



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

THAÍS MOTA FREITAS

**COMPORTAMENTO MECÂNICO A LONGO PRAZO DE UM SOLO
REFORÇADO COM FIBRAS DE COCO**

Salvador

2022

THAÍS MOTA FREITAS

**COMPORTAMENTO MECÂNICO A LONGO PRAZO DE UM SOLO
REFORÇADO COM FIBRAS 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 Mestra em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Sandro Lemos Machado

Agência Financiadora: FAPESB

Salvador

2022

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Thaís Mota Freitas

APRESENTADA AO MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, EM 14 DE AGOSTO DE 2022.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

SANDRO LEMOS MACHADO

Data: 14/08/2022 08:05:08-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. (a) Dr. (a) **Sandro Lemos Machado**

Orientador

PPEC-UFBA



Documento assinado digitalmente

MIRIAM DE FATIMA CARVALHO MACHADO

Data: 15/08/2022 10:11:45-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. (a) Dr. (a) **Miriam de Fátima Carvalho Machado**

PPEC- UFBA



Documento assinado digitalmente

MARIANA VELLA SILVEIRA

Data: 15/08/2022 11:46:04-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. (a) Dr. (a) **Mariana Vela Silveira**

POSDEHA/UFC

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

Freitas, Thaís Mota
Comportamento mecânico a longo prazo de um solo reforçado com fibras de coco / Thaís Mota Freitas.
Salvador, 2022.
98f.

Dissertação de Mestrado – Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Área de Geotecnia – Universidade Federal da Bahia, 2022. Orientador: Prof. Dr. Sandro Lemos Machado.

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

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FREITAS, Thaís Mota. **Comportamento mecânico a longo prazo de um solo reforçado com fibras de coco** . 2022. 98f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Bahia, Salvador.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Thaís Mota Freitas

TÍTULO DO TRABALHO: Comportamento mecânico a longo prazo de um solo reforçado com fibras 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. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a autorização da autora.



Thaís Mota Freitas
Avenida Sergipe, 150
45.051-270 – Vitória da Conquista – BA

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Sandra, por ser meu exemplo de força e determinação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo seu amor incondicional que me sustentou até aqui, por ser o meu porto seguro e o meu amparo.

Ao meu esposo Hugo, pela compreensão, companherismo e por sempre me encorajar a ir mais longe. Aos meus pais Sandra e João e minha irmã Ingrid por todo amor, incentivo e por todo esforço para que eu chegasse até aqui.

Ao meu padrasto Valter, madrasta Mara, meus sogros Zelfa e Valdomiro e meus cunhados Thiago e Êmilly pelo apoio, fundamental para a conclusão desta etapa.

Ao meu orientador Prof.^o Sandro Machado pelo exemplo, ensinamentos, disponibilidade e dedicação a esta pesquisa.

À Prof.^a Miriam Carvalho pela paciência e pelas contribuições durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

A toda equipe do Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA, em especial aos técnicos Jeová e Ricardo pelo auxílio durante a realização dos experimentos, ensinamentos e pela convivência durante todo o processo.

À Michelle, que além de colega de mestrado se tornou uma grande amiga, obrigada pelo companherismo e por dividir comigo as alegrias e tristezas da vida em Salvador. Ao meu colega de pesquisa Antonio Felipe, que é também parte deste trabalho, pela amizade, ensinamentos e momentos de descontração. Vocês tornaram esta jornada mais leve.

Aos demais colegas do GEOAMB, Murilo, Camilla, Bruno, Leandro e Érdeson, pelos ensinamentos e pela convivência.

Aos técnicos Armando e Neto do Laboratório de Geotecnia da UFBA por viabilizarem a realização de alguns ensaios.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pela concessão da bolsa de mestrado.

EPÍGRAFE

Confie no Senhor de todo o coração e não se apoie na sua própria inteligência. Reconhece-o em tudo o que fizer, e Ele lhe mostrará o caminho certo.

— Provérbios 3:5-6

RESUMO

O reforço de solos tem se apresentado como uma alternativa eficaz para viabilizar diversas aplicações destes materiais diante de suas características geotécnicas, muitas vezes, limitadas no estado natural. A adição de fibras ao solo é uma técnica de reforço que possui reconhecido efeito de melhoria das suas propriedades mecânicas. Por outro lado, o emprego de fibras naturais ainda é objeto de diversos estudos, uma vez que estas se degradam ao longo do tempo. Diante disso, o presente trabalho visa avaliar o comportamento mecânico de um solo areno-siltoso reforçado com fibras de coco após submetidas ao processo de envelhecimento natural. O programa experimental consistiu no tratamento das fibras de coco pelos processos de hornificação, mercerização (tratamento com NaOH) e o tratamento em conjunto (hornificação + NaOH). O solo sem reforço e os compósitos contendo o teor de 1% de fibras não tratadas e tratadas foram compactados em caixas de madeira, as quais ficaram expostas às intempéries por um período de cinco meses. Ao final desse período, foram talhados os corpos de prova e realizados ensaios triaxiais do tipo CD nas tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa e ensaios de resistência à tração por compressão diametral. Os resultados obtidos foram comparados às análises sem envelhecimento realizadas por Reis (2022). Tal comparação mostrou que a resistência do solo sem reforço e dos compósitos foi afetada de forma sutil pelo envelhecimento natural e que mesmo após este processo, as fibras continuaram a contribuir com o aumento da resistência ao cisalhamento. Notou-se que os compósitos de fibras hornificadas apresentaram valores de tensão desviadora máxima 14, 11 e 8% superiores aos compósitos com fibras sem tratamento mesmo após o envelhecimento natural para as três tensões confinantes analisadas. Tais resultados mostraram que as fibras tratadas com a hornificação apresentam grande potencial de aplicação em situações de campo.

Palavras-Chave: Envelhecimento Natural, Fibras de Coco; Reforço de Solos

ABSTRACT

Soil reinforcement has been presented as an effective alternative to enable several applications of these materials in view of their geotechnical characteristics, often limited in the natural state. The addition of fibers to the soil is a reinforcement technique that has a recognized effect of improving its mechanical properties. On the other hand, the use of natural fibers is still the subject of several studies, since they degrade over time. In view of this, the present work aims to evaluate the application of coconut fibers as a reinforcement of a sandy-silty soil extracted from the area of boot outside the Aterro Sanitário Metropolitano Centro de Salvador-Ba, after the natural aging process. The experimental program consisted of the treatment of coconut fibers by the processes of hornification, mercerization (treatment with NaOH) and the joint treatment (hornification + NaOH). The pure soil and the composites containing 1% of untreated and treated fibers were compacted in wooden boxes, which were exposed to the elements for a period of five months. At the end of this period, the specimens were carved and triaxial tests CD were carried out at confining stresses of 50, 100 and 200 kPa and tensile strength tests by diametral compression. The results obtained were compared to analyzes without aging performed by Reis (2022). This comparison showed that the strength of the unreinforced soil and composites was subtly affected by natural aging and that even after this process, the fibers continued to contribute to the increase in shear strength. Such results showed that fibers treated with hornification have great potential for application in field situations.

Keywords: Natural Aging; Reinforced soils; Coconut fibers

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Distribuição das fibras no solo.	9
Figura 2.2. Organização estrutural dos três principais constituintes da parede celular da fibra.	15
Figura 2.3. Arranjo helicoidal das fibras de celulose nas fibras naturais.	17
Figura 2.4. Partes constituintes do coco.	19
Figura 2.5. Microscopia ótica de fibras de coco.	21
Figura 2.6. Parâmetros de resistência obtidos para compósitos solo/fibra de coco.	22
Figura 2.7. Estrutura típica da (a) fibra não tratada (b) fibra pós tratamento com NAOH.	27
Figura 3.1. Esquema do desenvolvimento experimental	34
Figura 3.2. Mapa com a localização da área de coleta do solo com a geologia	35
Figura 3.3. (a) Local de coleta do solo: área de bota fora do ASMC . (b) Solo Barreiras	36
Figura 3.4. Ensaio de caracterização geotécnica: (a) Peneiramento. (b) Sedimentação (c) Determinação do Limite de Liquidez	37
Figura 3.5. Ensaio de FRX do solo.	38
Figura 3.6. Fibras vegetais de coco	39
Figura 3.7. Comprimentos das fibras de coco	40
Figura 3.8. Ensaio de capacidade de absorção de água. (a) Saturação das fibras. (b) Centrífuga manual. (c) Papel toalha para retirar o excesso de água.	41
Figura 3.9. Picnômetro a gás hélio utilizado para determinar a massa específica das fibras	43
Figura 3.10. Microscópio óptico	44
Figura 3.11. Ensaio de tração direta nas fibras. (a) Corpo de prova antes da ruptura. (b) Aparato utilizado para o ensaio ensaio. (c) Corpo de prova após a ruptura.	45
Figura 3.12. Mistura solo/fibra (teor de 1%)	46
Figura 3.13. Compactação das caixas. (a) Orifícios para drenagem da água de chuva. (b) Geotêxtil sobre a base. (c) Compactador manual utilizado.	48
Figura 3.14. Compactação das caixas. (a) Orifícios para drenagem da água de chuva. (b) Geotêxtil sobre a base. (c) Compactador manual utilizado.	49
Figura 3.15. Local de exposição das caixas compactadas.	50
Figura 3.16. Talhagem dos corpos de prova envelhecidos. (a) Equipamento utilizado. (b) Processo de talhagem. (c) CP talhado.	51

Figura 3.17.Preparação dos corpos de prova: (a) Corpo de prova na base da câmara triaxial. (b)Corpo de prova revestido com membrana. (c) Corpo de prova montado na câmara triaxial. (d) Ensaio de permeabilidade.	51
Figura 3.18.Sistema automatizado servo-controle. (a) Parte elétrica. (b) Aplicação e medição das pressões. (c) Sistema mecânico.	53
Figura 3.19.Ensaio de resistência à tração por compressão diametral: (a) Corpo de prova de solo sem reforço. (b) Corpos de prova solo/fibra hornificada.	56
Figura 4.1. Curva granulométrica das amostras de solo	57
Figura 4.2. Composição gravimétrica do solo	60
Figura 4.3. Ciclos do tratamento de hornificação.	62
Figura 4.4. Capacidade de absorção de água para as fibras sem tratamento e tratadas.	62
Figura 4.5. Superfície longitudinal da fibra de coco.	63
Figura 4.6. Variação entre diâmetros das fibras e resistência à tração.	66
Figura 4.7. Parâmetros meteorológicos entre setembro de 2021 e fevereiro de 2022: precipitação, temperatura média e umidade relativa do ar.	69
Figura 4.8. Superfície das amostras ao final do período de exposição. (a) Solo sem reforço. (b) Compósito solo fibra não tratada.	70
Figura 4.9. Curvas tensão-deformação e variação volumétrica para o solo compactado no molde e nas caixa de madeira.	71
Figura 4.10.Análises de curto e longo prazos: curvas tensão-deformação e variação volumétrica para o solo não reforçado.	73
Figura 4.11.Envoltórias de resistência para o solo puro.	74
Figura 4.12.Superfície de ruptura formada nos corpos de prova: (a) Corpos de prova submetidos às confinantes de 50 e 100 kPa. (b) Corpos de prova submetidos à confinante de 200 kPa.	74
Figura 4.13.Análises de curto e longo prazo: curvas tensão-deformação e variação volumétrica para os compósitos.	76
Figura 4.14.Envoltória de resistência para os compósitos ensaiados a curto e longo prazos. (a) Fibras não tratadas. (b) Hornificação. (c) NaOH. (d) Hornificação + NaOH.	79
Figura 4.15.Curvas tensão-deformação e variação volumétrica para o solo puro e compósitos envelhecidos.	80
Figura 4.16.Envoltória de resistência para os compósitos envelhecidos com relação ao solo sem reforço sem envelhecimento. (a) Fibras não tratadas. (b) Hornificação. (c) NaOH. (d) Hornificação + NaOH.	82
Figura 4.17.Influência da tensão confinante nos valores de tensão desviadora máxima	84
Figura 4.18.Resistência à tração por compressão diametral: curvas típicas de tensão vs deslocamento.	86
Figura 4.19.Coesão dos ensaios de tração versus coesão dos ensaios triaxiais.	87

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1. Trabalhos anteriores envolvendo solos reforçados com fibras.	12
Tabela 2.2. Composição química típica das fibras naturais (%)	16
Tabela 2.3. Propriedades mecânicas de fibras naturais e de fibras convencionais usadas como reforço	18
Tabela 2.4. Propriedades mecânicas das fibras de coco	20
Tabela 2.5. Estudos sobre o compósito solo/fibra de coco	22
Tabela 2.6. Tratamentos aplicados em fibras naturais	29
Tabela 3.1. Caracterização geotécnica do solo: normas utilizadas	37
Tabela 3.2. Compósitos submetidos ao envelhecimento natural.	48
Tabela 4.1. Composição granulométrica e classificação do solo.	57
Tabela 4.2. Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do solo.	58
Tabela 4.3. Composição química do solo.	59
Tabela 4.4. Porcentagem de matéria orgânica.	59
Tabela 4.5. Resultado do ensaio FRX para a fibra natural.	61
Tabela 4.6. Resultados médios e respectivos desvios padrão e coeficientes de vari- ação dos ensaios de tração para definição do tratamento com NaOH.	64
Tabela 4.7. Resultados médios e respectivos desvios padrão e coeficientes de vari- ação dos ensaios de tração.	65
Tabela 4.8. Coeficiente de permeabilidade (cm/s) das amostras.	67
Tabela 4.9. Parâmetros de resistência do solo para os métodos de compactação empregados.	71
Tabela 4.10. Tensão desviadora máxima e parâmetros de resistência do solo antes e após envelhecimento.	74
Tabela 4.11. Tensão desviadora máxima para o solo puro e para os compósitos (kPa).	75
Tabela 4.12. Parâmetros de resistência dos compósitos.	78
Tabela 4.13. Parâmetros de resistência do solo e dos compósitos envelhecidos.	81
Tabela 4.14. Valores de tensão desviadora máxima para o solo puro e para os com- pósitos.	83
Tabela 4.15. Índices físicos dos ensaios de compressão diametral.	85
Tabela 4.16. Resistência à tração.	86
Tabela A.1. Índices físicos das análises a curto prazo.	97
Tabela A.2. Índices físicos das análises a longo prazo.	98

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CD	Consolidado Drenado
CP	Corpo de prova
CV	Coeficiente de variação
CSL	Linha de Estados Críticos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária
EPN	Energia do Proctor Normal
FRX	Fluorescência de Raio-X
GEOAMB	Laboratório de Geotecnia Ambiental
IP	Índice de Plasticidade
LEDMa	Laboratório de Ensaios de Durabilidade dos Materiais
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NaCl	Cloreto de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NCL	Linha de Compressão Isotrópica
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
M.O.	Matéria orgânica
Pa	Pascal
pH	Potencial de hidrogênio
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UFBA	Universidade Federal da Bahia
B	Parâmetro de poropressão de Skempton
$^{\circ}C$	Graus Celsius
c	Intercepto coesivo do solo
d	Diâmetro da fibra
E	Módulo de elasticidade
e	Índice de vazios

e_c	Índice de vazios após a compactação
e_c	Índice de vazios final
k	Coefficiente de permeabilidade
l	Comprimento da fibra
M_f	Massa da fibra após imersão em água
M_o	Massa da fibra antes da imersão em água
P_f	Teor de fibras
P	Carga de fratura primária
q	Tensão desviadora
S_r	Grau de Saturação
t_{100}	Tempo de consolidação
$'$	Relativo às tensões efetivas
ε	Deformação
γ_s	Peso específico dos sólidos
γ_f	Peso específico das fibras
$\gamma_{s,f}$	Peso específico do compósito
ϕ	Ângulo de atrito do solo
ρ_s	Massa específica dos grãos
ρ_{dmax}	Massa específica seca máxima
σ_3	Tensão confinante
σ_t	Resistência à tração
W_{ot}	Umidade ótima

SUMÁRIO

	Pág.
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xii
SUMÁRIO	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	4
1.1.1 Objetivo Geral	4
1.1.2 Objetivos Específicos	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Solos reforçados e sua aplicação em camadas de coberturas	5
2.2 Mecanismos de interação solo-fibra	7
2.3 Tipos de fibras empregadas como reforço	12
2.3.1 Fibras Minerais	13
2.3.2 Fibras Poliméricas	13
2.3.3 Fibras Metálicas	14
2.3.4 Fibras Naturais	14
2.4 Fibras de coco	19
2.5 Estudos experimentais envolvendo fibras de coco	21
2.6 Degradação das fibras naturais	22
2.7 Tratamentos em fibras naturais	25
2.8 Envelhecimento de fibras naturais	29
3 METODOLOGIA	33
3.1 Caracterização do Solo	35
3.1.1 Caracterização geotécnica	36
3.1.2 Caracterização química	37
3.2 Caracterização das Fibras de Coco	39

3.2.1	Comprimento da fibra	39
3.2.2	Caracterização química	40
3.2.3	Capacidade de absorção de água	41
3.2.4	Tratamento das fibras	42
3.2.5	Determinação da Massa Específica	43
3.2.6	Análise microscópica	44
3.2.7	Ensaio de tração simples	44
3.3	Compósitos solo/fibra	46
3.4	Envelhecimento natural e monitoramento do processo de fissuração	49
3.5	Talhagem e preparação dos corpos de prova	50
3.6	Ensaio de permeabilidade	51
3.7	Comportamento Mecânico	52
3.7.1	Ensaio de compressão triaxial	52
3.7.2	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1	Caracterização do solo	57
4.2	Caracterização das fibras	60
4.2.1	Comprimentos	60
4.2.2	Composição química	60
4.2.3	Capacidade de absorção de água	61
4.2.4	Massa específica das fibras	63
4.2.5	Análise microscópica	63
4.2.6	Resistência à tração	64
4.3	Permeabilidade dos corpos de prova	67
4.4	Efeitos do envelhecimento na superfície dos compósitos	68
4.5	Comportamento Mecânico	70
4.5.1	Ensaio triaxiais	71
4.5.2	Resistência à tração por compressão diametral	84
5	CONCLUSÕES	88
6	REFERÊNCIAS	91
	APÊNDICE A – Apêndices	97

1 INTRODUÇÃO

Embora o solo seja um material de construção de origem natural empregado nas mais diversas aplicações de engenharia civil devido a sua abundância e baixo custo, um dos maiores desafios impostos à engenharia geotécnica é garantir que determinado solo consiga resistir mecanicamente às solicitações estimadas. Frequentemente, a capacidade de suporte do solo sobre o qual se deseja construir está aquém destas solicitações e, por isso, é necessário que ocorra algum tipo de intervenção.

No que concerne às possibilidades de intervenção disponíveis é possível mencionar a substituição do material local por outro com características mais adequadas - o que pode elevar consideravelmente os custos da obra - ou modificar e melhorar as propriedades do solo existente no local por meio de técnicas de melhoramento. Uma técnica que tem ganhado destaque nas últimas décadas é a adição de elementos de reforço no solo, dentre os quais pode-se citar a incorporação de elementos tais como geotêxteis, grelhas, tiras ou fibras.

A adição de fibras ao solo possui reconhecido efeito de melhoria das propriedades mecânicas deste, principalmente na sua capacidade de resistir aos esforços de tração que surgem durante com o tempo. O reforço do solo com as fibras é uma alternativa para melhorar a resposta mecânica de terraplenagem sempre que a compactação do solo por si só não fornecer o comportamento mecânico desejado. Em virtude disso, o solo reforçado com fibras tem ganhado notoriedade em diversas aplicações, tais como composição de camadas de cobertura de aterros sanitários, maciços barragens de terra, pavimentos flexíveis e outras obras de terraplenagem.

É consenso entre diversos autores que o melhoramento ou alteração das propriedades mecânicas dos solos reforçados com fibras depende da união entre fatores como as características das fibras e do solo empregado, da tensão de confinamento e do modo de carregamento. Além disso, entende-se que o maior potencial deste material está no estado pós-pico, onde as fibras contribuem de forma mais efetiva na resistência, aumentando assim a sua capacidade de absorção de energia (SILVEIRA, 2018).

A introdução de um elemento de reforço (fibras) em uma matriz (solo) resulta em

um material chamado de compósito, ou seja, a união de dois materiais diferentes dá origem a um novo material com propriedades distintas das propriedades de seus materiais constituintes (CASAGRANDE, 2005). As fibras empregadas como reforço são divididas em dois grandes grupos: fibras sintéticas e fibras naturais. As fibras sintéticas são compostas por materiais artificiais e possuem vantagens como as propriedades constantes e bem definidas e a não deterioração. Já as fibras naturais, em sua grande maioria de origem vegetal, não apresentam uniformidade em suas propriedades mecânicas tais como as fibras sintéticas. No entanto, comparadas às fibras sintéticas, evidenciam baixo custo, reciclabilidade, baixo consumo de energia para sua produção e emprego de tecnologias relativamente simples, além de serem advindas fontes renováveis (NETO; PARDINI, 2016).

Em contrapartida, um fator que limita o uso de fibras naturais como material de reforço é o fato destas sofrerem processos de decomposição após sua aplicação no solo, devido a sua natureza orgânica, suscetibilidade à ação de microrganismo e a elevada capacidade de absorção de água, o que reduz a vida útil do material compósito. Diante disso, uma das maiores aplicações para este tipo de fibras na engenharia geotécnica é na construção de obras temporárias, como é o caso das camadas de cobertura dos aterros sanitários. A inclusão das fibras naturais no solo que compõe estas camadas apresenta-se como uma opção para reduzir as emissões fugitivas de gases no aterro a partir da contenção das fissuras formadas pelos ciclos de umedecimento e secagem a que são expostas no ambiente e, além disso, introduzir matéria orgânica capaz de oxidar o gás metano liberado (DAMASCENO; CARVALHO; MACHADO, 2019).

Mais recentemente, diversos estudos têm voltado a sua atenção aos processos de tratamento de fibras vegetais, em uma tentativa de melhorar as propriedades e vida útil desses materiais e ampliar a gama de aplicação deste material a longo prazo (LEO-CÁDIO, 2005; FIDELIS, 2014; AGUILAR, 2015; FERREIRA, 2016; JAIRAJ; KUMAR; RAGHUNANDAN, 2018; SILVEIRA, 2018). Embora a importância de avaliar a durabilidade das fibras vegetais tenha sido reconhecida, conforme retratado por Silveira (2018), a literatura ainda carece de estudos voltados a avaliação do comportamento mecânico do compósito solo/fibras vegetais aleatoriamente distribuídas após exposição aos agentes climáticos diversos, principalmente em climas tropicais.

As fibras vegetais de coco, objeto de estudo desta pesquisa, destacam-se por sua maior durabilidade em comparação as outras fibras de origem vegetal, devido ao alto percentual de lignina presente em sua composição, podendo levar mais de oito anos para sua completa decomposição (CARRIJO; LIZ; MAKISHIMA, 2002). Outra justificativa para a utilização desta fibra reside na tentativa de dar uma destinação mais adequada para a casca de coco, que é um resíduo descartado em abundância, principalmente nas praias do nordeste brasileiro onde o consumo do coco é bastante elevado, e possui baixo valor comercial.

Nesse contexto, o presente trabalho pretende avaliar o potencial de uso de fibras de coco como reforço do solo com vistas ao seu emprego em obras de terra. Para isso, foi analisado o comportamento mecânico do compósito solo/fibra a longo prazo por meio do processo de envelhecimento natural e verificado os eventuais benefícios dos tratamentos adotados para mitigar os efeitos da degradação nas fibras, focando-se em como o envelhecimento afetou o comportamento mecânico do compósito.

O trabalho está dividido em cinco capítulos os quais abrangem a introdução, a revisão bibliográfica, a metodologia, os resultados e discussão e as conclusões. No primeiro capítulo, é apresentado o tema de forma introdutória, seguido do objetivo geral e dos objetivos específicos. O segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica, a qual trata do emprego de fibras para o reforço do solos e suas especificações, destacando-se o uso de fibras naturais, sua degradação e a aplicação de processos de tratamento. O capítulo três abrange os procedimentos experimentais empregados na pesquisa. Neste capítulo são descritos os ensaios de caracterização dos materiais utilizados, bem como os equipamentos e os métodos para realização dos ensaios mecânicos. O capítulo quatro apresenta e discute com base na literatura, os resultados encontrados a partir dos ensaios realizados na pesquisa, entre eles a caracterização do solo e das fibras empregadas, bem como o comportamento mecânico do compósito solo/fibra de coco após o envelhecimento natural. Por fim, no capítulo cinco encontram-se as conclusões obtidas a partir desta pesquisa.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Verificar os efeitos a longo prazo da adição de fibras de coco tratadas e não tratadas, como material de reforço em um solo areno-siltoso por intermédio da análise do comportamento mecânico dos compósitos envelhecidos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir tratamentos contra a degradação das fibras de coco e avaliar a influência destes tratamentos na resistência à tração das fibras por meio de ensaios de tração direta.
- Comparar o comportamento da resistência ao cisalhamento do solo quando compactado em um molde cilíndrico bipartido e em uma caixa de madeira para validação da comparação entre as análises de curto e longo prazo.
- Analisar o comportamento da resistência ao cisalhamento dos compósitos com o teor de 1% de fibras de coco sem tratamento e tratadas após exposição às intempéries.
- Comparar o comportamento mecânico das amostras envelhecidas com a análise a curto prazo realizada por Reis (2022).
- Obter o tipo de tratamento que oferece melhor desempenho a partir da análise do comportamento mecânico dos compósitos envelhecidos.
- Analisar a resistência à tração dos compósitos com o teor de 1% de fibras antes e após envelhecimento por meio de ensaios de compressão diametral.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solos reforçados e sua aplicação em camadas de coberturas

Os compósitos são materiais formados pela combinação de dois ou mais elementos distintos. O desenvolvimento dos compósitos consiste na combinação de duas fases (matriz e reforço) que formam um material com desempenho superior ao da matriz original, principalmente em relação às suas propriedades mecânicas. Os reforços são comumente utilizados por suprirem propriedades então ausentes ou deficitárias à matriz, como no caso da resistência à tração dos solos e de sua susceptibilidade ao aparecimento e propagação de fissuras.

Em termos de desempenho mecânico, é função da matriz absorver as solicitações aplicadas ao compósito e posteriormente transmitir e distribuir para o reforço provocando um compartilhamento da resistência do compósito entre as fases constituintes. A fase reforço de um compósito pode ser constituída por materiais na forma de fibras ou partículas, cuja origem pode ser sintética ou natural e de formas, tamanhos e orientações variados (CALLISTER; RETHWISCH, 2007).

O reforço de solos consiste numa técnica na qual se insere um material que possua alta resistência à tração no solo, promovendo, então, uma melhoria nas suas propriedades mecânicas, aumentando a sua resistência e diminuindo a sua compressibilidade (BOLAÑOS, 2013).

As fibras caracterizam-se por serem elementos filiformes com flexibilidade, finura e grande comprimento em relação à dimensão transversal máxima. O termo fibra é utilizado de forma genérica para vários tipos de materiais, naturais ou não, que formam os elementos básicos de estruturas fibrosas (COSTA, 2013). A técnica de reforço de solos compactados por meio da inclusão de fibras tem sido amplamente aplicada na engenharia geotécnica para melhorar o desempenho de materiais suscetíveis ao aparecimento de fissuras, as quais diminuem a capacidade de suporte do solo, prejudicando a vida útil destes.

As fibras atuam controlando a abertura e o espaçamento entre as fissuras que se formam devido às tensões de tração atuantes no solo. Para Taylor (1994) e Hannant

(1994), a maior contribuição que as fibras conferem como elemento de reforço se dá após o surgimento das fissuras no compósito, uma vez que a partir deste momento, elas começam a trabalhar, contribuindo com o aumento da resistência ao cisalhamento do material.

Teodoro (1999) confeccionou painéis com solo de matriz argilosa reforçados com fibras de polipropileno, com a finalidade de estudar o padrão de fissuramento deste material quando submetido a variações térmicas. O autor concluiu que o efeito da inclusão de fibras nos painéis foi o de reduzir a dimensão das trincas sem, no entanto, evitar o fissuramento. As fibras não impedem a formação de fissuras porque elas apenas são mobilizadas após a deformação da matriz, mas impedem o aumento das dimensões das fissuras pelo intertravamento que proporcionam na matriz. É consenso entre diversos autores que uma das principais funções das fibras é evitar a propagação de fissuras (HALIP et al., 2019; CASTILHO, 2017).

Alguns estudos têm apresentado a adição de compostos orgânicos e fibras aos solos de cobertura de aterros sanitários como uma potencial alternativa para o melhoramento das propriedades mecânicas no tocante à capacidade de resistir aos esforços de tração impostos pelos ciclos de umedecimento e secagem e pelos recalques diferenciais do maciço de resíduos, e, também, no que se refere ao seu potencial para oxidação de metano (SANTOS, 2019; COSTA, 2015). Conforme relatado por Damasceno (2018) e Damasceno, Carvalho e Machado (2019), a presença de fissuras aumenta consideravelmente as emissões fugitivas de metano pelas camadas de cobertura, podendo atingir valores entre 33 a 50 m³/h em uma área de cobertura de cerca de 3800 m², esse valor corresponde a aproximadamente 15% do metano gerado em um aterro tropical.

A inclusão de fibras ao solo compactado que compõe a cobertura, intermediária ou final, sobretudo de fibras naturais, apresenta-se como uma potencial alternativa para a melhoria do funcionamento desse tipo de estrutura. As fibras naturais, além de melhorarem as propriedades mecânicas do solo de cobertura, favorecendo o aumento da resistência a tração e, conseqüentemente, reduzindo a propagação de fissuras e a emissão de gases, podem ser capazes de aumentar o potencial de oxidação de metano da camada devido ao aumento da concentração de matéria orgânica.

Neste sentido, o uso de fibras naturais sem tratamento para retardar a ocorrência dos

processos de degradação pode ser preferível no caso de camadas de cobertura intermediária, já que as propriedades mecânicas das fibras seriam exigidas por um curto período e os processos de degradação das fibras naturais poderiam auxiliar no desempenho da camada de cobertura do ponto de vista oxidativo.

