, em duas amostras. Todos os corpos de prova usados para obtenção da curva de compactação foram empregados na determinação do ISC, possibilitando analisar de que forma as condições de compactação influem na capacidade de suporte do solo.

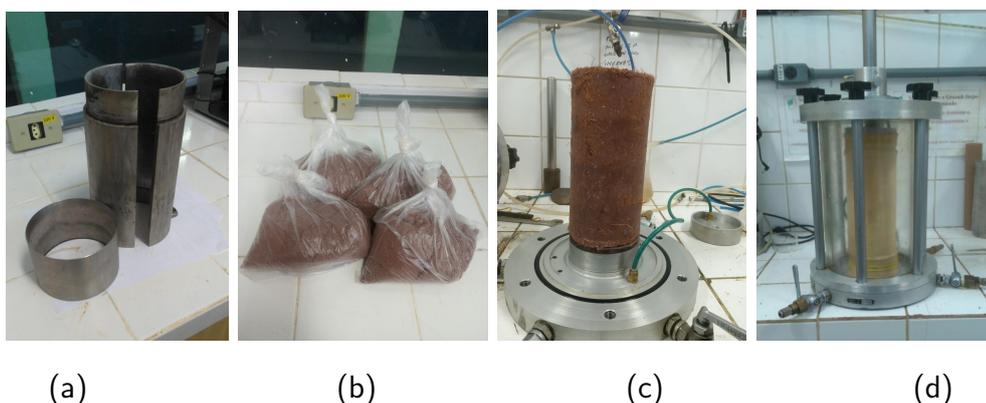
3.2.4 Ensaios triaxiais CD

Os ensaios triaxiais foram realizados na condição Consolidada Drenada (CD), com amostras preparadas nas condições ótimas de compactação da EPN. Foram utilizados corpos de prova com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, compactados em um molde bipartido (Figura 3.9 (a)), adaptados a um suporte. O compactador é constituído por um tarugo de aço 10 cm de diâmetro e 7 cm de altura. Com o auxílio dos índices físicos definidos no ensaio de compactação, a quantidade de solo necessária para uso no molde foi determinada. Para facilitar o processo de compactação o material foi separado em quatro camadas idênticas (Figura 3.9 (b)). As amostras então foram golpeadas até atingirem a altura pré estabelecida, as quais seguiam rigorosamente o índice de vazios

da condição ótima de compactação.

Para a montagem, o processo inicia-se com a extração do corpo de prova (CP) do molde bipartido e as aparas do material são retiradas para regularização da superfície da amostra e retirada de material para aferição da umidade. Em seguida, as dimensões do corpo de prova são determinadas com auxílio de um paquímetro e o corpo de prova é pesado. Após as etapas descritas, o CP é revestido por uma membrana látex e um filtro geotêxtil é colocado em sua base e no seu topo, a fim de evitar eventuais obstruções do sistema de drenagem pelo solo, (Figura 3.9 (c) e (d)). A amostra enfim é colocada na célula triaxial para início do ensaio.

Figura 3.9 – Preparação dos corpos de prova. (a) Molde bipartido. (b) Solo ensacado para compactação. (c) Corpo de prova compactado. (d) Corpo de prova na câmara triaxial

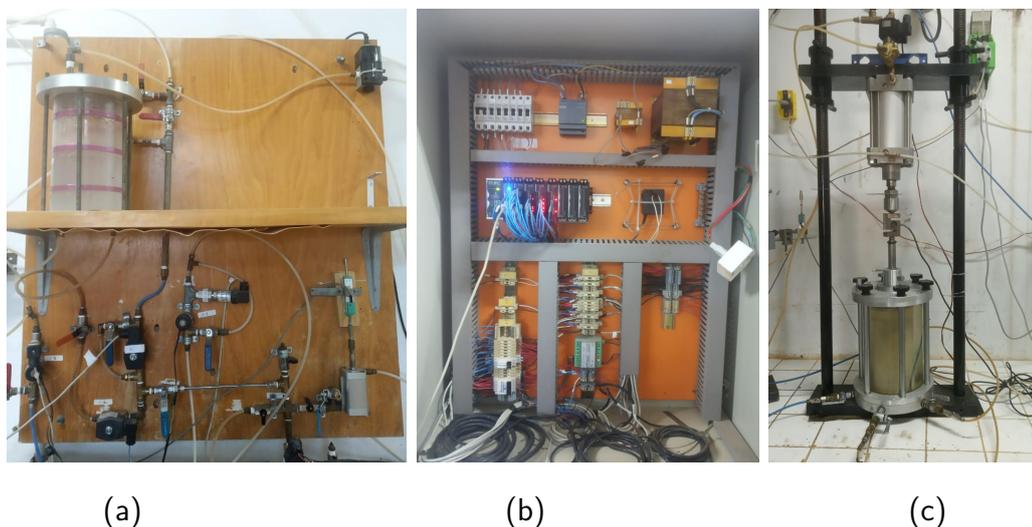


Fonte: Autor, 2022.

Os CP foram ensaiados em três tensões confinantes, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, com dois ensaios válidos, adotando a deformação axial de 20% como parâmetro para finalização do ensaio. Esses ensaios foram realizados no GEOAMB - UFBA, usando um sistema servo-controlado com aquisição de dados já existente no laboratório. O sistema automatizado é composto por uma parte mecânica e uma parte elétrica/eletrônica, ilustrado na Figura 3.10, que possui: controlador lógico programável, transdutores, válvulas, conexões, sistema para fornecimento de pressão, pistões hidráulicos e o programa supervisor SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), que monitora as variáveis do sistema de aquisição de dados. A prensa possui também controle de deformação por uma bomba dosadora com controle de vazão que aplica uma taxa de deslocamento constante ao corpo de prova. Para realização dos ensaios foram realizados ajustes e calibrações

dos instrumentos: células de carga, transdutores de pressão, válvulas e transdutores de deslocamento.

Figura 3.10 – Sistema servo controlado. (a) Aplicação e medições das pressões (b) Parte elétrica (c) Sistema mecânico



Fonte: Autor, 2022.

Os ensaios seguiram as recomendações de Head e Epps (2014). Os corpos de prova foram saturados, inicialmente, por percolação de água. Para isso, as amostras foram submetidas à uma tensão efetiva de cerca de 30 kPa, de forma a evitar a ocorrência de fluxo preferencial. O gradiente hidráulico foi imposto por um reservatório de água destilada e uma pressão de fluxo de cerca de 20 kPa foi aplicada, à carga constante. O fluxo ocorreu de baixo para cima, no sentido base-topo. Após a saturação dos corpos de prova, foram feitas as leituras das vazões para determinação da permeabilidade das amostras. Em seguida, as amostras foram levadas à prensa de Ensaio Triaxial para saturação por contrapressão, que tem objetivo de eliminar eventuais bolhas de ar existentes. Nesta etapa, o requisito adotado para continuação do ensaio é um parâmetro B de Skempton superior a 0,90.

Após a etapa de contrapressão, os CP eram enfim consolidados nas respectivas tensões confinantes. Nessa etapa, notou-se que as variações volumétricas por adensamento cessavam, em média, nos primeiros dez minutos de ensaio. A velocidade de ruptura dos corpos de prova foi determinada levando em consideração o tempo de consolidação do ensaio. Segundo Head e Epps (2014) a velocidade de cisalhamento em ensaios do

tipo CD deve corresponder a 8,6 vezes o tempo de consolidação, desde que o tempo de ruptura seja superior a 120 minutos. Na presente pesquisa, o tempo do cisalhamento seguiu a velocidade mínima recomendada; para as dimensões dos corpos de prova a taxa utilizada foi de 0,33 mm/min. Durante a aplicação da tensão desviadora, o programa solicita a inserção do parâmetro dq/dp para definir a trajetória de tensão desejada para o ensaio, controlando as tensões segundo a Equação 3.2.

$$\sigma_3 = \sigma_{3_0} + \frac{F_v}{A} \cdot \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{3} \right) \quad (3.2)$$

Na Equação 3.2: σ_{3_0} equivale ao valor da tensão confinante ao final do adensamento; $\alpha = dq/dp$ corresponde à trajetória de tensões adotada; A área do CP e F_v força aplicada pelo pistão no topo de amostra.

Além dos ensaios triaxiais convencionais, com trajetória $dq/dp = 3$, foram realizados ensaios com trajetória de tensões $dq/dp = -3$, para o solo puro e também para o compósito com teor de fibras de 1,0%, para melhor entendimento do comportamento tensão-deformação do solo e do compósito. Para execução dos ensaios com $dq/dp = -3$ foi definida a tensão confinante inicial de 100 kPa. Estes ensaios possibilitam uma melhor avaliação dos parâmetros elásticos do solo, pois a amostra é levada a ruptura praticamente de forma elástica, rompendo no lado esquerdo da linha de estados críticos.

Com estes ensaios foi possível avaliar o comportamento deste solo quanto a resistência ao cisalhamento de pico e residual, traçar as envoltórias de resistência e avaliar a variação volumétrica durante o ensaio.

3.2.5 Ensaio de compressão isotrópica

Foram realizados ensaios de compressão isotrópica ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) em corpos de prova compactados com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, moldados no índice de vazios obtido para a condição de umidade ótima e massa específica seca máxima na Energia do Proctor Normal. A preparação dos corpos de prova seguiu o descrito na Subseção 3.2.4.

Esses ensaios foram realizados, em duplicata, na prensa de ensaios triaxiais, seguindo

parte da rotina desse ensaio. Como já comentado anteriormente, a prensa possui sistema com aquisição direta de dados e permite leituras de variação de volume. Após a consolidação do corpo de prova na respectiva confinante, foi aplicado um aumento gradativo no confinamento, na seguinte sequência: 0, 40, 80, 160, 320 e 640 kPa.

3.3 Estudo do comportamento mecânico dos compósitos

3.3.1 Preparação das misturas dos compósitos

Na presente pesquisa, os compósitos foram compactados no mesmo índice de vazios do solo obtido no Ensaio de Compactação na Energia Normal ($e=0,383$). Para isso, a fibra foi considerada como parte dos sólidos e a Equação 3.3 foi utilizada para obtenção do peso específico dos sólidos dos compósitos para diferentes teores de fibra.

$$\gamma_{sc} = \frac{(1 + \%_f) \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{sf}}{\gamma_{sf} + (\gamma_s \cdot \%_f)} \quad (3.3)$$

Onde:

γ_{sc} : peso específico dos sólidos do compósito (kN/m^3);

γ_s : peso específico dos grãos do solo (kN/m^3);

γ_{sf} : peso específico da fibra (kN/m^3);

$\%_f$: teor de fibras (%).

Mantendo-se o índice de vazios constante (0,383) e com os respectivos valores de massa específica dos sólidos para os diferentes compósitos, foi possível determinar a massa específica seca corresponde para cada teor de fibra, como mostra a Tabela 3.1. Dessa maneira, o presente trabalho tem compósitos com o mesmo índice de vazios e constituídos com distintas concentrações de fibra de coco, sendo essas em função da massa seca das amostras: 0% (solo puro), 0,5%, 1,0% e 1,5%. Os percentuais de fibra foram definidos com base na literatura existente.

Para preparação das misturas, o solo foi molhado em sua umidade ótima, obtida no ensaio de compactação e ensacado por 24 h. As fibras foram colocadas em estufa a 70°C por 24 h, para garantir que a massa utilizada seja livre de água e portanto, toda a massa incorporada seja apenas referente a fibra seca.

Após a conferência de umidade do solo e secagem das fibras, os materiais foram pesados e separados em quatro partes, onde cada uma correspondia a uma camada do processo de compactação. A porção de solo e fibra de cada camada foi homogenizada em uma bandeja, individualmente, antes da compactação, para garantir que todas as camadas tivessem a mesma quantidade de fibra, possibilitando a obtenção de amostras homogêneas. A compactação dos corpos de prova seguiu o mesmo processo descrito anteriormente, Subseção 3.2.4.

Tabela 3.1 – Valores obtidos para massa específica dos sólidos dos compósitos e massa específica seca do compósito em função do teor de fibra estudado.

Teor de fibra (%)	Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	Massa específica seca do compósito (g/cm ³)
0	2,676	1,936
0,5	2,665	1,928
1,0	2,655	1,921
1,5	2,645	1,914

Fonte: Autor, 2022.

Trabalhabilidade e preparação das amostras

Nos procedimentos de mistura e homogeneização das fibras ao solo foi possível observar alguns fatores relacionados à trabalhabilidade das amostras:

- Os teores de 0,5% e 1,0% mostraram facilidade para mistura e as fibras se distribuíram de maneira mais homogênea.
- O teor de 1,5% mostrou grande dificuldade de homogeneização. Para esse teor há um grande volume de fibras no compósito e a distribuição das mesmas pelo corpo de prova não ocorre mais de forma homogênea como nos teores menores.

A Figura 3.11 apresenta um corpo de prova com o teor de 1,5% compactado. Nota-se a grande presença de fibras na amostra e uma certa aglomeração em alguns pontos. Contudo, a distribuição permanece aparentemente aleatória e sem planos preferenciais de acomodação.

Como a metodologia empregada neste trabalho consiste da manutenção do índice de vazios constante, a energia empregada na compactação mudou em cada compósito. Observou-se a necessidade de um número maior de golpes nas camadas com o aumento do teor de fibras, o que pode ser explicado pela capacidade de absorção de energia pelo reforço.

Figura 3.11 – Corpo de prova com teor de 1,5%. (a) Vista do corpo de prova em planta (b) Vista frontal.



Fonte: Autor, 2022.

3.3.2 Ensaios de Índice de Suporte Califórnia.

A técnica utilizada na compactação dos CP para este ensaio seguiu, de modo similar, o processo empregado para realização dos CPs para os ensaios triaxiais (Subseção 3.2.4). Foi utilizado o mesmo compactador (tarugo de aço de 10 cm de diâmetro e 7 cm de altura), porém com compactação manual, sem o auxílio do dispositivo de aplicação dos golpes. Os CP foram moldados em 3 camadas, controlando a massa compactada até atingir a altura necessária para obter o índice de vazios desejado. A quantidade de camadas baseou-se na altura útil do cilindro, de forma que cada uma possuísse altura similar as usadas nos corpos de prova moldados para os ensaios triaxiais. Após a moldagem das amostras, o procedimento foi análogo ao apresentado na Subseção 3.2.3, com imersão da amostra em água por 96 h e seguida de ruptura.

3.3.3 Ensaios triaxiais CD

Foram realizados ensaios triaxiais tipo CD em amostras de compósitos com três concentrações de fibra sem tratamento em relação a massa seca do solo 0,5%, 1,0% e 1,5%.

O teor de 1,0% foi adotado para o uso dos compósitos com fibras tratadas (hornificação, mercerização e a combinação delas, hornificação+mercerização. Conforme descrito em Subseção 3.1.5), três confinantes (50kPa, 100kPa e 200kPa) e duas repetições válidas foram empregadas. Os compósitos foram moldados com o mesmo índice de vazios do solo quando compactado na umidade ótima e massa específica seca máxima da energia do Proctor Normal e as quantidades de solo e fibra para cada teor foram determinadas seguindo o procedimento descrito na Subseção 3.3.1. A Figura 3.12 ilustra etapas da preparação das amostras.

Figura 3.12 – Preparação dos corpos de prova. (a) Solo e fibras preparados para mistura. (b) Solo misturado às fibras. (c) Corpo de prova compactado pronto para ser retirado do molde. (d) Corpo de prova pronto para ensaio.



Fonte: Autor, 2022.

3.4 Aplicação do modelo semi-empírico de Machado et al. (2022)

No trabalho realizado por Machado et al. (2022) os autores compilaram uma série de dados de ensaios triaxiais de solos reforçados com fibras existentes na literatura, buscando avaliar mecanismos de mobilização do reforço. Assim, propuseram um modelo que estima a tensão desviadora de um solo reforçado com fibras a partir de dados de ensaios do solo sem reforço e de características da fibra.

As informações necessárias da fibra utilizada são: teor, comprimento, diâmetro, módulo de rigidez, densidade e resistência à tração.

Do solo, são necessários os dados de: índice de plasticidade, coeficiente de uniformidade (C_u), D_{50} , tensão desviadora, com as respectivas tensões confinantes e índice de vazios das amostras, coesão e ângulo de atrito obtidos através de ensaios triaxiais CD

no solo sem reforço.

Após a realização dos ensaios triaxiais no solo sem reforço e reforçado nos diferentes teores (0,5; 1,0 e 1,5%), os dados obtidos experimentalmente foram aplicados ao modelo, a fim de testar a sua adequabilidade na previsão da tensão desviadora na ruptura das amostras de solo reforçadas com fibras de coco.

Com os dados obtidos experimentalmente, iniciou-se a simulação. Para isso a quantidade relativa de tensão desviadora suportada pelas fibras ($f_{m,f}$) foi determinada utilizando a Equação 2.4. Foi necessário determinar o valor da função logística f_{bd} e a variável x_f , utilizando Equação 2.6 e Equação 2.7.

