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

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE UM SOLO TROPICAL ARGILOSO REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS DE AÇAÍ (*EUTERPE OLERACEA*)

AUGUSTO BARBOSA SILVA

ORIENTADORA: MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE

COORIENTADOR: ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD-219/2026

BRASÍLIA/DF, JUNHO/2026

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

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE UM SOLO TROPICAL ARGILOSO REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS DE AÇAÍ (*EUTERPE OLERACEA*)

AUGUSTO BARBOSA SILVA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

_____

MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc.
(Universidade de Brasília)
(ORIENTADORA)

_____

ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, D.Sc.
(Universidade de Brasília)
(COORIENTADOR)

_____

JOSÉ WILSON DOS SANTOS FERREIRA, D.Sc.
(Universidade de Brasília)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

MARIANA VELLA SILVEIRA, D.Sc.
(Universidade Federal do Ceará)
(EXAMINADORA EXTERNA)

_____

RODRIGO CÉSAR PIEROZAN, D.Sc.
(Universidade Tecnológica Federal do Paraná)
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, JUNHO/2026

SILVA, AUGUSTO BARBOSA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE UM SOLO TROPICAL ARGILOSO REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS DE AÇAÍ (*EUTERPE OLERACEA*)

xxi, 157 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2026)

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Reforço de solos 2. Solo tropical laterítico 3. Durabilidade

4. Sílica coloidal 5. Comportamento geomecânico

I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, A. B. (2026). Avaliação do comportamento geomecânico de um solo tropical argiloso reforçado com fibras naturais de açaí (*Euterpe oleracea*). Tese de Doutorado, Publicação G.TD-219/2026, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF,157 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Augusto Barbosa Silva

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Avaliação do comportamento geomecânico de um solo tropical argiloso reforçado com fibras naturais de açaí (*Euterpe oleracea*)

GRAU / ANO: Doutor / 2026

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

_____

Augusto Barbosa Silva

SQN 403, B. J

70.835-100 – Brasília/DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas perfeitas condições de saúde e pelas inúmeras oportunidades que me foram concedidas ao longo desse percurso, e por me permitir concluir com êxito mais esta importante e desafiadora etapa da minha jornada.

À minha família, meus pais e meus irmãos, o meu eterno porto seguro. Obrigado por me acompanharem, por vibrarem com cada passo e por me darem todo o suporte possível. Ao meu parceiro de todas as horas, Augusto Johonnes, minha gratidão pelo suporte, incentivo e paciente presença durante todo o tempo em que me dediquei a esta pesquisa.

Aos amigos que a vida e a ciência me deram. Um agradecimento especial ao Mateus, por ser um grande e generoso amigo, e por me auxiliar desde os primeiros dias do doutorado, sempre pronto e solícito pra qualquer pedido de ajuda, sem hesitar. Agradeço também aos amigos Lídia e Feliphe, que tornaram os dias muito mais leves, além de contribuírem muito com o trabalho por meio de várias discussões e trocas de experiência. Estendo meu agradecimento aos amigos Bruno (que muito me ajudou) e Gabi, e ao técnico do laboratório de geotecnia, Rogério, que muito me ajudou, assim como tantos outros colegas (e foram muitos) que fizeram parte desta jornada, contribuindo de forma valiosa para o meu crescimento pessoal e para minha formação acadêmica.

Expresso minha especial gratidão à minha orientadora, professora Michéle. Obrigado por quatro anos de ensinamentos que transcenderam a geotecnia e agregaram grande valor à minha vida pessoal e acadêmica. Agradeço pela paciência, generosidade e por ser um exemplo de competência em uma área majoritariamente masculina (e muito machista). Seu otimismo, sua humanidade e seu apoio incondicional desde o primeiro dia foram a base para que este trabalho se tornasse possível. Sem o seu incentivo e a sua confiança, nada disso seria realidade.

Aos membros da banca de qualificação e de defesa, expresso meu profundo respeito. Foram valiosas considerações e contribuições, fundamentais para o amadurecimento e o enriquecimento técnico deste trabalho.

Ao professor Rodrigo, meu sincero agradecimento por ter acreditado e me incentivado, viabilizando a minha entrada e, agora, conclusão neste doutorado.

Ao professor José, pelo valioso auxílio oferecido durante a pesquisa, tanto na parte experimental quanto na parte escrita, contribuindo grandemente com o trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (PPGG/UnB), por me proporcionar essa experiência única. Agradeço aos docentes do programa pela valiosa contribuição à minha formação, bem como aos técnicos e a toda a infraestrutura oferecida.

Um agradecimento especial, ao laboratório *New Geotechnical Materials*, um ambiente de excelência e incrivelmente equipado, que se tornou a minha verdadeira casa. Ali, entre manhãs, tardes, noites e madrugadas adentro, sem distinção de horário, processei mais de uma tonelada de material em centenas de ensaios (e fui feliz assim).

Estendo meus agradecimentos aos demais laboratórios e parceiros: ao DER-DF, pela imediata disponibilidade de suas instalações e ajuda na ocorrência dos ensaios, além dos laboratórios internos da Universidade de Brasília, em especial ao Instituto de Geociências (IG), ao Instituto de Química (IQ), ao Instituto de Ciências Biológicas (IB) e ao Geofluxo, pelo suporte indispensável na execução da pesquisa.

Ao Instituto Federal de Rondônia (IFRO), pela oportunidade de formação por meio do afastamento integral, demonstrando o compromisso da instituição com a valorização de seus professores, com a qualidade do ensino e com as ações de retorno à sociedade.

Ao suporte financeiro concedido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP/DF), no âmbito do Projeto SEI-GDF nº 00193-00001386/2024-04, além da VALE que, por meio do Acordo de Parceria para Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (APPDI), viabilizou a aquisição de equipamentos essenciais ao desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, deixo meus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, me ajudaram a percorrer esse caminho. Cada gesto de apoio foi fundamental para a realização desta conquista.

RESUMO

SILVA, A. B. **Avaliação do comportamento geomecânico de um solo tropical argiloso reforçado com fibras naturais de açaí (*Euterpe oleracea*)**. Brasília, 2026. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília.