2.2 Mecanismos de interação solo-fibra

São analisados aqui os mecanismos que regem o comportamento mecânico do material compósito solo reforçado com fibras, de forma a entender as causas pelas quais a introdução de fibras no solo pode incrementar a sua resistência.

O estudo do comportamento de compósitos solo-fibra requer que a influência de diferentes variáveis seja analisada de forma isolada e também conjunta, pois uma combinação de variáveis pode trazer um resultado esperado para uma dada aplicação do compósito, porém, pode não ser eficaz em outra situação. O conhecimento das mudanças na estrutura do material reforçado com fibras em relação ao solo sem fibras fornece a base para avaliar até que ponto o comportamento mecânico dos solos reforçados pode ser explicado pelas mudanças nos parâmetros usuais empregados para solos não reforçados (CASAGRANDE, 2005).

McGown, Andrawes e Al-Hasani (1978) foram os primeiros autores a discutirem o comportamento mecânico dos solos reforçados com fibras (FEUERHARMEL, 2000). A partir da analogia com uma estaca cravada e de alguns resultados experimentais, esses autores postularam que, considerando não haver deslizamento entre o reforço e o solo, a presença da fibra ocasionará um aumento da capacidade de suporte da areia reforçada em análise com relação ao solo puro ou uma redução das deformações para um dado nível de carregamento. Além disso, os autores observaram um aumento da resistência ao cisalhamento de pico tanto para solos argilosos, quanto arenosos. Foi observado ainda que para se obter o máximo benefício das inclusões de fibras é necessário que elas estejam dispostas na direção das deformações principais dentro da massa de solo. A adesão entre o solo e o reforço e as características de deformação desse elemento também são parâmetros importantes na definição do comportamento do material compósito.

A orientação das fibras e o estado de tensões destacam-se dentre os vários fatores que interferem diretamente no mecanismo de interação solo-fibra (TEODORO, 1999). Além

destes fatores, as características da superfície do reforço, suas propriedades mecânicas e o tipo de solo utilizado são variáveis importantes que controlam o mecanismo de atrito/ adesão na interface de inclusão do solo e, portanto, a transferência efetiva de carregamento da matriz para o reforço (MCGOWN; ANDRAWES; AL-HASANI, 1978).

A orientação da fibra em relação ao plano de ruptura, afeta a sua capacidade de colaborar com a resistência ao cisalhamento e, portanto, influencia na eficiência do reforço. Nesse sentido, uma fibra que esteja posicionada paralela ao plano de ruptura não irá contribuir na resistência mecânica do compósito. Por outro lado, uma fibra que esteja posicionada de forma perpendicular ao plano contribui em seu máximo, promovendo uma "costura" e mobilizando a resistência ao cisalhamento do solo. Ao reforçarem um solo arenoso com diferentes tipos de fibras empregando diferentes orientações de reforço, Gray e Ohashi (1983) comprovaram que a orientação afeta diretamente a resistência ao cisalhamento do solo, sendo que as fibras devem estar preferencialmente orientadas na direção dos esforços de tração para que haja o máximo de mobilização de sua resistência a tração. Os autores obtiveram melhores resultados de resistência do compósito com a orientação das fibras a 60° do plano de cisalhamento. Além disso, notou-se uma similaridade de resposta ao cisalhamento entre a distribuição aleatória e a distribuição orientada das fibras a 90° .

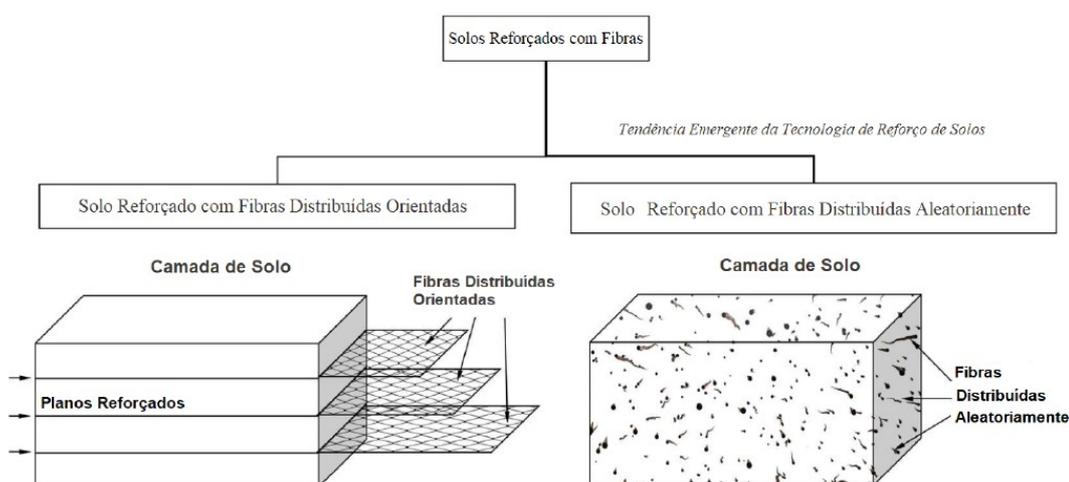
No entanto, com relação a este aspecto, pode-se dizer que o emprego de fibras distribuídas aleatoriamente como técnica de reforço tem sido alvo de grande parte dos estudos mais recentes por apresentar algumas vantagens (BOLAÑOS, 2013; AGUILAR, 2015; SILVEIRA, 2018; GOWTHAMAN; NAKASHIMA; KAWASAKI, 2018; Oliveira Júnior et al., 2019). Além de minimizar a anisotropia do compósito, a inclusão aleatória não costuma apresentar planos preferenciais de fraqueza que podem se desenvolver paralelamente ao reforço orientado. Outro aspecto relevante é que a distribuição aleatória fornece uma facilidade de execução em campo e aplicações do material em larga escala, como é o caso das coberturas de aterros sanitários.

Gowthaman, Nakashima e Kawasaki (2018) estudaram o comportamento mecânico de solos reforçados com fibras de origem vegetal distribuídas de forma orientada e aleatória, conforme apresentado na Figura 2.1. Os autores observaram que a distribuição aleatória apresentou melhores resultados quanto ao incremento da resistência do solo

reforçado.

Apesar dos esforços para obtenção de uma distribuição aleatória das fibras na massa de solo, vale ressaltar que ainda assim pode ser observado um comportamento anisotrópico dentro do solo devido aos efeitos causados pelas técnicas de compactação ou vibração. Sobre este aspecto, Diambra et al. (2010) mostraram que, durante a compactação, as fibras apresentam uma tendência de se orientarem de forma horizontal e sugerem a técnica chamada de "*moist tamping*" (compactação úmida) como aquela capaz de levar a uma distribuição mais próxima da condição de aleatoriedade.

Figura 2.1 – Distribuição das fibras no solo.



Fonte: Gowthaman, Nakashima e Kawasaki (2018).

São vários os aspectos desejados com a inclusão de fibras à uma matriz: aumento da capacidade suporte do material, maior capacidade de absorção de energia para se atingir o colapso (maior resistência ao impacto), queda na redução da resistência pós-pico (para o caso de materiais frágeis), maior capacidade de absorver deformações até atingir a resistência última, redução do fissuramento, entre outros.

As características de resistência e deformabilidade dos elementos de reforço influenciam diretamente o comportamento tensão versus deformação do solo reforçado. As fibras somente passam a exercer uma ação efetiva dentro da massa de solo ao sofrer deformações. McGown, Andrawes e Al-Hasani (1978), ao estudar o processo de deformação nos solos reforçados, perceberam que carregamentos externos de compressão ou alívio de tensões agem na massa de solo provocando deformações internas que acabam por transferir esforços para os elementos de reforço.

Desse modo, em um compósito solo-fibra, o solo quando submetido a esforços de cisalhamento, transfere parte destes esforços para as fibras, provocando assim, uma redistribuição de tensões e de deformações. Tal processo é, portanto, controlado pelas características de deformabilidade e resistência tanto do solo como do reforço, bem como pelos esforços de adesão que se desenvolveram na interface destas duas fases. Dessa forma, acredita-se que ocorre uma mobilização progressiva das fibras do compósito, sendo o comportamento mecânico deste regido por uma fase inicial de mobilização do conjunto matriz-fibras, onde predomina a ação da matriz e uma fase final, na qual a presença das fibras governa os mecanismos de interação (COELHO, 2008).

Gray e Ohashi (1983) notaram que existe um valor de tensão de confinamento crítica, abaixo da qual a fibra não é solicitada, tendendo a escorregar ou ser arrancada durante a ruptura. Para tensões confinantes maiores que a crítica, a resistência à tração da fibra é mobilizada durante a ruptura do compósito. Assim, são característicos os mecanismos de ruptura por perda da aderência solo-fibra (baixas tensões confinantes) e por ruptura do próprio reforço (tensões confinantes altas), já que o aumento da resistência do material compósito é atribuído tanto ao atrito na interface solo-fibra quanto à tensão de tração desenvolvida nas fibras.

A seguir serão apresentados de forma resumida os principais fatores que influenciam no comportamento de solos reforçados com fibras, os quais foram obtidos a partir de um levantamento realizado por Casagrande (2005) baseado nas conclusões de diversos autores:

- a) Teor de fibra: quanto maior o teor de fibra, maior é o acréscimo de resistência mecânica, até um certo limite, a partir do qual este efeito não é mais observado (GRAY; OHASHI, 1983; MAHER; HO, 1993; MCGOWN; ANDRAWES; AL-HASANI, 1978). O aumento do teor de fibra provoca aumento do índice de fragilidade, que diz respeito a quantidade de deformação que precede a fratura do material (MAHER; HO, 1993).
- b) Comprimento da fibra: quanto maior o comprimento da fibra maior é o ganho de resistência mecânica, até um certo limite, a partir do qual não se observa melhorias significativas (GRAY; OHASHI, 1983; SILVEIRA, 2018). O aumento do

comprimento provoca diminuição da resistência de pico e aumento da capacidade de absorção de energia (MAHER; HO, 1993).

- c) Rugosidade: as fibras devem estar bem aderidas à matriz do compósito para que a sua resistência à tração seja mobilizada. Uma boa aderência entre a fibra e solo reduz as dimensões das fissuras e homogeniza a distribuição do reforço no compósito (TAYLOR, 1994; CASAGRANDE, 2005).
- d) Módulo de elasticidade da fibra: as fibras com menores valores de módulo de elasticidade comportam-se como reforços idealmente extensíveis e pouco contribuem com o aumento da resistência mecânica (GRAY; OHASHI, 1983).

Pinto (2021) realizou um levantamento sobre a influência da adição de fibras nas principais propriedades de engenharia dos solos. Algumas das conclusões obtidas na literatura são mencionadas a seguir.

- a) Resistência mecânica: as fibras são capazes de preservar a sua contribuição na resistência ao cisalhamento mesmo quando submetidas a grandes deformações, aumentando as resistências de pico e pós-pico do solo (CASAGRANDE, 2005; CONSOLI et al., 2002; VENDRUSCOLO, 2003). Quanto aos parâmetros de resistência do solo, alguns autores concluíram que a inclusão de fibras afeta mais o intercepto coesivo que o ângulo de atrito (TEODORO, 1999; FESTUGATO, 2008). Entretanto, outros autores relatam aumentos consideráveis no ângulo de atrito do solo após a inclusão de fibras (DIAMBRA et al., 2010; VENDRUSCOLO, 2003).
- b) Compressibilidade: alguns autores observaram que a inclusão de fibras aumentou a compressibilidade do solo (DIAMBRA et al., 2010; VENDRUSCOLO, 2003). Já outros autores observaram que o comportamento volumétrico não foi afetado pela adição de fibras (FESTUGATO, 2008). Aguilar (2015) ao reforçar um solo arenoso com fibras de coco, notou que a variação volumétrica foi influenciada pelo teor de fibras, sendo que para teores menores não foram observadas diferenças no comportamento volumétrico, enquanto que para teores maiores, as variações volumétricas foram consideráveis.

c) Permeabilidade: a influência da presença de fibras na permeabilidade depende de fatores como a densidade do compósito e a pressão de confinamento e, por isso, alguns autores observam tendências crescentes e outros não notam alterações consideráveis. De modo geral, a inclusão das fibras aumenta a condutividade hidráulica do solo, sendo esse aumento mais pronunciado para maiores teores de fibras (MAHER; HO, 1993; AGUILAR, 2015).

2.3 Tipos de fibras empregadas como reforço

O reforço dos solos pode ser feito por meio de uma ampla variedade de fibras. O comportamento dessas fibras, suas propriedades físicas, químicas e mecânicas e o processo de fabricação, irão afetar diretamente o comportamento do material compósito que será formado.

Por isso, torna-se importante a compreensão dos mecanismos de interação solo-fibra e do comportamento do material compósito para a definição do tipo de fibra a ser empregado. Esta definição dependerá fundamentalmente das características da matriz (solo) a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante (CASAGRANDE, 2005).

De modo geral, as fibras podem ser classificadas de acordo com as suas origens em quatro grandes classes: minerais, poliméricas, metálicas e naturais, as quais terão suas características abordadas a seguir.

A Tabela 2.1 apresenta algumas características dos estudos feitos empregando fibras em alguns solos brasileiros.

Tabela 2.1 – Trabalhos anteriores envolvendo solos reforçados com fibras.

Referência	Tipo de solo	Fibra	Teor de fibra (%)	Comprimento (mm)
Casagrande (2005)	Areia siltosa	Polipropileno	0,5; 0,75.	12, 24 e 60.
Aguilar (2015)	Areia	Coco	0,25; 0,5; 0,75	25 e 50.
Silveira (2018)	Arenoso	Sisal e Curauá	0,5; 1,0; 1,5; 2,0.	10, 15, 20, 25 e 30.
Oliveira Júnior (2018)	Argiloso	Coco	0,5; 1,0; 2,0.	Variados.
Bolaños (2013)	Argiloso	Coco	0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5.	20.
Pinto (2021)	Areia	Polipropileno	0,5; 1,0; 1,5.	12,5; 25 e 51

Fonte: Autora (2021).

2.3.1 *Fibras Minerais*

As fibras minerais são aquelas feitas de minérios ou de compostos minerais extraídos de jazidas naturais e processados. Algumas das fibras minerais mais destacadas são as fibras de carbono e vidro, as quais, geralmente, apresentam boas propriedades de resistência a durabilidade. A vantagem das fibras de carbono está na resistência das ligações entre os átomos de carbono e na leveza destas, além de apresentarem alta resistência à tração e módulo de elasticidade em torno de 420 GPa. Essas características proporcionam uma grande aderência entre a matriz e as fibras (TAYLOR, 1994).

As fibras de vidro, além de apresentarem alta resistência mecânica, química e à corrosão, possuem estabilidade dimensional, boas propriedades elétricas e são resistentes ao ataque da maioria dos ácidos.

2.3.2 *Fibras Poliméricas*

As fibras de natureza polimérica são compostas de cadeias carbônicas longas, ocasionalmente mescladas com outros elementos químicos. Dentre os materiais constituintes das fibras poliméricas de uso corrente na geotecnia podem-se citar: polipropileno, polietileno, poliéster e poliamida.

As fibras de polipropileno possuem módulo de elasticidade em torno de 8 GPa e sua resistência à tração é de aproximadamente 400 MPa. Além disso, possuem elevada resistência ao ataque de várias substâncias químicas e aos álcalis (TAYLOR, 1994). Ressalta-se contudo que as suas propriedades mecânicas se deterioram de forma considerável com o aumento da temperatura.

As fibras de polietileno têm um módulo de elasticidade em torno de 1,1 GPa, alta durabilidade e grandes deformações de fluência, o que significa que, se elas forem utilizadas para suportar tensões altas e permanentemente em um compósito fissurado, consideráveis elongações e deflexões podem ocorrer ao longo do tempo (HANNANT, 1994).

As fibras de poliéster apresentam alta densidade, rigidez e resistência. Possuem um aspecto bastante similar às fibras de polipropileno, podendo ser utilizadas para as mesmas aplicações (TAYLOR, 1994). O polietileno tereftalato (PET) é o poliéster mais conhecido atualmente, sendo o material constituinte das garrafas plásticas.

As fibras de poliamida são chamadas de fibras de aramida e são conhecidas comerci-

almente por Kevlar. São produzidas por extrusão e fiação. Quando a solução polimérica passa pelo processo de fiação desenvolve um alto grau de orientação e então alcança valores de resistência e módulo de elasticidade elevados. Existem dois tipos de Kevlar, o Kevlar 29, cuja resistência mecânica é da ordem de 3000 MPa e o módulo de elasticidade médio é de aproximadamente 64 GPa, e o Kevlar 49, cuja resistência é a mesma do anterior, mas seu módulo é de 300 GPa (AGUILAR, 2015).

2.3.3 *Fibras Metálicas*

As fibras metálicas são produzidas normalmente em aço, e têm emprego bastante comum em reforço de concreto e de outros materiais construtivos. A resistência à tração das fibras de aço é da ordem de 1.100 MPa e o módulo de elasticidade é de aproximadamente 200 GPa. As fibras de aço podem apresentar corrosão em função do meio em que estão inseridas, embora esse problema possa ser minimizado com tratamento utilizando níquel. A ruptura do compósito é normalmente associada ao arrancamento da fibra e não à sua ruptura, por isso, existe uma grande variedade de formatos para aumentar a resistência ao arrancamento desse tipo de fibra (TAYLOR, 1994).

2.3.4 *Fibras Naturais*

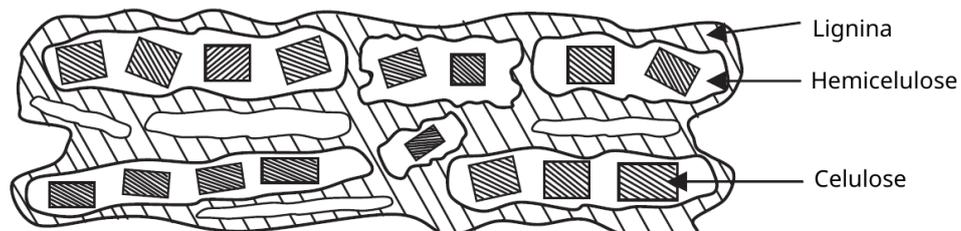
O reforço de solos usando fibras naturais, embora seja uma técnica utilizada há muito tempo pela humanidade, tem sofrido avanços recentes na área da ciência e engenharia, proporcionando o desenvolvimento de materiais cada vez mais resistentes e duráveis. Estes estudos são normalmente motivados pela necessidade de se obter tecnologias cada vez mais sustentáveis.

As fibras naturais, em sua maioria, são extraídas de plantas. Em geral, as fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos podem ser de bambu, juta, capim elefante, malva, coco, piaçava, sisal, linho e cana-de-açúcar. Algumas destas fibras podem atingir grandes resistências, como por exemplo, as fibras do bambu, que atingem normalmente resistências acima de 100 MPa, com módulo de elasticidade entre 10 e 25 GPa (HANNANT, 1994).

As características das fibras naturais dependem das propriedades dos seus constituintes individuais, da estrutura fibrilar e matriz lamelar. Quanto à composição química, elas

são constituídas basicamente de carboidratos (celulose e hemiculose), lignina, pectina e minerais. A Figura 2.2 apresenta de forma geral a organização estrutural da parede celular de uma fibra natural.

Figura 2.2 – Organização estrutural dos três principais constituintes da parede celular da fibra.



Fonte: Adaptado de Kabir et al. (2012)

A celulose pode ser considerada como o principal componente que influencia nas propriedades mecânicas das fibras naturais. Em síntese, ela consiste em uma cadeia de moléculas de glicose interligadas por um átomo de oxigênio. O processo de formação da celulose compreende a estruturação de longas cadeias poliméricas, as quais ficam muito próximas através de longos segmentos, dando origem a fortes ligações químicas secundárias intermoleculares que são responsáveis pela grande resistência dos materiais celulósicos.

O grau de polimerização da celulose determina as propriedades dos materiais celulósicos. Celulose com cadeias longas são denominadas de α -celulose. Celuloses com graus de polimerização menores são categorizados como β -celulose (grau de polimerização entre 15 e 90) e hemicelulose (grau de polimerização menor que 15) (TOMCZAK, 2010). As fibras com maiores percentuais de celulose, como as fibras de juta, linho, rami, sisal são indicadas para uso como material de reforço em compósitos por apresentarem maior resistência à tração.

As hemiceluloses, diferentemente da celulose composta apenas por glicose, são polímeros compostos de cinco açúcares: glicose, manose, galactose, xilose e arabinose; formando um polissacarídeo de massa molecular relativamente baixa e solúvel em água ou em soluções salinas. À parcela de carboidratos que compõe as fibras (celulose e hemicelulose), dá-se o nome de holocelulose.

Além da holocelulose, as fibras possuem uma espécie de resina denominada lignina. A lignina (componente que compõe a parede das células vegetais) é um polímero com

estrutura molecular complexa, amorfa, com constituintes aromáticos e alifáticos. Sua principal função é manter as fibras de celulose unidas. Além disso, ela fornece resistência à compressão ao tecido celular e às fibras, enrijecendo a parede celular e protegendo os carboidratos (açúcares) contra danos físicos e químicos. De acordo com Passos (2005), a concentração de lignina nas fibras influencia a estrutura, a morfologia, a flexibilidade e a taxa de hidrólise dos materiais. Além disso, a lignina é o componente das fibras vegetais menos biodegradável.

A fibra de coco, material de estudo dessa pesquisa, é talvez a fibra natural com a maior concentração de lignina, o que confere a ela propriedades únicas, as quais serão discutidas na Seção 2.4. O teor de lignina nas fibras varia em função da idade do fruto, sendo o percentual de cerca de 20% encontrado em fibras oriundas de coco jovem, colhido com 6 meses, e de aproximadamente 35% no fruto maduro, com 11 meses (DAM; OEVER; KEIJSERS, 2004).

A pectina, outro componente das fibras naturais, é um polissacarídeo, rico em ácido galacturônico, presente nas paredes celulares e com função aglutinante. Existem também os componentes minerais, responsáveis pela formação das cinzas após a incineração das fibras (PASSOS, 2005).

Outras substâncias podem estar presentes nas fibras naturais em teores menores. É o caso das resinas ácidas, ácidos graxos e álcoois. A maioria destas substâncias é solúvel em água ou solventes orgânicos neutros e são chamadas de extrativos. A Tabela 2.2 apresenta as composições químicas de diferentes fibras naturais.

Tabela 2.2 – Composição química típica das fibras naturais (%)

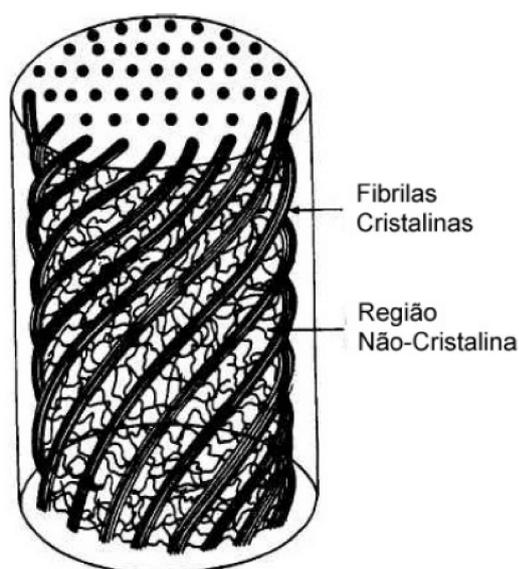
Fibra	α -celulose	Hemicelulose	Lignina	Cinzas	Extrativos
Abacaxi	80 - 83	-	12	0,1 - 1	4
Bagaço de cana	54,3 - 55,2	16,8 - 29,7	24 - 25	1,1	0,7 - 3,5
Bambu	33 - 45	30	20 - 25	-	-
Banana	60 - 65	6 - 8	5 - 10	1,2	-
Coco	43,4 - 53	14,7	38 - 40	-	3,5
Curauá	70,7 - 73,6	21,1	8 - 11	0,8 - 0,9	2,5 - 2,8
Luffa Cylindrica	62	20	11	0,4	3,1
Piassava	31,6	-	48	-	-
Rami	80 - 85	3,0 - 4,0	0,5	-	6,4
Sisal	60 - 75,2	10,0 - 15,0	7 - 12	0,14 - 0,87	1,7 - 6,0

Fonte: Tomczak (2010).

A fibra natural é composta de várias células, que são formadas por microfibrilas crista-

linas constituídas de celulose, as quais são conectadas por meio de uma camada amorfa, formada de lignina e hemicelulose (estrutura cristalina). Estas células diferem em suas composições químicas e em seu ângulo microfibrilar (ângulo helicoidal das microfibrilas). O ângulo microfibrilar refere-se ao ângulo que as microfibrilas da camada S2 (parede celular do meio da célula) faz com o seu eixo longitudinal. Uma representação das fibras cristalinas dispostas na forma de espiras helicoidais é apresentado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Arranjo helicoidal das fibras de celulose nas fibras naturais.



Fonte: Kulkarni, Satyanarayana e Sukumaran (1981)

As fibras vegetais, por serem elementos naturais, não apresentam uma uniformidade em suas propriedades como ocorre com as fibras sintéticas. As propriedades mecânicas das fibras naturais dependem de fatores como a percentagem de celulose, o grau de polimerização da celulose (α -celulose e β -celulose) e o ângulo microfibrilar. Fibras com alta percentagem de celulose, alto grau de polimerização e baixo ângulo microfibrilar apresentam uma maior resistência à tração (TOMCZAK, 2010).

A celulose, como mencionado, é o principal constituinte das fibras naturais e contribui de forma significativa para suas propriedades mecânicas. Outros componentes, como lignina e hemicelulose, também contribuem para as propriedades particulares desses elementos. A tenacidade, propriedade das fibras de absorver energia até a ruptura, reduz com a diminuição da quantidade de lignina e hemicelulose, enquanto que a resistência da fibra aumenta. A remoção de lignina nas fibras naturais permite a produção de fibras mais rígidas. A remoção de hemicelulose deixa a fibra menos densa e permite

que a região interfibrilar entre as fibrilas se rearranjam através do eixo principal da fibra (MWAIKAMBO; ANSELL, 2006).

As propriedades mecânicas das fibras naturais são influenciadas também por outros fatores, como local de origem (clima da região), as propriedades do solo, forma como foi cultivada, maturação (idade), espécie e método de extração. A Tabela 2.3 apresenta algumas propriedades mecânicas de fibras vegetais e fibras sintéticas que normalmente são utilizadas como reforço em materiais compósitos. A associação dos dados constantes na tabela com a composição química de cada fibra permite avaliar as suas potencialidades de uso.

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas de fibras naturais e de fibras convencionais usadas como reforço

Fibra	Densidade (g/cm)	Alongamento (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Coco	1,2	30,0	175	4,0 - 6,0
Algodão	1,5 - 1,6	7,0 - 8,0	287 - 597	5,5 - 12,6
Juta	1,3	1,5 - 1,8	393 - 773	26,5
Linho	1,5	2,7 - 3,2	345 - 1035	27,6
Cânhamo	-	1,6	690	-
Rami	-	3,6 - 3,8	400 - 938	61,4 - 128
Sisal	1,5	2,0 - 2,5	511 - 635	9,4 - 22,0
Kraft	1,5	-	1000	40,0
E-vidro	2,5	2,5	2000 - 3500	70,0
Carbono	1,4	3,3 - 3,7	3000 - 3150	63,0 - 67,0
Polipropileno	0,9 - 0,95	15 - 25	450 - 760	3,5-10
Polietileno	0,92 - 0,96	3 - 100	80 - 600	5
PVA	1,3	5,7	800 a 1500	29 - 36

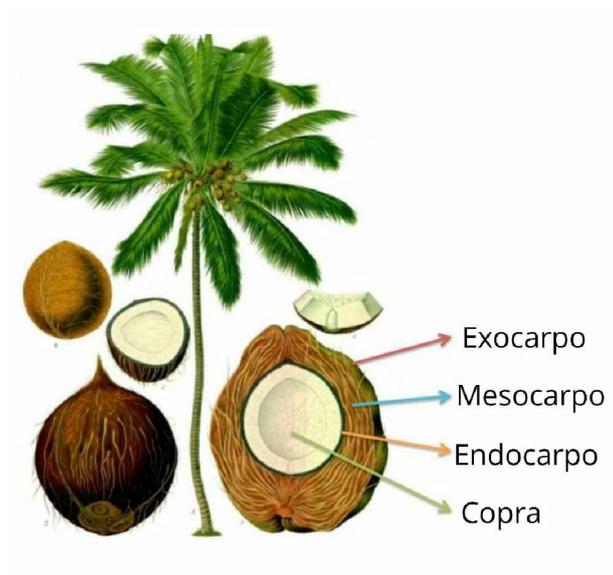
Fonte: Bledzki e Gassan (1999), Bentur e Mindess (1990)

É notório que alguns dos valores característicos das fibras naturais são inferiores aos encontrados para as fibras de vidro usadas na indústria eletrônica (E-vidro) e fibras de carbono. No entanto, algumas fibras naturais conseguem atingir valores de resistência à tração e módulo de elasticidade maiores que as fibras sintéticas de polipropileno e polietileno, por exemplo. As fibras de coco apresentam percentual de alongamento superior a maioria das fibras apresentadas.

2.4 Fibras de coco

O coco, é constituído por uma parte externa lisa (o exocarpo), pelo mesocarpo, uma parte fibrosa e espessa (3 a 5 cm); e por uma casca duríssima e lenhosa, o endocarpo (Figura 2.4). O mesocarpo ou casca fibrosa externa do coco é quase que totalmente destruído no Brasil, no entanto, produz fibras que poderiam ser utilizadas em diversas aplicações industriais e científicas. (BOLAÑOS, 2013).

Figura 2.4 – Partes constituintes do coco.



