



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

SÁVILLA VIEIRA COSTA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E DA DURABILIDADE DE
COMPÓSITOS EM MATRIZ DE SOLO ARENO-ARGILOSO REFORÇADOS COM
A FIBRA NATURAL DO COCO (*nucifera L*)**

FORTALEZA, CE

2024

SAVILA VIEIRA COSTA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E DA DURABILIDADE DE
COMPÓSITOS EM MATRIZ DE SOLO ARENO-ARGILOSO REFORÇADOS COM A
FIBRA NATURAL DO COCO (nucifera L)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares

Coorientadora: Prof^a. Dra. Mariana Vela Silveira

FORTALEZA, CE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C875a Costa, Sávilla Vieira.
Análise do comportamento mecânico e da durabilidade de compósitos em matriz de solo areno-argiloso reforçados com a fibra natural do coco (nucifera L) / Sávilla Vieira Costa. – 2024.
144 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.
Coorientação: Profa. Dra. Mariana Vela Silveira.
1. compósito. 2. degradação. 3. fibra de coco. 4. resistência. I. Título.
- CDD 624.15
-

SAVILA VIEIRA COSTA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E DA DURABILIDADE DE
COMPÓSITOS EM MATRIZ DE SOLO ARENO-ARGILOSO REFORÇADOS COM A
FIBRA NATURAL DO COCO (nucifera L)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares

Coorientadora: Prof^a. Dra. Mariana Vela Silveira

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Mariana Vella Silveira (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura (Examinador Interno)
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Prof. Dra. Michéle Dal Toé Casagrande (Examinador Externo)
Universidade de Brasília (UnB)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Sales e Valdizia, sem eles eu não teria conseguido chegar até aqui. A minha irmã pelo incentivo. A Anita e o Nunes, que abriram as portas da sua casa pra mim durante todo o período do mestrado, sem isso tudo seria muito mais difícil, terei uma eterna gratidão.

Ao professor Anderson, sem seu empenho em fazer as correções em prazos muito apertados não seria possível eu sequer pensar na possibilidade de ir pro doutorado agora, e estou indo. Também terei uma eterna gratidão. Além de ser um profissional excepcional. A professora Mariana, com quem tive o prazer de trabalhar, quem sempre foi muito compreensiva as minhas limitações por morar em outra cidade, me ajudou muito a conseguir chegar aqui.

Ao professor Joao Barbosa, que novamente me recebeu no laboratório de mecânica dos solos do Cariri. Ao Igor, que me ajudou muito na execução dos ensaios no Cariri, tudo seria muito mais difícil sem sua ajuda. A Fabiola, uma pessoa incrível que cruzou meu caminho. A toda a equipe do laboratório de mecânica dos solos da UFC.

Aos meus colegas de turma, em especial a Kelly, Vitor e Vitoria. Minhas primas, que me ajudaram muito a cortar as fibras. Ao meu amigo Wallyson Junio quem me ajudou muito nas etapas finais de formatação e quem escuta minhas reclamações da vida a anos.

Minhas amigas, Ana Carla, Daniele, Amanda, Isadora e Emile, todas tiveram um papel muito importante em me ajudar até chegar aqui, me ouviram e me acolheram quando eu mais precisei. Mas em especial a Rafaela, que me acolheu em um momento muito difícil nesse período. Não há como expressar aqui em palavras como sou agradecida por isso, quando achei que não conseguiria ela me incentivou e me fez acreditar.

Irei registrar aqui um momento interessante, quando eu estava em um momento em que nada dava certo e não sabia muito como prosseguir. A professora Liliane me disse uma frase que eu levei dali em diante “lide com o problema do dia”, foi o que eu fiz, e levarei isso pra toda minha vida.

A vitória, apesar dos pesares, foi quem esteve ao meu lado durante a maior parte desse período. Quem me ouviu reclamar e me acolheu. Não vou nem falar de ter passado dias e dias cortando fibra comigo ou no laboratório, por que isso foi o de menos. Ser minha companheira de vida, foi o mais importante.

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

RESUMO

Os solos são materiais complexos e apresentam variabilidade em suas propriedades. A prática de incluir fibras para melhorar as propriedades mecânicas do solo remonta a tempos antigos. A melhoria ou alteração das propriedades mecânicas dos solos reforçados com fibras depende de características específicas das fibras, do tipo de solo, da tensão de confinamento e do modo de carregamento. Este trabalho busca contribuir no entendimento do comportamento do solo reforçado com fibras de coco, aleatoriamente distribuídas, analisando o efeito da degradação natural das fibras sobre a resistência do compósito, e contribuir para a redução da poluição causada pelo descarte desses resíduos. Para esse propósito, foi analisado o potencial de degradação da fibra de coco através de ensaios de resistência à compressão simples, em intervalos de tempo dobrados ($t_1=30$, $t_2=60$ e $t_4=120$ dias) e no tempo de controle ($t_0=0$ dias), com teor de fibras 0,5%, em relação à massa de solo seco, e comprimento de 25 mm. A fibra de coco foi analisada de 3 formas distintas: a amostra completa, a fração mais grossa e a fração mais fina. O programa experimental também consistiu de ensaios triaxiais convencionais, ensaios de permeabilidade, MEV, FRX e DRX. O coeficiente de permeabilidade obtido para o compósito com amostra de fibra completa não teve diferenças significativas do coeficiente de permeabilidade encontrado para o solo natural. No ensaio de resistência à compressão simples (RCS), o solo natural (SN) apresentou variação de resistência nos tempos estudados com significativo aumento no tempo t_4 , fator atribuído ao aumento da sucção da matriz do compósito. Através do ensaio de resistência a compressão simples (RCS), constatou-se que o comportamento de endurecimento adquirido com a adição das fibras foi gradualmente sendo perdido com o aumento do tempo de exposição, até o tempo t_2 . Podendo-se afirmar que a exposição da amostra aos agentes climáticos alterou o mecanismo de ruptura dos compósitos reforçados com as fibras expostos aos agentes climáticos. Esta constatação está de acordo com o observado visualmente. Foi notado que as fibras ficam mais frágeis ao toque, com o aumento do tempo de exposição. No entanto, no tempo t_4 ocorreu um aumento da resistência, tal fator pode ser atribuído ao aumento da resistência da matriz do compósito com o tempo. O compósito SAFF (solo + amostra de fibra fina) foi o que apresentou maior resistência em todos os tempos analisados, seguido do compósito SAFC (solo + amostra fibra completa) e SAFG (solo + amostra fibra grossa). No ensaio triaxial o compósito SAFC e o SN apresentaram ganho de resistência do tempo t_0 para o tempo t_4 , fator atribuído ao aumento da sucção da matriz do compósito.

Palavras-chave: Compósito. Degradação. Fibra de coco. Resistência.

ABSTRACT

The soils are complex materials and exhibit variability in their properties. The practice of incorporating fibers to enhance the mechanical properties of the soil dates back to ancient times. The improvement or alteration of the mechanical properties of fiber-reinforced soils depends on specific characteristics of the fibers, the type of soil, the confinement stress, and the loading mode. This study seeks to contribute to the understanding of the behavior of soil reinforced with randomly distributed coconut fibers, analyzing the effect of natural fiber degradation on the composite strength and aiming to reduce pollution caused by the disposal of these residues. For this purpose, the degradation potential of coconut fiber was analyzed through simple compression strength tests at doubled time intervals ($t_1=30$, $t_2=60$, and $t_4=120$ days) and at the control time ($t_0=0$ days), with a fiber content of 0.5% relative to the mass of dry soil and a length of 25mm. The coconut fiber was analyzed in three different forms: the complete sample, the thicker fraction, and the finer fraction. The experimental program also included conventional triaxial tests, permeability tests, SEM, XRF, and XRD. The permeability coefficient obtained for the composite with the complete fiber sample did not show significant differences from the permeability coefficient found for natural soil. In the simple compression strength test (RCS), the natural soil (SN) showed variations in strength over the studied times, with a significant increase at time t_4 , a factor attributed to the sensitivity of the clayey fraction present in the soil. Through the simple compression strength test (RCS), it was observed that the hardening behavior acquired with the addition of fibers was gradually lost with increasing exposure time, up to time t_2 . It can be stated that exposure to climatic agents altered the rupture mechanism of the fiber-reinforced composites exposed to climatic agents. This finding is consistent with visual observations. It was noticed that the fibers became more fragile to the touch with increasing exposure time. However, at time t_4 , there was an increase in strength, which may be attributed to the increased strength of the composite matrix over time. The SAFF composite (soil + fine fiber sample) showed the highest strength at all analyzed times, followed by the SAFC composite (soil + complete fiber sample) and SAFG (soil + thick fiber sample). In the triaxial test, the SAFC composite and the SN showed an increase in strength from time t_0 to time t_4 , a factor attributed to the increase in suction of the composite matrix.

Keywords: Composite. Degradation. Coconut fiber. Strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 - Estrutura hierárquica de uma fibra de sisal.....	20
Figura 2 - Forças componentes do compósito durante um carregamento	41
Figura 3 - Partes constituintes do coco	46
Figura 4 - Organograma dos ensaios realizados na matriz areno-argiloso.....	59
Figura 5 - Organograma dos ensaios realizados na fibra	60
Figura 6 - Organograma dos ensaios realizados nos compósitos solo-fibra	60
Figura 7 - Solo natural	61
Figura 8 - Ensaio de permeabilidade da matriz do compósito.	62
Figura 9 - Equipamento utilizado no ensaio FRX.	63
Figura 10 - Prensa triaxial	64
Figura 11 - Equipamento utilizado nos ensaios triaxiais	65
Figura 12 - Fibra de coco.....	66
Figura 13 - Fibra de coco – amostra completa e frações	67
Figura 14 - Equipamento utilizado no ensaio de DRX.....	69
Figura 15 - Corpo de prova do SAFC no tempo t_4	70
Figura 16 - Preparo de amostras para o ensaio MEV – fibras imersas.....	70
Figura 17 - Equipamento utilizado no ensaio MEV	71
Figura 18 - Preparo para o ensaio de compactação	72
Figura 19 - Ensaio de permeabilidade do compósito com AFC.....	73
Figura 20 - Configuração do tudo de PVC empregado.	74
Figura 21 - Configuração dos corpos de prova.	75
Figura 22 - Processo de uniformização da umidade.....	77
Figura 23 - Caixas para exposição dos corpos de prova	78
Figura 24 - Corpos de prova expostos aos agentes climáticos	79
Figura 25 - MEV fibras de coco para o t_0 :.....	92
Figura 26 - MEV fibras de coco para o t_4 :.....	94
Figura 27 - Ruptura a compressão simples dos corpos de prova	98

GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensão-deformação de um solo reforçado com fibras de coco	43
Gráfico 2 - Produção regional do coco, em 2020 (mil frutos).....	47
Gráfico 3 - Produção estadual do coco, em 2020 (mil frutos).....	48
Gráfico 4 - Parâmetros meteorológicos do ano de 2023.....	79
Gráfico 5 - Curvas granulométricas do solo com defloculante	81
Gráfico 6 - Curva de compactação da matriz do compósito.....	82
Gráfico 7 - Curvas de resistência à compressão simples do solo natural	84
Gráfico 8 - Ensaio triaxial do SN para os tempos t_0 e t_4 : tensão desvio x def. espec. axial	86
Gráfico 9 - Ensaio triaxial do SN para os tempos t_0 e t_4 : poropressão x def. espec. axial	86
Gráfico 10 - Envoltórias de ruptura de tensões efetivas do SN): I) t_0 ; II) t_4	88
Gráfico 11 - Difração de Raio-X da fibra de coco <i>in natura</i> : I) t_0 ; II) t_4	90
Gráfico 12 - Difração de Raio-X da fibra de coco após carbonização: I) t_4 ; II) t_0	91
Gráfico 13 - Curvas de compactação.....	96
Gráfico 14 - RCS para cada tempo: I) t_0 ; II) t_1 ; III) t_2 ; IV) t_4	101
Gráfico 15 - RCS para cada compósito: I) SAFC; II) SAFG; III) SAFF	101
Gráfico 16 - SN, SAFC, SAFF, SAFG para os tempos t_0, t_1, t_2 e t_4 :.....	103
Gráfico 17 - Ensaio triaxial SAFC para t_0 e t_4 : tensão desvio x def. espec. axial	105
Gráfico 18 - Ensaio triaxial SAFC para t_0 e t_4 : poropressão x def. espec. axial.....	106
Gráfico 19 - Envoltórias de ruptura de tensões efetivas do compósito SAFC: I) t_0 ; II) t_4	107
Gráfico 20 - Envoltória de ruptura em termos de tensões efetivas: I) t_0 ; II) t_4	107
Gráfico 21 - Ensaio triaxial do compósito SAFC e do SN para os tempos t_0 e t_4	109

QUADROS

Quadro 1 - Estudos de solos reforçados com fibras de coco.....	57
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras minerais.....	17
Tabela 2 - Propriedades das fibras Poliméricas	19
Tabela 3 - Propriedades mecânicas das fibras vegetais.	21
Tabela 4 - Composição química de algumas fibras vegetais (%)	23
Tabela 5 - Estudos de solos reforçados com fibras vegetais.....	24
Tabela 6 - Principais propriedades da fibra de coco verde	49
Tabela 7 - Propriedades físicas da fibra de coco verde.....	50
Tabela 8 - Ensaio de compressão simples.....	76
Tabela 9 - Período de exposição dos corpos de prova	80
Tabela 10 - Propriedades físicas do solo.....	81
Tabela 11 - Composição química da matriz do compósito	83
Tabela 12 - Dados de resistência à compressão simples para o solo natural (SN)	84
Tabela 13 - Dados de ruptura do triaxial para o solo natural (SN)	87
Tabela 14 - Dados de poropressão do triaxial para o solo natural (SN)	87
Tabela 15 - Dados da envoltória de ruptura do solo natural (SN) – parâmetros efetivos	88
Tabela 16 - Composição química da fibra de coco	89
Tabela 17 - Tensão de ruptura	102
Tabela 18 - Desvio padrão	103
Tabela 19 - Dados de ruptura do triaxial para o compósito SAFC	106
Tabela 20 - Dados de poropressão do triaxial para o compósito SAFC	106
Tabela 21 - Dados da envoltória de ruptura do compósito SAFC - parâmetros efetivos	107

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Considerações iniciais	11
1.2	Relevância e justificativa da pesquisa.....	12
1.3	Objetivos.....	15
1.3.1	Geral	15
1.3.2	Específicos.....	15
1.4	Estrutura da dissertação	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Solos reforçados – Histórico	11
2.2	Materiais compósitos reforçados com fibras.....	12
2.3	Tipos de fibras empregadas como reforço.....	14
2.3.1	Fibras metálicas	16
2.3.2	Fibras minerais	16
2.3.3	Fibras poliméricas	17
2.3.4	Fibras vegetais	19
2.4	Alterações nas propriedades dos solos pela inclusão de fibras.....	27
2.4.1	Influência na compactação	28
2.4.2	Resistência ao cisalhamento de pico	29
2.4.3	Resistência ao cisalhamento pós-pico	31
2.4.4	Deformabilidade	32
2.4.5	Modo de ruptura	33
2.4.6	Variação volumétrica	34
2.4.7	Condutividade hidráulica.....	35
2.5	Parâmetros que influenciam no comportamento de solos reforçados	36
2.6	Fibra de coco	44
2.6.1	Histórico	44
2.6.2	Características, produção e consumo.....	45
2.6.2	Propriedades das fibras de coco.....	49
2.6.3	Estudos experimentais com a fibra de coco.....	52
3	MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1	Caracterização do solo (matriz do compósito).....	60
3.1.1	Caracterização física.....	61

3.1.2	Compactação	61
3.1.3	Ensaio de permeabilidade (matriz do compósito)	62
3.1.4	Caracterização química.....	62
3.1.5	Caracterização mecânica	63
3.2	Caracterização da fibra de coco (elemento de reforço do compósito)	66
3.2.1	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e determinação de matéria orgânica	68
3.2.2	Ensaio de difração de Raios-X	68
3.2.3	Microscopia Eletrônica de Varredura	70
3.3	Caracterização do compósito solo-fibra sem e com exposição	71
3.3.1	Compósito ou mistura solo-fibras	71
3.3.2	Ensaio de compactação.....	71
3.3.3	Ensaio de permeabilidade (compósito).....	72
3.3.4	Ensaio de resistência – compressão simples e triaxial	73
3.3.5	Caracterização e preparo dos compósitos submetidos ao envelhecimento natural	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1	Caracterização do solo (matriz do compósito).....	81
4.1.1	Caracterização física.....	81
4.1.2	Compactação	82
4.1.3	Ensaio de permeabilidade (matriz do compósito)	82
4.1.4	Caracterização química.....	83
4.1.5	Caracterização mecânica	83
4.2	Caracterização da fibra de coco (elemento de reforço do compósito)	88
4.2.1	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e teor de matéria orgânica	88
4.2.2	Ensaio de difração de Raios-X	89
4.2.3	Microscopia Eletrônica de Varredura	91
4.3	Caracterização do compósito solo-fibra sem e com exposição	95
4.3.1	Ensaio de compactação.....	95
4.3.2	Ensaio de permeabilidade (compósito).....	96
4.3.3	Ensaio de resistência a compressão simples.....	97
4.3.4	Ensaio triaxial.....	104
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109
	REFERÊNCIAS	113

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Os solos são materiais complexos e apresentam variabilidade em suas propriedades. Em certas situações, jazidas de solos disponíveis podem não satisfazer as propriedades exigidas para um projeto de engenharia, sendo necessário realizar um melhoramento das mesmas, como por exemplo, por meio da inserção de reforços.

A incorporação de fibras para aprimorar as características mecânicas do solo é uma técnica antiga (Van Impe, 1989). Os babilônios e chineses, há mais de três mil anos, já empregavam a técnica de reforço do solo, como mencionado por Festugato (2008). Contudo, apenas a partir da segunda metade do século XX é que os mecanismos atuantes pela inserção dos reforços ao solo relacionados começaram a ser compreendidos.

Um material compósito é caracterizado como uma combinação de dois ou mais materiais que possuem propriedades que não estão presentes individualmente nos materiais que lhe deram origem. Essa composição consiste em um elemento de reforço e uma matriz, sendo desenvolvida para aprimorar as características positivas de cada uma das fases (Budinski, 1996). Os compósitos surgem da necessidade de atender às demandas por materiais alternativos que possam ter desempenho igual ou superior aos materiais convencionais utilizados em diversos produtos, serviços ou obras.

O Brasil se destaca como um país com um imenso potencial para liderar a tecnologia na fabricação de compósitos reforçados com fibras vegetais para diversas aplicações, devido a sua grande extensão territorial cultivável e por ser um dos principais produtores globais de diversas fibras vegetais. Com a maior biodiversidade do planeta, o Brasil dispõe de uma ampla gama de matérias-primas com grande potencial para diversas aplicações industriais. Contudo, muitos dessas matérias-primas são subutilizados devido à falta de estudos aprofundados sobre suas propriedades. A busca por novas aplicações de processos e produtos provenientes de fontes renováveis tem crescido, impulsionada pelo objetivo de reduzir a poluição ambiental. Nesse contexto, as fibras vegetais, foco deste estudo, ganham relevância como recursos naturais sustentáveis.

Grande parte dos reforços e produtos utilizados em aplicações de engenharia são produzidos a partir de materiais sintéticos. Contudo, devido às questões relacionadas à eliminação de resíduos e ao esgotamento dos recursos petroquímicos, aliados à crescente conscientização ambiental da sociedade, buscam-se soluções sustentáveis, que incentivam o

desenvolvimento de materiais compósitos reforçados por fibras de origem vegetal.

A melhoria ou alteração das propriedades mecânicas dos solos reforçados com fibras depende de características específicas das fibras, do tipo de solo, da tensão de confinamento e do modo de carregamento. O maior potencial dos materiais compostos fibrosos é geralmente observado no estado pós-pico, onde as fibras contribuem de maneira mais eficaz para a resistência do material, gerando um aumento na capacidade de absorção de energia de deformação (Silveira, 2018). A utilização de materiais fibrosos para melhorar o comportamento mecânico de solos compactados tem demonstrado eficácia, especialmente devido aos efeitos de aumento de resistência dos materiais resultantes (Palacios *et al.*, 2015).

O reforço do solo por meio das fibras de coco surge como uma proposta para o emprego de materiais reciclados (Sotomayor, 2014). Essas fibras, obtidas da casca da fruta, são amplamente consumidas nas cidades litorâneas do Brasil e, muitas vezes, não recebem uma disposição final adequada, sendo descartadas em lixões ou depositadas em aterros sanitários sem nenhum processo de aproveitamento (Ishizaki *et al.*, 2006). Além das características da fibra, o comportamento de compósitos reforçados com esse tipo de material depende também da compatibilidade com a matriz de solo.

Este trabalho busca contribuir no entendimento do comportamento do solo reforçado com fibras de coco, aleatoriamente distribuídas, analisando o efeito da degradação natural das fibras sobre a resistência do compósito, e contribuir para a redução da poluição causada pelo descarte desses resíduos.

1.2 Relevância e justificativa da pesquisa

A concepção tradicional de que a natureza é uma fonte inesgotável de recursos, materiais e energias, com capacidade ilimitada de deposição, está sendo gradualmente substituída por um modelo que se baseia em ciclos de vida e melhoria de gestão de resíduos (Silva, 2009). Esse paradigma tem evoluído ao longo dos anos devido à necessidade de promover o desenvolvimento econômico e material sem causar danos ao meio ambiente, priorizando a utilização inteligente e a preservação dos recursos naturais para o futuro (Martinho; Gonçalves, 2000).

O aumento expressivo do consumo de produtos derivados do coco resultou no acúmulo significativo de resíduos da casca do coco, que é a matéria-prima para a fibra de coco. Esse cenário cria um sério problema ambiental, principalmente porque a casca do coco é um material de difícil degradação. O problema torna-se ainda mais agravante nos grandes

centros urbanos, onde esse resíduo sólido encontra dificuldades de ser descartado, sendo comumente enviado para “lixões” e aterros sanitários. Em Fortaleza, por exemplo, segundo a Ecofor (Diário do Nordeste, 2018) é coletada diariamente 20 toneladas de coco, equivalendo a cerca de 5% do total de resíduos produzidos na capital cearense, e apenas uma pequena parcela desse material é reaproveitada (Jacques, 2013). A gestão deficiente desses resíduos nas áreas urbanas resulta em problemas ambientais e de saúde pública.

O Brasil se destaca como o quinto maior produtor global de coco (Faostat, 2021), sendo cultivado em quase todo o território nacional. Em 2022, a área de produção era de 189.525 hectares, gerando uma produção de 1,8 bilhão de frutos (IBGE, 2023). Na região Nordeste, principal polo produtor do país, no ano de 2020, concentrou 80,9% da área colhida de coco e 73,5% da produção nacional. Somente no estado do Ceará, foram produzidos mais de 405 milhões de frutos de coco (IBGE, 2021). A maior parte dessa produção é destinada às agroindústrias para a obtenção de derivados do coco, utilizados na fabricação de diversos produtos alimentícios, como coco ralado, leite de coco, bebidas, óleos, doces, biscoitos, chocolates, entre outros (Pino, 2005).

A elevada produção e consumo de coco motivaram a exploração das potencialidades de aproveitamento de sua casca, que normalmente representam mais de 80% de seu peso total (Rosa *et al.*, 2001) e constitui cerca de 70% do lixo gerado nas praias brasileiras (Rosa *et al.*, 2009). Silva; Jerônimo (2012) destacam que a não utilização desses resíduos implica na eliminação de matérias-primas infinitas e renováveis de grande valor, os quais poderiam ser empregados em substituição a outros produtos cuja extração traz inúmeras desvantagens ecológicas, como é o caso da turfa e da vermiculita, por exemplo. Matérias-primas não aproveitadas representam desperdício e acarretam custos de descarte para a sociedade (Senhoras, 2003).

A agroindústria no Brasil está associada ao extrativismo de diversas culturas, como a do coco. Quando as cascas de coco são dispostas em aterros, incorrem em custo de coleta e disposição. Esses custos são superiores aos necessários para direcionar esses resíduos para usinas de processamento/beneficiamento ou cooperativas de produtores (Dias *et al.*, 2012; Silveira, 2008).

A região Nordeste do Brasil é onde se concentra a maior parte da produção e consumo do coco verde devido ao seu extenso litoral (Ferreira Neto *et al.*, 2002), e, por consequência, é onde há uma maior disponibilidade deste resíduo para beneficiamento da fibra de coco. Além disso, essa região enfrenta desafios socioeconômicos e de tratamento adequado de resíduos. Silveira e Aragão (2016) afirmam que há viabilidade técnicas e

econômicas para a implementação de unidades de processamento de cascas de coco nessa região. O reforço de solos com a fibra de coco surge como uma forma de diversificar o uso dessa fibra e contribuir para a gestão da produção das unidades de beneficiamento.

Outro aspecto atrativo do uso de fibras naturais como reforço em compósitos é a neutralidade de emissão de dióxido de carbono. O emprego de materiais de origem fóssil, como o petróleo, libera grandes quantidades de dióxido de carbono durante o processo de produção, contribuindo significativamente para o efeito estufa e as mudanças climáticas globais (Wanbua, 2003). A utilização de fibras vegetais reduz a emissão de dióxido de carbono na atmosfera ao substituírem as fibras sintéticas, uma vez que são obtidas de fontes naturais e renováveis, e as plantas que dão origem as fibras vegetais auxiliam na captura do dióxido de carbono presente na atmosfera.

A extração de fibras das cascas do coco é uma prática de baixo custo e sua utilização como reforço em solos pode não apenas contribuir para a valorização desse resíduo, mas também gerar oportunidades de emprego e renda por meio da criação de unidades de beneficiamento da fibra, assim como diminuir o volume de material a ser descartado. Nesse contexto, a técnica de misturar fibras naturais ao solo é uma prática conhecida (Gowthaman; Nakashima; Kawasaki, 2018), que se apresenta como uma excelente alternativa, pois contribui com o reuso de resíduos e assim agrega valor ao produto (Menezes, 2018; Selvaraj *et al.*, 2019). Além do mais, essa prática pode contribuir para aumento da vida útil dos aterros sanitários que é um dos grandes desafios atuais que a geotecnia ambiental vem tentando solucionar.

Diante desse cenário, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos na atualidade com o intuito de obter metodologias que viabilizem a inclusão das fibras vegetais em solos, visando sua aplicação como reforço de solos na engenharia geotécnica. Atualmente, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas sobre esse tema (Silveira; Casagrande, 2021; Reis, 2022; Brito, 2022; Teja; Muttharam, 2022; Lopes; Casagrande, 2022; Vela Silveira; Fereira; Casagrande, 2022; Freitas, 2023; Santos, M., 2023; Bu *et al.*, 2023; Kumar; Mir, 2023; Yazici; Keskin, 2023).

Embora os efeitos da inclusão de fibras vegetais como reforço de solo já sejam comumente estudados, principalmente no que se refere ao melhoramento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, inclusive com estudos referentes a compósitos com a fibra de coco, é importante compreender quais os efeitos que o envelhecimento natural da fibra, quando submetidos aos processos de intemperismos, acarreta suas propriedades.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

O objetivo principal desta pesquisa consiste em estudar o comportamento mecânico de um solo areno-argiloso reforçado com fibras de coco verde (*Cocos nucifera*) aleatoriamente distribuídas, avaliando a influência dos diâmetros na degradação dos compósitos quando expostos às condições climáticas, em diferentes tempos de exposição.

Este objetivo será alcançado através da avaliação do comportamento mecânico das misturas com e sem exposição ao envelhecimento natural, estabelecendo padrões de comportamento que possam explicar a influência da adição de fibras, relacionando-a com os parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformação do solo.

1.3.2 Específicos

- Estudar as propriedades químicas da fibra vegetal do coco no tempo zero e quatro meses, ou seja, sem e com contato com o solo e os agentes climáticos;
- Avaliar através de ensaios fluorescência de raios-x a composição química da matriz do compósito e da fibra de coco;
- Determinar através de ensaios difração de raios-X o índice cristalinidade e a composição química da fibra vegetal nos tempos zero e quatro meses;
- Avaliar a estrutura da fibra através de ensaios de microscopia eletrônica de varredura a fibra de coco no tempo zero e quatro meses;
- Avaliar a influência da adição da fibra vegetal do coco na permeabilidade de um solo argiloso através do ensaio de permeâmetro de parede rígida.

1.4 Estrutura da dissertação

O presente trabalho é organizado em cinco capítulos:

- O primeiro trata da introdução com uma breve contextualização relacionada à temática abordada, seguida da justificativa do estudo, motivação, objetivos e estrutura da dissertação;
- O segundo trata da revisão de literatura que abrange os temas relacionados diretamente com a pesquisa, abordando o histórico da aplicação de reforços, materiais compósitos, os tipos de fibra que são empregados como reforço de solos,

as alterações nas propriedades dos solos pela inclusão de fibras, a influência dos principais fatores no comportamento de solos reforçados e, por fim, as fibras de coco, com o histórico de sua aplicação, características, produção, consumo, propriedades e estudos experimentais;

- O terceiro descreve os materiais utilizados e as etapas da metodologia realizadas na pesquisa, destacando a caracterização da matriz do compósito (caraterização física, compactação, permeabilidade, caracterização química – FRX, caracterização mecânica - resistência à compressão simples e triaxial), caracterização da fibra de coco (FRX, DRX e MEV) e a caraterização dos compósitos solo-fibra com e sem exposição (resistência à compressão simples e triaxial);
- O quarto refere-se aos resultados e discussões das análises e ensaios realizados, destacando os resultados da caracterização da matriz do compósito (caraterização física, compactação, permeabilidade, caracterização química – FRX, caracterização mecânica - resistência à compressão simples e triaxial), caracterização da fibra de coco (FRX, DRX e MEV) e a caraterização dos compósitos solo-fibra com e sem exposição (resistência à compressão simples e triaxial);
- O quinto refere-se às conclusões onde são apresentadas as principais considerações referentes aos resultados obtidos e as recomendações para pesquisas futuras sobre o tema abordado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Solos reforçados – Histórico

O reforço de solos é uma técnica na qual se insere um material com alta resistência à tração, que promove uma melhoria nas propriedades mecânicas dos solos, aumentando a resistência e diminuindo a compressibilidade destes (Bolaños, 2013). A técnica de melhorar as propriedades mecânicas dos solos é há muito tempo conhecida e empregada pela humanidade (Palmeira, 1992). Segundo Van Impe (1989), do ponto de vista técnico, o melhoramento do solo é, provavelmente, a técnica mais antiga, comparando os métodos executivos comuns em engenharia civil.

Desde tempos antigos, o ser humano aprendeu a praticidade de usar o solo presente no local de construção, mesmo que suas características não sejam ideais. Para aprimorar as propriedades do solo, começou-se a incorporar diversos materiais, predominantemente orgânicos, visando alcançar uma estrutura mais resistente e durável ao longo do tempo (Sotomayor, 2014).

Fruto dessa necessidade, o ser humano desenvolveu uma ampla variedade de técnicas para aprimorar as propriedades geotécnicas do solo. O caso do reforço de solos com fibras já é muito conhecido e empregado, sendo antigo o conceito de reforço de solos com materiais que apresentam resistência à tração (Sotomayor, 2014). Indícios do emprego dessa técnica também são encontrados em partes da Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas, no Peru, empregando lã de lhama como reforço (Palmeira, 1992).

Por volta de 5000 a 2500 anos atrás, durante a construção de grandes templos religiosos, como o Ziggurats, pelos babilônios, eram utilizadas esteiras de cana como elementos de reforço (Sotomayor, 2014). Em alguns Ziggurats, utilizavam-se como reforço adicional cordas com 0,05m de diâmetro, inseridas perpendicularmente ao talude e regularmente espaçadas nas direções vertical e horizontal (Silva, 2009).

Existem registros de materiais vegetais serem usados para dar maior resistência aos tijolos de argila que datam períodos antes de Cristo (Palmeira, 1992). Também, em algumas das estradas que conectavam o Império Romano, foram encontrados vestígios de tecidos e peles utilizadas para propósitos de reforço (Sotomayor, 2014).

Muralhas de adobe reforçadas com bambu podem ser encontradas na cidade histórica de Chan-Chan, existentes há mais de 600 anos, feitas pela civilização anterior aos incas, numa zona de grande atividade sísmica (Sotomayor, 2014).

Segundo Casagrande (2005), é conhecida a utilização de mantas de folhas e galhos sobre camadas de solos moles antes da construção de aterros no interior do Brasil e em outros países. Uma aplicação pioneira, que mais se aproxima do uso de fibras sintéticas como reforço de solo, foi à utilização de mantas de algodão, em 1926, pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul, Estados Unidos, como reforço de camadas asfálticas em pavimentos (Palmeira, 1992). Inicialmente, diversos artigos foram publicados com o intuito de avaliar o efeito de raízes de plantas na resistência ao cisalhamento dos solos, dentre estes estão os trabalhos de Kaul (1965 apud Schaefer *et al.*, 1997), Endo; Tsuruta (1969 apud Schaefer *et al.*, 1997) e Gray; Ohashi (1983). Além de evidenciar a contribuição positiva de raízes de plantas para a resistência ao cisalhamento dos solos, também foi comprovado que estas contribuíam para a melhora da estabilidade dos taludes.

No contexto moderno, as estruturas de contenção em solo reforçado começaram ser empregadas no final dos anos 60, quando o arquiteto francês Henry Vidal patenteou a técnica denominada “Terra Armada” (Vidal, 1969), em que o reforço de solo consistia na introdução de tiras metálicas conectadas a painéis de concreto que compunham a face do maciço de solo. A utilização de geossintéticos como reforço de solos no Brasil data do final dos anos 70 e início dos anos 80, com obras também envolvendo aplicações em drenagem e filtração, (Sotomayor, 2014).

Segundo Chen (2010), atualmente solos reforçados com fibras estão sendo utilizada em diferentes aplicações, que incluem estabilização de taludes e construção de aterros com solos reforçados, redução das trincas de tração em *liners* de argila compactadas, e para reforçar sub-bases rodoviárias. Hejazi *et al.* (2012) mostra que o uso de fibras naturais e/ou sintéticas em engenharia geotécnica é viável em seis campos, incluindo camadas de pavimento (construção de estradas), muros de contenção, aterros ferroviários, proteção de encostas, engenharia sísmica e fundação de solos.

2.2 Materiais compósitos reforçados com fibras

A técnica de reforçar solos com fibras encontra-se inserida na tecnologia dos materiais compósitos. Um material compósito pode ser definido como a associação de dois ou mais materiais com propriedades específicas, cuja união resulta em um novo material com características diferentes das individuais, os quais são desenvolvidos com o objetivo de melhorar as qualidades específicas de um material (Budinski, 1996). O compósito é constituído por duas fases: a matriz (solo, concretos, silicones, argamassas etc.) e o elemento

de reforço (fibras, papéis, aço, fragmentos de borracha, isopor, etc.) (Silveira, 2018). Um exemplo de reforço foi o utilizado por Ramírez (2012), que estudou a influência da inclusão de fibras de borracha moída de pneus ($d_{50}=1,0\text{mm}$) na resistência ao cisalhamento de dois diferentes tipos de solo, uma areia e um solo residual maduro argilo-arenoso de origem coluvionar (matriz).

Aprimorar as características mecânicas de um solo é viável por meio de procedimentos físicos e/ou químicos, e, geralmente, a expressão "melhoria de solos" está ligada ao tratamento químico, ao passo que o termo "reforço" é empregado em intervenções físicas, como a incorporação de fibras (Casagrande, 2005)

Atualmente, a tecnologia de materiais compósitos tem um espaço preferencial para os estudos de reforço de solos com fibras recicláveis (sintéticas ou naturais), já que há uma tendência ambiental de utilizar esses materiais para evitar a geração de resíduos. Diante desse cenário, a comunidade científica tem desenvolvido pesquisas sobre o uso de materiais compósitos com fibras recicladas (Freitas, 2023; Santos, M., 2023; Bu *et al.*, 2023; Kumar; Mir, 2023; Yazici; Keskin, 2023).

A degradação das fibras orgânicas incentivou o desenvolvimento de pesquisas com materiais sintéticos para reforço dos solos, resultando na fabricação de fibras sintéticas para formar materiais compósitos mais resistentes, como, por exemplo, o fibroso solo que consiste na mistura de solo e fibras sintéticas para utilização em pavimentos, aterros sobre solos moles, estabilidade de taludes e em fundações superficiais.

Para Hannant (2001) se tratando de compósitos fibrosos, fatores como o teor de fibra presente, o comprimento das fibras, as características do solo, aderência entre matriz e o reforço e a orientação e a distribuição das fibras na matriz, são determinantes para o desempenho do compósito já que isso implica na forma como as fibras atuam, controlando a abertura e o espaçamento entre as fissuras e distribuindo de forma mais uniforme as tensões dentro da matriz.

Para Taylor (2013) e Hannant (2001) a maior contribuição que as fibras conferem como elemento de reforço se dá após o surgimento de deformações no compósito, devido a esforços de tração, uma vez que a partir deste momento, as fibras começam a trabalhar contribuindo com o aumento da resistência ao cisalhamento do material, melhorando, a capacidade de absorção de energia. Segundo Taylor (2013) para que haja um aumento de resistência pré-fissuração de um compósito, é preciso o emprego de fibras que apresentem uma rigidez maior, que a matriz. É preciso também que exista uma boa aderência entre as fases (reforço e matriz) impedindo que ocorram deslocamentos relativos entre as partes. As

fibras não evitam a formação de fissuras, mas, controlam a propagação de fissuras pelo incremento da resistência à tração (Taylor, 2013).

Com o intuito de aprimorar a resistência ao cisalhamento e o comportamento de assentamento do solo, a disposição desordenada das fibras favorece a habilidade de interceptar a zona potencial de ruptura, resultando em uma melhoria no comportamento tensão-deformação do solo. Além disso, a mobilização da resistência à tração das fibras aumenta a deformação de ruptura, fazendo com que a amostra de solo rompa de maneira dúctil (Khatri; Dutta; Katre, 2017).

Para Coelho (2008) existem duas etapas distintas que regem o comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibra. O primeiro consistiu na ativação do conjunto matriz-fibras, onde prevaleceu a influência da matriz. A segunda etapa caracteriza-se pelo condicionamento dos mecanismos de interação devido à presença das fibras.

Além do comprimento e do diâmetro da fibra, o desempenho de um compósito reforçado é conferido, principalmente, por conta do teor da fibra, pelas propriedades físicas da fibra e da matriz e pela aderência entre as duas fases (Hannant, 2001). Johnston (1994) afirma que há um efeito da orientação e distribuição da fibra sobre a matriz. A orientação de uma fibra presente no plano de ruptura, apresenta possibilidades distintas de contribuir com a transferência de cargas. Por exemplo, uma fibra que se posiciona paralela ao plano de ruptura não tem efeito, enquanto, por outro lado, uma fibra que se posiciona perpendicular a este plano contribui integralmente com sua capacidade de resistir à tração (Sotomayor, 2014).

As pesquisas atuais se concentram em aprimorar a aplicação das fibras, explorando novos materiais para avaliar sua eficácia como reforço, não apenas atendendo aos requisitos de resistência, mas também garantindo condições que promovam a preservação ambiental. A escolha do tipo de fibra a ser utilizado deve considerar as características referentes a cada material, tanto em relação às fibras como ao solo no qual serão inseridas, e assim, conhecer o mecanismo de interação matriz com reforço, de modo a não comprometer o desempenho do conjunto. Nesse contexto, fatores como a proporção da mistura, comprimento, espessura e durabilidade das fibras são considerações para melhorar o desempenho dos compostos solo-fibra.

2.3 Tipos de fibras empregadas como reforço

As fibras são materiais de geometria aproximadamente uniforme, compostas por tramas minúsculas em relação ao seu comprimento. As fibras apresentam diferentes

propriedades como: capacidade de alongamento, flexibilidade resistência mecânica e densidade (Vasconcelos, 2020).

Atualmente há uma ampla variedade de fibras empregadas como reforço de materiais compósitos, podendo ser de origem sintética ou natural. As características físicas, químicas e mecânicas específicas de cada fibra desempenham um papel crucial no desempenho global do composto em que estão incorporados (Bolaños, 2013). Essas características estão intrinsecamente ligadas à origem das fibras, aos materiais que as compõem e ao processo de obtenção.

Fibras adequadas para o reforço de compósitos devem possuir características desejáveis como flexibilidade, homogeneidade macroscópica e uma relação elevada (≥ 40) entre o comprimento e a área da seção transversal (Callister, 2012). Segundo Levy; Pardini (2006) as fibras que constituem um meio efetivo de reforço, possuem menor quantidade de defeitos (falhas estruturais da fibra durante o processamento, material com processo de degradação avançado, etc.) comparando-se a sua forma mássica, isto é, à medida que se tornam mais finas há maior tendência em apresentar defeitos, que possam induzir às falhas e comprometer o desempenho mecânico. Desta forma os autores relatam que a resistência da fibra tende a se aproximar da resistência teórica do material.

Existe atualmente uma ampla variedade de fibras disponíveis para serem utilizadas como reforço de solos. Esses materiais possuem elevada resistência à tração e módulo de elasticidade alto, sendo este último um dos principais critérios para a seleção adequada da fibra visando reforço de compósitos. As particularidades, características e comportamento de cada uma, bem com suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, estão em função do material de que são feitas e da forma como são produzidas, influenciando diretamente no comportamento do compósito no qual elas são empregadas (Feurharmel, 2000; Bolaños, 2013; Aguilar, 2015; Silveira, 2018)

Para que se obtenha o efeito esperado com respeito ao mecanismo de interação entre o reforço (fibra) e a matriz, e a contribuição de cada uma das fases no comportamento mecânico do compósito em questão, é indispensável que se adote uma fibra com as propriedades adequadas para determinada função (Silveira, 2018). É importante que se conheça as características e os diferentes tipos de fibras utilizados como elemento de reforço em materiais compósitos fibrosos. Essas podem ser classificadas em poliméricas, metálicas, minerais e naturais, apresentadas brevemente a seguir.

2.3.1 Fibras metálicas

O uso de fibras de aço como reforço, de materiais utilizados na engenharia, acarretou o desenvolvimento de inúmeras pesquisas sobre o tema. As fibras de aço utilizadas na construção civil apresentam fator de forma na faixa de 30 a 50, comprimento variando de 0,1 a 7,62 cm e diâmetro entre 0,13 e 0,9 mm (Bolaños, 2013). Segundo o mesmo autor, as fibras apresentam resistência à tração em torno de 1100 kPa e módulo de elasticidade em torno de 200 GPa. A ruptura do compósito é normalmente associada ao arrancamento da fibra e não à sua ruptura. Este tipo de fibra pode apresentar problemas de corrosão. Uma técnica utilizada para minimizar tal problema é o banho de níquel (Taylor, 2013). Seu formato pode ser bastante variável, de forma a aumentar sua aderência com a matriz (Hannant, 2001).