3.5 Aplicação do modelo constitutivo de Machado, Carvalho e Vilar (2002) adaptado para solo reforçado

A aplicação do modelo constitutivo de Machado, Carvalho e Vilar (2002) adaptado para solo reforçado foi feita com auxílio de uma planilha eletrônica. De forma geral, o modelo requer alguns parâmetros do solo, tais como, λ , κ , Γ , ϕ' (na condição de estado crítico), p_o , e_s e ν_s , que foram obtidos nos ensaios triaxiais realizados no solo sem reforço. Os ensaios realizados em amostras reforçadas foram usados para definição dos parâmetros a_{ff} e ν_f . Os parâmetros da fibra foram determinados através dos ensaios de laboratório descritos anteriormente.

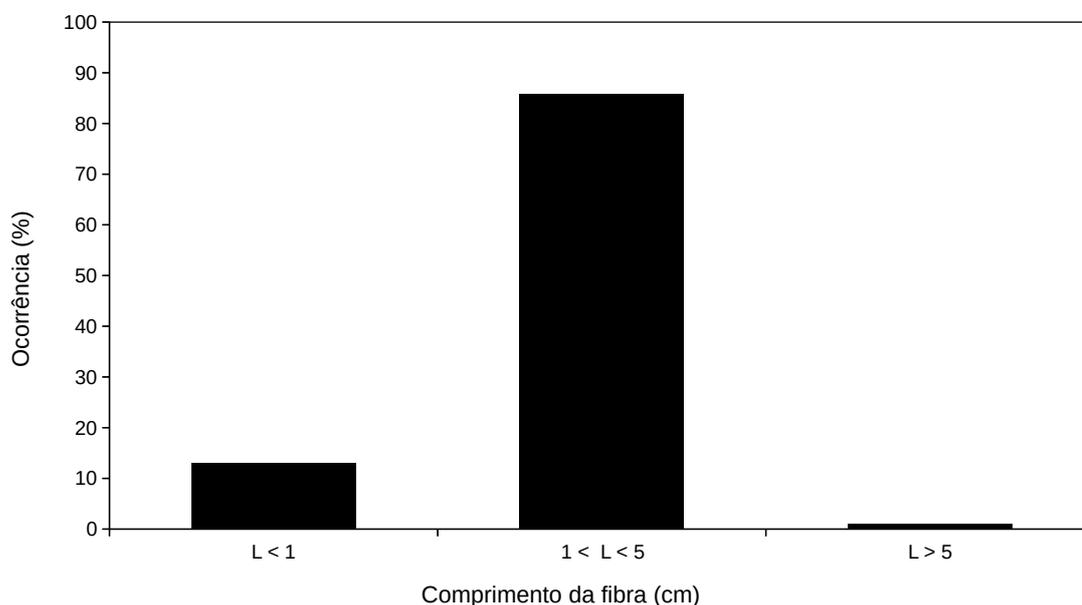
4 RESULTADOS

4.1 Fibras de coco

4.1.1 Composição gravimétrica

A Figura 4.1 apresenta os percentuais médios de ocorrência para os comprimentos de fibras nas três amostras estudadas. Nota-se que a maior parte das fibras (cerca de 86%) têm comprimento entre 1 e 5 cm. Aproximadamente 13% das fibras apresentam comprimentos inferiores a 1 cm e apenas 1% possuem comprimentos superiores a 5 cm. Os resultados encontrados são semelhantes aos obtidos por Oliveira (2018), que também realizou uma pesquisa com fibras de coco, dividindo-as em faixas de comprimentos. Esse autor encontrou cerca de 80% da massa das suas fibras entre 1 e 5 cm de comprimento e cerca de 16% da massa era composta por fibras inferiores a 1 cm.

Figura 4.1 – Ocorrência dos comprimentos das fibras de coco estudadas.



Fonte: Autor, 2022.

4.1.2 Caracterização química das fibras

A Tabela 4.1 mostra os resultados médios da composição química das fibras obtidos com o ensaio de ensaio de FRX. Observa-se que as fibras são compostas essencialmente

por cloro, potássio, cálcio e silício.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de FRX da fibra de coco.

Elemento	AM 01	AM 02	AM 03
	Média (%)	Média (%)	Média (%)
Cl	52,00	57,01	61,11
K	21,01	18,57	20,02
Ca	3,60	1,09	0,97
Si	2,73	3,50	0,61
Fe	0,60	0,56	0,75
Se	0,19	0,15	0,15
Mo	0,49	0,43	0,45
Ag	0,09	-	0,05
Sn	0,05	0,05	-
Sb	0,05	0,12	-
Th	0,03	-	-
Co	-	0,02	-
Ba	-	-	0,32

Fonte: Autor, 2022.

4.1.3 Ensaio de tração direta

Os valores médios de resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura obtidos das seis amostras ensaiadas para cada condição de fibra, natural e tratada, com seus respectivos desvios (valor entre parênteses) são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de tração direta na fibra de coco com os seus respectivos desvios.

Tratamento	Nº de amostras	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Não tratada	6	75,98 (8,57)	7,41 (4,98)	14,18 (5,51)
Hornificada	6	123,08 (27,63)	13,96 (4,06)	9,15 (1,73)
<i>NaOH</i>	6	67,49 (15,51)	6,79 (2,59)	10,34 (3,54)
Hornificada + <i>NaOH</i>	6	89,34 (12,31)	7,84 (6,27)	11,23 (2,09)

Fonte: Autor, 2022.

A resistência a tração de fibras naturais é bastante estudada, e a literatura aponta uma grande variabilidade nos resultados. Essa discrepância pode estar relacionada a alguns fatores, como diâmetros variáveis e irregulares, comprimento da fibra, velocidade do ensaio, distância entre garras do equipamento, precisão da célula de carga, entre outros, como reportado por Tomczak, Satyanarayana e Sydenstricker (2007), Fidelis (2014) e Silveira (2018). A resistência à tração média obtida para as fibras de coco ensaiadas neste trabalho (aproximadamente de 76 MPa) está próxima da encontrada por Anggraini et al. (2016). O módulo de elasticidade obtido neste trabalho (7,4 GPa) é levemente superior aos encontrados na literatura (normalmente situam-se entre 2 e 6 GPa). O alongamento na ruptura, em torno de 15% aproxima-se dos trabalhos de Toledo et al. (2005) e Li, Wang e Wang (2007).

Os tratamentos utilizados alteraram as propriedades mecânicas das fibras. A hornificação elevou a resistência à tração da fibra em mais de 60%. Isto pode estar associado à redução da seção transversal causada pelo tratamento, o que aumenta a tensão para um mesmo valor de força. O módulo de elasticidade cresceu de forma considerável (quase 2 vezes), enquanto o alongamento na ruptura reduziu em mais de 30%, que pode estar associado ao enrijecimento da estrutura polimérica da fibra.

Para as fibras tratadas com *NaOH* houve redução da resistência à tração em pouco mais de 10%. O módulo de elasticidade reduziu cerca de 10% e o alongamento na ruptura reduziu em pouco menos de 30% em comparação à fibra não tratada. Em relação às fibras tratadas com hornificação e *NaOH*, houve aumento de aproximadamente 15% da resistência à tração, comparado com a fibra natural. O módulo de elasticidade foi praticamente o mesmo e o alongamento na ruptura reduziu cerca de 20% em relação à fibra não tratada.

O tratamento com *NaOH* pode ter danificado parte da superfície da fibra, o que acarretou em menor resistência à tração. Por outro lado, a combinação dos dois tratamentos pode ter agido de forma diferente, visto que a hornificação altera previamente a superfície da fibra, podendo alterar a ação do *NaOH* na fibra.

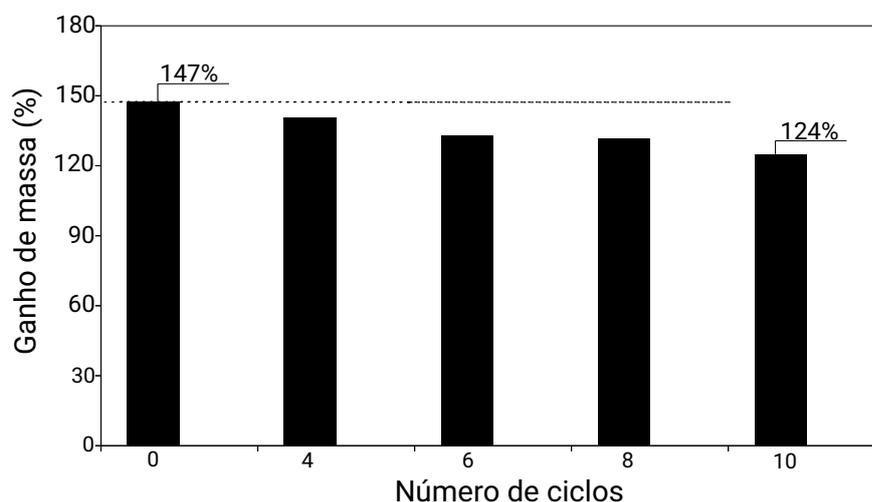
4.1.4 Ensaio de massa específica das fibras

A fibra de coco estudada apresenta massa específica de $1,492 \text{ g/cm}^3$. O valor obtido é superior ao reportado por Bledzki e Gassan (1999), Motta e Agopyan (2007) e Oliveira (2018), que encontraram valores de aproximadamente $1,2 \text{ g/cm}^3$ e se aproxima dos reportados por Anggraini et al. (2015) e Anggraini et al. (2016), que apontam valores de massa específica de $1,4 \text{ g/cm}^3$. A variação encontrada pode ser explicada pela variabilidade das fibras, da idade do fruto e da região onde foi cultivada.

4.1.5 Capacidade de absorção de água e Tratamento das fibras

Conforme mencionado na Subseção 3.1.5, o ensaio de absorção de água foi realizado para as fibras hornificadas com quatro, seis, oito e dez ciclos. A Figura 4.2 ilustra os resultados de ganho de massa das fibras, em 24h, após esses ciclos de hornificação. Como pode ser visto, a absorção de água das fibras reduziu conforme aumenta-se a quantidade de ciclos de molhagem e secagem. A partir destes resultados, convencionou-se 10 ciclos como o ideal para realização do tratamento de hornificação.

Figura 4.2 – Ganho de massa em 24h após alguns ciclos de hornificação.

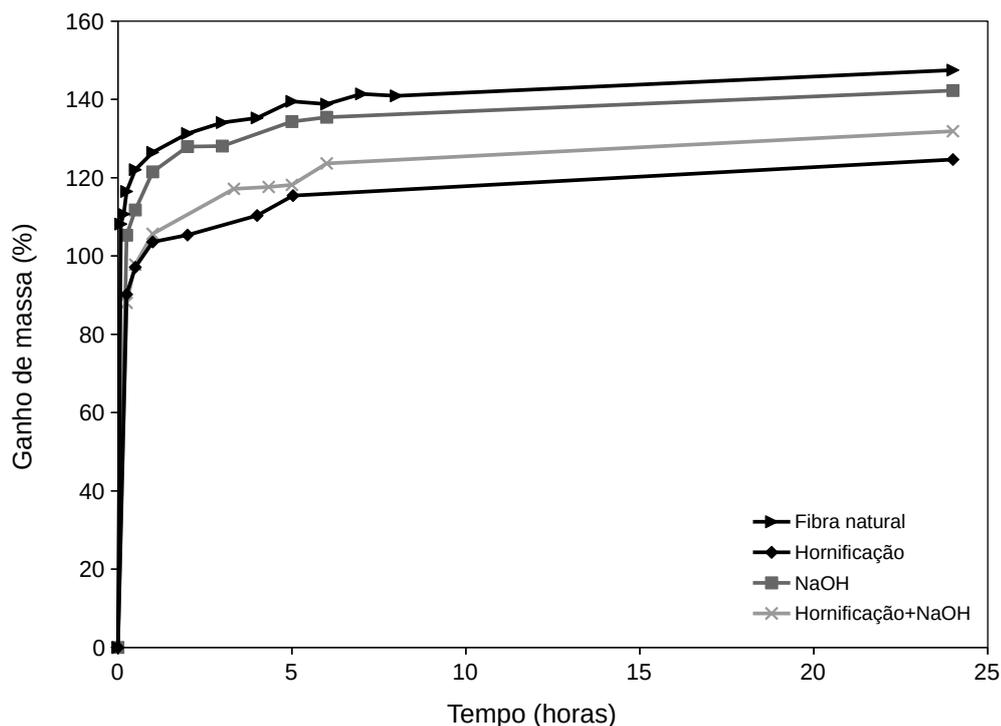


Fonte: Autor, 2022.

A Figura 4.3 apresenta os resultados de ganho de massa ao longo do tempo da fibra na condição natural e após alguns tratamentos. A fibra de coco sem tratamento teve um ganho de massa de até 147% após submersão de 24 h. Esses resultados são

similares à pesquisa de Priya, Raju e Naveen (2014), onde as fibras de coco estudadas atingiram entre 130 e 180% de ganho de massa. Porém, destoam da pesquisa realizada por Savastano e Agopyan (1999), onde a fibra de coco analisada por esses autores ganhou apenas 80% de massa após 24 h de imersão.

Figura 4.3 – Ganho de massa da fibra em 24h após tratamentos.



Fonte: Autor, 2022.

Com dez ciclos de hornificação a absorção de água das fibras caiu para 124%, demonstrando sutil melhoria nessa propriedade com o uso desse tratamento. A redução encontrada no presente trabalho aproxima-se da pesquisa de Claramunt et al. (2011). Esses autores testaram a influência da hornificação na absorção de água de fibras de polpa de celulose, reduzindo a absorção de água de 126% para 90%.

Nas três primeiras horas de imersão a fibra alcançou aproximadamente 90% da capacidade total de absorção. Este comportamento foi similar à pesquisa de Santos (2020), com fibras de sisal.

Nota-se que o tratamento com $NaOH$ teve praticamente o mesmo comportamento da fibra não tratada, reduzindo a absorção de 147% para 145%. A combinação de $NaOH$ com hornificação, houve uma redução da absorção de água pouco mais pronun-

ciada, de 147% para 131%.

4.2 Solo Barreiras

4.2.1 Ensaios de caracterização geotécnica

A Figura 4.4 apresenta as curvas de distribuição granulométrica obtidas de quatro amostras analisadas, enquanto a Tabela 4.3 traz resultados médios da caracterização e da compactação do solo estudado.

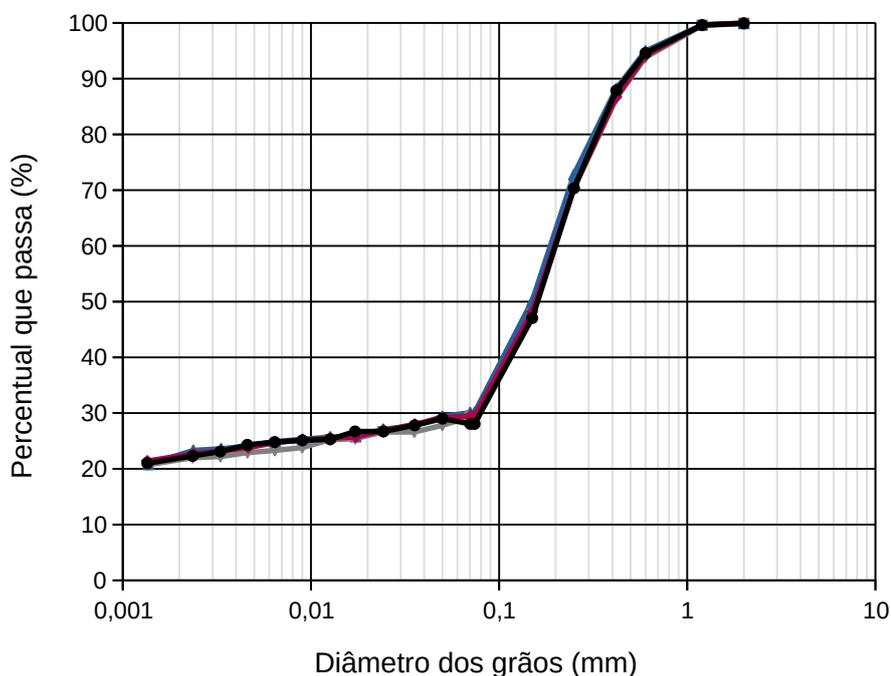
O solo Barreiras tem aproximadamente 70% de areia em sua composição, sendo classificado de acordo com a USCS (Unified Soil Classification System), como SM (areia siltosa) e como A-2-4 pela HRB. Apresenta valor médio de massa específica dos grãos de 2,676 g/cm³, que está de acordo com os publicados por Sousa (2012) e Cerqueira (2016). O material é pouco plástico (IP= 4%) e inativo (atividade de Skempton de 0,16). Essa formação apresenta solos com composição que varia de materiais não plásticos (CERQUEIRA, 2016) até plásticos de média atividade (SOUSA, 2012). Obteve-se da compactação do solo na energia do Proctor Normal uma umidade ótima de 11,05% e massa específica seca máxima de 1,936 g/cm³.