Fonte: Adaptado de Bolaños (2013)

As fibras de coco, oriundas do mesocarpo, são materiais lignocelulósicos que, em geral, apresentam alto teor de lignina, responsável pela sua dureza e durabilidade quando comparadas com outras fibras naturais e concentração de celulose mediana (SILVA, 2002). A baixa taxa de decomposição da fibra de coco é a principal vantagem para sua utilização como reforço. De acordo com Carrijo, Liz e Makishima (2002), esse material apresenta baixa taxa de degradação, levando mais de 8 anos para completa decomposição.

A Tabela 2.4 apresenta algumas propriedades mecânicas das fibras de coco. Conforme exposto na Tabela 2.2 e na Tabela 2.3, esta fibra apresenta grande percentual de alongamento, baixa densidade em comparação às fibras metálicas e minerais, bem como

menores valores de resistência à tração e de módulo de elasticidade quando comparada a outras fibras naturais. A sua utilização em um compósito tende a diminuir a densidade do material, oferecendo-lhe bom potencial de alongamento e capacidade de reforço mediana, porém com possibilidades de aumento de performance da interação fibra-matriz devido à ação aglutinante da lignina.

A sua menor resistência à tração é atribuída ao alto ângulo microfibrilar e ao teor intermediário de celulose, visto que esse componente é o principal responsável pela resistência mecânica das fibras vegetais. No entanto, o alto teor de lignina contribui para o desempenho mecânico a longo prazo da fibra de coco, tornando-a mais resistente à biodegradação natural.

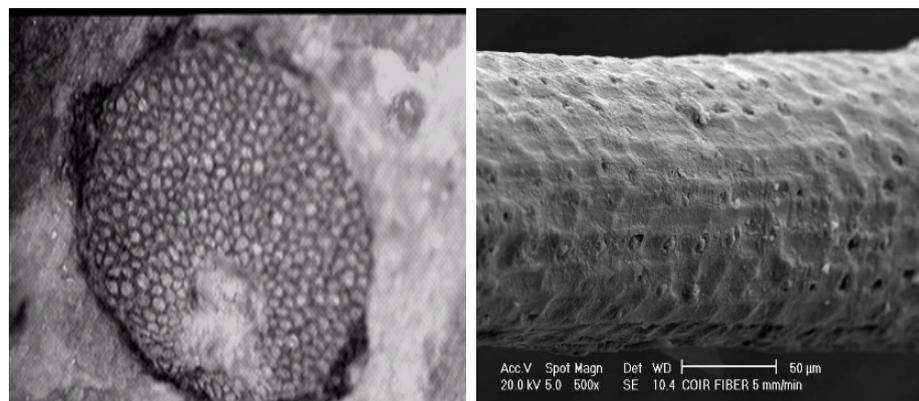
Tabela 2.4 – Propriedades mecânicas das fibras de coco

Referência	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Kulkarni, Satyanarayana e Sukumaran (1981)	106 - 175	3,00 - 6,00	17 - 47
Ghavami, Filho e Barbosa (1999)	37,53 - 110,52	-	10,47 - 27,77
Toledo Filho et al. (2000)	174	3,5	25
Tomczak (2010)	100 - 250	3,00	30
Agopyan e Junior (2007)	95 - 118	2,80	23,9 - 51,4
Paramasivam e Gupta (1984)	69,3	2,0	-
Ramesh, Krishna e Mamatha (2010)	140	-	26,25
Mohanty, Misra e Hinrichsen (2000)	131 -175	4 - 6	-

Fonte: Autora (2021).

A morfologia da fibra de coco é mostrada na Figura 2.5. A seção transversal da fibra (Figura 2.5a) permite observar que tais fibras são compostas de células regularmente arranjadas com uma lacuna no centro. As células apresentam formas circulares, formando um ângulo helicoidal das microfibrilas igual a 45° aproximadamente, sendo um dos maiores nas fibras orgânicas (TOMCZAK, 2010).

Figura 2.5 – Microscopia ótica de fibras de coco.



(a) Seção transversal

(b) Seção longitudinal

Fonte: Tomczak (2010)

2.5 Estudos experimentais envolvendo fibras de coco

O desenvolvimento de novos materiais com adição de fibras vegetais, sobretudo as fibras de coco, tem sido objeto de diversos estudos, uma vez que a substituição de fibras sintéticas pelas naturais e ecologicamente corretas é cada vez mais necessária.

Algumas pesquisas atuais têm se voltado à substituição da fibra de vidro em compostos poliméricos por fibras vegetais, com o intuito de reduzir o uso de fontes não renováveis. Isto tem motivado o desenvolvimento de compósitos reforçados com fibra de coco, sisal e juta, que estão competindo com os plásticos reforçados com fibra de vidro (PASSOS, 2005).

A Tabela 2.5 descreve parâmetros considerados em estudos utilizando compósitos solo/fibra de coco. Na Figura 2.6 são apresentados os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos nestas pesquisas. Alguns autores realizaram os ensaios utilizando fibras com comprimentos diferentes, no entanto, para a análise considerou-se na tabela o comprimento que apresentou os melhores resultados. É possível observar que a inclusão das fibras de coco até determinado teor causa um incremento nestes parâmetros, sobretudo na coesão. Oliveira Júnior (2018) concluiu que o teor de 1% de fibras de coco é o teor ótimo para o desempenho mecânico. Já Aguilar (2015) concluiu que a mistura contendo 0,5% de fibras e comprimento de 25 mm foi a que apresentou o melhor comportamento dentre os compósitos estudados. Bolaños (2013) notou que

o teor mais alto estudado (1,5%) foi o que apresentou os melhores resultados quanto à resistência ao cisalhamento.

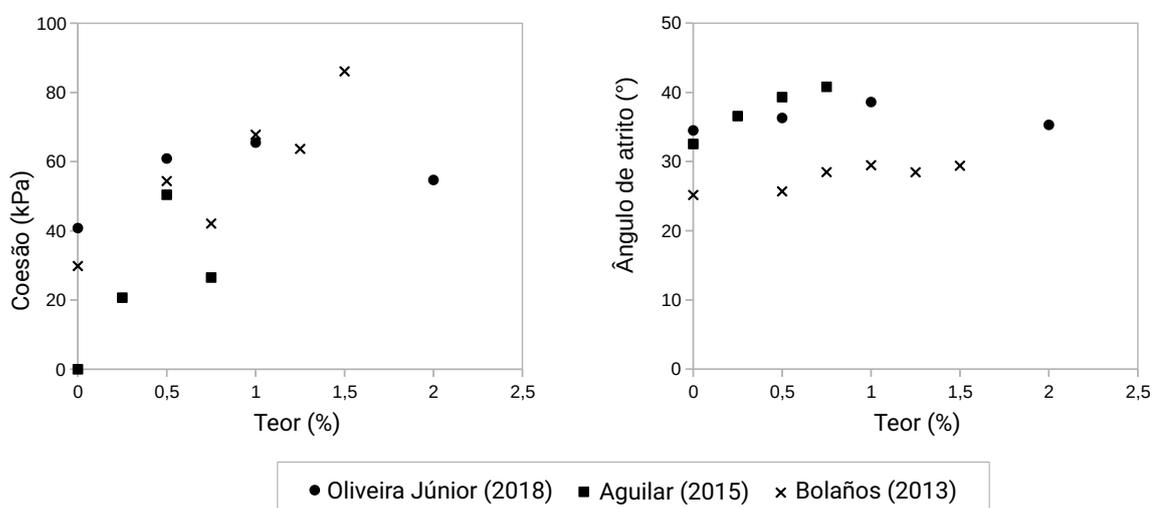
Os resultados obtidos por estes autores permitiram concluir que o uso das fibras de coco no solo argiloso é uma opção promissora para aplicação em obras geotécnicas do tipo camadas de base e camadas de cobertura de aterros temporários submetidos a carregamentos estáticos, dando assim uma destinação mais sustentável ao resíduo, atendendo às questões ambientais e socioeconômicas.

Tabela 2.5 – Estudos sobre o compósito solo/fibra de coco

Referência	Matriz	Teor (%)	Comprimentos	Ensaio	Tensões Confinantes (kPa)
Oliveira Júnior (2018)	Solo argiloso	0; 0,5; 1,0; 2,0.	Variados	Cisalhamento direto	-
Aguilar (2015)	Solo arenoso	0; 0,25; 0,5; 0,75.	25 mm e 50 mm	Triaxiais CD	50, 100 e 150
Bolaños (2013)	Solo argiloso	0;0,5;0,75; 1,0; 1,25; 1,5.	20 mm	Triaxiais CD	50, 150 e 300

Fonte: Autora (2021).

Figura 2.6 – Parâmetros de resistência obtidos para compósitos solo/fibra de coco.



Fonte: Autora (2021).

2.6 Degradação das fibras naturais

A avaliação da durabilidade dos compostos formados com fibras naturais é um dos principais problemas a serem investigados para a sua correta aplicação e popularização, já que a exposição ao ambiente causa a sua degradação a longo prazo.

A decomposição do material fibroso conduz à redução da sua capacidade de reforço, quebra de aderência com a matriz e torna a fibra um material inativo (do ponto de vista do reforço) dentro do compósito, chegando a prejudicar o comportamento do solo natural pela geração de vazios. Assim, a fibra natural deixa de funcionar como reforço, passando a ser um material de enchimento, com o agravante de ser higroscópico e putrescível, fenômeno que pode ser agravado pela variação de umidade da matriz (SILVA, 2002).

A elevada capacidade de absorção de água desse tipo de fibra (100 a 200%) é considerada como o principal agravante do processo de decomposição e é resultante da estrutura porosa da fibra natural (MARTINS, 2014). A decomposição da fibra natural ocorre quando os seus constituintes, principalmente a hemicelulose presente na lamela intercelular, são decompostos pela ação do elevado pH da água.

A biodegradação de fibras naturais é influenciada por vários fatores tais como temperatura, umidade, tipo de fibra, o pH, teor de matéria orgânica e de umidade do solo. Costa (2013) ressalta a importância da determinação do valor de pH do solo a ser reforçado dada a suscetibilidade química das fibras naturais de origem vegetal em função da acidez ou alcalinidade própria do meio a que são sujeitas.

Um estudo sobre a biodegradação de geotêxteis de fibra de coco feito por Mukkulath e Thampi (2012) utilizando vários efluentes, com diferentes valores de pH e analisando a redução da resistência à tração das fibras de coco, possibilitou concluir que a degradação, ou redução da resistência à tração dos geotêxteis de fibra de coco, era menor quando a gama de pH era de 6,5 a 8. Assim, o afastamento das gamas neutras de pH torna as fibras de coco mais frágeis e isso é evidente na redução da resistência à tração.

Já um estudo realizado por Toledo Filho et al. (2000) imergiu fibras de coco e sisal em soluções de hidróxido de cálcio (pH=12) e de hidróxido de sódio (pH=11) e a perda da resistência à tração com o tempo foi medida para avaliar a durabilidade das fibras. A partir dos resultados, notou-se que a intensidade do ataque alcalino foi maior na solução de hidróxido de cálcio que na solução de hidróxido de sódio. Os resultados mostram que após 210 dias de imersão em solução de hidróxido de cálcio, as fibras de sisal e coco retiveram, respectivamente, 33.7% e 58% das suas resistências originais. Após 300 dias, no entanto, toda a sua resistência tinha sido perdida.

Os resultados encontrados na literatura diferem quanto a faixa de pH aceitável para

evitar o ataque às fibras vegetais. No Brasil, a maioria dos solos é considerada ácida apresentando valores de pH entre 5,0 e 6,5 e, por isso, usualmente são aplicadas técnicas de correção do pH solo. Alguns estudos voltados à incorporação de fibras nos solos tem-se voltado a realização de tratamentos alcalinos nas fibras para aumentar a durabilidade do compósito solo/fibra. Este assunto é tratado na Seção 2.7.

As variações dimensionais da fibra natural diante da variação de umidade e temperatura do meio influenciam a adesão entre o solo e as fibras. A absorção de água pela fibra gera sua expansão ou inchamento, afastando o solo ao seu redor, pelo menos em nível microscópico. Ao perder umidade, a fibra retoma seu tamanho inicial, diminuindo suas dimensões, deixando pequenos vazios à sua volta, o que prejudica a sua ação como elemento de reforço (GHAVAMI; FILHO; BARBOSA, 1999).

A perda da resistência à tração com o tempo é o principal problema que afeta a utilização das fibras naturais. Essa perda de resistência à tração pode ser atribuída a efeitos físicos, químicos ou biológicos, ou uma combinação de todos os três. Danos físicos são normalmente associados com a deterioração da lignina que mantém as fibras individuais em conjunto para formar a cadeia de fibra longa. Danos químicos estão associados normalmente à quebra das cadeias moleculares das fibras e os danos biológicos ocorrem quando bactérias que vivem nas fibras passam a digeri-las (SILVEIRA, 2018).

Carvalho, Fangueiro e Neves (2014) constatou, num estudo sobre a durabilidade de fibras naturais quando colocadas em contato com um solo residual granítico, por meio de ensaios de resistência à tração realizados periodicamente, que fibras de sisal perderam maior parte da sua resistência nos primeiros 15 dias de estudo, tendo registrado perdas entre 65 e 81%. Ao fim de 90 dias de estudo, a perda de resistência ficou entre 89 e 96%, concluindo que nos primeiros 15 dias de estudo as fibras de sisal perderam quatro vezes mais resistência que nos 75 dias que se seguiram.

Joy, Balan e Jayasree (2011) também avaliaram o efeito da biodegradação dependente do tempo e da profundidade do geotêxtil com fibras de coco sob condições climáticas tropicais. Foram realizados ensaios de resistência à tração em amostras de geotêxteis de fibra de coco que foram enterradas em solo laterítico em profundidades de 15, 45, 75 e 100 cm e então recuperados após 30, 60, 75, 105 e 120 dias. A porcentagem de redução da resistência à tração ficou entre 70 e 90% após 120 dias. A biodegradação

do geotêxtil foi mais acentuada à profundidade de 75 cm. Por fim, concluiu-se que a redução da resistência nessa profundidade pode ter sido devido ao ambiente alcalino, em vez da umidade no solo.

A principal variável responsável pela determinação das taxas de degradação das fibras é a lignina, que, por si só, é resistente à degradação, além de promover a redução da deterioração da celulose e de outros componentes do material fibroso. A celulose, por outro lado, serve como uma fonte imediata de energia para os microrganismos presentes no solo que, assim, promovem a degradação das fibras (SILVEIRA, 2018). Ambientes com elevados teores de umidade (comuns em locais com elevada precipitação pluviométrica) potencializam a proliferação destes microrganismos, acelerando o processo de biodegradação das fibras e resultando em uma rápida deterioração desse material (COSTA, 2013).

A rápida degradação de fibras naturais empregadas como reforço no solo de camadas de coberturas provisórias e finais provoca a propagação de fissuras nestas estruturas, levando ao aumento das emissões fugitivas de metano para a atmosfera, uma vez que as fibras que antes inibiam o processo de fissuração têm suas propriedades mecânicas (principalmente, a resistência à tração) reduzidas. Com a finalidade de reduzir os inconvenientes causados pela degradação das fibras naturais nos compósitos, diversos estudos vêm sendo realizados sobre diferentes processos de tratamento neste tipo de reforço, os quais serão tratados adiante.

2.7 Tratamentos em fibras naturais

Os processos de tratamento em fibras naturais procuram, dentre outros aspectos, promover uma redução da absorção de umidade desses materiais. Por intermédio do uso de revestimentos variados ou por tratamentos químicos, busca-se sanar as questões de instabilidade volumétrica, remover impurezas na superfície das fibras e melhorar a transferência de tensões fibra-matriz (FIDELIS, 2014).

A interação fibra-matriz é uma propriedade fundamental dos compósitos, visto que afeta consideravelmente o desempenho dos mesmos quando submetidos a carregamentos. As fibras vegetais apresentam variações dimensionais em razão da sua capacidade de absorção de água e, após a secagem, reduzem de dimensões, o que pode prejudi-

car a interação fibra-matriz, reduzindo a ductilidade e resistência pós-pico do material (FERREIRA et al., 2012).

Diante disso, os tratamentos aplicados em fibras naturais devem, ao tempo que melhoram a durabilidade das fibras, preservar a interação da fibra com a matriz e sua função de reforço.

Embora as fibras de coco sejam relativamente mais duráveis quando comparadas a outras fibras vegetais, devido ao elevado teor de lignina presente em sua estrutura, o principal fator que prejudica a durabilidade destas é a alta capacidade de absorção de água, reduzindo a vida útil destas fibras após serem incorporadas no solo. Assim, estudos têm sido realizados para a definição de técnicas viáveis de tratamento das fibras de coco que lhe confirmam uma durabilidade em aplicações da engenharia civil.

A hornificação é um tipo de tratamento baseado na aplicação de ciclos de molhagem e secagem nas fibras, causando-lhes redução na capacidade de retenção de água, além de modificações no comportamento mecânico. Após os ciclos de molhagem e secagem, as paredes celulares da fibra entram em colapso, resultando em modificações de sua estrutura, como redução do diâmetro do lúmen e deformações nas paredes fibrocelulares (FIDELIS, 2014). O procedimento adotado por Ferreira et al. (2012) para hornificação de fibras de sisal consistiu na secagem das fibras em estufa a uma temperatura de 80°C (permanecendo nesta temperatura por 16 horas) e no resfriamento até atingir a temperatura de 23°C, a fim de se evitar um possível choque térmico.

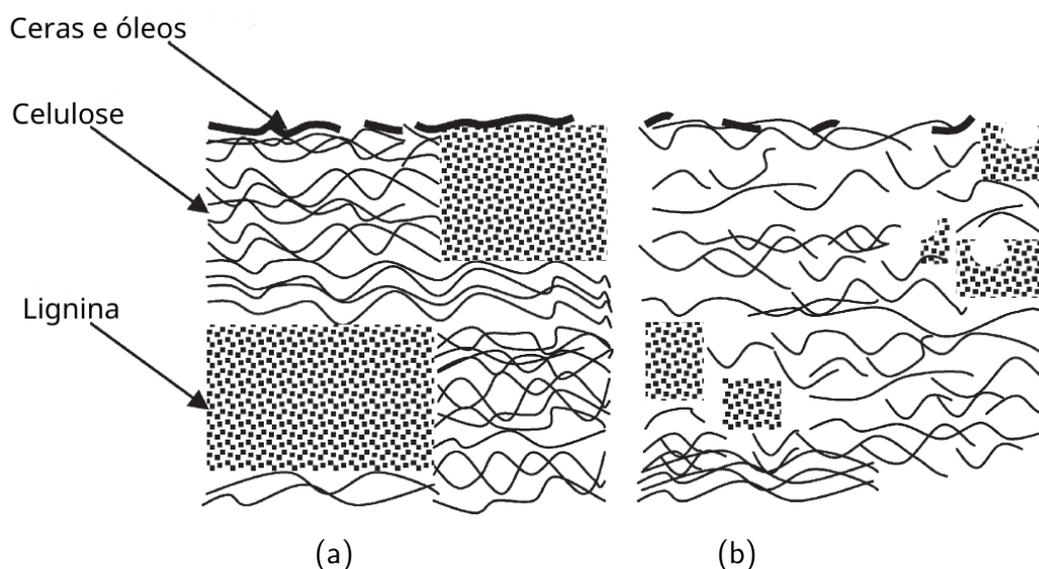
A diferença entre a hornificação e os ciclos de umedecimento e secagem que ocorrem naturalmente e são prejudiciais é o fato do tratamento ser realizado de forma controlada em laboratório, em ciclos sequenciais, enquanto que os ciclos naturais ocorrem de forma desordenada, sujeitando as fibras à ação dos agentes climáticos que lhe causam rápida degradação.

Claramunt, Ardanuy e García-Hortal (2010) realizaram um estudo sobre hornificação de fibras vegetais para melhorar durabilidade de compósitos cimentícios. Os autores submeteram fibras de polpa de celulose e algodão a quatro ciclos de molhagem e secagem e avaliaram o comportamento mecânico de compósitos produzidos com essas fibras, através de ensaios de compressão e flexão. Os resultados indicaram que o tratamento das fibras foi benéfico no comportamento mecânico e na durabilidade dos compósitos. Os

compósitos reforçados com fibras tratadas apresentaram maior resistência à flexão (8% de acréscimo para os compósitos com polpa de celulose e 16% com para aqueles com fibra de algodão), do que compósitos com fibras não tratadas. Houve uma diminuição da resistência após o envelhecimento. No entanto, os compósitos com fibras tratadas mantiveram resistência na pós-fissuração e os compósitos com fibras não tratadas apresentaram comportamento semelhante à matriz sem reforço.

O tratamento alcalino ou mercerização é um dos tratamentos químicos mais empregados em fibras naturais. Este tratamento superficial promove a remoção de impurezas e de parte de alguns componentes superficiais da fibra, como a hemicelulose e a lignina. A remoção destes componentes das fibras promove um melhor empacotamento das cadeias de celulose, as quais são responsáveis pela cristalinidade da fibra. Assim, esse tipo de tratamento aumenta a cristalinidade e reduz o diâmetro da fibra (BLEDZKI; GASSAN, 1999). De acordo com Saha et al. (2012), o tratamento alcalino também provoca a separação das fibras, aumentando a área superficial efetiva, a adesão entre a fibra e a matriz e propiciando melhorias nas propriedades mecânicas do compósito.

Figura 2.7 – Estrutura típica da (a) fibra não tratada (b) fibra pós tratamento com NaOH.



Fonte: Adaptado de Kabir et al. (2012)

O procedimento, de acordo com Fidelis (2014), consiste na agitação seguida de lavagem das fibras imersas em solução aquosa $NaOH$, provocando a separação das fibras, aumentando a área superficial efetiva e propiciando aumento nas propriedades

mecânicas do compósito. O esquema reacional que ocorre durante o tratamento alcalino está representado na Equação 2.1.



Cardoso (2014) analisou a influência do tratamento alcalino em fibras de curauá nas propriedades de laminados compósitos de matriz epóxi. As fibras de curauá foram tratadas em solução de NaOH 0,25-2% (p/v) com tracionamento para melhorar a adesão fibra-matriz. O tratamento das fibras de curauá com NaOH 0,5% sob tração permitiu a obtenção de um compósito com propriedades mecânicas melhores do que aqueles produzidos com fibras não tratadas.

A impregnação com agentes bloqueadores e repelentes à água é outro tipo de tratamento comumente empregado em fibras naturais. Gram (1983), ao realizar diferentes tratamentos em fibras de sisal com o objetivo de melhorar a durabilidade das mesmas, concluiu que a impregnação com agentes repelentes à água levou a um retardo da tendência de fragilização dos compósitos, sem impedir a mineralização das fibras.

A imersão da fibra de sisal em solução de micro-sílica antes de ser incorporada na matriz de cimento foi o procedimento que se mostrou mais eficiente dentre todos os intentos de Gram (1983). O tratamento das fibras de sisal foi realizado pela imersão das fibras na micro-sílica líquida por 10 minutos, seguida da remoção e secagem ao ar por 15 minutos. Os resultados demonstram que este é um método efetivo para melhorar a resistência e tenacidade dos compósitos com o tempo. A superfície da fibra tratada depois de 322 dias de envelhecimento não apresentou significantes sinais de deterioração devido a presença de minúsculas partículas de micro-sílica na interface fibra-matriz, as quais criaram uma zona de baixa alcalinidade ao redor da fibra que retarda ou previne a mineralização da fibra em razão da migração de produtos de cálcio.

Em geral, os tratamentos como a hornificação propiciam uma melhor estabilidade dimensional pela perda permanente da capacidade de absorção de água e diminuição da seção transversal da fibra devido ao enrijecimento da estrutura polimérica presente nos materiais lignocelulósicos. Já os tratamentos químicos visam a remover extrativos

e substâncias não celulósicas presentes na superfície das fibras, aumentando a área de contato e melhorando a adesão fibra/matriz.

A Tabela 2.6 reúne alguns tipos de tratamentos empregados em fibras naturais de acordo com a literatura.

Tabela 2.6 – Tratamentos aplicados em fibras naturais

Referência	Fibra	Matriz	Método de Tratamento	Resultados Obtidos
Ghavami, Filho e Barbosa (1999)	Coco e sisal	Solo arenoso	Imersão das fibras em materiais betuminosos.	Fibra de sisal obteve menor absorção de água com o tratamento dos dois produtos; Fibras de coco somente o piche diminuiu a capacidade de absorção de água. Sem mudanças na aderência, mas aumentou a durabilidade das amostras.
Leocádio (2005)	Sisal	Solo laterítico	Imersão em solução de poliestireno expandido (EPS)	O tratamento proporcionou boa impermeabilização e aumento da resistência residual.
Ramesh, Krishna e Mamatha (2010)	Coco	Solo mole	Imersão das fibras em betume	O compósito com fibras tratadas apresentou comportamento muito similar ao solo natural, sendo que as fibras sem tratamento obtiveram melhor resultado.
Aguilar (2015)	Coco	Areia	Imersão das fibras em sílica coloidal com proporções iguais a água destilada.	Redução da permeabilidade, aumento da resistência ao cisalhamento do compósito, diminuição da coesão e aumento do ângulo de atrito.
Jairaj, Kumar e Raghunandan (2018)	Coco	Solo expansivo	Impregnação com álcali e revestimento com resina epóxi e pó de pedra	O tratamento alcalino da fibra de coco causou uma redução significativa na absorção de água, levando a uma melhoria nas características de compactação e resistência do solo.
Silveira (2018)	Sisal e Curauá	Areia	Imersão em sílica coloidal e copolímero de estireno-butadieno carboxilado	Os dois produtos diminuiram a absorção de água. As fibras de sisal apresentaram melhoria na resistência a tração, sendo que o compósito com sisal e sílica teve o melhor desempenho. As fibras de curauá não apresentaram variações após o tratamento com sílica.

Fonte: Autora (2021).

2.8 Envelhecimento de fibras naturais

A avaliação da durabilidade das fibras pode ser feita a partir de métodos que expõem o material às condições de uso ao longo do tempo. Os processos mais usais para a verificação do comportamento das fibras a longo prazo são os métodos de envelhecimento natural e o método de envelhecimento acelerado, nos quais a comparação do desempenho antes e depois permitem avaliar a degradação sofrida, e, conseqüentemente, sua durabilidade (SILVA, 2002).

O envelhecimento natural baseia-se na exposição das fibras ou do compósito solo-fibra às condições climáticas variadas por um determinado período, sobretudo, épocas de transição entre estações do ano, nas quais as variações de temperatura e umidade são

mais intensas. Segundo Silva (2002), os ensaios de envelhecimento natural implicam na exposição do material às condições de uso real, a partir da disposição em bancadas com inclinação de 30° voltadas para o norte magnético, com o intuito de maximizar a incidência solar. Embora permitam aproximar a análise real da degradação sofrida, é um processo lento, requerendo longos períodos de espera.

O envelhecimento acelerado tem o objetivo de simular em laboratório as condições encontradas em campo. Para isso, as fibras ou o compósito são submetidos a ciclos de umedecimento/secagem ou irradiação controlados.

Costa (2013) avaliou o comportamento mecânico e a estrutura fibrosa de geotêxteis de fibras naturais ao longo do tempo. Foram consideradas as fibras de juta e sisal, incorporadas no solo, sendo este posteriormente exposto a condições ambientais e também a condições controladas, sem ação de agentes climáticos. Concluiu-se que as fibras expostas a condições ambientais apresentam uma degradação muito superior àquela verificada para condições controladas, comprovando-se como chave as ações da umidade, temperatura e incidência de radiação solar no processo de biodegradação deste tipo de material.

O autor ressalta que ocorreu rápida e acentuada degradação das propriedades mecânicas das fibras durante as primeiras semanas de exposição no solo. A interação de geotêxteis naturais com o solo e agentes climáticos diversos resulta em um acelerado processo de biodegradação deste tipo de material, devido à ação química dos solos e também de microrganismos, como pode ser comprovado pela perda significativa de propriedades como a resistência à tração, perda de massa das fibras e degradação da superfície da estrutura fibrosa da juta e sisal. A perda significativa nas propriedades mecânicas se relaciona com a natural perda de matéria existente na composição das fibras. A perda de massa das amostras de fibra em função do tempo de exposição está intimamente relacionada com a perda dos vários constituintes da composição química das fibras (hemicelulose, celulose, lignina entre outros) resultado do processo de biodegradação das mesmas.

Toledo Filho et al. (2000) investigaram a durabilidade de compósitos reforçados com fibras de sisal e coco, submetidos aos envelhecimentos acelerado e natural. As fibras foram tratadas com soluções de hidróxido de cálcio e sódio, além de serem mantidas

imersas em água. Os compósitos reforçados com fibras tratadas e não tratadas foram testados à flexão, depois de submetidos a condições de envelhecimento acelerado (ciclos de molhagem e secagem) e envelhecimento natural.

O procedimento adotado para realização do processo de envelhecimento acelerado do compósito de argamassa de cimento e fibras naturais consistiu, primeiramente, em definir o período do ciclo de umedecimento e secagem do compósito. Uma amostra foi moldada, depois completamente saturada em água a 18 °C e deixada secar em uma sala de laboratório condicionada a 23 °C e 40,1% de umidade relativa. Durante esse período, foram feitas as leituras de ganho e perda de peso. Considerando que ocorreu a saturação da amostra nas primeiras 24 horas e perda de cerca de 72% da massa adquirida em seis dias, foi escolhido um ciclo de sete dias. Neste ciclo, as amostras foram deixadas um dia sob a água à 18 °C e seis dias secando na sala de laboratório condicionada. Os autores concluíram que houve significativa redução na tenacidade após seis meses tanto no envelhecimento natural quanto acelerado, com consequente redução da flexibilidade e da capacidade de deformação. A fragilização das fibras devido à migração dos produtos de hidratação podem ter contribuído para estes resultados.