2.3.2 Fibras minerais

Uma das principais características das fibras minerais é sua ótima aderência à matriz (Sotomayor, 2014). Dentre as fibras minerais podemos citar as de carbono, vidro e amianto (ou fibra de asbesto). A seguir serão apresentadas algumas características de cada uma delas:

- a. Fibras de Carbono: Baseadas na resistência das ligações entre os átomos de carbono e na leveza destas, as fibras de carbono apresentam alta resistência à tração e módulo de elasticidade em torno de 420 GPa (Bolaños, 2013). Características que tornam imprescindível uma grande aderência entre a matriz e as fibras (Taylor, 2013). Possuem alta relação resistência/peso próprio, elevada rigidez, boas propriedades elétricas e estabilidade dimensional, além da resistência química e à corrosão elevada (Bolaños, 2013). A fibra de carbono é amplamente empregada em matrizes termoplásticas e termorrígidas pela sua resistência, módulo de elasticidade e por suas propriedades físicas e térmicas. Na construção civil encontra aplicação em concretos para reforço estrutural.
- b. Fibras de Vidro: Apresentam alta resistência mecânica e estabilidade dimensional, boas propriedades elétricas, alta resistência química e à corrosão, sendo resistentes ao ataque da maioria dos ácidos (Bolaños, 2013). O diâmetro dos filamentos individuais é geralmente da ordem de 10 µm (Taylor, 2013). Geralmente manufaturadas na forma de “cachos”, isto é, fios compostos de centenas de filamentos individuais justapostos, com cerca de 99% sendo produzidas a partir do vidro tipo E, que é susceptível ao ataque dos álcalis

(Tamayo, 2015). Sendo aplicadas em isolamento termo acústicas, devido a sua baixa condutividade térmica.

- c. Fibras de Amianto ou asbesto: apresentam resistência à tração, em torno de 1000 Mpa, e módulo de elasticidade em torno de 160 GPa. Apresentam uma ótima aderência com uma matriz composta por cimento (Bolaños, 2013). Seu diâmetro é muito pequeno, da ordem de 1 μm (Taylor, 2013). Esta fibra, quando cortada, libera partículas muito pequenas, que em função do seu reduzido diâmetro, danificam os alvéolos pulmonares se aspiradas pelo homem. Em função disso sua utilização na construção civil é proibida em muitos países (Bolaños, 2013).

Apresenta-se a Tabela 1, com as principais propriedades físicas dos três tipos de fibras (Curcio, 2001). Nota-se que a fibra carbono apesar de apresentar um comportamento intermediário em relação ao alongamento na ruptura, possui maior resistência à tração e módulo de elasticidade

Tabela 1 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras minerais.

Fibra	Densidade	Alongamento na ruptura (%)	Resistencia a tração (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Carbono	1,70 a 1,90	0,3 a 1,8	5,5	290 a 400
Vidro	2,5	5	1,5 a 4,5	87
Asbesto	2,5	0,62	1	160

Fonte: Adaptado de Curcio (2001).

2.3.3 Fibras poliméricas

Até o momento, os diferentes tipos de fibras poliméricas têm sido utilizados como reforço em solos, como a de polipropileno (Raman; Aiswarya; Abraham, 2018; Kurugodu *et al.*, 2018; Vakili *et al.*, 2018; Bernardina, 2019; Sonmezer, 2019; Zhao *et al.*, 2020; Ta'negonbadi; Noorzad; Shakery, 2021), poliéster (Zhao *et al.*, 2020), polietileno (Raman; Aiswarya; Abraham, 2018; Ta'negonbadi; Noorzad; Shakery, 2021) e poliamida. As principais características dessas fibras são descritas a seguir.

- a. Fibras de Polipropileno: As fibras de polipropileno são formadas por material termoplástico. Os polímeros termoplásticos são formados por séries de longas cadeias de moléculas polimerizadas, separadas entre si, de uma maneira que

passam deslizar umas sobre as outras (Hollaway, 2010). Possuem flexibilidade e tenacidade notáveis, com módulo elasticidade em torno de 8 GPa (menor que qualquer outra fibra) e resistência à tração de aproximadamente 400 Mpa (Bolaños, 2013). Além disso, apresentam resistência a produtos químicos e alcalinos (Taylor, 2013). Estas propriedades conferem substancial resistência ao impacto aos materiais que as incorporam (Tamayo, 2015).

- b. Fibras de Polietileno:** Possuem um baixo módulo de elasticidade, baixa aderência à matriz, alta resistência aos álcalis, alta durabilidade, e tendência de apresentar fluência para deformações mais elevadas (Tamayo, 2015). Isso implica que, se este tipo de fibra for utilizado para suportar altas tensões permanentes em um composto fissurado, pode ocorrer alongamentos e deflexões consideráveis ao longo do tempo (Hannant, 2001). De acordo com Tamayo (2015), para minimizar o problema da baixa aderência e módulo de elasticidade, tem sido desenvolvido o polietileno de alta densidade, como opção mais econômica em relação às demais fibras de polietileno.
- c. Fibras de Poliéster:** o poliéster apresenta alta densidade, rigidez e resistência, conferindo tais características às fibras feitas deste material (Tamayo, 2015). Essas fibras possuem um aspecto bastante similar às de polipropileno e podem ser utilizadas para as mesmas aplicações (Taylor, 2013). O poliéster atualmente mais conhecido é o polietileno tereftalato cuja sigla é PET. É o material constituinte das garrafas plásticas. Sua produção e consumo vêm aumentando muito rapidamente nos últimos anos. Apresenta alongamento na ruptura de 7% a 50% e densidade relativa entre 1,33 e 1,45 (Bolaños, 2013). A temperatura de fusão é da ordem de 270°C (Mano, 2000).
- d. Fibras de Poliamida (Kevlar):** Os polímeros com longas cadeias de moléculas geralmente apresentam baixa resistência e rigidez devido à espiralização e dobras moleculares (Tamayo, 2015). No entanto, quando esticadas e reforçadas durante a fabricação, podem alcançar altas resistências e módulos de elasticidade, como apresentados nas fibras de poliamida Kevlar (Taylor, 2013). O Kevlar, uma fibra de poliamida aromática, é altamente bem-sucedido comercialmente como a fibra orgânica de maior sucesso (Tamayo, 2015). Existem duas variantes principais: o Kevlar 29, com resistência mecânica em torno de 2,65 GPa e módulo de elasticidade média de cerca de 64 GPa, e o

Kevlar 49, com a mesma resistência, mas um módulo de especificidade de 127 GPa (Hollaway, 2001)

Apresenta-se a Tabela 2, com as principais propriedades físicas dos quatro tipos de fibras. A fibra de poliamida se destaca como a de maior resistência à tração e módulo de elasticidade.

Tabela 2 - Propriedades das fibras Poliméricas

Fibra	Resistencia a tração (Mpa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Poliamida	3000	128
Polipropileno	400	8
Polietileno	24	1,1
Poliéster (PET)	130-880	4-15

Fonte: Adaptado de Hollaway (1994).

2.3.4 Fibras vegetais

Fibras naturais são estudadas há anos no que diz respeito à sua composição, às suas propriedades mecânicas e aos seus possíveis usos (Bledzki; Gassan, 1999; Sparniaš, 2006). Durante séculos elas foram utilizadas até que, gradativamente, elas começaram a ser substituídas por novas tecnologias. Todavia, a necessidade de se obter tecnologia sustentável faz com que o uso de fibras naturais se torne uma alternativa viável.

A utilização de fibras vegetais como reforço apresenta várias vantagens em comparação com outros materiais sintéticos, como reciclabilidade, fonte abundante renovável para obtenção, abrasividade reduzida, baixa densidade, propriedades mecânicas específicas favoráveis, atoxidade, possibilidade de melhoria de suas propriedades a partir de modificação química, baixo consumo de energia em sua produção, baixo custo, e possibilidade de aproveitamento da mão de obra local (Bledzki; Gassan, 1999; Ferreira *et al.*, 2012; Levy Neto; Pardini, 2006; Pannirselvam *et al.*, 2005).

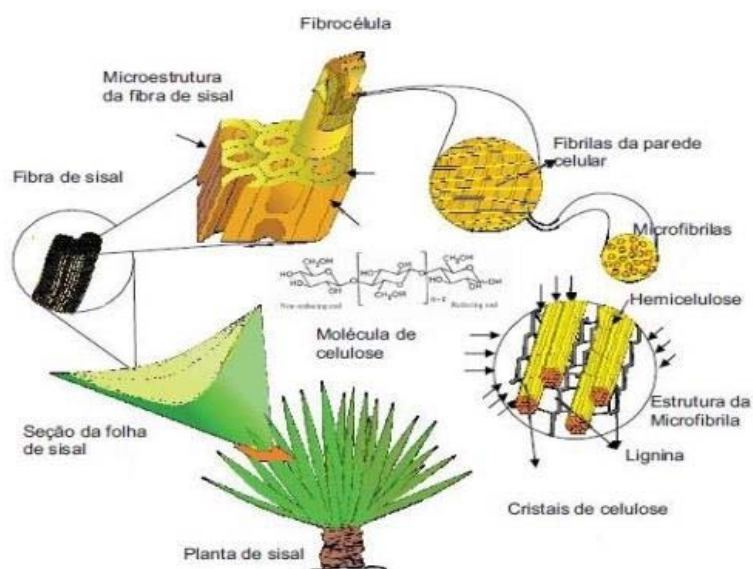
As fibras vegetais podem ser obtidas de diferentes partes da planta. Podem ser provenientes do caule, folha, sementes ou frutos das plantas. Fibras de juta, linho, cânhamo são exemplos de fibras obtidas do caule. As fibras de sisal, curauá e banana são provenientes da folha da planta. O algodão é um exemplo de fibra de sementes e a fibra de coco é proveniente do fruto (Thomas *et al.*, 2011).

As fibras oriundas das folhas são as de maior interesse para serem utilizadas como reforço, embora fibras de talo, do caule e do fruto também possam ser usadas (Santiago, 2011). Segundo o mesmo autor, de uma maneira geral, as fibras das folhas são mais grossas que as fibras dos talos e são referenciadas como fibras “duras”, enquanto as fibras dos talos são chamadas de fibras “macias” e, portanto, mais próprias para fins têxteis. Neste trabalho foi utilizada a fibra vegetal do coco, proveniente do fruto da planta.

As características das fibras dependem das propriedades dos seus constituintes individuais, da estrutura fibrilar e da matriz lamelar (Bolaños, 2013). Mas, de um modo geral, as fibras apresentam uma mesma estrutura celular como pode ser visto na Figura 1 (Fidelis *et al.*, 2013). As fibras vegetais são, por si mesmas, materiais compósitos naturais por serem compostas por numerosas fibras individuais (fibrocélulas) unidas pelas lamelas médias (Silveira, 2018), as quais são constituídas de lignina, hemicelulose e pectina (Toledo Filho, 1997). Cada fibrocélula é composta por quatro partes principais, a saber, a parede primária, a parede secundária, a parede terciária e o lúmen. (Silva; Chawla; Tolêdo Filho *et al.*, 2000; Fidelis *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2017).

Assim, as fibras vegetais são como tubos microscópicos, onde o lúmen está entre as paredes celulares (Thomas *et al.*, 2011). Segundo Tolêdo Filho; England; Ghavami (1997), o lumen é a parte viva da célula, sendo responsável pela flexibilidade da fibra, pela elevada absorção de água e baixa massa específica aparente, características comuns às fibras vegetais.

Figura 1 - Estrutura hierárquica de uma fibra de sisal



Fonte: Melo Filho (2012).

Apesar de apresentarem uma mesma estrutura celular (paredes celulares, lamela média e lumens), as fibras vegetais se diferenciam por aspectos como a área transversal total, o número de fibrocélulas e espessura das paredes celulares, quantidade e área de lúmens. Esses fatores afetam a resistência mecânica das fibras (Fidelis *et al.*, 2013). Na Tabela 3 é mostrada a grande variabilidade das propriedades mecânicas de fibras vegetais.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas das fibras vegetais.

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

Fonte: Adaptado de Bledzki *et al.*, (1999); Satyanarayana *et al.*, (1982); Tomzack, (2010).

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

As paredes celulares são constituídas por micro fibrilas unidas por uma matriz de lignina e hemicelulose e apresentam diferentes orientações em cada parede celular (Silveira, 2018). As micro fibrilas possuem diâmetro de cerca de 10 – 30 nm e são constituídas por 30 – 100 moléculas de celulose (John; Anandjiwala, 2008; Thomas *et al.*, 2011; Dittenber; GangaRao, 2012). O ângulo micro fibrilar, ou ângulo médio, formado entre as micro fibrilas e o eixo da fibra varia de uma fibra para outra e pode ser o responsável por propriedades mecânicas das fibras (Defoirdt *et al.*, 2010). Fibras com pequenos ângulos, geralmente, apresentam maiores resistências e rigidez, enquanto fibras com maiores ângulos apresentam

comportamento dúctil (Defoirt *et al.*, 2010). A parede secundária (a mais espessa) é a grande responsável pelas propriedades mecânicas da fibra (Silveira, 2018).

A composição química das fibras vegetais é apresentada minuciosamente por Tolêdo Filho; England; Ghavami (1997). Consistindo, basicamente, em carboidratos (celulose e hemicelulose), lignina, pectina e minerais (Passos, 2005)

A celulose se apresenta, em geral, em estado cristalino, sendo o principal componente da parede celular, e o seu teor é o grande responsável pela resistência mecânica das fibras (Tolêdo Filho; England; Ghavami, 1997). Segundo Mohanty; Misra; Drzal, (2005), a celulose consiste em um polímero linear de glicose com elevado grau de polimerização e alto índice de cristalinidade. Ainda segundo o mesmo autor, constitui-se de um polissacarídeo, composto por unidades de anidro-glicose, as quais contêm grupos de hidroxila que estabelecem interações por ligações de hidrogênio intra e intermolecular e embora a estrutura química da celulose seja a mesma para diferentes fibras naturais, há variação no grau de polimerização, a qual afeta as propriedades mecânicas das fibras. O teor de celulose é o principal constituinte responsável pela resistência. A estrutura cristalina dos polímeros está relacionada à organização das cadeias poliméricas e afeta as propriedades mecânicas como rigidez e resistência. Quanto maior o grau de cristalinidade, melhor o alinhamento das cadeias e, portanto, maior a resistência (Canevarolo, 2006). O teor de celulose e de lignina se relacionam diretamente com o módulo de elasticidade e resistência à tração das fibras vegetais (Pino, 2005; Corradini *et al.*, 2009; Bolaños, 2013). Segundo Thakur; Singha (2010), fibras com alta concentração de celulose, com material celulósico de alto grau de polimerização e baixo ângulo micro fibrilar possuem alta resistência à tração.

A hemicelulose também presente na parede celular, é raramente ou nunca cristalina (Tolêdo Filho; England; Ghavami, 1997). A hemicelulose é formada por um grupo de polissacarídeos de massa molecular relativamente baixa, solúvel em água ou em soluções alcalinas, e compostas por cinco diferentes tipos de açúcares: manose, galactose, xilose, arabinose, além da própria glicose (Bolaños, 2013). Possui grande capacidade de absorção de água, devido entre outros fatores, à ausência de cristalinidade e à baixa massa molecular, contribuindo pouco na resistência mecânica das fibras (Perissoto, 2005).

O termo holocelulose é usado para caracterizar toda a parcela de carboidratos existentes na fibra, ou seja, a celulose e a hemicelulose. Além da holocelulose, as fibras contêm uma espécie de resina denominada lignina (Bolaños, 2013).

A lignina também presente na parede celular confere a esta resistência à compressão e rigidez (Tolêdo Filho; England; Ghavami, 1997). A lignina é um polímero amorfo constituído

por unidades de fenilpropano, sendo uma de suas funções, juntamente com a hemicelulose, agir como barreira à degradação causada por microrganismos, além de conferir rigidez à fibra (Perissoto, 2005). Segundo Passos (2005) fibras com alto teor de lignina serão de excelente qualidade e flexíveis. Como se verá mais a frente, a fibra de coco, material de estudo dessa pesquisa, possui alta concentração de lignina, o que lhe confere propriedades únicas.

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

Por serem naturais, a composição química e o percentual de cada componente variam de acordo com a espécie, a região da fibra onde é retirada a amostra, do estado de maturação, de fatores ambientais, como solo e clima, região de cultivo, entre outros (Perissoto, 2005). Segundo Canevarolo (2006) a composição química pode influir na resistência mecânica da fibra. A Tabela 4 apresenta a composição química de algumas fibras vegetais. A Tabela 5 apresenta trabalhos realizados com diferentes tipos de fibras vegetais.

Tabela 4 - Composição química de algumas fibras vegetais (%)

Fibra	Celulose	Hemicelulose	Lignina
Algodão	82,7	5,7	-
Juta	64,4	12	11,8
Linho	64,1	16,7	2
Rami	68,6	13,1	0,6
Sisal	65,8	12	9,9
Bagaço de cana	32-48	19-24	23-32
Folha de abacaxi	70-82	18	5-10
Folha de bananeira	60-65	6-8	5-10
Coco verde	23-43	3-12	35-45

Fonte: Adaptado de Silva; Jerônimo (2012)

Tabela 5 - Estudos de solos reforçados com fibras vegetais

Referência	Fibra	Solo	Teor de fibra (%)	Comprimento da fibra (mm)	Tipo de tratamento	Principais resultados encontrados
Kumar; Mir (2023)	Juta	X	0,25, 0,50, 0,75 e 1	Comprimento 30 mm; diâmetro 4 mm	Betume	A RCS passou de 0,87 kg/cm ² para 1,16 kg/cm ² com a adição de 1% de fibra não tratada
Yazici; Keskin (2023)	Cânhamo	Argiloso	0,05, 0,10, 0,15 e 0,20	Diâmetro 17 e 35 µm; Comprimento 24-50 mm	Materiais químicos: Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), epóxi e Cristal PIB 907.	Os maiores valores de tensão desviadora na ruptura, capacidade de absorção de energia e ângulo de atrito interno foram obtidos na amostra usando 0,10%.
Jishnua; Sankar; Chandrakaran (2020)	Fibra da folha de coco	Arenoso	1, 2 e 3	2,5cm	Não	Com um teor de 3% o fator de melhoria da resistência foi de 3,3
Bu <i>et al.</i> (2023)	Sisal	Argiloso	0,1, 0,3 e 0,6	40 mm	Não	A fibra reduz o desenvolvimento de fissuras longitudinais e laterais e valas rasas
Kanayama; Kawamura (2019)	Bambu	X	1, 3 e 5	Variado	Não	O LL e o LP do solo-fibra tenderam a aumentar com o aumento do teor de fibra e não houve alteração no índice de plasticidade do solo-fibra pela diferença do teor de fibra.
Bawadi <i>et al.</i> (2020)	Bananeira	Argiloso	0,3 0,5 e 1	Variado	Não	O teor de 1% melhorou a resistência ao cisalhamento
Carvalho (2019)	Curauá	Arenoso	0,5 e 0,75	25 e 50mm	Não	Os compostos com maior teor e comprimento tiveram maior ganho de resistência.
Koutenaiei; Choobasti; Kutanaei (2019)	Kenaf	Arenoso	0,3 e 0,6	Comprimento de 10 mm; diâmetro de 1,0 mm	Não	Aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento do teor de fibras.
Lopes; Casagrande (2022)	Açaí	Arenoso	0,5 e 1	Variado	Não	Compósitos solo-fibra apresentam maior resistência de pico e pós-pico que o solo puro

Fonte: Autora (2023).

2.3.4.1 Durabilidade das fibras vegetais – estudos experimentais

A biodegradação das fibras naturais é influenciada por diversos fatores, como temperatura, umidade, tipo de fibra, pH, teor de matéria orgânica e umidade do solo, entre outros (Silveira, 2018). O principal desafio associado à utilização de fibras naturais como reforço de solo é a perda de resistência à tração ao longo do tempo, resultante de efeitos físicos, químicos ou biológicos, ou uma combinação desses fatores. Dano físico pode ser classificado como a deterioração da lignina que mantém as fibras individuais em conjunto para formar a cadeia de fibra longa. Dano químico ocorre quando as cadeias moleculares nas fibras começam a quebrar. Danos biológicos ocorrem quando bactérias que vivem nas fibras passam a digeri-las. A primeira variável na determinação das taxas de degradação das fibras é considerada como sendo a lignina, que, por si só, é resistente à degradação, e que também diminui a degradação de outros componentes celulares (Chesson, 1997). Celulose por outro lado, serve como uma fonte imediata de energia para os microrganismos do solo e assim, promove a quebra de fibras. A lignina é conhecida por reduzir a degradação de celulose através da sua proteção (Isaac; Nair, 2005).

Como as fibras vegetais são compostas principalmente por celulose, esse componente está sujeito ao ataque de fungos e bactérias, que o decompõem e utilizam os produtos resultantes como fonte de alimento. As condições de umidade elevada no solo, causadas pela precipitação, potencializam a proliferação desses microrganismos, acelerando o processo de biodegradação das fibras e resultando em uma rápida deterioração (Alvarez e Illman, 2005; Costa, 2013). A ação das intempéries provoca a degradação dos compósitos, levando à perda de resistência e ductilidade (Toledo Filho, 1997).

De acordo com Alvarez; Illman (2005), bactérias, como os actinomicetos, e fungos, constituem a microflora natural do solo e nele podem agir sinergicamente durante a degradação e se reproduzem em condições naturais. Bactérias e fungos são os principais grupos de microrganismos responsáveis pela decomposição microbiana de materiais têxteis naturais. Em comparação com os fungos, as bactérias necessitam de mais umidade para o crescimento, de modo que elas não provocam deterioração tão frequentemente como os fungos (Joy *et al.*, 2011).

A presença de umidade é um dos fatores determinantes para a biodegradação das fibras vegetais. Conforme observado por Tolêdo Filho; England; Ghavami (1997), a umidade penetra na região amorfa das fibras, ocasionando o deslocamento das moléculas individuais de celulose e causando o inchaço das fibras. Martins (2014) destaca que a elevada capacidade

de absorção de água das fibras vegetais, que varia entre 100% e 200%, resulta de sua estrutura porosa.

Em um estudo conduzido por Tolêdo Filho; England; Ghavami (1997), fibras de sisal e coco foram submetidas a ensaios de imersão em água de torneira, medindo-se a massa a cada 24 horas. A saturação completa ocorreu após 10 dias de experimentação, com absorção de 230% para a fibra de sisal e 100% para a de coco, sendo a maior parte dessa absorção registrada nas primeiras 24 horas. A variação dimensional, medida por um micrômetro, revelou um aumento de diâmetro de 15% na fibra de sisal e 9% na de coco. Ao avaliar a durabilidade das fibras por meio de ensaios de tração, até 420 dias após serem imersas em água de torneira, constatou-se que, ao final desse período, as fibras de sisal e coco mantiveram, respectivamente, 83,3% e 77,2% de sua resistência original. A perda de resistência foi atribuída à provável ação microbiana.

Joy *et al.* (2011) investigaram o impacto da biodegradação ao longo do tempo e da profundidade em geotêxteis com fibras de coco em condições climáticas tropicais. Realizaram ensaios de resistência à tração em amostras de geotêxteis enterradas em solo laterítico a profundidades de 15, 45, 75 e 100 cm, recuperando essas amostras após 30, 60, 75, 105 e 120 dias. Concluíram que, de maneira geral, uma redução percentual da resistência à tração atingiu 70-90% após 120 dias. A biodegradação foi mais pronunciada a uma profundidade de 75 cm. Observaram que os materiais celulósicos se degradam mais intensamente pela atividade microbiana em profundidades mais rasas, em comparação com profundidades maiores, indicando que a redução da resistência pode estar relacionada ao ambiente alcalino em vez da umidade no solo. O que valida a importância da determinação do valor de pH do solo utilizado, dada a suscetibilidade química das fibras naturais de origem vegetal às variações da acidez ou alcalinidade própria do meio à que são sujeitas (Costa, 2013).

Lopes (2019) realizou experimentos utilizando amostras de solo argiloso laterítico e solo arenoso com diferentes concentrações de fibra de açaí (0,5% e 1,0%), tanto em ensaios de compressão simples quanto em ensaios de cisalhamento direto. Os testes foram conduzidos no tempo zero e em compósitos que foram expostos às condições ambientais por até 5 meses. Segundo o autor, a exposição das fibras de açaí ao envelhecimento natural resultou na diminuição de suas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, na redução da resistência dos compósitos solo-fibra. No entanto, as perdas de resistência não foram consideravelmente significativas, atingindo no máximo 30%.

Silveira; Casagrande (2021) comportamento e a durabilidade de solos reforçados com fibras vegetais (sisal e curauá) em uma matriz arenosa, submetidos ao envelhecimento natural

pela exposição às condições ambientais, através de ensaios triaxiais. A análise global dos resultados permitiu identificar que os efeitos do envelhecimento natural tiveram um efeito significativo no comportamento mecânico das fibras vegetais, o que consequentemente afetou o comportamento mecânico dos compósitos areia-fibra. As perdas de resistência ao cisalhamento foram mais relevantes e acentuadas nos compósitos com fibras de curauá, indicando que essas fibras, mesmo com maior resistência à tração sem exposição, são mais suscetíveis à degradação em ambientes naturais do que as fibras de sisal.

Vela Silveira; Ferreira; Casagrande (2022) estudaram através de ensaios triaxiais, os efeitos dos tratamentos superficiais com sílica e polímeros na biodegradabilidade das fibras de sisal e no comportamento mecânico da matriz arenosa reforçada com essas fibras, sendo os compósitos expostos às condições ambientais reais. O tratamento com sílica resultou na barreira mais eficaz contra a biodegradação das fibras, contribuindo para a durabilidade do compósito ao longo do tempo de exposição. Apesar do processo de degradação, tanto as fibras de sisal naturais quanto as tratadas superficialmente resultaram em parâmetros de resistência ao cisalhamento superiores aos do solo não reforçado.

2.4 Alterações nas propriedades dos solos pela inclusão de fibras

A maior parte das pesquisas conduzidas em materiais compostos direcionou seus esforços para a comparação do desempenho entre solos reforçados e não reforçados, analisando parâmetros de resistência ou deformabilidade.

As propriedades desejadas ao incorporar fibras dependerão da natureza específica da aplicação do composto, não sendo obrigatoriamente relacionadas ao aumento da resistência. Em um contexto de projeto para materiais sismo-resistentes, por exemplo, a prioridade será na melhoria da capacidade de absorção de energia, na ductilidade e na redução da perda de resistência após o pico (Martins, 2014).

A seguir serão apresentadas algumas experiências realizadas com solos reforçados com diferentes tipos de fibras, as alterações que ocorreram no comportamento mecânico e nas demais propriedades geotécnicas de misturas solo-fibras como, nos parâmetros de compactação, na resistência ao cisalhamento de pico, na resistência ao cisalhamento pós-pico, na deformabilidade, no modo de ruptura, na variação volumétrica e na condutividade hidráulica.

2.4.1 Influência na compactação

Al Wahab; Al-Qurna (1995) avaliaram os efeitos da inclusão de vários teores de fibra de polipropileno (0%; 0,5%; 1% e 2% em peso do solo seco) na curva de compactação de uma argila. Os resultados encontrados demonstraram um decréscimo da densidade aparente seca e um acréscimo na umidade ótima com o aumento do teor de fibras, porém essas variações não foram muito significativas. O mesmo comportamento sobre a curva de compactação foi observado por Mohamed (2013) que avaliou adições de até 1,5% de fibras de feno em uma matriz de solo argiloso.

O aumento da umidade e diminuição da massa específica aparente seca máxima na curva de compactação quando fibras vegetais são adicionadas ao solo também foi constatado por Prabakar; Sridhar (2002), Mirzababaei *et al.* (2013), Sarbaz; Ghiassian; Heshmati (2014), Lopes; Casagrande (2019), Faustino (2022) e Santos, M. (2023). Mirzababaei *et al.* (2013) atribui a diminuição do peso específico seco máximo à diferença entre a densidade das partículas do solo em comparação com a das fibras.

Ao compactar um solo laterítico reforçado com fibras de sisal, tratadas superficialmente com EPS (poliestireno expandido), Leocádio (2005) observou um aumento significativo em sua densidade seca máxima com a inclusão de fibras. Também pode perceber um aumento no teor de umidade ótimo, quando se aumentou o teor das fibras, com redução deste aumento da umidade ótima com o tratamento superficial. O autor justifica que o tratamento com EPS reduz a absorção de umidade das fibras de sisal.

Vários outros autores relataram não ter encontrado nenhuma alteração significativa na compactação com a inclusão de fibras (Maher; Ho, 1994; Nataraj *et al.*, 1996; Ulbrich, 1997; Consoli; Prietto; Ulbrich, 1999; Casagrande, 2001; Heineck, 2002; Gomes, 2018; Rocha, 2019).

Pinto (2007) também observou que a adição de fibras vegetais ao solo acarreta a aplicação de um maior esforço de compactação, em comparação aos espécimes sem fibras, para obtenção da mesma densidade, indicando que as fibras atuam absorvendo parte da energia imposta.

Diab *et al.* (2018) avaliou o efeito de dois métodos de compactação (de impacto e de amassamento) no comportamento mecânico não drenado de argilas reforçadas com fibras. Os resultados indicam que a melhoria na resistência é altamente dependente do método de compactação, pois amostras compactadas por impacto (método empregado em laboratório) resultaram em resistências até três vezes maiores do que amostras compactadas por

amassamento (método empregado em campo). Essa diferença de comportamento foi atribuída a modificações na orientação das fibras em função do tipo de compactação. Esta observação é significativa, pois indica que estudos experimentais que utilizam compactação por impacto podem produzir estimativas não conservativas da resistência ao cisalhamento não drenado que podem não ser representativas das condições de compactação em campo, que envolvem predominantemente amassamento.

Santos, I. (2023), Pedrosa (2021) e Almeida (2021), analisaram compósitos constituídos de solo, resíduos da construção civil e fibras, de polipropileno, polietileno tereftalato (PET) e sisal, respectivamente. Os autores relataram que a adição de fibras provocou mudanças na curva de compactação, com aumento da umidade ótima e redução da densidade seca máxima.

2.4.2 Resistência ao cisalhamento de pico

O aumento da resistência ao cisalhamento de pico com a inclusão de fibras foi verificado por diversos autores (Gray; Ohashi, 1983; Maher; Gray, 1990; Bueno *et al.*, 1996; Michalowski; Čermák, 2003; Heineck; Coop; Consoli, 2005; Consoli *et al.*, 2007; Ahmad; Bateni; Azmi, 2010; Jamei *et al.*, 2013; Diambra; Ibraim, 2015; Senez, 2016; Diab *et al.*, 2018; Oliveira Junior, 2018; Silveira, 2018; EsmailpourShirvani *et al.*, 2019; Lopes, 2019; Rocha, 2019; Gusmão, 2020; Sotomayor *et al.*, 2021; Alves, 2022; Silveira *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2022; Freitas, 2022; Reis, 2022; Santos; Casagrande, 2023; Santos, M., 2023).

Vários autores relataram apenas o aumento do intercepto coesivo com a inclusão de fibras (Nataraj *et al.*, 1996; Teodoro, 1999; Casagrande, 2001; Heineck, 2002; Prabakar; Sridhar, 2002; Leocádio, 2005; Santiago, 2011; Bolaños, 2013; Rocha, 2019) e outros autores relataram apenas o aumento do ângulo de atrito com a inclusão de fibras (Andersland; Kattak, 1979; Al Wahab; Al-Qurna, 1995; Teodoro, 1999; Heineck, 2002).

Taylor (2013), verificou que para haver um acréscimo de resistência pré- fissuração do compósito é necessário que a aderência do reforço com a matriz seja tal que impeça movimentos relativos entre as partes.

As fibras passam a exercer uma ação efetiva dentro da massa de solo quando esta é submetida a esforços externos, ou seja, quando sofre deformações. Os 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. As fibras ao serem

submetidas a esforços de tração transferem esforços para o solo, provocando uma redistribuição de tensões e, portanto, de deformações na matriz de solo. Assim, o comportamento das fibras é comandado pelas características de deformabilidade do solo e pela distribuição dessas deformações (McGown; Andrawes; Al-Hasani, 1978).

Muitos autores relatam haver identificado acréscimos na resistência pela inclusão de fibras ao solo. Alguns constataram um aumento da resistência de forma linear com o aumento da quantidade de reforço (Gray; Ohashi, 1983; Gray; Al-Refeai, 1986), enquanto outros constataram um aumento não linear.

Heineck (2002) constatou uma bi linearidade na envoltória de ruptura de uma areia siltosa com cinzas de carvão reforçada com fibras. A parte inicial da envoltória possui um intercepto coesivo praticamente inexistente e aumentos significativos no ângulo de atritos em comparação com o solo sem reforço. Já na segunda parte da envoltória, acima da tensão confinante crítica, o ângulo de atrito é semelhante ao do solo sem reforço, entretanto, há um acréscimo razoável do intercepto coesivo. A bi linearidade foi também observada por vários autores (Gray; Ohashi, 1983; Gray; Al-Refai, 1986; Maher; Gray, 1990; Stauffer; Holtz, 1995; Teodoro, 1999; Casagrande, 2005; Shewbridge; Sitar, 1989; Jewell; Wroth, 1987). Teodoro; Bueno (1998) e Teodoro (1999) concluíram que as envoltórias tendem a bi linearidade à medida que o teor e o comprimento das fibras aumentam.

Andersland; Kattak (1979) observaram a existência de uma grande taxa de acréscimo de resistência com a deformação, mesmo para níveis elevados de deformação axial (20%), para um compósito com 40% de fibra (constituída quase 100% por celulose) e 60% de caulinita. Comportamento semelhante também foi observado por Feuerharmel (2000). Que verificou que o comportamento resistente dos solos reforçados pode ser dividido em três etapas: a) inicial, onde o comportamento é controlado basicamente pela matriz de solo; b) intermediária, na qual o comportamento do material compósito é comandado juntamente pela matriz e pelos elementos de reforço; c) final, onde o comportamento do material é comandado exclusivamente pelas fibras. Curcio (2008) corrobora esse comportamento afirmando que o material compósito parece ser inicialmente controlado unicamente pela matriz de solo, à medida que crescem as deformações, o comportamento passa a ser controlado pela matriz e pelas fibras.

Bueno *et al.* (1996) elaborou um estudo comparativo entre um material granular e um coesivo reforçados por fibras, observando que os solos coesivos são menos sensíveis ao aumento do comprimento das fibras, através de estudos de ensaios triaxiais com amostras

reforçadas, onde se observou um acréscimo no ângulo de atrito com a adição do reforço, sendo este maior com o aumento do teor de fibras.

Ranjan; Vasan; Charan, (1996) observaram que a curva tensão x deformação de uma areia fina reforçada com fibras distribuídas aleatoriamente, tanto sintéticas quanto naturais, exibiu tendências a crescimento mesmo a deformações axiais de ordem de 20%. Teodoro (1999) observou um aumento na resistência de uma areia siltosa reforçada com o aumento no comprimento das fibras de polipropileno (5, 10 20 e 30 mm), evidenciando a influência do comprimento na resistência ao cisalhamento.

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

Santos (2020), analisou o comportamento de um solo erodível de uma encosta após a incorporação de resíduos de construção civil e fibras de coco. O autor relatou que a inserção dos materiais levou ao melhoramento do solo, apresentando ganhos na resistência quando comparado ao solo sem reforço, indicando que a técnica é efetiva.

2.4.3 Resistência ao cisalhamento pós-pico

Quase todas as pesquisas que investigaram o comportamento de solos reforçados em relação à resistência concluíram que a incorporação de fibras reduz a queda da resistência pós-pico (Gray; Ohashi, 1983; Gray; Al-Refeai, 1986; Fatani *et al.*, 1991; Ranjan; Vasan; Charan, 1996; Consoli *et al.*, 1997; Consoli *et al.*, 1999; Consoli *et al.*, 2002; Donato *et al.*, 2004; Donato, 2007; Casagrande, 2005 e Festugato, 2008; Oliveira Junior, 2018; Silveira, 2018; Rocha, 2019; Sotomayor *et al.*, 2021; Freitas, 2022; Silveira *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2022; Santos *et al.* 2022; Santos, M., 2023; Santos; Casagrande, 2023). O verdadeiro potencial dos materiais compósitos fibrosos é atingido após o pico, quando as fibras têm um impacto relevante no aumento da resistência do material e, por conseguinte, na sua capacidade de absorver energia, como indicado por Casagrande (2005).

Andersland; Kattak (1979), Ranjan; Vasan; Charan (1996), Feuerharmel (2000), Santoni; Tingle; Webster, (2001), Casagrande; Consoli (2002) e Santiago (2011) relataram um crescimento constante da resistência com o aumento da deformação axial, caracterizando um comportamento elasto-plástico de endurecimento. Para Santiago (2011) existe um valor

para o índice de forma da fibra a partir do qual o comportamento de endurecimento (hardening) passa a ser mais nítido.

Lirer; Flora; Consoli (2012) estudou o comportamento de um compósito de uma areia com pedregulho e fibras de polipropileno. Para grandes deformações, o comportamento resistente do material com reforço e sem reforço é similar, isto quer dizer que a adição das fibras na areia com pedregulhos não contribui positivamente na resistência do material quando ele sofre grandes deformações.

2.4.4 Deformabilidade

McGown *et al.* (1985) observaram um acréscimo no módulo de deformação com o aumento do teor de fibras para areias reforçadas. O mesmo comportamento foi observado para solos argilosos (Maher; Ho, 1994; Nataraj *et al.*, 1996). Em contrapartida, Ulbrich (1997) constatou uma diminuição do módulo ao se reforçar um solo arenoso artificialmente cimentado com fibras de vidro. A deformabilidade dos compostos é dependente das características da matriz e do elemento de reforço.

De acordo com Freitag (1986), as curvas de tensão x deformação de um solo residual de calcário compactado e reforçado com fibras sintéticas de 20 mm de comprimento, apresentou deformação até a ruptura significativamente maior em comparação com o solo não reforçado, evidenciando uma maior capacidade de absorção de energia durante a aplicação das cargas.

Em um estudo conduzido por Consoli; Casagrande; Coop (2007) com uma areia reforçada com fibras de polipropileno de diferentes comprimentos, submetida a elevadas deformações cisalhantes por meio de ensaios de cisalhamento direto, houve um aumento na resistência ao cisalhamento do solo reforçado com o aumento do comprimento das fibras. Os pesquisadores também observaram, através da exumação das fibras após os testes, que à medida que as deformações cisalhantes nos ensaios aumentavam, mais as fibras eram rompidas. Isso sugere que as fibras se alongam até que as deformações do ensaio ultrapassem a deformação de ruptura das fibras, embora elas sofram deformações plásticas antes de se romperem.

Santos, M. (2023) investigou a interação das fibras vegetais de açaí e coco com um solo tropical ao longo do tempo, com os teores de 1% e 2%. Foi observado aumento da deformabilidade dos compósitos para ambas as fibras. Com a fibra de coco, ocorreu um aumento na deformabilidade que passou de 1,43% no solo sem reforço, para 1,67% nos dois

teores estudados. Com a fibra de açaí, enquanto o solo sem reforço apresentou uma deformação de 1,43%, essa deformação aumentou para 2,82% no caso do solo reforçado com 1,0% de fibras e para 2,54% no caso do solo reforçado com 2,0% de fibras.

2.4.5 Modo de ruptura

A observação de um aumento na ductilidade do solo com a introdução de fibras é consensual entre vários autores que investigaram essa propriedade (Hoare, 1994; McGown *et al.*, 1985; Maher; Ho, 1994; Nataraj *et al.*, 1996; Consoli; Prietto; Ulbrich, 1999; Ghavami; Tolêdo Filho; Barbosa, 1999; Casagrande, 2005; Martins, 2014; Claria; Vettorelo, 2016; Tang *et al.*, 2016; Kutanaei; Choobbasti, 2016; Oliveira, 2018; Silveira, 2018; Abbaspour *et al.*, 2019; Menezes *et al.*, 2019; Silveira *et al.*, 2022; Freitas, 2022; Santos, M., 2023), sendo mais notável à medida que o teor de fibras aumenta.

Montardo (1999), chegou à conclusão de que a adição de fibras de polipropileno ao compósito com uma matriz de solo arenoso artificialmente cimentado, provoca uma alteração significativa no seu modo de ruptura. Com a incorporação das fibras, o comportamento do material na ruptura, que era inicialmente frágil, transforma-se em um comportamento dúctil. Estas conclusões foram derivadas da análise dos índices de fragilidade e da observação visual da presença ou ausência de planos de ruptura nos corpos de prova rompidos. Concluiu ainda que a inclusão de fibras PET reduziu sensivelmente o índice de fragilidade da matriz cimentada, mas não foi suficiente para expressar uma modificação no modo de ruptura da matriz cimentada, e que a inclusão de fibras de vidro não modificou o modo de ruptura do material. A inclusão de fibras rígidas com elevado módulo de elasticidade, como a PET, geralmente resulta na sua separação da matriz, levando a um comportamento de ruptura dúctil, conforme apontado por Consoli *et al.* (2002).

Specht (2000) analisou os efeitos da inclusão de fibras poliméricas com diferentes propriedades mecânicas, distinguindo entre um tipo de filamento e outra fibrilada (tipo mesh) em um solo artificialmente cimentado. Os resultados indicaram que a inclusão de fibras mais alongáveis, como em forma de filamento, alterou o comportamento do material de frágil para dúctil. No entanto, para as fibras mais rígidas, do tipo fibrilada, não houve uma alteração evidente no modo de ruptura do material.

Mirzababaei *et al.* (2013) investigaram o efeito de dois tipos de fibras provenientes de resíduos de carpetes na resistência a compressão simples de dois solos argilosos. Em amostras de solo não reforçadas, os padrões de ruptura mostraram planos de cisalhamento quase

vertical. Com o aumento do teor de fibras, o padrão de ruptura evoluiu gradualmente para um abaulamento plástico com redes de pequenas fissuras, sem um plano de cisalhamento aparente na ruptura. Amostras de solo não reforçadas exibiram um comportamento frágil, rompendo com uma deformação axial muito pequena (ou seja, menos de 1%), enquanto amostras com 5% de teor de fibra romperam com uma deformação axial relativamente maior (ou seja, 15% ou mais), demonstrando um comportamento de endurecimento e dúctil.

Brito (2022) investigou o comportamento mecânico de misturas de solo-cimento reforçadas com fibras de coco, destinadas a subcamadas de pavimento. Essas misturas, além de incluir solo e cimento, eram compostas por agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição. O autor relata que a inserção de fibras de coco alterou o comportamento mecânico das misturas, tornando-as mais dúcteis, que deverá implicar em uma menor reflexão de trincas para o revestimento, no caso da utilização em camadas de base de pavimento.