O reforço de solos com fibras naturais desponta como uma alternativa sustentável e de alto desempenho na geotecnia contemporânea. Contudo, a degradação orgânica desses materiais ao longo do tempo, especialmente em matrizes tropicais sujeitas a ciclos climáticos severos, constitui uma lacuna crítica que restringe sua aplicação em obras definitivas. Diante disso, investigou-se o comportamento geomecânico, a microestrutura e a durabilidade de um solo tropical argiloso reforçado com fibras do caroço de açaí (*Euterpe oleracea*) sob duas condições: tratadas superficialmente com solução de sílica coloidal e sem tratamento. O programa experimental envolveu a avaliação de degradabilidade dos compósitos com 1% de fibra expostos às condições climáticas de Brasília-DF ao longo de 24 meses. A avaliação multiescala englobou caracterizações físicas, químicas, geomecânicas e microestruturais. Foram realizados ensaios de compactação, adensamento unidimensional, compressão triaxial drenada (CD), cisalhamento simples direto (DSS) e prova de carga em placa em modelo físico reduzido para avaliação do comportamento carga-recalque. A rigidez intrínseca da fibra de açaí (Módulo de Young de 3,73 GPa e 45% de lignina) otimizou o efeito ponte, absorvendo os esforços de tração ao longo dos planos de cisalhamento e interceptando microfissuras. A inserção das fibras elevou a condutividade hidráulica à ordem de 10^{-5} cm/s e duplicou a tenacidade do compósito, induzindo a um comportamento dúctil, além de promover um aumento de 93% no intercepto coesivo. Em modelo físico reduzido, o compósito atingiu o Fator de Melhoria da Capacidade de Carga (BCR) de 3,49, reduzindo o recalque central em 87,8% sob a tensão de colapso do solo não reforçado. A avaliação de longo prazo revelou que a alcalinização do ambiente (pH ≈ 7,5) deflagrou a hidrólise da fibra natural, gerando uma desestruturação celular e perda de rigidez elástica das fibras. No entanto, a ancoragem mecânica garantiu a manutenção integral da resistência de pico original após dois anos de exposição. Em contrapartida, o tratamento com sílica coloidal demonstrou eficácia na impermeabilização das fibras, em forma de película inorgânica, que atuou como barreira química estável (ligações Si–O–Si) impedindo a lixiviação mineral e o colapso estrutural interno. Como resultado, o compósito preservou a integridade da rede de macroporos, apresentando parâmetros de resistência ao cisalhamento superiores à situação sem reforço. Conclui-se que o compósito solo-fibras de açaí, sobretudo submetido ao tratamento superficial com sílica coloidal, constitui uma eficaz tecnologia de reforço de solos, viável para aplicações geotécnicas e alinhada aos princípios da sustentabilidade nos âmbitos ambiental, econômico e social.

PALAVRAS-CHAVE: Reforço de solos. Fibras de açaí. Solo tropical laterítico. Durabilidade. Sílica coloidal. Comportamento geomecânico.

ABSTRACT

SILVA, A. B. **Evaluation of the geomechanical behavior of a tropical clayey soil reinforced with natural açaí (Euterpe oleracea) fibers**. Brasília, 2026. PhD Thesis – Graduate Program in Geotechnics, University of Brasília.

Soil reinforcement with natural fibers emerges as a sustainable and high-performance alternative in contemporary geotechnical engineering. However, the organic degradation of these materials over time, particularly in tropical soil matrices subjected to severe weather cycles, constitutes a critical gap that restricts their application in permanent engineering works. Therefore, the geomechanical behavior, microstructure, and durability of a clayey tropical soil reinforced with açaí pit fibers (*Euterpe oleracea*) were investigated under two conditions: surface-treated with a colloidal silica solution and untreated. The experimental program involved evaluating the degradability of composites with a 1% fiber content exposed to the weather conditions of Brasília-DF over 24 months. The multiscale assessment encompassed physical, chemical, geomechanical, and microstructural characterizations. Tests including compaction, one-dimensional consolidation, consolidated drained (CD) triaxial compression, direct simple shear (DSS), and plate load tests on a small-scale physical model were conducted to evaluate load-settlement behavior. The intrinsic stiffness of the açaí fiber (Young's Modulus of 3.73 GPa and 45% lignin content) optimized the bridging effect, absorbing tensile stresses along shear planes and intercepting microcracks. The inclusion of fibers increased the hydraulic conductivity to the order of 10^{-5} cm/s and doubled the composite's toughness, inducing ductile behavior, while also promoting a 93% increase in the effective cohesion intercept. In the small-scale physical model, the composite achieved a Bearing Capacity Ratio (BCR) of 3.49, reducing the central settlement by 87.8% under the collapse stress of the unreinforced soil. Long-term evaluation revealed that the alkalization of the environment (pH ≈ 7.5) triggered the hydrolysis of the natural fibers, leading to cellular structural breakdown and loss of elastic stiffness. However, mechanical anchorage ensured the full preservation of the original peak shear strength after two years of exposure. Conversely, colloidal silica treatment demonstrated effectiveness in waterproofing the fibers by forming an inorganic film that acted as a stable chemical barrier (Si–O–Si bonds), preventing mineral leaching and internal structural collapse. As a result, the treated composite preserved the integrity of the macropore network, exhibiting shear strength parameters superior to those of the unreinforced soil. It is concluded that the açaí fiber-soil composite, especially when subjected to the colloidal silica surface treatment, constitutes an effective soil reinforcement technology that is viable for geotechnical applications and aligned with environmental, economic, and social sustainability principles.