Carvalho, Fangueiro e Neves (2014) estudaram como a degradação interfere no comportamento mecânico de fibras naturais de origem vegetal. Foram estudadas as condições de degradação provocada por envelhecimento acelerado (agentes agressivos simulados em laboratório) e em condições reais (as fibras foram enterradas no solo e sujeitas às condições climáticas de transição primavera/verão em um período de três meses). Foram empregados solo residual granítico (solo ácido com pH 5) e três tipos de fibras: a de sisal, a de banana e a de coco. Para o processo de envelhecimento das fibras em laboratório foi utilizado o equipamento QUV (Accelerated Weathering Tester – Model QUV/Spray). O funcionamento do QUV consiste em irradiar as amostras sob uma lâmpada fluorescente com uma irradiância de 430 nm, com ciclos de irradiação UV de 16 horas a uma temperatura de 50 °C, seguidos por 8 horas de pulverização à temperatura de 50 °C, para um tempo de exposição de 24 horas.

Após a análise dos efeitos dos métodos de envelhecimento nas fibras naturais, Carvalho, Fangueiro e Neves (2014) concluíram que as amostras de sisal e banana submetidas ao ensaio de envelhecimento em solo apresentam maior perda de resistência ao longo do

tempo, que as amostras submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado. Já as fibras de coco apresentam-se com resultado inverso.

Em geral, a maior perda de resistência ocorre nos primeiros 15 dias de exposição (360 horas), provocando uma redução da resistência à tração superior a 50% da sua resistência inicial, e ao final do primeiro mês de exposição verificou-se uma estabilização da perda de resistência, mantendo-se quase inalterável. A análise das fibras estudadas por microscópio eletrônico de varredura mostrou que as fibras de coco são as que apresentam menor degradação, enquanto as fibras de sisal e banana apresentam logo nas primeiras 360 horas de exposição, a presença de orifícios e fissuras. A lenta degradação das fibras de coco é justificada pela sua elevada concentração de lignina em comparação com sisal e banana, já que a lignina é responsável pela resistência das fibras naturais à radiação ultra-violeta, o que possivelmente justifica a maior resistência à tração das fibras de coco nos ensaios de envelhecimento em solo, podendo então desempenhar várias funções como reforço de solos (CARVALHO; FANGUEIRO; NEVES, 2014).

O fato das fibras de sisal e banana apresentarem maior degradação e, por conseguinte, maior perda de resistência no ensaio de envelhecimento em solo pode ser explicado pelas condições do ensaio de envelhecimento em laboratório não conseguirem reproduzir a situação real. As fibras envelhecidas em solo normalmente são submetidas a variações de temperatura repentinas e ciclos de molhagem e secagem descontrolados, além de outros parâmetros não quantificáveis, como o peso do solo sob as fibras e o atrito existente entre elas e as partículas do solo, que poderão criar fragilidades na sua estrutura.

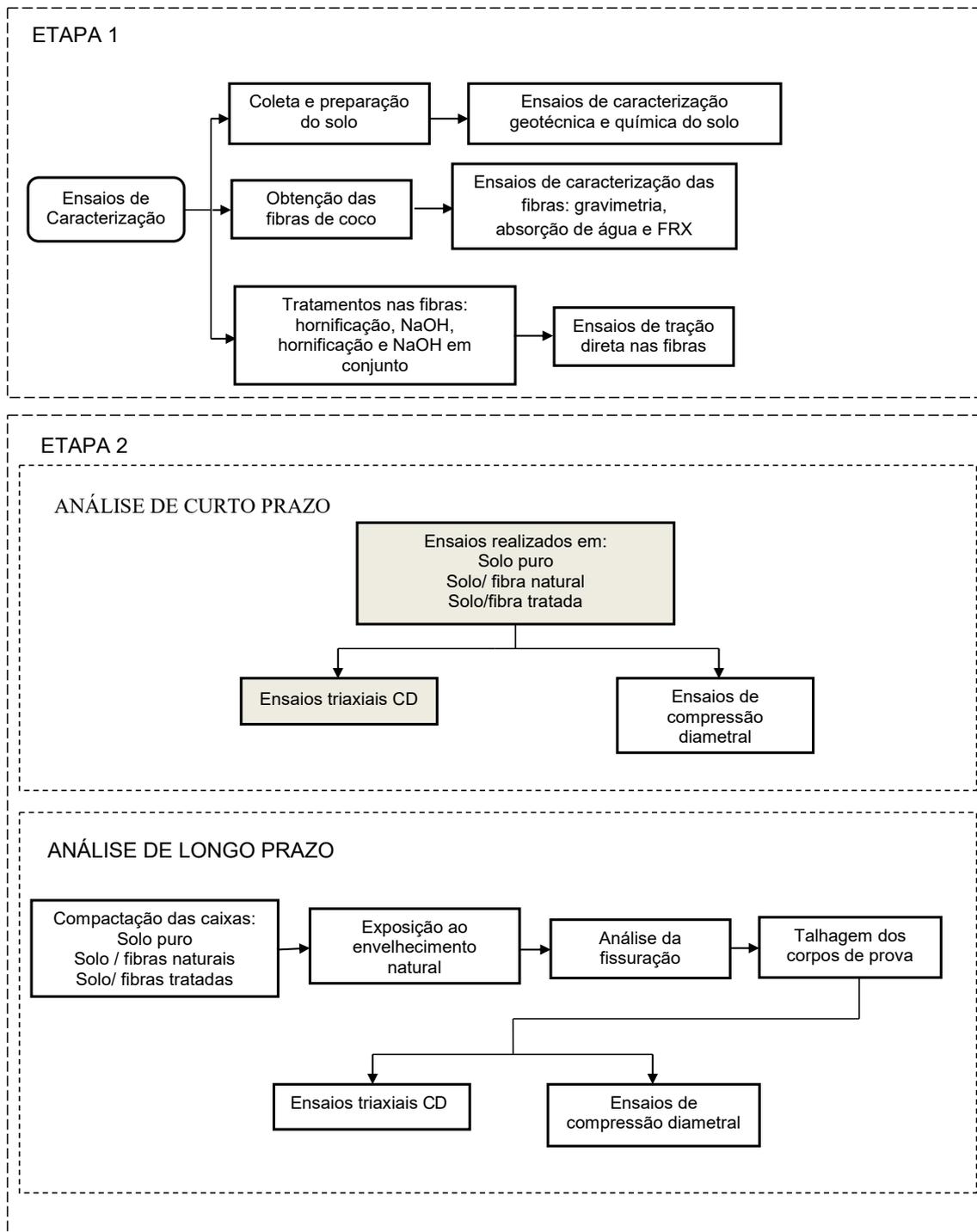
3 METODOLOGIA

O programa experimental está baseado em duas etapas. A primeira teve como objetivo caracterizar o solo e as fibras empregadas no trabalho, enquanto que na segunda etapa, focou-se na avaliação do desempenho mecânico a longo prazo dos compósitos constituídos por estes materiais.

O estudo em questão faz parte de um trabalho maior cuja finalidade é avaliar o comportamento de compósitos solo/fibras de coco em curto e longo prazos. Neste estudo, foram analisados os compósitos solo/fibra com e sem tratamento após um período de exposição aos agentes climáticos (envelhecimento natural). O emprego de três tipos de tratamento para a melhoria do desempenho a longo prazo das fibras é também um aspecto abordado.

A Figura 3.1 ilustra as etapas do desenvolvimento experimental proposto para este trabalho. As caixas de atividades com fundo colorido no fluxograma representam as análises do comportamento mecânico a curto prazo que foram desenvolvidas por Reis (2022), outro discente do projeto, no Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA.

Figura 3.1 – Esquema do desenvolvimento experimental



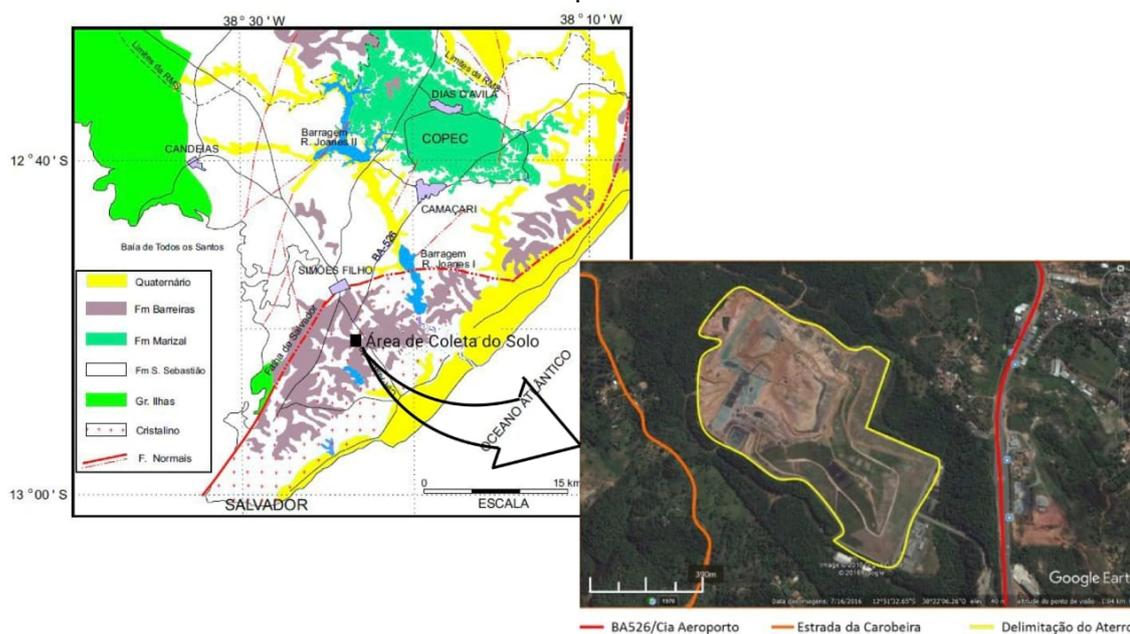
Fonte: Autora (2021).

3.1 Caracterização do Solo

O solo utilizado para a pesquisa é um solo sedimentar da Formação Barreiras disponível na área de bota fora do Aterro Sanitário Metropolitano Centro (ASMC), situado na rodovia BA-526 (Centro Industrial de Aratu - Aeroporto), km 6, Zona Norte, Região Metropolitana de Salvador. O ASMC atende diariamente, desde 1997, as cidades de Salvador, Simões Filho e Lauro de Freitas.

A Formação Barreiras é uma unidade geológica de natureza sedimentar que aflora em uma faixa ao longo de aproximadamente 4000 km no litoral brasileiro. Em geral, os solos da formação barreiras apresentam perfis com camadas intercaladas de argilitos, siltitos, arenitos, com diferentes teores de silte, argila e areia. Ocorre com frequência a presença de camadas enrijecidas com cimentação ferruginosa. Além disso, esses sedimentos costumam apresentar tonalidades com coloração viva e que variam desde vermelhas, amarelas até brancas. Os sedimentos da Formação Barreiras afloram nas falésias erodidas ao longo das praias, nas vertentes íngremes dos vales e em taludes de cortes de rodovias (JUNIOR; COUTINHO; SEVERO, 2015). A Figura 3.2 mostra a área de coleta do solo na Região Metropolitana de Salvador e sua respectiva geologia e a localização do ASMC.

Figura 3.2 – Mapa com a localização da área de coleta do solo com a geologia



Fonte: Adaptado de Cavalcanti (1999).

As amostras deformadas do solo Barreiras foram coletadas por escavação manual no ASMC até uma profundidade de 1 metro (Figura 3.3), sendo armazenadas em sacos de rafia e, posteriormente, encaminhadas ao Laboratório de Geotecnia Ambiental (GEOAMB) da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA). Aproximadamente 1800 kg deste material foi levado ao laboratório, onde foi homogeneizado, destorroado, submetido à secagem ao ar e armazenado em baias, sendo então separadas quatro amostras de 20 kg de solo homogeneizado para realização dos ensaios de caracterização geotécnica e compactação.

Figura 3.3 – (a) Local de coleta do solo: área de bota fora do ASMC . (b) Solo Barreiras



Fonte: Autora (2021).

3.1.1 Caracterização geotécnica

Os ensaios de caracterização geotécnica foram realizados em quadruplicata com a finalidade de determinar a distribuição granulométrica, a massa específica dos grãos, ρ_s , os Limites de Consistência (Limite de Liquidez, W_L , e Limite de Plasticidade, W_P) e a massa específica seca máxima. Os ensaios de compactação foram realizados empregando-se a Energia do Proctor Normal (EPN), sem reúso do material.

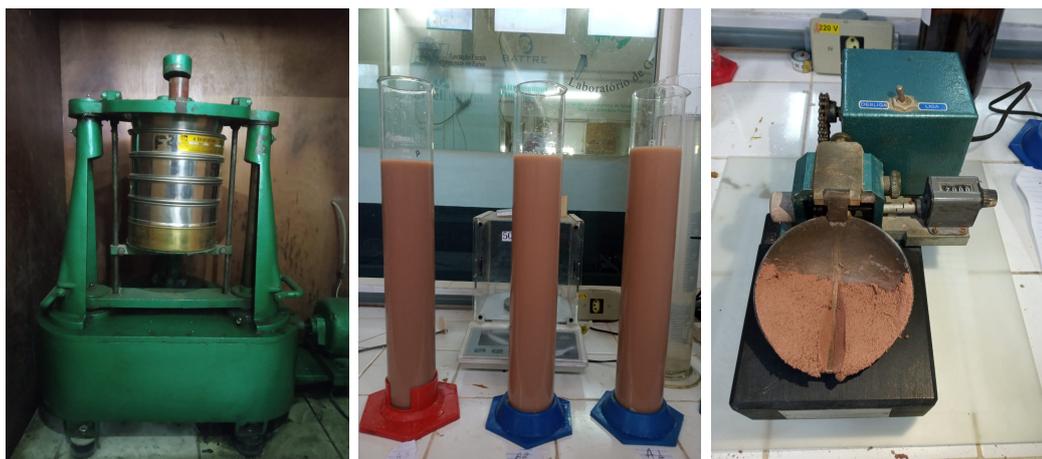
Os procedimentos de ensaio foram realizados de acordo com as normas brasileiras vigentes dispostas na Tabela 3.1. A Figura 3.4 ilustra algumas etapas dos ensaios de caracterização geotécnica do solo.

Tabela 3.1 – Caracterização geotécnica do solo: normas utilizadas

Normas	Descrição
ABNT NBR 7181 (2016)	Análise Granulométrica - Método de Ensaio.
ABNT NBR 6508 (2017)	Grãos que passam pela peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica
ABNT NBR 6459 (2016)	Solo: Determinação do Limite de Liquidez
ABNT NBR 7180 (2016)	Solo: Determinação do Limite de Plasticidade
ABNT NBR 7182 (2016)	Solo: Ensaio de Compactação: Método de Ensaio

Fonte: Autora (2021).

Figura 3.4 – Ensaios de caracterização geotécnica: (a) Peneiramento. (b) Sedimentação (c) Determinação do Limite de Liquidez



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autora (2021).

3.1.2 Caracterização química

Análise por Fluorescência de Raios-X (FRX)

A análise por FRX baseia-se na medida das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos químicos componentes da amostra, quando devidamente excitada por radiação eletromagnética (SOUSA, 2015). Nesse estudo, as amostras de solo foram caracterizadas utilizando um espectrômetro portátil de fluorescência de raios-X (XMET 7500, Oxford Instruments, UK) apresentado na Figura 3.5.

O ensaio foi realizado em triplicata. Foram utilizadas amostras do solo seco em estufa com massa aproximada de 100 g, as quais eram acondicionadas no porta-amostras próprio para o ensaio e então, o espectrômetro era acionado, deixando-o em contato com a amostra por aproximadamente 15 segundos. Este procedimento foi repetido 10 vezes para cada amostra e, por fim, calculou-se os valores médios das concentrações principais de cada elemento químico constituinte do solo.

Figura 3.5 – Ensaio de FRX do solo.



Fonte: Autora (2021).

Determinação do pH

A determinação do pH (potencial hidrogeniônico) fornece a acidez ou alcalinidade do solo em estudo, sendo importante pois influencia na velocidade e/ou propensão à degradação das fibras. O pH do solo foi determinado por meio da análise da suspensão dos solos em água destilada na relação peso/volume de 1:10, ou seja, a cada 10 gramas de solo seco adicionou-se 100 mL água destilada. A solução água destilada + solo foi agitada, deixando-a em repouso por 1 hora. Posteriormente, agitou-se a solução novamente procedendo à leitura do pH mediante o uso do pH-metro. A metodologia adotada para a determinação do pH utilizou como referência os procedimentos da Embrapa (1997).

Teor de matéria orgânica

O teor de matéria orgânica do solo foi obtido por gravimetria por volatilização no Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA. Seis amostras de solo com cerca de 40

gramas foram calcinadas em forno mufla a 600°C por duas horas, após a secagem do solo em estufa a 70°C. A diferença entre as massas calcinadas e secas forneceram a massa de matéria orgânica no solo.

3.2 Caracterização das Fibras de Coco

As fibras vegetais de coco utilizadas como reforço do solo foram obtidas a partir dos resíduos das cascas do fruto e adquiridas já beneficiadas da empresa Saturno Fibras, situada na cidade de Conde - BA. As fibras de coco são do tipo "fibroso", designação da Saturno Fibras, usada aqui como referência em virtude dos diferentes tipos de fibras fornecidos. Para esta pesquisa foram estudadas as fibras submetidas ao processo de peneiramento ainda na fábrica (Figura 3.6). As fibras de coco foram submetidas aos ensaios de caracterização de modo a se obter informações de interesse para o desenvolvimento da pesquisa.

Figura 3.6 – Fibras vegetais de coco



Fonte: Autora (2021).

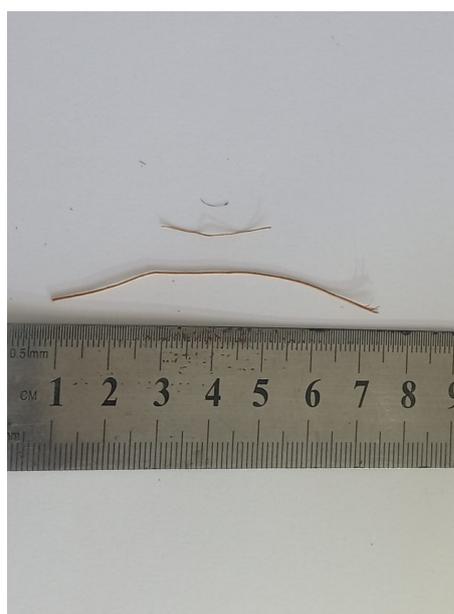
3.2.1 Comprimento da fibra

O material fibroso obtido dispõe de grande variabilidade de comprimentos conforme apresentado na Figura 3.7. Por isso, a caracterização da fibra de coco foi realizada por meio da análise da composição gravimétrica. Foram selecionadas três amostras de cerca de 10g cada, de forma aleatória de um fardo de fibras de 10 kg. Utilizando

um paquímetro, as fibras foram separadas manualmente e classificadas em diferentes tamanhos da seguinte forma: pó e fibras curtas ($L < 1\text{cm}$), fibras médias ($1 \leq L < 5\text{ cm}$) e fibras longas ($L > 5\text{cm}$), sendo L equivalente ao comprimento da fibra. Com o auxílio de uma balança de precisão (0,001 g), pesou-se cada fração e em seguida calculou-se o percentual de cada classe.

O comprimento da fibra influi no ganho de resistência mecânica do compósito, de sorte que quanto maior o comprimento da fibra empregada como reforço, maior será o incremento da resistência cisalhante do solo, até determinado limite no qual ocorre queda do desempenho com o aumento do comprimento. Dessa forma, entende-se que a utilização do pó de fibra como reforço não seria capaz de fornecer melhorias significativas nos parâmetros de resistência do solo, sendo esta fração removida para a realização dos ensaios.

Figura 3.7 – Comprimentos das fibras de coco



Fonte: Autora (2021).

3.2.2 Caracterização química

A técnica de FRX permitiu identificar de forma quantitativa a composição química das fibras naturais de coco. O ensaio foi realizado em triplicata e o preparo consistiu no acondicionamento de uma amostra de 15 g da fibra no porta-amostras. Os procedimentos de ensaio adotados foram os mesmos para o caso das amostras de solo.

3.2.3 Capacidade de absorção de água

Para a realização do ensaio de absorção de água, inicialmente, quatro feixes de fibras pensando 100 gramas cada foram pesados para obtenção da massa seca ao ar ($T=23^{\circ}\text{C}$), e, ao término, imersos em água ($T=21^{\circ}\text{C}$) por 24h. O peso úmido foi determinado nos intervalos iniciais de 5, 10, 15, e 30 minutos e depois de 1 em 1 hora até completadas 8 horas de ensaio, sendo por fim realizada a última leitura quando completadas 24 horas de imersão.

A cada intervalo de tempo, foram utilizados uma centrífuga manual revestida com tecido permeável e papel toalha para retirar o excesso de água presente na superfície e então, as fibras eram pesadas. A Figura 3.8 ilustra os procedimentos deste ensaio.

O ganho de massa das fibras para as diferentes condições, em porcentagem, foi obtido por meio da Equação Equação 3.1, onde M_f é a massa das fibras após imersão e M_o é a massa inicial. Por fim, foi possível traçar a curva ganho de massa *versus* tempo para as fibras. Este procedimento foi repetido tanto para as fibras sem tratamento quanto para as fibras submetidas aos tratamentos descritos na Subseção 3.2.4.

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

Figura 3.8 – Ensaio de capacidade de absorção de água. (a) Saturação das fibras. (b) Centrífuga manual. (c) Papel toalha para retirar o excesso de água.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autora (2021).

3.2.4 Tratamento das fibras

Diante da necessidade de verificar o comportamento dos compósitos solo/fibra a longo prazo foram definidos três tipos de tratamento para as fibras de coco: a hornificação, tratamento alcalino com solução de NaOH e o tratamento acoplado hornificação + NaOH.

Hornificação

A hornificação das fibras consistiu na realização de ciclos de molhagem até a saturação das fibras e secagem até a constância de massa. A definição da quantidade de ciclos de molhagem e secagem e a duração da imersão das fibras em água deionizada foi realizada a partir do ensaio de capacidade de absorção de água, procedimento detalhado na Subseção 3.2.3.

Apesar de ainda terem ocorrido variações nos resultados finais de 6/8 para 10 ciclos, definiu-se 10 ciclos de molhagem e secagem como suficientes para a obtenção da estabilização dimensional da fibra (ver Figura 4.3 em resultados obtidos). Como a diferença entre os valores de absorção de água pelas fibras entre 4 e 24 horas não excedeu 10%, determinou-se 4 horas como o tempo de imersão suficiente para promover a saturação.

Para determinação do tempo de secagem, as fibras previamente saturadas por 4 horas foram secas em estufa à 70°C, sendo pesadas em intervalos de tempo pré-definidos até a obtenção da constância de massa. Com isso, determinou-se o tempo de secagem de 16 horas como suficiente para a secagem das fibras.

Tratamento alcalino

A definição dos parâmetros do tratamento alcalino foi feita de acordo com dados disponíveis na literatura (SAHA et al., 2012; KABIR et al., 2012). Com base nos resultados apresentados por estes autores, considerou-se que os tempos de imersão entre 30 e 60 minutos, em solução de baixa concentração alcalina (entre 0,5 e 1,0%) não degradariam a fibra natural.

Sendo assim, as fibras de coco submetidas ao tratamento alcalino foram submersas em soluções contendo 0,5 e 1,0% de NaOH em tempos de 30 e 60 minutos. Posteriormente, as fibras tratadas foram sujeitas aos ensaios de tração direta (Subseção 3.2.7).

O tratamento que apresentou o melhor desempenho durante os ensaios de tração direta (realizado com 1,0% de NaOH e tempo de imersão de 60 minutos) foi aplicado às fibras submetidas aos ensaios de exposição às intempéries (ensaios de envelhecimento natural).

Tratamento acoplado Hornificação + NAOH

O tratamento de hornificação com NaOH consistiu na imersão das fibras previamente hornificadas com 10 ciclos de molhagem e secagem em solução aquosa contendo o percentual pré-definido de 1,0% de NaOH durante 60 minutos. Completado o período de imersão, era retirado o excesso de solução das fibras e as mesmas eram expostas a secagem ao ar por 24 horas e posterior secagem em estufa a 70°C por mais 24 horas.

3.2.5 Determinação da Massa Específica

A massa específica foi determinada em picnômetro a gás hélio AccuPyc II 1340 (Micromeritics, Estados Unidos) (Figura 3.9). As amostras das fibras sem tratamento foram previamente secas em estufa a 70° até constância de massa, sendo em seguida resfriadas à temperatura ambiente em dessecador com sílica gel. Inicialmente, a massa da amostra de fibras foi medida e, quando inserida no equipamento, o valor da massa foi registrado. O picnômetro a gás determina o volume verdadeiro de um sólido, por variação da pressão do gás, numa câmara de volume conhecido. O gás hélio é comumente utilizado, pois, além de ser inerte, possui moléculas de pequeno tamanho e, por isso, penetra facilmente nos poros da amostra. Foram feitas pelo menos três determinações em cada amostra de aproximadamente 10g e o equipamento forneceu a massa específica média do número de leituras solicitado.

Figura 3.9 – Picnômetro a gás hélio utilizado para determinar a massa específica das fibras



Fonte: Autora (2021).

3.2.6 Análise microscópica

Para a determinação da área da seção transversal das fibras foi utilizado um microscópio óptico BX41 (Olympus, Japão) disponível no Núcleo de Tecnologia da Preservação e Restauração (NTPR/UFBA) (Figura 3.10). Os diâmetros médios foram medidos empregando o *software* Motic Images Plus 2.0. Foram visualizadas seis amostras de cada tipo de fibra, natural, tratadas com NaOH nos percentuais de 0,5 e 1,0% nos tempos de imersão de 30 e 60 minutos, além das fibras hornificadas e hornificadas com NaOH.

Figura 3.10 – Microscópio óptico



Fonte: Autora (2021).

3.2.7 Ensaio de tração simples

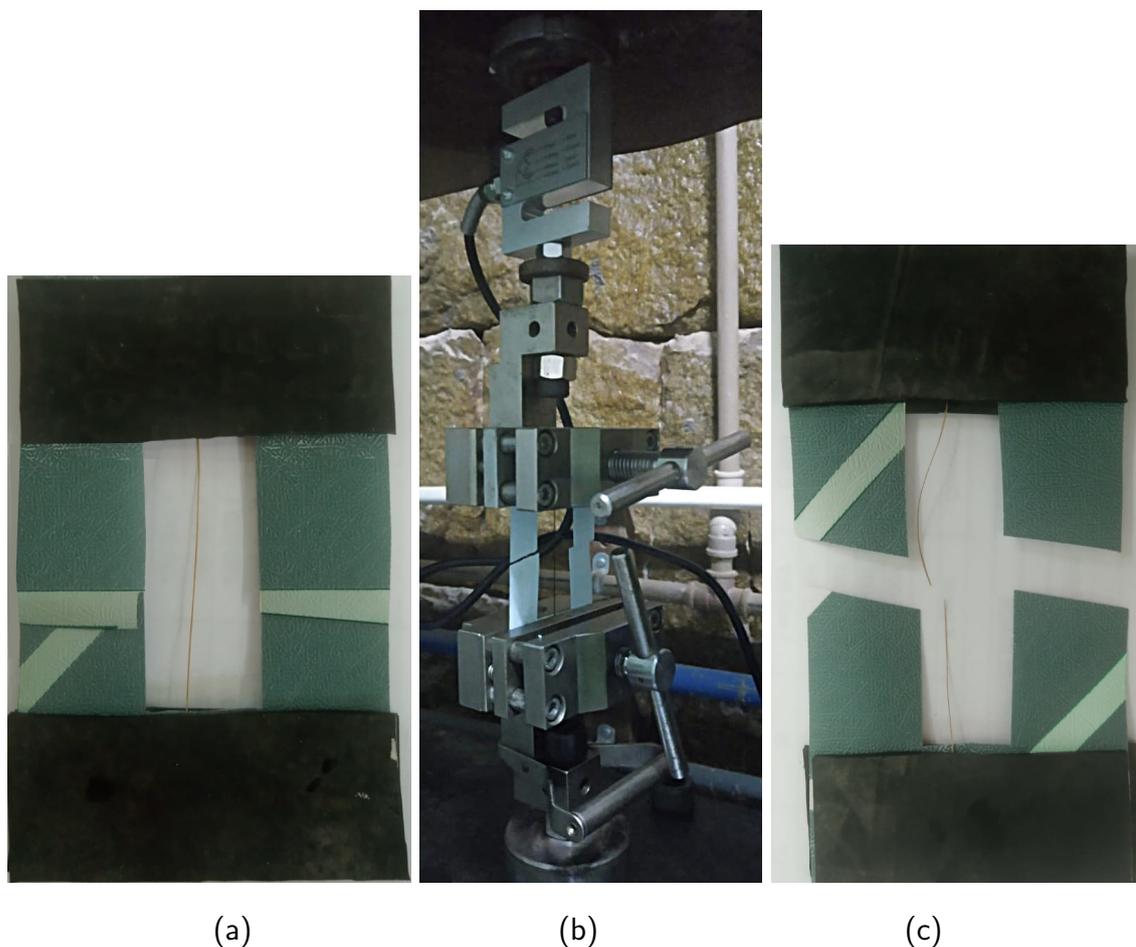
Ensaio de tração simples foram realizados nas fibras naturais e nas fibras tratadas com o objetivo de determinar a resistência à tração, o módulo de elasticidade e o alongamento na ruptura, além de averiguar se os tratamentos superficiais afetariam de alguma maneira o comportamento mecânico do material. Os procedimentos deste ensaio foram definidos seguindo as recomendações de Agopyan e Junior (2007). Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios universal (Materialprüfung 1445, Zwick, Alemanha) do Laboratório de Geotecnia da UFBA. A célula de carga utilizada foi de 10 kgf e a velocidade de ensaio de 2,0 mm/min.