Tabela 4.3 – Resultados médios dos ensaios de caracterização geotécnica

Solo Barreiras	Média	Desvio
Areia Grossa (%)	6	0,577
Areia Média (%)	34	1,155
Areia Fina (%)	30	0,957
Silte (%)	8	0,577
Argila (%)	23	0,577
ρ_s (g/cm ³)	2,676	0,016
Limite de liquidez (%)	21	0,957
Limite de plasticidade (%)	17	0,500
Índice de plasticidade (%)	4	1,291
Atividade de Skempton	0,156	0,056
Umidade ótima (%)	11,05	0,087
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,936	0,015

Fonte: Autor, 2022.

Figura 4.4 – Curva granulométrica do solo estudado.



Fonte: Autor, 2021.

4.2.2 Caracterização química do solo

A Tabela 4.4 mostra os resultados médios da composição química de três amostras de solo submetidas ao ensaio de FRX. Observa-se que silício, alumínio, magnésio e cloro são os elementos predominantes no solo estudado.

4.2.3 Ensaio de I.S.C.

A Figura 4.5 mostra os resultados dos I.S.C. realizados para todos pontos da curva de compactação, para duas amostras e a Tabela 4.5 são apresentados todos os resultados ISC com amostras moldadas na condição de umidade ótima e massa específica seca máxima obtida da compactação na EPN. A capacidade de suporte média obtida para o solo puro é de 33% na condição de umidade ótima e nenhuma expansão foi medida. Como esperado, à medida que os teores de umidade se afastam da umidade ótima o valor de I.S.C. decresce, principalmente nos pontos do ramo úmido da curva.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de FRX do solo barreiras.

Elemento	AM 01	AM 02	AM 03
	Média (%)	Média (%)	Média (%)
Si	23,62	22,49	25,58
Al	16,37	18,18	14,68
Mg	2,90	2,05	1,41
Cl	2,82	3,23	4,03
Co	1,86	1,95	2,41
Fe	1,33	1,47	1,91
Ca	1,48	0,70	1,31
Ti	1,76	1,65	1,83
Ag	0,50	0,57	0,96
Mo	0,19	0,21	0,27
Se	0,13	0,14	0,25
Mn	0,09	0,17	-
Sb	0,07	0,04	-
Ba	-	0,147	0,44

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de ISC.

Corpo de prova	I.S.C. (%)	Expansão
A	37	-
B	34	-
C	29	-
D	36	-
E	31	-
Média	33	-
Desvio	3,36	-

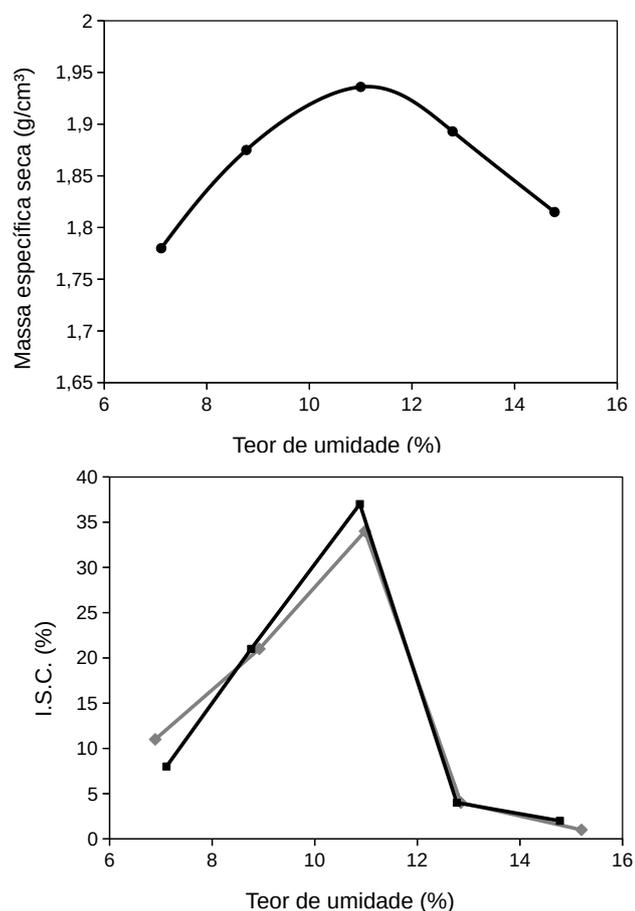
Fonte: Autor, 2022.

4.2.4 Ensaios Triaxiais CD

Os resultados dos ensaios triaxiais realizados para o solo, nas três confinantes estudadas, são apresentados na Figura 4.6. Nota-se a partir das curvas tensão-deformação, conforme esperado, aumento da tensão desviadora com o crescimento da tensão de confinamento. Para as tensões confinantes de 50 e 100 kPa nota-se uma leve formação de pico, o que não ocorre na maior confinante adotada. As amostras comportam-se de forma similar aos solos pré-adensados, o que pode ser explicado pela tensão imposta na compactação. O comportamento volumétrico do material também seguiu o comportamento de amostras pré-adensadas, as quais comprimem levemente no início do

ensaio e em seguida experimentam dilatação, especialmente nas menores pressões de confinamento.

Figura 4.5 – Curva de compactação e resultados de I.S.C.

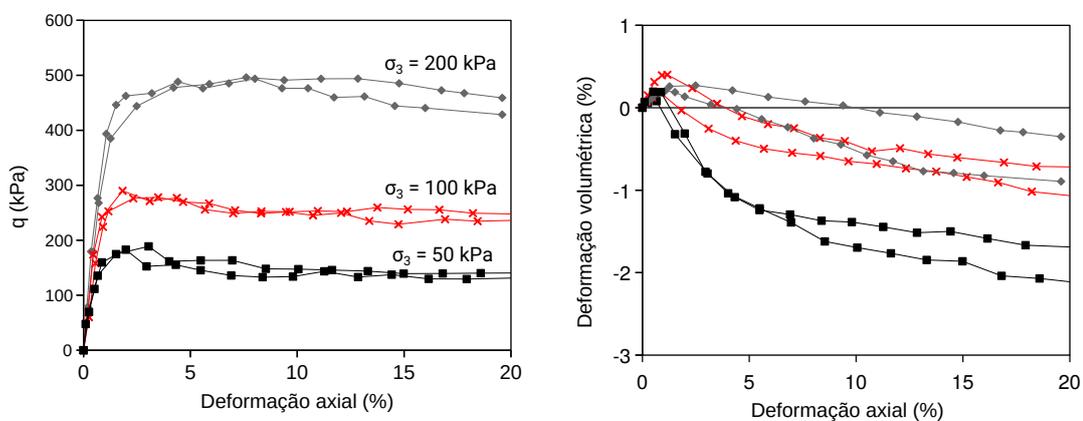


Fonte: Autor, 2022.

Nos ensaios realizados foi possível notar uma diferença na forma de ruptura dos corpos de prova de acordo a tensão de confinamento (Figura 4.7). Nas tensões confinantes de 50 e 100 kPa os corpos de prova apresentaram um plano bem definido de cisalhamento. Já para tensão de confinamento de 200 kPa, os corpos de prova apresentaram ruptura plástica, com um certo "embarrigamento" na parte superior.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para o solo foram de aproximadamente 31° de ângulo de atrito e 20 kPa para coesão. A envoltória de ruptura do solo encontra-se no Apêndice A do presente trabalho.

Figura 4.6 – Curvas tensão - deformação e deformação volumétrica x axial para o solo compactado.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 4.7 – Forma de ruptura do solo estudado: (a) Amostras com 50 e 100 kPa de tensão confinante; (b) Amostras com 200 kPa de tensão confinante.



(a)

(b)

Fonte: Autor, 2022.

4.2.5 Ensaios de Compressão Isotrópica

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão isotrópica serão apresentados na Seção 4.6, plotada junto à CSL obtida para o solo estudado.

4.3 Material compósito

4.3.1 Ensaios de Índice de Suporte Califórnia

A Tabela 4.6 apresenta os valores obtidos nos ensaios de Índice de Suporte Califórnia do solo puro e reforçado. Nenhuma das amostras apresentou expansão. A amostra reforçada com 0,5% apresentou pequeno aumento no valor de I.S.C., saindo de um valor médio de 33% para média de 39%, cerca de 18% de ganho. As amostras reforçadas com teor de 1,0% apresentaram I.S.C. médio de aproximadamente 57%, indicando um ganho de pouco mais 70% em relação ao solo não reforçado. Já as amostras reforçadas com o teor de 1,5% apresentaram I.S.C. médio de aproximadamente 56%, um ganho médio de quase 70%.

Tabela 4.6 – Valores de Índice de Suporte Califórnia do solo e material compósito.

Corpo de prova	Teor (%)							
	0,0		0,5		1,0		1,5	
	I.S.C.	Expansão	I.S.C.	Expansão	I.S.C.	Expansão	I.S.C.	Expansão
A	37	-	33	-	58	-	58	-
B	34	-	38	-	57	-	58	-
C	29	-	40	-	54	-	56	-
D	36	-	43	-	57	-	50	-
E	31	-	39	-	58	-	54	-
Média	33	-	39	-	57	-	56	-
Desvio	3,36	-	3,65	-	1,64	-	2,00	-

Fonte: Autor, 2022.

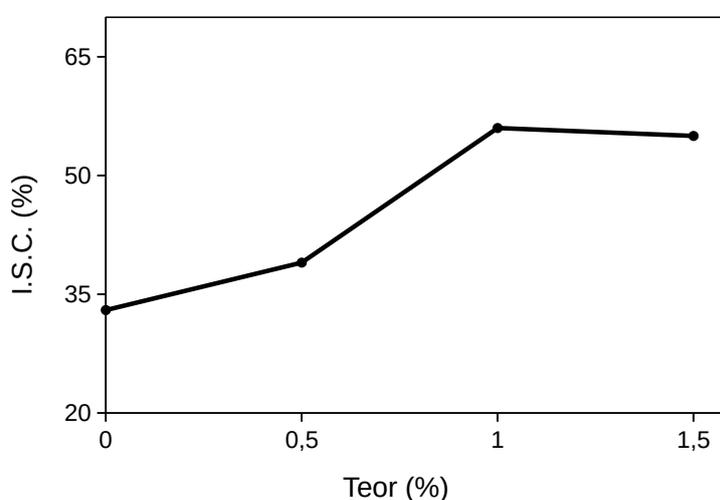
Apesar do grande ganho de ISC com a adição de fibras, especialmente nos teores de 1,0 e 1,5%, o valor atingido ainda não é suficiente para o uso do compósito em bases de pavimento, pois para essa aplicação o material deve possuir ISC de pelo menos 80%. Por outro lado, mesmo o solo não reforçado apresenta propriedade adequada para sua aplicação como sub-base de pavimentos (ISC > 20%).

A Figura 4.8 apresenta, para efeito de ilustração, os valores médios de ISC dos compósitos em função do teor de fibras. Como discutido na Seção 2.1 no capítulo de revisão bibliográfica, a melhoria de uma propriedade de um solo reforçado com fibras acontece com o aumento do teor até um limite e varia conforme as propriedades da matriz e do reforço. Ayininuola e Oladotun (2016) e Butt, Mir e Jha (2016) também encontraram valores similares de I.S.C. para amostras reforçadas com 1,0 e 1,5% de

fibras.

Os resultados obtidos neste trabalho para o teor de 0,5% estão abaixo dos encontrados por Ayininuola e Oladotun (2016), que estudando um solo arenoso com ISC natural de 32%, obteve melhora de 47% no ISC para o solo reforçado com o teor de 0,5% de fibra de coco. Por outro lado, o ganho de capacidade de suporte observado para os teores de 1,0 e 1,5% assemelham-se aos encontrados por Ayininuola e Oladotun (2016), que obtiveram ISC médio de 56% e 58% para os teores de 1,0 e 1,5%, respectivamente.

Figura 4.8 – ISC dos compósitos em função do teor de fibra.



Fonte: Autor, 2022.

4.3.2 Ensaios Triaxiais CD

Comparativo da permeabilidade das amostras ensaiadas

Para a execução dos ensaios triaxiais as amostras foram saturadas e seus coeficientes de permeabilidade foram determinados a fim controlar as características de moldagem, bem como analisar se a inclusão das fibras tem alguma influência na permeabilidade das amostras. A Tabela 4.7 apresenta os valores de coeficiente de permeabilidade, desvio padrão e coeficiente de variação das amostras com 0; 0,5; 1,0 e 1,5% de fibras, respectivamente. As amostras possuem permeabilidade da ordem de $5E-05$ cm/s, dentro da faixa de areias siltosas compactadas. A Tabela 4.8 apresenta os valores de coeficientes

de permeabilidade obtidos dos ensaios com amostras reforçadas com 1% de fibras com e sem tratamentos.

Tabela 4.7 – Coeficiente de permeabilidade (cm/s) de CP moldados em diferentes teores de fibra.

Corpo de prova	Teor (%)			
	0,0	0,5	1,0	1,5
A	5,35E-05	4,05E-05	6,86E-05	2,97E-05
B	7,81E-05	5,02E-05	3,72E-05	5,14E-05
C	5,97E-05	3,78E-05	3,87E-05	3,87E-05
D	3,50E-05	4,68E-05	7,42E-05	5,22E-05
E	7,37E-05	7,28E-05	2,17E-05	7,30E-05
F	2,11E-05	4,42E-05	4,29E-05	5,18E-05
Média	5,35E-05	4,87E-05	4,72E-05	4,95E-05
Desvio padrão	2,21E-05	1,25E-05	2,03E-05	1,64E-05
C.V.	0,4131	0,2585	0,4265	0,3383

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 4.8 – Coeficiente de permeabilidade (cm/s) de CP moldados com 1% de fibras tratadas e não tratadas.

Corpo de prova	Tipo de tratamento			
	Sem tratamento	Hornificação	NaOH	Hornificação.+NaOH
A	6,86E-05	5,96E-05	7,12E-05	6,03E-05
B	3,72E-05	4,46E-05	5,29E-05	6,61E-05
C	3,87E-05	4,62E-05	4,32E-05	3,04E-05
D	7,42E-05	6,01E-05	4,66E-05	4,32E-05
E	2,17E-05	4,43E-05	3,72E-05	5,95E-05
F	4,29E-05	6,89E-05	6,65E-05	2,14E-05
Média	4,72E-05	5,39E-05	5,29E-05	4,68E-05
Desvio Padrão	2,01E-05	1,03E-05	1,34E-05	1,81E-05
C.V.	0,4265	0,1914	0,2535	0,3872

Fonte: Autor, 2022.

Da Tabela 4.7 é possível notar que não houve variações significativas na permeabilidade das amostras com o implemento de fibras. Isso já era esperado, visto que as amostras foram moldadas com índice de vazios constante, padrão similar às pesquisas de Pinto (2021) e Conceição (2021). Em geral, a adição de fibras aumenta a permeabilidade do compósito, pois a introdução do reforço aumenta a porosidade e cria caminhos preferenciais de fluxo, o que não é o caso do presente trabalho. O tratamento das fibras também não alterou de forma significativa o coeficiente de permeabilidade das amostras (Tabela 4.8).

Curvas tensão-deformação e variação volumétrica do solo reforçado

A Figura 4.9 apresenta curvas tensão-deformação e deformação volumétrica do solo reforçado nas diferentes tensões confinantes. Observa-se que o aumento do teor de fibra promove ganho de resistência do solo.