Keywords: Soil reinforcement. Açaí fibers. Lateritic tropical soil. Durability. Colloidal silica. Geomechanical behavior.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 OBJETIVOS 2
1.2 ESTRUTURA DA TESE 3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
2.1 SOLOS TROPICAIS 4
2.2 SOLOS REFORÇADOS 7
2.3 MATERIAIS FIBROSOS PARA REFORÇO DE SOLOS 9
2.4 FIBRAS NATURAIS 12
2.4.1 FIBRAS DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea*) 18
2.5 COMPORTAMENTO DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS 21
2.6 DEGRADAÇÃO DE FIBRAS NATURAIS E TRATAMENTOS SUPERFICIAIS 27
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL 31
3.1 MATERIAIS 31
3.1.1 SOLO 31
3.1.2 FIBRA NATURAL DE AÇAÍ 32
3.1.3 SÍLICA COLOIDAL 33
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO 34
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO 34
3.2.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO 34
3.2.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO SOLO 35
3.2.4 TRATAMENTO SUPERFICIAL DAS FIBRAS 35
3.2.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DAS FIBRAS 37
3.2.6 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DAS FIBRAS 38
3.2.7 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DAS FIBRAS 40
3.2.8 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS FIBRAS 40
3.3 ENSAIOS DE COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO E DE DURABILIDADE 41
3.3.1 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO 41
3.3.2 PREPARAÇÃO E MOLDAGEM DAS AMOSTRAS 41
3.3.3 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (PIM) 43
3.3.4 ACONDICIONAMENTO E EXPOSIÇÃO DOS COMPÓSITOS 43
3.3.5 ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL 45
3.3.6 TRIAXIAL MONOTÔNICO 45
3.3.7 CISALHAMENTO SIMPLES DIRETO (DIRECT SIMPLE SHEAR - DSS) 48
3.3.8 AVALIAÇÃO MULTIESCALA DA DURABILIDADE 49
3.4 PROVA DE CARGA EM MODELO FÍSICO REDUZIDO 50
4 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E DAS FIBRAS 55
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO 55
4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO 57
4.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO SOLO 58
4.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DAS FIBRAS 59
4.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DAS FIBRAS 61
4.6 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DAS FIBRAS 65
4.7 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL 67
5 COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO 71
5.1 COMPACTAÇÃO 71
5.2 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (PIM) 73
5.3 ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL 74
5.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA 77
5.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO 79

6 DURABILIDADE E EVOLUÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO SOB DEGRADAÇÃO 90

7 COMPORTAMENTO CARGA-RECALQUE EM MODELO REDUZIDO 116

7.1 ORIENTAÇÕES PARA APLICAÇÃO PRÁTICA 125

8 CONCLUSÕES 128

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 129

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Propriedades físicas e mecânicas comparativas entre fibras naturais e sintéticas 14
Tabela 2.2- Teores dos componentes estruturais de fibras vegetais (Adaptado de Santana (2024)) 16
Tabela 2.3- Propriedades físicas das fibras de açaí 19
Tabela 2.4- Teores de lignina, celulose e hemicelulose em fibras de açaí 19
Tabela 2.5- Investigações sobre o comportamento geomecânico de solos reforçados com fibras naturais 26
Tabela 2.6- Estudos experimentais e principais achados sobre a degradação estrutural e tratamentos de superfície em fibras naturais 29
Tabela 4.1- Porcentagem de frações granulométricas do solo 56
Tabela 4.2- Limites de Atterberg e índice de plasticidade do solo 56
Tabela 4.3- Composição química presente no solo pelo ensaio de FRX 57
Tabela 4.4- Resultados da composição estrutural e teor de cinzas de fibras de açaí 61
Tabela 4.5- Resultado das medições de pH das fibras de açaí 62
Tabela 4.6- Constituintes elementares das fibras, resultantes do FRX 64
Tabela 4.7 - Parâmetros dimensionais das fibras de açaí 70
Tabela 5.1- Parâmetros de compactação do solo puro e do compósito solo-fibra 72
Tabela 5.2- Parâmetros de compressibilidade do solo e compósito sem exposição às condições climáticas 75
Tabela 5.3- Coeficientes de permeabilidade do solo e compósito sem exposição às condições climáticas 77
Tabela 5.4- Parâmetros de resistência ao cisalhamento em ensaios triaxiais: presente estudo versus literatura 87
Tabela 6.1- Evolução do pH ao longo de 24 meses de exposição às condições climáticas 91
Tabela 6.2- Evolução da composição elementar superficial das fibras após exposição às condições climáticas 100
Tabela 6.3- Evolução do coeficiente de permeabilidade dos compósitos ao longo do tempo de exposição ao clima 102
Tabela 6.4- Evolução dos parâmetros globais de resistência (c' e ϕ) ao longo da exposição ao clima 110
Tabela 7.1- Evolução do recalque central e percentual de redução de recalque pela inclusão das fibras 117
Tabela 7.2- Tenacidade estática e fator de melhoria de tenacidade do solo puro e do compósito 120

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Estrutura da parede celular de fibras vegetais: destaque para as camadas da parede primária e secundária, orientação das microfibrilas e sua composição lignocelulósica (adaptado de Kabir et al., 2012). 15
Figura 2.2- Caroços e fibras de açaí. 18
Figura 2.3- Representação esquemática do mecanismo micromecânico de reforço: estágio inicial da mistura e estágio de deformação sob carregamento (Adaptado de Gowthaman et al., 2018). 22
Figura 3.1- Solo utilizado como matriz do compósito. 31
Figura 3.2- Fibras de açaí utilizadas como elemento de reforço. 32
Figura 3.3- Maquinário utilizado no processamento do caroço de açaí para separação das fibras do mesocarpo fibroso por secagem e ação mecânica. (Fonte: Imagem fornecida pela empresa Popinhak Açaí, 2023). 33
Figura 3.4- Fibras de açaí impermeabilizadas observadas por MEV na proporção de: a) 1:1; b) 1:2. 36
Figura 3.5- Etapas sequenciais do ensaio de absorção de água. 38
Figura 3.6- Compósito solo-fibra de açaí. 41
Figura 3.7- Envoltórias de resistência obtidas a partir de cisalhamento direto. (Fonte: Silva et al., 2024). 41
Figura 3.8- Ilustração de compósitos compactados, da forma e local de exposição. 44
Figura 3.9- Gráfico de temperatura, precipitação e umidade registradas em Brasília para os anos de 2024 e 2025. 44
Figura 3.10- Equipamento de adensamento (Geocomp): a) visão geral; b) câmara de adensamento. 45
Figura 3.11- Equipamento triaxial (Fulltest): a) prensa e câmara triaxial; b) pressurizadores. 46
Figura 3.12- Ensaio de DSS (Geocomp): a) amostra em processo de montagem; b) amostra sob ensaio. 48
Figura 3.13- Pórtico com sistema automatizado de aplicação de carga em placa (Owntec). .. 51
Figura 3.14- Execução da compactação dos modelos: a) martelete vibratório elétrico aplicado à última camada; b) controle de nivelamento do topo da camada com nível a laser. 52
Figura 3.15- Montagem do ensaio de placa: a) visão geral dos espaçadores metálicos sobre a placa; b) detalhe do arranjo dos transdutores externos posicionados radialmente. 53
Figura 4.1- Curvas granulométricas do solo investigado (com e sem defloculante). 55
Figura 4.2- Mineralogia do solo investigado por DRX. 58
Figura 4.3- Gráfico de absorção de água pelo tempo decorrido. 59
Figura 4.4- Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier nas fibras de açaí. 63
Figura 4.5- Gráficos de termogravimetria (TGA/DTG) em fibras de açaí. 65
Figura 4.6- Gráfico de intensidade vs. 2θ para cálculo da cristalinidade das fibras. 67
Figura 4.7- Morfologia das fibras de açaí: a) superfície rugosa povoada por microgrânulos de SiO_2; b) morfologia alongada. 68
Figura 4.8- Formas transversais recorrentes: a) aproximadamente elíptica; b) distintamente achatada. 68
Figura 4.9- Seção transversal da fibra de açaí: a) visão geral; b) lúmens em close-up. 69
Figura 5.1- Curvas de compactação do solo puro e do compósito solo-fibra. 71
Figura 5.2- Curvas de distribuição do tamanho dos poros (PIM) (tempo zero). 73
Figura 5.3- Índice de vazios (e/e_0) x pressão aplicada (tempo zero). 75