As fibras separadas para este ensaio, de comprimento aproximado de 30 mm, foram coladas num molde de papel de gramatura de aproximadamente 180 g/m². Os moldes

possuíam dimensões de 65 mm x 25 mm e eram dotados de uma janela de dimensões de 5 x 15 mm no centro, conforme apresentado na Figura 3.11. As fibras foram fixadas no molde utilizando cola instantânea da marca *SuperBonder*. Nas extremidades de cada molde foi colocada uma proteção de borracha para evitar que a garra da máquina causasse o esmagamento e ruptura da fibra. Procedimentos similares foram adotados por Ferreira et al. (2012).

Inicialmente, foram consideradas fibras naturais e tratadas com 0,5 e 1,0% de NaOH nos tempos de 30 e 60 minutos para a definição dos parâmetros a serem adotados para o tratamento com NaOH. Posteriormente, os ensaios de tração foram também realizados nas fibras hornificadas e nas fibras com o tratamento acoplado. Para este ensaio, considerou-se 6 amostras de cada tipo de fibra, que previamente teve o diâmetro determinado utilizando o microscópio óptico.

Figura 3.11 – Ensaio de tração direta nas fibras. (a) Corpo de prova antes da ruptura. (b) Aparato utilizado para o ensaio. (c) Corpo de prova após a ruptura.



Fonte: Autora (2021).

3.3 Compósitos solo/fibra

A proporção de fibras nas misturas solo-fibra de coco foram calculadas em função da massa total de solo seco. O percentual de fibra definido para os compósitos foi de 1%. Este teor foi selecionado baseando-se na definição deste como sendo o teor ótimo de adição de fibras ao solo barreiras nas análises de curto prazo realizadas por Reis (2022). O autor realizou ensaios triaxiais no solo puro e em compósitos com teores de 0,5, 1,0 e 1,5 % das fibras de coco, e notou que o teor de 1,0% foi o que melhor aliou melhorias no comportamento mecânico e trabalhabilidade da mistura solo-fibra (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Mistura solo/fibra (teor de 1%)



Fonte: Autora (2021).

Os compósitos foram compactados considerando o mesmo índice de vazios do solo, obtido no ensaio de compactação na Energia do Proctor Normal ($e = 0,383$). Assim, as fibras foram consideradas como parte dos sólidos, sendo o peso específico das partículas sólidas do compósito calculado conforme a Equação 3.2.

$$\gamma_{sc} = \frac{(1 + P_f) \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{sf}}{\gamma_{sf} + (P_f \cdot \gamma_s)} \quad (3.2)$$

Onde:

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

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

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

P_f : teor de fibras;

Dessa forma, mantendo-se o índice de vazios constante, para o teor de 1,0%, obteve-se a massa específica dos sólidos do compósito (ρ_{sc}) de 2,655 g/cm³ e a massa específica seca do compósito (ρ_{dsc}) foi de 1,921 g/cm³. A proporção utilizada foi de aproximadamente 26 kg de massa seca do solo para 268 g de massa seca da fibra para cada camada compactada, conforme detalhado a seguir.

Diante da necessidade de se reproduzir uma exposição mais próxima possível da situação real a que são submetidas as camadas de cobertura provisórias, foi analisado o comportamento dos compósitos submetidos ao processo de envelhecimento natural. Para isso, foram confeccionadas caixas de madeira com dimensões de 35 cm (largura), 100 cm (comprimento) e 35 cm (profundidade). As caixas são dotadas de orifícios na base sobrepostos por uma tela para facilitar a drenagem da água de chuva (Figura 3.14 (a)). Além disso, a base de cada caixa foi coberta por um geotêxtil não tecido (Figura 3.14 (b)) para evitar a fuga de material devido ao fluxo de água de infiltração pluvial.

A preparação das misturas consistiu em molhar o solo em sua umidade ótima definida no ensaio de compactação, deixando-o ensacado por 24 horas. As fibras eram colocadas em estufa à 70°C por 24 horas para eliminar a umidade higroscópica e se obter apenas a massa seca. Após a conferência da umidade do solo e a secagem das fibras, estes materiais eram pesados e separados em seis partes iguais, sendo que cada uma correspondia a uma camada de solo a ser compactada. As misturas para obtenção dos compósitos solo/fibra foram feitas em uma bandeja metálica. As fibras e o solo foram revolvidos utilizando uma espátula com o intuito de homogeneizar o material. O solo foi compactado utilizando um compactador manual e controlando-se a altura de cada camada de solo de modo a garantir que todas possuíssem a mesma densidade. A altura final de cada uma das seis camadas de solo da caixa tinha altura final de 4 cm, conforme apresentado na Figura 3.14 (c). Foram compactadas 10 caixas contendo as especificações apresentadas na Tabela 3.2.

No que diz respeito a trabalhabilidade das amostras, notou-se que o teor analisado (1,0 %) apresentou facilidade de mistura para as fibras sem tratamento e para as fibras submetidas ao tratamento de hornificação, as quais se distribuíram de forma homogênea na massa de solo. Em contrapartida, as fibras tratadas com NaOH demonstraram certa dificuldade para a homogeneização. Após o tratamento tais fibras apresentaram um

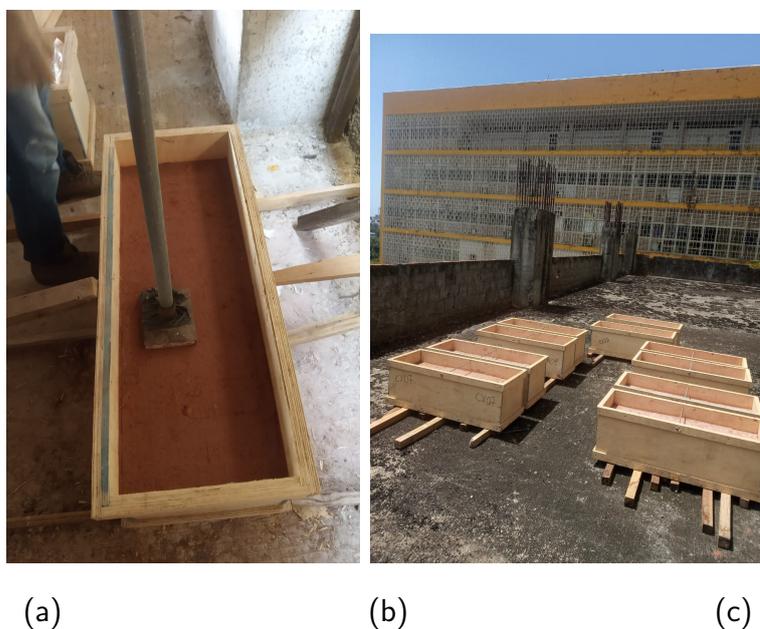
aspecto mais rígido e passaram a formar grumos, os quais tinham que ser desfeitos durante a mistura para não prejudicar a distribuição aleatória e evitar a formação de planos preferenciais de fraqueza no compósito.

Tabela 3.2 – Compósitos submetidos ao envelhecimento natural.

Caixa	Material	Teor de fibra (%)
01	Solo Puro	0,0
02		
03	Solo/Fibra Natural	1,0
04		
05	Solo/Fibra Hornificada	1,0
06		
07	Solo/Fibra NaOH	1,0
08		
09	Solo/Fibra Hornificada NaOH	1,0
10		

Fonte: Autora (2021).

Figura 3.13 – Compactação das caixas. (a) Orifícios para drenagem da água de chuva. (b) Geotêxtil sobre a base. (c) Compactador manual utilizado.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autora, 2021.

Figura 3.14 – Compactação das caixas. (a) Orifícios para drenagem da água de chuva. (b) Geotêxtil sobre a base. (c) Compactador manual utilizado.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autora, 2021.

3.4 Envelhecimento natural e monitoramento do processo de fissuração

O ensaio de envelhecimento natural do solo e dos compósitos foi feito expondo as caixas compactadas às intempéries em um prédio anexo da Escola Politécnica da UFBA por um intervalo de cinco meses, iniciando-se em setembro e finalizando-se em fevereiro. Durante esse período, as caixas foram sujeitas à ação de agentes climáticos diversos, como variações de temperatura e umidade do solo, frutos da transição do dia para a noite, da ocorrência de precipitações e incidência de radiação solar. Estes fatores influenciam na propensão das fibras à degradação. O dados climáticos para o período de exposição são apresentados e discutidos na Seção 4.4.

A Figura 3.15 apresenta as caixas expostas às variações climáticas. Durante o processo de envelhecimento natural do solo puro e dos compósitos, monitorou-se a ocorrência ou não de fissuração nas camadas compactadas. Em cada caixa, a evolução deste processo foi feita por fotos capturadas semanalmente.

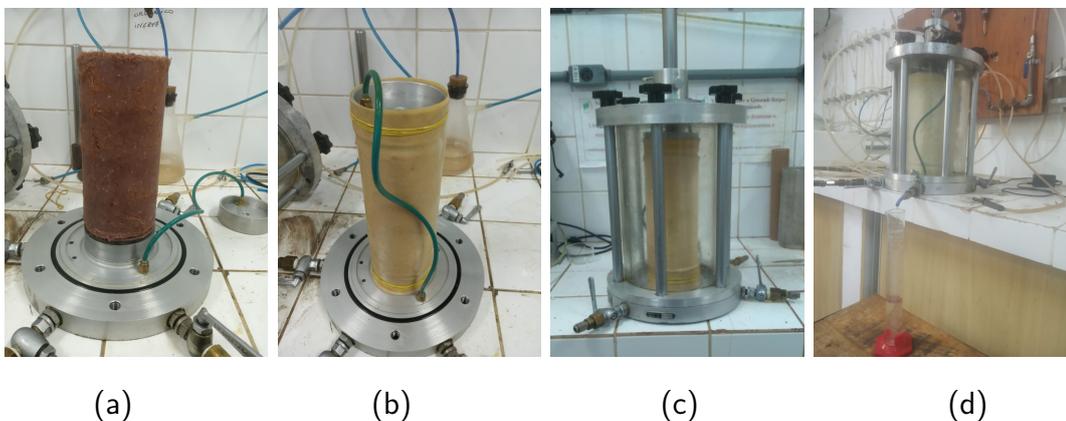
com água, conforme Figura 3.17 (c).

Figura 3.16 – Talhagem dos corpos de prova envelhecidos. (a) Equipamento utilizado. (b) Processo de talhagem. (c) CP talhado.



Fonte: Autora, 2022.

Figura 3.17 – Preparação dos corpos de prova: (a) Corpo de prova na base da câmara triaxial. (b) Corpo de prova revestido com membrana. (c) Corpo de prova montado na câmara triaxial. (d) Ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autora (2022).

3.6 Ensaios de permeabilidade

Após montados na câmara triaxial, os corpos de prova eram submetidos ao ensaio de permeabilidade a carga constante. Durante o ensaio de permeabilidade, o corpo de prova é submetido a uma pressão confinante efetiva de 30 kPa, enquanto a amostra é percolada por uma pressão de fluxo de água de 20 kPa, utilizando um gradiente hidráulico de cerca de $\Delta h/\Delta L = 10\text{cm}/\text{cm}$, imposto por um reservatório de água

destilada. A percolação foi realizada no sentido base-topo do corpo de prova. Após a saturação, eram realizadas as leituras das vazões para a determinação do coeficiente de permeabilidade. A Figura 3.17 (d) ilustra este ensaio sendo realizado no Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA. Posteriormente à este ensaio, os corpos de prova eram submetidos aos ensaios de compressão triaxial detalhados na Subseção 3.7.1. Os ensaios de permeabilidade serviram também como controle de qualidade das amostras, visto que este parâmetro é sensível a mudanças no índice de vazios do solo.

3.7 Comportamento Mecânico

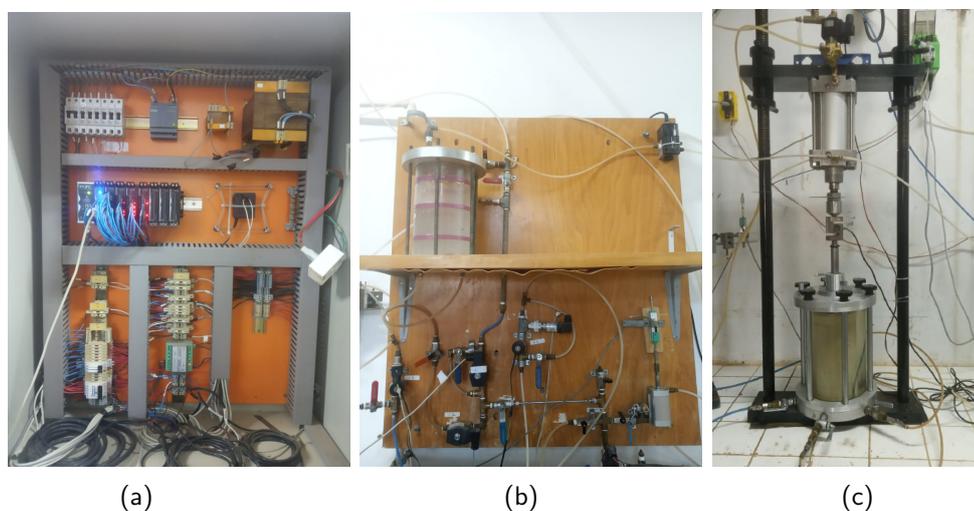
3.7.1 Ensaios de compressão triaxial

Neste estudo foram realizados ensaios triaxiais do tipo consolidado isotropicamente drenado (CD) para três tensões confinantes (50, 100 e 200 kPa) com uma repetição válida. Dessa forma, foram ensaiados pelo menos seis corpos de prova para cada situação: solo sem reforço, solo fibra sem tratamento, solo fibra hornificada, solo fibra com NaOH e solo fibra com ambos os tratamentos (hornificação + NaOH), sendo, portanto, realizados 30 ensaios triaxiais válidos ao todo. Todos os ensaios foram conduzidos após as amostras terem passado pelo processo de envelhecimento natural mencionado anteriormente, visto que a análise do comportamento mecânico dos compósitos solo/fibra sem envelhecimento (análise de curto prazo) é parte do estudo realizado por Reis (2022).

Os ensaios de compressão triaxial foram realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA, o qual conta com um sistema automatizado de servo-controle e de aquisição de dados. O sistema citado é constituído por uma parte mecânica e uma parte elétrica/eletrônica, composta por controlador lógico programável, válvulas, conexões, transdutores, sistema para fornecimento de pressão, pistões hidráulicos e o programa supervisor (o qual monitora as variáveis do sistema de aquisição de dados), e pode ser programado utilizando a linguagem VBS (Visual Basic Script) (Figura 3.18).

A prensa é constituída de uma bomba dosadora com controle de vazão, utilizada para o controle da deformação, aplicando uma taxa de deslocamento constante ao corpo de prova. Para a execução dos ensaios eram realizados os devidos ajustes e calibrações nas células de carga, transdutores de pressão e deslocamento e válvulas.

Figura 3.18 – Sistema automatizado servo-controle. (a) Parte elétrica. (b) Aplicação e medição das pressões. (c) Sistema mecânico.



Fonte: Autora (2021).

Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios seguiram as recomendações de Head (1994) e foram constituídos pelas seguintes fases: saturação dos corpos de prova por fluxo e contrapressão, adensamento e fase de cisalhamento.

Para a saturação dos corpos de prova foram realizadas as etapas de saturação por fluxo e saturação por contrapressão. A saturação por fluxo foi feita durante os ensaios de permeabilidade mencionados na Seção 3.6. A saturação por contrapressão dissolve as bolhas de ar intersticial remanescentes e aquelas que possam existir entre a membrana e a amostras (HEAD, 1994). Após a aplicação das tensões confinantes e neutras desejadas, considerando-se uma tensão efetiva máxima de 30 kPa (a mesma dos ensaios de permeabilidade), e decorrido um período de estabilização, é aplicado um acréscimo de tensão externa ($\Delta\sigma_c$) e realizado cálculo do parâmetro B de Skempton a partir das leituras de acréscimos de pressão neutra (Δu). Este parâmetro serve para verificar se o grau de saturação é satisfatório e é dado pela relação entre o excesso de poropressão gerado e o acréscimo de tensão confinante aplicado (Equação 3.3). O corpo de prova é considerado saturado quando o parâmetro B de Skempton for igual ou superior a 0,90, caso contrário a etapa de saturação por contrapressão era repetida até que este critério fosse atendido.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_c} \quad (3.3)$$

Na fase de adensamento isotrópico utilizou-se a tensão hidrostática confinante respectiva ao ensaio dada pela diferença entre as tensões confinante total e neutra utilizadas. Nessa fase, observou-se que as variações volumétricas cessavam, em média, nos primeiros 10 minutos de ensaio.

Em seguida, iniciava-se a fase de cisalhamento com a aplicação da tensão desviadora. A velocidade de ruptura foi determinada levando em consideração o tempo de consolidação. Conforme recomendado por Head (1994), a velocidade do cisalhamento para ensaios do tipo CD deve levar a um tempo de ruptura de cerca de 8,6 vezes o tempo de consolidação (t_{100}), respeitando o tempo de ruptura mínimo de 120 minutos. Desse modo, respeitando o critério de ruptura, considerou-se 120 minutos como o tempo requerido para o solo concluir a fase de cisalhamento. Considerando um altura nominal do corpo de prova de 200mm, a taxa de deslocamento utilizada foi de 0,33 mm/min. A deformação axial de 20% foi considerada como critério de finalização do ensaio.

Tanto as amostras da análise de curto prazo quanto as de longo prazo foram compactadas considerando o mesmo índice de vazios do solo obtido nos ensaios de compactação na EPN, conforme detalhado na Seção 3.3. No entanto, as amostras da análise de curto prazo realizada por Reis (2022) foram compactadas em um cilindro metálico bipartido, enquanto que para a análise de longo prazo, o material foi compactado em caixas, conforme mencionado anteriormente. Para que fosse possível realizar a comparação entre os comportamentos mecânicos para as situações distintas foram feitos ensaios triaxiais CD nas tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa para o solo compactado no cilindro (compactação tradicional) e para o solo compactado em uma caixa, afim de verificar se a alteração do molde de compactação afetaria o comportamento mecânico das amostras.

3.7.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração do solo puro e dos compósitos solo/fibra a curto e longo prazo foi verificada por meio do ensaio de compressão diametral. Este ensaio é normatizado pela ABNT NBR 7222 (2011) e foi desenvolvido inicialmente para avaliar a resistência à tração do concreto, e só mais tarde foi adaptado para ser utilizado em rochas e solos cimentados.

A execução consiste no carregamento de amostras cilíndricas, no sentido do seu

diâmetro. As cargas de compressão são aplicadas com uma velocidade constante ao longo de duas linhas axiais e diametralmente opostas.

A partir dos dados obtidos no ensaio de compressão diametral, como a carga de ruptura e deslocamento vertical, é possível determinar os valores de tensão de tração e de compressão através da Equação 3.4 e Equação 3.5, respectivamente.

$$\sigma_t = \frac{2.F}{\pi.D.H} \quad (3.4)$$

$$\sigma_c = \frac{-5,5.F}{\pi.D.H} \quad (3.5)$$

Onde:

F: carga de fratura primária (N);

D: o diâmetro da amostra (m);

H: altura da amostra (m);

A carga de fratura primária é identificada pelo pico de carga na curva carga versus deslocamento e por análise visual do corpo de prova durante o ensaio.

Os corpos de prova de solo puro e os compósitos solo/fibra com e sem envelhecimento possuíam dimensões aproximadas de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. As amostras sem envelhecimento foram compactadas utilizando o molde bipartido, enquanto que as amostras envelhecidas foram talhadas das caixas, procedimento já detalhado na Seção 3.5.

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados numa prensa (Materialprüfung 1445, Zwick, Alemanha) do Laboratório de Geotecnia da UFBA. A célula de carga utilizada foi de 100 kgf e a velocidade de ensaio de 2,0 mm/min.

A Figura 3.19 ilustra os ensaios sendo realizados em amostras após terem sido submetidas ao envelhecimento natural. Para que todos os corpos de prova fossem ensaiados na mesma umidade foi necessária a realização da correção de umidade dos corpos de prova envelhecidos. O procedimento consistiu em pesar os corpos de prova logo após serem talhados, verificação da umidade e caso estivessem abaixo da umidade ótima que

foi considerado nos ensaios a curto prazo, adicionava-se a massa de água necessária no topo e na base dos corpos de prova e esperava-se 24 horas para se obter a constância de massa.

Figura 3.19 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral: (a) Corpo de prova de solo sem reforço. (b) Corpos de prova solo/fibra hornificada.



(a)

(b)

Fonte: Autora (2022).

A determinação dos valores de coesão do solo para o ensaio de compressão diametral foi possível utilizando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e os valores de ângulo de atrito efetivo do solo determinado nos ensaios triaxiais. A coesão c , portanto, foi obtida a partir da Equação 3.6. As tensões de compressão e de tração são respectivamente as tensões principais σ_1 e σ_3 .

$$c = \frac{t}{\cos(\phi')} - s \cdot \tan(\phi') \quad (3.6)$$

Onde:

$$t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (3.7)$$

$$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (3.8)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do solo

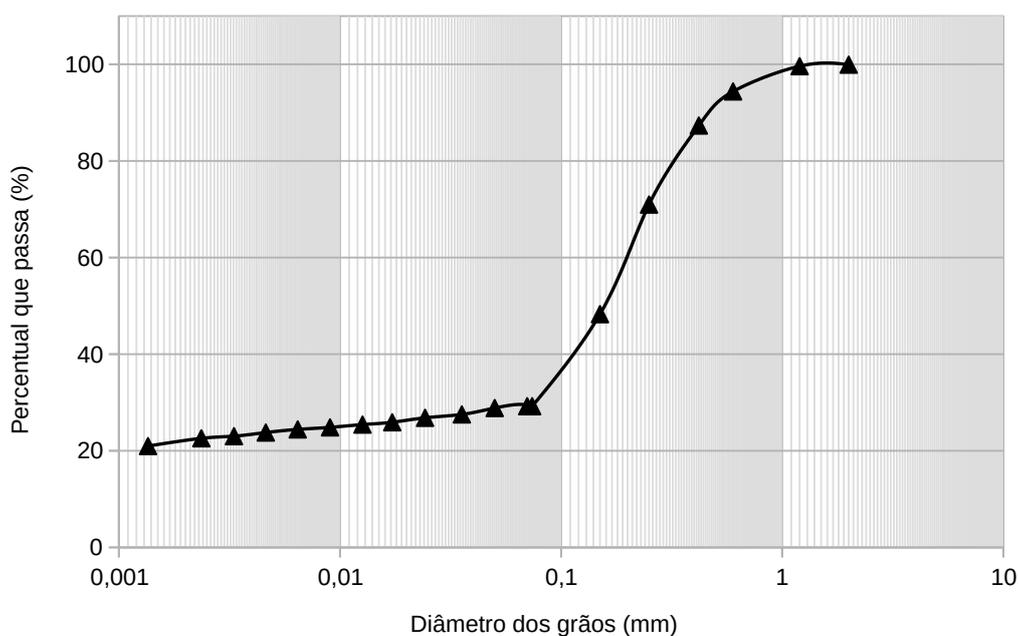
A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos para a composição granulométrica do solo estudado. Nota-se que este material possui cerca de 70% de areia e 30% de finos (silte e argila), sendo classificado conforme o SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos) como SM (areia siltosa). A Figura 4.1 apresenta a curva granulométrica do solo estudado.

Tabela 4.1 – Composição granulométrica e classificação do solo.

	Composição do Solo (%)					Classificação	
	Areia			Silte	Argila	SUCS	ABNT
	Grossa	Média	Fina				
Média	6	34	30	8	22	SM	Areia siltosa
Desvio Padrão	0,577	1,155	0,957	0,577	0,577		
Coef. de Variação	0,096	0,034	0,0319	0,072	0,025		

Fonte: Autora (2021).

Figura 4.1 – Curva granulométrica das amostras de solo



Fonte: Autora (2021).

Quanto aos resultados dos ensaios de limites de consistência, massa específica dos grãos e de compactação dispostos na Tabela 4.2, observa-se que o solo apresentou índice de plasticidade (IP) de 4% (pouco plástico) e massa específica dos grãos de 2,676 g/cm³. O valor determinado para a massa específica dos grãos mostrou-se semelhante a do solo de formação Barreiras estudado por Sousa (2012). No entanto, o índice de plasticidade difere dos valores encontrados na literatura. O solo estudado por Sousa (2012) apresentou IP de 21%, enquanto que Cerqueira (2016) classificou o solo Barreiras como não plástico, o que mostra a variabilidade dessa formação. De toda maneira, o valor determinado neste estudo é coerente com o elevado percentual de material granular presente nas amostras. Do ensaio de compactação do solo na energia do Proctor Normal, obteve-se umidade ótima de 11,16% e massa específica seca máxima de 1,938 g/cm³.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do solo.

	Limites de Consistência			Massa Específica dos Grãos	Ensaio de Compactação	
	LL (%)	LP (%)	IP(%)	ρ_s (g/cm ³)	W_{ot} (%)	$\rho_{d_{max}}$ (g/cm ³)
Média	21	17	4	2,676	11,16	1,938
Desvio Padrão	0,957	0,500	1,291	0,016	0,097	0,017
Coefficiente de Variação	0,04557	0,029	0,323	0,006	0,009	0,009

Fonte: Autora (2021).

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos para composição química por meio da técnica FRX. Desta tabela, observa-se que o silício, o alumínio, o magnésio e o cloro são os elementos predominantes no solo estudado. Cerqueira (2016) também notou a predominância dos componentes silício, alumínio e cloro para o solo da formação Barreiras utilizando a técnica FRX.

O pH determinado foi em torno de 6,0 e portanto, o solo mostrou-se ligeiramente ácido. Além disso, o solo apresentou baixa ocorrência de matéria orgânica, valor médio de 2,50%, conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.3 – Composição química do solo.

Elemento	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
	Média (%)	Desvio (%)	Média (%)	Desvio (%)	Média (%)	Desvio (%)
Si	23,62	3,10	22,49	2,56	25,58	3,07
Al	16,37	1,41	18,18	1,39	14,68	1,94
Mg	2,90	4,47	2,05	4,18	1,41	4,24
Cl	2,82	0,50	3,24	0,51	4,03	0,81
Co	0,19	0,05	0,19	0,04	0,24	0,06
Fe	0,13	0,02	0,15	0,02	0,19	0,04
Ca	0,15	0,06	0,07	0,07	0,13	0,11
Ti	0,18	0,04	0,16	0,03	0,18	0,04
Ag	0,05	0,01	0,06	0,01	0,09	0,03
Mo	0,02	0,03	0,02	0,04	0,03	0,05
Se	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,05
Mn	0,01	0,02	0,02	0,03	-	-
Sb	0,06	0,02	0,03	0,01	-	-
Ba	-	-	0,01	0,04	-	-

Fonte: Autora (2021).

Tabela 4.4 – Porcentagem de matéria orgânica.

Voláteis (g)	M.O. (%)	
39,03	0,97	2,43
39,02	0,98	2,45
38,94	1,07	2,67
39	1,03	2,57
38,99	1,02	2,55
39,09	0,92	2,30
	Média (%)	2,50
	Desvio padrão (%)	0,10
	Coefficiente de variação	0,04

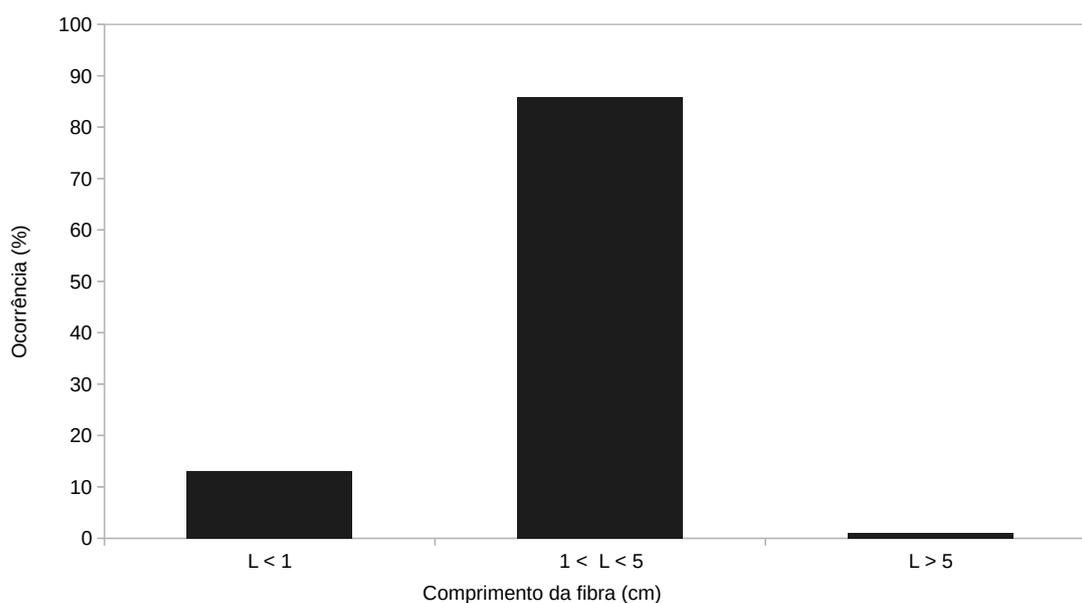
Fonte: Autora (2021).

4.2 Caracterização das fibras

4.2.1 Comprimentos

Embora o material fibroso utilizado nesta pesquisa disponha de grande variabilidade de comprimentos, a composição gravimétrica apresentada na Figura 4.2 mostrou que aproximadamente 87% do material correspondeu a fração de fibras com comprimentos entre 1 e 5 cm. Aproximadamente 13% das fibras apresentaram comprimentos inferiores a 1 cm e apenas 1% possuem comprimentos maiores que 5 cm. As fibras de coco estudadas por Oliveira Júnior (2018) também apresentaram cerca de 80% da sua composição com comprimento entre 1 e 5 cm e cerca de 16% composta por fibras de comprimento inferior a 1 cm. As fibras empregadas nos compósitos possuíam, portanto, comprimentos variados.

Figura 4.2 – Composição gravimétrica do solo



Fonte: Autora (2021).