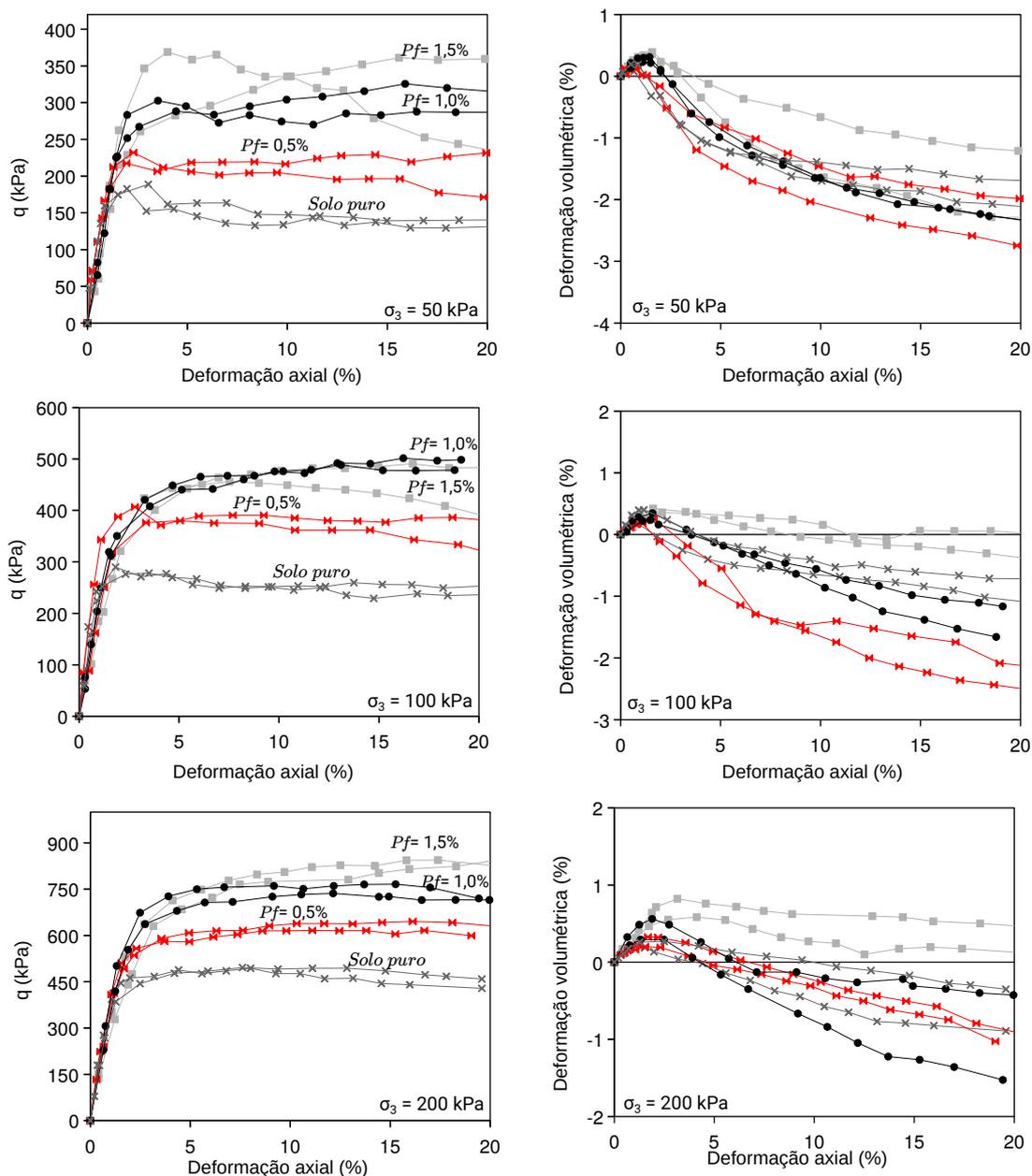
Em relação às curvas tensão-deformação, nota-se, conforme esperado, que o aumento do teor de fibras influi diretamente no aumento de resistência. Para o solo e fibra estudados, observa-se um ganho de resistência significativo entre os teores de 0,5 e 1,0%. Entretanto, o aumento do teor de fibras para 1,5% não acarretou em ganhos relevantes de resistência. As amostras com essa concentração apresentaram resistência similar à concentração de 1,0%. A melhoria nas propriedades dos compósitos com o implemento de fibras, até um limite, é corriqueiro na literatura. Com fibras de coco, autores como Kar, Pradhan e Naik (2014), Ayininuola e Oladotun (2016), Oliveira (2018), Menezes et al. (2019) observaram comportamento similar.

Em relação ao comportamento volumétrico dos compósitos estudados, analisando um mesmo teor de fibras em diferentes confinantes, nota-se uma característica bem definida, onde maiores confinantes apresentam menor dilatância. Todos os corpos de prova ensaiados se comportam volumetricamente como amostras pré adensadas (leve compressão seguido de dilatância).

No que diz respeito à influência do teor de fibras no comportamento volumétrico do compósito, nota-se que para os teores de 0; 0,5 e 1,0% não há uma mudança bem definida na variação volumétrica com a mudança de concentração das fibras. Comportamento similar ao de Aguilar (2015), que em sua pesquisa com solo arenoso e fibras de coco

também não encontrou um comportamento bem definido na variação volumétrica.

Figura 4.9 – Curvas tensão deformação e variação de volume para compostos com diferentes teores de fibra e diferentes confinantes.



Fonte: Autor, 2022.

Entretanto, para o teor de 1,5% houve uma clara mudança de comportamento na variação volumétrica, especialmente para as confinantes de 100 e 200 kPa. Nessa concentração, os corpos de prova confinados com 100 kPa apresentaram leve compressão no início do ensaio, seguido de uma suave dilatância, de forma que ao fim do ensaio as

amostras apresentaram variação volumétrica quase nula.

Para o confinamento de 200 kPa as amostras apresentaram somente compressão. Um comportamento similar na variação volumétrica do compósito foi observado por Pinto (2021), com areia reforçada com fibras de polipropileno. Nos teores mais elevados com maior confinante, o solo reduziu a dilatância ou apenas comprimiu ao longo do ensaio. É possível observar também que para maior tensão confinante utilizada, com o aumento do teor de fibras houve maior variabilidade na variação volumétrica das amostras.

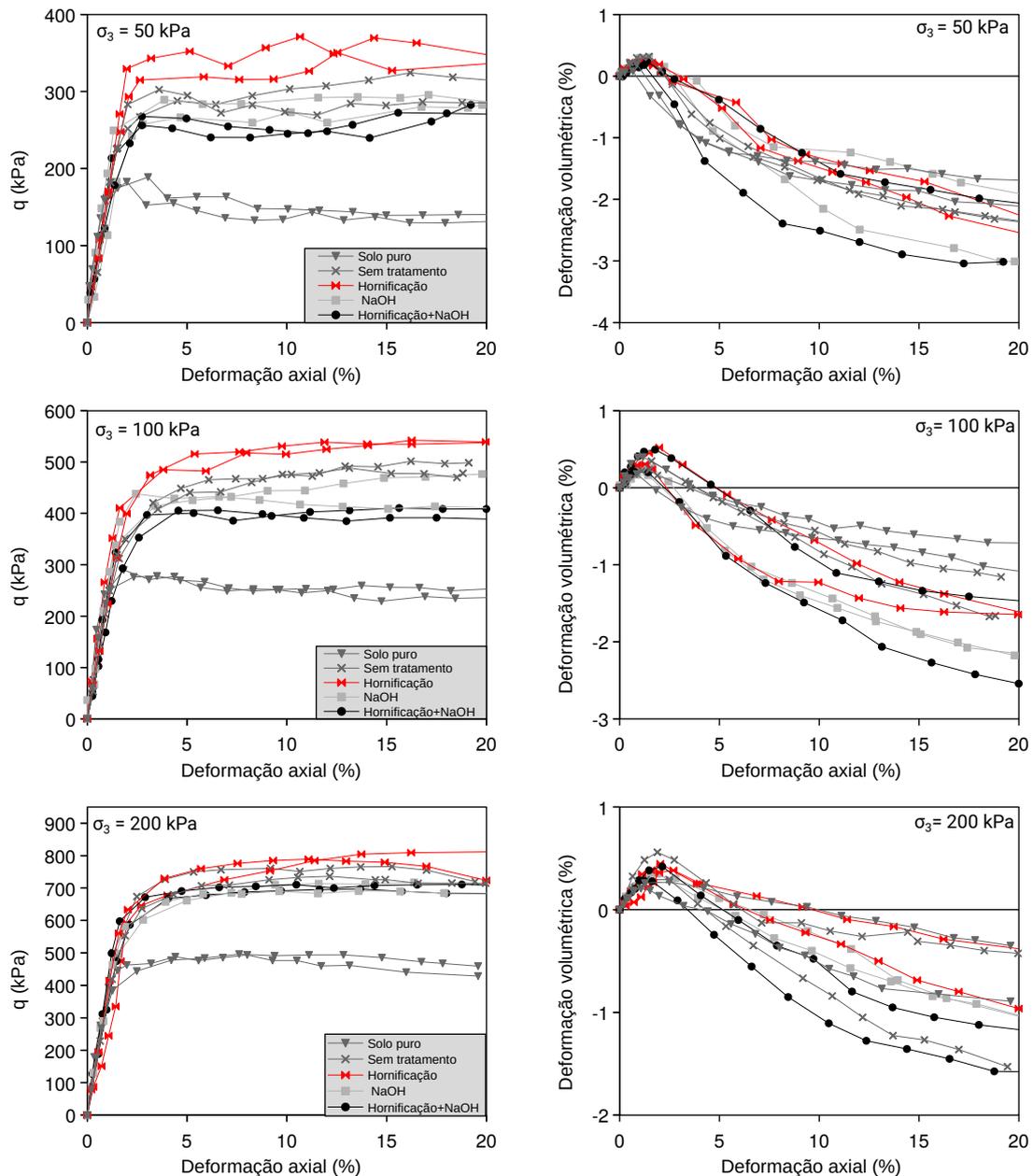
A Figura 4.10 apresenta as curvas tensão-deformação e deformação volumétrica do compósito reforçado com fibras tratadas no teor de 1,0%. Para efeito de comparação, nesta figura também estão apresentadas as informações obtidas para o solo puro e para o compósito com 1% de fibra sem tratamento. Nota-se que em todos os tratamentos adotados, o reforço promoveu ganho de resistência do compósito em relação ao solo não reforçado.

A aplicação de ciclos de molhagem e secagem nas fibras (hornificação) promoveu leve aumento na resistência dos compósitos em relação às amostras com fibras sem tratamento. Na tensão confinante de 50 kPa as amostras apresentaram tensão desviadora máxima de cerca de 15% maior. Para o confinamento de 100 kPa e 200 kPa o crescimento foi mais sutil, cerca de 9% e 6%, respectivamente. Este comportamento pode estar associado à redução da seção transversal da fibra após o tratamento, elevando o seu índice de aspecto (l/d), o que gera melhora a interação entre as fibras e o solo. O aumento da coesão com um maior índice de aspecto foi observado nas pesquisas de Festugato (2008) com fibra de polipropileno em um solo arenoso e Santiago (2011) com fibras de curauá e sisal como reforço de um solo arenoso.

Em contrapartida, o uso do tratamento com $NaOH$ (mercerização) promoveu pequena redução na resistência dos compósitos em relação às amostras não tratadas. As amostras com fibras não tratadas apresentaram tensão desviadora máxima aproximadamente 8%, 9% e 7% maior, nas confinantes de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente, em relação à fibra tratada. A combinação dos dois tratamentos (hornificação+mercerização) também reduziu suavemente a resistência dos compósitos. As amostras reforçadas com fibras não tratadas apresentaram tensão desviadora máxima 13%, 21% e 6% maior que as amostras reforçadas com esse tratamento, para as confinantes de 50, 100 e 200 kPa,

respectivamente.

Figura 4.10 – Curvas tensão deformação e variação de volume para compósitos com 1% de fibras tratadas e diferentes tensões confinantes.



Fonte: Autor, 2022.

Os tratamentos utilizados não alteraram de forma significativa o comportamento volumétrico das amostras, todas elas apresentaram comportamento de amostras pré-adensadas (leve compressão seguido de dilatância, com maior dilatância em confinantes menores).

Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos compósitos

A Tabela 4.9 mostra os parâmetros de resistência dos compósitos reforçados com diferentes teores de fibra de coco e, para efeito de comparação são também apresentados os parâmetros do solo puro, bem como os acréscimos de coesão e ângulo de atrito proveniente da adição de fibras. As envoltórias de resistência dos compósitos são apresentadas no Apêndice A do trabalho.

O ângulo de atrito tem uma tendência de crescimento com o aumento do teor de fibra de coco, mas de forma não linear. Já o intercepto coesivo apresentou um expressivo aumento no teor de 1,0%, permanecendo praticamente inalterado para um teor de 1,5%.

Observa-se que para todos os teores estudados há um incremento significativo na coesão e no ângulo de atrito. Nota-se que a maior parcela ocorre no intercepto coesivo, especialmente nos teores de 1,0 e 1,5 %. Como comentado anteriormente, a diferença da resistência do compósito com 1,0% de fibra para o compósito com 1,5% de fibra é pequena. Dada a dificuldade de homogeneização entre solo e fibra, a necessidade de maior energia para alcance do índice de vazios necessário e o maior gasto com fibras, pode-se afirmar que a concentração de 1,0% é o teor ótimo deste trabalho.

Tabela 4.9 – Parâmetros de resistência do solo e dos compósitos reforçados com diferentes teores.

Teor (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)	$\Delta c'$ (kPa)	$\Delta \phi'$ (°)
0	20	31	-	-
0,5	26	35	6	4
1,0	46	36	26	5
1,5	42	38	22	7

Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 4.10 apresenta os parâmetros de resistência dos compósitos reforçados com 1% de fibras coco submetidas a diferentes tratamentos. Para efeito de comparação na Tabela 4.10 também são apresentados os resultados obtidos para o solo não reforçado e para o compósito com 1% de fibra sem tratamento, além dos acréscimos em cada parâmetro de resistência (coesão e ângulo de atrito) calculado em relação ao solo puro. Nota-se que todos os tratamentos apresentaram resistência superior ao solo não refor-

çado, com ganhos no ângulo de atrito e na coesão.

Vale salientar que todas as amostras reforçadas com 1% de fibra de coco, independente do tipo de tratamento, apresentaram ângulo de atrito de aproximadamente 36°. Toda a variação de resistência oriunda do tratamento movimentou apenas a parcela da coesão das amostras. Isto deve estar associado a adesão da fibra ao solo, visto que tratamentos alteram a superfície da fibra, com conseqüente variação na coesão desses compósitos.

Tabela 4.10 – Parâmetros de resistência do solo e dos compósitos com 1% de fibras tratadas e não tratadas.

Tipo de tratamento	c' (kPa)	ϕ' (°)	Δ c' (kPa)	Δ ϕ' (°)
Solo não reforçado	20	31	-	-
Fibra não tratada	46	36	26	5
Hornificação	56	36	36	5
<i>NaOH</i>	36	36	16	5
<i>NaOH</i> + Hornificação	28	36	8	5

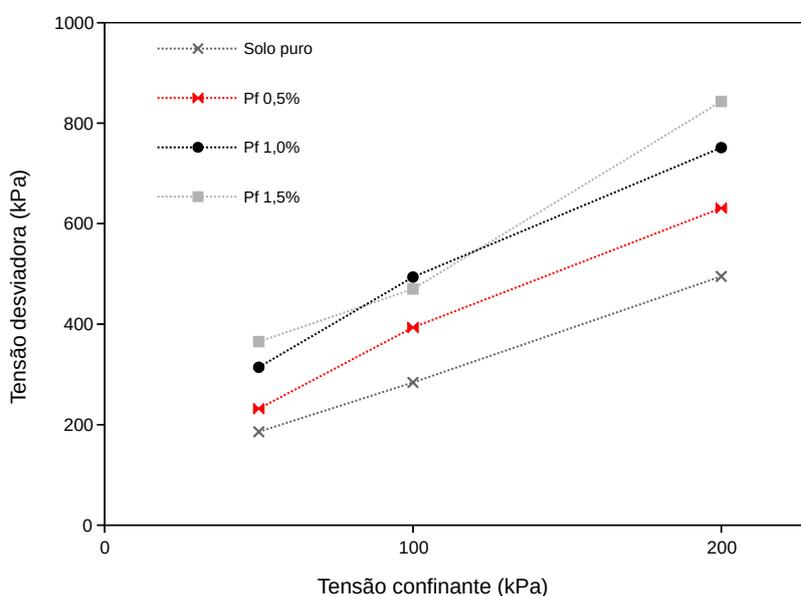
Fonte: Autor, 2022.

Influência da tensão confinante na tensão desviadora de ruptura dos compósitos

Com o objetivo de melhorar o entendimento do efeito da tensão confinante no incremento de tensão desviadora máxima do compósito, foram elaboradas as Figura 4.11 e Figura 4.12. Para isso, foram utilizados os valores médios de tensão desviadora máxima dos dois ensaios realizados na respectiva confinante.

A Figura 4.11 ilustra a relação entre a tensão confinante e a tensão desviadora máxima dos compósitos reforçados com diferentes teores de fibras e a Tabela 4.11 apresenta o ganho relativo de tensão desviadora dos compósitos em cada tensão confinante ensaiada. Sabe-se que quanto maior a tensão confinante, há maior densificação da amostra, melhorando assim o atrito entre os grãos de solo e a fibra, gerando aumento na tensão desviadora máxima, como apresentado na Figura 4.11. Além disso, é possível observar que o solo puro apresenta um comportamento praticamente linear entre tensão desviadora e tensão confinante. Para os compósitos, não há uma tendência linear, com mudanças de inclinação.

Figura 4.11 – Influência da tensão confinante na tensão desviadora máxima dos compósitos reforçados com diferentes teores de fibra de coco.