Figura 5.4- Curvas de tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial. 79
Figura 5.5- Modos de ruptura pós-ensaio: (a) plano de cisalhamento diagonal; (b) deformação por abaulamento. 80
Figura 5.6- Curvas de tensão desviadora x deformação axial: a) confinante de 50 kPa; b) confinante de 100 kPa. 82
Figura 5.7- Evolução do módulo de cisalhamento secante (G) para solo e compósito..... 84
Figura 5.8- Trajetórias de tensões efetivas: a) solo puro; b) compósito solo-fibra. 85
Figura 5.9- Envoltórias globais de resistência para o solo puro e para o compósito sem exposição. 85
Figura 5.10- Energias de deformação absorvidas no tempo zero. 88
Figura 6.1- Aspecto macroscópico das fibras: a) tempo zero; b) 24 meses (naturais); c) 24 meses (tratadas). 90
Figura 6.2- Seção transversal e aspecto dos compósitos após 24 meses: a) natural; b) tratado com sílica coloidal. 90
Figura 6.3- MEV em fibra de açaí após 12 meses de exposição: a) natural; b) tratada. 93
Figura 6.4- MEV em fibra natural após 24 meses de exposição: a) visão geral de superfície incrustada por argilominerais e com pontos de fratura; b) close-up. 93
Figura 6.5- Evidências de degradação estrutural, pontos de fratura e lúmens ocos: a) visão geral; b) close-up. 94
Figura 6.6- MEV da seção transversal (fibra natural) após 24 meses de exposição: a) visão geral - cavidade central (aspecto oco) e lúmens circundantes; b) close-up na cavidade degradada. 94
Figura 6.7- MEV em fibra tratada após 24 meses de exposição: a) visão geral de superfície limpa, ausência de fraturas e lúmens preservados; b) close-up. 95
Figura 6.8- MEV da seção transversal (fibra tratada) após 24 meses de exposição: a) e b) fibras apresentando preservação total da matriz interna, com ausência de cavidades ou esvaziamento. 96
Figura 6.9- Adesão e intertravamento mecânico entre fibras e argila: a) fibra natural (12 meses); b) fibra tratada (12 meses); c) fibra natural (24 meses); d) fibra tratada (24 meses).. 96
Figura 6.10- Curvas de distribuição do tamanho dos poros após 24 meses de envelhecimento. 97
Figura 6.11- FTIR comparativo - estado inicial e 24 meses de envelhecimento (fibras naturais). 99
Figura 6.12- FTIR comparativo - estado inicial e 24 meses de envelhecimento (fibras tratadas). 99
Figura 6.13- Evolução temporal das curvas de tensão desviadora x deformação axial: a) 3 meses; b) 6 meses. 104
Figura 6.14- Evolução temporal das curvas de tensão desviadora x deformação axial: a) 9 meses; b) 12 meses. 104
Figura 6.15- Evolução temporal das curvas de tensão desviadora x deformação axial: a) 15 meses; b) 18 meses. 105
Figura 6.16- Evolução temporal das curvas de tensão desviadora x deformação axial: a) 21 meses; b) 24 meses. 105
Figura 6.17- Evolução temporal das curvas de deformação volumétrica x deformação axial: a) 3 meses; b) 6 meses. 107
Figura 6.18- Evolução temporal das curvas de deformação volumétrica x deformação axial: a) 9 meses; b) 12 meses. 107
Figura 6.19- Evolução temporal das curvas de deformação volumétrica x deformação axial: a) 15 meses; b) 18 meses. 108

Figura 6.20- Evolução temporal das curvas de deformação volumétrica x deformação axial: a) 21 meses; b) 24 meses. 108
Figura 6.21- Evolução c' e ϕ ao longo do tempo. 110
Figura 6.22- Envoltórias globais de resistência ao cisalhamento para compósitos expostos ao clima. 111
Figura 6.23- Evolução do módulo secante (1% de deformação axial) dos compósitos ao longo da exposição às condições climáticas. 112
Figura 6.24- Energia de deformação absorvida entre o solo puro e os compósitos ao longo da exposição às condições climáticas. 114
Figura 7.1- Curvas de tensão-recalque central para o solo e para o compósito. 116
Figura 7.2- Evolução do BCR em função do recalque da placa central. 118
Figura 7.3- Evolução do módulo de deformabilidade inicial (E_s). 119
Figura 7.4- Razão de deslocamento normalizada em função da tensão aplicada: a) solo puro; b) compósito. 121
Figura 7.5- Distribuição transversal dos recalques radiais (s_d) para o solo puro. 122
Figura 7.6- Distribuição transversal dos recalques radiais (s_d) para compósito. 123
Figura 7.7- Padrão de fissuração radial desenvolvido na superfície: a) solo puro; b) compósito. 124