4.2.2 Composição química

A Tabela 4.5 apresenta a composição química das fibras de coco obtida pela técnica FRX. De maneira geral, notou-se que os elementos químicos predominantes neste material são cloro, potássio, cálcio, silício e ferro. O elevado percentual de cloro presente

nas fibras provavelmente está relacionado com a proximidade do local de obtenção das fibras do mar.

Tabela 4.5 – Resultado do ensaio FRX para a fibra natural.

Elemento	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
	Média (ppm)	Desvio (ppm)	Média (ppm)	Desvio (ppm)	Média (ppm)	Desvio (ppm)
Cl	51,99	4,79	57,01	3,38	61,11	3,07
K	21,01	2,95	18,57	2,29	20,24	1,26
Ca	3,60	0,87	1,09	1,11	0,97	1,49
Si	2,73	2,24	3,50	2,33	0,61	1,83
Fe	0,60	0,09	0,56	0,16	0,75	0,14
Se	0,19	0,05	0,15	0,08	0,015	0,010
Mo	0,49	0,010	0,43	0,05	0,45	0,07
Ag	0,09	0,19	-	0,04	0,14	-
Sn	0,04	0,14	0,05	0,16	-	-
Sb	0,05	0,16	0,12	0,25	-	-
Th	0,03	0,10	-	-	-	-
Co	-	-	0,02	0,07	-	-
Ba	-	-	-	-	0,32	0,65

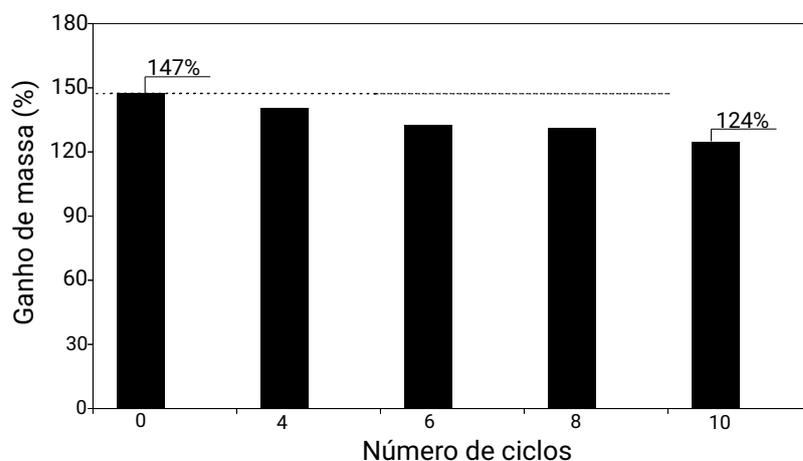
Fonte: Autora (2021).

4.2.3 Capacidade de absorção de água

A Figura 4.3 ilustra os resultados de ganho de massa das fibras, em 24 horas, após quatro, seis, oito e dez ciclos de molhagem e secagem. Como mencionado na Subseção 3.2.3, a absorção de água pelas fibras reduziu com o aumento do número de ciclos, sendo, portanto, convencionado a quantidade de dez ciclos como ideal para a realização do tratamento de hornificação, por associar a diminuição da absorção de água com facilidade de execução do tratamento em larga escala. O aumento do número de ciclos poderia tornar o procedimento de tratamento muito oneroso para a aplicabilidade em campo.

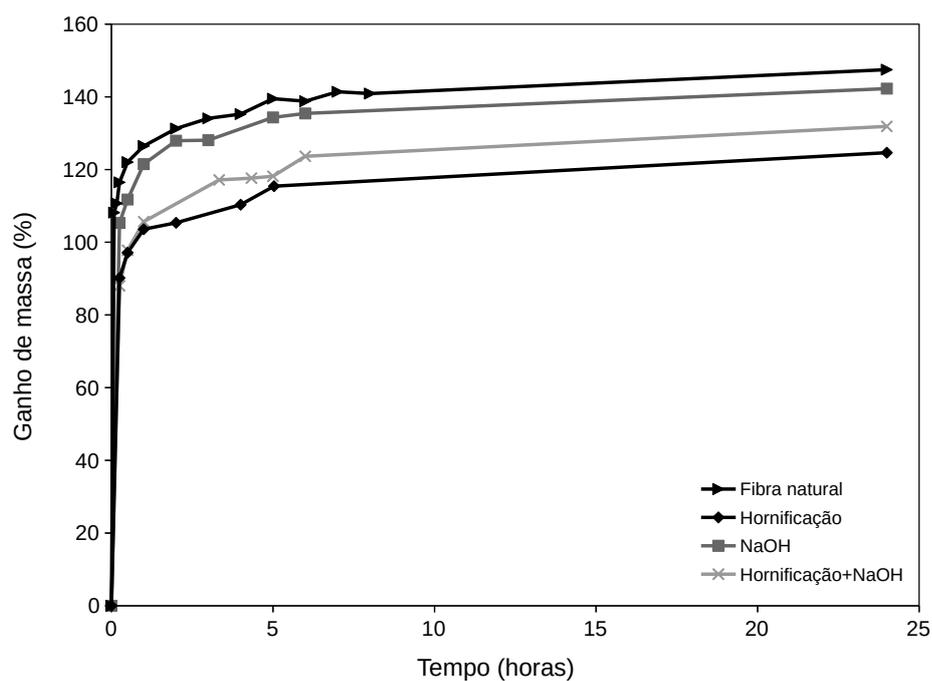
Na Figura 4.4 são apresentadas as curvas de ganho de massa *versus* tempo para as fibras naturais e para as fibras tratadas para fins de comparação. As curvas mostram que, em geral, o limite de ganho de massa acontece em aproximadamente 60 minutos e que após esse tempo não há ganho de massa expressivo para todas as amostras analisadas. As fibras de coco sem tratamento apresentaram ganho de massa de 147% após 24 horas de imersão.

Figura 4.3 – Ciclos do tratamento de hornificação.



Fonte: Autora (2021).

Figura 4.4 – Capacidade de absorção de água para as fibras sem tratamento e tratadas.



Fonte: Autora (2021).

Os três tratamentos diminuiram a capacidade de absorção de água pelas fibras, devido ao seu comportamento hidrofóbico. O tratamento de hornificação foi o que proporcionou redução mais significativa nesta propriedade, apresentando decréscimo de 147% para 129%. Resultados semelhantes de redução na absorção de água após o tratamento de hornificação foram encontrados por Claramunt, Ardanuy e García-Hortal

(2010), após tratar fibras de polpa de celulose, a absorção de água reduziu de 126% para 90%.

Já as fibras tratadas com NaOH tiveram o comportamento de absorção de água praticamente similar ao da fibra não tratada, demonstrando redução de 147% para 145%. O tratamento acoplado de hornificação com NaOH apresentou uma redução um pouco mais pronunciada na capacidade de absorção de água, sendo o decréscimo 147% para 131%.

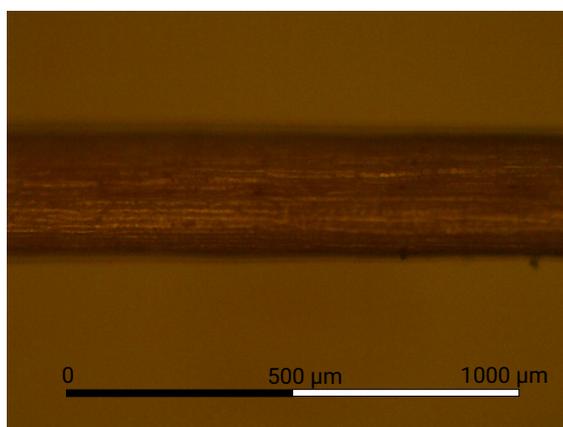
4.2.4 *Massa específica das fibras*

A fibra de coco apresentou massa específica de $1,492 \text{ g/cm}^3$. Este valor é superior aos valores encontrados na literatura, que são de aproximadamente $1,2 \text{ g/cm}^3$ (BLEDZKI; GASSAN, 1999; AGOPYAN; JUNIOR, 2007). Esta variação pode estar relacionada contudo por características intrínsecas às fibras estudadas, como a idade do fruto e a região onde foi cultivada.

4.2.5 *Análise microscópica*

Devido às limitações do microscópio óptico utilizado não foi possível visualizar com clareza a morfologia da seção transversal das fibras de coco estudadas. Quanto à superfície longitudinal, notou-se que as fibras de coco exibiram uma superfície relativamente lisa, conforme Figura 4.5. Os diâmetros das fibras estudadas situaram-se entre 150 e $350 \mu\text{m}$.

Figura 4.5 – Superfície longitudinal da fibra de coco.



Fonte: Autora (2021).

4.2.6 Resistência à tração

A Tabela 4.6 apresenta os resultados dos ensaios de tração simples e seus respectivos desvios padrões e coeficientes de variação (%) para as fibras naturais e para as fibras tratadas com NaOH nos teores de 0,5 e 1,0% nos diferentes tempos de imersão (30 e 60 minutos). A partir dos resultados encontrados definiu-se que o tratamento com NaOH seria feito empregando-se concentração de 1,0% e tempo de imersão na solução de 60 minutos, visto que este tratamento foi o que apresentou menor queda (diminuição de 75,98 MPa para 67,49 MPa) no valor de resistência à tração quando comparado a fibra sem tratamento.

Tabela 4.6 – Resultados médios e respectivos desvios padrão e coeficientes de variação dos ensaios de tração para definição do tratamento com NaOH.

Fibra	Nº de amostras		Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Natural	6	Média	75,98	7,41	14,18
		Desv. Pad.	(8,57)	(4,98)	(5,51)
		Coef. Var.	(11,28)	(67,21)	(38,86)
0,5% NaOH (30 minutos)	6	Média	58,45	6,25	9,82
		Desv. Pad.	(6,96)	(3,57)	(3,90)
		Coef. Var.	(11,91)	(57,12)	(39,71)
0,5% NaOH (60 minutos)	6	Média	66,97	9,00	8,96
		Desv. Pad.	(11,51)	(4,70)	(2,23)
		Coef. Var.	(17,18)	(52,22)	(24,88)
1,0% NaOH (30 minutos)	6	Média	64,98	5,54	12,41
		Desv. Pad.	(11,13)	(1,68)	(4,18)
		Coef. Var.	(17,13)	(30,32)	(33,68)
1,0% NaOH (60 minutos)	6	Média	67,49	6,79	10,34
		Desv. Pad.	(15,51)	(2,59)	(3,54)
		Coef. Var.	(22,98)	(38,14)	(34,24)

Fonte: Autora (2021).

Os valores encontrados para resistência à tração das fibras naturais de coco estão abaixo de alguns valores encontrados na literatura que situam-se entre 100 e 170 MPa, conforme relatado por Toledo Filho et al. (2000), Kulkarni, Satyanarayana e Sukumaran (1981) e Mohanty, Misra e Hinrichsen (2000). No entanto, tanto o módulo de elasticidade

dade quanto os valores de deformação na ruptura para a fibra natural encontram-se em conformidade com os valores da literatura, assim como apresentado na Tabela 2.4. Os valores de deformação na ruptura são elevados quando levada em conta a resistência à tração obtida. Isso pode ser explicado, de acordo com a literatura, devido ao alto teor de lignina presente na estrutura das fibras de coco (BOLAÑOS, 2013).

A Tabela 4.7 apresenta os resultados dos ensaios de tração para as fibras sem tratamento e tratadas. Observou-se que o processo de hornificação melhorou a resistência à tração das fibras, aumentando em aproximadamente 38% a resistência à tração quando comparada à fibra no estado natural. Isso mostra que o tratamento de hornificação pode ser benéfico na durabilidade dos compósitos e no comportamento mecânico. Comportamento semelhante foi observado por Santos (2020). O autor verificou melhora da resposta mecânica na tração direta em fibras vegetais de sisal hornificadas, proporcionando um aumento da resistência à tração em torno de 11% em comparação com fibra in natura. Ferreira (2016) explicou que a melhora de desempenho mecânico após o tratamento pode ser explicada pela mudança de cristalinidade da celulose presente nas fibras vegetais e da possível formação de ligações entre as cadeias de polímeros nas microfibrilas. Este autor observou utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), mudanças na estrutura celular e diminuição da seção transversal de fibras de sisal após o tratamento de hornificação.

Tabela 4.7 – Resultados médios e respectivos desvios padrão e coeficientes de variação dos ensaios de tração.

Fibra	Nº de amostras		Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Natural	6	Média	75,98	7,41	14,18
		Desv. Pad.	(8,57)	(4,98)	(5,51)
		Coef. Var.	(11,28)	(67,21)	(38,86)
NaOH	6	Média	67,49	6,79	10,34
		Desv. Pad.	(15,51)	(2,59)	(3,54)
		Coef. Var.	(22,98)	(38,14)	(34,24)
Hornificada	6	Média	123,08	13,96	9,15
		Desv. Pad.	(27,63)	(4,06)	(1,73)
		Coef. Var.	(22,44)	(29,08)	(18,91)
Hornificada + NaOH	6	Média	89,34	7,84	11,23
		Desv. Pad.	(12,31)	(6,27)	(2,09)
		Coef. Var.	(13,77)	(79,90)	(18,61)

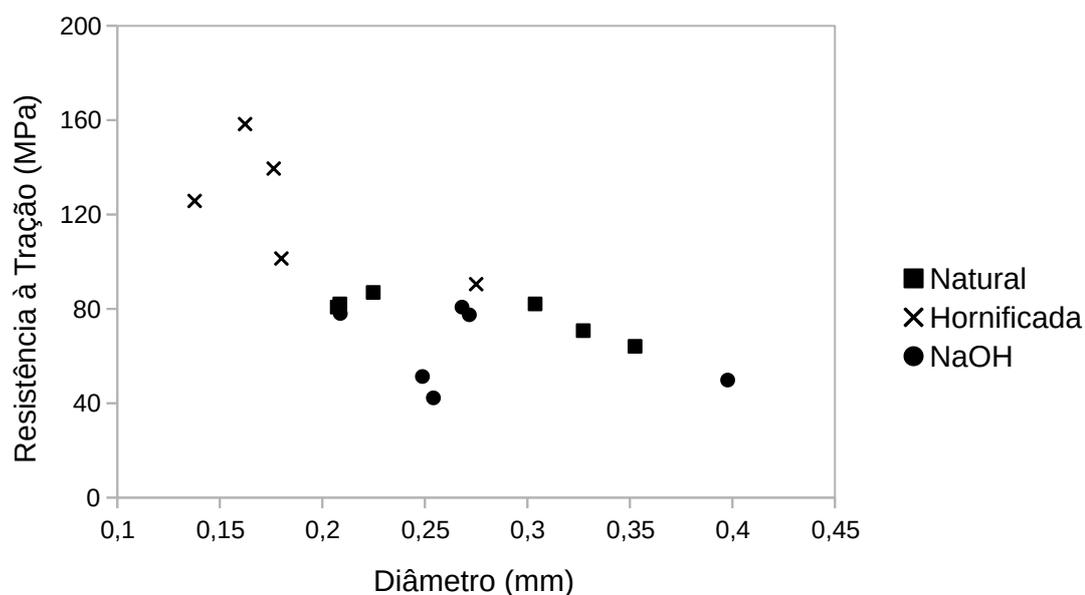
Fonte: Autora (2021).

As dispersões entre os valores de resistência à tração evidenciadas pelos coeficien-

tes de variação sumarizados na Tabela 4.6 e Tabela 4.7 podem ter origem na grande variabilidade da seção transversal do material fibroso. A Figura 4.6 ilustra a relação entre a resistência à tração e os diâmetros das fibras. Observa-se grande variação entre os diâmetros, sendo que a dispersão aumenta para os grupos de fibras tratadas. Tal variação não deveria ocorrer por se tratar de amostras do mesmo material. Entretanto, estas diferenças podem estar associadas aos procedimentos do ensaio de tração direta, sobretudo, pelo possível esmagamento da fibra pelas garras do equipamento ou pelo fato de que, quando a hornificação é aplicada, há uma redução do diâmetro das fibras, embora a sua *seção resistente* permaneça a mesma.

Diversos autores reportam sobre a grande variabilidade nos resultados de resistência à tração de fibras naturais (TOMCZAK, 2010; FIDELIS, 2014; SILVEIRA, 2018). Sobre este assunto, Fidelis (2014) afirma que as discrepâncias existentes entre os valores relatados na literatura para o comportamento mecânico das fibras vegetais estão associados às seções transversais variáveis e irregulares, distância entre as garras do equipamento, a taxa de deformação, forma de fixação das amostras ao equipamento e a precisão da célula de carga.

Figura 4.6 – Variação entre diâmetros das fibras e resistência à tração.



Fonte: Autora (2021).

4.3 Permeabilidade dos corpos de prova

A Tabela 4.8 apresenta os valores médios dos coeficientes de permeabilidade e os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação para o solo puro e para as amostras reforçadas com fibras não tratadas e fibras tratadas. Tanto o solo puro quanto as amostras reforçadas apresentaram coeficiente de permeabilidade da ordem de $5\text{E-}05$ cm/s, o que está em conformidade com os valores típicos de coeficiente de permeabilidade para as areias siltosas compactadas.

Tabela 4.8 – Coeficiente de permeabilidade (cm/s) das amostras.

Corpo de Prova	Tipo de Tratamento				
	Solo Puro	Sem tratamento	Hornificação	NaOH	Hornificação + NaOH
A	5,50E-05	4,91E-05	6,54E-05	1,75E-05	2,72E-05
B	9,43E-05	1,95E-05	6,54E-05	7,83E-05	1,92E-05
C	4,66E-05	5,23E-05	6,80E-05	5,35E-05	2,74E-05
D	5,66E-05	5,01E-05	3,06E-05	1,70E-05	2,91E-05
E	5,26E-05	7,44E-05	3,11E-05	2,93E-05	5,26E-05
F	3,98E-05	3,92E-05	5,73E-05	6,50E-05	4,33E-05
Média	5,75E-05	4,74E-05	5,30E-05	4,34E-05	3,31E-05
Desvio Padrão	1,91E-05	1,79E-05	1,75E-05	2,59E-05	1,23E-05
C.V.	0,3317	0,3782	0,33052	0,5962	0,3723

Fonte: Autora (2022).

Em geral, os compósitos reforçados com fibras costumam apresentar maior permeabilidade que o solo não reforçado, uma vez que o reforço aumenta a porosidade das

amostras criando caminhos preferenciais de percolação. No entanto, notou-se que a inclusão das fibras não alterou de forma acentuada a permeabilidade do solo.

Tal comportamento já era esperado, visto que as caixas de onde foram retiradas as amostras foram compactadas considerando o índice de vazios constante, padrão semelhante ao adotado para as análises de curto prazo realizadas por Reis (2022), o qual também não observou alterações no coeficiente de permeabilidade do solo após a inclusão das fibras ficando na ordem de $5E-05$ cm/s para o solo puro e para as amostras reforçadas com fibras tratadas e não tratadas. Os tratamentos nas fibras e a exposição ao envelhecimento natural, portanto, também não alteraram de forma significativa a permeabilidade do solo.

4.4 Efeitos do envelhecimento na superfície dos compósitos

O monitoramento das caixas contendo o solo puro e os compósitos estudados ao longo do tempo de exposição de 5 meses (setembro de 2021 a fevereiro de 2022) não permitiu a visualização de fissuras em nenhuma das amostras, embora estas tenham sido sujeitas às variações de temperatura, variações de umidade do solo e incidência solar.

Dentre os aspectos levantados para a ausência fissuração, sobretudo nas caixas contendo o solo puro, destaca-se a ocorrência de precipitações constantes durante o período de exposição, já que a formação de fissuras se dá quando o material passa por períodos relativamente longos de estiagem. A Figura 4.7 apresenta as variáveis meteorológicas mensais (precipitação, temperatura e a umidade relativa do ar apresentada em porcentagem acima das barras do gráfico) obtidas para o período. Estas informações foram obtidas do Instituto Nacional de Meteorologia, Estação Ondina, Salvador - BA. Embora seja comum chover com frequência durante o verão na cidade de Salvador-BA, o volume de chuvas para o período analisado foi atípico quando comparado aos anos anteriores e a temperatura média mensal não sofreu grandes variações, situando-se em torno de 26° C.

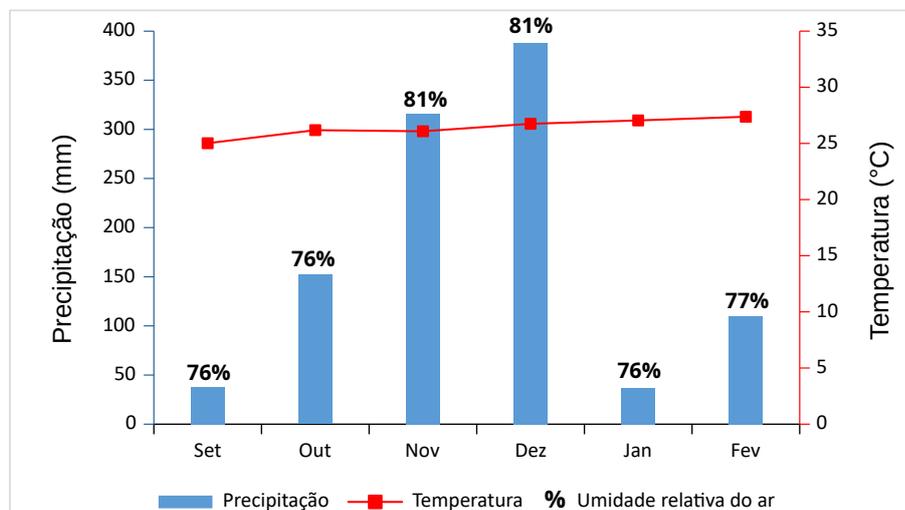
Outro aspecto que pode ter impossibilitado a visualização de fissuras nas amostras relaciona-se à composição mineralógica do solo, dada a sua natureza arenosa (areia = 70%) e baixo índice de plasticidade ($IP = 4\%$). O conteúdo de argila presente no solo e seu índice de plasticidade influenciam diretamente na sua capacidade de variação

volumétrica. À medida que se tem maior teor de argila com alto índice de plasticidade, o solo apresentará maior capacidade de retenção de água, diminuição do peso específico seco máximo e, portanto, maior variação volumétrica.

Damasceno, Carvalho e Machado (2019) observou a formação de fissuras em uma camada de cobertura construída em campo com solo similar. Neste caso, nota-se que a massa de resíduos sobre a qual o solo é assentado também tem grande influência no aparecimento das fissuras. Além disso, destaca-se o efeito escala, já que o solo estava confinado em caixas de tamanho reduzido em comparação com a aplicação em campo.

Apesar do aspecto ressecado do solo superficial, não foi possível observar nenhum padrão de fissuração na superfície das amostras conforme apresentado na Figura 4.8, que mostra a superfície de uma amostra de solo puro e de uma amostra do compósito solo fibra sem tratamento. É importante ressaltar que o mesmo padrão se repetiu para os compósitos contendo fibras com os tratamentos.

Figura 4.7 – Parâmetros meteorológicos entre setembro de 2021 e fevereiro de 2022: precipitação, temperatura média e umidade relativa do ar.



Fonte: Adaptado do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Figura 4.8 – Superfície das amostras ao final do período de exposição. (a) Solo sem reforço. (b) Compósito solo fibra não tratada.



Fonte: Autora (2022).

4.5 Comportamento Mecânico

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios triaxiais e de compressão diametral para o solo sem reforço e para os compósitos solo/fibra sem tratamento e tratadas. Em ambas as situações os resultados obtidos após o envelhecimento natural serão comparados com as análises a curto prazo (tempo zero) a fim de verificar os efeitos do envelhecimento para as diferentes situações. No Apêndice A deste trabalho são apresentados alguns índices físicos das amostras submetidas aos ensaios de compressão triaxial: a densidade seca (ρ_d), índices de vazios antes do ensaio ($e_{inicial}$) e após o ensaio (e_{final}) para as análises a curto e a longo prazo.

4.5.1 Ensaios triaxiais

4.5.1.1 Solo puro: análise a curto prazo vs análise a longo prazo

A Figura 4.9 ilustra o comportamento mecânico do solo sem envelhecimento compactado utilizando um molde bipartido e compactado na caixa de madeira. As amostras apresentaram resultados semelhantes para ambas situações, o que permite inferir que os procedimentos de compactação em diferentes moldes não interferiram de maneira geral no comportamento mecânico das amostras, embora as amostras compactadas nas caixas tenham apresentado dilatância inferior.

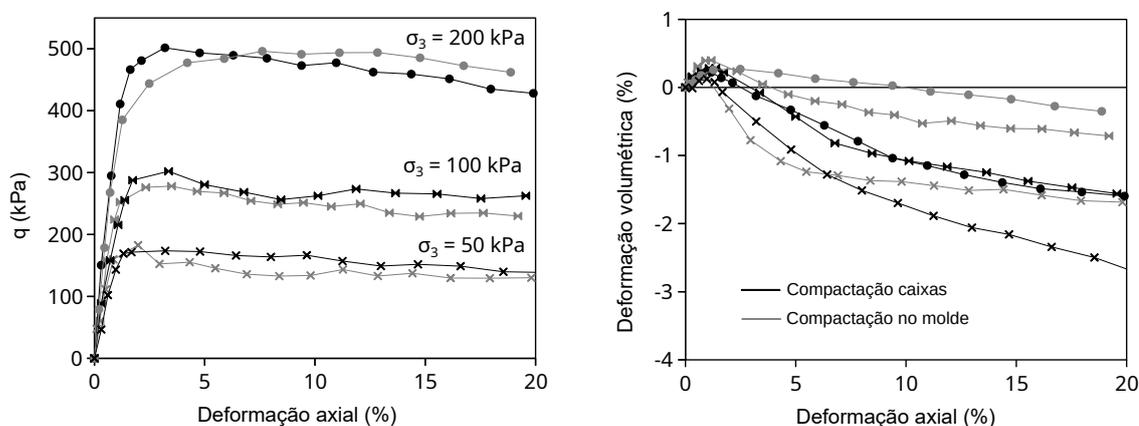
A Tabela 4.9 apresenta os valores dos parâmetros de resistência obtidos para as diferentes compactações. A semelhança entre os resultados validam a comparação entre as análises de curto prazo realizadas por Reis (2022) empregando a compactação no molde e as análises de longo prazo consideradas neste trabalho cujas amostras foram compactadas nas caixas.

Tabela 4.9 – Parâmetros de resistência do solo para os métodos de compactação empregados.

Métodos de Compactação	c' (kPa)	ϕ' (°)
Compactação no molde	20,4	30,9
Compactação nas caixas	20,6	31,4

Fonte: Autora (2022).

Figura 4.9 – Curvas tensão-deformação e variação volumétrica para o solo compactado no molde e nas caixa de madeira.



Fonte: Autora (2022).

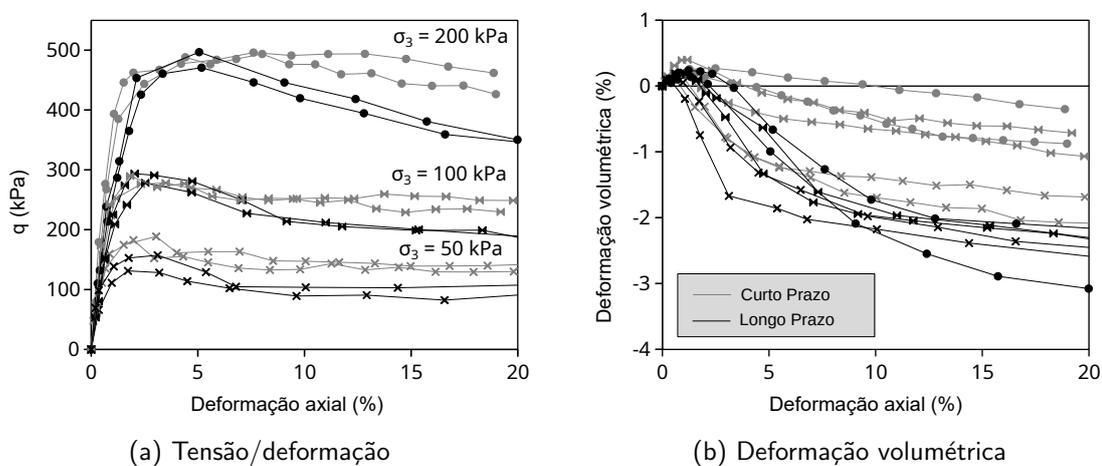
A Figura 4.10 compara a resistência ao cisalhamento das amostras não reforçadas (solo puro) nos dois tempos analisados. Observa-se que, após o período de cinco meses de exposição às intempéries, as amostras apresentaram maior diminuição da resistência pós-pico, além de demonstrarem maior dilatância. Isso já era esperado, uma vez que os ciclos de umedecimento e secagem tendem a aumentar a tensão de pré-adensamento do solo devido à ação da sucção matricial (FREDLUND; RAHARDJO, 1993). No entanto, não houve incremento no pico de tensão, provavelmente devido aos efeitos deletérios das microfissuras formadas no solo durante estes ciclos, contrabalanceando os efeitos do pré-adensamento.

O comportamento volumétrico predominantemente dilatante apresentado pelo solo, experimentando uma leve compressão ao início, seguida do fenômeno de dilatação. A redução inicial do volume ocorre até, aproximadamente, o momento em que o solo atinge sua resistência de pico e, a partir de então, ocorre a dilatação. Este comportamento está associado ao fato das amostras terem se comportado como pré-adensadas, as quais sofreram expansão durante o aumento de tensões, apresentando ao final dos ensaios volume e índice de vazios maiores que os iniciais.

Para a verificação deste comportamento, Reis (2022) realizou ensaios de compressão isotrópica ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). Nestes ensaios, o corpo de prova era consolidado na respectiva tensão confinante e, em seguida, havia um aumento gradativo no confinamento, obedecendo a sequência: 0, 40, 80, 160, 320 e 640 kPa. A linha de compressão isotrópica (NCL) obtida apresentou-se com inclinação inferior a Linha de Estados Críticos (CSL), indicando que as amostras encontram-se no trecho elástico, devido a alta tensão de pré-adensamento proporcionado pela compactação.