Fonte: Autor, 2022.

Tabela 4.11 – Valores de tensão desviadora máxima para as tensões confinantes ensaiadas no compósito reforçado com diferentes teores.

Teor (%)	Tensão desviadora máxima (kPa)			Ganho em relação ao solo sem reforço (%)		
	$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa	$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa
0,0	188,82	284,00	494,92	-	-	-
0,5	231,80	393,39	630,83	24,7	38,5	27,7
1,0	314,15	493,64	751,25	69,0	73,8	51,8
1,5	365,12	469,83	843,19	96,5	65,4	70,3

Fonte: Autor, 2022.

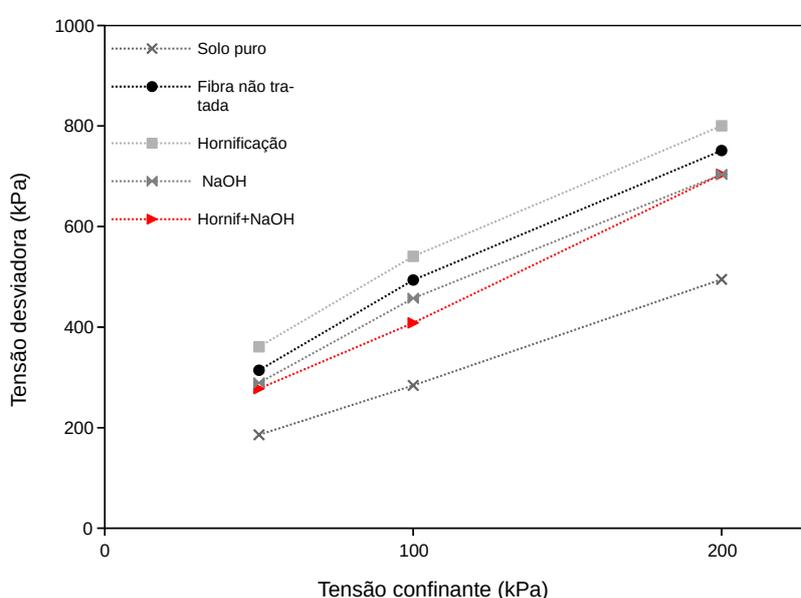
Da Tabela 4.11 constata-se que nos compósitos reforçados com 0,5 e 1,0% de fibra, a tensão confinante que gerou maior aumento em relação ao solo sem reforço foi a de 100 kPa, ganhos de 38,5 e 73,8%, respectivamente. Para o teor de 1,5% o resultado mais expressivo foi para a tensão confinante de 50 kPa, atingindo 96% de aumento. Analisando ainda a Tabela 4.11, nota-se que, exceto para o teor de 1,5%, os ganhos, em termos relativos, foram mais expressivos para as tensões confinantes de 50 e 100 kPa.

Ainda na Figura 4.11, outra consideração que merece destaque é que as tensões desviadoras máximas obtidas para os teores de 1,0 e 1,5% de fibras praticamente se

sobrepõem, atestando a semelhança dos valores de resistência desses teores, também identificados nos parâmetros de resistência ao cisalhamento apresentados anteriormente.

Seguindo a mesma lógica dos compósitos reforçados com diferentes teores, ilustra-se na Figura 4.12 os valores de tensão desviadora máxima referentes às tensões confinantes ensaiadas nos compósitos reforçados com fibras tratadas e valores de ganho relativo apresentados na Tabela 4.12.

Figura 4.12 – Influência da tensão confinante na tensão desviadora dos compósitos com fibras tratadas.



Fonte: Autor, 2022.

Os compósitos reforçado com fibras hornificadas, os compósitos reforçados com fibras tratadas com $NaOH$ e os reforçados com fibras tratadas pelos dois tratamentos, apresentaram o maior ganho nas tensões confinantes de 50 e 100 kPa, assim como as fibras não tratadas para esse mesmo teor (1,0%). Como já abordado anteriormente, nota-se que os compósitos reforçados com fibras tratadas pelos tratamentos de $NaOH$ e a combinação da hornificação com $NaOH$ apresentaram ganho inferior ao compósito reforçado com fibra não tratada. Houve menor diferença na tensão desviadora máxima, na tensão confinante de 200 kPa, quando comparadas às amostras reforçadas com fibras sem tratamento e fibras hornificadas. Por se tratar da mais elevada tensão confinante ensaiada, a mudança causada na superfície aparentemente influenciou menos no com-

portamento do compósito, visto que, percentualmente, os ganhos na tensão desviadora são menores em tensões confinantes maiores.

Tabela 4.12 – Valores de tensão desviadora para as tensões confinantes ensaiadas nos compósitos reforçados com fibras tratadas.

Teor (%)	Tensão desviadora máxima (kPa)			Ganho em relação ao solo sem reforço (%)		
	$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa	$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa
Solo sem reforço	188,82	284,00	494,92	-	-	-
Fibra não tratada	314,15	493,64	751,25	69,0	73,8	51,8
Hornificação	360,84	540,68	800,41	94,2	90,3	61,7
<i>NaOH</i>	289,11	457,44	703,67	55,6	61,2	42,1
Hornificação+ <i>NaOH</i>	277,55	408,31	703,90	49,3	43,8	42,2

Fonte: Autor, 2022.

Rigidez inicial

A Tabela 4.13 apresenta valores de Módulo de Rigidez Secante (E_{s50}) obtidos das curvas tensão deformação do solo sem reforço e solo reforçado com diferentes teores de fibra de coco. Como já era esperado o E_{s50} aumentou com a tensão confinante em todos os casos estudados. Foi observado uma redução do E_{s50} com o aumento do teor de fibras, sendo que para maior teor, maior foi o decréscimo. Michalowski e Čermák (2003) também observaram este comportamento em um solo arenoso reforçado com fibras de poliamida. O aumento do teor de fibras produz uma tensão de ruptura mais elevada, mas também requer uma maior deformação para esta tensão.

A Tabela 4.14 apresenta os valores de E_{s50} obtidos de compósitos reforçadas com 1% de fibras de coco tratadas e sem tratamento e, para efeito de comparativo, também apresenta informações do solo sem reforço. Pode-se observar que o tratamento não produziu nenhuma alteração significativa no módulo de rigidez secante e que este reduziu em relação ao solo não reforçado para todas as situações de tratamento.

Tabela 4.13 – Módulo de rigidez secante para solo sem reforço e reforçado com diferentes teores de fibra de coco.

Teor (%)	E_{s50} (MPa)		
	$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa
Solo sem reforço	24,22	32,60	41,12
0,5	21,88	29,35	39,09
1,0	16,45	22,30	37,70
1,5	15,98	17,76	28,48

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 4.14 – Módulo de rigidez secante dos compósitos reforçadas com 1% de fibras de coco tratadas.

Tratamento	E_{s50} (MPa)		
	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa
Solo sem reforço	24,22	32,60	41,12
Fibra sem tratamento	16,45	22,30	37,70
Hornificação	15,89	26,28	33,77
<i>NaOH</i>	16,70	25,27	36,11
Hornificação + <i>NaOH</i>	15,59	21,74	36,77

Fonte: Autor, 2022.

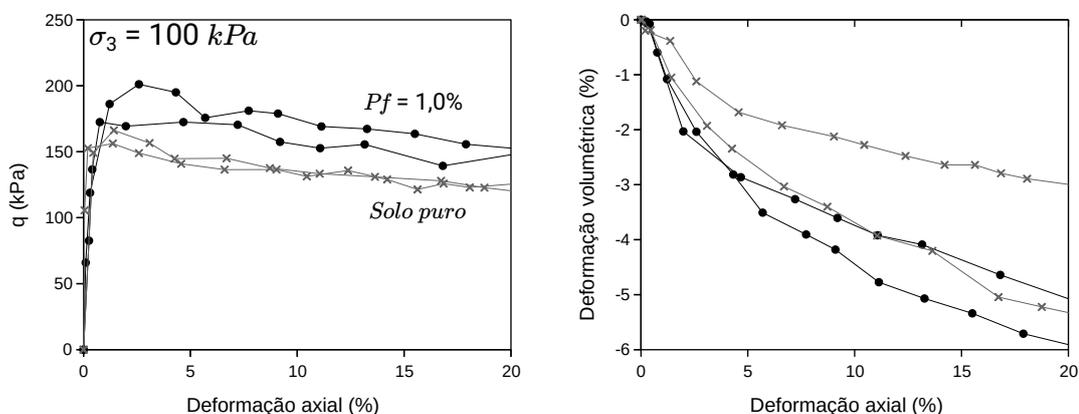
4.4 Ensaios triaxiais realizados com diferentes trajetórias de tensões

A Figura 4.13 apresenta os resultados dos ensaios triaxiais drenados realizados no solo reforçado com 1% de fibra e sem reforço, seguindo a trajetória de tensões $dq/dp = -3$ (redução na tensão confinante com maior velocidade e tensão desviadora crescente), consolidados com $\sigma_3 = 100$ kPa. Houve incremento de resistência nas amostras reforçadas em comparação ao solo sem reforço, mesmo com a baixa tensão confinante ao longo do ensaio. Nota-se que as amostras apresentam apenas dilatância, que pode estar associada à ruptura na faixa elástica, com decréscimo na tensão confinante até a ruptura.

4.5 Aplicação do modelo semi-empírico de Machado et al. (2022)

A Figura 4.14 apresenta uma comparação entre os valores de tensão desviadora obtidos para o compósito e os valores previstos pelo modelo de Machado et al. (2022). Como a fibra utilizada nesse trabalho apresenta comprimentos variados, no modelo adotou-se um comprimento médio de 30 mm. Além disso, utilizou-se os dados de resistência à tração (76MPa), módulo de elasticidade (7,5GPa) e densidade das fibras (1,492 g/cm³). Para o solo, utilizou-se algumas variáveis como o D_{50} (0,158 mm), o Índice de Plasticidade (4%), e o Limite de Liquidez (21%).

Figura 4.13 – Ensaio triaxial com trajetória de tensão dq/dp -3 para solo sem reforço e com 1% de fibra.



Fonte: Autor, 2022.

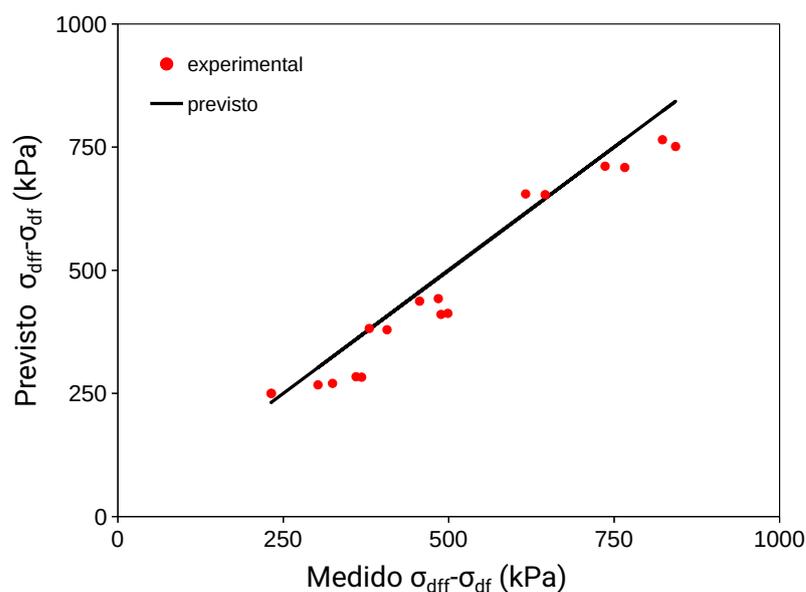
Observando a Figura 4.14 verifica-se uma boa aderência entre os resultados experimentais e os previstos. Apenas duas amostras (11% do universo analisado) apresentaram erro relativo superior a 20%, o que confirma a aplicabilidade do modelo para as amostras utilizadas neste estudo.

4.6 Aplicação do modelo constitutivo de Machado, Carvalho e Vilar (2002) modificado

O modelo constitutivo de Machado, Carvalho e Vilar (2002) modificado para solo reforçado foi aplicado para simular os resultados das curvas tensão deformação e variação volumétrica obtidas experimentalmente no presente trabalho. A Figura 4.15 apresenta a projeção da CSL nos planos $q \times p'$ e $p' \times \nu$ e a NCL do solo não reforçado no plano $p' \times \nu$, juntamente aos dados de ν_{cr} , p' e q obtidos no fim dos ensaios triaxiais do

solo sem reforço e dos compósitos. Observa-se no plano $q \times p'$ que todas as amostras reforçadas estão acima da CSL, o que indica a resistência superior dos compósitos em relação ao solo puro no estado crítico, assim como observado por Conceição (2021), que utilizou uma areia de duna e Pinto (2021) com uma areia de rio, ambos reforçados com fibras de polipropileno.

Figura 4.14 – Dados experimentais e previsão do modelo de Machado et al. (2022)



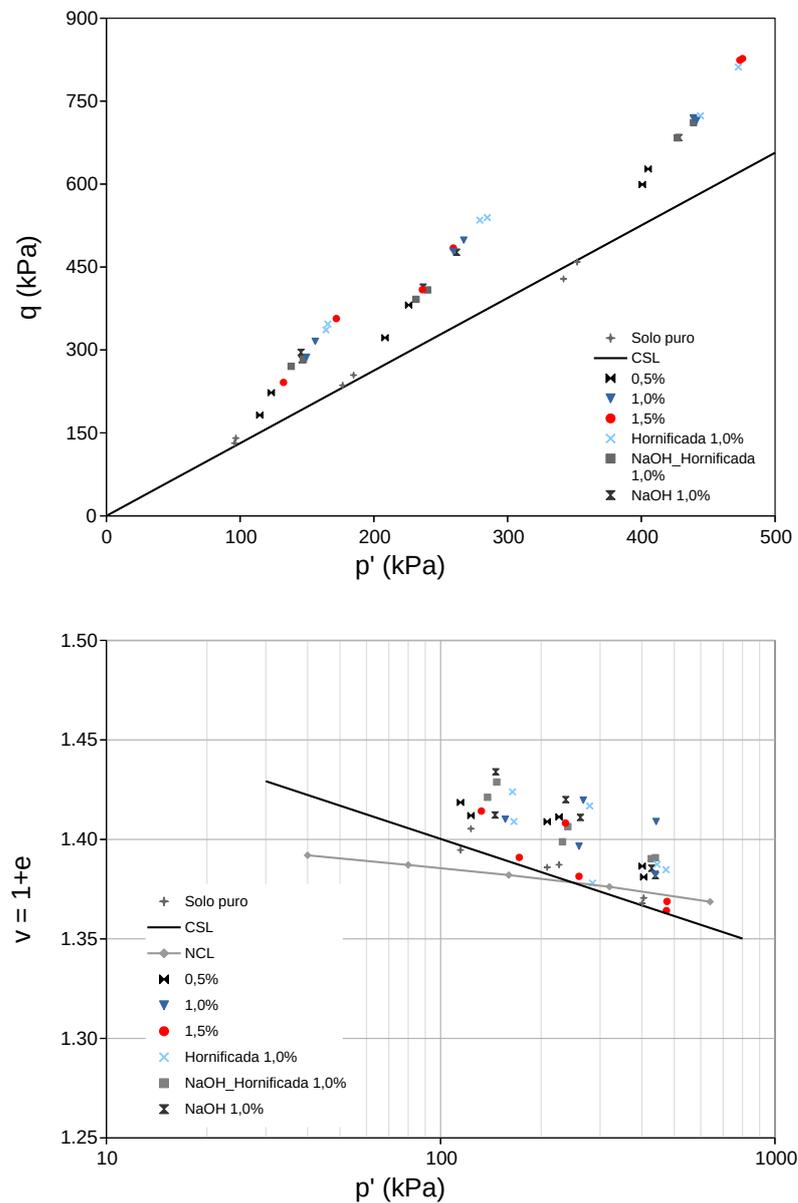
Fonte: Autor, 2022.

Praticamente todas as amostras reforçadas apresentam ν_{cr} superior à CSL do solo não reforçado. Por outro lado, é válido salientar que há baixa variação volumétrica nos ensaios e há uma pequena diferença de índice de vazios das amostras no estado crítico, não sendo possível relatar uma tendência clara no comportamento volumétrico dessas amostras. Para o caso das amostras com teor de fibra de 1,5%, inclusive, o valor de ν_{cr} foi próximo daquele obtido para o caso das amostras sem reforço, especialmente nas tensões de confinamento de 100 e 200 kPa.

A NCL da amostra não reforçada também é apresentada na Figura 4.15. A linha de compressão isotrópica mostra-se com inclinação inferior à CSL, indicando que a amostra está no trecho elástico. Isso está associado a alta tensão de pré-adensamento das amostras, proporcionada pela compactação. As areias, por não serem estruturadas, apre-

sentam comportamento peculiar. No modelo, utiliza-se λ^* , que é determinado através da inclinação da CSL do solo sem reforço.