Santos, I. (2023) e Pedrosa (2021) analisaram através de ensaios de resistência a compressão simples, compósitos de solo e resíduos da construção civil com a introdução de fibras sintéticas, de polipropileno e de polietileno tereftalato (PET), respectivamente. Ambos observaram rupturas característica de materiais dúcteis. Santos, I. (2023) ainda acrescenta que as curvas de tensão e deformação dos compósitos com fibras, além de apresentar uma ruptura com características dúcteis, apresentou crescimento contínuo, tanto da resistência à compressão como da deformação, com o aumento da idade de ruptura.

2.4.6 Variação volumétrica

Stauffer; Holtz (1995) verificou, através de ensaios triaxiais, que a inclusão de fibras sintéticas em uma matriz de solo arenoso, resulta em um aumento das deformações volumétricas de compressão na ruptura. A compressão foi maior em uma areia uniforme em comparação com uma areia bem graduada, ambas com o mesmo diâmetro médio (D_{50} – assim: d_{50}).

Bueno *et al.* (1996) também observaram um aumento na compressibilidade do solo com a adição de fibras. De acordo com Shewbridge; Sitar (1989), a deformação volumétrica aumenta com o aumento da quantidade de reforço, mas de maneira não linear, em concordância com as observações de Nataraj *et al.* (1996).

Oliveira Junior (2018), observou em ensaios de adensamento, que a compressibilidade das misturas aumentou à medida que o teor de fibras de coco foi aumentado. Os principais

efeitos observados da adição de fibras de coco foi o aumento da inclinação das curvas de compressibilidade, no trecho de compressão primária, a redução da tensão de sobre adensamento e o aumento do índice de compressão e descompressão, com o aumento do teor de fibras no compósito.

Pesquisadores como Aguilar (2015), Bernardina (2019) e Conceição (2021), que analisaram ensaios triaxiais em areias reforçadas, não identificaram uma correlação substancial entre o comportamento volumétrico do solo com e sem reforço.

Reis (2022) analisou a introdução de diferentes teores de fibra coco (0; 0,5; 1,0 e 1,5%) em uma matriz de solo areno siltoso através de ensaios triaxiais do tipo CD em três tensões confinantes (50, 100 e 200 kPa). A autor constatou que a adição de fibras não alterou de forma significativa o comportamento de variação volumétrica, exceto para o teor de 1,5%, nas confinantes de 100 e 200 kPa, que experimentaram menor dilatação quando comparados aos outros compósitos. Sendo possível observar também que para a maior tensão confinante utilizada, com o aumento do teor de fibras houve maior variabilidade na variação volumétrica das amostras.

2.4.7 Condutividade hidráulica

Maher; Ho (1994), que investigaram as propriedades hidráulicas de um compósito de caulinita/fibra por meio de ensaios de condutividade hidráulica. Eles constataram que a inclusão de reforços fibrosos, como polipropileno e vidro, resultou em um aumento na permeabilidade da argila estudada, sendo mais expressivo em compósitos com-teores de fibra mais elevados.

Feurharmel (2000) destaca que a adição de fibras e cimento a um material argiloso resulta em valores significativamente mais elevados de condutividade hidráulica do compósito em relação ao solo. Esse aumento é atribuído à floculação das partículas argilosas que se aglomeram em torno das partículas de cimento, favorecendo a segregação das fibras e a formação de vazios.

Al Wahab; El-Kedrah (1995) observaram um aumento significativo na condutividade hidráulica, superior a uma ordem de grandeza, ao se adicionar 2% de fibra (polipropileno) em uma matriz de solo argiloso. Bueno *et al.* (1996) indicaram uma redução da permeabilidade em aproximadamente uma ordem de grandeza, resultante da introdução de fibras de polipropileno em solos mais grossos. Isso pode ser devido ao fato de que as inclusões funcionam como uma barreira, assim bloqueando o fluxo de água. Solos reforçados, menos

permeáveis, como os solos argilosos, ao contrário, apresentam um aumento considerável na condutividade hidráulica, quando comparado aos solos sem reforço. Nesse caso a fibra pode criar caminhos de fluxo preferenciais que facilitam a passagem de água.

De acordo com Heineck (2002) e Heineck *et al.* (2003), a introdução de 0,5% de fibras de polipropileno com 24mm não provocou alterações expressivas na condutividade hidráulica avaliada para todas as matrizes estudadas (solo residual de arenito, cinza de fundo, areia e caulim). Esse comportamento pode ser atribuído ao teor de fibras utilizado. Podendo não ter sido suficientemente expressivo para provocar mudanças na condutividade hidráulica das matrizes estudadas.

Oliveira Junior (2018) não observou alterações na condutividade hidráulica saturada das misturas de solo argiloso e fibras de coco (até 1% de teor de fibra) devido à maior adesão solo-fibra para esta proporção de mistura. No entanto, para a mistura com o teor de 2% de fibras a condutividade hidráulica do compósito foi aumentada em cerca de uma ordem de grandeza. O que pode ser atribuído ao alto teor de fibras. Pois o aumento do teor de fibras promoveu o aumento da porosidade, assim como, com a maior quantidade de tecidos vegetais a predominância de contatos fibras-fibras, favorecendo o fluxo de água.

Nos estudos conduzidos por autores como Conceição (2021) e Pinto (2021), nos quais os compósitos foram preparados com um índice de vazios constante, observou-se que a permeabilidade geralmente não apresenta variações significativas.

2.5 Parâmetros que influenciam no comportamento de solos reforçados

Abaixo, são apresentados os principais parâmetros que influenciam no comportamento dos compostos reforçados com fibras, baseado em resultados apresentados na literatura. A influência de todos os parâmetros sobre o comportamento hidromecânico do compósito pode variar em função da natureza das fibras e das matrizes utilizadas nos diferentes estudos.

2.5.1 Comprimento da fibra

Quanto maior o comprimento da fibra, maior a resistência do compósito, sendo esse aumento é observado até certo limite, a partir do qual este efeito não é mais observado. Existe um comprimento ideal de fibras que proporciona maior resistência ao composto (Gray; Ohashi, 1983; Ulbrich, 1997; Santoni; Tingle; Webster, 2001; Heineck, 2002; Vendruscolo, 2003; Prabakar; Sridhar, 2002; Santiago *et al.*, 2012; Bolaños, 2013). Fibras muito longas e

finas, por exemplo, apresentam problemas de emaranhamento e eficácia reduzida (Consoli *et al.*, 2009).

Em uma análise de compósitos de areia com fibras de polipropileno, de diferentes comprimentos, sujeitos a consideráveis deformações de cisalhamento em ensaios de cisalhamento direto, Consoli *et al.* (2007) concluíram que o comprimento da fibra é proporcional ao aumento da resistência ao cisalhamento do solo. De acordo com Casagrande (2005), o acréscimo na resistência associado ao aumento do comprimento da fibra ocorre por que fibras mais longas apresentam uma maior ancoragem dentro da amostra. Para Taylor (2013), a probabilidade de arrancamento das fibras diminui à medida que o comprimento delas aumenta.

Maher; Ho (1994) demonstram, em compósitos com mesmo teor de fibras, mas com comprimentos de fibras diferentes, que fibras relativamente mais curtas tendem a ter uma presença mais frequentes na superfície de ruptura, contribuindo para um aumento na resistência. No entanto, após uma ruptura, as fibras mais curtas são arrancadas mais facilmente, destacando a importância de fibras mais longas na melhoria da ductilidade e da capacidade de absorção de energia. Ulbrich (1997) e Montardo; Consoli; Prietto, (2002) afirmaram que o aumento do comprimento da fibra está associado a um aumento na capacidade de absorção de energia. Michalowski; Čermák (2003) sugerem que o comprimento da fibra deve ser pelo menos uma ordem de grandeza maior do que o tamanho do grão para ativar o mecanismo de interação fibra-solo. Para Wei *et al.* (2018) o comprimento ideal das fibras corresponde a aproximadamente 30 a 40% do diâmetro da amostra.

2.5.2 Resistência da fibra

O incremento na resistência das fibras resulta em um aumento na ductilidade do compósito, dado que não haja ruptura nas ligações de aderência. A resistência exigida para o compósito dependerá das características pós-pico desejadas, bem como do teor de fibras e das propriedades de aderência entre fibra-matriz (Casagrande, 2005; Hejazi *et al.*, 2012).

2.5.3 Diâmetro da fibra

As fibras com menor diâmetro oferecem uma interação mais eficaz entre solo e fibra, permitindo uma mobilização sucessiva das mesmas e contribuindo para a melhoria do

comportamento mecânico do material (Casagrande, 2005). De acordo com Vendruscolo (2003), o aumento no diâmetro das fibras resulta em uma diminuição da tensão de ruptura do compósito. Isso deve ao fato de que, para um mesmo teor de fibras, a quantidade de fibras diminui na matriz.

2.5.4 Teor da fibra

De modo geral, à medida que o teor de fibra aumenta são obtidos maiores ganhos de resistências mecânicas, até certo ponto onde este ganho deixa de ser observado. Há certo teor ótimo de fibra que confere melhores propriedades mecânicas ao compósito (Gray; Ohashi, 1983; Al-Refai, 1986; McGown *et al.*, 1985; Fatani; Bauer; al- Joulani, 1991; Maher; Ho, 1994; Gray; Specht, 2000; Santoni; Tingle; Webster, 2001; Casagrande *et al.*, 2002; Vendruscolo, 2003; Casagrande; Coop; Consoli, 2006; Consoli; Coop; Casagrande, 2007; Santiago *et al.*, 2012; Bolaños, 2013; Palacios *et al.*, 2015; Bolaños, 2013; Oliveira Junior, 2018; Bernardina, 2019). Segundo Gray; Ohashi (1983), Maher; Ho (1994), Ulbrich (1997) e Montardo; Consoli; Prietto, (2002), o aumento do teor de fibra provoca aumento a capacidade de absorção de energia de deformação. Para Taylor (2013), um alto teor de fibras confere maior resistência pós-fissuração e menor dimensão das fissuras, desde que as fibras possam absorver as cargas adicionais causadas pela fissura.

2.5.5 Orientação das fibras

Johnston (1994), destaca que a orientação e a distribuição das fibras na matriz exercem uma influência significativa sobre a sua resistência. A disposição de uma fibra em relação ao plano de ruptura determina sua capacidade de contribuição para a transferência de cargas. Se uma fibra estiver disposta paralelamente ao plano de ruptura, ela não possui efeito; no entanto, quando uma fibra se posiciona perpendicularmente a esse plano, ela contribui plenamente com a sua capacidade de resistência à tração. O reforço deve ser posicionado no sentido das deformações de tração do solo (Consoli; Moraes; Festugato, 2011; Consoli; Rocha; Silvani, 2014; Festugato *et al.*, 2017; McGown; Andrawes; Al-Hasani, 1978; Fatani *et al.*, 1991; Morel; Gourc, 1997; Diambra *et al.*, 2007). Vale ressaltar que a compactação de misturas de solos com fibras proporciona uma orientação preferencial quase que horizontal das fibras (Diambra *et al.*, 2007; Özkul; Baykal, 2007). Portanto, é necessário ter uma atenção especial na homogeneização dos materiais, que pode ser alcançada por meio do uso de

equipamentos dedicados para garantir a uniformidade na distribuição das fibras e evitar qualquer predominância de orientação específica das fibras no solo, o que poderia afetar significativamente o desempenho mecânico da mistura, conforme mencionado por Palmeira (2018).

Nyuin; Khalil; Petrus (2018) analisaram a introdução de fibras de coco em matrizes arenosas (areia grossa e fina) através de ensaios de cisalhamento direto. As fibras foram colocadas em três orientações distintas (vertical, horizontal e aleatória). O melhor resultado foi apresentado pela areia grossa com orientação aleatória das fibras.

2.5.6 Distribuição das fibras

Fibras distribuídas aleatoriamente mantêm a resistência isotrópica, não sendo observados planos potenciais de fragilidade (Gray; Al-Refai, 1986; Gray; Maher, 1989; Maher; Gray, 1990; Palacios *et al.*, 2015; Casagrande *et al.*, 2002; Casagrande; Coop; Consoli, 2006; Peter *et al.*, 2016; Yixian *et al.*, 2016; Menezes *et al.*, 2019; Jha, 2019; Reis, 2022). Jha (2019) determinam a diminuição da perda de resistência pós-pico como uma das principais vantagens da distribuição aleatória de fibras. Tang *et al.* (2016) apontam outra vantagem, a simplicidade de incorporação das fibras na matriz, já que podem ser adicionadas da mesma maneira que o cimento, a cal e outros aditivos estabilizantes.

2.5.7 Módulo de elasticidade da fibra

McGown *et al.* (1978) notaram que o comportamento do solo reforçado, em termos de tensão x deformação, é significativamente influenciado pelas propriedades de resistência e deformabilidade dos elementos de reforço. Os pesquisadores propuseram categorizar o reforço de solos com base na deformabilidade do reforço, distinguindo entre inclusões extensíveis e não extensíveis. As inclusões extensíveis têm uma deformação de ruptura maior que a máxima deformação de tração do solo sem reforço, contribuindo principalmente para aumentar a ductilidade, reduzir a perda de resistência pós-pico e proporcionar um acréscimo na resistência mecânica. Em contraste, as inclusões não extensíveis têm uma deformação de ruptura menor que a máxima deformação de tração no solo sem reforço, oferecendo ganho de resistência mecânica, mas, rupturas catastróficas podem ocorrer se o reforço romper. Fibras com módulo de elasticidade baixo comportam-se como reforços idealmente extensíveis, ou seja, não rompendo durante o ensaio (Gray; Ohashi, 1983; Specht, 2000; Shukla, 2017).

Para Montardo (1999), Specht (2000) e Gray; Ohashi (1983) fibras com módulo baixo não contribuem para o aumento da resistência mecânica. Segundo Shewbridge; Sitar (1990), Taylor (2013) e Festugato (2011) quanto maior o módulo maior a probabilidade de haver o arrancamento das fibras.

Silveira (2018), Bernardina (2019) e Santos, M. (2023), realizaram ensaios de tração em diferentes fibras vegetais submetidas ao processo de envelhecimento natural decorrente da exposição agentes climáticos em tempos de exposição de crescimento progressivo. As autoras constaram a diminuição do módulo de elasticidade e da resistência das fibras com o aumento o tempo de exposição. Fatores que podem ser atribuídos a perda de resistência dos compósitos com o aumento do tempo de exposição.

2.5.8 Aderência fibra matriz

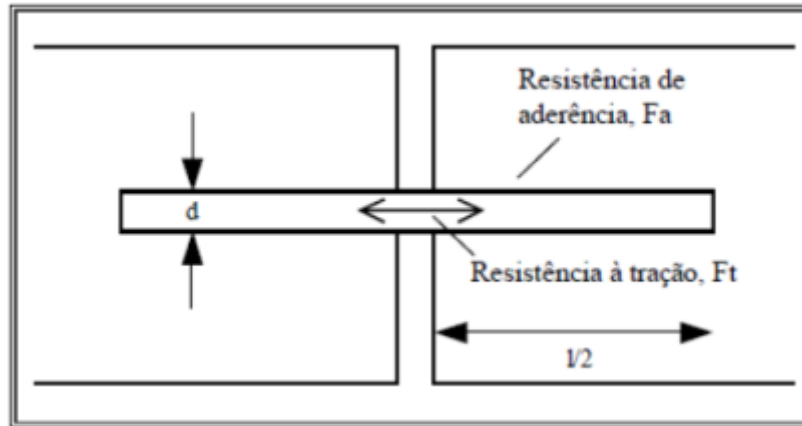
Para Taylor (2013), as fibras devem estar bem aderidas à matriz do compósito para que a sua resistência à tração seja mobilizada. Uma alta aderência entre a fibra e a matriz reduz o tamanho das fissuras e amplia sua distribuição pelo compósito. Segundo Casagrande (2005), as características de resistência, deformação e padrões de ruptura de uma grande variedade de compósitos reforçados com fibras dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. A força de adesão da matriz ao reforço é o que mobiliza a resistência à tração da fibra após transmissão do carregamento da matriz para o reforço. A compatibilidade entre a matriz e a fibra pode favorecer adesão eletrostática e o processo de compactação favorece a adesão do tipo mecânica (Donato, 2007; Tang *et al.*, 2007; Tang; Shi; Zhao, 2010; Anagnostopoulos; Tzetzis; Berketis, 2013). Nas regiões de interação solo-fibra, há maior quantidade de vazios, e com isso, pouca adesão dos materiais (Castro, 2020). Para Marçal (2019), quanto maior a diversidade de tamanhos (diâmetros) dos grãos maior será a força de ligação na interface solo-fibra e, portanto, maior será a resistência mecânica do compósito.

2.5.9 Fator de forma

O comprimento e o diâmetro da fibra são importantes para manter juntas as interfaces das fissuras que possam ocorrer no solo devido a esforços de tração. A relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra (l/d), denominado de fator de forma, é proporcional ao quociente entre a resistência à tração da fibra (F_t) e a resistência da aderência fibra/matriz (F_a). No caso de fibras com alta resistência à tração, como por exemplo as fibras de aço, é

necessário que a resistência de aderência seja elevada para evitar o arrancamento antes que a resistência à tração seja completamente mobilizada, senão devem ser usadas fibras com elevado fator de forma. Illston (1994) e Taylor (2013) propõem uma formulação do equilíbrio de forças, quando a fibra é solicitada no compósito, conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 - Forças componentes do compósito durante um carregamento



Fonte: Taylor (2013).

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot F_t = \pi \cdot d \cdot \frac{l}{2} \cdot F_a \quad (1)$$

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

Gray; Maher (1989), Michalowski; Čermák (2003) e Ibraim *et al.* (2010) observaram que as fibras com um alto fator de forma apresentam maior contribuição no aumento da resistência ao cisalhamento do que quando comparadas às fibras com menor fator de forma. Conforme apontado por Qu; Sun (2016), um elevado fator de forma contribui de duas maneiras para o aumento da resistência ao cisalhamento do compósito: a) o número absoluto de fibras (volume) é relativamente maior para um mesmo teor de fibras, e b) a área de contato entre as fibras e as partículas do solo também se torna mais extensa, resultando em um aumento significativo do atrito solo-fibra.

De acordo com Maher; Gray (1990) o aumento na resistência está relacionado às características tanto da areia (incluindo sua granulometria, tamanho e forma das partículas) quanto da fibra (teor, fator de forma e módulo). A resistência tende a diminuir à medida que o tamanho médio e a esfericidade das partículas de areia aumentam. Por outro lado, observa-se

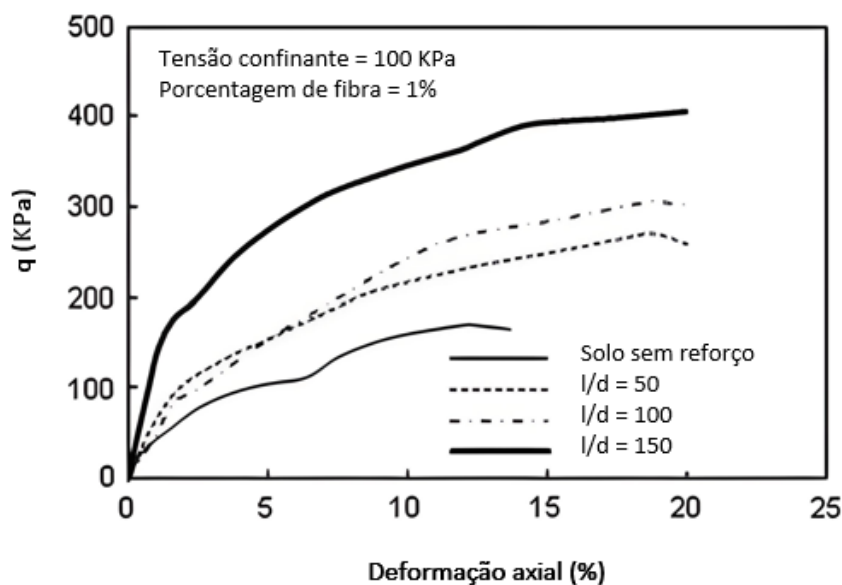
um aumento na resistência com o incremento do coeficiente de uniformidade da areia, do teor de fibras, do módulo das fibras e da relação entre o comprimento (l) e o diâmetro (d) das fibras.

Ranjan; Vasan; Charan (1996) conduziram uma série de ensaios de compressão triaxial em solos granulares reforçados com fibras naturais e sintéticas distribuídas de forma aleatória. O objetivo era investigar como as características das fibras (teor, relação l/d , superfície de fricção) e as propriedades dos solos influenciam na resistência ao cisalhamento. A partir dos resultados obtidos, os autores identificaram a presença de uma tensão confinante crítica. Eles observaram que aumentar a relação l/d das fibras resulta em uma redução na tensão confinante crítica, indicando que as fibras são suscetíveis ao arrancamento apenas dentro de um intervalo limitado de tensão de confinamento.

Em um estudo realizado por Festugato (2008) sobre o uso de fibras de polipropileno em solo arenoso, foi observado que o fator de forma das fibras teve um impacto direto no intercepto coesivo da amostra, enquanto o ângulo de atrito não foi afetado. Os resultados indicaram que um maior fator de forma resultou em um intercepto coesivo mais elevado. Esse mesmo padrão foi corroborado por Santiago (2011), que examinou solo arenoso reforçado com fibras de curauá e sisal. Segundo o mesmo autor, quanto maior o fator de forma da fibra, maior a taxa de ganho e o ganho de resistência. No entanto, isto não foi observado quando se comparou as fibras de curauá e de sisal, pois embora as fibras de curauá apresentassem maior fator de forma e melhores propriedades mecânicas, o material reforçado com estas fibras não apresentou o maior ganho de resistência. O que o autor atribui ao fato das fibras de sisal serem mais trabalháveis, permitindo, portanto, uma melhor homogeneização da mistura solo-fibra.

Maliakal e Thiyyakkandi (2012) realizaram um estudo sobre um solo argiloso reforçado com fibras de coco, com uma concentração de 1,0%. Por meio de ensaios triaxiais CU, observaram que o aumento do fator de forma das fibras teve um impacto direto na tensão desviadora máxima da amostra, conforme ilustrado na Figura 3.

Gráfico 1 - Tensão-deformação de um solo reforçado com fibras de coco em diferentes fatores de forma



Fonte: Modificado de Maliakal e Thiyyakkandi (2012).

Silveira (2018) e Bernardina (2019) analisaram, através de ensaios triaxiais, o comportamento mecânico de compósitos constituídos de uma matriz de solo arenoso com a introdução de diferentes tipos de fibras com comprimento de 25mm, submetidos ao envelhecimento natural. Silveira (2018), ao analisar compósitos com fibras de sisal e curauá, constatou que a fibra de curauá contribui mais significativamente no aumento da resistência da matriz arenosa (amostra de controle), mas após o período de exposição sua contribuição passou a ser semelhante a do compósito de fibra de sisal também exposto. A maior contribuição inicial e a maior susceptibilidade à degradação, a autora atribuiu ao maior fator de forma da fibra de sisal. Bernardina (2019) analisou diferentes fibras (polipropileno e as fibras vegetais de coco, sisal e curauá) e dentre as fibras vegetais analisadas, a fibra de coco foi a que apresentou menos susceptibilidade à degradação. A autora atribuiu o resultado ao alto teor de lignina e o seu menor fator de forma (L/D).

Carvalho (2019) avaliou o comportamento mecânico de compósitos solo-fibra através da inserção de fibras naturais de sisal, curauá e coco. O comportamento tensão x deslocamento foi avaliado por meio de ensaios de cisalhamento direto. Os ensaios se deram fazendo uso de fibras com 25 e 50 mm de comprimento, nos teores de 0,5 e 0,75% de fibra, em uma densidade relativa de 50% e 10% de umidade. Os resultados demonstraram que o compósito solo-fibra de coco com comprimento de 50 mm e teor de 0,75% de fibra, foi o que apresentou os melhores parâmetros de resistência, devido ao fato desta fibra apresentar

diâmetros menores, resultando em maior quantidade de fibras na matriz, bem como em alongamento mais efetivo após o ensaio (cerca de 40% maiores do que o comprimento inicial).

2.6 Fibra de coco

2.6.1 Histórico

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

O coqueiro não é uma espécie nativa do Brasil, não estava aqui no momento da chegada dos portugueses, em 1500, sendo introduzido no Brasil no ano de 1553, no Estado da Bahia (razão de ser chamado também de “coco-da-baía”), procedendo das ilhas de Cabo Verde (Bolaños, 2013). O coqueiro se disseminou facilmente no litoral nordestino e outras regiões do país por ser uma frutífera típica de clima tropical (Cintra *et al.*, 2009; Silva, 2014). A origem remota desse material seria a Índia ou Sri Lanka e posteriormente teriam sido introduzidos em Moçambique (Siqueira; Aragão; Tupinamba, 2002).

As primeiras referências da presença dessa espécie em território nacional aparecem no “Tratado Descritivo do Brasil”, escrito por Gabriel Soares de Souza em 1587, em um trecho com os seguintes dizeres: “As palmeiras que dão os cocos se dão bem na Bahia, melhor que na Índia, porque metendo um coco debaixo da terra, a palmeira que dele nasce dá coco em cinco e seis anos, e na Índia não dão, estas plantas, frutos em vinte anos” (Bondar, 1955). O termo coco foi atribuído pelos portugueses durante a viagem de Vasco da Gama à Índia (1497-1498), devido à aparência do endocarpo e dos poros de germinação observados na extremidade do fruto, que se assemelha à face de uma coca (masculino, coco). A coca retrata um monstro imaginário infantil (papão; ogro), conforme relata o historiador João de Barros no seu livro Décadas da Ásia (Rocha; Ferreira; Garcia, 2021).

O consenso geral dos estudiosos no assunto é de que o coqueiro é originado do sudoeste do Pacífico (Purseglove 1972; Child 1974; apud Schuiling; Harries 1994 e Ohler, 1984). No entanto, De Candolle, (1895 apud Ohler 1984), reúne argumentos em favor da origem Asiática, como as correntes marítimas, rota de navegantes e número de nomes comuns encontrados na Ásia. A dispersão natural dos frutos nas correntes marítimas pode ter levado os

cocos para praias distantes, já que esse pode flutuar durante dias na água do mar, sem afundar e sem danificar o embrião (Bolaños, 2013).

2.6.2 Características, produção e consumo

O coqueiro, cientificamente conhecido como *Cocos nucifera* L., é uma palmeira perene pertencente à família *Palmae*. Seu tronco pode atingir até 30 metros de altura, com um diâmetro variando entre 30 e 50 centímetros, possuindo uma coroa exuberante de folhas. Essa palmeira é conhecida por sua produção constante de frutos ovais, que possuem um diâmetro de 15 a 20 centímetros. A diversidade de produtos derivados do coqueiro torna um recurso globalmente reconhecido. Os frutos são consumidos in natura ou processados em uma variedade de produtos, e para outras partes, como raiz, estipe, inflorescência, folhas e casca, têm valor econômico significativo. Além disso, o coqueiro é utilizado como planta ornamental em espaços públicos e propriedades (Debmandal; Mandal, 2011; Warwick *et al.*, 2018).

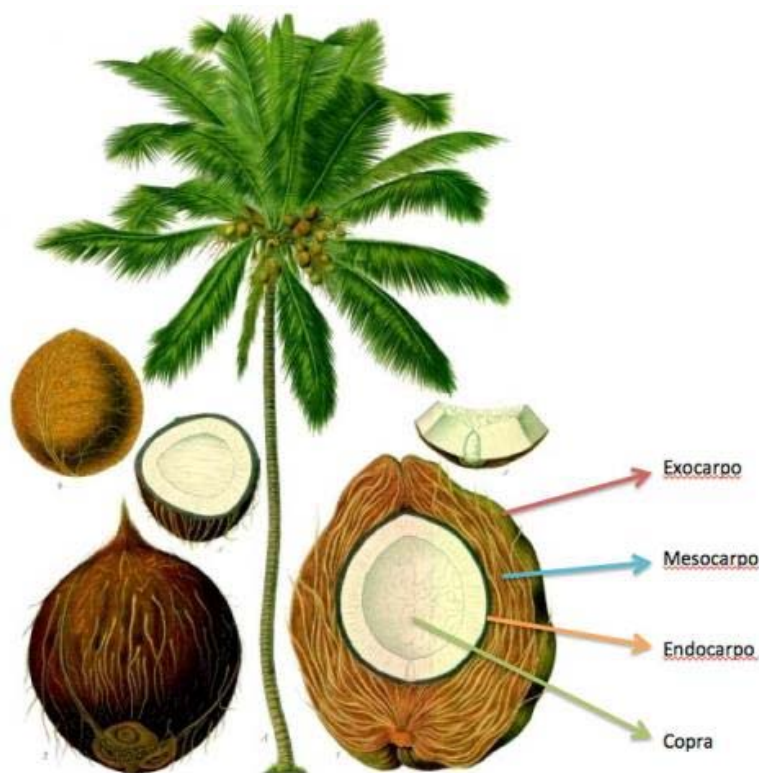
A espécie prospera em climas subtropicais e requer uma oferta contínua de água. Elementos como a umidade do ar, a temperatura, a radiação solar e a maturidade da planta podem influenciar a produção, as dimensões do fruto, a quantidade de água contida no coco colhido verde e o peso do albúmen sólido no fruto maduro (Embrapa, 2018; Warwick *et al.*, 2006).

O cultivo abrange mais de 200 nações, incluindo ilhas na Ásia, América Latina, Caribe e África Tropical. Contudo, devido às condições climáticas necessárias para o cultivo, a prática comercial da cultura de coqueiro está restrita a cerca de 90 países (Rocha; Ferreira; Garcia, 2021; Debmandal; Mandal, 2011; Warwick *et al.*, 2018). A cultura do coqueiro apresenta benefícios como facilidade de cultivo, sendo adequada para solos ricos em cálcio e fósforos, como a areia da praia, que não é propícia para outros tipos de plantações. Além disso, essa cultura demonstra alta produtividade ao longo de longos períodos. Requer um clima quente, intensa exposição solar e águas em movimento, ricas em oxigênio, o que explique sua adaptação favorável às regiões litorâneas (Senhoras, 2003).

Existem duas variedades de palmeira de coco: a normal, que pode atingir 30m, e a anã, que não ultrapassa 3m. Apesar das diferenças, as características são as mesmas (Aguilar, 2015). O gênero *Cocos* constitui-se pela espécie *Cocos nucifera* L. pertencente à família *Arecaceae* (família das palmeiras) (Lédo *et al.*, 2019) A espécie é composta principalmente pelas variedades *Typica*, também chamada de gigante, e Nana, conhecida como anã, além das híbridas, resultantes de cruzamentos entre as variedades (Warwick *et al.*, 2006).

De acordo com Bolaños (2013), o coco é classificado como uma variedade de drupa, caracterizado por um fruto carnosos que contém apenas uma semente ou caroço, embora, no caso do coco, não apresente caroço. Esse fruto é composto por uma epiderme lisa ou exocarpo que envolve um mesocarpo espesso e fibroso. Este, por sua vez, envolve uma camada extremamente rígida chamada de endocarpo, responsável por proteger a copra e a água do coco, conforme ilustrado na Figura 4. Segundo Silva (2014), o epicarpo corresponde à casca externa, que varia entre tons esverdeados e amarelados, dependendo do estágio de maturação. Com o tempo, essa camada externa desidratada e sofre um escurecimento enzimático, adquirindo uma aparência seca e amarronzada. Ainda para o mesmo autor, o mesocarpo, localizado abaixo da casca externa do coco, é uma camada com espessura de 3 a 5 cm, composta por frações de fibras curtas e longas, além de uma fração denominada pó, que se agrega às fibras. O endocarpo, por sua vez, consiste de uma casca interna extremamente dura e lenhosa que envolve a amêndoa, composta pela copra (polpa branca) e a água de coco (Bolaños, 2013).

Figura 3 - Partes constituintes do coco



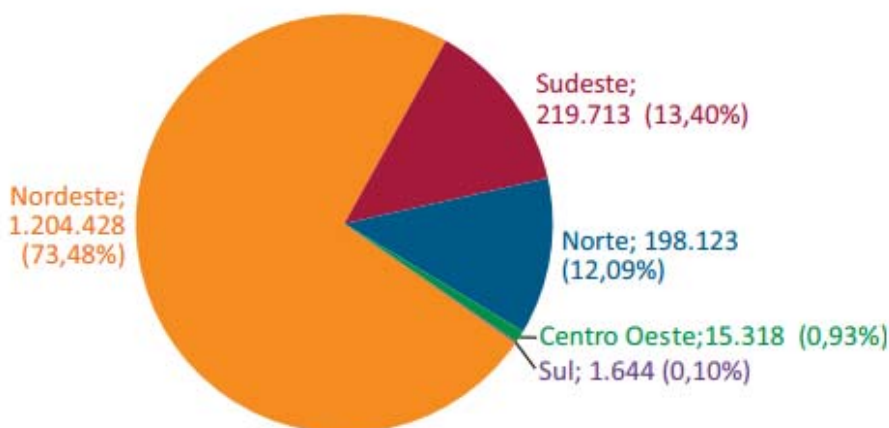
Fonte: Bolaños (2013).

Todas as partes do fruto possuem valor econômico, desde a casca até a polpa, onde se encontram os nutrientes (Andrade *et al.*, 2004; Léo *et al.*, 2019). Para Rocha; Ferreira; Garcia (2022), o fruto dos coqueiros corresponde à parte mais relevante, tanto em quantidade de produtos e seus usos, quanto ao valor alimentar e econômico. Os principais usos do fruto são água, óleo, polpa e fibra. Um fruto de coco é facilmente cultivável e leva em torno de doze meses para amadurecer, sendo produzido durante o ano todo (Senhoras, 2003).

A produção mundial de coco em 2019 foi de 62,9 milhões de toneladas (Faostat, 2021). O Brasil é o quinto maior produtor mundial, mas participa com apenas 3,7% do total. Os principais produtores são Indonésia, Filipinas e Índia, que se dedicam, especialmente, à extração de copra, para produção de óleo e farinha, enquanto o Brasil dedica-se à produção de coco ralado, leite de coco e água de coco. O coqueiro é cultivado em quase todo o Brasil, cuja área no ano de 2022 foi de 189.525 hectares com produção de 1,8 bilhão de frutos (IBGE, 2023).

Na região Nordeste, principal produtora nacional, no ano de 2020, concentrava 80,9% da área colhida de coco do País e 73,5% de sua produção (IBGE, 2021). O valor da produção nacional de coco nesse ano foi de R\$ 1,15 bilhão, com a participação de 62,6% do Nordeste. No comércio exterior, a região Nordeste é a principal exportadora de água de coco (99,5%); no acumulado de janeiro a setembro de 2021, o faturamento foi US\$ 22,84 milhões. Em 2020, mesmo com a situação agravada pela crise sanitária, o consumo nacional cresceu 4,6% em relação a 2019, passando a 2,47 milhões de toneladas, revelando a importância dessa atividade e a tendência mundial (IBGE, 2021). O Gráfico 1, mostra os dados regionais.

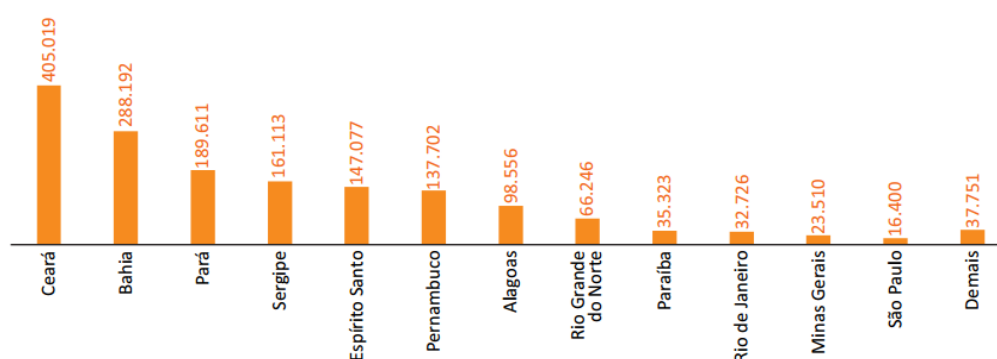
Gráfico 2 - Produção regional do coco, em 2020 (mil frutos)



Fonte: IBGE (2021).

Na produção estadual, dentre os nove principais produtores, sete pertencem ao Nordeste, um ao Norte e outro ao Sudeste. Em 2020, o Ceará tornou-se o maior produtor de coco do Brasil, com 21,2% da área e 24,7% da produção nacional. A Bahia, é o segundo maior produtor nacional, respondendo por 19,3% da área colhida e 17,6% da produção. Paraipaba, localizado no Ceará, é o maior produtor municipal de coco do Brasil, destacando-se por seu elevado rendimento de 24.626 frutos/ha. O Gráfico 2 mostra a produção por estado brasileiro.

Gráfico 3 - Produção estadual do coco, em 2020 (mil frutos)



Fonte: IBGE (2021).

A maior parcela da produção de coco no Brasil é direcionada às agroindústrias, para a obtenção de produtos derivados como o coco ralado, o leite de coco, bebidas, óleos e outros itens, com o objetivo atender à demanda na fabricação de diversos produtos alimentares, incluindo doces, biscoitos e chocolates (Pino, 2005). Para Silveira; Aragão (2016), 70% da produção nacional é consumida nesses processos. Enquanto mundialmente o coco é tido como uma oleaginosa para produção de óleo e outros produtos em seu estado final de maturação, no Brasil é bastante comum também seu consumo ainda imaturo (verde) para obtenção de água (Rosa *et al.*, 2001).

O peso médio do coco é cerca de 1,5 kg, sendo 20% desse peso correspondente à polpa mais água e os 80% restante correspondentes à casca (Silveira; Aragão, 2016). Isso implica que 80% do peso bruto do coco se convertem em resíduos após o processo de beneficiamento do produto. No entanto, esses resíduos são utilizados para a produção de um material conhecido como fibra de coco, sendo possível observar em diversos setores industriais o uso de fibras longas, curtas e o pó da casca de coco como matéria-prima. Apesar de ainda incipiente em nível nacional, a produção de fibra de coco tem apresentado crescimento nas usinas de beneficiamento.

2.6.2 Propriedades das fibras de coco

A casca do coco verde, assim como a do coco maduro, é constituída por uma fração de fibras e outra fração de pó. As fibras de coco são materiais lignocelulósicos obtidos do mesocarpo de cocos e caracterizam-se pela sua dureza e durabilidade atribuída ao alto teor de lignina, quando comparadas com outras fibras naturais (Silva, 2006). Para Anggraini (2016) o diâmetro das fibras geralmente varia de 0,1 a 0,3 mm e o comprimento de 10 a 50 mm. Rowell; Han; Rowell (2000) observou diâmetros de 0,1 a 0,6 mm. O mesmo autor também acrescenta que a absorção de água é de cerca de 130 a 180%.

Para Nascimento (2017) as principais características a serem avaliadas nas fibras são: o tipo de celulose presente (cada tipo de celulose tem a sua geometria e a geometria das células influência nas propriedades físicas); a idade da fibra; a relação entre as quantidades de celulose, hemicelulose e lignina e, finalmente, o nível de cristalização das fibrilas que formam as fibras. A Tabela 6 apresenta algumas propriedades citadas por Silva; Jerônimo (2012).

Tabela 6 - Principais propriedades da fibra de coco verde

Propriedades	Valor
pH	5,4
Condutividade elétrica	1,8 dS/m
Relação carbono/nitrogênio	132
Densidade	70 g/L
Porosidade total	95,6%
Retenção de água	538 mL/L
Água facilmente assimilável	19,8%
Porcentagem de lignina	35 a 45%
Porcentagem de celulose	23 a 43%
Porcentagem de hemicelulose	3 a 12%

Fonte: Adaptado de Silva; Jerônimo (2012).

Devido à sua natureza como fibra natural, as propriedades físicas e mecânicas da fibra de coco apresentam variabilidade nos dados obtidos, como evidenciado na Tabela 7. Observa-se que a fibra de coco apresenta um módulo de elasticidade relativamente baixo. Quando empregadas como reforço em matrizes frágeis, predomina o arrancamento da fibra em vez da ruptura e o desempenho entre a fibra e a matriz se torna o principal fator a influenciar na capacidade de deformação do compósito (Bernardina, 2019).

Tabela 7 - Propriedades físicas da fibra de coco verde

Fonte dos dados	Diâmetro (mm)	Resistência última à tração (Mpa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Kulkarni (1981)	0,10-0,45	106-175	3-6	17-47
CEPED (1982)	0,7	182,2	3,4	28,27
Ramaswamy; Ahuja; Krishnamoorthy (1983)	0,2-0,25	140	-	26,25
Paramasivam (1984)	0,3	69,3	2	-
Guimaraes (1984)	-	180	2,8	29,2
Ghavani e Veloso (1985)	0,24-0,42	37,53-110,52	-	10,47-27,77
Aziz (1987)	0,10-0,40	120-200	19-26	10-25
Satanarayana (1990)	0,10-0,45	106-175	4-6	17-47
Aggarwal (1992)	0,10-0,40	100-130	0,019-0,026	10-26
Toledo Filho (1997)	0,25	174	3,5	25
Savastano; Agopyan (1998)	-	95-118	2,8	23,9-51,4
Fabio Tomczak (2010)	0,13-0,23	100-250	3	30

Fonte: adaptado de Tomczak (2010).

De acordo com Monteiro *et al.* (2006), o efeito de adesão entre matriz e fibra de coco é gerado pela rugosidade superficial da fibra, especificamente das saliências arranjadas como fileiras de pequenos nódulos. Essas saliências ajudam melhorar a aderência fibra-matriz, causando melhor resistência mecânica do compósito. Segundo Agopyan *et al.* (2005) a fibra de coco possui sua morfologia caracterizada por um formato cilíndrico e com pontuações superficiais, que auxiliam na ancoragem da fibra a matriz.

Os trabalhos publicados em referência a ensaios, para definir as propriedades físicas e mecânicas da fibra de coco, têm uma grande dispersão nos dados obtidos, demonstrando a variabilidade dos resultados experimentais.

As características mecânicas das fibras de coco estão sujeitas a uma série de variáveis, incluindo a região de origem, o estágio de maturação, a composição química, além das condições de realização dos ensaios (Tomczak, 2010). O diâmetro da fibra influencia nos valores de resistência da mesma, sendo essa relação explicada em termos de propriedades estruturais. À medida que o diâmetro aumenta, ocorrem variações na quantidade de células da fibra, causando alterações em outros parâmetros estruturais, como o ângulo helicoidal, o volume de células constituintes e o número de defeitos. Esses fatores agem reduzindo a resistência das fibras, refletindo na diminuição da tensão de ruptura e no módulo de elasticidade (Tomczak, 2010).