A Tabela 4.10 apresenta os valores obtidos para a tensão desviadora máxima e os parâmetros de resistência para o solo antes e após o processo de envelhecimento. Em termos de tensão desviadora máxima, o solo envelhecido apresentou perda na resistência da ordem de 17%, 5% e 4% para as tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente. No que diz respeito aos parâmetros de resistência do solo puro nas condições de curto e longo prazo, observa-se que o envelhecimento natural causou a diminuição do valor de coesão do solo em cerca de 50%. O ângulo de atrito não sofreu alteração significativa, o que mostra que a perda de resistência do solo está creditada ao intercepto

Figura 4.10 – Análises de curto e longo prazos: curvas tensão-deformação e variação volumétrica para o solo não reforçado.



Fonte: Autora (2022).

coesivo do solo.

Os resultados obtidos mostram que, mesmo sem o aparecimento de trincas mensuráveis a olho nu, a exposição da camada compactada de solos às condições intempéricas afeta sim a sua resistência ao cisalhamento. No Apêndice A deste trabalho são apresentados alguns índices físicos das amostras ensaiadas, a saber, a densidade seca (ρ_d) e os índices de vazios antes ($e_{inicial}$) e após os ensaios triaxiais (e_{final}) para as análises a curto e a longo prazo. A análise dos índices físicos das amostras do solo puro após o envelhecimento permitem observar o menor grau de compactação destas quando comparadas às amostras sem envelhecimento.

A Figura 4.11 ilustra a envoltória de resistência obtida para o solo puro nas duas condições analisadas considerando o intervalo de confiança de 90%. Notou-se, conforme esperado, que a envoltória de resistência para a situação de curto prazo situa-se abaixo da envoltória de longo prazo, no entanto, está dentro do intervalo considerado, o que indica que a perda de resistência não foi significativa.

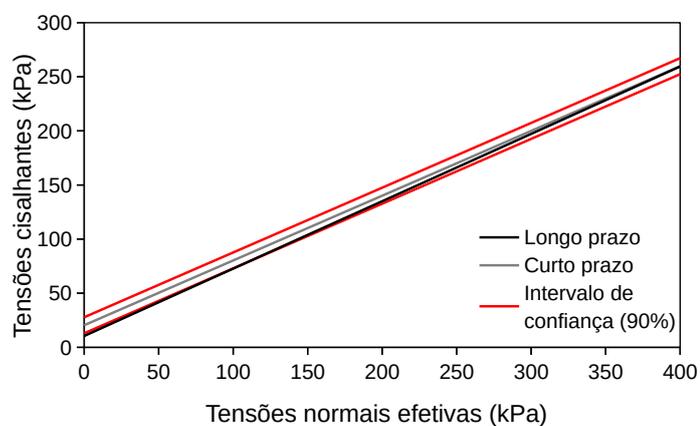
Quanto ao aspecto das amostras de solo puro ao final dos ensaios triaxiais, os corpos de prova apresentaram aspecto bastante característico de solos de ruptura do tipo frágil, mostrando uma superfície de ruptura bem definida, especialmente para as tensões confinantes de 50 e 100 kPa, conforme exposto na Figura 4.12. Já para a tensão confinante de 200 kPa observou-se a ruptura do tipo plástica com embarrigamento na parte superior do corpo de prova ao final da ruptura.

Tabela 4.10 – Tensão desviadora máxima e parâmetros de resistência do solo antes e após envelhecimento.

Amostra	σ_3	Tensão desviadora de ruptura (kPa)	Deformação axial (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Solo antes do envelhecimento	50	173,71	20,00	20,6	31,4
	100	302,13	20,00		
	200	501,68	20,00		
Solo pós envelhecimento	50	144,1	20,00	10,5	31,9
	100	286,10	20,00		
	200	483,85	20,00		

Fonte: Autora (2022).

Figura 4.11 – Envoltórias de resistência para o solo puro.



Fonte: Autora (2022).

Figura 4.12 – Superfície de ruptura formada nos corpos de prova: (a) Corpos de prova submetidos às confinantes de 50 e 100 kPa. (b) Corpos de prova submetidos à confinante de 200 kPa.



(a)

(b)

Fonte: Autora (2021).

4.5.1.2 Compósitos: comparativo entre as análises a curto prazo e a longo prazo

A Figura 4.13 compara as curvas tensão-deformação e o comportamento volumétrico obtido para as amostras ensaiadas logo após a compactação (curto prazo) e para as amostras expostas ao envelhecimento natural (longo prazo). Os resultados obtidos para os valores de tensão desviadora máxima para a análise de curto prazo realizada por Reis (2022) e os obtidos para a situação de longo prazo são sumarizados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Tensão desviadora máxima para o solo puro e para os compósitos (kPa).

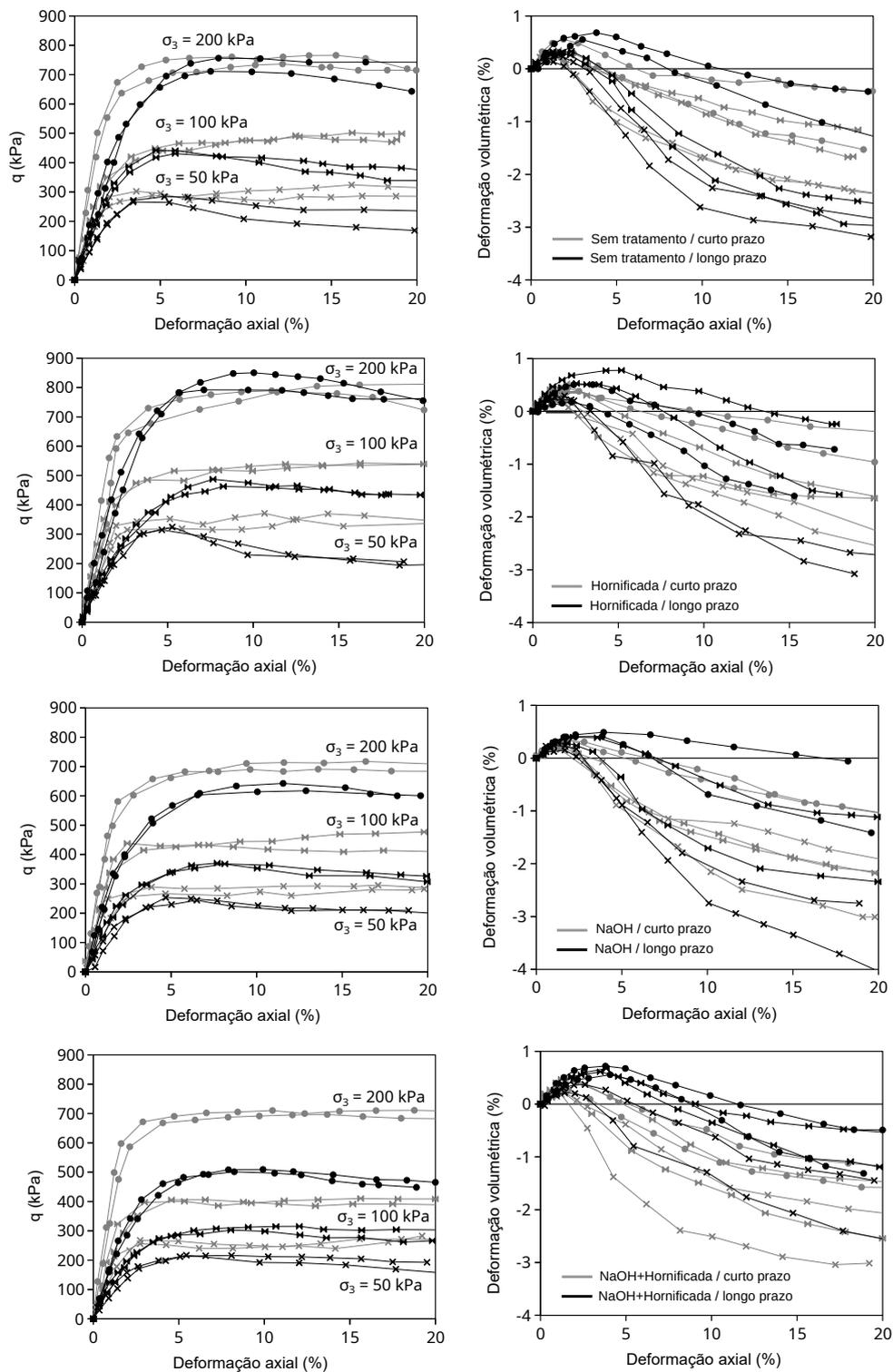
Compósito	Curto Prazo			Longo Prazo		
	$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa	$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa
Sem tratamento	314,15	493,64	751,25	275,24	436,12	726,84
Hornificação	360,84	540,68	800,41	319,65	475,09	821,16
NaOH	289,11	457,44	703,67	248,54	369,28	629,83
Hornificação + NaOH	277,55	408,31	703,90	216,57	309,03	505,34

Fonte: Autora (2022).

Em geral, observa-se que as amostras com fibras sem tratamento e de fibras hornificadas conduziram a picos de resistência semelhantes, mesmo após os cinco meses de exposição às intempéries. Os compósitos de fibras hornificadas demonstraram maior resistência ao cisalhamento do que os de fibras sem tratamento nos dois tempos analisados. No entanto, notou-se que maiores deformações axiais são necessárias para a mobilização das fibras nas amostras envelhecidas. Tal comportamento observado é compatível com a hipótese de ocorrência de microtrincas citada anteriormente, pois causariam danos à aderência na interface solo-fibra, principalmente para menores tensões de confinamento.

Para os compósitos de fibras sem tratamento notou-se diminuição da resistência pós-pico de forma mais acentuada para as confinantes de 50 e 100 kPa, o que pode ser explicado também pela provável ocorrência de degradação destas fibras que não passaram por nenhum tipo de tratamento, tornando-as mais fragilizadas. As amostras envelhecidas demonstraram maior dilatância do que as amostras de curto prazo, exceto para a confinante de 200 kPa. Em termos de tensão desviadora máxima, para a confinante de 50 kPa, os compósitos envelhecidos de fibras sem tratamento apresentaram perda de resistência de cerca de 12% em comparação com a mesma análise realizada a curto prazo. Para as tensões confinantes de 100 e 200 kPa, o decréscimo na tensão desviadora foi de cerca de 12% e 3%, respectivamente.

Figura 4.13 – Análises de curto e longo prazo: curvas tensão-deformação e variação volumétrica para os compósitos.



Fonte: Autora (2022).

Os compósitos envelhecidos de fibras hornificadas também demonstraram menor resistência pós-pico, especialmente para as confinantes de 50 e 100 kPa. Já para a tensão confinante de 200 kPa, a resistência de pico foi superior, apresentando queda na resistência pós-pico. Os compósitos com as fibras envelhecidas apresentaram perda na tensão desviadora máxima cerca de 11% e 12% para as confinantes de 50 e 100 kPa, respectivamente. Para a tensão confinante de 200 kPa, houve um acréscimo na tensão desviadora máxima da ordem de 3% em comparação com os compósitos de curto prazo.

O comportamento observado mostra que o tratamento de hornificação proporcionaram a proteção das fibras contra o processo de degradação e, conseqüentemente, promoveram ganho de resistência para o compósito, o que pode ser explicado pela melhoria da resistência à tração das fibras hornificadas verificada ainda nos ensaios de tração direta mencionados na Subseção 4.2.6. Além do rearranjo da estrutura cristalina das fibras, os ciclos de molhagem e secagem nas fibras causaram a redução da seção transversal das fibras e conseqüente aumento do índice de aspecto (l/d). Conforme relatado por Machado et al. (2022), a redução do diâmetro das fibras parece ter um efeito direto na interação fibras/partículas sólidas, pois, principalmente no caso de solos grossos, a fibra deve ser capaz de curvar-se até certo ponto ao redor da partícula de solo para adquirir melhores condições de ancoragem.

Por outro lado, tanto os compósitos de fibras tratadas com o NaOH quanto os de fibras tratadas com hornificação + NaOH apresentaram diminuição da resistência após os cinco meses de exposição às intempéries para as três tensões confinantes consideradas, sendo a queda na resistência ao cisalhamento mais pronunciada para as amostras contendo o tratamento em conjunto. Este comportamento também está em concordância com os ensaios de tração direta nas fibras, nos quais observou-se que o tratamento com NaOH causaram redução na resistência à tração das fibras analisadas, o que refletiu também no comportamento do compósito à longo prazo. O tratamento superficial com NaOH criou uma espécie de película na superfície das fibras, tornando-as mais frágeis, com menor capacidade de deformação e de aderência ao solo. Os resultados, portanto, evidenciam que a exposição ao ambiente alcalino prejudicam a estrutura das fibras de coco e a redução do diâmetro causada pela hornificação aumentam os danos.

Em termos de tensão desviadora máxima, os compósitos envelhecidos com fibras

tratadas com NaOH apresentaram perda na resistência da ordem de 14%, 19% e 11% com relação aos compósitos analisados a curto prazo, para as tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente. Já os compósitos com as fibras envelhecidas tratadas com hornificação + NaOH evidenciaram perda na tensão desviadora máxima cerca de 22%, 24% e 28% para as tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente, em comparação com os compósitos analisados a curto prazo.

Na Tabela 4.12 são apresentados os parâmetros de resistência para as amostras de curto e longo prazo.

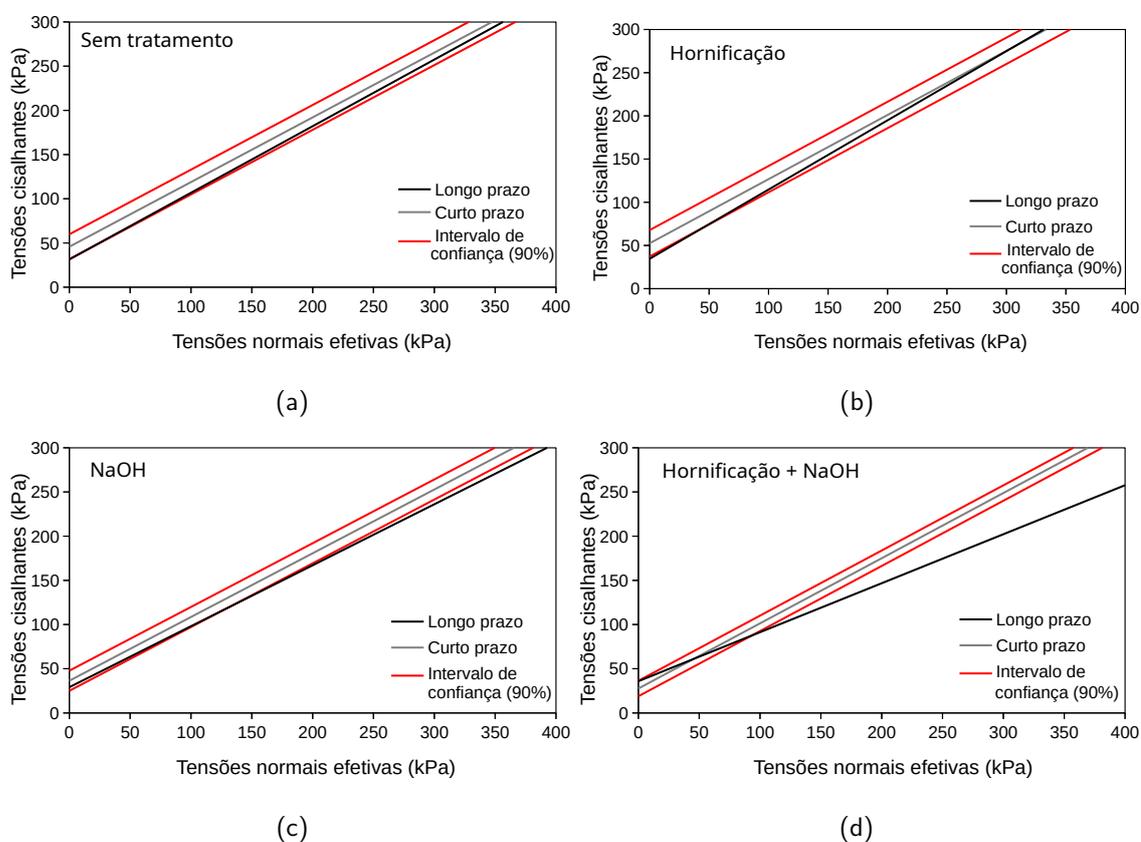
Tabela 4.12 – Parâmetros de resistência dos compósitos.

Tipo de tratamento	Curto Prazo		Longo Prazo	
	c' (kPa)	ϕ'	c' (kPa)	ϕ'
Sem tratamento	46	36	31	37
Hornificação	56	36	35	39
NaOH	36	36	29	35
Hornificação + NaOH	28	36	36	29

Fonte: Autora (2022).

A Figura 4.14 compara as envoltórias de resistência ao cisalhamento das amostras sem envelhecimento com as expostas às intempéries. Para fins de comparação, foi considerado o intervalo de confiança de 90% (desvio padrão de $\pm 1,65$), sendo o ajuste centrado nas amostras de curto prazo. As envoltórias de resistência ao cisalhamento dos compósitos contendo fibras não tratadas, hornificadas e com NaOH situam-se quase que inteiramente dentro do intervalo de confiança considerado, o que permite concluir que os resultados obtidos para estes compósitos não foram significativamente afetados pela exposição às intempéries, visto que as amostras envelhecidas apresentaram comportamento semelhante às amostras sem envelhecimento. Os compósitos solo/fibras hornificadas + NaOH, no entanto, foram os únicos que demonstram uma perda na resistência ao cisalhamento estatisticamente significativa, visto que a envoltória para o longo prazo situa-se completamente fora do intervalo.

Figura 4.14 – Envoltória de resistência para os compósitos ensaiados a curto e longo prazos. (a) Fibras não tratadas. (b) Hornificação. (c) NaOH. (d) Hornificação + NaOH.



Fonte: Autora (2022).

4.5.1.3 Comparativo entre os compósitos envelhecidos e o solo não reforçado

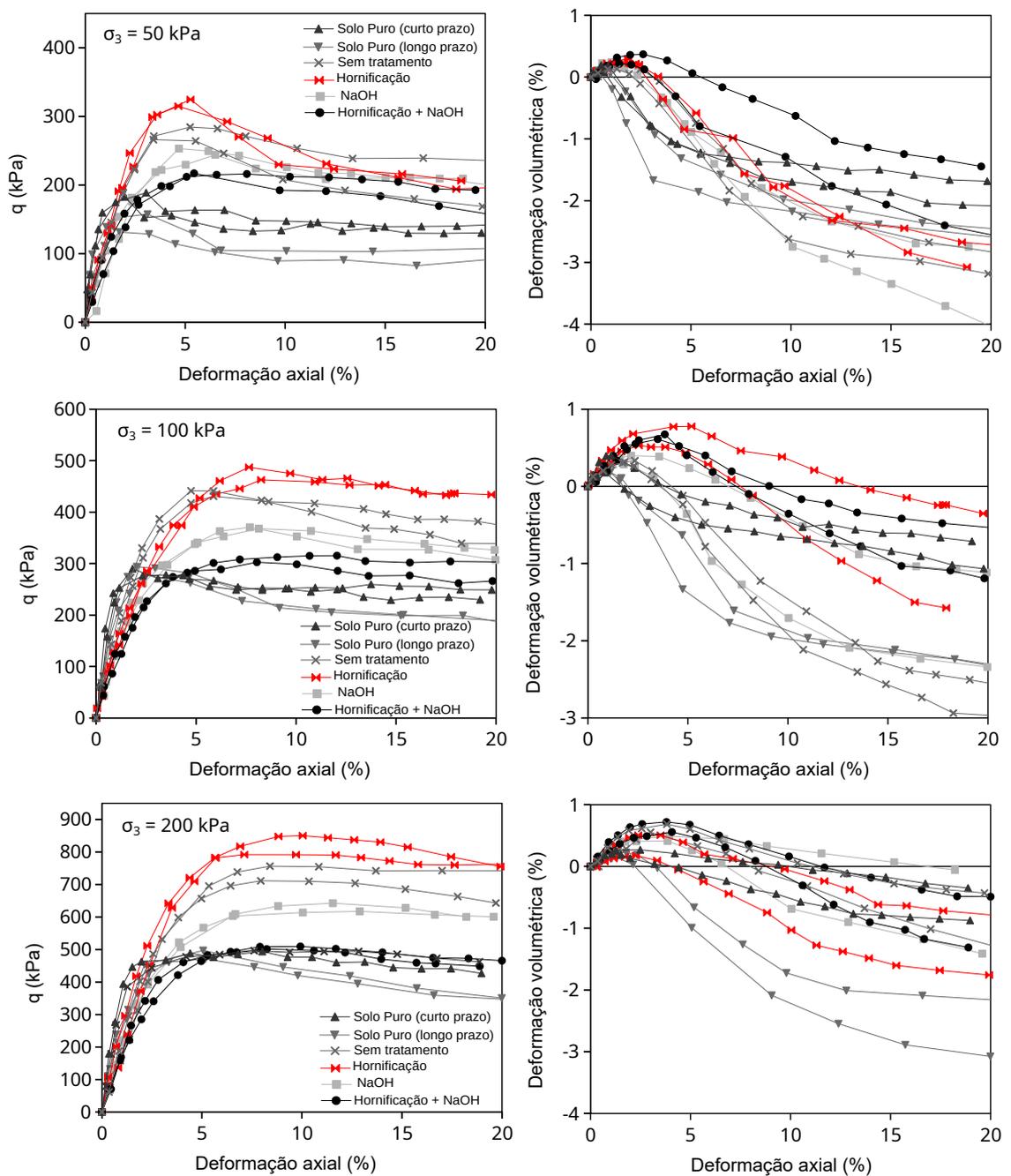
As curvas tensão vs deformação axial e as respectivas variações volumétricas dos compósitos reforçados contendo 1% de fibras tratadas e sem tratamento são apresentados na Figura 4.15. Nesta figura também foram incluídos os dados referentes ao solo puro ensaiado a curto e a longo prazo para fins de comparação.

A análise das curvas tensão-deformação permite constatar que para todos os compósitos ensaiados, o reforço com as fibras de coco promoveu incremento na resistência ao cisalhamento quando comparado ao solo não reforçado também envelhecido. As fibras passam a contribuir com a resistência ao cisalhamento do solo logo ao início do ensaio, quando a deformação axial é em torno de 2,5%. A partir desse valor de deformação, a contribuição das fibras permanece visível até a deformação axial medida de 20%.

No que diz respeito as curvas deformação volumétrica vs deformação axial para os compósitos de fibras sem tratamento e fibras tratadas também notou-se a predominância

do comportamento de dilatância, no qual os corpos de prova sofreram uma leve compressão ao início do ensaio, seguida da dilatação. Em geral, não foi possível observar um comportamento de deformação volumétrica bem definido com a variação da tensão confinante para os compósitos analisados.

Figura 4.15 – Curvas tensão-deformação e variação volumétrica para o solo puro e compósitos envelhecidos.



Fonte: Autora (2022).

Na Tabela 4.13 são apresentados os parâmetros de resistência dos compósitos com fibras submetidas aos diferentes tipos de tratamento e também do solo puro e do compósito solo fibra sem tratamento para efeito comparativo. Além disso, são apresentados os acréscimos obtidos nos valores destes parâmetros (coesão e ângulo de atrito) com relação ao solo puro.

Tabela 4.13 – Parâmetros de resistência do solo e dos compósitos envelhecidos.

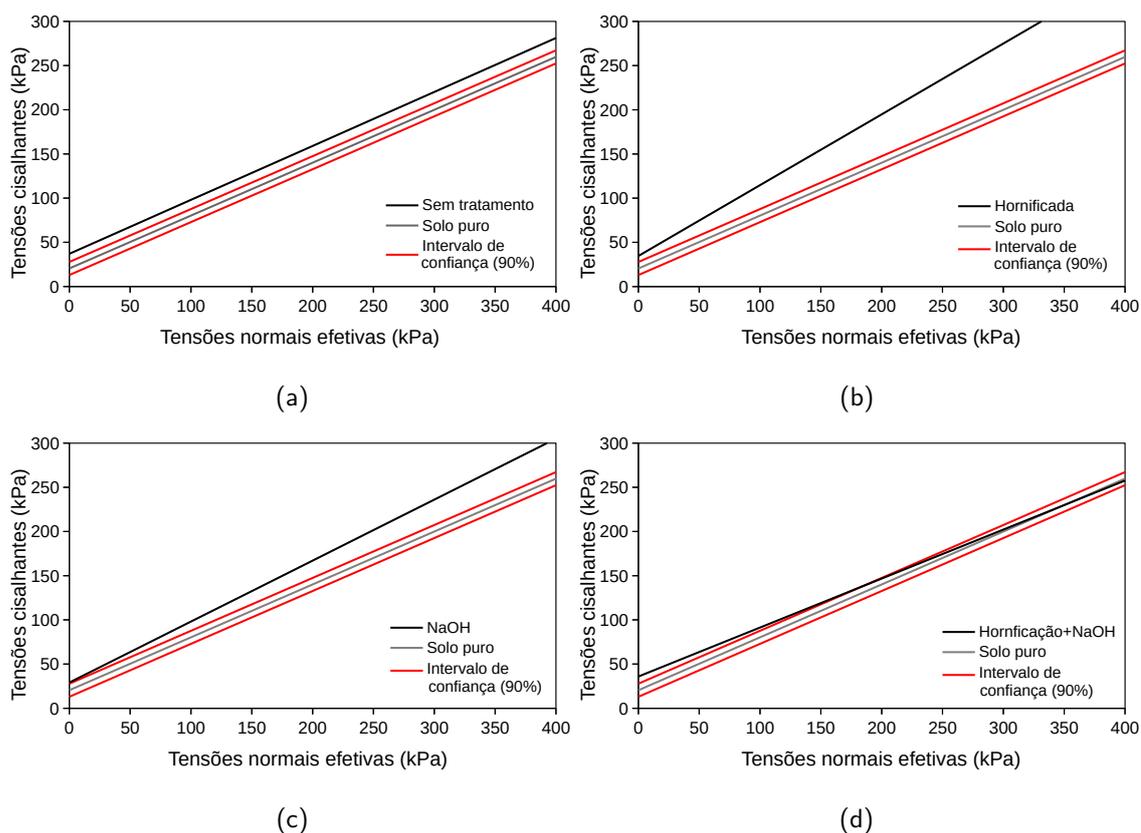
Tratamento	c' (kPa)	ϕ' ($^{\circ}$)	$\Delta c'$ (kPa)	$\Delta \phi'$ ($^{\circ}$)
Solo Puro	11	31	-	-
Sem tratamento	31	37	20	6
Hornificação	35	39	24	8
<i>NaOH</i>	29	35	18	4
Hornificação + <i>NaOH</i>	36	29	25	-2

É possível observar que a maior parcela do ganho de resistência com a inclusão das fibras é creditado ao intercepto coesivo, já que este sofre variações superiores às do ângulo de atrito, exceto para as amostras com fibras tratadas com hornificação + NaOH, cuja perda da resistência com o envelhecimento refletiu-se na diminuição do ângulo de atrito. Apesar dos outros compósitos terem sido afetados pela exposição aos agentes climáticos no decorrer do tempo, para todas as amostras reforçadas com 1% de fibras de coco tratadas e não tratadas, houve incremento no valor de coesão quando comparados ao solo puro, mesmo após o processo de envelhecimento.

As amostras com fibras hornificadas apresentaram coesão e ângulo de atrito superiores às amostras com fibras sem tratamento. Em contrapartida, a coesão dos compósitos com o tratamento de NaOH foi menor, evidenciando mais uma vez que a película criada na superfície das fibras com este tratamento prejudicaram a aderência das mesmas ao solo.

A Figura 4.16 compara as envoltórias de resistência ao cisalhamento obtidas para as amostras reforçadas envelhecidas com as obtidas para o solo puro ensaiado logo após a compactação. Novamente foi considerado o intervalo de confiança de 90% e o ajuste foi centrado nas amostras sem reforço e sem envelhecimento. A análise da Figura 4.16 demonstra que a presença das fibras ainda auxilia o ganho de resistência ao cisalhamento acima do intervalo de confiança mesmo após o envelhecimento, exceto para as amostras reforçadas com fibras com o tratamento de hornificação + NaOH. Mais uma vez, o tratamento de hornificação, seguido das fibras sem tratamento apresentaram os melhores resultados.

Figura 4.16 – Envoltória de resistência para os compósitos envelhecidos com relação ao solo sem reforço sem envelhecimento. (a) Fibras não tratadas. (b) Hornificação. (c) NaOH. (d) Hornificação + NaOH.



Fonte: Autora (2022).

4.5.1.4 Influência da tensão confinante na tensão desviadora de ruptura dos compósitos envelhecidos

Na Tabela 4.14 são sumarizados os valores de tensão desviadora máxima para o solo puro e para os compósitos envelhecidos com fibras não tratadas e tratadas, bem como os valores de ganho relativo.

Tabela 4.14 – Valores de tensão desviadora máxima para o solo puro e para os compósitos.

Compósito	Tensão desviadora máxima (kPa)			Acréscimo de resistência solo puro (%)		
	$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa	$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa
Solo puro	144,41	286,10	483,85	-	-	-
Sem tratamento	275,24	436,12	726,84	90,60	52,44	50,22
Hornificação	319,65	475,09	821,16	121,35	66,05	69,71
NaOH	248,54	369,28	629,83	72,11	29,07	30,17
Hornificação + NaOH	216,57	309,03	505,34	49,97	8,02	4,44

Fonte: Autora (2021).

A análise da Figura 4.15 e da Tabela 4.14 evidencia que os compósitos contendo as fibras tratadas com a hornificação apresentaram os maiores valores de resistência, sendo seguidos pelos valores obtidos pelos compósitos de fibras não tratadas. Em termos de tensão desviadora máxima, para a confinante de 50 kPa, os compósitos de fibras hornificadas apresentaram ganho de resistência de cerca de 14% superior ao compósito de fibras não tratadas. Para as tensões confinantes de 100 e 200 kPa, o acréscimo na tensão desviadora foi de cerca de 8% e 11%, respectivamente.