Figura 4.15 – CSL obtida para o solo não reforçado e reforçado ao fim dos ensaios triaxiais no plano q vs p' e no plano ν_{cr} vs p' apresentada junto à NCL.



Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 4.15 apresenta os parâmetros utilizados na simulação do comportamento mecânico do solo estudado. Da Figura 4.15, como mencionado acima, percebe-se que as amostras reforçadas possuem ν_{cr} acima da CSL, o que tornaria o valor de N dos

compósitos levemente superior. Por conta disso, na tentativa de aprimorar a simulação do comportamento volumétrico das amostras reforçadas, optou-se por aumentar o valor de N de 1,48 para 1,50 (aumento de 0,02), mantendo a mesma inclinação da CSL do solo puro (λ^*). Dessa maneira, houve uma melhor modelagem do comportamento volumétrico dos compósitos, havendo contudo, uma pequena perda na capacidade de previsão do comportamento volumétrico das amostras não reforçadas pelo modelo.

Tabela 4.15 – Parâmetros do modelo adotados para previsão do comportamento do solo.

λ^*	κ	ϕ	N	ν_s	a_{ff}	a_d	a_{ng}
0,0109	0,0042	32,6	1,50	0,15	3,2	7,0	1,0

Fonte: Autor, 2022.

O mesmo critério utilizado para o modelo semi-empírico foi adotado em relação ao comprimento das fibras, sendo utilizado um comprimento médio das fibras de 30 mm nas simulações.

Os ensaios realizados com trajetória $dq/dp = -3$ e a NCL, no seu trecho de recompressão, auxiliaram na determinação do parâmetro κ , que está associado à inclinação do trecho elástico de compressão isotrópica das amostras, pois tocam a superfície de escoamento a esquerda da CSL, solicitando o solo de forma elástica até o momento da ruptura, a partir da qual o solo apresenta amolecimento.

O valor de p_o definido foi de 300 kPa, devido à alta tensão de pré-adensamento do material, o qual é condizente com a energia de compactação empregada e ao início de mudança na NCL observado na Figura 4.15. Por meio de ensaio de compressão confinada em amostras compactadas na Energia do Proctor Normal, Silva (2018) obteve valores de aproximadamente 470 kPa.

Em relação ao comportamento volumétrico o modelo consegue capturar a dilatação das amostras, agora com uma tendência de apresentar dilatações menores que as observadas experimentalmente. Novamente, estes resultados estão relacionados àqueles apresentados na Figura 4.15. De toda sorte, pode-se dizer que os resultados obtidos são bastante promissores, uma vez que o comportamento volumétrico das amostras é sensível aos valores de índice de vazios, que varia muito pouco na consolidação e no cisalhamento.

A Figura 4.16 apresenta as simulações das curvas tensão deformação e variação de volume para o solo puro e reforçado com diferentes teores de fibra.

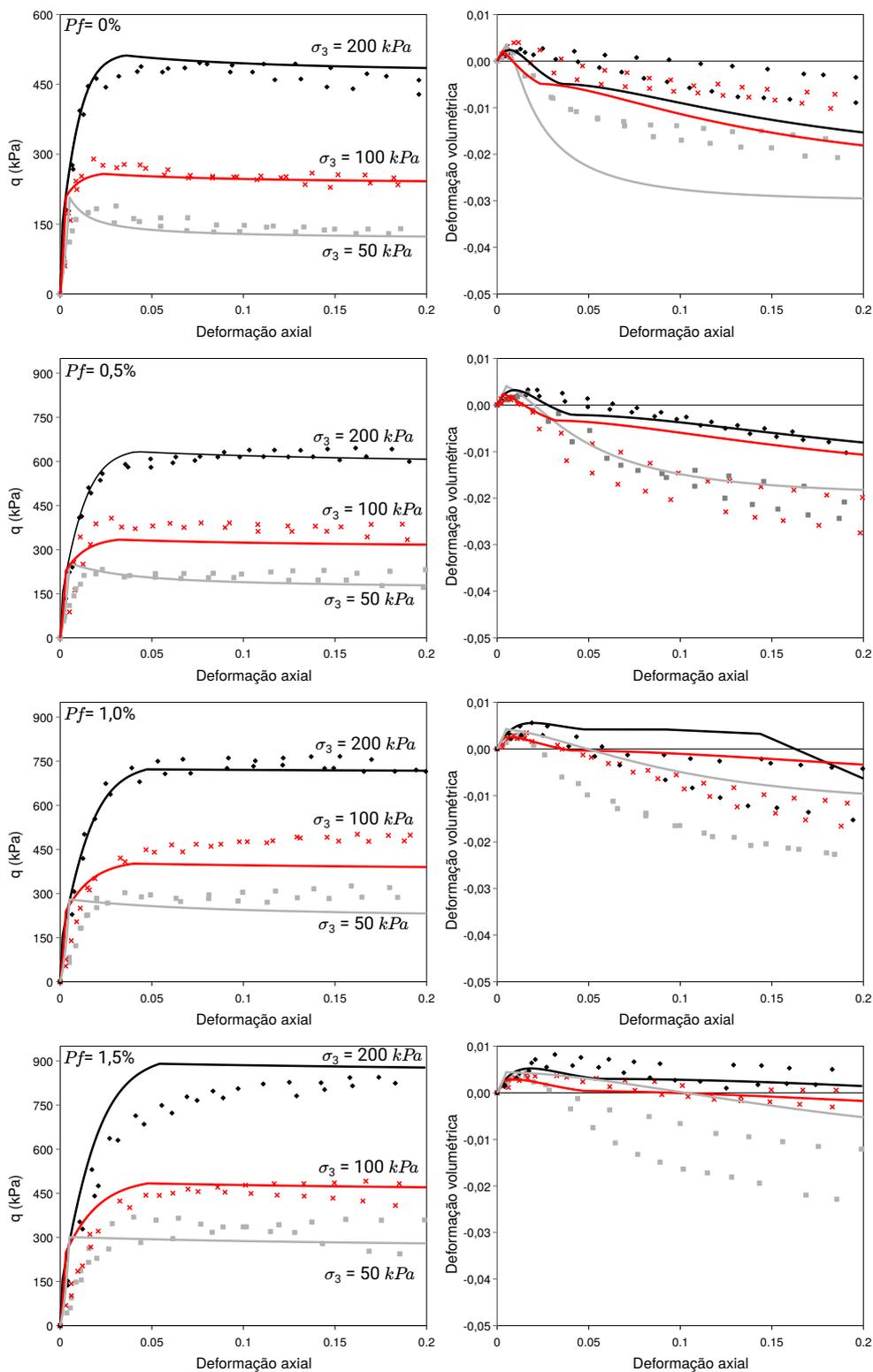
Da Figura 4.16 nota-se que, para o solo não reforçado, o modelo representa muito bem o comportamento de tensão-deformação para as três confinantes analisadas. Em relação ao comportamento volumétrico, a simulação mostra mais dilatância que o resultado experimental, mas os resultados podem ser considerados como satisfatórios. Isso está associado ao valor de N adotado, levemente superior ao obtido para a CSL. Observa-se que o modelo tem uma boa previsão dos resultados de tensão-deformação em praticamente todas as tensões confinantes nos três teores de fibra analisados. A simulação subestima levemente os valores de tensão desviatória para a a tensão confinante de 100 kPa para os teores de 0,5 e 1,0%.

Em relação ao comportamento volumétrico dos compósitos, apresentados na Figura 4.16, o modelo consegue capturar de forma satisfatória a variação volumétrica dos materiais, especialmente nas tensões confinantes de 100 e 200 kPa. Para o solo reforçado com 0,5% de fibra o modelo captura muito bem o comportamento volumétrico para o confinamento de 50 kPa. Nos compósitos reforçados com 1,0 e 1,5% o modelo não representa tão bem a dilatância das amostras para essa confinante. Para o teor de 1,5% o modelo captura de maneira muito satisfatória a variação volumétrica nas tensões confinantes de 100 e 200 kPa, reproduzindo até mesmo o comportamento somente de compressão na tensão confinante de 200 kPa.

A Figura 4.17 apresenta as simulações das curvas tensão deformação e de variação de volume para os ensaios com trajetória $dq/dp = -3$.

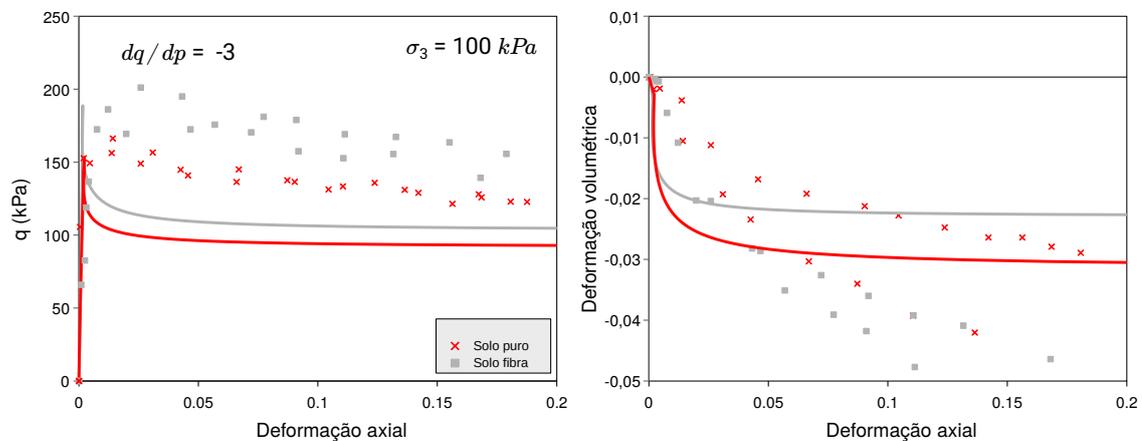
Da Figura 4.17 percebe-se que o modelo tem um bom ajuste e consegue simular o pequeno incremento de resistência que a fibra promove e simula de forma razoável o comportamento volumétrico das amostras (apenas dilatância). O modelo prevê um valor de pico que é compatível com os valores experimentais, mas o decréscimo para o valor de tensão residual se dá de forma abrupta. Este comportamento está provavelmente relacionado com a lei de fluxo empregada para uma região à esquerda, mais próxima à NCL, onde pequenas variações nos valores de q/p produzem grandes variações de inclinação dos vetores de plastificação

Figura 4.16 – Simulação do comportamento tensão-deformação e deformação volumétrica para solo puro e reforçado com os três teores de fibra.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 4.17 – Simulação do modelo para amostras ensaiadas com trajetória $dq/dp = -3$ com solo puro e reforçado com 1,0%.



Fonte: Autor, 2022.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento desta pesquisa permitiu chegar às seguintes conclusões:

A fibra de coco analisada, conhecida como fibroso, possui resistência à tração de aproximadamente 76 MPa, módulo de elasticidade de 7,4 GPa, alongamento na ruptura de aproximadamente 15%, massa específica de 1,492 g/cm³ e a maior parte do material fibroso (86%) possui comprimento entre 1 e 5 cm.

Com o objetivo de melhorar as propriedades da fibra, foram realizados três tratamentos na fibra de coco: hornificação, mercerização e hornificação+mercerização. Esses tratamentos alteraram as propriedades das fibras, como resistência à tração e capacidade de absorção de água. A fibra natural apresenta ganho de massa de água de 147% após 24 horas. A hornificação reduziu a absorção de água das fibras em aproximadamente 15%. Os outros dois tratamentos (*NaOH* e hornificação+*NaOH*) não alteraram o ganho de massa de água de maneira significativa (reduzindo de 147% para 145% e 131%).

Os tratamentos utilizados alteraram a resistência à tração das fibras. A hornificação elevou resistência à tração em mais de 60%, aumentou o módulo de elasticidade em quase duas vezes e reduziu o alongamento em mais de 30%. Já o tratamento com *NaOH* reduziu cerca de 10% a resistência à tração e o módulo de elasticidade e o alongamento na ruptura diminuiu em cerca de 30%. Por outro lado, a combinação de *NaOH* e hornificação elevou levemente a resistência à tração (cerca de 15%), não variou o módulo de elasticidade e o alongamento na ruptura reduziu cerca de 20%.

O solo residual Barreiras é composto essencialmente por areia (70%), é pouco plástico (IP=4%), classificado como SM quanto a USCS e possui valores de umidade ótima e massa específica seca máxima, na Energia do Proctor Normal, de 11,05% e 1,936 g/cm³, respectivamente.

A inclusão das fibras de coco no solo Barreiras promove o surgimento de um material com melhores propriedades mecânicas, sendo influenciadas fortemente pelo teor de fibras. Em relação à trabalhabilidade das amostras, o solo reforçado nos teores de 0,5 e 1,0% apresentou boa trabalhabilidade, com a fibra se distribuindo de forma satisfatória. No

caso do teor de 1,5% houve dificuldade de homogeneização e as fibras se aglomeraram em alguns pontos. Em relação à moldagem, devido ao método empregado (índice de vazios constante), constatou-se que quanto maior o teor de fibras, maior a energia necessária para atingir o índice de vazios, visto que as fibras absorvem parte da energia.

Através dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia constatou-se que a inclusão de fibras no teor de 0,5% proporcionou pequeno ganho em relação a amostra não reforçada (cerca de 16%). Para os teores de 1,0 e 1,5% houve ganho muito significativo, elevando essa propriedade para 57 e 56% respectivamente. Apesar do expressivo aumento, esses valores não atendem às exigências para aplicação como base de pavimentos (ISC > 80%).

O coeficiente de permeabilidade das amostras não alterou com a adição de fibras, estando na ordem de $5.10^{-5} cm/s$. Esse comportamento era esperado, visto que, em todos os teores, as amostras foram preparadas com o mesmo índice de vazios.

Por meio dos ensaios triaxiais, constatou-se que os compósitos estudados apresentaram aumento de resistência em relação ao solo sem reforço em todos os teores de fibras analisados. O solo sem reforço apresentou $c' = 20kPa$ e $\phi' = 31^\circ$. Compósito com 1,0% ($c' = 46kPa$ e $\phi' = 36^\circ$) de fibra apresentou resistência semelhante ao teor de 1,5% ($c' = 42kPa$ e $\phi' = 38^\circ$). O comportamento mostrou-se assintótico.

Ainda em relação aos ensaios triaxiais, a adição de fibras não alterou de forma significativa o comportamento de variação volumétrica, exceto para o teor de 1,5%, nas confinantes de 100 e 200 kPa, que experimentaram menor dilatação quando comparados aos outros compósitos.

As amostras reforçadas com 1,5% de fibra apresentaram grande dificuldade de homogeneização devido ao grande volume de fibras e a distribuição das fibras não ocorre de forma tão homogênea como nos teores inferiores. Além disso, há maior dificuldade para atingir o índice de vazios, demandando maior energia. Devido à similaridade na resistência entre os dois teores, nesse trabalho, a concentração de 1,0% foi considerada como o teor ótimo, dada a melhor homogeneização e menor demanda de fibras.

Para ensaios realizados com a trajetória de tensões $dq/dp = -3$ houve um pequeno incremento na resistência ao cisalhamento. Devido à baixa tensão confinante, há pouca mobilização das fibras entre os grãos do solo, o que pode justificar o sutil aumento.

Os tratamentos adotados na fibra alteraram a resistência mecânica do compósito. Quando comparados ao compósito reforçado com 1% de fibras sem tratamento, houve as seguintes alterações: a hornificação elevou c' em 10 kPa; O uso de $NaOH$ reduziu c' em 10 kPa; e a combinação de hornificação e $NaOH$ reduziu c' em 18 kPa. A variação da resistência dos compósitos reforçados com fibras tratadas foi menor na maior confinante ensaiada. O tratamento das fibras não alterou o comportamento volumétrico do compósito. O uso dos tratamentos, em uma análise de curto prazo, mostrou que a fibra tratada pela hornificação eleva a resistência mecânica do compósito. Por outro lado, o tratamento das fibras com $NaOH$ e a combinação da hornificação com $NaOH$ não apresentaram resultados satisfatórios.

O modelo semi-empírico de Machado et al. (2022), testado no presente trabalho, apresentou boa adequabilidade, com baixo erro relativo entre os dados experimentais e previstos.

O modelo de Machado, Carvalho e Vilar (2002) modificado para solos reforçados conseguiu prever o comportamento dos compósitos de forma bem satisfatória. O modelo simula de forma aderente os dados de deformação axial vs tensão desviadora e deformação axial vs deformação volumétrica. A função que prevê o comportamento dilatante de materiais granulares proporcionou boa aderência aos resultados obtidos para os diferentes teores testados.

Os resultados mostram que a adição de fibras de coco no solo Barreiras pode ser uma alternativa para uso em campo. A proposta de modelo constitutivo pode ser uma ferramenta relevante na previsão do comportamento de solos reforçados.