As fibras de coco possuem uma quantidade menor de celulose, contudo, o percentual de lignina é grande, cerca de duas a quatro vezes maiores que os valores existentes nas fibras de juta e sisal, tornando-a extremamente vantajosas em termos de durabilidade frente às outras fibras (Nascimento, 2017). Segundo Passos (2005), o teor de lignina nas fibras varia em função da idade do fruto, girando entre 20% nas fibras de coco jovem e de aproximadamente 35% no fruto maduro. A partir da Tabela 4 é possível observar o alto teor de lignina da fibra de coco e o baixo teor de celulose, se comparada a outras fibras vegetais. Portanto, a sua degradação é mais lenta se comparada a outras fibras vegetais (Hejazi *et al.*, 2012). Segundo artigos apresentados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), o tempo de degradação para a fibra de coco é de 10 anos. Segundo Carrijo; Liz; Makishima, (2002), esse material leva mais de 8 anos para completa decomposição. Portanto, é esperado que o alto teor de lignina das fibras de coco a tornem um material versátil, dada a sua resistência, durabilidade e resiliência (Senhoras, 2003).

Corradini *et al.* (2009) conduziram um estudo sobre a concentração de lignina e celulose, juntamente com as propriedades mecânicas de cinco variedades de coqueiro (*Cocos nucifera*): Nana 'Anão-Verde'-de-Jequi, 'Anão-Amarelo'-de-Gramane, 'Anão-Amarelo'-da-Malásia, 'Anão-vermelho'-da-Malásia e 'Anão-Vermelho'-de-Camarões, em quatro estágios diferentes de maturação, a saber, 120, 150, 180 e 210 dias (período em que o coco ainda está verde). Os resultados indicaram que o menor teor de lignina registrado foi de 37,2% ($\pm 0,8\%$), enquanto o maior foi de 43,9% ($\pm 0,7\%$). No que diz respeito à concentração de celulose, a menor taxa identificada foi de 31,5% ($\pm 0,1\%$), e a mais alta foi de 37,4% ($\pm 0,5\%$). Em relação à celulose, as fibras de coco verde exibiram valores um pouco inferiores aos comparados com valores encontrados na literatura para a fibra de coco maduro (36-43%) (Mohanty; Misra; Hinrichsen, 2000; Bledzki; Reihmane; Gassen, 1996). Quanto ao teor de lignina, os valores obtidos para o coco verde são semelhantes aos observados para o coco maduro (41-45%) (Mohanty; Misra; Hinrichsen, 2000). As fibras de coco verde apresentaram teores mais baixos de celulose e teores mais altos de lignina em comparação com outras fibras lignocelulósicas, como a fibra de juta e sisal (Mohanty; Misra; Hinrichsen, 2000). Em relação às propriedades mecânicas desenvolvidas, o módulo elástico (E) variou de 801 MPa (± 308 MPa) a 1.600 MPa (± 508 MPa), a tensão de ruptura à tração (σ_r) variou de 82 MPa (± 18 MPa) a 129 MPa (± 40 MPa) e a deformação na ruptura (ϵ) varia de 25% ($\pm 6\%$) a 32% ($\pm 7\%$). Os valores de σ_r e E encontrados estão próximos aos valores mencionados por Mohanty; Misra; Hinrichsen, (2000) para coco maduro, que são 4×10^3 a 6×10^3 MPa, 131 a 175 MPa, e 15-40%, para E, σ_r , e ϵ , respectivamente. Os valores de σ_r e E obtidos para fibras

de coco verde são significativamente menores do que os descritos na literatura para outras fibras, como juta e sisal, devido ao menor teor de celulose nas fibras de coco (Mohanty; Misra; Hinrichsen, 2000).

De acordo com a pesquisa de Pereira (2012) sobre as propriedades da fibra de coco verde, a densidade dessa fibra foi encontrada em torno de $1,40 \text{ g/cm}^3$, enquanto sua resistência à tração simples atingiu 6,5 MPa, com uma deformação de 10,4 mm. O estudo também revelou que a absorção de água pela fibra foi de 4,6% de sua massa após 72 horas de imersão e aumentou para 17,6% após 144 horas submersa.

2.6.3 Estudos experimentais com a fibra de coco

Depois de 28 dias de exposição de fibras em um ambiente alcalino, Ramaswamy; Ahuja; Krishnamoorthy (1983), observaram uma redução na resistência à tração de 5% para as fibras de coco, de 32% para as fibras de juta. As fibras de coco em comparação de outros tipos de fibras têm melhores características microestruturas, como a durabilidade em meio alcalino (Savastano Jr.; Agopyan, 1998).

Tolêdo Filho *et al.* (2000) conduziram um estudo para avaliar a resposta das fibras de coco e de sisal à alcalinidade de uma matriz de argamassa de cimento. As fibras foram imersas em uma solução de hidróxido de cálcio por 300 dias, resultando na perda total de flexibilidade das fibras nesse período. Além disso, as fibras de coco e sisal, quando imersas em água por 420 dias, apresentaram perdas de resistência de 77,2% e 83,3%, respectivamente, possivelmente pela degradação microbiológica. Após seis meses de exposição ao ar, com ciclos de molhamento e secagem, as fibras apresentaram diminuição em sua tenacidade.

Reis (2006) declarou que a fibra de coco desempenha efetivamente o papel de reforço em concreto polimérico, conferindo-lhe maior tenacidade e resistência à flexão. Gunasekaran; kumar; lakshmipath, (2011) realizaram vários ensaios que indicaram que a adição da casca de coco atende efetivamente aos requisitos necessários para ser utilizado como agregado leve no concreto. Em relação à condutividade térmica, Rodríguez *et al.* (2011) comprovaram que a intensidade da propagação de calor através do concreto é consideravelmente reduzida quando as fibras de coco são utilizadas como uma barreira térmica.

Defoirdt *et al.* (2010) investigaram a resistência à tração da fibra de coco (branco e marrom), do bambu e da fibra de juta. As fibras eram testadas quanto a sua resistência à tração (máquina de tamanho reduzido), com taxas de 0,1, 1 e 5 mm/min, para juta, bambu e fibra de coco, respectivamente. Os testes se deram em diferentes comprimentos de fibras, a fim de

avaliar a influência do comprimento das fibras na resistência à tração. As fibras de coco apresentaram baixa resistência mecânica, baixo módulo de elasticidade e alta deformação da capacidade instalada, ou seja, grande capacidade de energia absorção – fato explicado devido à baixa celulose e ao ângulo micro fibrilar elevado.

Bolaños (2013) realizou ensaios triaxiais em amostras de solo argiloso reforçado e não reforçado com fibras de coco. As fibras foram incorporadas ao solo de duas maneiras: moídas e cortadas, com comprimento aproximado de 2 cm. Os ensaios foram realizados em amostras compactadas na densidade máxima e umidade ótima, com energia de compactação Proctor Normal, com diferentes teores de fibra moída (0,5% e 1%) e teores de fibra cortada (0,5%, 0,75%, 1%, 1, 25% e 1,5%), em relação ao peso seco do solo. O autor obteve um aumento na resistência ao cisalhamento das misturas solo-fibra, evidenciando um aumento discreto no ângulo de atrito e um incremento significativo no intercepto coesivo das misturas reforçadas em comparação com os dados obtidos para o solo puro.

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

Sotomayor (2014), realizou ensaios de placa em verdadeira grandeza para análise do comportamento carga-recalque de um solo arenoso com a introdução de fibras de coco na forma de manta e aleatoriamente distribuídas na massa de solo. Ele observou, nas curvas carga-recalque, que o reforço de fibra em manta conseguiu uma diminuição maior do recalque, mas com um maior fissuramento superficial, enquanto que o reforço com as fibras colocadas aleatoriamente conseguiu uma menor redução dos recalques, mas uma melhor inibição da propagação de fissuras. Ambos os resultados, comparados com a areia sem adição de fibras, demonstraram uma maior resistência e redução do recalque.

Anggraini *et al.* (2015) analisou solos moles reforçados com fibra de coco e com adição de cal. Os autores relataram maior resistência à tração e a compressão simples não confinada para teores de fibra de 1%. Eles relatam melhoria no atrito quando comparado apenas ao solo.

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

Peter *et al.* (2016) observou que a introdução de 0,6% de fibras de coco aumentou o CBR de um solo mole em até 335%.

Oliveira Junior (2018) realizou ensaios de cisalhamento direto e compressão edométrica em condições inundadas e não inundadas e de condutividade hidráulica saturada em permeâmetro de parede flexível, para diferentes teores de fibra de coco (0, 0,5, 1 e 2%). Ele observou que a inclusão das fibras aumentou os parâmetros de resistência ao cisalhamento para até 1% de fibra de coco, sendo verificados ganhos de 34,4% na coesão e 7,5% no ângulo de atrito para a condição não inundada e 59,5% na coesão e 5,8% no ângulo de atrito para condição inundada. A compressibilidade das misturas aumentou à medida que o conteúdo de fibra foi aumentado, sendo observadas elevações em mais de 30% no coeficiente de compressão em ambas as condições de inundação em relação ao solo sem reforço. A condutividade hidráulica saturada não apresentou alterações para até um teor de fibras de 1%, mas observou-se aumento de uma ordem de grandeza para a mistura com teor de fibras de 2%.

Motta (2018) avaliou o comportamento mecânico em um solo argiloso reforçado com fibras naturais (sisal, carauá e coco) através de ensaios de resistência a compressão simples. Os compósitos no tempo zero e em outros expostos ao envelhecimento natural. Através dos ensaios realizados foi possível comparar as diferenças de comportamento do solo reforçado com fibras de 25mm e 50 mm degradadas ou não. Com base nos resultados obtidos chega-se à conclusão de que, apesar de apresentaram degradação ao serem expostas ao envelhecimento natural, as fibras melhoram o comportamento mecânico do solo puro, com ganhos relevantes de resistência.

Santos (2020), analisou o comportamento de um solo erodível de uma encosta após a incorporação de resíduos de construção civil e fibras de coco. Os resultados mostraram que o solo reforçado com 29,5% de resíduos e 0,5% de fibra, teve sua resistência à compressão aumentada, atingindo o valor de 1230 kPa aos 120 dias de cura. Concluiu-se que a mistura de solo-RCC-fibra possui viabilidade técnica para ser aplicado como material de reforço.

Brito (2022) analisou a alteração do comportamento mecânico, de camadas de pavimento, com a adição de fibras de coco em compósitos cimentados. As misturas analisadas, além de conter solo e cimento, eram compostas de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição. Como resultados, os compósitos cimentados, com e sem fibras, se mostraram aptos ao uso na pavimentação, considerando especificações vigentes, que se baseiam na resistência à compressão simples mínima de 2,1MPa como parâmetro exigível. As misturas contendo 0,5% fibras e teor de 7% de cimento apresentaram um melhor comportamento mecânico, considerando os resultados dos ensaios de módulo de resiliência. De um modo geral, a inserção de fibras de coco alterou o comportamento mecânico das misturas, tornando-as mais dúcteis.

Bernardina (2019) estudou o comportamento mecânico e a durabilidade de compósitos de solo arenoso reforçado com fibras de polipropileno e fibras vegetais de sisal, curauá e coco. Foram realizados ensaios triaxiais nas amostras com e sem reforço, além de ensaios de tração nas fibras, ambos antes e após exposição a agentes externos, com o objetivo de avaliar a durabilidade das fibras. Os resultados indicaram para todos os compósitos solo-fibra expostos aos agentes climáticos uma queda na resistência ao cisalhamento, em relação à amostra de controle, inclusive, para os solos reforçados com fibra de polipropileno. Porém, os compósitos solo-fibra de coco apresentaram a menor taxa de degradação, quando comparado com os compósitos solo-fibra de sisal e curauá. E no que se refere aos ensaios de tração, as fibras de curauá foram aquelas que apresentaram a maior resistência à tração inicial, porém, após a exposição aos agentes externos por um período de oito meses, foi a que apresentou a maior queda de resistência em relação às outras fibras. Bernardina (2019) justificou os comportamentos dos compósitos solo-fibra expostos aos agentes externos pelas características físicas e morfológicas de cada tipo de fibra analisada. A mistura solo-fibra de coco apresentou a menor perda de resistência quando exposta, em comparação aos compósitos misturados com as outras fibras naturais, sendo menos susceptível à degradação. O alto teor de lignina seria a justificativa, pois é o componente responsável por agir contra o ataque de microrganismos.

Teja; Muttharam (2022) analisaram o potencial de biodegradação da fibra de coco ao ser introduzida em uma matriz argilosa em diferentes teores (0, 0,5, 1 e 1,5%) após passarem por dois tratamentos (ácido clorídrico (HCL) e emulsão betuminosa). Os compósitos passaram por períodos de cura (7 e 30 dias) sendo, posteriormente, submetidos aos ensaios de RCS e CBR. Com base nos resultados obtidos, observa-se que a inclusão de fibra de coco

melhora a resistência do solo, e a fibra de coco tratada com emulsão betuminosa apresenta maior durabilidade.

Freitas (2022) analisou o comportamento mecânico de compósitos de matriz areno-siltosa reforçados com fibras de coco após serem submetidos ao processo de envelhecimento natural, por um período de 5 meses. A análise foi realizada através de ensaios triaxiais. 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). Os resultados mostraram 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.

Reis (2022) estudou a inserção de fibras de coco em diferentes teores (0; 0,5; 1,0 e 1,5%) em uma matriz de solo areno-siltosa, através de ensaios triaxiais. Após a determinação do teor ótimo (1%), uma nova etapa de ensaios foi realizada, tratando as fibras com técnicas de hornificação, mercerização e a combinação de ambos. As fibras tratadas com a técnica de hornificação apresentou maiores ganhos de resistência quando comparado as não tratadas. O método da mercerização, por outro lado, provocou uma redução na resistência, quando comparado as fibras não tratadas.

O estudo de Athira; Manju (2022) concentra-se na modificação da fibra de coco para melhorar a sua durabilidade analisando a sua resistência. O trabalho envolve a modificação da fibra de coco utilizando tratamento químico denominado método de precipitação rápida, onde nanopartículas de Ca(OH)_2 são impregnadas nos poros e na superfície da fibra. Para estudar a eficácia após a modificação, tanto a fibra de coco não tratada quanto a modificada foram submetidas a condições de pH neutro e alcalino para ciclos alternados de umedecimento e secagem, e sua durabilidade foi avaliada medindo o teste de carga de tração de fibra individual. Também foram avaliados diferentes teores de fibra de coco não tratada e tratada em matriz solo-cinza volante, para estudar a melhoria da resistência através da realização de testes de compressão não confinados. A fibra de coco modificada resistiu muito melhor às condições adversas de durabilidade comparativamente a fibra não tratada. A nanomodificação das fibras melhorou a resistência à tração, a adesão interfacial e teve boa interação com a matriz de cinzas volantes do solo. Melhorando, assim, o parâmetro de resistência do solo.

Santos, M. (2023) investigou a interação de reforços vegetais (serragem de bambu, fibras de coco e fibras de açaí) em uma matriz arenosa ao longo do tempo, levando em consideração os processos de degradação resultantes de fatores ambientais. Durante a exposição dos compósitos, pelo período de 6 meses, todos os materiais de reforço estudados

mostraram uma perda de resistência, porém as fibras de coco e as de açaí continuaram contribuindo como elemento de reforço na matriz de solo, visto que a resistência à compressão simples permaneceu maior quando comparado ao solo sem reforço. Ao longo dos meses de exposição, as fibras de coco mostraram uma redução de resistência consideravelmente menor em comparação com os outros materiais, demonstrando uma boa resistência à degradação.

Carvalho; Monteio; Casagrande (2023) avaliou o comportamento mecânico de compósitos solo-fibra através da inserção de fibras naturais de coco. O comportamento tensão x deslocamento foi avaliado por meio de ensaios de cisalhamento direto em laga escala. Os ensaios se deram fazendo uso de fibras com 25 e 50 mm de comprimento, nos teores de 0,5 e 0,75% de fibra, em uma densidade relativa de 50% e 10% de umidade. A análise geral dos resultados mostrou que a adição de fibras de coco na areia bem graduada aumentou os parâmetros de resistência ao cisalhamento e a ductilidade, em comparação com a areia não reforçada.

O Quadro 1 apresenta um resumo dos principais trabalhos referentes ao processo de degradação natural da fibra de coco quando submetida aos agentes naturais.

Quadro 1 - Estudos de solos reforçados com fibras de coco

Referência	Teor de fibra (%)	Comprimento da fibra (mm)	Tratamento	Processo para análise de degradação	Principais resultados encontrados
Bernardina (2019)	0,5	25	-	Submetidos à exposição aos agentes climáticos diversos por até 8 meses	A mistura solo-fibra de coco apresentou a menor perda de resistência quando exposta, em comparação aos compósitos misturados com as outras fibras naturais, sendo menos susceptível à degradação.
Freitas (2022)	1	Variado	Hornificação, mercerização (tratamento com NaOH) e o tratamento	Submetidos à exposição aos agentes climáticos diversos por até 5 meses	Mesmo após submetidas ao processo de envelhecimento natural, as fibras continuaram a

			em conjunto (hornificação + NaOH)		contribuir com o aumento da resistência ao cisalhamento. A mistura solo- fibra de coco apresentou a menor perda de resistência quando exposta, em comparação aos compósitos misturados com as outras fibras naturais, sendo menos susceptível à degradação.
Santos, M. (2023)	1 e 2	15	-	Submetidos à exposição aos agentes climáticos diversos por até 6 meses	
A presente pesquisa	0,5	25	-	Submetidos à exposição aos agentes climáticos diversos por até 4 meses	-

Fonte: Autora (2023).

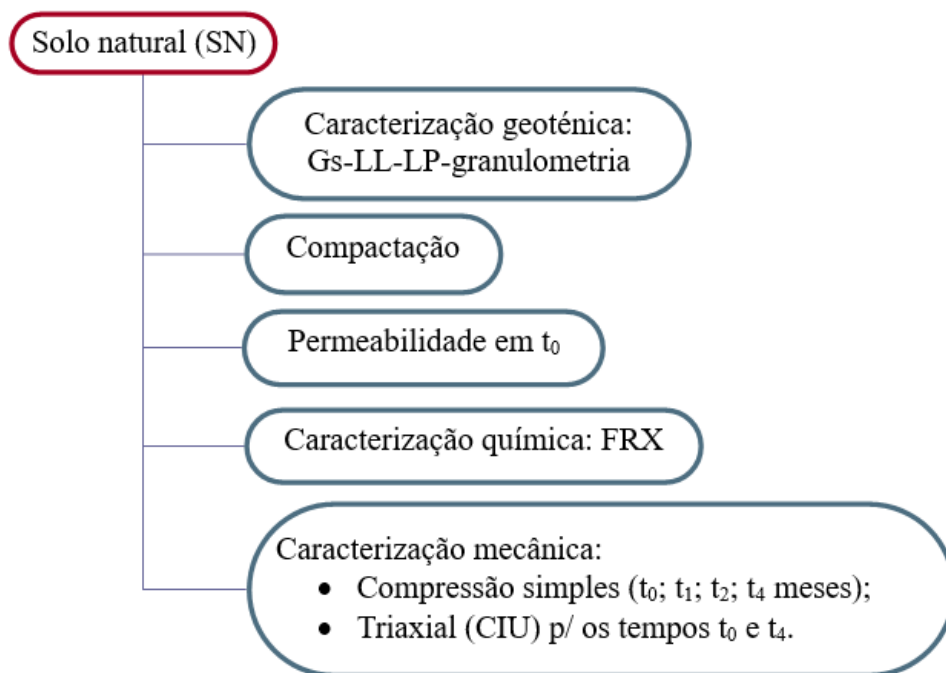
Diante do exposto, a elaboração da presente pesquisa, foi importante para o conhecimento de todas as referências sobre a interação dos compósitos solo-fibras e os diversos fatores que os compreendem. As características particulares de cada fibra (propriedades físicas, mecânicas, químicas e morfológicas, por exemplo) foram importantes para entender e justificar os mecanismos e as alterações dos resultados com a inclusão da fibra de coco, objeto de estudo dessa pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo será descrito o programa experimental empregado nessa pesquisa. Em que o objetivo principal consiste em estudar o comportamento mecânico de um solo areno-argiloso reforçado com fibras de coco verde (*Cocos nucifera*) aleatoriamente distribuídas, avaliando a influência dos diâmetros na degradação dos compósitos quando expostos às condições climáticas, em diferentes tempos de exposição.

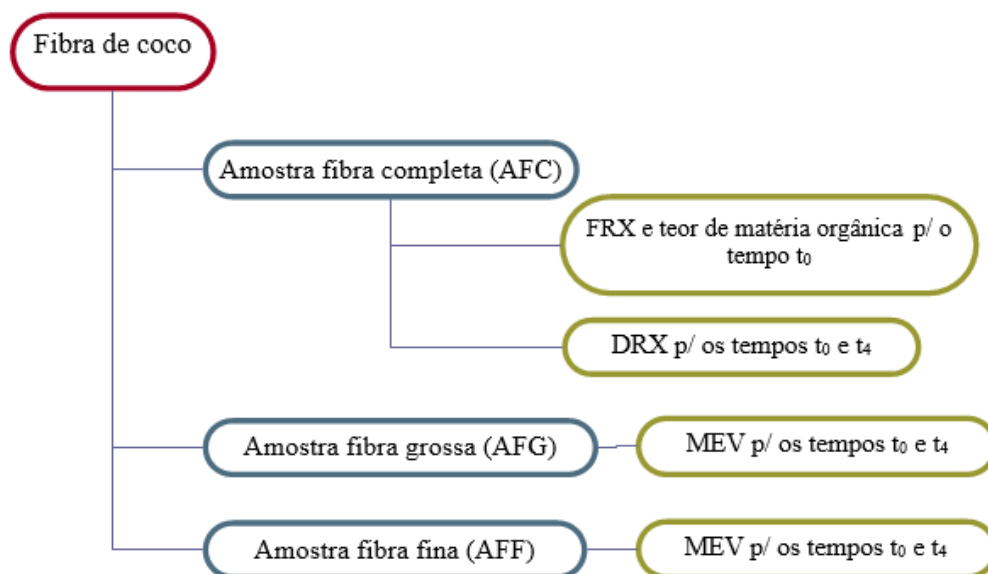
As Figuras 4, 5 e 6 apresentam os organogramas dos ensaios realizados. A pesquisa utilizou três compósitos de fibras vegetais, onde foi empregada a amostra de fibra completa e amostras referentes as frações mais grossa e mais fina (amostra fibra completa - AFC; amostra fibra fina - AFF; amostra fibra grossa - AFG) com uma matriz areno-argiloso (Solo natural-SN) a serem avaliados em até quatro períodos de tempo $t_0=0$, $t_1=30$, $t_2=60$ e $t_4=120$ dias.

Figura 4 - Organograma dos ensaios realizados na matriz areno-argiloso



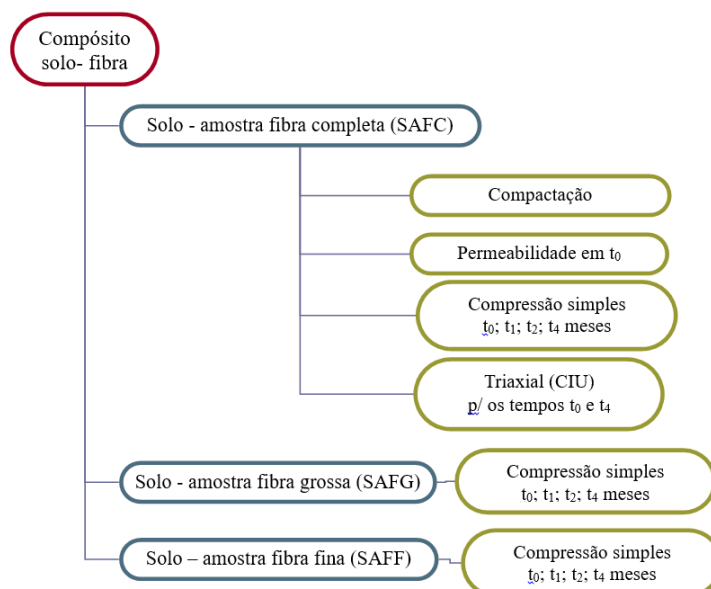
Fonte: Autora (2023).

Figura 5 - Organograma dos ensaios realizados na fibra



Fonte: Autora (2023).

Figura 6 - Organograma dos ensaios realizados nos compósitos solo-fibra



Fonte: Autora (2023).

3.1 Caracterização do solo (matriz do compósito)

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado como matriz um solo areno- argiloso (Figura 7). O material foi coletado na Universidade Federal do Cariri-UFCA, no campus do município do Crato, no estado do Ceará. O material foi seco ao ar no laboratório e posteriormente preparado para as análises experimentais.

Figura 7 - Solo natural



Fonte: Autora (2023).

3.1.1 Caracterização geotécnica

Os ensaios de caracterização física do solo foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFCA – *Campus Juazeiro do Norte* e no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC, e foram determinados conforme os seguintes métodos e procedimentos:

- Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (NBR 6457 – ABNT, 2016);
- Ensaios de granulometria (NBR 7181 – ABNT, 2016);
- Massa específica real dos grãos (NBR 6458 – ANBT, 2016);
- Limite de liquidez (NBR 6459 – ABNT, 2016);
- Limite de plasticidade (NBR 7180 – ABNT, 2016);

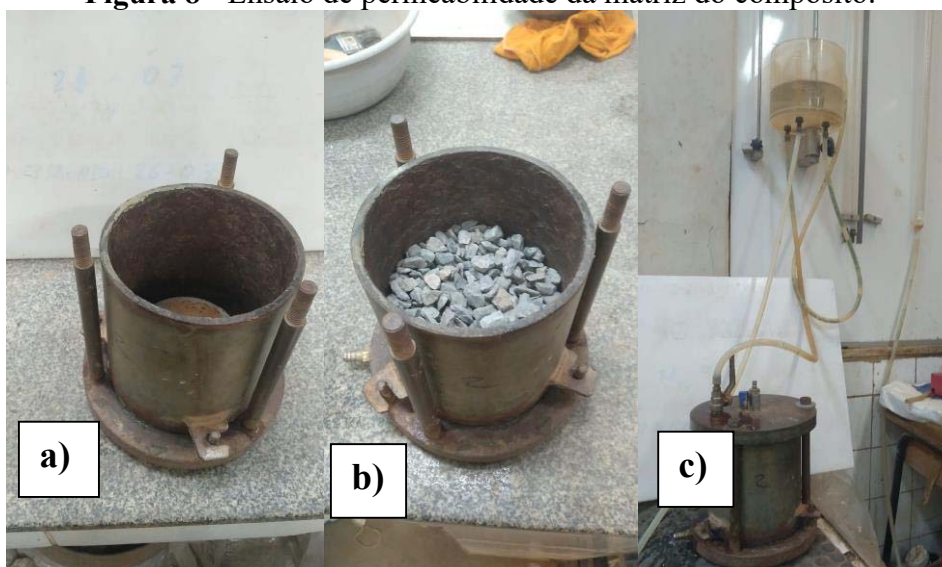
3.1.2 Compactação

Os ensaios foram realizados utilizando a energia de compactação Proctor Normal e com reuso de material, como estabelece a NBR 7182 (ABNT, 2020). O ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC. Nos ensaios foram utilizados o cilindro e o soquete pequeno. O ensaio foi realizado em 3 camadas sendo aplicado 26 golpes por camada.

3.1.3 Ensaio de permeabilidade (matriz do compósito)

O ensaio de permeabilidade foi realizado utilizando um permeâmetro de carga variável, de acordo com norma NBR 14545/2021 para a matriz areno-argiloso (SN). A amostra foi ensaiada utilizando como base os parâmetros obtidos da curva de compactação. O material foi moldado no cilindro com 9,9 cm de diâmetro e 4,74 cm de altura, compactadas dinamicamente em três camadas. A Figura 8 apresenta etapas referentes ao ensaio.

Figura 8 - Ensaio de permeabilidade da matriz do compósito.



Fonte: Autora (2023). a) corpo de prova compactado; b) material granular de preenchimento; c) ensaio em andamento.

3.1.4 Caracterização química

Para a caracterização da composição química da matriz de solo empregou-se o método de determinação por Fluorescência de Raios-X (FRX), utilizando o equipamento da marca PANalytical modelo Epsilon1 (Figura 9). As análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFCA.

A fluorescência de Raios X (FRX) é um método qualitativo-quantitativo, que utiliza energia dispersiva para determinar a composição química de solos e rochas e a presença estimada de elementos, através da intensidade dos raios X emitidos pelos elementos presentes na amostra (Pacheco, 2020). Com esta técnica, é possível quantificar a presença de óxidos que compõem o material em análise, ajudando a identificar os minerais presentes no solo (Nascimento, 2019).

Figura 9 - Equipamento utilizado no ensaio FRX.



Fonte: Autora (2023).

3.1.5 Caracterização mecânica

3.1.5.1 Ensaio de resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples foi determinada com a aplicação de uma carga em corpos de prova, sem confinamento e com controle de deformação. A preparação das amostras e a execução dos ensaios foram orientadas pelas diretrizes estabelecidas na NBR 12770 (ABNT, 2022). A preparação e o rompimento dos CP's foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFCA – *Campus Juazeiro do Norte*.

Os corpos de prova (CP) foram moldados na mesma densidade e umidade obtidas nos ensaios de compactação (seção 3.1.2), sendo moldados 3 corpos de prova para cada tempo de exposição ($t_0=0$; $t_1=30$, $t_2=60$ e $t_4=120$ dias). O processo de moldagem e preparo para rompimento foi o mesmo descrito no item 3.3.4.

Com o uso da prensa triaxial de marca MATEST, modelo S301M, com capacidade de 10 kN (Figura 10), as amostras foram rompidas, a uma velocidade de 1,0 mm/min, até a ruptura ou até atingir uma deformação máxima de 15%, como sugere a NBR 12770 (ABNT, 2022). No entanto, nas amostras que não apresentaram picos até a deformação de 15%, prosseguiu-se o ensaio até o limite do extensômetro do equipamento, de 22%.

Figura 10 - Prensa triaxial



Fonte: Autora (2023).

3.1.5.2 Ensaio de compressão triaxial

Os procedimentos adotados para realização do ensaio de compressão triaxial CIU, adensado e não drenado, seguiram as recomendações de Head (1988). Para a determinação das envoltórias de ruptura os corpos de prova foram submetidos a tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC. O ensaio consiste em submeter um corpo-de-prova cilíndrico a uma tensão de confinante (σ_c) e, após um período de adensamento ou consolidação, aplicar um acréscimo de carga axial ($\Delta\sigma$) até atingir a ruptura impedindo a drenagem.

Logo após a montagem do corpo de prova na câmara triaxial, iniciava-se a fase de saturação da amostra. O processo de saturação foi feito de duas etapas: (1) pela percolação de água, na base para o topo do corpo de prova; nesta etapa a amostra era submetida a uma tensão confinante de 10kPa para impedir o fluxo preferencial entre o corpo de prova e a membrana; (2) pela aplicação de contrapressão; onde estágios de incrementos de 50 kPa na tensão confinante e na contrapressão eram aplicados, sendo a diferença entre a contrapressão e a tensão confinante mantida constante em 10 kPa. Quando a poropressão monitorada na base do corpo de prova equalizava-se com a contrapressão aplicada em seu topo, um novo incremento de pressão era aplicado. O processo continua até chegar-se a uma saturação de pelo menos 95%, monitorada através da medição do parâmetro B (Skempton, 1953), medido após a aplicação de cada incremento de tensão.

Em seguida, partiu-se para a etapa de adensamento do solo. Nesta fase a tensão confinante é elevada até obter-se a tensão efetiva de ensaio e finalizada quando a variação de volume do corpo de prova torna-se constante.

Por fim, aplicou-se a carga para fase de cisalhamento do corpo de prova impedindo a drenagem. A prensa utilizada nos ensaios (Figura 11) foi uma automática com carga máxima de 50 kN. As tensões geradas foram medidas com anéis dinamométricos com capacidade de 250 kN. A velocidade de carregamento empregada foi de 0,083 mm/min. A seguir são apresentados os principais elementos do equipamento empregado nos ensaios triaxiais:

- Prensa: que permite a aplicação de deformação controlada;
- Câmara triaxial: que permite que o corpo de prova seja submetido à tensão de confinamento e a força axial;
- Sistema de aplicação de pressão: através de colunas de mercúrio;
- Medidores de pressão confinante: pela leitura do manômetro;
- Medidores de poropressão: pela leitura do transdutor;
- Medidores de variação volumétrica: pela leitura da variação da altura da bureta;
- Medidores de deformação: através da leitura do extensômetro;
- Medidores de força axial: através da leitura da deformação do anel dinamométrico;

A aquisição dos dados foi realizada pela leitura dos medidores citados anteriormente.

Figura 11 - Equipamento utilizado nos ensaios triaxiais



Fonte: Autora (2023).

3.2 Caracterização da fibra de coco (elemento de reforço do compósito)

As fibras de coco (*nucifera L*), obtidas a partir dos resíduos da casca do fruto foram usada como elemento de reforço do solo. Algumas informações sobre esta fibra foram apresentadas na seção 2.6. As fibras são comercializadas pela empresa Ecoluz fibras de coco, da cidade de Fortaleza/ CE, e foram adquiridas já beneficiadas.

Essa fibra vegetal foi escolhida por apresentar boas propriedades mecânicas e pela necessidade de uso de novas matérias-primas provenientes de fontes renováveis, que possam substituir as fibras sintéticas. A utilização de fibras vegetais, além de garantir a confecção de um produto ecologicamente correto, pode garantir uma nova alternativa de renda para agricultores das regiões produtoras quando produzidas em escala industrial. A Figura 12 apresenta a fibra empregada nesse estudo.

Figura 12 - Fibra de coco

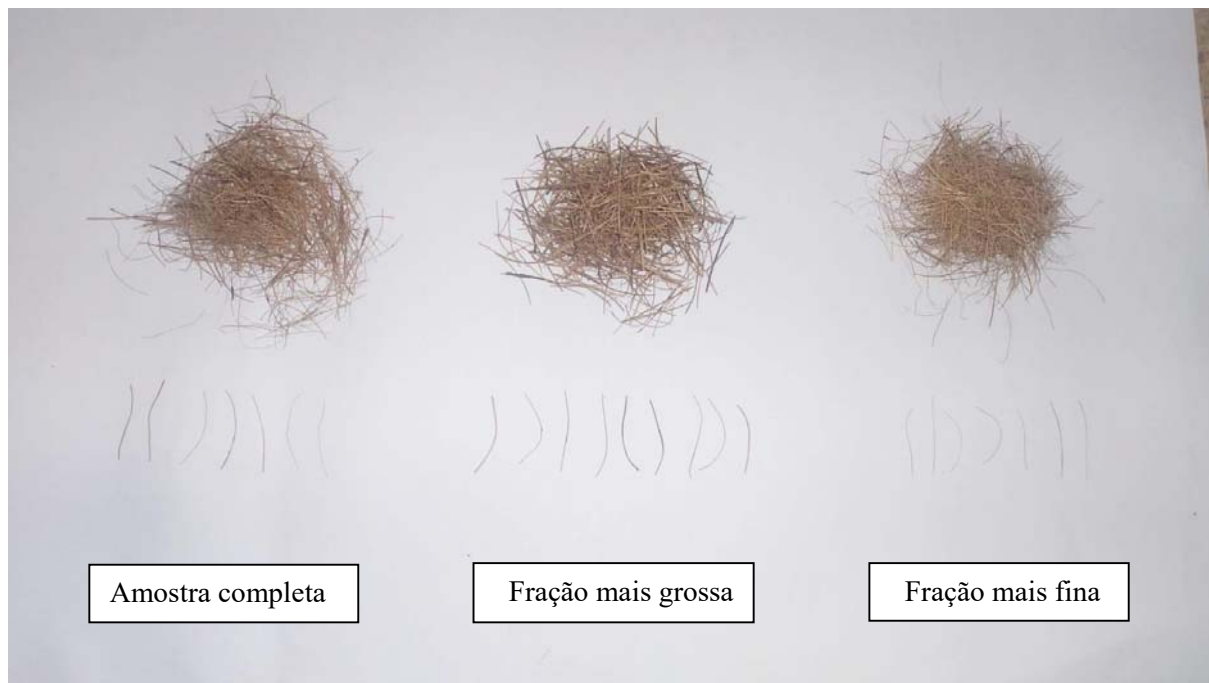


Fonte: Autora (2023).

A caracterização dos resíduos fibrosos da casca do coco foi realizada para a determinação da composição gravimétrica. De uma amostra de 4 kg foi feita a separação em 4 partes aproximadamente iguais. De cada parcela foi recolhida uma amostra de 15g. Resultando em uma amostra final de 60g. De forma visual foi feita a separação da amostra final em duas frações, uma correspondente a fração mais fina, e outra a fração mais grossa. As frações fina e grossa correspondem, respectivamente, a 35,73% e 64,27% da amostra total de 60g. A Figura 13 apresenta as amostras de fibras com diferentes frações. A separação em

frações foi realizada com o objetivo de analisar a contribuição de cada parcela na resistência do compósito.

Figura 13 - Fibra de coco – amostra completa e frações



Fonte: Autora (2023).

Para a definição dos teores e comprimentos de fibras que foram incorporados no solo, foi adotada os valores empregados na literatura. Em geral, os teores adotados em geotecnia são pequenos, chegando até 1%, em relação à massa seca do solo. Há relatos de problemas de trabalhabilidade e baixa resistência do material quando se incorpora teor de 1.0% (Pinto, 2007; Leocádio, 2005; Prabakar; Sridhar, 2002). Quanto ao comprimento, quando se adota fibras curtas, implica-se que o comprimento será de no máximo 50mm, pois quanto maior o comprimento maior a dificuldade na homogeneização.

Baseando-se em estudos anteriores, que utilizaram teores de fibras entre 0,25 a 1% com diferentes comprimentos (Tamayo, 2015; Prakabar; Sridhar, 2022; Leocácio, 2005, Casagrande 2005; Santiago, 2005; Senez, 2016; Silveira, 2018; Consoli *et al.*, 2007), adotou-se o teor de 0,5% de teor de fibra, em relação à massa de solo seca, e comprimento de 25mm. Pois teores e comprimentos elevados tornam difícil à homogeneidade da mistura solo-fibra.

As fibras foram cortadas de forma manual no comprimento de 25mm, sendo posteriormente acondicionadas em sacos plásticos hermeticamente fechados até a realização dos ensaios.

3.2.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) e determinação do teor de matéria orgânica

A técnica de análise por Fluorescência de Raios-X (FRX) possibilita a realização de análises em materiais, permitindo a identificação tanto quantitativa quanto qualitativa das composições químicas presentes nas amostras (Silveira, 2018). O preparo da amostra a ser ensaiada consiste no picotamento das fibras em partículas com comprimento de 1 mm e acondicionamento em recipiente próprio para o ensaio. As análises foram realizadas no equipamento da marca PANalytical modelo Epsilon1, disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais da UFCA.

Para determinar o teor de matéria orgânica presente na fibra foi realizado o ensaio de determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 °C (NBR 7182 – ABNT, 2022). Durante o procedimento da determinação do teor de matéria orgânica, a fibra foi levada a estufa a temperatura de 70 °C, sendo feita a pesagem a cada intervalo de 1h até ser atingida a constância de massa. O processo foi realizado por 5h. Após esse processo a amostra foi levada a mufla por 12h a 440 °C. A fibra não passou por nenhum preparo e foi levada a mufla em quantidade aproximada de 2 g.

Ambos os ensaios foram realizados na amostra de fibra completa para o tempo t_0 .

3.2.2 Ensaio de difração de Raios-X (DRX)

A análise por DRX tem por objetivo determinar o índice de cristalinidade da fibra, diretamente relacionada à celulose. Quanto maior o grau de cristalinidade, melhor o alinhamento das cadeias e, portanto, maior a resistência mecânica das fibras (Canevarolo, 2006).

O ensaio foi realizado de duas formas, com a fibra natural e após ser carbonizada. Com a fibra natural o preparo consistiu no picotamento das fibras em partículas com comprimento de 1 mm. No processo de carbonização a amostra foi levada a mufla a 450 °C por 12 horas. Após ser retirada da mufla, com auxílio de um almofariz, a amostra foi macerada e então conduzida para o ensaio DRX.

As análises foram realizadas no difratômetro da marca Panalytical, modelo Xpert Pro MPD, disponível no Laboratório de Difração de Raios-X da UFC. A Figura 14 apresenta uma visão do equipamento utilizado.

Figura 14 - Equipamento utilizado no ensaio de DRX



Fonte: Autora (2023).

Os ensaios de DRX foram realizados nas amostras de fibra completa (AFC), para t_0 , e após submetida aos processos de degradação, para t_4 . Após o rompimento dos corpos de prova referentes à amostra completa (SAFC) do tempo de 120 dias (t_4) os mesmos foram lavados em uma peneira para separar o solo da fibra, para a realização de ensaios de difração de raios-X nas fibras. A Figura 15 apresenta o corpo de prova antes de ser levado à peneira para separação.

Figura 15 - Corpo de prova do compósito da amostra de fibra completa (SAFC) do tempo t_4 antes de ser lavado na peneira



Fonte: Autora (2023).

3.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica permitiu a visualização da estrutura da fibra. As imagens das amostras foram registradas com aumento de 300 vezes do tamanho real. O preparo das amostras consistiu em imersão das fibras em água destilada por 24h e posterior corte da seção transversal com lâmina, Figura 16.

Figura 16 - Preparo de amostras para o ensaio MEV – fibras imersas



Fonte: Autora (2023).

A análise de microscopia foi realizada no Laboratório de Microscopia do Departamento de Geologia da UFC. O equipamento utilizado foi o Microscópio Eletrônico de Varredura com detector de EDS, modelo TM3000, da marca Hitachi (Figura 17).

Figura 17 - Equipamento utilizado no ensaio MEV



Fonte: Autora (2023).

A análise foi realizada para as amostras correspondentes a fração mais fina (AFF) e a fração mais grossa (AFG), para os tempos t_0 e t_4 . Para obter as fibras relacionadas ao tempo t_4 , após a ruptura dos corpos de prova dos compósitos da fração mais fina (SAFF) e da fração mais grossa (SAFG), que anteriormente foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, procedeu-se à lavagem dos mesmos em uma peneira, separando assim a fibra da matriz de solo.

3.3 Caracterização do compósito solo-fibra sem e com exposição

3.3.1 Compósito ou amostras solo-fibras

Os compósitos de solo e fibras naturais foram feitos com 3 formas distintas de fibra: (a) amostra fibra completa (AFC); (b) amostra fibra fina (AFF) e (c) amostra fibra grossa (AFG), todas utilizando um teor de fibras de 0,5% e comprimento de 25mm.