LISTA DE SÍMBOLOS

A –Absorção de água (%)

av – Coeficiente de compressibilidade

B – Parâmetro B de Skempton (ensaio triaxial)

Cc –Índice de compressão

Cd – Coeficiente de descompressão

Cr – Coeficiente de recompressão

c' – Intercepto coesivo efetivo (coesão aparente) / Coeficiente de classificação (MCT)

Δc' – Variação do intercepto coesivo

D – Diâmetro da partícula / Módulo oedométrico / Diâmetro da placa (ensaio de carga)

d' – Coeficiente angular da reta (Metodologia MCT)

D_f – Diâmetro médio da fibra

Es – Módulo de Deformabilidade inicial

$E_{sec1\%}$ – Módulo secante a 1% de deformação axial

e_0 – Índice de vazios inicial

$e_{ót}$ – Índice de vazios ótimo

G – Módulo de cisalhamento secante

Gs – Densidade relativa dos sólidos

Ia – Intensidade correspondente ao halo amorfo (Ensaio DRX)

Ic – Intensidade máxima do pico cristalino (Ensaio DRX)

IC – Índice de Cristalinidade (%)

I_d – Razão de Deslocamento Normalizada (s_d/s_0)

$k_{20°C}$ – Coeficiente de permeabilidade a 20 ºC

L – Altura do corpo de prova

L_f – Comprimento médio da fibra

mv – Coeficiente de variação volumétrica

Pi – Perda de massa por imersão

Ps – Peso seco da amostra

Pw – Peso úmido da amostra

p', q – Invariantes de tensão efetiva (Trajetórias de tensões)

$q_{últ}$ – Capacidade de carga última

S_r – Grau de saturação

$S_{r,ót}$ – Grau de saturação ótimo

s_0 – Recalque central sob a placa

s_d – Recalque radial (deslocamento superficial)

t_{90} – Tempo correspondente a 90% do adensamento primário

v – Velocidade de cisalhamento

Letras Gregas:

γ_s – Peso específico dos sólidos

ΔpH – Variação do pH (diferença entre o pH em KCl e o pH em H_2O)

Δu – Variação da poropressão

$\Delta\sigma_3$ – Variação da pressão confinante

$\Delta\phi$ – Variação do ângulo de atrito interno efetivo

ε_a – Deformação axial

ε_{vol} – Deformação volumétrica

2θ – Ângulo de difração (Ensaio DRX)

κ – Rigidez inicial da curva tensão-recalque

ν – Coeficiente de Poisson

ρ_s – Massa específica aparente seca

$\rho_{s,máx}$ – Massa específica seca máxima

ρ – Massa específica dos grãos do solo

σ'_p – Tensão de pré-adensamento

σ_d – Tensão desviadora

φ' – Ângulo de atrito interno efetivo

$\omega_{ót}$ – Teor de umidade ótimo

LISTA DE ELEMENTOS, COMPOSTOS E LIGAÇÕES QUÍMICAS

-OH – Grupo hidroxila livre

Al – Alumínio

$Al(OH)_3$ – Hidróxido de alumínio (Gibbsita)

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio / Alumina

$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ – Caulinita

Ba – Bário

C–H – Ligação carbono-hidrogênio

C–O–C – Vibração celulósica

C=C – Ligação dupla carbono-carbono

C=O – Ligação dupla carbono-oxigênio

Ca – Cálcio

CaO – Óxido de Cálcio

COOH – Grupo carboxila

Cr – Cromo

CuKα – Radiação de Cobre K-alfa

Fe – Ferro

Fe_2O_3 – Óxido de Ferro III / Hematita

H_2SO_4 – Ácido Sulfúrico

K – Potássio

K_2O – Óxido de Potássio

KCl – Cloreto de Potássio

Mg – Magnésio

MgO – Óxido de Magnésio

Mn – Manganês

MnO – Óxido de Manganês

Na_2O – Óxido de Sódio

O–H – Ligação oxigênio-hidrogênio

OH^- – Íon hidroxila

P – Fósforo

P_2O_5 – Pentóxido de Fósforo

Ru – Rutênio

S – Enxofre

S1, S2, S3 – Subcamadas concêntricas estruturais da parede celular secundária das fibras

Si – Silício

Si–O–Si – Ligação siloxano

SiO_2 – Dióxido de Silício (Sílica / Quartzo)

Ti – Titânio

TiO_2 – Dióxido de Titânio / Anatásio

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

ATR – Reflectância Total Atenuada (*Attenuated Total Reflectance*)

Aw – Clima de Savana Tropical (Classificação climática de Köppen-Geiger)

BCR – Fator de Melhoria da Capacidade de Carga (*Bearing Capacity Ratio*)

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CD – Adensado Drenado / Consolidado Drenado (*Consolidated Drained*)

CL – *Clay Low* (Argila de baixa plasticidade)

CN – Compósito Natural (sufixo de nomenclatura para amostras com fibra *in natura*)

CN0M / CN6M / CN12M / CN24M – Compósito Natural após 0, 6, 12 e 24 meses de exposição

CT – Compósito Tratado (sufixo de nomenclatura para amostras com fibra tratada)

CT0M / CT6M / CT12M / CT24M – Compósito Tratado após 0, 6, 12 e 24 meses de exposição

CU – Adensado Não Drenado (*Consolidated Undrained*)

DF – Distrito Federal

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DRX – Difratometria de Raios-X

DSS – Cisalhamento Simples Direto (*Direct Simple Shear*)

DTG – Derivada Termogravimétrica (ou Termogravimetria Derivada)

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*)

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPS – Poliestireno Expandido (*Expanded Polystyrene*)

FN – Fibra Natural (sufixo de nomenclatura para amostras sem tratamento superficial)

FT – Fibra Tratada (sufixo de nomenclatura para amostras sem tratamento superficial)

FRX – Fluorescência de Raios-X

FTIR – Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFSC-USP – Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo

IG/UnB – Instituto de Geociências da Universidade de Brasília

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IP – Índice de Plasticidade

LG' – Solo laterítico argiloso (Classificação da Metodologia MCT)

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

LVDT – Transdutor Diferencial Variável Linear (*Linear Variable Differential Transformer*)

MCT – Miniatura, Compactado e Tropical (Metodologia de classificação de solos)