6 REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, M.; AFLAKI, E.; NEJAD, F. M. Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement. *Journal of Cleaner Production*, v. 207, p. 1059–1071, 2019. Publisher: Elsevier B.V. ISBN: 0000000183. 33
- ABNT NBR 6459. Solo - Determinação do Limite de Liquidez - Método de Ensaio. In: . Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. 54
- ABNT NBR 6508. Grãos que passam na peneira 4,88mm - Determinação da Massa específica - Método de ensaio. In: . Rio de Janeiro: [s.n.], 2017. 54
- ABNT NBR 7180. Solo - Determinação do Limite de plasticidade - Método de Ensaio. In: . Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. 54
- ABNT NBR 7181. Solo - Análise granulométrica - Método de ensaio. In: . Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. 54
- ABNT NBR 7182. Solo - Ensaio de compactação. In: . Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. 54
- ABNT NBR 9895. Solo - Índice de Suporte Califórnia (ISC - método de ensaio. In: . Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. 55
- ADENIYI, A. G. et al. A review of coir fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 176, n. August, p. 107305, 2019. Publisher: Elsevier Ltd. 19, 26
- AGUILAR, J. R. T. *Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Reforçado com Fibras de Coco*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2015. 2, 4, 14, 23, 25, 28, 32, 33, 34, 77
- AL-REFEAI, T. O. Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 10, n. 4, p. 319–333, 1991. 14
- ALMEIDA, A. L. F. S. et al. Efeito do tratamento de mercerização em fibras de curauá (*Ananas erectfolius*). *8o Congresso Brasileiro de Polímeros*, p. 12–13, 2005. 26
- ANGGRAINI, V. et al. Effects of coir fibres modified with Ca(OH)₂ and Mg(OH)₂ nanoparticles on mechanical properties of lime-treated marine clay. *Geosynthetics International*, v. 23, n. 3, p. 206–218, 2016. ISBN: 0016173732. 7, 21, 25, 66, 67
- ANGGRAINI, V. et al. Performance of Chemically Treated Natural Fibres and Lime in Soft Soil for the Utilisation as Pile-Supported Earth Platform. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 1, n. 3, p. 1–14, 2015. Publisher: Springer International Publishing. 2, 21, 67
- AYININUOLA, G. M.; OLADOTUN, P. O. Geotechnical Properties of Coconut Coir Fiber Soil Mixture. *Journal of Civil Engineering Research*, v. 6, n. 4, p. 79–85, 2016. 2, 32, 74, 75, 77

- BABU, G. L. S.; VASUDEVAN, A. K. Strength and stiffness response of coir fiber-reinforced tropical soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 20, n. 9, p. 571–577, 2008. ISSN 08991561. 3, 4
- BABU, G. L. S.; VASUDEVAN, A. K.; SAYIDA, M. K. Use of coir fibers for improving the engineering properties of expansive soils. *Journal of Natural Fibers*, v. 5, n. 1, p. 61–75, 2008. ISSN 1544046X. 34
- BALMACEDA, J.; GENS, A.; ALONSO, E. An elasto-plastic model for partially saturated soils exhibiting a maximum collapse. *3rd Int. Conf. Comp. Plast.*, v. 1, p. 815–826, 1992. 43
- BERNARDINA, F. *Influência da Degradação de Fibras no Comportamento Mecânico de Solos Reforçados*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2019. 2, 18, 21, 23, 30, 34
- BERNARDINA, F.; CASAGRANDE, M. Avaliação da Degradação de Fibras (Natural e Sintética) e sua Influência no Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso. *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Geotecnia e Desenvolvimento Urbano*, II, n. 1, p. 1–10, 2018. 31, 34
- BLEDZKI, A.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose. *Prog. Polym. Sci*, v. 24, p. 221–274, 1999. 15, 16, 21, 67
- BOLANOS, E. R. Z. *Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Reforçado com Fibras de Coco*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2013. 3, 4, 17, 19, 23, 32
- BOLANOS, R. E. Z.; CASAGRANDE, M. D. T. Estudo Experimental de Solo Reforçado com Fibra de Coco Verde Para Carregamentos Estáticos em Obras Geotécnicas. *XVII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng Geotécnica, 2014*, v. 1, p. 1–10, 2014. Place: Goiânia. 20, 33
- BRAHMAKUMAR, M.; PAVITHRAN, C.; PILLAI, R. M. Coconut fibre reinforced polyethylene composites: Effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. *Composites Science and Technology*, v. 65, n. 3-4, p. 563–569, 2005. 21
- BUTT, W. A.; MIR, B. A.; JHA, J. N. Strength Behavior of Clayey Soil Reinforced with Human Hair as a Natural Fibre. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 34, n. 1, p. 411–417, 2016. Publisher: Springer International Publishing. 32, 74
- CARDOSO, P. *Efeito do tratamento alcalino/mecânico de fibras de curauá nas propriedades de laminados compósitos de matriz epóxi*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. ISBN: 9781787284395. 26
- CARVALHO, L. *Comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras naturais submetido a ensaios de cisalhamento direto em média escala*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, 2019. ArXiv: 1011.1669v3 Publication Title: G.DM-324/2019 Issue: 1 ISBN: 9783540773405 ISSN: 1098-6596. 4, 20, 23

- CASAGRANDE, M. *Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 32
- CASAGRANDE, M. D. T. *Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 1, 6, 9, 10, 12, 14, 32, 33
- CASTILHO, T. *Resistência ao Cisalhamento de Solos com Fibras de Politereftalato de Etileno Reciclado*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, 2017. 2, 11
- CAVALCANTE, L. V. *A nova geografia do coco: reestruturação produtiva, territorialização do capital e dinâmicas socioespaciais*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual do Ceará, 2015. 20
- CERQUEIRA, R. d. C. V. *Avaliação do fluxo bidimensional de óleo diesel em solo não saturado da formação Barreiras*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Bahia, 2016. 69
- CHAPLE, P.; DHATRAK, A. Performance of fiber reinforced clayey soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 2, n. 4, p. 54–64, 2013. 4, 32
- CLARAMUNT, J. et al. The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 5, p. 586–595, 2011. Publisher: Elsevier Ltd. 27, 29, 68
- CLARIA, J. J.; VETTORELO, P. V. Mechanical Behavior of Loose Sand Reinforced with Synthetic Fibers. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. 53, n. 1, p. 12–18, 2016. 8, 33
- CONCEIÇÃO, M. *Análise do comportamento tensão-deformação de um solo reforçado com fibra*. Tese (Dissertação) — Universidade Federal da Bahia, 2021. 33, 34, 35, 38, 39, 40, 77, 88
- CONSOLI, N. C. et al. Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 128, n. 6, p. 462–472, 2002. 14, 32, 33
- CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; ULBRICH, L. A. Influence of Fiber and Cement Addition. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 124, n. 12, p. 1211–1214, 1998. 8, 32, 33
- COSTA, C. D. M. C. *Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, 2015. 32, 33
- COSTA, J. E. G. *Estudo da degradação de geotêxteis em fibra natural*. Tese (Mestrado) — Universidade do Minho, 2013. 24
- CURCIO, D. S. *Comportamento hidromecânico de compósito solo-fibra*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. 6, 9, 13, 15, 32, 33, 34

- DIAB, A. A. et al. Effect of compaction method on the undrained strength of fiber-reinforced clay. *Soils and Foundations*, v. 58, n. 2, p. 462–480, 2018. Publisher: The Japanese Geotechnical Society. 8
- DIAB, A. A. et al. Undrained shear strength characteristics of compacted clay reinforced with natural hemp fibers. *International Journal of Geotechnical Engineering*, v. 10, n. 3, p. 263–270, 2016. 2, 14
- DIAMBRA, A. et al. Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 28, n. 3, p. 238–250, 2010. Publisher: Elsevier Ltd. 7, 32, 34, 37, 46
- DIAS, T. M. S.; SILVA, B. A. *Potencial de uso da fibra de coco verde em pavimentação na cidade do Rio de Janeiro - Seus benefícios para o meio ambiente*. [S.l.], 2012. 10 p. Publication Title: 18a Reunião de Pavimentação Urbana Reunião de Pavimentação Urbana Volume: 1 Issue: 1. 3
- DONATO, M. *Medidas diretas de tensão em solo reforçado com fibras de polipropileno*. Tese (Tese) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. 12, 13, 15
- EMBRAPA. *Coleção Plantar- Coco*. Brasília, 2006. 100p p. Volume: 04. 3, 19
- ESMAEILPOURSHIRVANI, N. et al. Improvement of the engineering behavior of sand-clay mixtures using kenaf fiber reinforcement. *Transportation Geotechnics*, v. 19, n. 2, p. 1–8, 2019. Publisher: Elsevier. 32
- FERREIRA, S. R. *Influência da hornificação na aderência fibra-matriz e no comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Feira de Santana, 2012. 27, 29
- FESTUGATO, L. *Análise do comportamento mecânico de um solo micro - reforçado com fibras de distintos índices de aspecto*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. 10, 32, 79
- FEUERHARMEL, M. R. *Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 14, 32, 33, 34
- FIDELIS, M. E. A. *Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta*. Tese (Doutorado) — UFRJ/COPPE, 2014. 29, 66
- FIDELIS, M. E. A. et al. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 2, n. 2, p. 149–157, 2013. 17
- FREITAS, T. M. *Comportamento mecânico a longo prazo de um solo reforçado com fibras de coco*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Bahia, 2022. 47, 52, 53
- GAO, Z.; DIAMBRA, A. A multiaxial constitutive model for fibre-reinforced sand. *Géotechnique*, v. 71, n. 6, p. 548–560, 2020. 7, 37

GEHLEN, L. R. *Efeito da utilização de fibras lignocelulósicas (açai e curauá) em compósitos com matriz de resina poliéster insaturado*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2014. 18

GHAVAMI, K.; TOLEDO, R. D.; BARBOSA, N. P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites*, v. 21, n. 1, p. 39–48, 1999. ISSN 09589465. 6, 19, 25, 28, 29

GOMES, N. *Comportamento hidromecânico de solos reforçados com fibras PET para aplicação em barreiras de contenção de resíduos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018. Issue: 9. 32, 34

GOWTHAMAN, S.; NAKASHIMA, K.; KAWASAKI, S. A state-of-the-art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: Past findings, present trends and future directions. *Materials*, v. 11, n. 4, p. 23, abr. 2018. Publisher: MDPI AG. 7, 8, 17

GRAY, D. H.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 109, n. 3, p. 335–353, 1983. ISSN 0733-9410. 8, 9, 12, 36

GUSMÃO, L. *Influência de ciclos de secagem-molhagem no comportamento hidráulico-mecânico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras de coco verde*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2020. 23, 32, 33

HALIP, J. A. et al. *Effect of treatment on water absorption behavior of natural fiber-reinforced polymer composites*. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2018. Publication Title: Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites. 2, 11, 26

HEAD, K. H.; EPPS, R. *Manual of Soil Laboratory Testing*. Third edit. [S.l.: s.n.], 2014. v. 21. Publication Title: Environmental & Engineering Geoscience Issue: 3 ISSN: 1078-7275. ISBN 978-1-84995-054-1. 57

HEINECK, K. S. *Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. Publication Title: Ufrgs. 8, 9, 32

HEJAZI, S. M. et al. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 100–116, 2012. Publisher: Elsevier Ltd. 2, 3, 4

IOZZI, M. A. et al. Estudo da influência de tratamentos químicos da fibra de sisal nas propriedades de compósitos com borracha nitrílica. *Polimeros*, v. 20, n. 1, p. 25–32, 2010. 11

JAIRAJ, C.; KUMAR, M. T. P.; RAGHUNANDAN, M. E. Compaction characteristics and strength of BC soil reinforced with untreated and treated coir fibers. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 3, n. 1, 2018. Publisher: Springer International Publishing. 26, 29, 32

JEFFERIES, M.; BEEN, K. *Soil Liquefaction. A Critical State approach*. Second edition. [S.l.: s.n.], 2016. (Taylor & Francis Group). 45

JOY, S.; BALAN, K.; JAYASREE, P. K. Biodegradation of coir geotextile in tropical climatic conditions. *Proceeding of Indian Geotechnical Conference*, v. 1, n. 1, p. 604–606, 2011. 24, 30

KABIR, M. M. et al. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, v. 43, n. 7, p. 2883–2892, 2012. Publisher: Elsevier Ltd. 17, 26

KAR, R. K.; PRADHAN, P. K.; NAIK, A. Effect of randomly distributed coir fibers on strength characteristics of cohesive soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 19, p. 1567–1583, 2014. 8, 21, 32, 77

KHATRI, V. N. et al. Shear strength behaviour of clay reinforced with treated coir fibres. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, v. 60, n. 2, p. 135–143, 2016. 28, 29, 32

KUMAR, B. T. H.; SANJAY, S. J. Study on Effect of Different Sizes of Footings Resting on Treated Coir Mat and Coir Fibre Reinforced Sand. v. 4, n. 11, p. 12–17, 2018. 7

KUTANAEI, S. S.; CHOBBASTI, A. J. Triaxial behavior of fiber-reinforced cemented sand. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 30, n. 6, p. 579–593, 2016. 32, 33

LEUCÁDIO, G. A. S. *Reforço de Solo Laterítico com Fibras de Sisal de Distribuição Aleatória, Tratadas Superficialmente com EPS Reciclado*. Tese (.) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2005. 2, 25, 28, 29, 33

LI, Z.; WANG, L.; WANG, X. Cement composites reinforced with surface modified coir fibers. *Journal of Composite Materials*, v. 41, n. 12, p. 1445–1457, 2007. 21, 66

LODI, P. C. *Aplicação do modelo cam-clay modificado a um solo arenoso*. Tese (Mestrado em Geotecnia) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998. 36

LOPES, M. M.; CASAGRANDE, M. Estudo do Comportamento de um Solo Reforçado com Fibras de Açaí (*Euterpe oleracea*). *Geocentro*, I, p. 1–10, 2019. 14, 32

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; VILAR, O. M. Constitutive Model for Municipal Solid Waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 128, n. 11, p. 940–951, 2002. vii, viii, xvi, xvii, 3, 5, 37, 40, 43, 46, 63, 87, 96

MACHADO, S. L. et al. Development of an Empirical Model to Capture Fiber Reinforcement Effect on Shear Strength of Soils. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 1, p. 1–12, 2022. vii, viii, x, xvi, xvii, 3, 5, 37, 38, 39, 62, 86, 87, 88, 96

MAHER, M. H.; GRAY, D. H. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. v. 116, n. 11, p. 1661–1667, 1990. 13, 36

- MALIAKAL, T.; THIYYAKKANDI, S. Influence of Randomly Distributed Coir Fibers on Shear Strength of Clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 31, n. 2, p. 425–433, 2012. 8, 10, 11, 23
- MARIANI, P. P. *Produção E Aplicação De Biomantas Para Controle De Erosão Em Taludes*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. 2
- MARINELLI, A. L. et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: Uma contribuição para a sustentabilidade Amazônica. *Polimeros*, v. 18, n. 2, p. 92–99, 2008. 24, 26
- MARTINS, A. *Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal*. Tese (Doutorado) — UFRJ/COPPE, 2014. Issue: 1. 17, 32, 33
- MENEZES, L. C. P. d. et al. Analysis of the Physical-Mechanical Behavior of Clayey Sand Soil Improved with Coir Fiber. *Soils and Rocks*, v. 42, n. 1, p. 31–42, 2019. 8, 14, 23, 33, 77
- MICHALOWSKI, R. L.; ČERMÁK, J. Triaxial compression of sand reinforced with fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 129, n. 2, p. 125–136, 2003. 14, 34, 85
- MIRZABABAEI, M. et al. Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 139, n. 3, p. 483–493, 2013. 33
- MONTEIRO, S. N. et al. Efeito da interface fibra/matriz sobre a resistência de compósitos poliméricos reforçados com fibras de coco. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 11, n. 4, p. 395–402, 2006. 19
- MORANDINI, T.; SCHNEIDER, V. C. Compressibilidade em misturas de solo laterítico, bentonita e fibras para uso em barreiras de fluxo. v. 17, p. 66–78, 2017. 34
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e Bioquímica do solo*. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. Publication Title: Microbiologia E Bioquímica Do Solo. 24
- MOTTA, L.; AGOPYAN, V. *Caracterização de Fibras Curtas Empregadas na Construção Civil*. São Paulo, 2007. 23 p. Publication Title: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP Departamento. 21, 49, 67
- MUNIRWAN, R. P. et al. Performance of Coir Fiber Addition for Clay as a Sub-Grade for Pavement Design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 712, n. 1, 2020. 2
- MURRAY, J. J.; FROST, J. D.; WANG, Y. Behavior of a sandy silt reinforced with discontinuous recycled fiber inclusions. *Transportation Research Record*, v. 1, n. 1714, p. 9–17, 2000. 14, 33