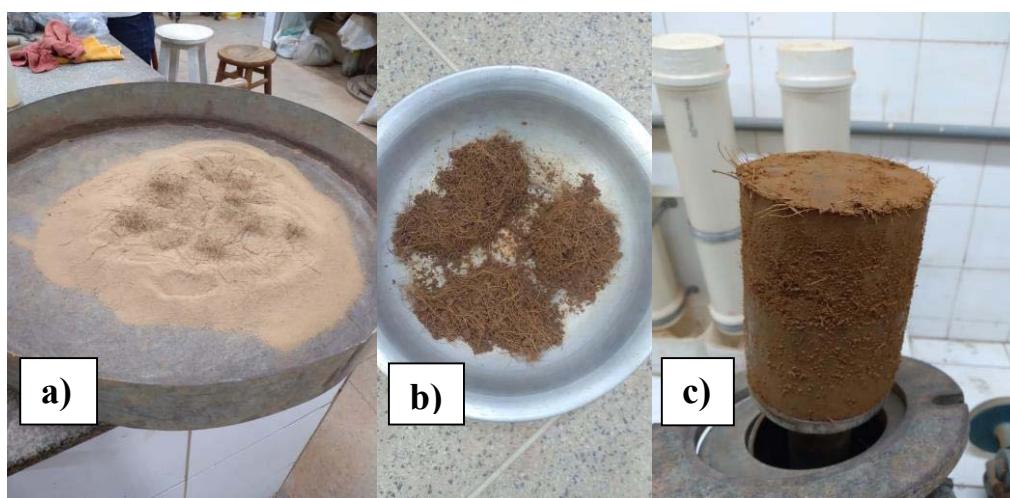
3.3.2 Ensaio de compactação

Os ensaios foram realizados utilizando a energia de compactação Proctor Normal e com reuso de material, como estabelece a NBR 7182 (ABNT, 2020). O ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC. Sendo empregado o teor de 0,5% de fibras de coco, em relação ao solo seco. O ensaio foi realizado para a amostra fibra completa (AFC), e os parâmetros obtidos foram utilizados na moldagem de todos os corpos

de prova (AFC, AFF AFG) utilizados nos ensaios de resistência a compressão simples e de compressão triaxial.

Para a mistura dos componentes os mesmos foram dispostos em uma bandeja metálica, sendo as fibras adicionadas randomicamente sob o solo em pequenas porções (Figura 18-a), sendo posteriormente adicionada à água. Em seguida as misturas foram revolvidas utilizando uma espátula com o intuito de homogeneizar o material (Figura 18-b). A Figura 18-c apresenta o corpo de prova após a compactação.

Figura 18 - Preparo para o ensaio de compactação

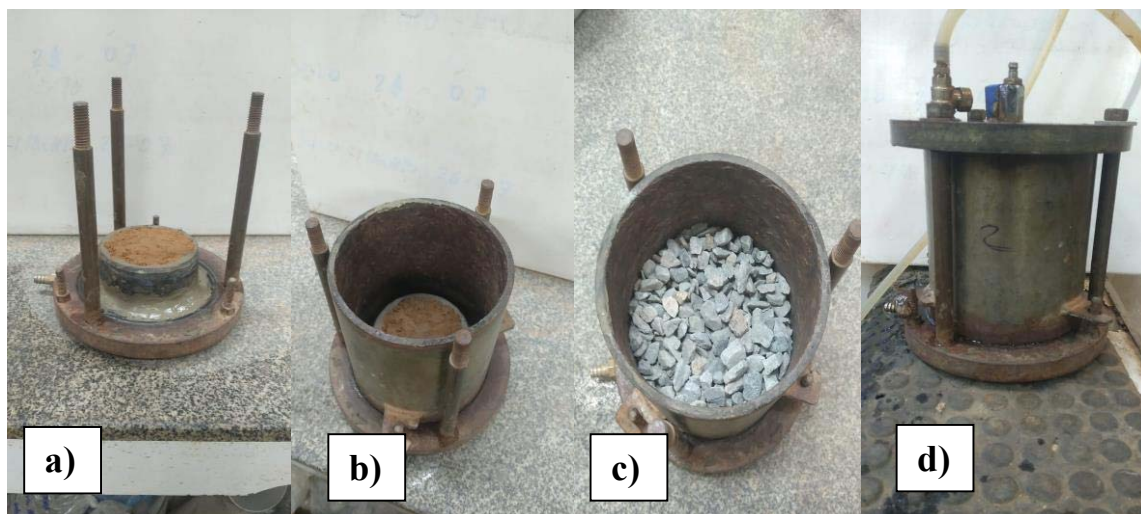


Fonte: Autora (2023). a) mistura em bandeja; b) material homogeneizado; c) material compactado

3.3.3 Ensaio de permeabilidade (compósito)

O ensaio de permeabilidade foi realizado utilizando um permeâmetro de carga variável, de acordo com norma NBR 14545/2001 para o compósito com amostra completa de fibra (AFC). O processo de preparo da mistura foi o mesmo estabelecido na compactação. Após a mistura feita, a amostra foi moldada no permeâmetro com os mesmos parâmetros obtidos no ensaio de compactação. O material foi moldado no cilindro com 9,9 cm de diâmetro e 4,74 cm de altura, compactadas dinamicamente em três camadas. A Figura 19 apresenta etapas de realização do ensaio.

Figura 19 - Ensaio de permeabilidade do compósito com a amostra completa de fibra (AFC):



Fonte: Autora (2023). a) corpo de prova compactado; b) corpo de prova posicionado na base) material granular de preenchimento; d) ensaio em andamento.

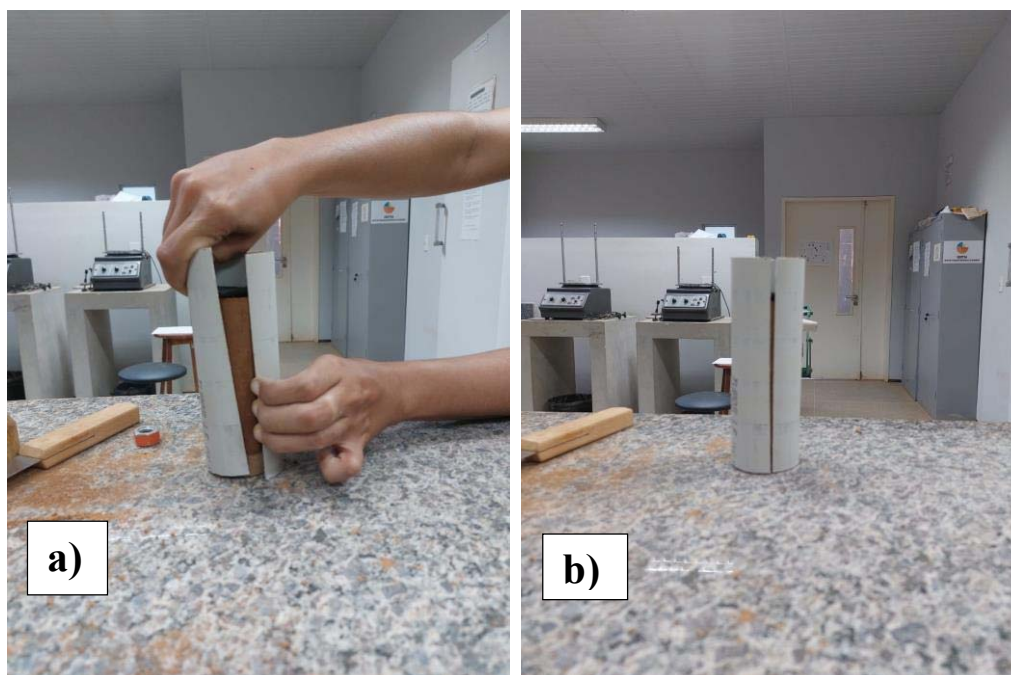
3.3.4 Ensaio de resistência – compressão simples e triaxial

Para os ensaios de compressão simples e triaxial inicialmente as misturas foram preparadas, da mesma forma anteriormente descrita, e em seguida moldados com os parâmetros obtidos no ensaio de compactação, e na energia Proctor Normal, para um teor de fibra de 0,5% (AFC, AFF e AFG) e comprimento de 25 mm.

3.3.4.1 Moldagem dos corpos de prova solo-fibra para os ensaios de compressão simples e triaxial

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência foram moldados em tubos de PVC de 5cm de diâmetro e 15 cm de altura, respeitando os parâmetros de compactação. Os tubos de PVC foram cortados no sentido longitudinal, como mostra a Figura 20, para facilitar a retirada dos corpos de prova compactados dentro dos moldes. Para definição dessa configuração foi necessário ser avaliado previamente 3 formas distintas: o tubo fechado; o tubo bipartido; e, o tubo cortado apenas no sentido longitudinal. Para essa análise foram confeccionados corpos de prova nas 3 configurações anteriores e esses foram expostos aos agentes climáticos por 15 dias. Ao final observou-se que o tubo PVC cortado no sentido longitudinal (Figura 20-a) foi o que apresentou melhor facilidade de desforma e variação de diâmetro aceitável.

Figura 20 - Configuração do tudo de PVC empregado.

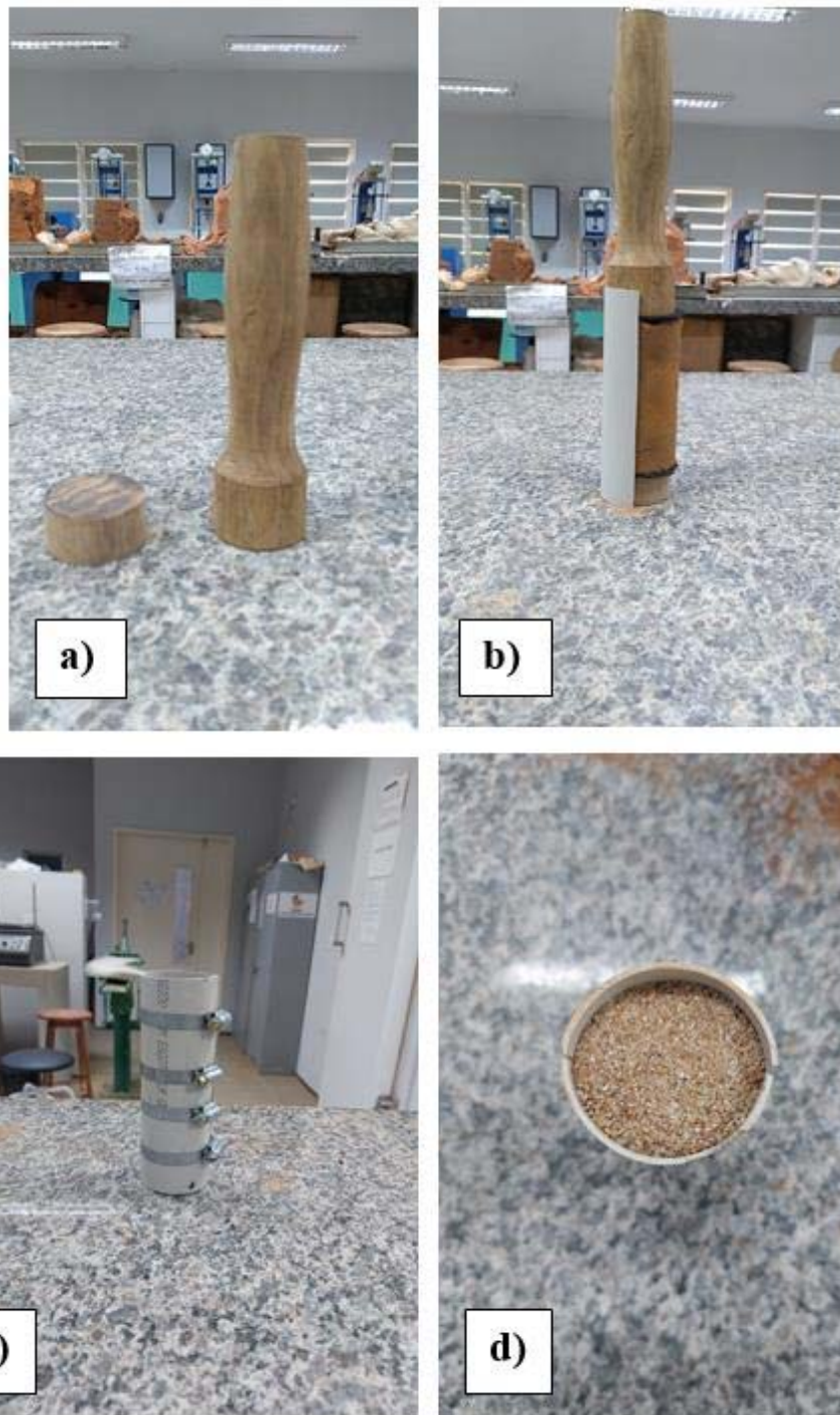


Fonte: Autora (2023). a) Retirada da amostra compactada; b) tubo cortado no sentido longitudinal

Os corpos de prova resultantes da compactação nos moldes apresentaram as seguintes dimensões: altura de $10\text{cm} \pm 2$ e diâmetro de $4,7\text{cm} \pm 2$. A compactação foi feita em três camadas, realizando-se escarificação entre elas. Para realização da compactação foi fabricado um soquete, de seção plena, e uma base (Figura 21-a). A configuração final é mostrada na Figura 21-b. Foi empregado um geotêxtil na base e no topo do corpo de prova, de forma a proteger e facilitar a sua moldagem. Também foram utilizadas 4 braçadeiras (Figura 21-c), em cada corpo de prova, sendo essa quantidade empregada para minimizar a variação de diâmetro com a aplicação do esforço de compactação. As amostras foram compactadas manualmente em três camadas, controlando o peso da mistura adicionada e a altura das camadas de forma a obter a densidade obtida no ensaio de compactação.

No topo dos corpos de prova que foram expostos aos agentes climáticos foi lançada uma camada de areia uniforme de cerca de 2 a 3 cm (Figura 21-d), com objetivo de proteger a parte superior dos corpos de prova da erosão.

Figura 21 - Configuração dos corpos de prova.



Fonte: Autora (2023). a) soquete e base para compactação; b) configuração do corpo de prova; c) braçadeiras; d) cobertura final com areia

3.3.4.2. Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)

Os ensaios de compressão simples foram realizados para cada tipo de fibra utilizada na amostra AFC, AFF, e AFG e para 4 tempos de exposição, $t_0=0$, $t_1=30$, $t_2=60$ e $t_4=120$ dias. Também foram realizados ensaios de compressão simples apenas na matriz de solo (SN), como referencial, utilizando os mesmos períodos de tempo dos ensaios realizados nas misturas solo-fibras. Os ensaios foram conduzidos como descrito no item 3.1.5.1. No total foram moldados 64 corpos de prova, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 - Ensaio de compressão simples

Amostra	Descrição	Número de ensaios				Total
		$t_0=0$	$t_1=30$	$t_2=60$	$t_4=120$	
SN	Solo natural	4	4	4	4	16
SAFC	Solo + fibra completa	4	4	4	4	16
SAFF	Solo + fibra fina	4	4	4	4	16
SAFG	Solo + fibra grossa	4	4	4	4	16
Total						64

Fonte: Autora (2023).

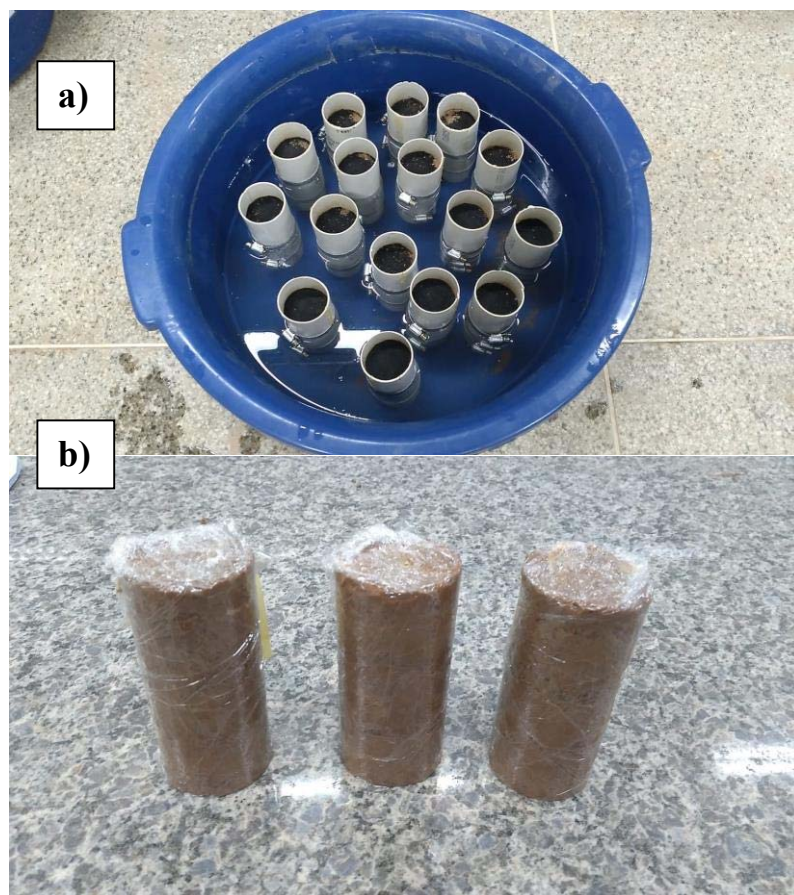
3.3.4.3 Preparo para rompimento dos compósitos submetidos ao ensaio de resistência a compressão simples após o tempo de exposição

Para cada tempo de ensaios os corpos de prova foram conduzidos para laboratório e submetidos ao processo de uniformização de umidade. O processo é descrito a seguir:

- Os corpos de prova foram colocados em um recipiente com água por aproximadamente 24 horas (Figura 22-a);
- Em seguida foram retirados do tubo de PVC e envoltos em plástico filme (Figura 23-b), sendo posteriormente conduzidos para uma câmara úmida por um período de 7 dias;
- Após o período na câmara úmida, os corpos de prova eram conduzidos à prensa para a realização do ensaio de RCS.

Após os rompimentos, foi feita a determinação do teor de umidade de cada corpo de prova, de modo a verificar se o processo descrito anteriormente conseguiu manter uma mesma umidade para os corpos de prova no momento do rompimento.

Figura 22 - Processo de uniformização da umidade.



Fonte: Autora (2023). a) corpos de prova em recipiente para saturação; b) corpos de prova prontos para serem conduzidos à câmara úmida.

3.3.4.4 Ensaios de resistência à compressão triaxial

Os ensaios de compressão triaxial foram realizados para as misturas solo fibras com fibras completas (SAFC) e para o solo natural (SN), para os tempos $t_1=0$ e $t_4=120$ dias. Os ensaios foram conduzidos como descrito no item 3.1.5.2.

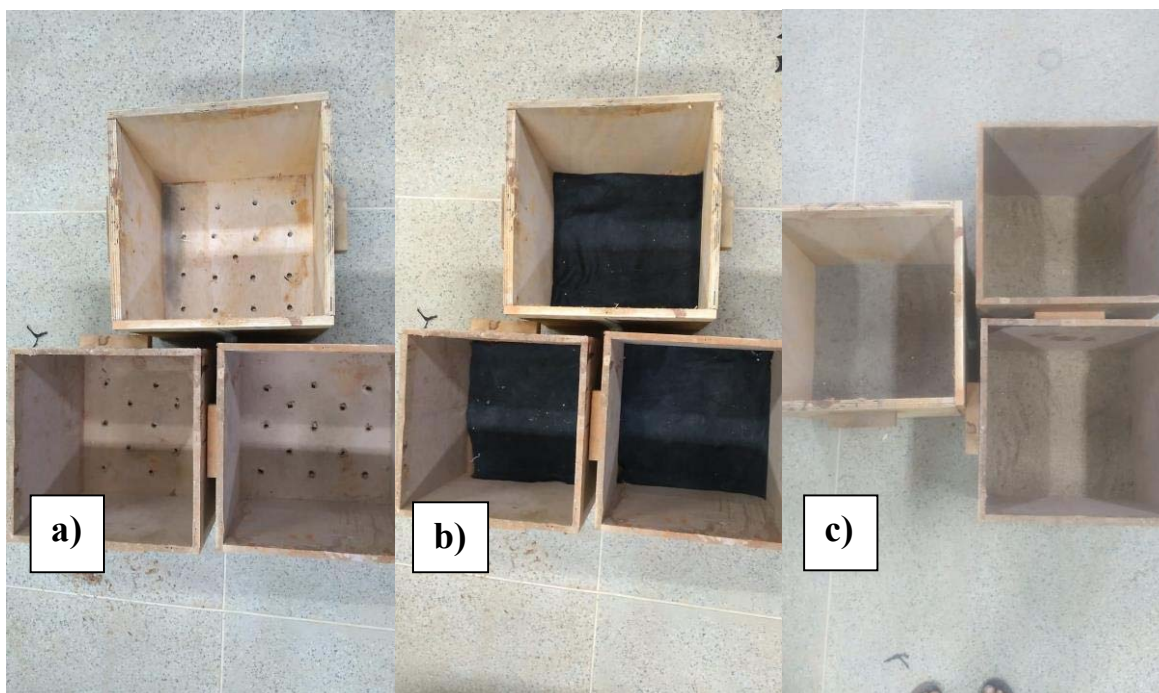
3.3.5 Caracterização e preparo dos compósitos a serem submetidos ao envelhecimento natural

Após os a moldagem os corpos de prova que buscavam investigar o efeito da degradação da fibra sobre a resistência do compósito foram expostos aos agentes climáticos em períodos tempos iguais ou superiores há 30 dias.

Diante desse quadro foram concebidos dois cenários de análise: solo reforçado com fibras no tempo zero, sem exposição aos agentes climáticos diversos (de controle) e solo reforçado com fibras exposto às condições ambientais diversas ao longo do tempo.

Os corpos de prova foram expostos no ambiente externo em caixas retangulares confeccionadas em madeira, com base perfurada (Figura 23-a), para permitir o escoamento da água da chuva. Sobre a base da caixa foi colocado um geotêxtil (Figura 23-b) e uma camada de 5cm de areia (Figura 23-c). Dessa maneira, a água das chuvas percolavam através dos compósitos pela base drenante, evitando acúmulo de água. A sequência é apresentada na Figura 24.

Figura 23 - Caixas para exposição dos corpos de prova



Fonte: Autora (2023). a) Caixas perfuradas; b) Caixas com geotêxtil; c) Caixas com camada drenante

No ambiente exterior, os compósitos ficaram expostos (Figura 24) por um período de até quatro meses (com a exposição dos corpos de prova entre os meses de junho a outubro), sendo realizados ensaios nos tempos 30, 60 e 120 dias com o objetivo traçar curvas que relacionem as variações da resistência com o tempo. Após cada período de exposição os corpos de prova eram retirados do ambiente de exposição e conduzidos para o laboratório.

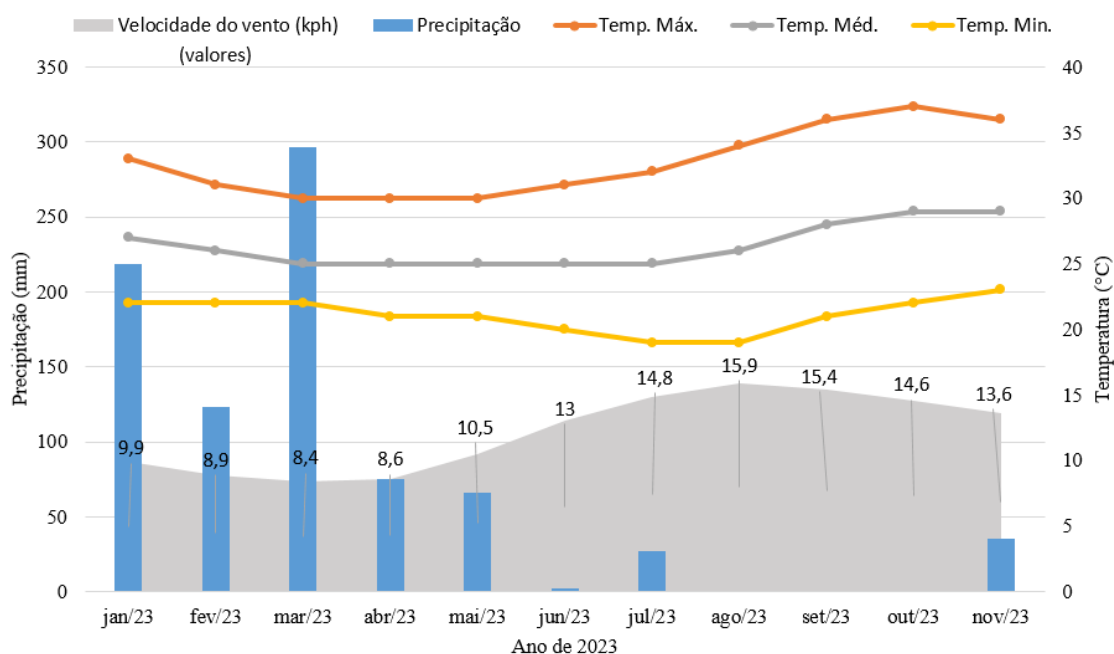
Figura 24 - Corpos de prova expostos aos agentes climáticos



Fonte: Autora (2023).

Estas amostras foram sujeitas à ação de diversos agentes climáticos, que influenciam o processo de biodegradação das fibras, como variações de temperatura do solo e de umidade do solo, que são função da precipitação e da radiação solar. As variáveis meteorológicas (temperatura, velocidade do vento e precipitação) são apresentadas no Gráfico 4

Gráfico 4 – Parâmetros meteorológicos do ano de 2023: Precipitação, temperatura (máxima, média e mínima) e velocidade do ar



Fonte: FUNCEME (2023) e INMET (2023).

O local de exposição dos corpos de prova estava localizado na Universidade Federal

do Cariri – *Campus Juazeiro do Norte*, a uma distância de aproximadamente 7 km da estação meteorológica de coleta dos dados, que fica localizada na cidade de Barbalha-CE. Os ensaios foram realizados entre os meses de junho e outubro. A Tabela 9 apresenta as datas de exposição e coleta.

Tabela 9 - Período de exposição dos corpos de prova

Tempo (dias)	t₁=30	t₂=60	t₄=120
Data de exposição	14/junho	14/junho	14/junho
Data de coleta	14/julho	14/agosto	14/outubro
Período (dias)	14/junho a 14/julho	14/julho a 14/agosto	14/agosto a 14/setembro a 14/agosto
Precipitação (mm)	29,1	0	0

Fonte: Autora (2023).

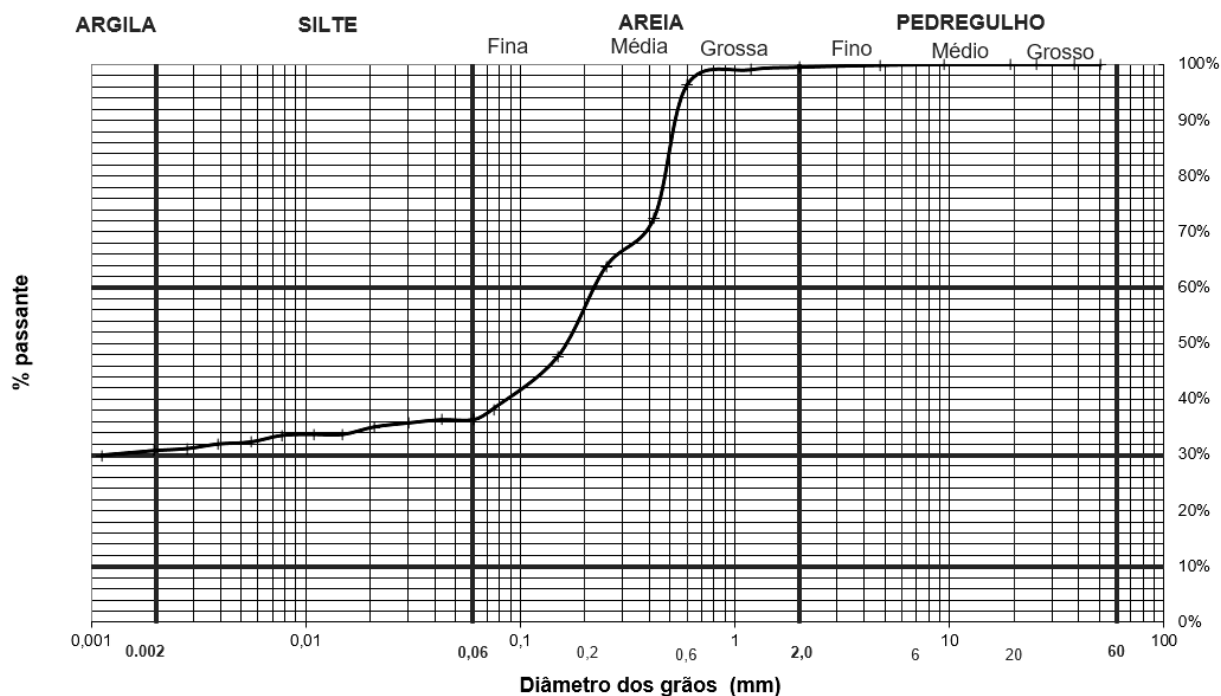
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do solo (matriz do compósito) no tempo zero e ao longo do tempo

4.1.1 Caracterização física

Os resultados da caracterização geotécnica indicaram que o solo utilizado como matriz possui baixa plasticidade (Burmister, 1949), com $IP = 10\%$, com porcentagem de partículas que passam na peneira 200 (abaixo de $0,074\text{mm}$) de cerca de $38,3\%$. A densidade real dos grãos obtida foi de $2,75$. A atividade do solo, obtida pelo índice de atividade de Skempton (1953), foi de $0,30$ e a fração argilosa é classificada como inativa. Pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) o material foi classificado como SC, uma areia argilosa. Durante a caracterização do material não foi observada a presença de matéria orgânica. No Gráfico 5 é apresentado a curva de distribuição granulométrica do material com defloculante, enquanto na Tabela 10 as propriedades físicas do solo.

Gráfico 5 - Curvas granulométricas do solo com defloculante



Fonte: Autora (2023).

Tabela 10 - Propriedades físicas do solo

Propriedades do solo	Valor
----------------------	-------

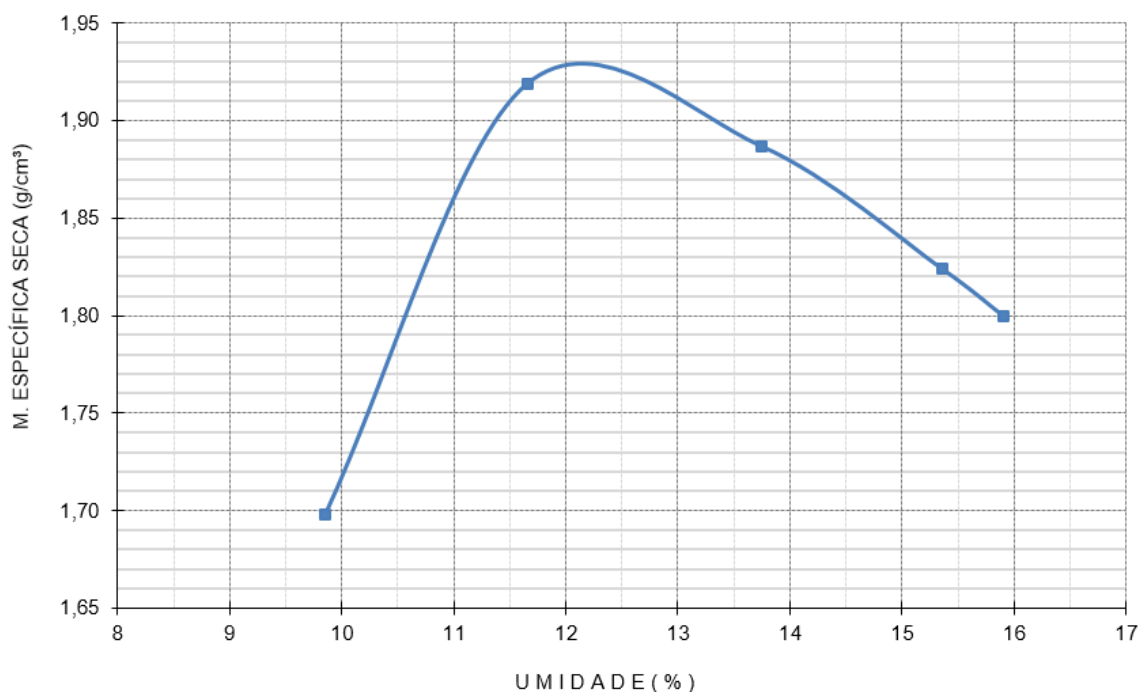
Massa específica dos grãos (g/cm^3)	2,75
Limite de liquidez (%)	24
Limite de plasticidade (%)	14
Índice de plasticidade (%)	10
Pedregulho (%)	0,48
Areia (%)	63,24
Silte (%)	5,55
Argila (%)	30,73
Índice de atividade	0,30

Fonte: Autora (2023).

4.1.2 Compactação

O Gráfico 6 refere-se à curva de compactação da matriz do compósito, a partir do qual se obteve a massa específica seca máxima de $1,93 \text{ g/cm}^3$ e a umidade ótima de 12,1%. Os valores de massa específica seca máxima e umidade ótima obtidos no ensaio de compactação são típicos para esse tipo de solo e estão de acordo com resultados obtidos por outros autores (Lima, 2018; Santos, I., 2023).

Gráfico 6 – Curva de compactação da matriz do compósito



Fonte: Autora (2023).

4.1.3 Ensaio de permeabilidade (matriz do compósito)

O coeficiente de permeabilidade para a matriz do compósito obtido foi de $1,9 \times 10^{-4}$ cm/s, valor esse de ordem de grandeza muito próxima à descrita por Pinto (2000) e Santos (2019) para esse tipo de solo. Para Das Braja (2007) esse valor de permeabilidade é típico de uma argila siltosa.

4.1.4 Caracterização química

A composição química do solo é apresentada na Tabela 11, tendo sido obtida através do ensaio FRX. Através desta análise foram obtidos os teores de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), potássio (K_2O), óxido de rubídio (Rb_2O), ferro (Fe_2O_3), bromo (Br), dióxido de germânio (GeO_2) dentre outros elementos presentes nos solos. Este resultado confirmou a presença marcante de sílica e aponta a presença de alumina como o segundo elemento mais representativo.

Tabela 11 - Composição química da matriz do compósito

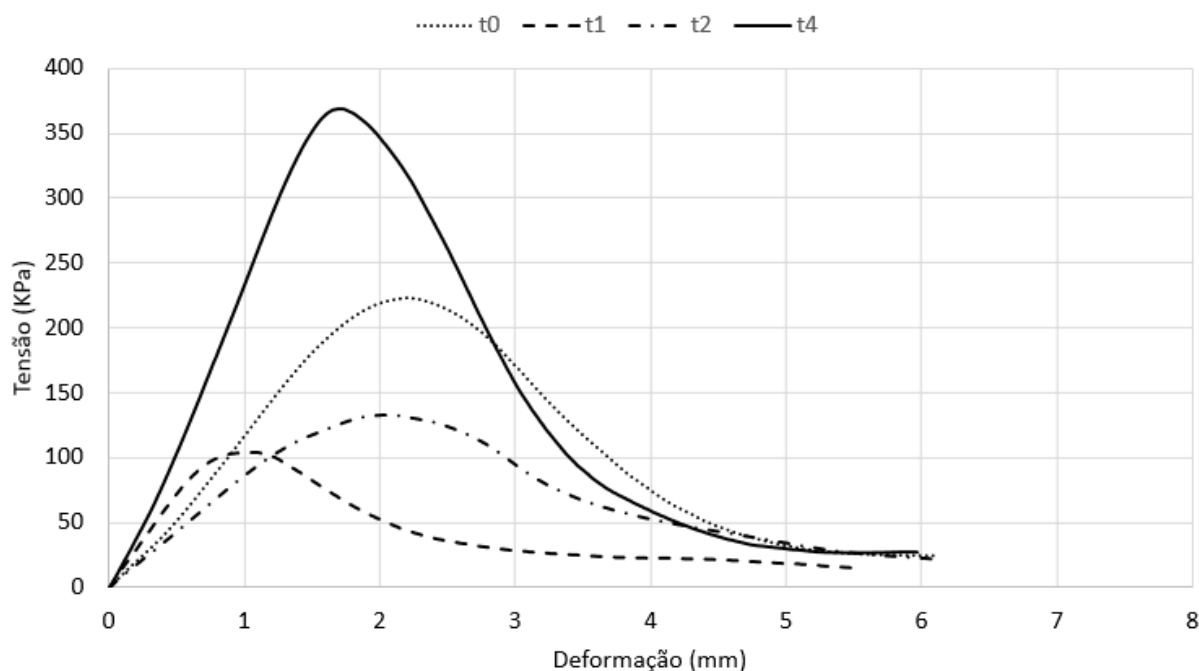
Constituintes em Porcentagens							
	SiO_2	Al_2O_3	Rb_2O	Fe_2O_3	Br	GeO_2	Outros
Matriz Areno Argilosa	44,773	20,944	5,507	5,415	5,135	3,750	14,426

Fonte: Autora (2023).

4.1.5 Caracterização mecânica

a) Ensaio de resistência à compressão simples (RCS)

Os resultados do ensaio de RCS (Gráfico 7 e Tabela 12) indicaram uma variação no comportamento mecânico do solo natural (SN) ao longo do tempo, acompanhando as mudanças nas condições climáticas do local de exposição dos corpos de prova. A análise da Tabela 12, juntamente com os dados de precipitação do Gráfico 3 e Tabela 10, revela que o comportamento observado nos ensaios de RCS está diretamente relacionado às variações na sucção matricial do solo causadas pelas condições climáticas ao longo do período de exposição.

Gráfico 7 - Curvas de resistência à compressão simples do solo natural (SN)

Fonte: Autora (2023).

Tabela 12 - Dados de resistência à compressão simples para o solo natural (SN)

Tempo de exposição	t_0	t_1	t_2	t_4
Tensão de ruptura (KPa)	223,19	103,40	133,30	368,97
Desvio padrão (KPa)	16,02	11,27	13,40	11,27

Fonte: Autora (2023).

Durante os períodos de alta precipitação (junho), a infiltração de água no solo reduziu a sucção matricial, diminuindo sua resistência, conforme evidenciado pela queda na tensão de ruptura de t_0 para t_1 . Esse fenômeno é amplamente discutido por Krahm e Fredlund (1972), que destacam o papel da sucção matricial no comportamento hidromecânico de solos não saturados. Informações complementares sobre esse fenômeno são fornecidas por Miguel *et al.* (2006), Neto (2008) e Mendes (2008).

Nos meses subsequentes, caracterizados pela ausência de precipitação (julho a outubro), a redução no teor de umidade devido à evaporação promoveu o aumento gradual da sucção matricial, resultando em uma recuperação parcial da resistência no tempo t_2 e um incremento significativo no tempo t_4 . Vieira e Marinho (2001) explicam que processos de evaporação e infiltração alteram o balanço hídrico do solo, modificando seu perfil de sucção.

Durante períodos de seca, o aumento da sucção eleva a resistência ao cisalhamento, como observado em t_4 , quando a tensão de ruptura atingiu seu valor máximo de 368,97 kPa.

Além disso, fatores como mineralogia, densidade, distribuição de poros e teor de água no solo influenciam suas propriedades mecânicas, conforme apontado por Mendes (2008). Fredlund e Rahardjo (1993) apontaram que bolhas de ar ocluídas são comuns em graus de saturação acima de 90%, mas tal fenômeno não ocorreu neste estudo, que registrou um grau máximo de saturação de 83%.

Por fim, a dinâmica entre períodos de seca e chuva destaca como as variações climáticas afetam diretamente o comportamento mecânico do solo, alterando sua resistência e parâmetros de deformabilidade. Essa interação evidencia a importância de considerar o balanço hídrico em estudos sobre solos não saturados e seus impactos na engenharia geotécnica.

b) Ensaio triaxial convencional

Os resultados do ensaio triaxial CIU para o solo natural (SN) mostram que as condições climáticas influenciaram diretamente os parâmetros de resistência ao cisalhamento e poropressão, de forma semelhante ao observado nos ensaios de resistência à compressão simples (RCS). Os Gráficos 8, 9 e 10, assim como as Tabelas 13, 14 e 15, apresentam os dados referentes ao ensaio triaxial realizado na matriz do compósito (SN) para os tempos t_0 e t_4 .

Na Tabela 13, observa-se que a tensão de ruptura aumentou de t_0 para t_4 para todas as tensões confinantes. Por exemplo, para uma tensão confinante de 100 kPa, a tensão de ruptura passou de 191 kPa para 330,5 kPa, um aumento significativo de resistência. Esse comportamento pode ser atribuído à maior sucção matricial durante o período de seca (tempo t_4), o que eleva a resistência ao cisalhamento do solo, conforme descrito em estudos de Fredlund e Rahardjo (1993).

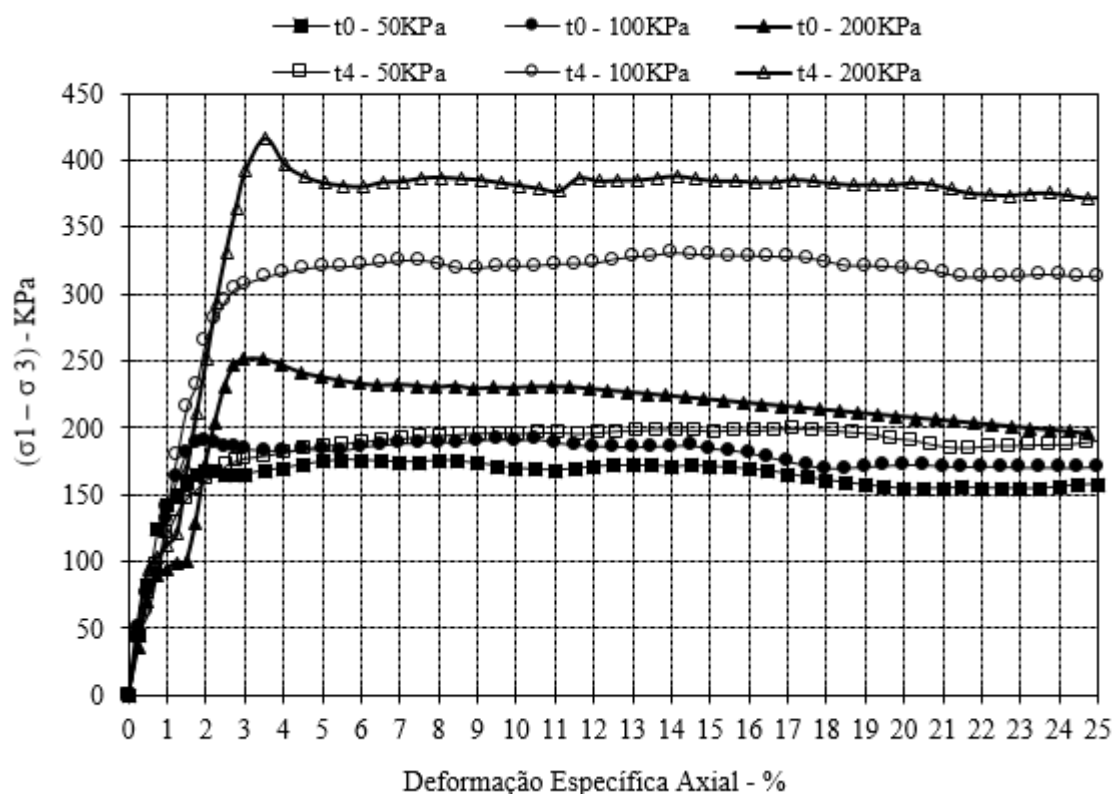
A Tabela 14 reforça esse efeito, mostrando uma redução nas poropressões desenvolvidas em t_4 em comparação a t_0 . Para uma tensão confinante de 100 kPa, a poropressão diminuiu de 56,88 kPa para 10,85 kPa. Essa redução indica um maior controle da água nos poros do solo devido à evaporação e aumento da sucção matricial, fenômeno típico de solos expostos a condições de seca prolongada (Vieira; Marinho, 2001).