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

Mini-MCV – Ensaio Miniatura de Compactação (*Moisture Condition Value*)

PIM – Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (*Mercury Intrusion Porosimetry*)

ML – Silte de baixa plasticidade (Classificação do SUCS)

NBR – Norma Brasileira

P.F. – Perda ao Fogo

PCZ – Ponto de Carga Zero

PET – Polietileno Tereftalato

pH – Potencial Hidrogeniônico

PPGG-UnB – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília

SP – Solo Puro (sufixo de nomenclatura para amostras de solo não reforçado)

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

TGA – Análise Termogravimétrica (*Thermogravimetric Analysis*)

UCS – Resistência à Compressão Simples (*Unconfined Compressive Strength*)

UnB – Universidade de Brasília

UU – Não Adensado e Não Drenado (*Unconsolidated Undrained*)

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1 - Cálculo do índice de cristalinidade pelo método de Segal.....40
Equação 3.2 - Cálculo do parâmetro B de Skempton.....46
Equação 3.3 - Cálculo da velocidade de cisalhamento pela ASTM D7181 (2020).....47
Equação 3.4 - Módulo de deformabilidade - solução de Boussinesq para placa rígida.....53

1 INTRODUÇÃO

A engenharia geotécnica frquentemente lida com solos que apresentam propriedades mecânicas deficitárias, como baixa resistência à tração e ruptura essencialmente frágil. Para contornar tais deficiências, o reforço com fibras consolidou-se como técnica de elevada eficácia. Diferentemente da estabilização química, a adição de fibras atua mecanicamente: os filamentos cruzam as superfícies de cisalhamento potenciais, gerando intertravamento que redistribui tensões e confere ductilidade ao maciço, sendo geralmente aplicado em taludes, muros de contenção, aterros e fundações rasas (Hejazi *et al*., 2012; Zhao *et al.*, 2021).

Embora fibras sintéticas industriais, como polipropileno e poliéster, ainda predominem historicamente devido ao rigoroso controle de qualidade e inércia biológica, que garantem previsibilidade a longo prazo (Abdeldjouad et al., 2019; Correia et al., 2021; Shen et al., 2021), sua produção contínua impõe elevado consumo energético e expressiva pegada de carbono, configurando severos passivos ecológicos (Abood & Shakir, 2023).

Nesse cenário, impulsionada pela urgência por infraestruturas alinhadas à economia circular, a engenharia vivencia a gradativa transição para fibras naturais, ecologicamente mais viáveis (Adegoke et al., 2025; Mozumder et al., 2025). Apesar de se apresentarem como soluções abundantes e de baixo custo, elas possuem uma natureza inerentemente hidrofílica e biodegradável. Consequentemente, esse fator impõe desafios significativos à sua aplicação devido às variações sazonais de umidade, podendo comprometer a durabilidade do compósito.

Esse cenário é particularmente complexo em regiões de clima tropical, como o Brasil. Os solos tropicais lateríticos, predominantes no território nacional, caracterizam-se por uma elevada porosidade aberta e comportamento geomecânico fortemente governado por ciclos de chuva e estiagem (Castro, 2020). A interação entre a degradação orgânica das fibras e essa matriz terrosa susceptível à lixiviação e à grande variação de umidade ainda constitui uma lacuna crítica no estado da arte.

Nesse contexto exploratório, o Brasil, com sua vasta biodiversidade, desponta como um celeiro promissor de novos materiais geotécnicos. Destacam-se, em especial, as fibras extraídas do caroço do açaí (*Euterpe oleracea*): por se tratar de um fruto de elevada importância socioeconômica e com indicativos de crescimento contínuo de produção, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2026), o seu processamento agroindustrial culmina na geração de um volume massivo de resíduos.

Geomecanicamente, contudo, esse resíduo subutilizado possui predicados potenciais: diferentemente de outras biomassas comuns, as fibras de açaí apresentam uma parede celular

caracteristicamente espessa e uma carga orgânica expressivamente rica em lignina. Essa composição bioquímica confere ao filamento uma elevada resistência à tração e uma blindagem natural que retarda a degradação biológica, tornando-o um candidato altamente competitivo para a formulação de compósitos de engenharia sustentáveis.

Ainda que estudos incipientes tenham demonstrado o enorme potencial do açaí para o ganho imediato de resistência em solos locais (Lopes & Casagrande, 2022; Silva *et al*, 2024; Santos *et al.*, 2026), há uma evidente escassez de investigações robustas que atestem o comportamento do compósito a longo prazo. Faltam respostas definitivas sobre o impacto de diferentes confinamentos, sobre a evolução da permeabilidade, sobre as alterações microestruturais durante o envelhecimento natural do material e, sobretudo, sobre a eficácia de tratamentos impermeabilizantes inorgânicos na mitigação da degradação orgânica em obras definitivas.

Para transpor essas limitações científicas e operacionais, este estudo propõe investigar de forma ampla o comportamento geomecânico e microestrutural de um solo tropical laterítico reforçado com fibras de açaí, tanto *in natura* quanto tratadas superficialmente com sílica coloidal, submetidas a um período de exposição às condições climáticas de 24 meses.

O ineditismo desta tese fundamenta-se na escassez de investigações geotécnicas que submetam geocompósitos naturais à exposição ambiental prolongada (24 meses) aliada a uma bateria de ensaios extensa, capaz de correlacionar desde o nível químico e microestrutural ao comportamento geomecânico, contando com a validação da capacidade de carga em modelo físico reduzido (prova de carga em placa). Adicionalmente, a inovação tecnológica desta pesquisa reside na formulação de um tratamento de superfície à base de sílica coloidal, que blinda quimicamente a biomassa das fibras contra a hidrólise, sem prejuízo nos parâmetros mecânicos e sem descaracterizar a sustentabilidade ambiental do material.

Ao aliar ensaios avançados de resistência ao cisalhamento, compressibilidade, capacidade de carga em modelo físico reduzido e condutividade hidráulica a análises químicas e microscópicas, esta pesquisa busca não apenas compreender os mecanismos de reforço e sua evolução ao longo do envelhecimento ambiental, mas também fornecer diretrizes práticas para a aplicação segura e eficiente dos compósitos em obras geotécnicas. Dessa forma, o intuito final é transformar um expressivo passivo ambiental amazônico em uma tecnologia geotécnica de alto desempenho, segura e ecologicamente sustentável.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa consiste em avaliar o comportamento geomecânico de um solo tropical laterítico reforçado com a adição de fibras do caroço de açaí (*Euterpe*

oleracea), a fim de viabilizar a sua aplicação segura e sustentável em obras de engenharia geotécnica.