Por outro lado, os compósitos contendo as fibras tratadas com NaOH foram afetados pelo envelhecimento natural apresentando resistência inferior aos compósitos de fibras sem tratamento. Os compósitos com fibras não tratadas apresentaram tensão desviadora máxima cerca de 10%, 18% e 15% superiores aos compósitos com fibras tratadas com NaOH para as tensões confinantes de ensaio de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente.

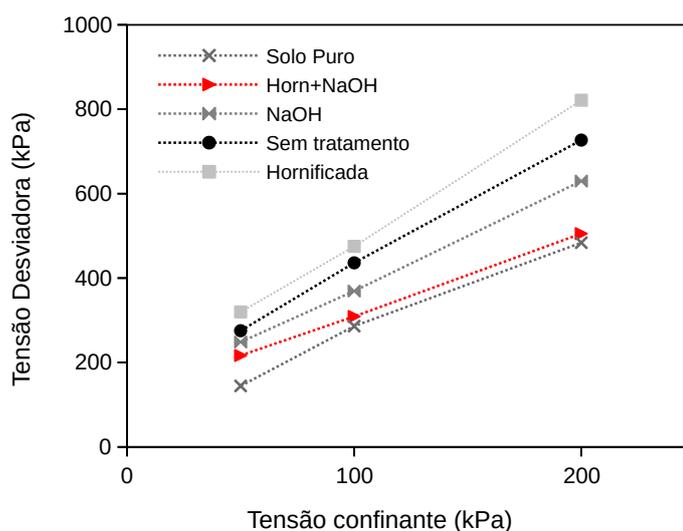
Os compósitos contendo as fibras submetidas aos dois tratamentos em conjunto (hornificação + NaOH) foi o que apresentou menor resistência mecânica em termos de tensão desviadora máxima após o envelhecimento natural, quando comparado aos compósitos de fibras sem tratamento. Estes últimos apresentaram tensão desviadora na ruptura cerca de 27 %, 41% e 48% maior que os compósitos contendo fibras submetidas ao tratamento acoplado para as tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa,

respectivamente.

A Figura 4.17 foi elaborada para melhor visualização do efeito da tensão confinante no incremento da tensão desviadora de máxima. Nela estão relacionadas as tensões confinantes de ensaio com os valores de tensão desviadora máxima obtidos para o solo puro e para os compósitos contendo o teor de 1% de fibras sem tratamento e fibras tratadas.

O aumento da tensão confinante propicia uma maior densificação das amostras, melhorando o rearranjo das partículas do solo e o atrito entre os grãos e as fibras, o que resulta no aumento da tensão desviadora máxima. Em geral, os compósitos apresentaram um crescimento praticamente linear da tensão desviadora máxima com o aumento da tensão confinante.

Figura 4.17 – Influência da tensão confinante nos valores de tensão desviadora máxima



Fonte: Autora (2021).

4.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

A Tabela A.2 sintetiza alguns índices físicos dos corpos de prova ensaiados a curto e a longo prazo: a densidade seca (ρ_d), o índice de vazios inicial ($e_{inicial}$) e o índice vazios ao final dos ensaios (e_{final}). As curvas típicas de tensão de tração versus deslocamento para os corpos de prova submetidos aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e ensaiados a curto e a longo prazos são ilustradas na Figura 4.18. Na Tabela 4.16 são apresentados o resultados dos ensaios de compressão diametral realizados

a curto e longo prazo para o solo puro e para os compósitos.

Tabela 4.15 – Índices físicos dos ensaios de compressão diametral.

	Compósito	ρ_d (g/cm ³)	$\epsilon_{inicial}$	ϵ_{final}
Curto prazo	Solo puro	1,95	0,372	0,373
		1,93	0,387	0,387
	Sem tratamento	1,92	0,380	0,380
		1,93	0,379	0,380
	Hornificação	1,91	0,392	0,393
		1,92	0,383	0,384
	NaOH	1,93	0,376	0,377
		1,93	0,375	0,376
	Hornificação + NaOH	1,93	0,374	0,375
		1,94	0,369	0,369
Longo prazo	Solo puro	1,96	0,363	0,363
		1,96	0,368	0,368
	Sem tratamento	1,95	0,358	0,359
		1,95	0,362	0,363
	Hornificação	1,94	0,365	0,366
		1,93	0,375	0,376
	NaOH	1,94	0,370	0,375
		1,93	0,373	0,374
	Hornificação + NaOH	1,95	0,362	0,373
		1,94	0,369	0,370

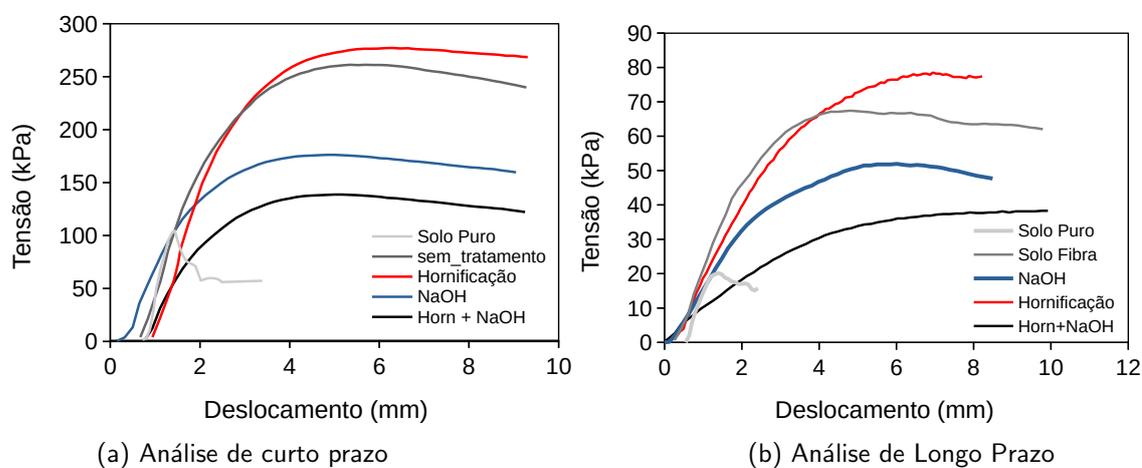
Fonte: Autora (2022).

Notou-se que, conforme esperado, o reforço com fibras proporcionou um incremento significativo na resistência à tração para todos os tipos de fibra analisados. Também para a resistência à tração, o acréscimo foi mais significativo para os compósitos de fibras hornificadas seguidos pelos compósitos de fibras sem tratamento. A resistência à tração dos compósitos de fibras hornificadas foram superiores ao das amostras reforçadas com fibras não tratadas nos dois tempos analisados, evidenciando ganhos de 14,5 % e 44,4 % para as análises de curto prazo e longo prazos, respectivamente.

A análise dos resultados dispostos na Tabela 4.16 demonstram que a exposição das amostras ao envelhecimento natural afetou de forma significativa a resistência à tração dos compósitos, visto que para todos os casos a perda de resistência à tração após o envelhecimento foi superior a 60%.

A Figura 4.19 relaciona os valores do intercepto coesivo obtido nos ensaios de compressão diametral com os dos ensaios triaxiais para os dois tempos analisados. Observa-se grande dispersão entre os valores encontrados, principalmente para a análise de longo

Figura 4.18 – Resistência à tração por compressão diametral: curvas típicas de tensão vs deslocamento.



Fonte: Autora (2021).

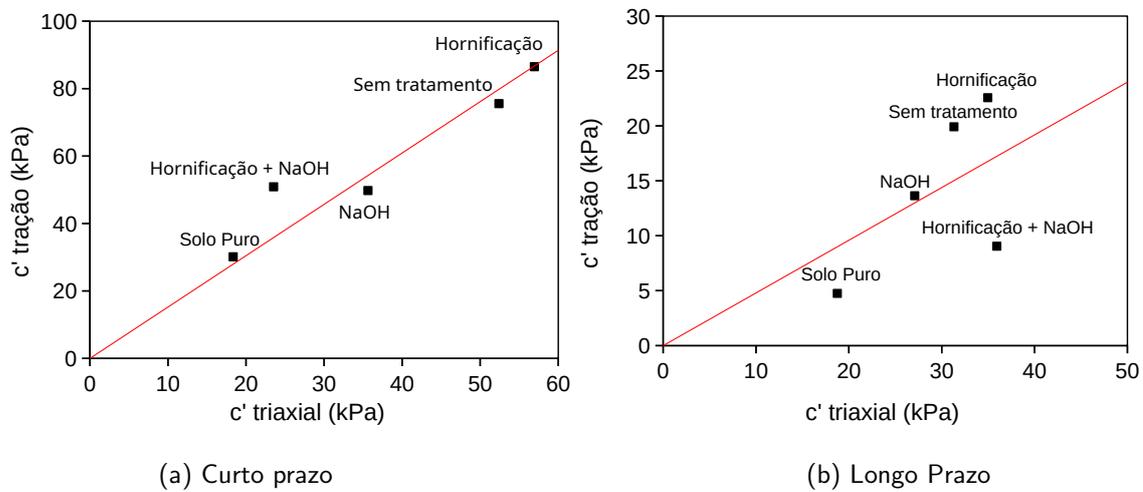
Tabela 4.16 – Resistência à tração.

Compósito	Curto Prazo	Longo Prazo	Perda da resistência à tração com o envelhecimento (%)
	Resistência à tração (kPa)	Resistência à tração (kPa)	
Solo puro	18,74	7,07	62,29
Sem tratamento	58,81	14,92	74,63
Hornificação	67,39	21,54	68,04
NaOH	50,38	13,85	72,51
Hornificação + NaOH	44,05	10,47	76,23

Fonte: Autora (2021).

prazo, sendo que para os ensaios triaxiais a coesão é superior para todos os compósitos analisados. A justificativa para tal comportamento talvez resida no fato de que ocorre uma perda na capacidade de ancoramento para baixas tensões de compressão após o envelhecimento, já que os resultados obtidos nos ensaios de compressão triaxial, que mostraram que as perdas na resistência com o envelhecimento não foram significativas. Além disso, a correção de umidade dos compósitos ensaiados a longo prazo podem não ter sido eficaz, causando heterogeneidade nos corpos de prova e, conseqüentemente, as análises a longo prazo foram prejudicadas.

Figura 4.19 – Coesão dos ensaios de tração versus coesão dos ensaios triaxiais.



Fonte: Autora (2022).

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o comportamento mecânico de um solo areno-siltoso reforçado com fibras de coco tratadas e não tratadas, distribuídas aleatoriamente, submetido ao envelhecimento natural por cinco meses.

De maneira geral, o programa experimental consistiu em submeter as fibras a diferentes tratamentos superficiais e a aos ensaios de tração direta, além da realização de ensaios triaxiais convencionais e de resistência à tração por compressão diametral em amostras do solo sem reforço e dos compósitos com fibras tratadas e não tratadas, expostos às intempéries. Foi realizado um comparativo entre o comportamento mecânico obtido nesta pesquisa com o comportamento de amostras sem envelhecimento.

Com base nos resultados apresentados e analisados no capítulo anterior, o desenvolvimento desta pesquisa permitiu delinear as conclusões a seguir:

Os três tratamentos realizados nas fibras de coco, hornificação, NaOH e hornificação + NaOH, alteraram algumas das suas propriedades importantes para a aplicabilidade deste estudo, como a resistência à tração e a capacidade de absorção de água. O tratamento de hornificação foi o que apresentou maior redução na capacidade de absorção de água pelas fibras (aproximadamente 18%). Por outro lado, os tratamentos com NaOH e hornificação + NaOH não alteraram o ganho de massa pelas fibras de forma significativa (a redução no ganho de massa foi de 147% para 145% e 131%, respectivamente). No que diz respeito à resistência à tração, observou-se que a hornificação aumentou em mais de 60% esta propriedade, enquanto que o tratamento com NaOH reduziu em cerca de 10% em comparação com as fibras não tratadas. Já a hornificação + NaOH elevou levemente a resistência à tração das fibras em cerca 15%.

A exposição do solo sem reforço aos agentes climáticos afetou a resistência ao cisalhamento deste, já que o valor de coesão do solo diminuiu aproximadamente 50% em comparação com o solo sem envelhecimento. No entanto, para o intervalo de confiança de 90%, notou-se estatisticamente que a perda de resistência não foi significativa.

Embora não tenha sido possível a visualização de padrões intensos de fissuras na superfície do solo e dos compósitos a olho nu após a exposição aos agentes climáticos

e ao tempo, a necessidade de maiores deformações axiais para a mobilização do reforço evidenciaram a provável ocorrência de microfissuras, as quais prejudicaram a aderência entre as partículas do solo e entre o solo e as fibras.

A comparação do desempenho de compósitos de fibras com o mesmo tratamento superficial, com e sem exposição às intempéries evidenciou que as amostras com fibras hornificadas e com fibras sem tratamento conduziram a picos de resistência próximos, mesmo após os cinco meses de exposição. O tratamento estatístico permitiu concluir que apenas as amostras com fibras duplamente tratadas (hornificação + NaOH) apresentaram resultados estatisticamente diferentes para o nível de confiança adotado (90%), o que significa que a exposição não foi capaz de afetar visivelmente o reforço das fibras de coco para o tempo estudado.

O tratamento de hornificação, além de reduzir a capacidade de absorção de água, diminuiu o diâmetro das fibras, aumentando seu índice de aspecto e a resistência à tração. Inferiu-se que a redução do diâmetro das fibras melhorou a interação entre solo/fibra, já que fibras com diâmetros menores conseguem curvar-se ao redor das partículas de solo. Consequentemente, os compósitos solo/fibra hornificada apresentaram aumento na resistência ao cisalhamento quando comparados aos compósitos com os outros tratamentos e aos compósitos de fibras não tratadas nos dois tempos analisados.

Os demais tratamentos empregados (NaOH e hornificação + NaOH) tenderam a reduzir a resistência ao cisalhamento em comparação com as fibras sem tratamento. Estes resultados conduziram à hipótese de que a exposição a um ambiente alcalino prejudicou de alguma forma a estrutura das fibras de coco e a redução do diâmetro causada pela hornificação aumentaram estes danos, principalmente a longo prazo.

Na comparação entre o comportamento mecânico de compósitos envelhecidos com solo natural sem envelhecimento notou-se que as fibras hornificadas e fibras sem tratamento apresentaram novamente o melhor desempenho, já que para ambos os casos o incremento na resistência com a inclusão das fibras, mesmo após os cinco meses de exposição ainda é considerável. As amostras com fibras duplamente tratadas (hornificação + NaOH), no entanto, perderam quase todos os benefícios do reforço nos cinco meses de exposição às condições atmosféricas, apresentando comportamento semelhante ao solo sem reforço.

Quanto ao comportamento de resistência à tração, observou-se novamente a melhor resposta dos compósitos com fibras hornificadas, seguidos pelas amostras com fibras sem tratamento. No entanto, uma provável perda da capacidade de ancoragem para baixas tensões de compressão fez com que os resultados evidenciassem uma perda elevada da resistência à tração após o envelhecimento.

A ausência de padrões intensos de fissuras na superfície do solo e dos compósitos aliada a discreta redução da resistência ao cisalhamento dos compósitos ao longo do tempo, incentivam o emprego do solo Barreiras reforçado com as fibras de coco utilizadas neste estudo em coberturas temporárias e até mesmo finais de aterros sanitários, uma vez que se espera que as camadas de cobertura de solo sejam capazes de reduzir as emissões de gases em campo.

O tratamento de hornificação nas fibras naturais é promissor para tal aplicação dados os benefícios observados e a relativa simplicidade de execução deste tipo de tratamento. A realização da hornificação em larga escala dependeria apenas da utilização de tanques para a imersão das fibras e estufas para secagem.

No que diz respeito a sugestões para a realização de trabalhos futuros para o prosseguimento do estudo sobre o reforço do solo com fibras naturais, é possível destacar: o estudo de outros tipos de tratamentos superficiais a serem aplicados nas fibras; realizar ensaios de tração direta nas fibras após o envelhecimento; verificar os efeitos do envelhecimento natural em um tempo maior de exposição às intempéries; avaliar a influência do envelhecimento natural das fibras vegetais em diferentes tipos de solos; desenvolver um modelo numérico de previsão do comportamento mecânico dos compósitos solo-fibra de coco após envelhecimento.

6 REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6459. SOLOS - Determinação do Limite de Liquidez. In: . Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. 37
- ABNT NBR 6508. SOLOS - Massa específica real dos grãos. In: . Rio de Janeiro: [s.n.], 2017. 37
- ABNT NBR 7180. SOLOS - Determinação do Limite de Plasticidade. In: . Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. 37
- ABNT NBR 7181. SOLOS - Análise Granulométrica. In: . Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. 37
- ABNT NBR 7182. SOLO - Ensaio de Compactação. In: *Método de ensaio*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. p. 1–10. 37
- ABNT NBR 7222. Argamassa e Concreto - Determinação da Resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. In: . Rio de Janeiro: [s.n.], 2011. 54
- AGOPYAN, V.; JUNIOR, H. S. *Fibras vegetais como material de construção*. São Paulo: IBRACON, 2007. 20, 44, 63
- AGUILAR, J. R. T. *Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Reforçado com Fibras de Coco*. 114 p. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2015. 2, 8, 11, 12, 14, 21, 22, 29
- BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. [S.l.]: Taylor y Francis, 1990. 18
- BLEDZKI, A.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress Polymer Science*, v. 24, p. 221–274, 1999. 18, 27, 63
- BOLAÑOS, E. R. Z. *Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Reforçado com Fibras de Coco*. *Dissertação de mestrado*, 2013. 5, 8, 12, 19, 21, 22, 65
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2007. 5
- CARDOSO, P. H. M. *Efeito do Tratamento Alcalino/Mecânico de Fibras de Curauá nas Propriedades de Laminados Compósitos de Matriz Epóxi*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. 28
- CARRIJO, O. A.; LIZ, R. S. D.; MAKISHIMA, N. Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola. *Horticultura Brasileira*, v. 20, n. 4, p. 533–535, 2002. ISSN 0102-0536. 3, 19

- CARVALHO, R.; FANGUEIRO, R.; NEVES, J. Durabilidade de Fibras Naturais para Geotecnia. *Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis*, v. 2, p. 237–245, 2014. 24, 31, 32
- CASAGRANDE, M. D. T. *Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações*. 219 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 2, 7, 10, 11, 12
- CASTILHO, T. W. L. *Resistência ao cisalhamento de solos com fibras de politereftalato de etileno reciclado*. Tese (Dissertação de mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2017. 6
- CAVALCANTI, S. S. *Hidrologia subterrânea na área do aterro sanitário de Salvador usando métodos geofísicos elétricos*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, 1999. 35
- CERQUEIRA, R. d. C. V. *Avaliação do Fluxo Bidimensional de óleo diesel em solo não saturado da formação barreiras*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2016. 58
- CLARAMUNT, J.; ARDANUY, M.; GARCÍA-HORTAL, J. A. Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. *Carbohydrate Polymers*, Elsevier Ltd, v. 79, n. 1, p. 200–205, 2010. ISSN 01448617. 26, 63
- COELHO, E. F. F. *Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2008. 10
- CONSOLI, N. et al. Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG*, v. 128, 2002. 11
- COSTA, J. E. G. Estudo da degradação de geotêxteis em fibra natural. *Dissertação de mestrado - Escola de Engenharia da Universidade do Minho*, p. 131, 2013. 5, 23, 25, 30
- COSTA, M. D. *Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos*. 143 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2015. 6
- DAM, J.; OEVER, M. Van den; KEIJERS, E. Production process for high density high performance binderless boards from whole coconut husk. *Industrial Crops and Products*, v. 20, p. 97–101, 07 2004. 16
- DAMASCENO, L. A. G. Emissão fugitiva de metano através do sistema de cobertura de um aterro sanitário considerando a ocorrência de zonas com fissuramento. *Dissertação de mestrado - Escola Politécnica da Universidade Federal da Baha*, v. 1, n. 1, p. 1–159, 2018. ISSN 08906955. 6
- DAMASCENO, L. A. G.; CARVALHO, M. d. F.; MACHADO, S. L. Methane fugitive emissions through the cover system of a msw landfill cell. *Journal of Environmental Engineering and Science*, v. 14, p. 1–11, 2019. 2, 6, 69

- DIAMBRA, A. et al. Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. *Geotextiles and Geomembranes*, Elsevier Ltd, v. 28, n. 3, p. 238–250, 2010. ISSN 02661144. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geotextmem.2009.09.010>>. 9, 11
- EMBRAPA. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 2^a ed.. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1997. v. 26. 212 p. ISSN 0100-350X. ISBN 8585864036. 38
- FERREIRA, S. R. *Effect of surface treatments on the structure mechanical durability and bond behavior of vegetable fibers for cementitious composites*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016. 2, 65
- FERREIRA, S. R. et al. Effect of sisal fiber hornification on the adhesion with portland cement matrices. *Revista Materia*, v. 17, n. 2, p. 1024–1034, 2012. ISSN 1517-7076. 26, 45
- FESTUGATO, L. *Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices de aspecto*. 145 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. 11
- FEUERHARMEL, M. R. *Comportamento de Solos Reforçados com Fibras de Polipropileno*. 152 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 7
- FIDELIS, M. E. A. *Desenvolvimeto e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta*. 290 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. 2, 25, 26, 27, 66
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. [S.l.]: New York: John Wiley and Sons, INC., 1993. 72
- GHAVAMI, K.; FILHO, R. D. T.; BARBOSA, N. P. Cement & Concrete Composites Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites*, v. 21, p. 39–48, 1999. 20, 24, 29
- 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 (Basel, Switzerland)*, v. 11, 2018. 8, 9
- GRAM, H.-E. *Durability of natural fibres in concrete*. Stockolm: Institute of Technology, Stockholm, 1983. 255 p. 28
- GRAY, D. H.; OHASHI, H. Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand. *J. Geotech. Eng.*, v. 109, p. 335–353, 1983. 8, 10, 11
- HALIP, J. A. et al. Effect of treatment on water absorption behavior of natural fiber-reinforced polymer composites. Woodhead Publishing, p. 141–156, 2019. 6
- HANNANT, L. *Polymers and polymers composities*. [S.l.]: J.M. Illston E and FN Spon, 1994. 6, 13, 14

HEAD, K. H. *Manual of soil laboratory testing, Vol 2, Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*. [S.l.]: John Wiley and SonS, INC., 1994. 53, 54

JAIRAJ, C.; KUMAR, M. T. P.; RAGHUNANDAN, M. Compaction characteristics and strength of bc soil reinforced with untreated and treated coir fibers. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 3, 2018. 2, 29

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

JUNIOR, O. F. S.; COUTINHO, R. Q.; SEVERO, R. N. F. Propriedades geotécnicas dos sedimentos da formação barreiras no litoral do Rio Grande do Norte - Brasil. *Geotecnia*, p. 87–108, 2015. 35

KABIR, 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. *Natural Materials in Composites Engineering*. 15, 27, 42

KULKARNI, A.; SATYANARAYANA, K.; SUKUMARAN, K. Mechanical behaviour of coir fibres under tensile load. *J Mater Sci*, v. 16, p. 905–914, 1981. 17, 20, 64

LEOCÁDIO, G. A. S. *Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2005. 2, 29

MACHADO, S. L. et al. Development of an empirical model to capture fiber reinforcement effect on shear strength of soils. *Arabian Journal of Science and Engineering*, v. 42, 2022. 77

MAHER, M. H.; HO, Y. C. Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads. *Geotechnical Testing Journal*, v. 16, p. 330–338, 1993. 10, 11, 12

MARTINS, A. P. d. S. *Desenvolvimento, Caracterização Mecânica e Durabilidade de Compósitos Solo-Cimento Autoadensáveis Reforçados com Fibras de Sisal*. 1–267 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. 23

MCGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; AL-HASANI, M. M. Effect of inclusion properties on the behaviour of sand. *Géotechnique*, v. 28, p. 327–346, 1978. 7, 8, 9, 10

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular Materials and Engineering*, v. 276-277, p. 1–24, 2000. ISSN 14387492. 20, 64

MUKKULATH, G.; THAMPI, S. G. Biodegradation of Coir Geotextiles Attached Media in Aerobic Biological Wastewater Treatment. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, v. 3, n. 11, 2012. 23

MWAIKAMBO, L.; ANSELL, M. Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials. i. hemp fibres. *Journal of Materials Science*, v. 41, p. 2483–2496, 2006. 18

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. São Paulo: Edgard Blucher, 2016. 2

Oliveira Júnior, A. I. *Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco*. 112 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2018. 12, 21, 22, 60

Oliveira Júnior, A. I. et al. Geotechnical Behavior and Soil-Fiber Interaction of Clayey Soil Mixed with Randomly Dispersed Coconut Fibers. *Soils and Rocks*, v. 42, n. 2, p. 127–138, 2019. ISSN 19809743. 8

PARAMASIVAM, G.; GUPTA, N. C. Coconut fibre reinforced corrugated slabs. *International Journal of Cement Composite Lightweight Concrete*, v. 6, n. 1, p. 19–27, 1984. 20

PASSOS, P. R. d. A. *Destinação sustentável de cascas de coco (Cocos nucifera) verde: obtenção de telhas e chapas de partículas*. 166 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. 16, 21

PINTO, C. M. T. *Estudo do comportamento mecânico de uma areia aluvionar reforçada com fibras*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, 2021. 11, 12

RAMESH, H. N.; KRISHNA, K. V. M.; MAMATHA, H. V. Effect of lime-coir fiber on geotechnical properties of black cotton soil. *Indian Geotechnical Conference*, 2010. 20, 29

REIS, A. F. d. S. M. *Análise do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras de coco*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, 2022. vii, viii, 4, 33, 46, 52, 54, 68, 71, 72, 75, 97

SAHA, P. et al. Durability of transesterified jute geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 35, p. 69–75, 2012. 27, 42

SANTOS, D. O. J. *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. 65

SANTOS, J. J. d. N. *Avaliação geotécnica de misturas de solo e composto orgânico para uso como biocoberturas em aterros sanitários*. 89 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2019. 6

SILVA, A. C. e. Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose. *Dissertação de mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, p. 1–115, 2002. 19, 23, 29, 30

SILVEIRA, M. V. *Análise do Comportamento Mecânico e da Durabilidade em Compósitos de Areia Reforçada com Fibras Naturais de Curauá e Sisal*. 148 p. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018. 1, 2, 8, 10, 12, 24, 25, 29, 66

- SOUSA, C. d. S. Caracterização física, química e mineralógica dos solos de encostas sob diferentes sistemas de uso. *Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba*, v. 1, n. 1, p. 1–83, 2015. 37
- SOUSA, R. P. d. *Estudo dos fluxos de óleo diesel e água em solos não saturados*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2012. 58
- TAYLOR, G. D. *Materials in construction*. [S.l.]: Longman Scientific and Technical, 1994. 5, 11, 13, 14
- TEODORO, J. M. *Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, 1999. 6, 7, 11
- Toledo Filho, R. D. et al. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement Mortar Composites*, v. 22, p. 127–143, 2000. 20, 23, 30, 64
- TOMCZAK, F. *Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil*. 135 p. Tese (Tese de Doutorado) — Univeridade Federal do Paraná, 2010. 15, 16, 17, 20, 21, 66
- VENDRUSCOLO, M. A. *Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais*. 248 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 11

Apêndice A - APÊNDICES

Tabela A.1 – Índices físicos das análises a curto prazo.

Compósito	Pf (%)	Tensão Confinante (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	$e_{inicial}$	e_{final}
Solo puro	0	50	1,95	0,373	0,395
			1,94	0,377	0,405
		100	1,94	0,382	0,386
			1,94	0,378	0,387
		200	1,95	0,373	0,368
			1,94	0,379	0,371
Sem tratamento	1	50	1,93	0,380	0,410
			1,91	0,389	0,420
		100	1,92	0,382	0,397
			1,92	0,380	0,409
		200	1,92	0,383	0,383
			1,92	0,385	0,400
Hornificação	1	50	1,92	0,382	0,414
			1,91	0,388	0,417
		100	1,91	0,397	0,409
			1,94	0,366	0,383
		200	1,91	0,392	0,393
			1,92	0,384	0,377
NaOH	1	50	1,91	0,389	0,413
			1,92	0,381	0,420
		100	1,92	0,382	0,407
			1,92	0,385	0,409
		200	1,93	0,375	0,376
			1,92	0,385	0,387
Hornificação + NaOH	1	50	1,92	0,386	0,425
			1,92	0,381	0,407
		100	1,93	0,379	0,396
			1,92	0,381	0,412
		200	1,92	0,383	0,387
			1,92	0,382	0,392

Fonte: Reis (2022).

Tabela A.2 – Índices físicos das análises a longo prazo.

Compósito	Pf (%)	Tensão Confinante (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	$e_{inicial}$	e_{final}
Solo puro	0	50	1,97	0,344	0,379
			1,95	0,361	0,394
		100	1,93	0,373	0,405
			1,96	0,350	0,382
			1,94	0,356	0,398
Sem tratamento	1	50	1,94	0,359	0,388
			1,93	0,376	0,420
		100	1,90	0,397	0,437
			1,90	0,389	0,431
			1,93	0,376	0,411
Hornificação	1	200	1,90	0,391	0,397
			1,92	0,380	0,398
		50	1,93	0,373	0,410
			1,94	0,365	0,407
			1,91	0,385	0,390
NaOH	1	100	1,92	0,383	0,405
			1,91	0,386	0,397
		200	1,93	0,368	0,392
			1,93	0,378	0,416
			1,93	0,375	0,431
Hornificação + NaOH	1	50	1,91	0,382	0,397
			1,91	0,387	0,419
		100	1,92	0,380	0,380
			1,93	0,371	0,390
			1,93	0,371	0,391
Hornificação + NaOH	1	200	1,94	0,369	0,404
			1,93	0,369	0,376
		100	1,94	0,366	0,382
			1,93	0,365	0,372
			1,92	0,370	0,388

Fonte: Autora (2022).