Os parâmetros efetivos do solo apresentados na Tabela 15 destacam mudanças significativas na coesão e no ângulo de atrito interno ao longo do tempo. A coesão diminuiu

de 22,1 kPa em t_0 para 2,4 kPa em t_4 , enquanto o ângulo de atrito interno aumentou de 33,9° para 40,2°. Essa variação pode ser explicada pela redistribuição das forças interpartículas causada pela redução da poropressão e aumento da sucção matricial. Durante os períodos de seca, o solo perde parte de sua coesão devido à diminuição da umidade, mas o aumento da resistência ao cisalhamento é compensado pelo maior ângulo de atrito interno, relacionado ao contato entre partículas mais secas e compactadas.

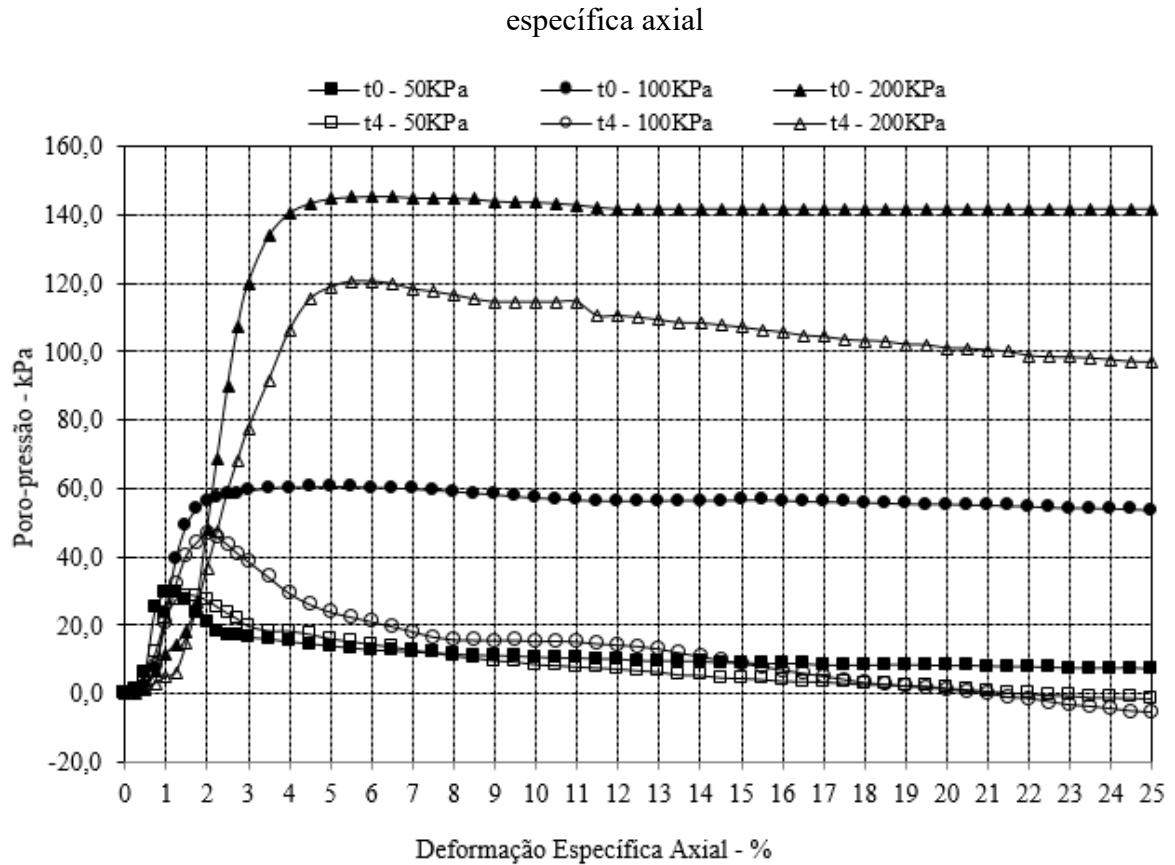
Esses resultados demonstram como as condições climáticas influenciam não apenas a resistência do solo, mas também seus parâmetros efetivos. A redução da poropressão observada em t_4 sugere uma maior contribuição da sucção matricial para a resistência, enquanto a diminuição da coesão reflete a menor disponibilidade de água para atuar como um agente de ligação entre as partículas. O aumento do ângulo de atrito interno evidencia o papel predominante das interações partículas-partículas em condições mais secas. Assim, o ensaio triaxial CIU destaca a importância de considerar tanto os parâmetros efetivos quanto as condições climáticas no comportamento de solos não saturados em projetos geotécnicos.

Gráfico 8 - Ensaio triaxial do solo natural (SN) para os tempos t_0 e t_4 : tensão desvio x def. específica axial



Fonte: Autora (2023).

Gráfico 9 - Ensaio triaxial do solo natural (SN) para os tempos t_0 e t_4 : poropressão x def.



Fonte: Autora (2023).

Tabela 13 - Dados de ruptura do triaxial para o solo natural (SN)

Tensão de ruptura	Tensão confinante (KPa)		
	50	100	200
t₀	175,5	191	251,1
t₄	198,2	330,5	416,3

Fonte: Autora (2023).

Tabela 14 - Dados de poropressão do triaxial para o solo natural (SN)

Poropressão	Tensão confinante (KPa)		
	50	100	200
t₀	13,34	56,88	133,67
t₄	3,43	10,85	91,51

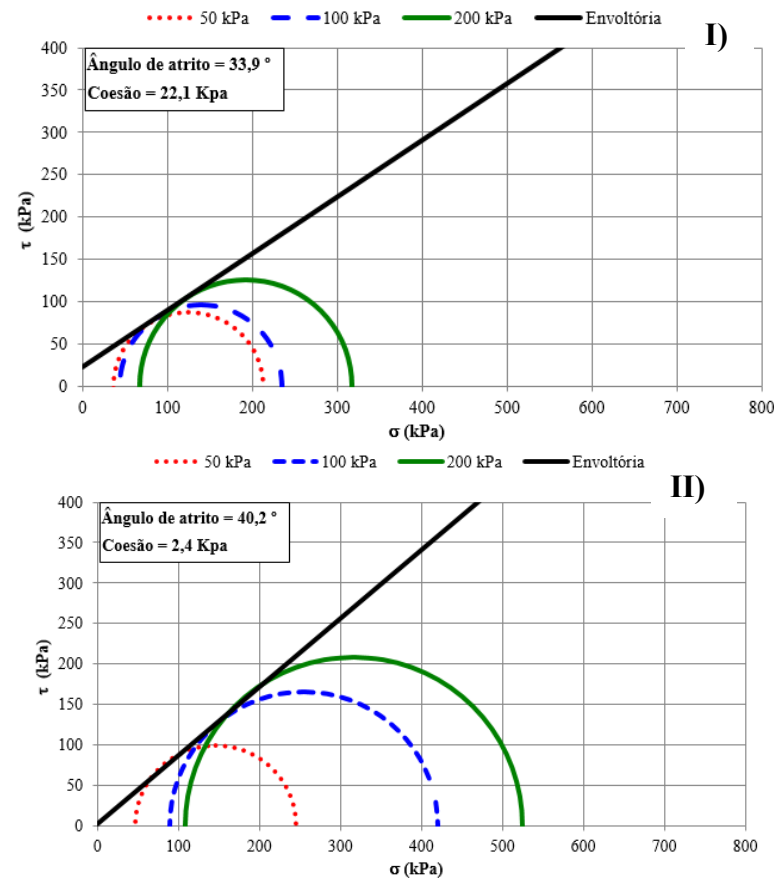
Fonte: Autora (2023).

Tabela 15 - Dados da envoltória de ruptura do solo natural (SN) – parâmetros efetivos

	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito (°)
t_0	22,1	33,9
t_4	2,4	40,2

Fonte: Autora (2023).

Gráfico 10 - Envoltórias de ruptura de tensões efetivas do solo natural (SN): I) t_0 ; II) t_4



Fonte: Autora (2023).

4.2 Caracterização da fibra de coco (elemento de reforço do compósito)

4.2.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e determinação de matéria orgânica

A composição química da fibra de coco, apresentada na Tabela 16, foi determinada por meio do ensaio de fluorescência de raios X (FRX). A análise revelou um elevado teor de CH (93,95%), característico de sua origem vegetal e natureza predominantemente orgânica.

Entre os constituintes inorgânicos, os principais elementos identificados foram óxido de cálcio (CaO) (2,17%) e sílica (SiO₂) (1,97%), que, embora em menor proporção,

desempenham um papel relevante para as interações químicas entre a fibra e a matriz do compósito. A presença de óxido sulfúrico (SO_3) (1,07%) e alumina (Al_2O_3) (0,33%) também é notável, pois esses compostos podem influenciar na durabilidade e compatibilidade química das fibras em diferentes ambientes de aplicação.

Adicionalmente, o potássio (K_2O) (0,29%) e outros elementos traço (0,22%) contribuem para a complexidade química da fibra, potencializando sua interação com os materiais de reforço. A composição equilibrada entre elementos orgânicos e inorgânicos confirma a versatilidade da fibra de coco como um material multifuncional, adequando-se a diversas aplicações, incluindo reforço de solos e matrizes compostas.

Esses resultados destacam o potencial da fibra de coco para aplicações em engenharia geotécnica e materiais compósitos, combinando propriedades estruturais e químicas que favorecem tanto o desempenho mecânico quanto a sustentabilidade.

Tabela 16 - Composição química da fibra de coco

Constituintes em Porcentagens							
	CH	CaO	SiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Outros
Fibra de coco	93,95	2,17	1,97	1,07	0,33	0,29	0,22

Fonte: Autora (2023).

4.2.2 Ensaio de difração de Raios-X

A análise do DRX foi realizada na fibra natural, Gráfico 11, e na fibra após passar pelo processo de carbonização, Gráfico 12, para retirada de matéria orgânica e obtenção da fração mineral, sendo ambos ensaios realizados para as fibras nos tempos t_0 e t_4 .

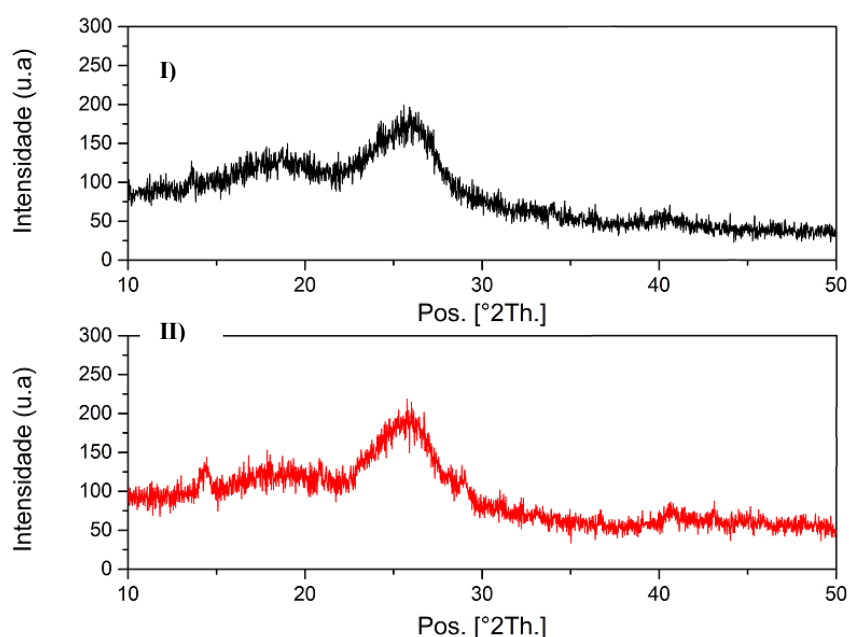
O Gráfico 10 evidenciou a composição química da fibra de coco, onde os valores adquiridos foram comparados com as cartas padrões para tal análise. Os picos de maior intensidade representam a presença de óxido de silício (SiO_2) e óxido de cálcio (CaO), como observado por Nascimento (2017). Observam-se picos de cristalinidade de fibra de coco no t_0 e em t_4 , alcançando níveis de unidades arbitrárias de aproximadamente 250 e 200 (u.a.), respectivamente.

A partir do ensaio de difração de raios-x foi possível determinar quantitativamente a presença ou não de fases cristalinas na fibra de coco. Materiais cristalinos ou com algum caráter cristalino são identificados pela presença de picos no difratograma. O desvio da linha entre 15 e 30 graus é indicativo da amorficidade do material, como mostra o Gráfico 10. O

índice de cristalinidade foi estimado pela relação entre os picos de intensidade máxima e mínima para as fibras no tempo t_0 e t_4 , respectivamente, sendo os valores de 60,37% e 55,73%. Estes valores estão de acordo com os encontrados na literatura (Bedin, 2014). Segundo Fidelis (2014), quanto maior o índice de cristalinidade maior a resistência mecânica da fibra.

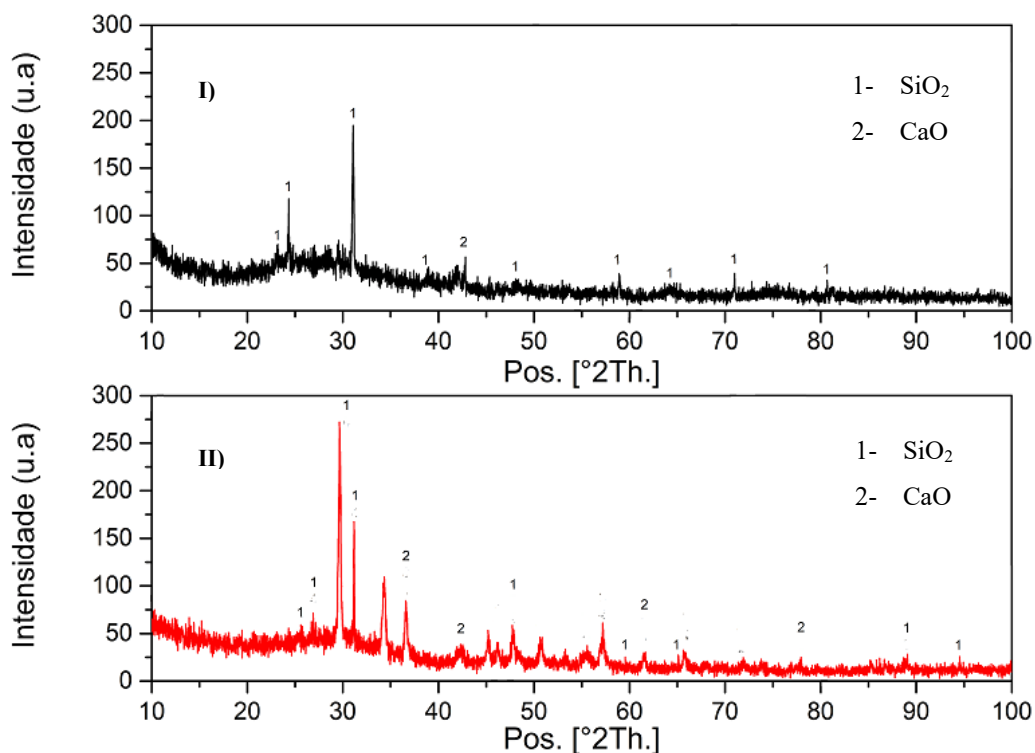
Ao analisar os espectros de difração de raios-X é possível observar que em aproximadamente $2\theta=25^\circ$ está indicado um pico referente à uma região cristalina, nas amostras *in natura* para os tempos t_0 e t_4 . Segundo Tomczak (2010) a constituição da fibra natural é de basicamente microfibrilas cristalinas constituídas de celulose, conectadas por meio de camadas amorfas de lignina e hemicelulose. Em seu estudo utilizou a difração de raios X para caracterizar fibras de coco e curauá, no qual através das análises observou o pico correspondente da celulose, presente em $24,7^\circ$, o que condiz com o pico no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Difração de Raio-X da fibra de coco *in natura*: I) t_0 ; II) t_4



Fonte: Autora (2023).

Gráfico 12 - Difração de Raio-X da fibra de coco após carbonização: I) t4; II) t0.

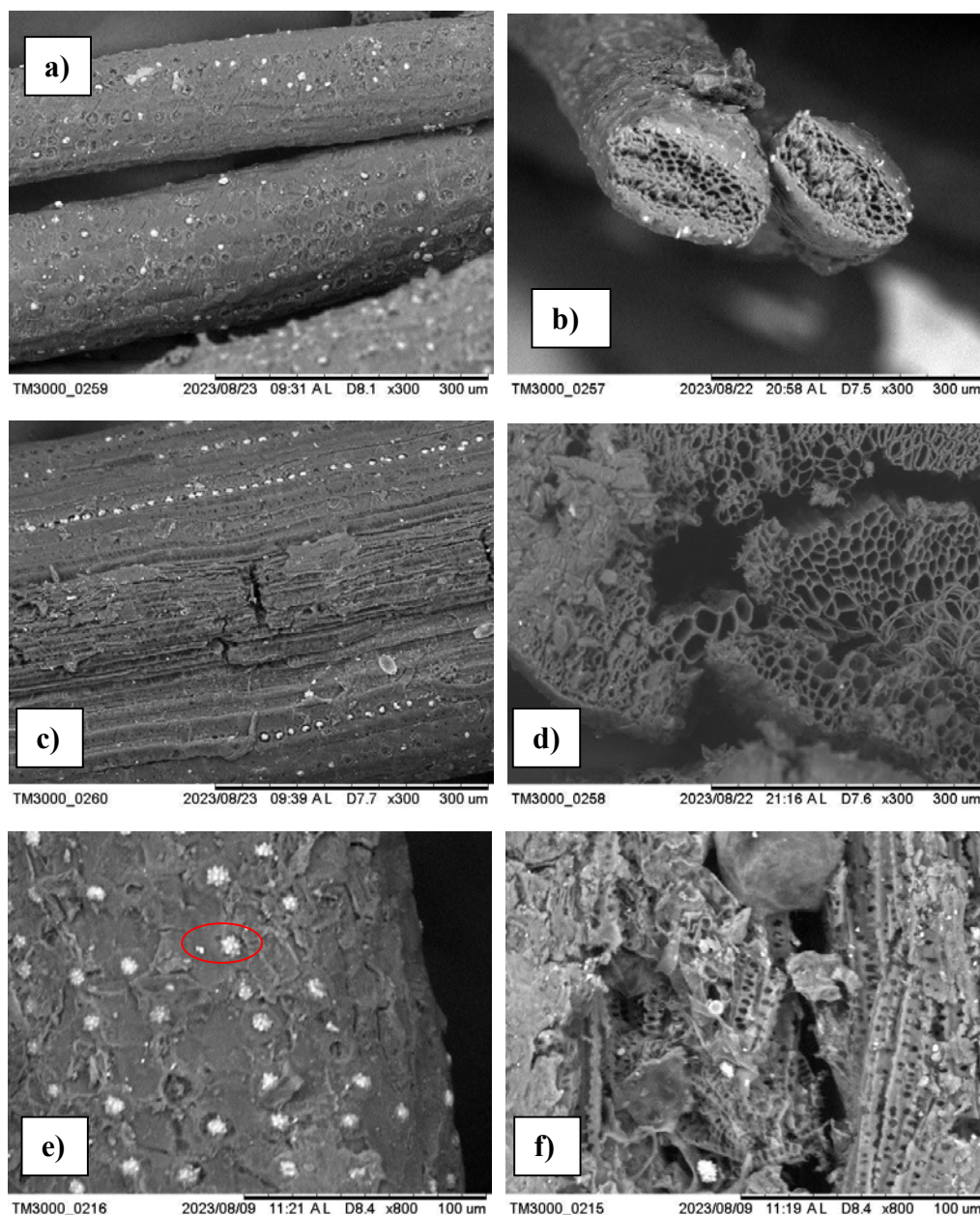


Fonte: Autora (2023).

4.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Apesar de apresentarem uma mesma estrutura celular (paredes celulares, lamela média e lúmens), as fibras vegetais se diferenciam por aspectos como a área transversal total e real (subtraída à área dos lumens), o número de fibrocélulas, a espessura das paredes celulares, e quantidade e área de lúmens. Essa variação entre as fibras pode resultar em um comportamento mecânico diferente (Fidelis *et al.*, 2013). As Figuras 25-a e 25-b apresentam, respectivamente, a fibra fina no sentido longitudinal e no sentido transversal e as Figuras 25-c e 25-d apresentam, respectivamente, a fibra grossa no sentido longitudinal e no sentido transversal, todas referentes ao tempo t₀.

Figura 25 - MEV fibras de coco para o t_0 :



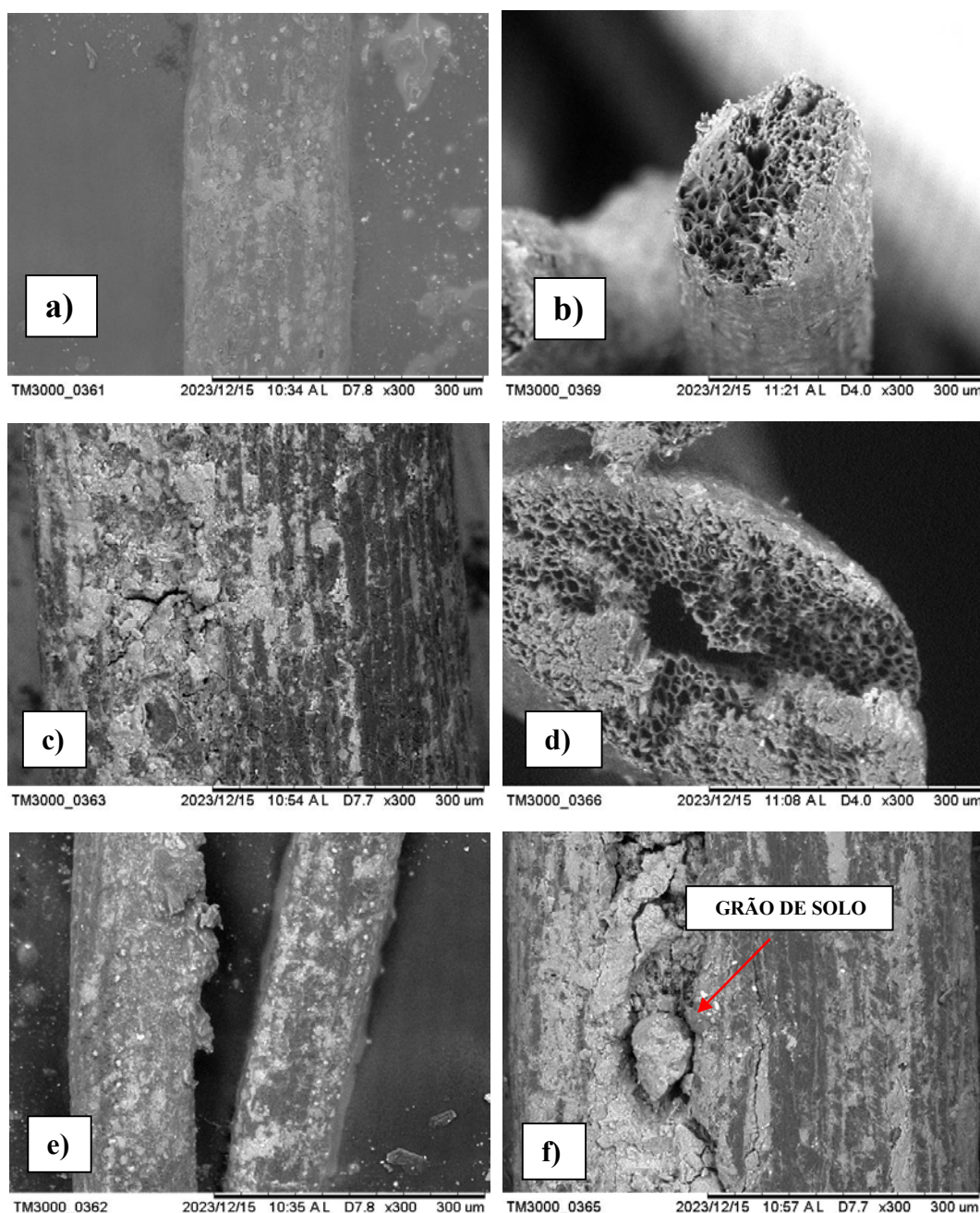
Fonte: Autora (2023). a) fibra fina - sentido longitudinal; b) fibra fina – sentido transversal; c) fibra grossa - sentido longitudinal; d) fibra grossa - sentido transversal; e) saliências na superfície da fibra f) irregularidades da superfície da fibra

A fibra de coco apresenta uma morfologia padrão, sendo possível identificar cada uma de suas estruturas (parede celular primária, secundária e lúmen), e com os lúmens variando em tamanho, geralmente bem definidos. Notando-se, ao corte, que essas fibras apresentam grande rigidez. Assim como, apresentam um grande número de fibrocélulas e suas paredes celulares não são tão espessas (Figura 25-d) quando comparadas a outras fibras como as de sisal, juta e curauá (Pereira *et al.*, 2012).

Analisando a Figura 25-e observa-se que existem pequenas saliências na superfície da fibra de coco. Essas saliências são “promoções” externas (cutículas e partículas globulares) que se instalam na superfície das fibras e propiciam uma morfologia irregular (Silva, 2015). Observa-se que essas saliências estão mais presentes nas fibras do t_0 quando comparas as fibras do t_4 , o que pode ser atribuído à perda de massa devido ao processo de degradação.

As Figuras 26-a e 26-b apresentam, respectivamente, a fibra fina no sentido longitudinal e no sentido transversal e as Figuras 26-c e 26-d apresentam, respectivamente, a fibra grossa no sentido longitudinal e no sentido transversal, todas referentes ao tempo t_4 . Nota-se que as fibras do t_4 apresentam uma superfície mais lisa, no entanto essas fibras também apresentaram maiores irregularidades ao longo de sua seção longitudinal (Figura 26-e; 26-f). Essas irregularidades resultam na perda de seção transversal, afetando a sua resistência. A Figura 26-f mostra uma partícula de solo presa à fibra, inferindo-se que o contato da fibra com o meio particulado pode ter causado impacto na sua resistência devido aos danos causados pelo contato solo-fibra.

Figura 26 - MEV fibras de coco para o t₄:



Fonte: Autora (2023). a) fibra fina - sentido longitudinal; b) fibra fina – sentido transversal; c) fibra grossa - sentido longitudinal; d) fibra grossa - sentido transversal; e) irregularidades da superfície d) partícula de solo presa à fibra

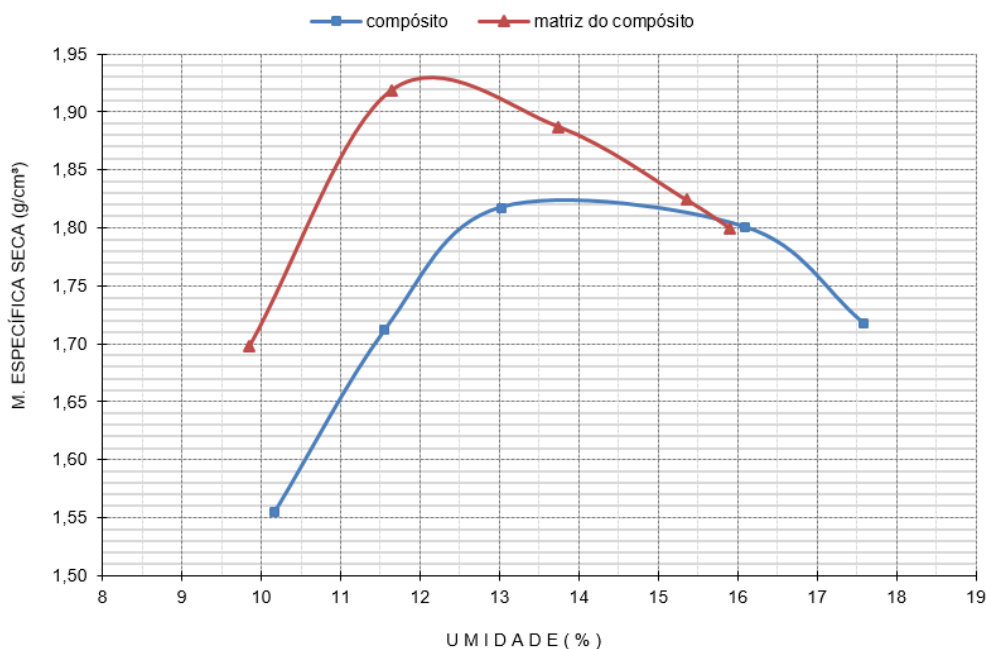
Não foram observadas maiores mudanças na estrutura da fibra causadas pelo efeito da degradação. No entanto, salienta-se que a degradação tornou as fibras menos rugosas e com superfícies mais definidas, o que pode ser atribuído a perda de massa, sendo um dos fatores de influência na perda de resistência mecânica com o tempo.

4.3 Caracterização do compósito solo-fibra sem e com exposição

4.3.1 Ensaio de compactação

O Gráfico 13 apresenta as curvas de compactação da matriz do compósito e do compósito referente à amostra completa (AFC). Nota-se que a adição das fibras reduziu a massa específica seca e aumentou o teor de umidade ótima. Essa redução está relacionada à interação entre as fibras e as partículas do solo. As fibras criam uma matriz mais porosa, dificultando o rearranjo das partículas durante a compactação e reduzindo a densidade alcançável. Além disso, a capacidade das fibras de reter umidade contribui para a necessidade de maior teor de água para alcançar a umidade ótima. Os valores de massa específica seca máxima e umidade ótima para a matriz do solo foram de 1,93 g/cm³ e 12,1%, respectivamente, enquanto, para o compósito, esses valores foram de 1,82 g/cm³ e 14%.

Prabakar; Sridhar (2002), avaliando a adição de até 1% de fibras curtas de sisal, distribuídas randomicamente, em um solo argiloso, classificado como CL pelo SUCS, oriundo de Bhopal na Índia, observaram este mesmo comportamento de redução da massa específica seca máxima e aumento do teor de umidade ótima, em relação à inclusão de fibras na mistura. Mohamed (2013) avaliando a inclusão aleatória de até 1,5% de fibras de feno em um solo argiloso, verificou a redução da massa específica seca máxima com a inclusão de fibra, corroborando com os resultados obtidos neste trabalho. Tal comportamento de aumento da umidade e diminuição da massa específica seca máxima quando fibras vegetais são adicionadas ao solo também foi constatado por Mirzababaei *et al.* (2013), Sarbaz; Ghiassian; Heshmati (2014) e Oliveira Junior (2018).

Gráfico 13 - Curvas de compactação

Fonte: Autora (2023).

4.3.2 Ensaio de permeabilidade (compósito)

O coeficiente de permeabilidade obtido para a compósito com amostra de fibra completa (AFC) foi de $4,7 \times 10^{-4}$ cm/s, não havendo diferenças significativas do coeficiente de permeabilidade encontrado para o solo natural (SN), $1,9 \times 10^{-4}$ cm/s.

Resultado semelhante foi encontrado por Oliveira Junior (2018). O autor não observou alterações na condutividade hidráulica das misturas de solo argiloso e fibras de coco (até 1% de teor de fibra) devido à maior adesão solo-fibra para esta proporção de mistura. Tal comportamento pode ser atribuído ao teor de fibras empregado, dado que no mesmo estudo o autor constata aumento de uma ordem de grandeza na condutividade hidráulica para o teor de fibras de 2%. Os autores Al Wahab; El-Kedrah (1995) observaram um aumento significativo na condutividade hidráulica, superior a uma ordem de grandeza, ao se adicionar 2% de fibra (polipropileno) em uma matriz de solo argiloso.

Os resultados encontrados por Miller; Rifai (2004) também corroboram o resultado obtido no presente trabalho. Os autores avaliaram misturas de solo argiloso (classificado como CL) com fibras de polipropileno e não observaram mudanças na ordem de grandeza da condutividade hidráulica para o teor de até 1% de fibras nas misturas. Outros autores também encontraram o mesmo comportamento (Heineck, 2002; Heineck *et al.*, 2003).

Dessa forma, conclui-se que o teor de fibra empregado neste estudo não foi suficiente para provocar mudanças significativas no coeficiente de permeabilidade. O aumento na quantidade de fibras presentes na mistura promove mais contatos entre as fibras, criando mais vazios e, conseqüentemente, aumentando a condutividade hidráulica. Vale destacar que o número de vazios é apenas um dos fatores que influenciam a condutividade, sendo também afetada pela forma e distribuição dos grãos, pelo tipo de fluido percolante, pelo gradiente hidráulico, entre outros (Heineck, 2002).

4.3.3 Ensaio de resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) foram realizados em compósitos de solo areno-argiloso reforçado com fibras de coco aleatoriamente distribuídas na matriz, submetidos a condições de exposição climática natural por um período máximo de 4 meses. O objetivo desses ensaios foi investigar os efeitos do envelhecimento natural nas propriedades mecânicas dos compósitos. Durante o ensaio, os corpos de prova apresentaram umidade variando entre 9% e 13%, enquanto o grau de saturação esteve na faixa de 64% a 76%.

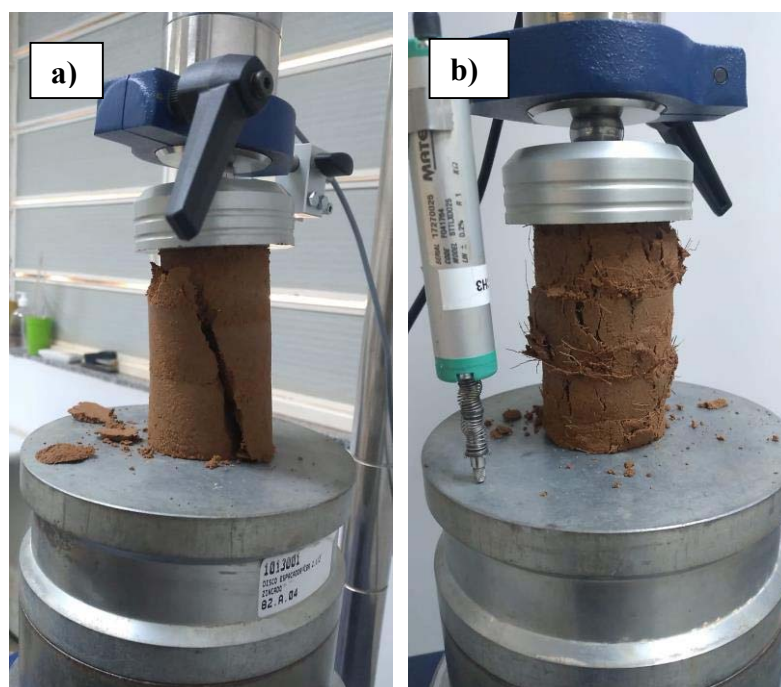
A Figura 27 ilustra as formas de ruptura observadas nos corpos de prova após a aplicação da carga. Observa-se que:

- Corpos de prova sem fibra (Figura 27-a): Apresentaram um plano de ruptura bem definido, formando um ângulo de aproximadamente 60° em relação à base. Esse comportamento é característico de materiais frágeis, nos quais a falha ocorre predominantemente por cisalhamento, com formação de superfícies lisas e inclinadas. Essa ruptura reflete a predominância da resistência interna do solo natural, que não apresenta mecanismos adicionais de redistribuição de tensões após atingir sua tensão de pico.
- Corpos de prova com fibra (Figura 27-b): Não apresentaram um plano de ruptura claro, mas sim deformações mais distribuídas ao longo do corpo de prova, com o surgimento de "embarrigamento". Esse comportamento evidencia características de materiais dúcteis, em que as fibras reforçam a matriz do solo, permitindo maior redistribuição de tensões internas antes do colapso. O reforço proporcionado pelas fibras retarda a

formação de fissuras críticas, resultando em uma ruptura mais gradual e menos definida.

Essa diferença no comportamento mecânico reflete a influência das fibras de coco no solo, que, mesmo após o envelhecimento natural, contribuem para alterar significativamente o modo de falha do material. O solo natural, mais frágil, depende exclusivamente de sua coesão e fricção interna para resistir às cargas, enquanto o compósito reforçado com fibras exibe maior capacidade de deformação antes da falha, indicando melhor desempenho estrutural em condições de carga.

Figura 27 - Ruptura a compressão simples dos corpos de prova



Fonte: Autora (2023). a) amostra sem fibra; b) amostra com fibra

Os resultados apresentados nos Gráficos 13 e 14, juntamente com os valores da Tabela 18, permitem uma análise detalhada da evolução das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras (SAFF, SAFC e SAFG) e do solo natural (SN) expostos a agentes climáticos ao longo de quatro períodos (t_0 , t_1 , t_2 e t_4).

- Comportamento das Curvas Tensão x Deformação:

A análise das curvas tensão x deformação, representadas no Gráfico 13, destaca uma transição significativa no comportamento mecânico dos compósitos reforçados com fibras

(SAFC, SAFF e SAFG) em relação ao solo natural (SN), especialmente no mecanismo de ruptura.

Matriz de Solo Natural (SN): O SN apresentou ruptura frágil em todos os tempos analisados, com baixa capacidade de deformação antes do rompimento. Este comportamento reflete a ausência de reforço estrutural interno. No entanto, foi identificado um aumento expressivo na resistência ao longo do tempo, atingindo 368,97 kPa no tempo t_4 . Esse ganho de resistência está diretamente associado ao aumento da sucção do solo, que intensifica a interação entre as partículas do material, promovendo um estado de tensão mais efetivo na matriz. Este efeito é característico de solos não saturados, onde o potencial matricial contribui para a coesão aparente do material.

Compósito SAFF: As curvas do SAFF mostram o comportamento de endurecimento mais pronunciado entre os compósitos analisados, com ruptura ocorrendo em deformações significativamente maiores. Este compósito apresentou as maiores tensões de ruptura em todos os tempos, destacando-se como o material mais resistente ao longo de toda a análise. No tempo inicial (t_0), o SAFF atingiu 378,97 kPa, enquanto no tempo t_4 , apesar da degradação, ainda manteve um desempenho relativamente elevado (272,01 kPa). O desempenho superior é atribuído ao alto fator de forma (L/D) das fibras empregadas, que aumenta a eficiência do reforço ao melhorar a interação fibra-matriz e a redistribuição de tensões. Além disso, o aumento da sucção da matriz contribuiu parcialmente para manter a resistência no tempo final.

Compósito SAFC: O SAFC apresentou comportamento intermediário, com resistência crescente até o tempo t_4 (233,36 kPa). As curvas tensão x deformação mostram endurecimento moderado, com capacidade de deformação superior à matriz SN, mas inferior ao SAFF. Este desempenho pode ser explicado pelo fator de forma intermediário das fibras, que resulta em menor eficiência de redistribuição de tensões na matriz do compósito. O aumento da sucção também contribuiu para estabilizar a resistência em tempos finais.

Compósito SAFG: O SAFG demonstrou o pior desempenho entre os compósitos, com menor resistência e capacidade de deformação. No tempo inicial (t_0), apresentou valores de resistência similares ao solo natural, enquanto nos tempos seguintes (t_1 e t_2) houve uma queda acentuada na resistência (112,59 kPa e 97,33 kPa, respectivamente). No tempo final (t_4), o SAFG apresentou o menor valor de tensão de ruptura entre os compósitos (188,93 kPa). Este comportamento pode estar relacionado à menor eficiência das fibras utilizadas, possivelmente devido a um fator de forma inadequado ou à fraca adesão fibra-matriz. No entanto, o aumento da sucção da matriz compensou parcialmente o baixo desempenho deste compósito.

- **Influência do Tempo de Exposição:**

A evolução das propriedades mecânicas ao longo do tempo foi afetada significativamente pela degradação das fibras e pelo aumento da sucção na matriz (Gráfico 14). Estes dois fatores tiveram impacto direto nas tensões de ruptura e no comportamento mecânico dos materiais.

A Tabela 17 evidencia a perda de resistência dos compósitos com o tempo, especialmente entre os tempos t_0 e t_2 , devido à degradação das fibras. Esse processo foi visualmente identificado, ao se observar a fragilidade das fibras ao toque em tempos avançados. No entanto, no tempo t_4 , observa-se um aumento da resistência, que pode ser atribuído ao aumento da sucção do solo. Esse fenômeno ocorre porque a sucção gera um estado de tensão efetiva maior, promovendo a coesão e o ganho de resistência, mesmo com a degradação das fibras.

- **Curvas Tensão x Deformação:**

As curvas mostram que, ao longo do tempo, o comportamento de endurecimento é progressivamente perdido até t_2 , devido à degradação das fibras. No entanto, no tempo t_4 , o aumento da sucção na matriz melhora o desempenho global dos materiais, permitindo um leve aumento da resistência, embora sem recuperar completamente o comportamento dúctil inicial.

- **Comparação de Desempenho Entre os Compósitos:**

A comparação entre os compósitos evidencia a influência do fator de forma (L/D) das fibras e sua concentração efetiva no comportamento mecânico dos materiais analisados (Gráfico 14).