Para atingir este fim, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

a) Caracterizar física, química, térmica e microestruturalmente as fibras de açaí em seu estado natural e tratadas superficialmente com sílica coloidal;
b) Investigar a influência da adição de fibras de açaí (naturais e tratadas) nos parâmetros de resistência ao cisalhamento (triaxial drenado e cisalhamento simples direto), na compressibilidade (adensamento unidimensional) e na condutividade hidráulica (permeabilidade) do solo laterítico;
c) Analisar, em modelo físico reduzido, o comportamento carga-recalque do solo reforçado, por meio de provas de carga em placa, estabelecendo a relação com a resposta do solo não reforçado.;
d) Avaliar o avanço da degradação das fibras de açaí ao longo de 24 meses de exposição às condições climáticas, a partir de ensaios de pH, FTIR, FRX, MEV e porosimetria;
e) Monitorar a evolução do comportamento geomecânico do compósito solo-fibra em função da exposição climática, estabelecendo-se o contraste de desempenho entre as fibras tratadas e não tratadas.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

A tese está organizada em oito capítulos, correspondendo o primeiro à contextualização do problema de pesquisa e delimitação dos objetivos, seguido pelo Capítulo 2, que consolida o estado da arte sobre solos tropicais, reforço geomecânico e durabilidade de fibras naturais. A etapa de elucidação do programa experimental é apresentada no Capítulo 3, enquanto os resultados de caracterização, tanto do solo quanto das fibras, são discutidos no Capítulo 4. O Capítulo 5 concentra-se na avaliação geomecânica do solo e do compósito em seu estado inicial de referência (tempo zero) enquanto o Capítulo 6 abrange a evolução da durabilidade e do comportamento geomecânico do compósito ao longo de 24 meses de exposição climática. No Capítulo 7 é avaliado o comportamento carga-recalque obtido a partir do ensaio de prova de carga em placa em modelo reduzido, enquanto as conclusões e sugestões para pesquisas futuras são apresentadas no Capítulo 8.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLOS TROPICAIS

Os solos tropicais correspondem a maciços formados sob condições de intemperismo intenso, típicos de ambientes quentes e comumente úmidos, cujos cenários, com ação combinada e contínua do clima, da drenagem e do tempo de exposição sobre a rocha de origem, produz perfis profundamente alterados. Consequentemente, exibem propriedades geotécnicas singulares, substancialmente distintas daquelas usuais aos solos de regiões temperadas.

A literatura adverte que a interpretação mecânica desses solos não deve ser conduzida exclusivamente por critérios de granulometria ou limites de consistência de Atterberg, sendo fundamental a compreensão de sua gênese, mineralogia e posição topográfica no perfil de intemperismo. Essa premissa estrutural alicerça os trabalhos clássicos de Sowers (1963), Gidigasu (1971, 1972), Townsend (1985) e Vargas (1985), consolidando-se contemporaneamente nos manuais definitivos sobre solos residuais tropicais (Fookes, 1997; Duarte & Rodrigues, 2018; Wesley, 2010).

Sob a ótica geotécnica, a peculiaridade dos solos tropicais é a sua natureza frequentemente residual, implicando que a matriz terrosa permaneceu no exato local de alteração de sua rocha de origem. Em função disso, esses materiais preservam traços estruturais herdados, anisotropias e heterogeneidades intrínsecas oriundas do intemperismo. Vaughan (1988) e Vaughan *et al.* (1988) atestaram que o desempenho em engenharia desses estratos depende desse estado estrutural e do grau de ligação intergranular, impossibilitando a adoção irrestrita de correlações empíricas originalmente desenvolvidas para argilas sedimentares clássicas. Townsend (1985) e Wesley (2010) corroboram essa tese, enfatizando que distúrbios na microestrutura natural, provenientes de amostragem inadequada ou remoldagem, podem mascarar medições fidedignas de compressibilidade, resistência e permeabilidade conduzidas em laboratório.

Nesse universo de solos residuais tropicais, a literatura distingue dois grandes grupos com comportamentos distintos: os solos saprolíticos e os solos lateríticos. Os primeiros correspondem ao estágio inicial de intemperismo, nos quais a rocha-mãe encontra-se fisicamente desagregada, mas quimicamente pouco alterada, preservando a textura, a estrutura e a mineralogia originais. Em termos de engenharia, esses materiais são tipicamente granulares, com elevada porosidade e suscetibilidade à erosão, apresentando comportamento mecânico fortemente influenciado pelas descontinuidades herdadas da rocha (Wesley, 2010; Duarte & Rodrigues, 2018). Já os solos lateríticos, objeto deste estudo, representam o estágio mais avançado de lixiviação e intemperismo. Nesse processo contínuo de laterização, a sílica é

intensamente removida, ocorrendo a concentração residual de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (sesquióxidos).

Do ponto de vista químico-mineralógico, essa dinâmica preserva minerais estáveis, como o quartzo, na fração arenosa, enquanto enriquece a fração fina com argilominerais do grupo da caulinita e precipitados metálicos. Esses óxidos atuam como agentes cimentantes naturais, fomentando o desenvolvimento de agregações granulares. Isso se reflete em uma microestrutura porosa, massiva e altamente aglomerada, que oblitera os limites individuais das partículas, diferentemente dos solos não lateríticos, onde os contornos lamelares das argilas são nítidos (Takeda, 2006). Devido a essas características estruturais únicas, as respostas à compactação, à saturação e ao carregamento desses dois grandes grupos de solos são tão distintas que a literatura recomenda tratamentos normativos e metodologias de ensaio específicos para cada um (Nogami & Villibor, 1981; Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

Como consequência direta desse encapsulamento promovido pelos óxidos hidratados, ocorre a formação de grumos ou torrões resistentes. Delgado (2007) adverte que essa agregação estrutural impõe um desafio aos ensaios tradicionais de caracterização. Por um lado, ensaios sem a devida dispersão podem mascarar a verdadeira textura mineralógica do solo, indicando falsamente proporções elevadas de frações granulares (areia e silte) que, na realidade, consistem em partículas de argila fortemente floculadas e cimentadas. Por outro lado, a utilização de dispersores mecânicos e defloculantes químicos, essenciais para revelar a fração real de argila, acaba por destruir essas agregações naturais. Esse procedimento desestrutura os grumos e mascara a macroestrutura original do solo laterítico, afastando o resultado de laboratório do seu real comportamento geomecânico e hidráulico em campo.