- NATARAJ, M.; MCMANIS, K. Stength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers. *Geosynthetics International*, v. 4, n. November, p. 65–79, 1997. 14, 32
- OLIVEIRA, A. *Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2018. Publication Title: Universidade Federal de Pernambuco. 4, 21, 23, 32, 33, 34, 64, 67, 77
- OLIVEIRA, G.; LIMA, A.; OLIVEIRA, W. Contenção de talude em área de preservação permanente – (APP) com aplicação de biomanta de fibra de coco. *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia*, v. 1, n. 1, p. 1–5, 2018. 2
- PASSOS, P. R. d. A. *Destinação Sustentável de Cascas de Coco (Cocos nucifera) Verde: Obtenção de Telhas e Chapas de Partículas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. 16, 17
- PAUL, J. V.; SNEHA, A. R. M. Effect of random inclusion of bamboo fibers on strength behaviour of flyash treated black cotton soil. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, v. 7, n. 5, p. 153–160, 2016. 14
- PEREIRA, P. H. F. et al. Vegetal fibers in polymeric composites: A review. *Polimeros*, v. 25, n. 1, p. 9–22, 2015. 16, 21
- PETER, L. et al. Laboratory Investigation in the Improvement of Subgrade Characteristics of Expansive Soil Stabilised with Coir Waste. *Transportation Research Procedia*, v. 17, n. December 2014, p. 558–566, 2016. Publisher: Elsevier B.V. 2, 8, 32
- PINTO, C. M. T. *Estudo do comportamento mecânico de uma areia aluvionar reforçada com fibras*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Bahia, 2021. 33, 38, 39, 77, 79, 88
- PRABAKAR, J.; SRIDHAR, R. S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Construction and Building Materials*, v. 16, n. 2, p. 123–131, 2002. 6, 7
- PRIYA, N. A. S.; RAJU, P. V.; NAVEEN, P. N. E. Experimental testing of polymer reinforced with coconut Coir fiber composites. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, v. 4, n. 12, p. 453–460, 2014. 68
- RAMESH, H.; MANOJ, K.; MAMATHA, H. Effect of Lime-Coir Fiber on Geotechnical Properties of Black Cotton Soil. *Indian Geotechnical Conference-*, v. 1, n. 1, p. 485–490, 2010. 25, 28, 29, 32
- RAMKRISHNAN, R. et al. Effect of random inclusion of sisal fibres on strength behavior and slope stability of fine grained soils. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 11, p. 25313–25322, 2018. Publisher: Elsevier Ltd. 2
- RANJAN, G.; VASAN, R. M.; CHARAN, H. D. Behaviour of plastic-fibre-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 13, n. 8, p. 555–565, 1994. 46

- RANJAN, G.; VASAN, R. M.; CHARAN, H. D. Probabilistic Analysis of Randomly Distributed Fiber-Reinforced Soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 122, n. 6, p. 419–426, 1996. 13, 36, 37
- SAHA, P. et al. Durability of lignocellulosic fibers treated with vegetable oil-phenolic resin. *Carbohydrate Polymers*, v. 87, n. 2, p. 1628–1636, 2012. Publisher: Elsevier Ltd. 23
- SAHA, P. et al. Durability of transesterified jute geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 35, p. 69–75, 2012. 27
- SALES, K. C. S. *Melhoria de solos por inclusão de fibras naturais*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, 2011. 14, 33
- SANTIAGO, G. A. *Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2011. 10, 14, 25, 32, 79
- SANTOS, D. *Desenvolvimento de painéis sanduíche leves com faces em compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal e núcleo em bioconcreto de casca de arroz*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020. 27, 29, 68
- SAPUAN, S.; ISMAIL, H.; ZAINUDIN, E. *Natural Fiber Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites Development, Characterization and Applications*. First. London: Elsevier, 2018. 4, 16, 17
- SARBAZ, H.; GHIASSIAN, H.; HESHMATI, A. A. CBR strength of reinforced soil with natural fibres and considering environmental conditions. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 15, n. 7, p. 577–583, 2014. 28, 32
- SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 38, n. 7, p. 1694–1709, 2007. 18
- SAVASTANO, H.; AGOPYAN, V. Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 21, n. 1, p. 49–57, 1999. 21, 68
- SHUKLA, S. K. *Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering*. First edit. Singapore: Springer International Publishing, 2017. 7, 9, 11, 12, 18
- SILVA, C. *Ensaio de adensamento com deformação controlada (CRS): Desenvolvimento de uma ferramenta para análise e interpretação dos resultados*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Viçosa, 2018. 90
- SILVEIRA, M. et al. Avaliação da Resistência Mecânica de um Solo Arenoso com a Inclusão de Fibras de Polietileno. *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano*, II, n. 1, p. 1–10, 2018. 8, 14

- SILVEIRA, M. V. *Análise do Comportamento Mecânico e da Durabilidade em Compósitos de Areia Reforçada com Fibras Naturais de Curauá*. Tese (Tese (Doutorado)) — PUC-Rio, 2018. 1, 2, 18, 21, 24, 25, 29, 30, 31, 51, 66
- SINDICOCO. *Indústria do coco cresce, mas alto desperdício gera desafio tecnológico*. 2014. Pages: 3. 3
- SINDICOCO. *Brasil é o maior produtor de água de coco do mundo*. 2017. Pages: 3. 19
- SOTOMAYOR, J. M. *Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibras de coco submetidos a ensaios de placa em verdadeira grandeza* Dissertação. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2014. 6
- SOTOMAYOR, J. M. G.; CASAGRANDE, M. Estudo experimental de solo reforçado com fibra de coco utilizando ensaios de placa de grande magnitude para aplicação em obras geotécnicas. *Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, v. 1, n. November, p. 11, 2015. 2, 23
- SOTOMAYOR, J. M. G.; CASAGRANDE, M. D. T. The performance of a sand reinforced with coconut fibers through plate load tests on a true scale physical model. *Soils and Rocks*, v. 41, n. 3, p. 361–368, 2018. 15
- SOUSA, R. P. *Estudo dos fluxos de óleo diesel e água em solos não saturados: desenvolvimento experimental e modelagem matemática*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Bahia, 2012. 69
- SPECHT, L. P. *Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 9
- SUBAIDA, E. A.; CHANDRAKARAN, S.; SANKAR, N. Laboratory performance of unpaved roads reinforced with woven coir geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 27, n. 3, p. 204–210, 2009. Publisher: Elsevier Ltd. 2
- SUBRAMANI, T.; UDAYAKUMAR, D. Experimental Study On Stabilization Of Clay Soil Using Coir Fibre. *International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management*, v. 5, n. 5, p. 192–204, 2016. 4, 32
- TANG, C. et al. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 25, n. 3, p. 194–202, 2007. 32, 33
- TANG, C. S. et al. Tensile strength of fiber-reinforced soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 7, 2016. ISSN 08991561. 32, 33
- TEODORO, J. M. *Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1999. 9, 24, 32
- TOLEDO, R. D. et al. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 5, p. 537–546, 2005. 21, 66

TOMCZAK, F. *Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2010. 16, 17, 18, 21

TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K. G.; SYDENSTRICKER, T. H. D. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III - Morphology and properties of Brazilian curauá fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 38, n. 10, p. 2227–2236, 2007. 22, 66

TRAN, K. Q.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft soils. *Transportation Geotechnics*, v. 16, n. February, p. 76–84, 2018. ISSN 22143912. Publisher: Elsevier. 8, 14, 34

TRINDADE, T. P. d. et al. Estudos laboratoriais do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em estradas florestais. *Revista Árvore*, v. 30, n. 2, p. 215–222, 2006. 8, 32, 33

VENDRUSCOLO, M. A. *Estudo do Comportamento de Materiais Compósitos Fibrosos para Aplicação como Reforço de Base de Fundações Superficiais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 8, 15

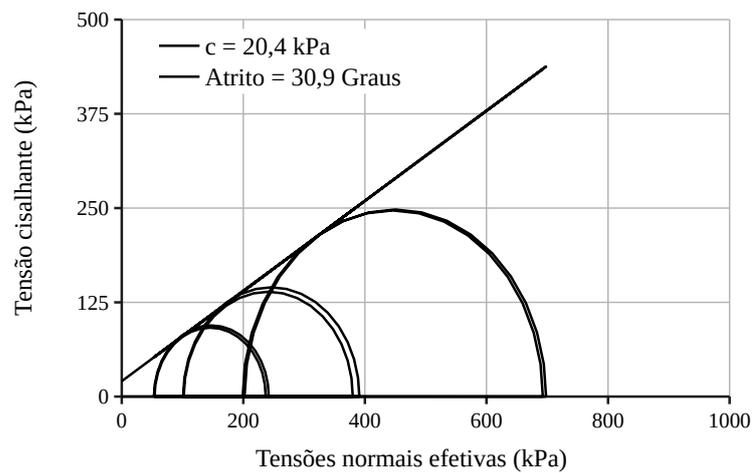
VENTURA, A. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 21, n. 3-4, p. 10–19, 2009. 13

YIXIAN, W. et al. Study on Strength Influence Mechanism of Fiber-Reinforced Expansive Soil Using Jute. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 34, n. 4, p. 1079–1088, 2016. Publisher: Springer International Publishing. 8

ZORNBERG, J. G. Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. *Geotechnique*, v. 8, p. 593–604, 2002. 36, 37

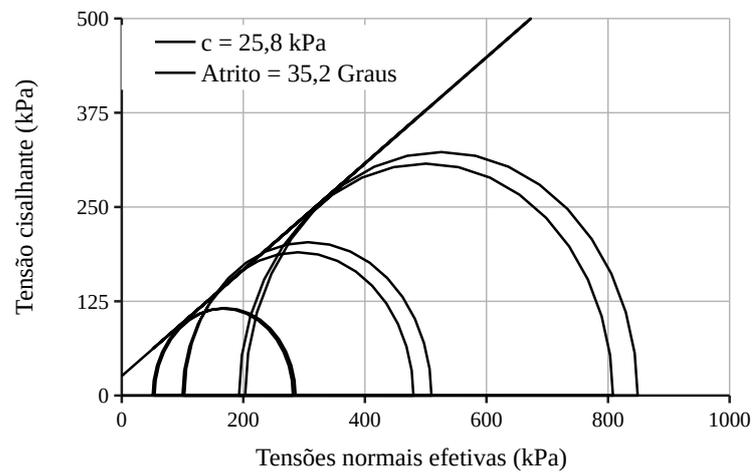
Apêndice A - APÊNDICES

Figura A.1 – Envoltória de resistência do solo não reforçado.



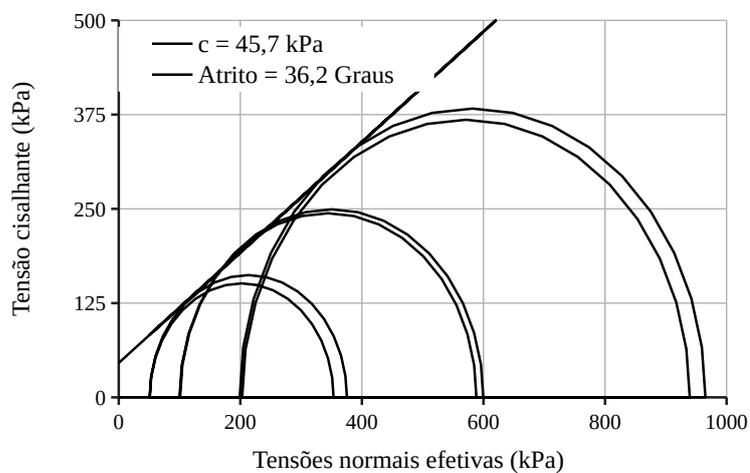
Fonte: Autor, 2022.

Figura A.2 – Envoltória do solo reforçado com 0,5% de fibra.



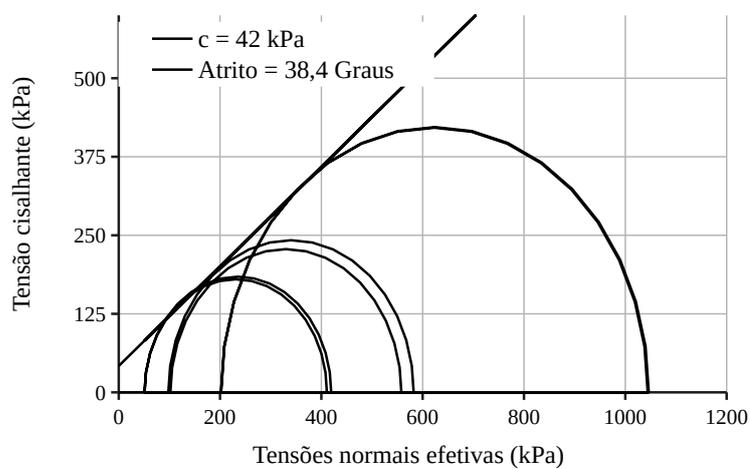
Fonte: Autor, 2022.

Figura A.3 – Envoltória do solo reforçado com 1,0% de fibra.



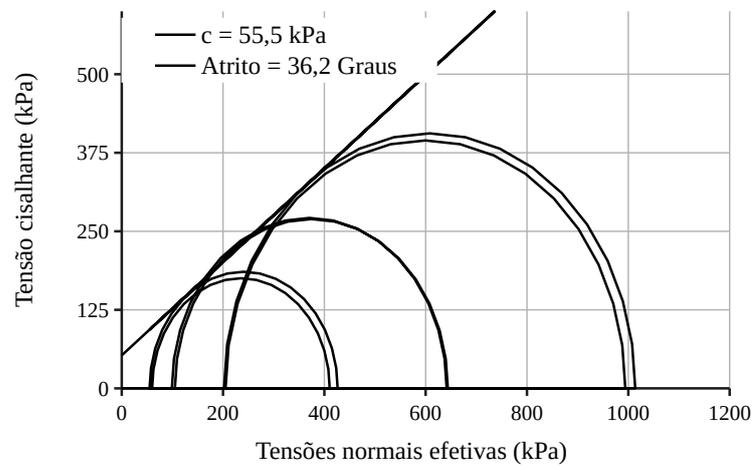
Fonte: Autor, 2022.

Figura A.4 – Envoltória do solo reforçado com 1,5% de fibra.

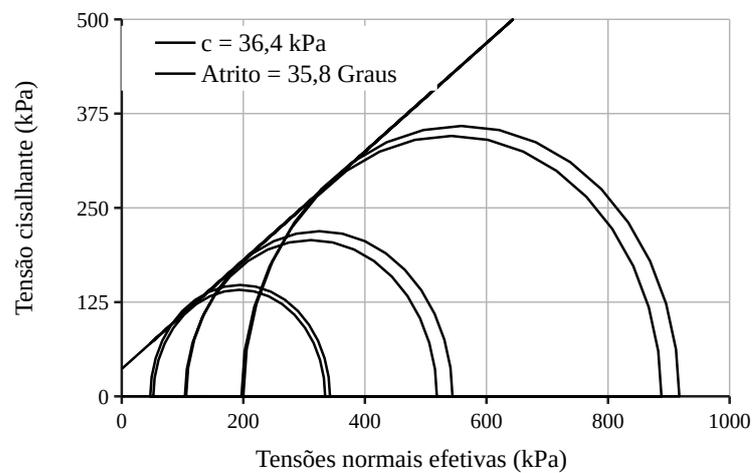


Fonte: Autor, 2022.

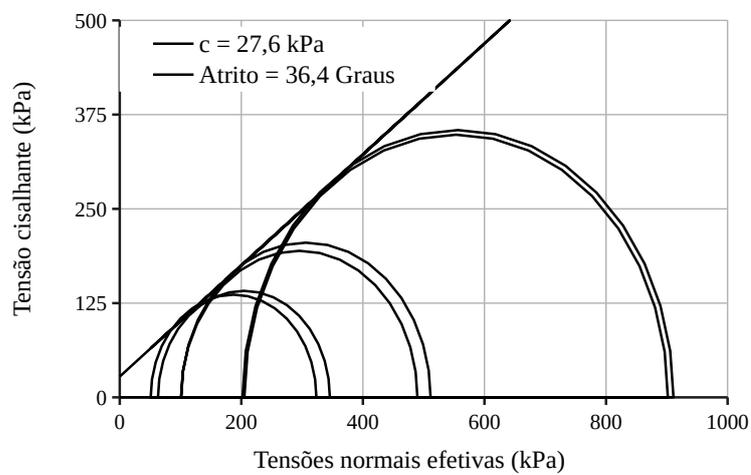
Figura A.5 – Envoltória do solo reforçado com fibra tratada por hornificação.



Fonte: Autor, 2022.

Figura A.6 – Envoltória do solo reforçado com fibra tratada com $NaOH$.

Fonte: Autor, 2022.

Figura A.7 – Envoltória do solo reforçado com fibra tratada com $NaOH$ e hornificação.

Fonte: Autor, 2022.