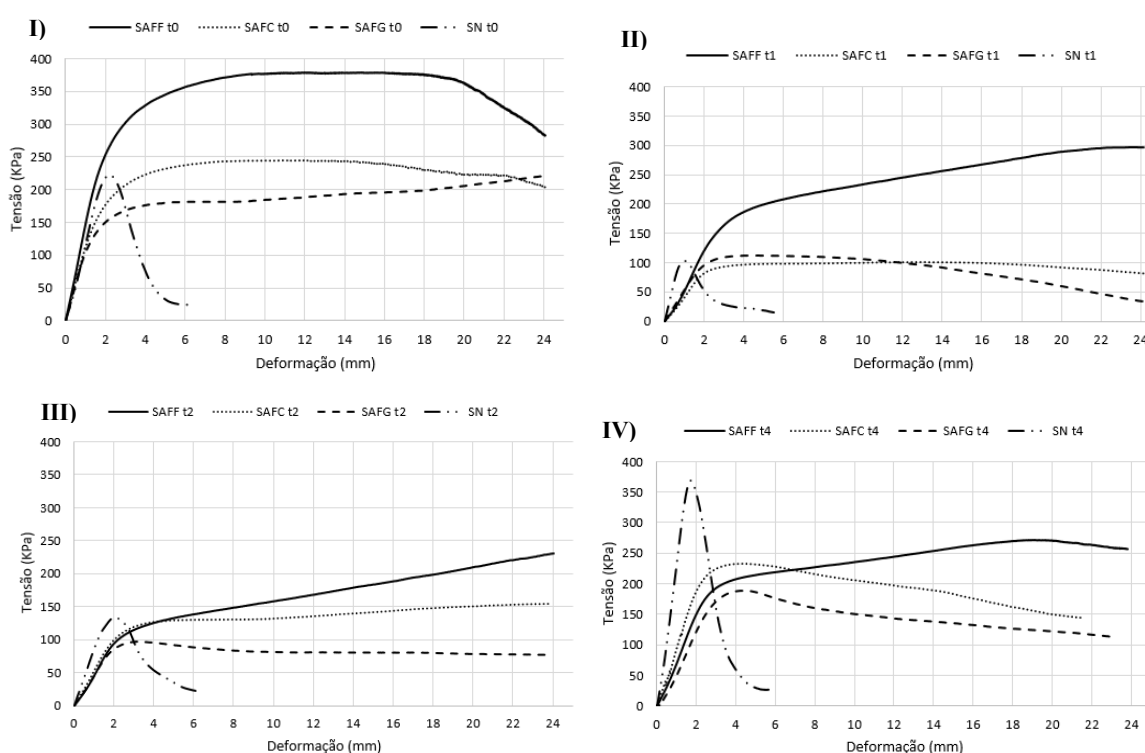
SAFF: Apresentou o melhor desempenho em todos os tempos analisados, com as maiores tensões de ruptura e maior capacidade de deformação. Esse comportamento está associado ao elevado fator de forma das fibras, o que resulta em uma maior quantidade de fibras efetivamente distribuídas na matriz para a mesma concentração. Essa distribuição otimiza a redistribuição de tensões e a interação fibra-matriz. Contudo, o SAFF também foi o compósito mais suscetível à degradação ao longo do tempo devido à menor resistência das fibras mais finas aos efeitos climáticos, resultando em uma redução significativa na resistência após os tempos iniciais.

SAFC: Demonstrou desempenho intermediário, com resistência consistente ao longo do tempo, embora inferior ao SAFF. Seu fator de forma intermediário implica uma menor

quantidade de fibras na matriz, mas sua menor suscetibilidade à degradação permitiu uma maior estabilidade no comportamento mecânico ao longo do tempo.

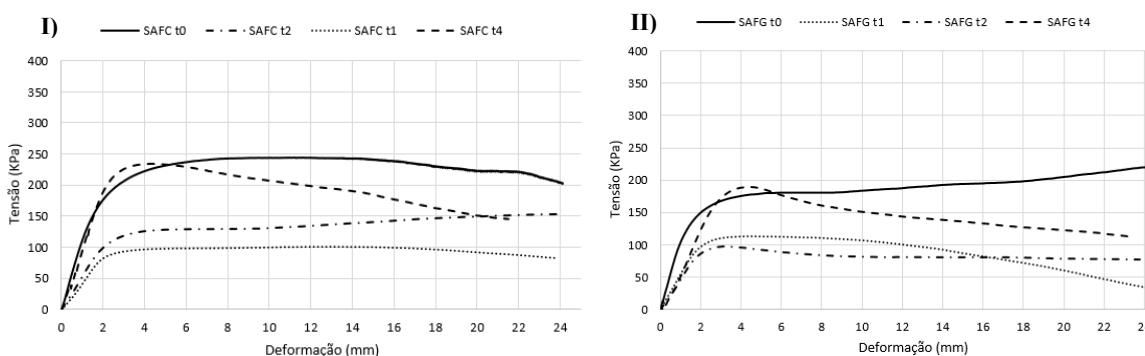
SAFG: Foi o compósito com o pior desempenho, apresentando tensões de ruptura próximas ou inferiores às do solo natural nos tempos t_1 e t_2 . Seu baixo fator de forma resulta em uma quantidade limitada de fibras na matriz, reduzindo a eficiência no reforço e a interação fibra-matriz. Apesar disso, o comportamento do SAFG mostrou menor impacto da degradação em relação ao SAFF, devido à maior resistência das fibras mais grossas aos efeitos climáticos.

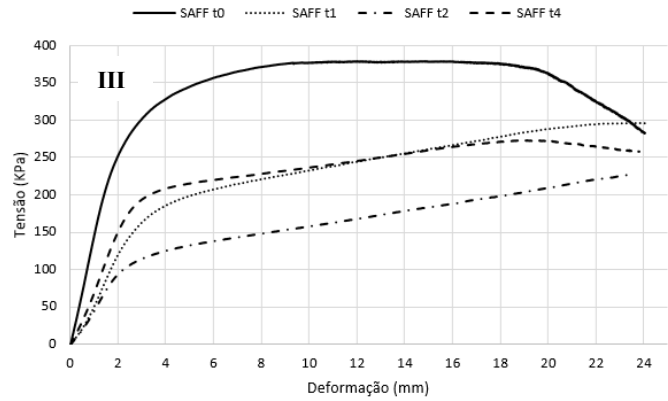
Gráfico 14 - RCS para cada tempo: I) t_0 ; II) t_1 ; III) t_2 ; IV) t_4



Fonte: Autora (2023).

Gráfico 15 - RCS para cada compósito: I) SAFC; II) SAFG; III) SAFF





Fonte: Autora (2023).

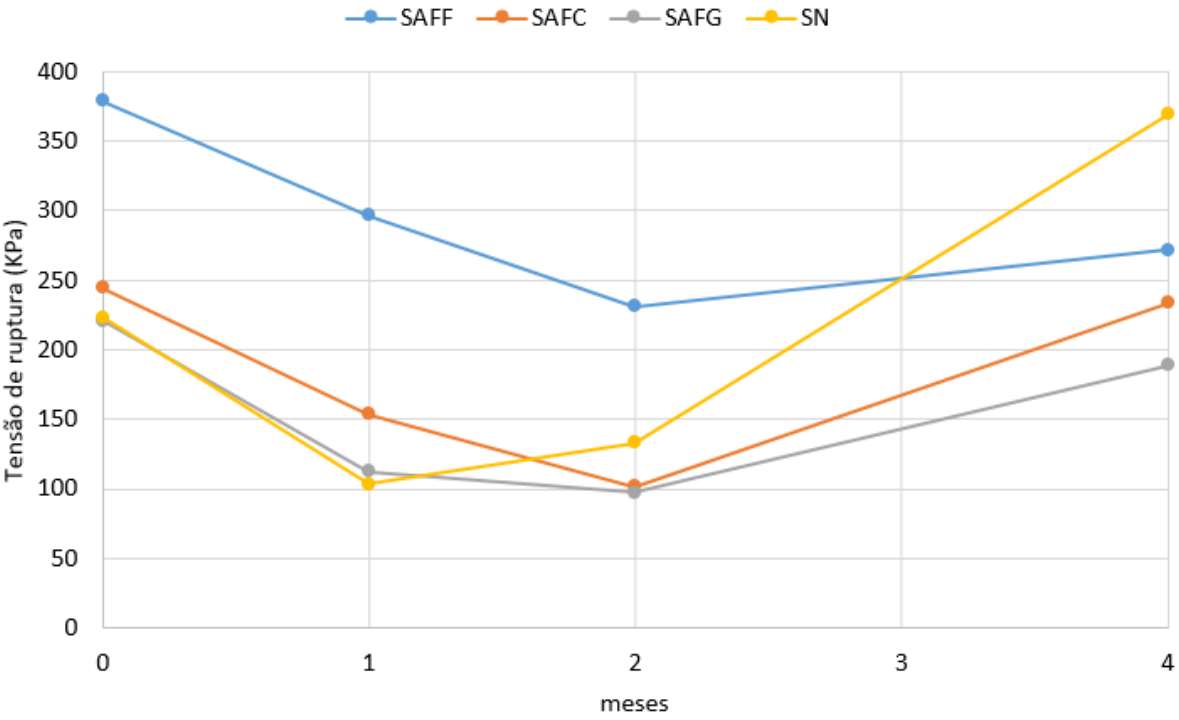
Tabela 17 - Tensão de ruptura

Tensão de ruptura	t ₀	t ₁	t ₂	t ₄
SN	223,19	103,40	133,30	368,97
SAFF	378,97	296,37	230,95	272,01
SAFC	244,53	153,66	101,42	233,36
SAFG	220,87	112,59	97,33	188,93

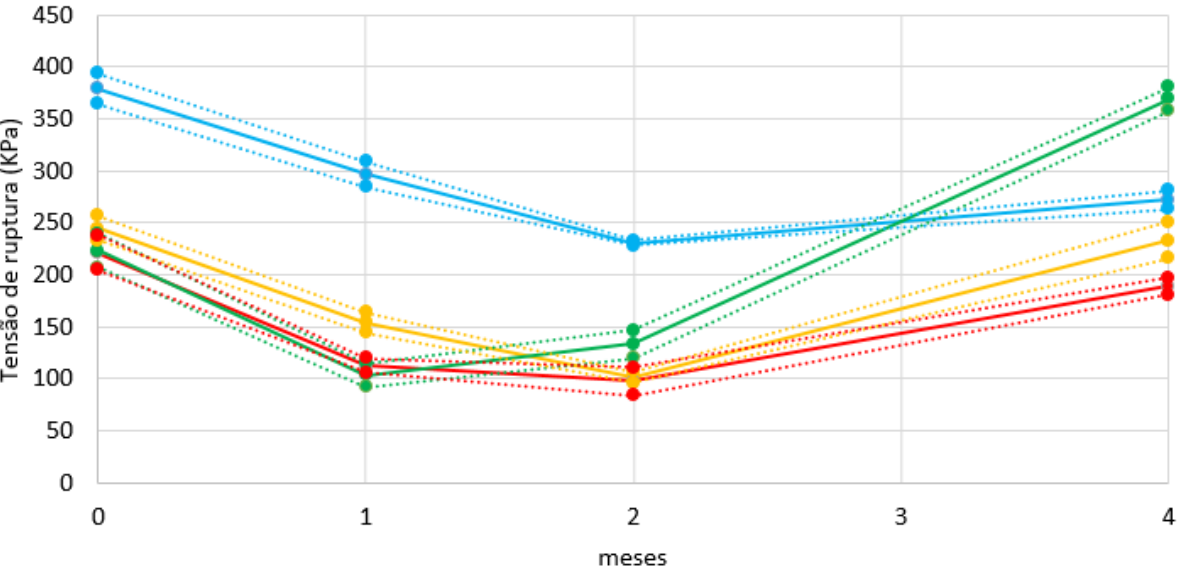
Fonte: Autora (2023).

No Gráfico 16-a é apresentado a tensão de ruptura de todos os compósitos e da matriz do compósito. No Gráfico 16-b e na Tabela 18 é apresentado o desvio padrão dos corpos de prova, variando entre 2 e 17 KPa. Como se observa, houve efetivamente (fora do desvio padrão) aumento da resistência, quando comparado com o SN, do compósito SAFF até o tempo t₂ e do compósito SAFC até o t₁. No tempo t₄, apesar da perda de resistência referente à degradação da fibra, o aumento de resistência da matriz do compósito (ver seção 4.1.5) compensou essa perda. Esse aumento de resistência da matriz do compósito também foi observado no ensaio triaxial (ver seção 4.1.5-b).

I)
Gráfico 16 - SN, SAFC, SAFF, SAFG para os tempos t_0, t_1, t_2 e t_4 :



II)
SAFF SAFC SAFG SN



Fonte: Autora (2023). a) tensão de ruptura; b) desvio padrão

Tabela 18 - Desvio padrão

Desvio padrão	t ₀	t ₁	t ₂	t ₄
---------------	----------------	----------------	----------------	----------------

SN	16,02	14,67	11,79	16,73
SAFF	11,27	12,36	9,80	7,15
SAFC	13,40	2,48	5,25	13,32
SAFG	11,27	9,11	17,58	8,26

Fonte: Autora (2023).

Os compósitos reforçados com fibras apresentam desempenho mecânico superior ao solo natural, especialmente em termos de resistência e comportamento dúctil. O SAFF é o compósito mais eficiente, destacando-se pela alta resistência e ductilidade, enquanto o SAFG apresentou desempenho limitado. O aumento da sucção do solo foi um fator chave no ganho de resistência da matriz SN ao longo do tempo, especialmente no tempo t_4 , compensando parcialmente a degradação das fibras. Esses resultados destacam a importância de otimizar a interação fibra-matriz e considerar a sucção como um fator relevante no desempenho mecânico de solos reforçados.

4.3.4 Ensaio triaxial

Os Gráfico 17 e 18 e as Tabelas 19 e 20 apresentam os resultados referentes aos ensaios triaxiais realizados no compósito SAFC. Os valores de tensão de ruptura demonstraram um aumento significativo do tempo t_0 para t_4 (Tabela 20). No tempo inicial (t_0), os valores obtidos foram de 164,6 kPa, 177,3 kPa e 247,5 kPa, para os confinantes de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente. Já no tempo t_4 a tensão de ruptura aumentou para 226,2 kPa, 279,2 kPa e 333,2 kPa. Esses resultados indicam um ganho de resistência com o tempo de exposição, devido principalmente ao fortalecimento da matriz (SN) causado pelo aumento da sucção, bem como à estabilização estrutural do composto, atribuído ao aumento da interação solo-fibra ao longo do tempo de exposição.

A resistência adicional fornecida pela matriz (SN) desempenhou um papel significativo no aumento da capacidade de carga do composto. A sucção gerada com o tempo (t_4) contribuiu para uma maior coesão do solo e, conseqüentemente, para uma maior resistência geral do sistema.

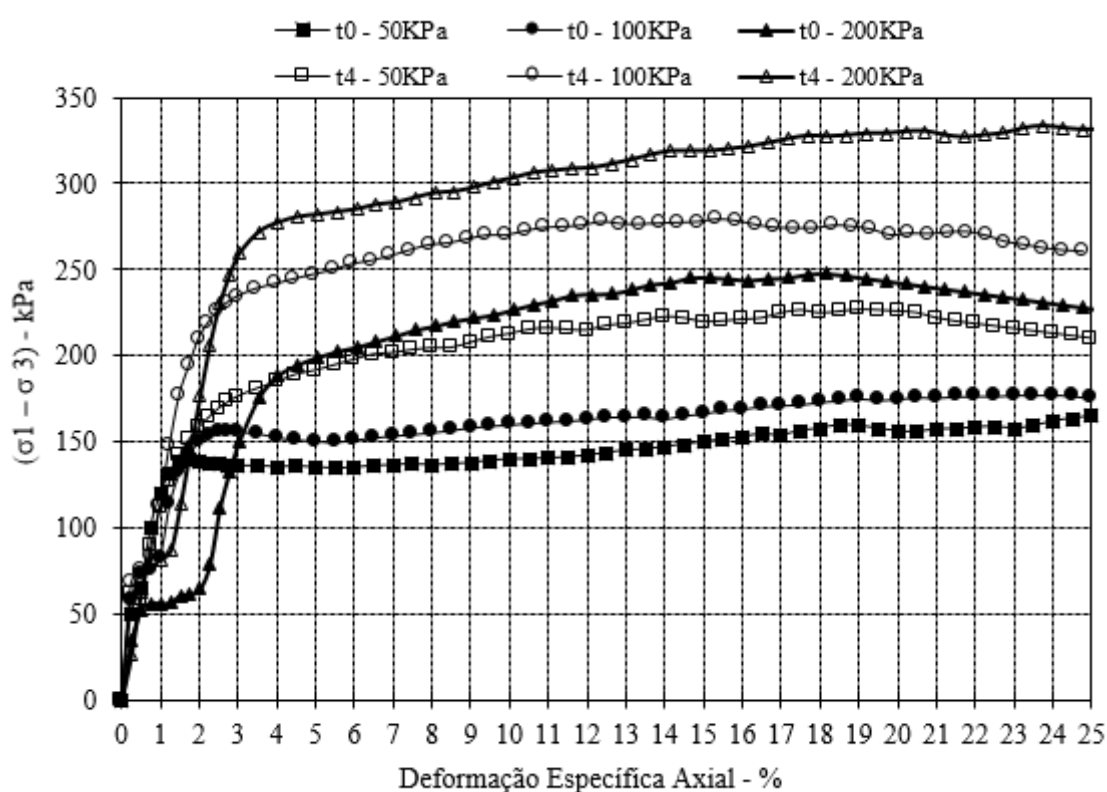
A poropressão também apresentou uma redução dos valores de t_0 para t_4 (Gráfico 18 e Tabela 20). Sob tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa, os valores de poropressão no tempo t_0 foram de 37,36 kPa, 81,5 kPa e 167,41 kPa, respectivamente. No tempo t_4 , esses

valores diminuíram para 28,83 kPa, 66,2 kPa e 165,64 kPa. A redução da poropressão é consistente com o aumento da resistência.

Os parâmetros eficazes do composto (coesão e ângulo de atrito) também aumentaram no intervalo de t_0 para t_4 (Gráfico 19 e Tabela 21). O valor da coesão foi de 26,9 kPa para 33,1 kPa, enquanto o ângulo de atrito cresceu de $39,8^\circ$ para $43,6^\circ$.

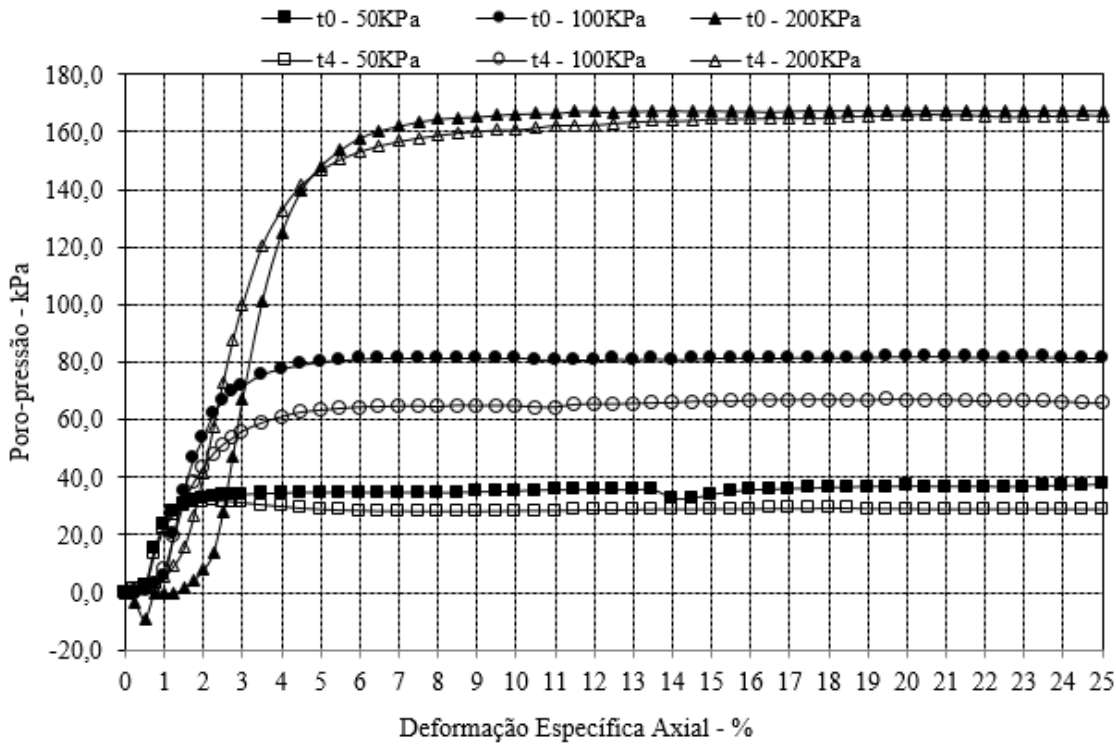
O Gráfico 19 mostra que o composto SAFC apresenta melhor desempenho que o solo natural (SN) tanto em t_0 quanto em t_4 . Em t_0 , o SAFC tem maior coesão (26,9 kPa) e ângulo de atrito ($39,8^\circ$) que o SN, refletindo maior resistência inicial devido à interação solo-fibra. Já em t_4 , o SN sofre significativa redução na coesão (de 22,1 para 2,4 kPa), mas compensa com aumento no ângulo de atrito (de $33,9^\circ$ para $40,2^\circ$), no composto SAFC, observa-se melhora consistente em t_4 , com aumento da coesão (33,1 kPa) e do ângulo de atrito ($43,6^\circ$), indicando resistência governada pela sucção.

Gráfico 17 - Ensaio triaxial do composto SAFC para os tempos t_0 e t_4 : tensão desvio x def. específica axial



Fonte: Autora (2023).

Gráfico 18 - Ensaio triaxial do compósito SAFC para os tempos t_0 e t_4 : poropressão x def. específica axial



Fonte: Autora (2023).

Tabela 19 - Dados de ruptura do triaxial para o compósito SAFC

Tensão confinante (KPa)			
Tensão de ruptura	50	100	200
t_0	164,6	177,3	247,5
t_4	226,2	279,2	333,2

Fonte: Autora (2023).

Tabela 20 - Dados de poropressão do triaxial para o compósito SAFC

Tensão confinante (KPa)			
Poropressão	50	100	200
t_0	37,36	81,5	167,41
t_4	28,83	66,2	165,64

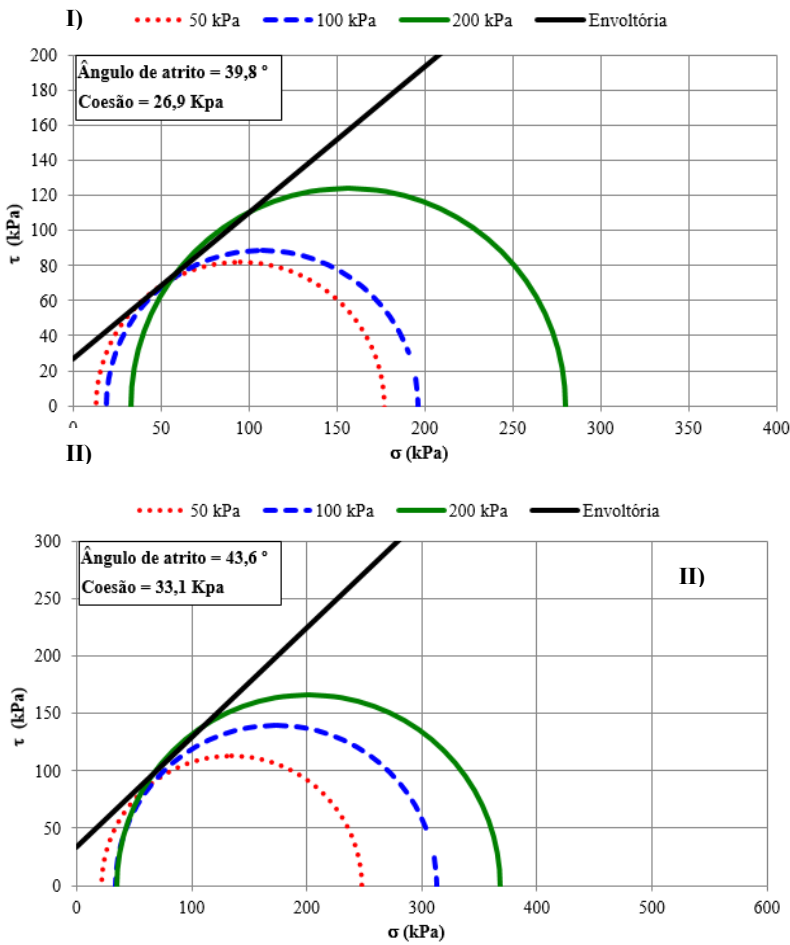
Fonte: Autora (2023).

Tabela 21 - Dados da envoltória de ruptura do compósito SAFC - parâmetros efetivos

	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito (°)
t_0	26,9	39,8
t_4	33,1	43,6

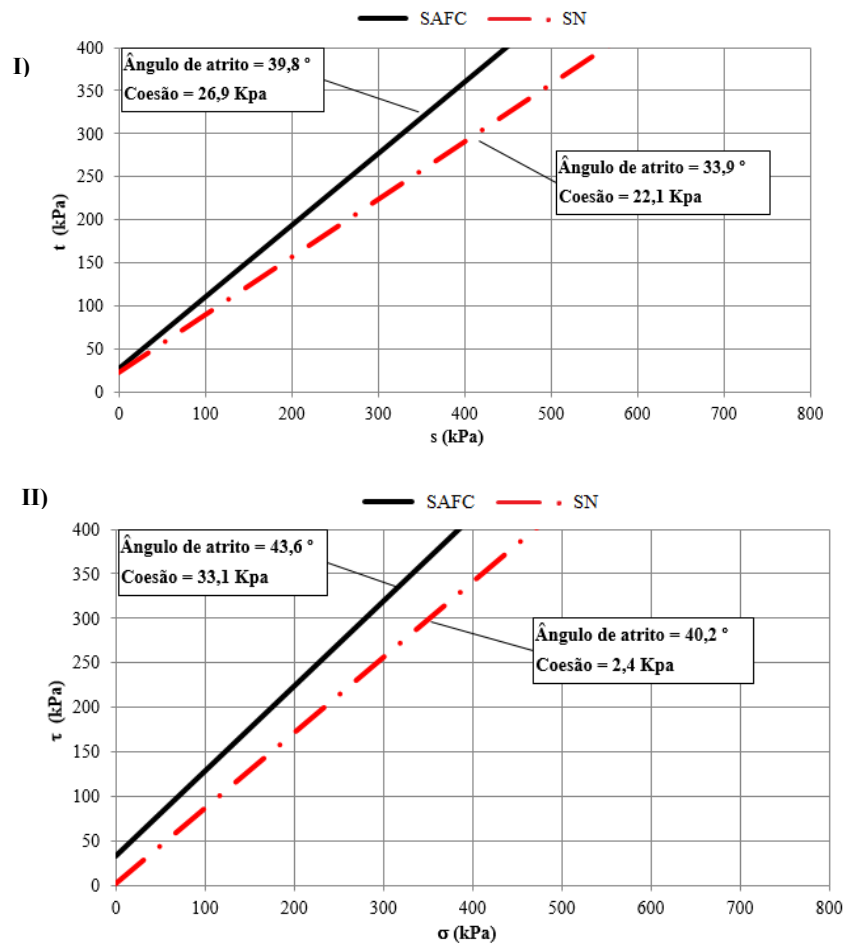
Fonte: Autora (2023).

Gráfico 19 - Envoltórias de ruptura de tensões efetivas do compósito SAFC: I) t_0 ; II) t_4



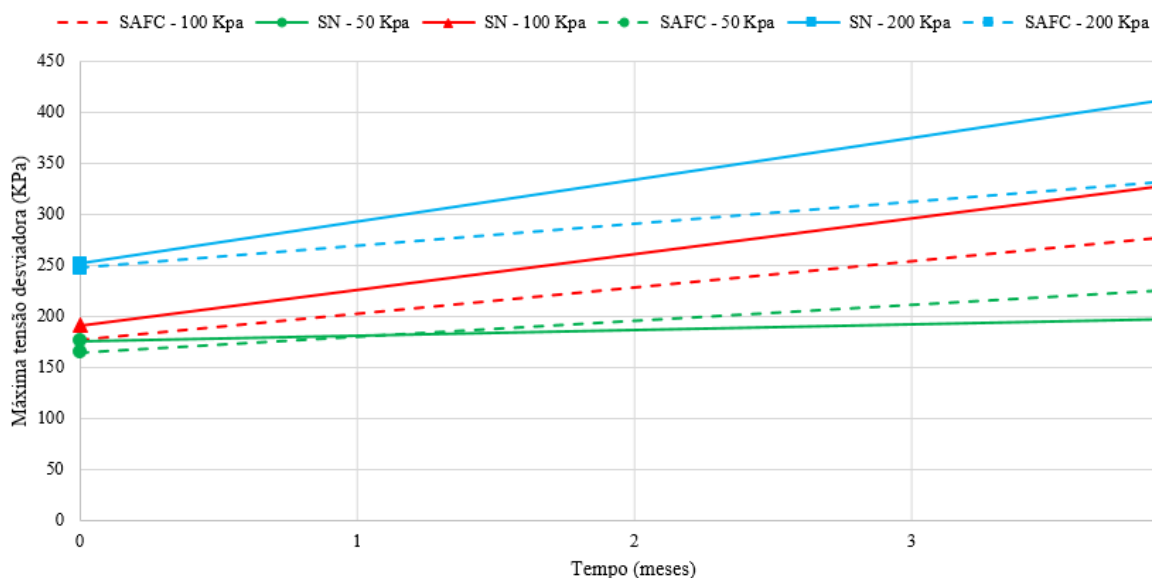
Fonte: Autora (2023).

Gráfico 20 - Envoltória de ruptura em termos de tensões efetivas: I) t_0 ; II) t_4



Fonte: Autora (2023).

O Gráfico 21 apresenta os resultados das máximas tensões desvio para cada tensão confinante aplicada do compósito SAFC e da matriz do compósito (SN) para os tempos t_0 e t_4 . Observa-se que no tempo t_0 praticamente não houve mudanças, mas no tempo t_4 , o SN apresentou aumento de resistência com o aumento da tensão confinante.

Gráfico 21 - Ensaio triaxial do compósito SAFC e do SN para os tempos t_0 e t_4 

Fonte: Autora (2023).

Por fim, o comportamento mecânico mais estável e eficiente do composto após o período de exposição destaca a importância da interação solo-fibra e do fortalecimento da matriz do solo na evolução das propriedades mecânicas do material. Essa interação promoveu um equilíbrio entre resistência e ductilidade, permitindo ao compósito resistir a esforços de maneira mais uniforme e eficiente. Assim, o composto SAFC mostrou-se promissor para aplicações em que a durabilidade e a capacidade de absorver deformações são essenciais, evidenciando o potencial de utilização de fibras na melhoria das características do solo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A motivação principal deste trabalho consistiu na avaliação do comportamento mecânico e da durabilidade de solos reforçados com fibras de vegetais aleatoriamente distribuídas, submetidos ao envelhecimento natural por exposição às condições ambientais diversas por 4 meses. Para tal fim, foram selecionados um solo areno-argiloso como a matriz do compósito, e a fibra vegetal do coco como elemento de reforço do compósito, sendo empregada de três maneiras distintas (a amostra completa, a fração mais fina a fração mais grossa). O programa experimental consistiu na realização de ensaios de resistência à compressão simples (RCS) em amostras de solo e solo-fibra expostos aos agentes do ambiente externo por até 4 meses, além de ensaios triaxiais, MEV, FRX, DRX e de permeabilidade. A seguir são apresentadas as conclusões, que caracterizam a relevância e

originalidade da pesquisa, baseadas nos resultados apresentados e analisados nos capítulos anteriores.

- Como indicado pelos resultados a fibra de coco conduz a um aumento inicial da resistência, com uma perda da resistência ao longo do tempo. Ressaltando-se que os componentes mais finos são os responsáveis pela parcela maior de resistência da fibra em comparação à da fibra grossa. No caso da fibra fina e completa, embora haja uma queda de resistência com o tempo, o material torna-se mais dúctil e menos frágil com o tempo, apresentando maiores deformações, em relação ao solo natural, antes de romper. O uso da fibra de coco em matriz de solo apresentou uma queda de resistência com o tempo e que pode representar um fator limitante ao emprego desse material em obras geotécnicas, mas que, no entanto, permite que composto suporte deformações maiores na ruptura. A análise geral dos resultados indicam que a fibra de coco pode ser usada em obras onde o caso crítico para a estabilização ou funcionalidade da obra é imediatamente após a construção, como uma estrada de acesso construído sobre argila mole saturada, onde a função primária de qualquer reforço é permitir que a estrada fosse construída. Como também em situações onde há necessidade de se suportar maiores deformações, como em de solos de cobertura de aterros sanitários. Para estes casos a fibra de coco pode ser usada, desde que conhecidas à variação temporal de seu comportamento mecânico.
- De modo particular, pode-se concluir que o ensaio de compactação revelou que a inclusão das fibras de coco elevou o teor de umidade ótima e reduziu a densidade seca máxima à medida, proporcionando ao compósito maiores índices de vazios;
- Como observado através do MEV e através de análise visual, com o passar do tempo às fibras de coco ficaram mais frágeis ao toque, apresentando uma superfície mais lisa, decorrente do desgaste sofrido pela exposição aos agentes climáticos;
- O coeficiente de permeabilidade obtido para o compósito com amostra de fibra completa não teve diferenças significativas do coeficiente de permeabilidade encontrado para o solo natural. Entende-se que o teor de fibra empregado nesse estudo não foi o suficiente para provocar mudanças no coeficiente de permeabilidade.
- No ensaio de resistência a compressão simples (RCS), o solo natural (SN) apresentou variação de resistência nos tempos estudados com significativo aumento no tempo t_4 , fator atribuído ao aumento da sucção da matriz do compósito;

- No ensaio triaxial o compósito SAFC e o SN apresentaram ganho de resistência do tempo t_0 para o tempo t_4 , fator atribuído ao aumento da sucção da matriz do compósito;
- Foi possível observar que a inclusão de fibras provocou mudanças na forma de ruptura dos corpos de prova. As amostras sem fibra apresentaram ângulo de ruptura bem definido, na ordem de 60° , semelhante a materiais frágeis. Por outro lado, as amostras com fibra não apresentaram plano de ruptura bem definido, indicando um embarrigamento, típico de um comportamento de materiais dúcteis;
- Através do ensaio de resistência a compressão simples (RCS), constatou-se que o comportamento de endurecimento adquirido com a adição das fibras foi gradualmente sendo perdido com o aumento do tempo de exposição, até o tempo t_2 . Podendo-se afirmar que a exposição da amostra aos agentes climáticos alterou o mecanismo de ruptura dos compósitos reforçados com as fibras expostos aos agentes climáticos. Esta constatação está de acordo com o observado visualmente. Foi notado que as fibras ficam mais frágeis ao toque, com o aumento do tempo de exposição. No entanto, no tempo t_4 ocorreu um aumento da resistência, tal fator pode ser atribuído ao aumento da sucção da matriz do compósito com o tempo. O compósito SAFF foi o que apresentou maior resistência em todos os tempos analisados, seguido do compósito SAFC e SAFG. Diante dos resultados deste trabalho, sugerem-se os quesitos abaixo como possíveis trabalhos futuros:

- Utilizar o mesmo programa experimental em misturas com fibras de coco e diferentes matrizes, tais como: solos arenosos, siltosos, solo-cimento, solo-cal, solo-bentonita e solo-resíduos da construção civil;
- Analisar em laboratório, ensaios de aceleração da degradação da fibra de coco isoladamente e do compósito solo-fibra utilizando soluções ácidas e básicas para avaliar a durabilidade das misturas;
- Realizar análises microbiológicas após cada intervalo de tempo de exposição às intempéries;
- Verificar o efeito do envelhecimento natural em outros tipos de fibras vegetais;
- Avaliar a influência do envelhecimento natural das fibras vegetais em diferentes tipos de solos;
- Investigar formas de tratamentos superficiais a serem aplicados nas fibras vegetais, buscando melhorar sua durabilidade;

- Desenvolver um modelo de previsão do comportamento mecânico e da durabilidade dos compósitos solo-fibras vegetais visando à simulação numérica.

REFERÊNCIAS (o que ta em destaque foi inserido deve ser conferido)

ABBASPOUR, M.; AFLAKI, E.; MOGHADAS NEJAD, F. Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 207, p. 1059–1071, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.253>

AGOPYAN, V. *et al.* Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brasil: na overview. **Cement e Concrete Composites**, [S.l.], v. 27, iss. 5, p. 527-536, 2005.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.004> Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095894650400143X> Acesso em: 28 jan. 2023.

AGUILAR, J. R. T. **Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Reforçado com Fibras de Coco**. 16 f. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

AHMAD, F.; BATENI, F.; AZMI, M. Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. **Geotextiles and Geomembranes**, [S.l.], v. 28, p. 93–99, 2010. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.09.017> Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114409000983> Acesso em: 28 jan. 2023.

AL WAHAB, R. M.; EL-KEDRAH, M. A. Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay. **Geotechnical Special Publication**, [S.l.], v. 46, p. 791-805, 1995. Disponível em: <https://eurekamag.com/research/020/569/020569814.php> Acesso em: 29 jan. 2024.

AL WAHAB, R.; AL-QURNA, H. Fiber reinforced cohesive soils for application in compacted earth structures. In: **Proceedings of the GEOSSYNTHETICS'95 CONFERENCE**. [S.l.], v. 2, p. 433–466, 1995.

ALMEIDA, S. M. **Análise do comportamento do solo com adição de resíduos de construção e fibras de sisal**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -. Universidade Federal de Pernambuco.

ALVES, D. S. **Análise comportamental de solo expansivo do município de Paulista-PE com adição de fibra de polipropileno, casca de coco e pneu**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

ANAGNOSTOPOULOS, C. A.; TZETZIS, D.; BERKETIS, K. Shear strength behaviour of polypropylene fibre reinforced cohesive soils. **Geomechanics and Geoengineering**, [S.l.], v. 9, n. 3, p. 241-251, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/17486025.2013.804213> Disponível em: 29 jan. 2023.

ANGGRAINI, V. *et al.* Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil. **J. Int. Meas. Confed**, [S.l.], v. 59, p. 372–381, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.059>

ANGGRAINI, V. Potential of Coir Fibres as Soil Reinforcement. **Pertanika J. Sch. Res.**

Rev., [S.l.], v. 2, p. 95–106, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Vivi-Anggraini/publication/294872135_Potential_of_Coir_Fibres_as_Soil_Reinforcement/links/56c48ab808aeeffa9e5bb83/Potential-of-Coir-Fibres-as-Soil-Reinforcement.pdf Acesso em: 29 jan. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12770**: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457**: Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459**: Solo Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180**: Solo Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182**: Solo - Ensaio de Compactação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2021.

ATHIRA, S.; MANJU, G. S. Effect of Modification on Coir Fiber in Durability and Shear Parameters in Flyash Soil Mixture. *In: Ground Improvement and Reinforced Soil Structures: Proceedings of Indian Geotechnical Conference, 2020, 2. Springer Singapore*, 2022. p. 155-166.

AUGUSTESEN, A.; LIINGAARD, M.; LADE, P.V. Evaluation of time-dependent behavior of soils. **Int. J. Geomech.**, v. 4, Iss. 3, p. 137-156, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2004\)4:3\(137\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2004)4:3(137)) Disponível: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291532-3641%282004%294%3A3%28137%29> Acesso em: 29 jan. 2021.

BAWADI, N. F. *et al.* Influence of Banana Fiber on Shear Strength of Clay Soil. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.l.], v. 864, n. 1, p. 012099, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/864/1/012099>

BEDIN, M. G. **Compósitos com polietileno de baixa densidade e fibra de coco in natura e modificada**. 99 f. 2014. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro.

BERNARDINA, F. P. D. **Influência da Degradação de Fibras no Comportamento Mecânico dos Solos Reforçados**. Rio de Janeiro. 123 f. 2019. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de

Janeiro, 2019.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, Oxford, v.24, n. 2, p.221-274, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5) Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079670098000185> Acesso em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079670098000185>

BLEDZKI, AK; REIHMANE, S.; GASSAN, JJ Propriedades e métodos de modificação de fibras vegetais para compósitos de fibras naturais. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 59, n. 2, p. 1326-1336, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19960222\)59:8<1329::AID-APP17>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19960222)59:8<1329::AID-APP17>3.0.CO;2-0) Disponível em: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19960222\)59:8%3C1329::AID-APP17%3E3.0.CO;2-0](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/(SICI)1097-4628(19960222)59:8%3C1329::AID-APP17%3E3.0.CO;2-0) Acesso em: 29 jan. 2023.

BOLAÑOS, R. E. Z. **Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Reforçado com Fibras de Coco**. 2013. 143 p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

BONDAR, G. A **Cultura do Coqueiro no Brasil**. Salvador, BA: Tipografia Naval. Salvador, 1955. 75 p.

BRITO, J. R. **Efeito da adição de fibras de coco em misturas cimentadas com agregados reciclados para subcamadas de pavimentos**. 2022. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) – Universidade Federal do ceará, Fortaleza, 2022.

BU, F. *et al.* Comportamento de fissuração de solo argiloso reforçado com fibra de sisal sob ciclos de umedecimento-secagem. **Cultivo do Solo Res**, [S.l.], v. 227, p. 105596, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105596>

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

BUENO, B. S. *et al.* Soil fiber reinforcement: basic understanding. In: **International Symposium on Environmental Geotechnology**, 1996, San Diego, Anais., v.1, p. 878-884, 1996.

CALLISTER JR., W. D.; **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 8. ed. LTC. Rio de Janeiro, 2012.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos Polímeros**. [S.l.]: Artliber Editora Ltda, 2006.

CARRIJO, O. A.; LIZ, R. S.; MAKISHIMA, N. Fibra de casca de coco verde como substrato agrícola. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.20, n. 4, p.533-535, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362002000400003> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/PQsvvcv3dgWRHGTYD9qsFML/?lang=pt#> Acesso em: 29 jan. 2023.

Carvalho, L. M. C. **Comportamento Mecânico De Um Solo Arenoso Reforçado Com Fibras Naturais Submetido A Ensaio De Cisalhamento Direto Em Média Escala**. 2019.

105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

CARVALHO, L. M. C.; MONTEIRO, F. F.; CASAGRANDE, M. D. T. Large-scale direct shear testing in coir fibers reinforced sand. **Soils and Rocks**, [S. l.], v. 46, p. e2023002822, 2023.

CARVALHO, L.M.C. **Comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras naturais submetido a ensaios de cisalhamento direto em média escala**. 106 f. 2019. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

CASAGRANDE, M. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. 243 f Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2005.

CASAGRANDE, M. D. T., **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. Porto Alegre, 2001, 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

CASAGRANDE, M. D.T; COOP, M. R.; CONSOLI, N. C. Behavior of a FiberReinforced concrete at large shear displacements. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [S.l.], v. 132, n. 11, p. 1505-1508, 2006. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:11\(1505\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1505)) Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291090-0241%282006%29132%3A11%281505%29> Acesso em: 29 jan. 2024.

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

CASAGRANDE, M.D.T. *et al.* Comportamento em campo e laboratório de um solo reforçado com fibras. **Solos e Rochas**, [S.l.], v. 25, n.3, p. 247-255, 2002.

CASTRO, C. L. de. **Comportamento hidromecânico de solos reforçados com fibras considerando a condição não saturada**. 2020. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

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

CHESSON, A. Plants degradation by ruminants: Parallels with litter decomposition in soils. In: CADISCH, G.; GILLER, K. Eds., **Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition**, CAB International, Wallingford, 47-66, 1997.

CINTRA, F. L. D. *et al.*. Fundamentos tecnológicos para a revitalização das áreas cultivadas com coqueiro gigante no nordeste do Brasil. **Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros**, p.

232, 2009.

CLARIA, J. J.; VETTORELO, P. V. Mechanical Behavior of Loose Sand Reinforced with Synthetic Fibers. **Soil Mechanics and Foundation Engineering**, [S. l.], v. 53, n. 1, p. 12–18, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9357-9>

COELHO, E. F. F., **Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas**. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

CONCEIÇÃO, M. **Análise do comportamento tensão - deformação de um solo reforçado com fibra**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, 2021.

CONSOLI, N. C. *et al.* Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York, v.128, n.6, p. 462-472, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:6\(462\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:6(462)) Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291090-0241%282002%29128%3A6%28462%29> Acesso em: 29 jan. 2023.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; ULBRICH, L. A. The behavior of a fiber-reinforced cemented soil. **Ground Improvement**, London, v. 3, n. 1, p. 21–30, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1680/gi.1999.030103> Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/gi.1999.030103> Acesso em: 29 jan. 2024.

CONSOLI, N. *et al.* Effect of relative density on plate loading tests on fibre-reinforced sand. **Géotechnique**, [S.l.], v. 59, n. 5, p. 471–476, 2009. DOI: 10.1680/geot.2007.00063 Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.2007.00063> Acesso em: 29 jan. 2023.

CONSOLI, N.; CASAGRANDE, M.; COOP, M. Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. **Géotechnique**, [S.l.], v. 57, n. 9, p. 751–756, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.9.751> Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/geot.2007.57.9.751> Acesso em: 29 jan. 2023.

CONSOLI, N.C.; ULBRICH, L.A.; PRIETTO, P.D.M. Engineering behavior of randomly distributed fiber-reinforced cement soil. In: **International symposium on recent developments in soil and pavement mechanics**, Rio de Janeiro, 1997.

CORRADINI, E. *et al.* Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [S.l.], v. 3, n. 3, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000300030> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbf/a/DQdC9ZVzgsndcvBjvGM4tNb/?lang=pt> Acesso em: 29 jan. 2024.

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

CURCIO, D. S. **Comportamento hidromecânico de compósito solo-fibra**. 2008. Tese

(Doutorado) — Escola de Engenharia, Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

CURCIO, D. S., **Comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono**. 2001. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense. Niterói, Rio de Janeiro, 2001.

DEBMANDAL, M.; MANDAL, S. Coconut (*Cocos nucifera* L.: Arecaceae): In health promotion and disease prevention. **Asian Pacific Journal of Tropical Medicine**, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 241–247, 2011. DOI: 10.1016/S1995-7645(11)60078-3. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1995-7645\(11\)60078-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1995-7645(11)60078-3). Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21771462/> Acesso em: 29 jan. 2024.

DEFOIRDT, N. *et al.* Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 41, Iss. 5, p. 588–595, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.01.005> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X10000126> Acesso em: 29 jan. 2023.

DIAB, A. A. *et al.* Effect of compaction method on the undrained strength of fiber-reinforced clay. **Soils and Foundations**, [S.l.], v. 58, iss. 2, p. 462-480, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.013>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080618300131>. Acesso em: 29 jan. 2024.

DIAMBRA, A. *et al.* Determination of fibre orientation distribution in reinforced sands. **Géotechnique**, v.57, n.7, p.623-628, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.7.623> Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/geot.2007.57.7.623> Acesso em: 29 jan. 2024.

DIAMBRA, A.; IBRAIM, E. Fibre-reinforced sand: interaction at the fibre and grain scale. **Géotechnique**, [S.l.] v. 65, n. 4, p. 296–308, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.14.P.206> Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/geot.14.P.206> Acesso em: 29 jan. 2023.

DIÁRIO DO NORDESTE. **Usina desativada há dois anos**. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/metro/usina-desativada-ha-dois-anos-1.683562> Acesso em: 14 nov. 2023.

DIAS, J. D. S. *et al.* **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. EMBRAPA Agroenergia-Documents (INFOTEC AE), 2012.

DITTENBER, D. B.; GANGARAO, H. V. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [S.l.], v. 43, n. 8, p. 1419–1429, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X11003903> Acesso em: 29 jan. 2024.

DONATO, M. *et al.* Fibras de polipropileno como reforço para materiais geotécnicos. Solos e

Rochas. **ABMS/ABGE**, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 161–179, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/264785071_Fibras_de_polipropileno_como_reforco_para_materiais_geotecnicos Acesso em: 29 jan. 2024.

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

ELERT, K.; RODRIGUES-NAVARRO, C. Degradation and conservation of claycontaining stone: A review. **Construction and Building Materials**, v. 330, n. 2, p. 1- 16, mai. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127226>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822009060> Acesso em: 02 nov. 2023.

EMBRAPA. **Coco: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília DF. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/192950/1/500_PERGUNTASCoco-ed-01-2018.pdf.

ESMAEILPOURSHIRVANI, N. *et al.* Improvement of the engineering behavior of sand-clay mixtures using kenaf fiber reinforcement. **Transportation Geotechnics**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 1–8, 2019.

FAOSTAT - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Crops and livestock products**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/>. Acesso em: 18 out. 2023.

FARUK, O. *et al.* Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Prog. Polym. Sci**, [S.l.], v. 37, iss. 11, p. 1552-1596, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079670012000391> Acesso em: 08 jan. 2024.

FATANI, M.; BAUER, G.; AL-JOULANI, N. Reinforcing Soil with Aligned and Randomly Oriented Metallic Fibers. **ASTM**, [S.l.], v. 14, iss. 1, 1991. Disponível em: <https://www.astm.org/gtj10194j.html> Acesso em: 29 jan. 2024.

FAUSTINO, O. W. C. **Análise do comportamento hidromecânico e o processo de formação de fissuras de solo expansivo reforçado com fibras do coco verde**. 2022. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

FERREIRA NETO, M. *et al.* Qualidade do fruto verde de coqueiro em função da irrigação com água salina. **Rev. bras. eng. agrícola e ambiental**, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 69-75, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000100013> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/sPg8R3VLhF9F537FVYRBTjm/> Acesso em: 29 jan. 2024.

FERREIRA, S. R. *et al.* Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 139, p. 551–561, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.004> Disponível:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816316087> Acesso em: 29 jan. 2024.

FERREIRA, S. R. *et al.* Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. **Rev. Matéria**, v. 17, n. 2, p. 1024-1034, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762012000200008> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/RJCyv3cJFZK3GJYWWzLV9FK/abstract/?lang=pt> Acesso em: 29 jan. 2024.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FESTUGATO, L. **Comportamento de hidratação e resposta cisalhante cíclica de resíduo de mineração cimentado reforçado com fibras**. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FEUERHARMEL, M.R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

FIDELIS, M. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta**. 2014. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

FIDELIS, M. E. A. *et al.* The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, [S.l.], v. 2, n. 2, p. 149–157, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785413000306> Acesso em: 29 jan. 2024.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Mecânica dos Solos para Solos Insaturados**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1993.

FREITAG, D. R. Soil randomly reinforced with fibers. **Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers**, [S.l.], v. 112, iss. 8, p. 823–826, 1986. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:8\(823\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:8(823))

FREITAS, T. M. **Comportamento mecânico a longo prazo de um solo reforçado com fibras de coco**. 2022. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2022.

FUNCEME. **Calendário de chuvas**. Disponível em: <http://www.funceme.br/app-calendario/diario/municipios/maxima/2023/1>. Acesso em: 04 dez. 2023.

GHAVAMI, K.; TOLÊDO FILHO, R. D.; BARBOSA, N. P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. **Cement and Concrete Composites**, [S.l.], v. 21, n. 1, p. 39–48, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00033-X) Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095894659800033X> Acesso em: 30 jan. 2024.

GOMES, N. **Comportamento hidromecânico de solos reforçados com fibras PET para aplicação em barreiras de contenção de resíduos**. 2028. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

GOWTHAMAN, S.; NAKASHIMA, K.; KAWASAKI, S. A state-of-the-art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: past findings, present trends and future directions. **Materials**, v. 11, n. 4, p. 553, 2018. DOI: 10.3390/ma11040553. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/4/553> Acesso em: 30 jan. 2024.

GRAY, D.; AL-REFAI, T. Behaviour of fabric versus fibre-reinforced sand. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, [S.l.], v. 112, n. 8, p. 804–826, 1986. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:8\(804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:8(804)) Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9410%281986%29112%3A8%28804%29> Acesso em: 29 jan. 2024.

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

GRAY, D.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. **Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers**, [S.l.], v. 109, n. 3, p. 335–353, 1983. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:3\(335\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(335)) Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9410%281983%29109%3A3%28335%29> Acesso em: 30 jan. 2024.

GUNASEKARAN, K.; KUMAR, P. S.; LAKSHMIPATH, M. Mechanical and bond properties of coconut shell concrete, **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 92-98, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.053> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061810003028> Acesso em: 30 jan. 2024.

GUSMÃO, L. R. C. **Influência de ciclos de secagem-molhagem no comportamento hidráulico-mecânico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras de coco verde**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

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

HEINECK, K. *et al.* Comportamento de solos micro-reforçados a pequeníssimas e grandes deformações cisalhantes. **Solos e Rochas**. São Paulo, v. 26, n. 1, p. 3–17, 2003.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras impermeáveis horizontais**. 275 f. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HEINECK, K. S.; COOP, M. R.; CONSOLI, N. C. Effect of microreinforcement of soils from very small to large shear strains. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, American Society of Civil Engineers**, [S.l.], v. 131, n. 8, p. 1024–1033, 2005. DOI:

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:8\(1024\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:8(1024)) Disponível em:
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291090-0241%282005%29131%3A8%281024%29> Acesso em: 30 jan. 2024.

HEJAZI, S. *et al.* A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Construction and building materials**, [S.l.], v. 30, p. 100–116, 2012. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045> Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061811006763> Acesso em: 30 jan. 2024.

HOARE, D. Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibres. **C.R. Call. Int. Renforcement des Sols**, Paris, p. 47-52, 1979. Disponível em:
<https://library.geosyntheticssociety.org/wp-content/uploads/resources/proceedings/Laboratory%20study%20of%20granular%20soils%20reinforced%20with%20randomly%20oriented%20discrete%20fibres.pdf> Acesso em: 29 jan. 2024.

HOLLAWAY, L. Polymers and polymer composites. *In: Construction Materials; their nature and behavior*. London: J. M. Illston/E. & F.N. Spon, 2ed., p.321-358, 1994.

IBGE. **Coco da Bahia**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/coco-da-baia/br> . Acesso em: 27 de nov. 2023.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. IBGE/LSPA. Fortaleza: IBGE/GCEA-CE. Dezembro. Série 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, outubro de 2021. Documento impresso.

IBGE. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em:
<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Acesso em: 15 nov. 2023.

IBRAIM, E. *et al.* Static liquefaction of fibre reinforced sand under monotonic loading. **Geotextiles and Geomembranes**, [S.l.], v. 28, n. 4, p. 374–385, 2010. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.12.001> Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114409001277> Acesso em: 30 jan. 2024.

ILLSTON, J. M. **Construction materials; their nature and behavior**. 2ed. London: E & FN Spon, 518p., 1994.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em:
<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A315>. Acesso em: 04 dez. 2023.

ISAAC, S. R.; NAIR, M. A. Biodegradation of leaf litter in the warm humid tropics of kerala, india. **Soil Biology and Biochemistry**, [S.l.], v. 37, n. 9, p. 1656–1664, 2005. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.02.002> Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071705000520> Acesso em: 30 jan. 2024.

ISHIZAKI, M. H. *et al.* Caracterização mecânica e morfológica de compostos de polipropileno e fibras de coco verde: influência do teor de fibra e das condições de mistura.

Polímeros, [S.l.], v. 16, p. 182-186, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282006000300006> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/TctNmXY7Y64S3f3jHQMKNKwf/?lang=pt#> Acesso em: 29 jan. 2024.

JACQUES, E. **MDF verde feito de casca de coco**. 2013. Disponível em: <http://atitudesustentavel.com.br/blog/2013/10/27/mdf-verde-feito-de-casca-de-coco/> Acesso em: 19 de agosto 2023.

JAMEI, M.; VILLARD, P.; GUIRAS, H. Shear Failure Criterion Based on Experimental and Modeling Results for Fiber-Reinforced Clay. **International Journal of Geomechanics**, [S.l.], v. 13, iss. 6, 2012. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.00002](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.00002) Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GM.1943-5622.0000258> Acesso em: 30 jan. 2024.

JEWELL, R. A.; WROTH, C.P. Direct shear tests on reinforced sand. **Géotechnique**, London, v.37, n.1, p.53-68, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1987.37.1.53> Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/geot.1987.37.1.53> Acesso em: 29 jan. 2024.

JISHNU, V. P.; SANKAR, N.; CHANDRAKARAN, S. Comportamento de resistência de solo sem coesão reforçado com folha de coco como material natural. **Mater Hoje Proc**, [S.l.], v. 31, p. 340–347, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.637>

JOHN, M. J.; ANANDJIWALA, R. D. Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. **Polymer composites**, [S.l.], v. 29, n. 2, p. 187–207, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.20461> Disponível em: <https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.20461> Acesso em: 29 jan. 2024.

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

JOHNSTON, C. D. Fiber-reinforced cement and concrete. *In: Advances in concrete technology*. 2ed. Ottawa: V.M. Malhorta, p.603-673., 1994.

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

KANAYAMA, M.; KAWAMURA, S. Efeito da adição de resíduos de fibra de bambu nas propriedades mecânicas do solo. **Revista Aberta de Engenharia Civil**, [S. l.], v. 9, p. 173-184, 2019. doi: 10.4236/ojce.2019.93012.

KHATRI, V. N.; DUTTA, R. K.; KATRE, S. Shear Strength, Bearing Ratio and Settlement Behavior of Clay Reinforced with Chemically Treated Coir Fibres. **Jordan Journal of Civil Engineering**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 659-679, 2017. Disponível em: <https://www.proquest.com/docview/1958356276?sourcetype=Scholarly%20Journals> Acesso em: 30 jan. 2024.

KOUTENAEI, R. Y.; CHOBBASTI, A. J.; KUTANAEI, S. S. Triaxial behaviour of a cemented sand reinforced with Kenaf fibres. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, [S. l.], v. 25, n. 7, p. 1268-1286, 2021.

KRAHN, J.; FREDLUND, D. G. On Total, Matric and Osmotic Suction. **Soil Science**, [S. l.], v. 114, n. 5, p. 339 – 348, 1972.

KUMAR, P.; MIR, F. A. Efeito da fibra de juta nas propriedades de engenharia do solo. In: Shukla, S. K. *et al.* **Desenvolvimentos Recentes em Geotecnia e Engenharia Estrutural, TRACE 2022**. Springer: Cingapura, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1886-7_34

KUTANAEI, S. S.; CHOBBASTI, A. J. Triaxial behavior of fiber-reinforced cemented sand. **Journal of Adhesion Science and Technology**, [S. l.], v.30, n. 6, p. 579–593. 2016. <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1110073>

LÉDO, A. S *et al.* Advances in Coconut palm propagation. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [S. l.], v. 41, n. 2, p. 1–14, 2019. DOI: 10.1590/0100-29452019159. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbf/a/vJVrsDBYhhK7VpjFLGLNzRR/> Acesso em: 30 jan. 2024

LEOCÁDIO, G. Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado. 2005. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas., 2005.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C.; **Ciência e tecnologia: Compósitos estruturais**. Edgard Blücher, São Paulo, 2006.

LIMA, F. A. L. V. **Transporte de contaminantes oriundos da água de produção da indústria petrolífera em solos areno-argilosos compactados**. 255 f. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

LIRER, S.; FLORA, A.; CONSOLI, N. C. Experimental evidences of the effect of fibres in reinforcing a sandy gravel. **Geotechnical and Geological Engineering**, [S. l.], v. 30, n. 1, p. 75–83, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.10.003> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775521001657> Acesso em: 29 jan. 2024

LOPES, M. M. **Estudo do comportamento físico-mecânico de solos reforçados com fibras de açaí (Euterpe oleracea)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

LOPES, M. M.; CASAGRANDE, M. D. T. Estudo do Comportamento de um Solo Reforçado com Fibras de Açaí (Euterpe Oleracea). In: 5 Simposio de Pratica de Engenharia Geotecnica na Regiao Centro Oeste, 5, 2019, Brasília. **Geocentro**, Brasília, 2019.

LOPES, M. M.; CASAGRANDE, M. Mechanical Improvement of a Reinforced Sand with Açaí (Euterpe oleracea) Fibers. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S. l.], v. 1260, n. 1, 2022.

MAHER, M.; GRAY, D. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers.

Journal of Geotechnical Engineering, [S.l.], v. 116, n. 11, p. 1661–1677, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:11\(1661\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:11(1661)) Acesso em: 29 jan. 2024.

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

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**, São Paulo: Blucher, 1991

MARÇAL, R. **Avaliação de Parâmetros de Resistência de Solos com Fibras de Polipropileno Reciclado**. 73 f. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2019.

MARTINHO, M. G.; GONÇALVES, M. G. **Manual de Gestão de Resíduos**. Universidade Aberta, 2000.

MARTINS, A. **Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal**. 2014. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MCGOWN, A. *et al.* Soil strengthening using randomly distributed mesh elements. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. [S.l.], v. 11, p. 1735–1738, 1985.

MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.; AL-HASANI, M. Effect of inclusion properties on the behaviour of sand. **Geotechnique**, [S.l.], v. 28, n. 3, p. 327–346, 1978. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1978.28.3.327> Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/geot.1978.28.3.327> Acesso em: 30 jan. 2024.

MELO FILHO, J. A. **Durabilidade Química e Térmica e Comportamento Mecânico de Compósitos de Alto Desempenho Reforçados com Fibras de Sisal**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MENDES, R. M. **Estudo das propriedades geotécnicas de solos residuais não saturados de Ubatuba/SP**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2008.

MENEZES, L. C. P. **Análise do comportamento mecânico de solo arenoargiloso reforçado com fibras de coco verde**. 2018. Dissertação (Mestrado). Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.

Menezes, L. C. P. D. *et al.* Analysis of the Physical-Mechanical Behavior of Clayey Sand Soil Improved with Coir Fiber. **Soils and Rocks**, [S.l.], 42, n. 1, p. 31–42, 2019. <https://doi.org/10.28927/SR.421031>

MENEZES, L. C. P. D., *et al.* Analysis of the Physical-Mechanical Behavior of Clayey Sand Soil Improved with Coir Fiber. **Soils and Rocks**, [S.l.], v. 42, n. 1, p. 31–42, 2019. <https://doi.org/10.28927/SR.421031>

MICHALOWSKI, R. L.; ČERMÁK, J. Triaxial compression of sand reinforced with fibers. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, **American Society of Civil Engineers**, [S.l.], v. 129, n. 2, p. 125–136, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:2\(125\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:2(125)) Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291090-0241%282003%29129%3A2%28125%29> Acesso em: 29 jan. 2024.

MIGUEL, M. G., TEIXEIRA, R. S., PADILHA, A. C. C. Curvas características de sucção do solo laterítico da região de Londrina/PR. *Revista de Ciência e Tecnologia*, [S. l.], v. 12, n. 24, p. 63-74, 2006.

MILLER, C. J.; RIFAI, S. Fiber reinforcement for waste containment soil liners. **Journal of Environmental Engineering**, [S.l.], v. 130, n. 8, p. 891-895, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2004\)130:8\(891\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2004)130:8(891)) Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9372%282004%29130%3A8%28891%29>

MIRZABABAEI, M. *et al.* Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [S.l.], v. 139, n. 3, p. 483–493, 2013. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000792](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000792) Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000792> Acesso em: 30 jan. 2024.

Mitchell, J.K. Fundamental aspects of thixotropy in soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, [S.l.], v. 86, n. 3, p. 19-52, 1960. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.000027> Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JSFEAQ.0000271#:~:text=If%20however%2C%20thixotropy%20is%20defined,grained%20soils%20at%20water%20contents> Acesso em: 29 jan. 2024.

MOHAMED, A. E. M. K. Improvement of swelling clay properties using hay fibers. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v.38, p.242-247, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000271> Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JSFEAQ.0000271#:~:text=If%20however%2C%20thixotropy%20is%20defined,grained%20soils%20at%20water%20contents> Acesso em: 29 jan. 2024.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites**. [S.l.]: CRC press, 2005.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRINCHSEN, G. Biofibers, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. **Macromolecular Materials and Engineering**, Berlin, v. 276, n. 4, p.1-24, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1439-2054\(20000301\)276:1<1::AID-MAME1>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1439-2054(20000301)276:1<1::AID-MAME1>3.0.CO;2-W) Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291439-2054%2820000301%29276%3A1%3C1%3A%3AAID-MAME1%3E3.0.CO%3B2-W> Acesso em: 30 jan. 2024.

MONTARDO, J. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes**. 1999. Dissertação (Mestrado) –

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

MONTARDO, J. P.; CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M. Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 24, n. 3, p. 191–209, 2002.

MOREL, J.; GOURC, J. Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements. **Geosynthetics International**, v. 4, n. 5, p. 481–508, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1680/gein.4.0103> Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/gein.4.0103> Acesso em: 29 jan. 2023.

MOTTA, T. G. **Estudo do comportamento mecânico de solos reforçados com fibras naturais**. 876 f. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

NASCIMENTO, C. M. **Compósito de gesso reforçado com fibra de coco e cortiça triturada**. 2017. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

NASCIMENTO, E. C. **Avaliação das propriedades do agregado reciclado da construção civil para utilização em sistema de cobertura final de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Pernambuco, Recife, 2019.

NATARAJ, M.S.; ADDULA, H.R.; MCMANIS, K. L. Strength and deformation characteristics of fiber reinforced soils. In: **International symposium on environment al geotechnology**, 3., San Diego, 1996. Proceedings Pennsylvania: Technomic Publishing Co., Inc, v.1, p.826-835, 1996.

NETO, O. F., **Resistência ao cisalhamento de um solo não saturado com medida direta de sucção**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2008.

NYUIN, J. D.; KHALIL, N. S.; PETRUS, C. Desempenho de areia reforçada com fibra de coco branca. In: **Série de Conferências IOP: Ciência e Engenharia de Materiais. Publicação IOP**, 2018. p.012031.

OHLER, J.G. **Coconut Tree of Life**. Roma: Fao, 1984.

OLIVEIRA JUNIOR, A. I. **Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco**. 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

OLIVEIRA, A. **Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco**. 2018. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

ONTEIRO, S. N. *et al.* Efeito da interface fibra/matriz sobre a resistência de compósitos poliméricos reforçados com fibras de coco. **Revista Matéria**, v. 11, v. 4, p. 395-402, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762006000400005> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/BK4XRyKJRrYYkXQbt6nBGzg/?lang=pt> Acesso em: 29 jan.

2024.

ÖZKUL, Z. H.; BAYKAL, G. Shear behavior of compacted rubber fiber-clay composite in drained and undrained loading. **Journal of geotechnical and Geoenvironmental engineering**, [S. l.], v. 133, n. 7, p. 767-781, 2007.

PACHECO, M. S. M. **Análise da variabilidade e dispersão espacial elementar em solos e sedimentos por micro fluorescência de raio X – um caso de estudo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) - Universidade Nova de Lisboa, [S.l.], 2020.

PALACIOS, M. A. P. *et al.* Estudo do comportamento de um compósito areia-fibra em extensão axial. **Revista de Engenharia Civil IMED**, [S.l.], v. 2, n. 1, p. 33-39, 2015. DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v2n1p33-39> Disponível em: <https://seer.atitus.edu.br/index.php/revistaec/article/view/785/584>. Acesso em: 30 jan. 2024.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

PALMEIRA, E.M. Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos. In: **Seminário sobre aplicações de geossintéticos em geotecnia**. Geossintéticos, Brasília, p.1-20, 1992.

PANNIRSELVAM, P. V. *et al.* Desenvolvimento de projeto para produção de fibra de coco com inovação de tecnologia limpa e geração de energia. **Revista Analytica**, [S.l.], v. 15, p. 56-62, 2005. Disponível em: https://www.academia.edu/6448827/DESENVOLVIMENTO_DE_PROJETO_PARA_PRODUCAO_DE_FIBRA_DE_COCO_COM_INOVACAO_DE_TECHNOLOGIA_LIMPA_E_GERACAO_DE_ENERGIA Acesso em: 29 jan. 2024.

PASSOS, P. R. A. **Destinação sustentável de cascas de coco (Cocos nucifera) verde: obtenção de telhas e chapas de partículas**. 2005. 186 f. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PEDROSA, A. A. **Comportamento geomecânico de solo reforçado com resíduo da construção civil e fibras de polietileno tereftalato (PET)**. 2021. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

PEREIRA, C. L. **Aproveitamento do resíduo do coco verde para produção de compósitos destinados à construção rural**. 2012. 137 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo. Departamento de Zootecnia. Pirassununga, 2012.

PEREIRA, T. V. C. *et al.* Investigação da influência morfológica via análise de imagens na resistência à tração de fibras naturais. In: **Congresso Anual da ABM, ABM WEEK-67**, Rio de Janeiro, p. 31-33, 2012.

PETER, L. *et al.* Laboratory Investigation in the Improvement of Subgrade Characteristics of Expansive Soil Stabilised with Coir Waste. **Transportation Research Procedia**, [S. l.], v. 17, p. 558–566, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.110>

PETER, L. *et al.* Laboratory Investigation in the Improvement of Subgrade Characteristics of

Expansive Soil Stabilised with Coir Waste. **Transp. Res. Procedia**, [S.l.], v. 17, p. 558–566, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.110> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516307256> Acesso em: 30 jan. 2024.

PINO, G. A. H. **Biossorção de metais pedados utilizando pó de casca de coco verde (Cocos nucifera)**. 2005. 15 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

Pinto, A. R. A. G. Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2021.

PINTO, A. R. A. G. **Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo**. 2007. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 2000.

PRABAKAR, J.; SRIDHAR, R. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 16, n. 2, p. 123–131, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00008-9](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00008-9) Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061802000089> Acesso em: 30 jan. 2024.

QU, J.; SUN, Z. Strength behavior of shanghai clayey soil reinforced with wheat straw fibers. **Geotechnical and Geological Engineering**, [S.l.], v. 34, n. 2, p. 515–527, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9963-8> Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-015-9963-8#citeas> Acesso em: 29 jan. 2024.

RAMASWAMY, H. S.; AHUJA, B. M.; KRISHNAMOORTHY, S. Behavior of concrete reinforced with jute, coir and bamboo fibers. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, [S.l.], v. 5, p. 3-13, 1983. DOI: [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(83\)90044-1](https://doi.org/10.1016/0262-5075(83)90044-1) Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0262507583900441> Acesso em: 30 jan. 2024.

RAMIREZ, G. G. D. **Estudo Experimental de Solos Reforçados com Borracha Moída de Pneus Inservíveis**. 2012. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

RANJAN, G.; VASAN, R.; CHARAN, H. Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. **Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers**, v. 122, n. 6, p. 419–426, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:6\(419\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:6(419)) Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9410%281996%29122%3A6%28419%29> Acesso em: 29 jan. 2024.

REIS, A. F. S. M. **Análise do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibra de coco**. 2022. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da

Bahia, Salvador, 2022.

REIS, J. M. L. Fracture and flexural characterization of natural fiberreinforced polymer concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 20, p. 673-678, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.008> Acesso em: 20 jan. 2024.

ROCHA, K. D. C.; FERREIRA, M. S.; GARCIA, C. E. R. Óleo de Coco: características e aplicações fisiológicas. In: NORA, F. M. D. (ed). **Compostos Bioativos**. Canoas: Mérida Publishers, 2021. DOI: 10.4322/mp.978-65-994457-7-4.c8.

ROCHA, K. D. C.; FERREIRA, M. S.; GARCIA, C. E. R. Produção e produtos à base de coco (Cocos nucifera L.): uma revisão Production and products based on coconut (Cocos nucifera L.). **Brazilian Journal of Development**, [S.l.], v. 8, n. 5, p. 41476-41491, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n5-573. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/48629>. Acesso em: 30 jan. 2024.

ROCHA, S. A. **Avaliação da influência de fibras de polipropileno na resistência efetiva de um solo argiloso**. 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

RODRÍGUEZ, N. J. *et al.* Assessment of coconut fiber insulation characteristics and its use to modulate temperatures in concrete slabs with the aid of a finite elemento methodology. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 43, p. 1264-1272, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.01.005> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778811000144> Acesso em: 30 jan. 2024.

ROSA, M. F. *et al.* Aproveitamento da casca de coco verde. In: CARVALHO, J. M. M. **Apoio do BNB à pesquisa e desenvolvimento da fruticultura regional**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, p. 165-190, 2009.

ROSA, M. F. *et al.* **Processo agroindustrial: obtenção de pó de casca de coco verde**. Comunicado Técnico 61. Fortaleza – CE, 4 p. dez, 2001.

ROWELL, R. M.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S. Characterization and Factors Effecting Fiber Properties. In: Frollini, E., Leo, A. L.; Mattoso, L. H. C. **Natural Polymers and Agrofibers Composites**, São Carlos, Brazil, p. 115-134, 2000.

SANTIAGO, G. A. **Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)**. 2011. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) — Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2011.

SANTIAGO, G. A. *et al.* Mechanical behavior of curauá treated fiber-reinforced sand. **Materials Science Forum**, v. 730-732, p. 319-324, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.355> Disponível em: <https://www.scientific.net/MSF.730-732.355> Acesso em: 30 jan. 2024.

SANTONI, R. L.; TINGLE, J. S.; WEBSTER, S. L. Engineering properties of sand-fiber

mixtures for road construction. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. **American Society of Civil Engineers**, [S.l.], v. 127, n. 3, p. 258–268, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:3\(258\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:3(258)) Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291090-0241%282001%29127%3A3%28258%29> Acesso em: 30 jan. 2024.

SANTOS, I. S. **Análise das propriedades de um solo com adição de resíduos da construção civil e fibras de polipropileno**. 2023. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -. Universidade de Pernambuco, Recife, PE, 2023.

SANTOS, M. J. P. **Reforço de um solo erodível com resíduos de construção e fibras de coco babaçu**. 2020. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade de Pernambuco, Recife, 2020.

SANTOS, M. L. J. **Desempenho Mecânico e Avaliação da Durabilidade de Serragem de Bambu, Fibras de Coco e Fibras de Açaí como Materiais de Reforço de um Solo Tropical**. 2023. 149 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

SANTOS, M. L. J; MACHADO, M.; CASAGRANDE, M. (2022). Desempenho de Solo Tropical Reforçado com Fibras de Açaí para a Aplicabilidade na Estabilização de Taludes. In: COBRAE - VIII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Porto de Galinhas, PE, **Anais**, 2020.

SANTOS, M.; CASAGRANDE, M. Avaliação de resíduos de bambu como material de reforço de solo tropical. In: 6º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e sustentabilidade, 2023, Foz do Iguaçu. **IBEAS - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais**, Foz do Iguaçu, 2023.

SANTOS, P. J. C. **Análise da estabilização granulométrica de um solo areno-argiloso do município de São Cristóvão/SE com escória de cobre jateada**. 2019. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, 2019.

SARBAZ, H.; GHIASSIAN, H.; HESHMATI, A. A. Cbr strength of reinforced soil with natural fibres and considering environmental conditions. **International Journal of Pavement Engineering, Taylor & Francis**, [S.l.], v. 15, n. 7, p. 577–583, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.770511> Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298436.2013.770511> Acesso em: 30 jan. 2024.

SATYANARAYANA, K. G; PILLAI, C. K. S.; SUKUMARAN, K.; PILLAI, S. G. K.; ROHATGI, P. K.; VIJAYAN, Kalyani. **Structure property studies of fibres from various parts of the coconut tree**. Journal of materials science, 17, p. 2453-2462, 1982.

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

SCHAEFER, V. R. *et al.* **Ground Improvement, Ground Reinforcement and Ground Treatment: Developments 1987- 1997**. [S.l.]: Amer Society of Civil Engineers, 1997.
SCHUILING, M.; HARRIES, H. C. The Coconut Palm in East Africa. **Principes**, Miami, v.38, n.1, 1994.

SEED, H.B.; CHAN, C.K. Structure and strength characteristics of compacted clays. **Proceedings**, [S.l.], v. 85, p. 87-128, 1959. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000229> Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JSFEAQ.0000229> Acesso em: 30 jan. 2024.

SELVARAJ, S. *et al.* Conversion of tannery solid waste to sound absorbing nanofibrous materials: A road to sustainability. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 213, p. 375–383, 2019. DOI:10.1016/j.jclepro.2018. 12.144. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JSFEAQ.0000229> Acesso em: 30 jan. 2024.

SENEZ, P. C. **Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET)**. 2016. 124. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio, 2016.

SENHORAS, E. **Estratégia de uma Agenda para a Cadeia Agroindustrial do Coco**. Campinas: Ed. ESC, 2003.

SHEWBRIDGE, E.; SITAR, N. Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v.115, n.8, p.1134-1147, 1989.
SHUKLA, S. K. **Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering**. 1 ed. Singapore: Springer International Publishing, 2017.

SILVA, A. C. D. Reaproveitamento da casca de coco verde. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 13, n. 5, p. 4077-4086, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236130815186> Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/index.php/remoa/article/view/15186> Acesso em: 30 jan. 2024.

SILVA, E. J. *et al.* Degradação da fibra de coco imersa em soluções alcalinas de cimento e NaOH. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 981-988, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p981-988> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/x78tRfkQD5KF3zJ9NddTvHv/> Acesso em: 30 jan. 2024.

SILVA, F. D. A.; CHAWLA, N.; TOLÊDO FILHO, R. D. Mechanical behavior of natural sisal fibers. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, [S.l.], v. 4, n. 2, p. 106–113, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.335> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811005236> Acesso em: 30 jan. 2024.

SILVA, F. **Durabilidade e Propriedades Mecânicas de Compósitos Cimentícios Reforçados por Fibras de Sisal**. 2009. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, G. O.; JERONIMO, C. E. M. Estudo de alternativas para o aproveitamento de resíduos sólidos da industrialização do coco. **Revista Monografias Ambientais**, v. 10, n. 10, p. 2193- 2208, 2012. DOI: 10.5902/223613086935. Disponível em:

<https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/6935>. Acesso em: 30 jan. 2024.

SILVEIRA, M. S. **Utilização de cascas de coco verde na produção de briquetes em Salvador (BA)**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 2008.

SILVEIRA, M. V. **Análise do Comportamento Mecânico e da Durabilidade em Compósitos de Areia Reforçada com Fibras Naturais de Curauá e Sisal**. 2018. 148 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018.

SILVEIRA, M. V.; CASAGRANDE, M. D. T. Efeitos da degradação de fibras vegetais no comportamento mecânico da areia reforçada. **Engenharia Geotécnica e Geológica**, [S. l.], v. 39, n. 5, p. 3875-3887, 2021.

SILVEIRA, M.; FERREIRA, J. W. D. S.; CASAGRANDE, M. D. T. Effect of Surface Treatment on Natural Aging and Mechanical Behavior of Sisal Fiber–Reinforced Sand Composite. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S. l.], v. 34, n. 6, p. 06022001, 2022.

SILVEIRA, V.; ARAGÃO, T. R. P. Viabilidade financeira de instalação de uma unidade de beneficiamento de cascas de coco verde. **Revista iPecege**, [S.l.], v. 2, n. 3, p. 72-85, 2016. DOI: <https://doi.org/10.22167/r.ipecege.2016.3.72> Disponível em: <https://revista.ipecege.org.br/Revista/article/view/80>. Acesso em: 30 jan. 2024.

SIQUEIRA, L. A.; ARAGÃO, W. M.; TUPINAMBA, E. A. **A Introdução do coqueiro no Brasil, importância histórica e agrônômica**, [S. l.]: Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, v. 47, 2002.

SKEMPTON, A. W. A atividade coloidal das argilas. **Artigos selecionados sobre mecânica dos solos**, [S.l.], v. 1, p. 57-61, 1953.

SKEMPTON, A.W. ; NORTHEY, R. D. The sensitivity of clays. **Géotechnique**, [S.l.], v. 3, n.1, p. 30-51, 1952.

SOTOMAYOR, J. M. G. **Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibra de coco submetida a ensaios de placa em verdadeira grandeza**. 2014. Dissertacao (Mestrado em Engenharia) – Programa de PósGraduacao em Engenharia Civil da Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SOTOMAYOR, J. M. G., MONIQUE, G.; CASAGRANDE, M. D. Influence of Polypropylene Fiber-Reinforcement on the Mechanical Behavior of Gold Ore Tailings through Direct Shear Tests. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S. l.], v. 33, n. 10, p. 04021256, 2021.

SOUSA, F. L. N. *et al.* Eletroquímica coloidal e sua relação com a sensibilidade de um solo argiloso na foz do rio Amazonas. **Contribuciones a las ciencias sociales**, [S.l.], v. 16, n. 8, p. 8486–8506, 2023. DOI: 10.55905/revconv.16n.8-017. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/1185>. Acesso em: 30 jan. 2024.

SOUZA, W. *et al.* Variable Significance Determination Utilizing Extended CHAID Method in Fiber Improvement of Fine Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [S.l.], v. 48, n. 7, 2022.

SPECHT, L.P. **Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidos a carregamentos estáticos visando à pavimentação**. 2000. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

STAUFFER, S.; HOLTZ, R. Stress-strain and strength behavior of stapl fiber and continuous filament-reinforced sand. **Transportation research record**, [S.l.], n. 1474, 1995. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/451616> Acesso em: 30 jan. 2024.

TAMAYO, J. R. A. **Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Reforçado com Fibras de Coco**. Rio de Janeiro, 2015. 114 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

TANG, C. S., SHI, B.; ZHAO, L.Z. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**, [S.l.], v.28, n.1, p.54–62, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.10.001> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114409001010> Acesso em: 30 jan. 2024.

TANG, C.S. *et al.* Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cemente stabilized clayey soil. **Geotextiles and Geomembranes**, [S.l.], v.25, n.3, p.194-202, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.11.002> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114406000860> Acesso em: 30 jan. 2024.

TANG, C.-S. *et al.* Tensile Strength of Fiber Reinforced Soil. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S.l.], v. 28, n. 7, p. 04016031, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001546)

TAYLOR, G. D. **Materials in Construction: An Introduction**. 3 ed. [S.l.]: Routledge, 2013. <https://doi.org/10.4324/9781315839158>

TEJA, M. D.; MUTTHARAM, M. Durability study on coir fiber-reinforced soil. *In: Ground Characterization and Foundations: Proceedings of Indian Geotechnical Conference 2020*, 1. **Springer Singapore**, 2022. p. 33-39.

TEODORO, J. M. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas**. 1999. 137 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

THAKUR, V. K.; SINGHA, A. S. Natural fibres-based polymers: Part I – Mechanical analysis of Pine needles reinforced biocomposites. **Bulletin of Material Science**, [S.l.], v. 33, n. 3, p. 257– 264, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12034-010-0040-x> Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12034-010-0040-x#citeas> Acesso em: 30 jan. 2024.

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

TOLÊDO FILHO, R. D. *et al.* Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibers in cement mortar composites. **Cement & Concrete Composites**, [S.l.], v. 22, p. 127-143, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00039-6) Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946599000396> Acesso em: 30 jan. 2024.

TOLÊDO FILHO, R. D.; ENGLAND, G. L.; GHAVAMI, K. Comportamento em compressão de argamassas reforçadas com fibras naturais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**. [S.l.], v. 01, p.79-88, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v1n1p79-88> Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/HhNxThpc9MDhvTXVKVDRz4d/abstract/?lang=pt> Acesso em: 30 jan. 2024.

TOMCZAK, F.; **Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil**. 2010. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

TROLLOPE, D. H.; CHAN, C. K. Soil structure and the step-strain phenomenon.

Proceedings, [S.l.], v. 86, p. 1-40, 1960. DOI: <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0008144>

Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/TACEAT.0008144> Acesso em: 30 jan. 2024.

ULBRICH, L. **Aspectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras.**, 1997. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

VAID, Y.P.; CAMPANELLA, R.G. Time-dependent behavior of undisturbed clay. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, [S.l.], v. 103-7, p. 693-709, 1977. DOI:

<https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000449> Disponível em:

<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/AJGEB6.0000449> Acesso em: 30 jan. 2024.

VAN IMPE, W.F.V. **Soil improvement techniques and their evolution**. Rotterdam, A. A. Balkema, 1989.

VASCONCELOS, P. F. L. **Estudo de viabilidade na utilização da fibra de coco para soluções de tratamento acústico em edificações**. Brasília, 2020. 22 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto do Ensino Superior em Brasília, Brasília, DF, 2020.

VELA SILVEIRA, M.; FERREIRA, J. W. S.; CASAGRANDE, M. D. T. Efeito do tratamento superficial no envelhecimento natural e no comportamento mecânico do compósito de areia reforçada com fibra de sisal. **Revista de Materiais em Engenharia Civil**, [S. l.], v. 34, n. 6, p. 06022001, 2022.

VENDRUSCOLO, M. **Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VIDAL, H. **The principle of reinforced earth**. [S.l.]: Highway Research Record, 1969.

VIEIRA, A. M.; MARINHO, F. A. M. Variação sazonal de sucção em um talude de solo

residual em São Paulo. In: **III CONGRESSO BRASILEIRO DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS**, Rio de Janeiro, v. 1, p. 287-295, 2001.

WANBUA, P.; IVENS, J. VERPOEST, Ignaas. Natural fibers: can they replace glass in fibre reinforced plastics? **Composites Science and Technology**, 63, p. 1259-1264, 2003.

WARWICK, D. R. N *et al.* **Principais doenças. A cultura do coqueiro no Brasil**, [S. l.], p. 447, 2018.

WARWICK, D. R. N.; *et al.* **A cultura do coqueiro**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006.

WEI, L. *et al.*. Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber. **Construction and Building Materials**, 172, 300– 308. 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.248>

WU, Z. *et al.* Geological investigation of the settlement behaviour of two highways in Lianyungang region. **Engineering Geology**, v. 272, p. 1-9, jul. 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105648>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001379521931525X> Acesso em: 23 de outubro de 2023.

YAZICI, M. F.; KESKIN, S. N. Melhorando Propriedades Mecânicas de Solo Argiloso de Baixa Plasticidade Usando Fibras de Cânhamo: Efeitos do Conteúdo de Fibra e Revestimento de Superfície de Fibra. **Irã J Sci Technol Trans Civ Eng**, [S.l.], v. 48, p. 961-975, 2023.

<https://doi.org/10.1007/s40996-023-01208-5>

YIXIAN, W. *et al.* Study on Strength Influence Mechanism of Fiber-Reinforced Expansive Soil Using Jute. **Geotechnical and Geological Engineering**, [S. l.], v. 34, n. 4, p. 1079–1088, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0028-4>