Por constituírem o horizonte mais superficial e espesso do perfil estratigráfico, esses solos altamente evoluídos são explorados em larga escala em obras de terra e, sobretudo, em projetos de pavimentação rodoviária que demandam volumes massivos de jazida. Impulsionados pela insuficiência dos sistemas de classificação mundiais tradicionais em identificar as particularidades dos solos tropicais, Nogami & Villibor (1981) introduziram a metodologia MCT (Miniatura, Compactado e Tropical), concebida especificamente para distinguir o comportamento mecânico e a contração entre solos de matriz laterítica e não laterítica.

Autores contemporâneos, como Camapum de Carvalho *et al.* (2015) e Camapum de Carvalho & Gitirana (2021), aprofundaram essa tese, reiterando que a matriz tropical brasileira apresenta complexidades mineralógicas que demandam ensaios específicos e um tratamento fenomenológico diferenciado em projetos geotécnicos.

Concomitantemente à laterização, o comportamento geomecânico desses solos não pode ser dissociado de seu estado estrutural não saturado (parcialmente úmido). Invariavelmente, a sucção mátrica, as flutuações sazonais de saturação e a forte interação entre macroporos e microporos ditam os parâmetros de rigidez, deformação e condutividade hídrica do maciço in situ. Estudos em argilas lateríticas comprovam que perturbações tencionais ou processos de compactação desestabilizam essa coexistência entre os poros que formam o agregado (intra) e o espaço entre eles (inter), resultando em curvas deformacionais sensíveis à trajetória hídrica de carregamento (Otálvaro *et al.*, 2015, 2016; Freitas *et al.*, 2020; Owusu *et al.*, 2024).

É a partir desse arcabouço conceitual que o solo da capital federal brasileira se insere como uma expressão pura de uma matriz tropical laterítica. Nos estudos clássicos e experimentais de Otálvaro Calle (2013), esse material foi taxado como um solo intensamente intemperizado, dotado de agregação granular em 65% de sua massa, com acentuada rede de poros bimodais que dita o seu comportamento mecânico. Massocco (2023) comprovou que a preservação ou destruição dessa microestrutura cimentada rege as tendências de dilatância e resistência ao cisalhamento da laterita metaestável.

Por conseguinte, o solo típico de Brasília, selecionado como matriz para os ensaios desta tese, não reflete um material atípico ou irregular, mas sim o retrato dos desafios inerentes aos solos tropicais compactados: lixiviação intensa, suscetibilidade a variações de umidade, estrutura macroporosa aberta e resposta cisalhante dominada por ligações cimentantes intrínsecas e agregações argilominerais.

Nesse panorama, estudos recentes têm aprofundado o entendimento sobre esses solos tropicais lateríticos especificamente no contexto de reforço com fibras. A estrutura intemperizada das lateritas, caracterizada por minerais amorfos e forte desbalanço de cargas elétricas, cria condições físico-químicas favoráveis para a interação com o reforço, potencializando os ganhos de resistência e alterando a macroporosidade (Crippa *et al.*, 2025). Em vez de atuar somente pelo intertravamento físico, essa conjunção permite uma atração eletrostática entre a matriz do solo e os filamentos, o que tem se mostrado altamente eficaz no reforço geomecânico quando utilizadas, por exemplo, fibras de PET reciclado em matrizes ácidas.

Este comportamento particular dos solos lateríticos, aliado à necessidade de superar suas deficiências mecânicas, motiva a aplicação do conceito de solo reforçado, como detalhado a seguir.

2.2 SOLOS REFORÇADOS

A engenharia geotécnica frequentemente se depara com solos que apresentam propriedades mecânicas aquém das exigidas em projeto, e para contornar essas limitações estruturais, consolidou-se o conceito de compósitos solo-reforço. Conforme esclarece Budinski (1996), materiais compósitos resultam da combinação sinérgica de dois ou mais componentes: neste caso, uma fase matriz (solo) e um elemento de reforço (e.g., geossintéticos, fibras).

Nesse contexto, é preciso estabelecer a distinção conceitual apontada por Casagrande (2005) entre melhoramento e reforço de solos, fundamental para a classificação das técnicas de intervenção geotécnica. Enquanto o melhoramento refere-se a intervenções fundamentadas em reações químicas (como a adição de cimento, cal ou cinzas) que promovem alterações na própria composição da matriz, o reforço atua como um elemento físico adicional, complementar à matriz. Dessa forma, o reforço designa a inclusão estrita de elementos estruturais mecânicos aptos a suportar esforços e otimizar o comportamento da matriz terrosa (Li *et al.*, 2026; Wang *et al.*, 2024).

De forma sintetizada, a incorporação desses elementos atua suprimindo deficiências inerentes à matriz terrosa. Nas últimas décadas, esse conceito passou a ser aplicado em uma ampla variedade de obras geotécnicas, incluindo estruturas de contenção, reforço de subleitos, taludes e fundações superficiais. A principal vantagem desses sistemas reside na mobilização progressiva das tensões na interface matriz-reforço, transformando solos tipicamente inelásticos e frágeis sob tensões de corte em materiais com comportamento dúctil. Essa transição confere maior resistência à tração e ao cisalhamento, permitindo que o estrato suporte maiores deformações antes da ruptura por meio de uma eficiente redistribuição tridimensional de tensões (Adegoke *et al.*, 2025; Mozumder *et al.*, 2025; Sabri *et al.*, 2022). Estudos em modelos físicos reforçam que essa inclusão altera a própria cinemática de falha estrutural do sistema, convertendo mecanismos de colapso por puncionamento localizado e frágil em rupturas globalizadas e altamente tenazes, capazes de atuar como dissipadores de energia (Consoli *et al.*, 2009; Ferreira *et al.*, 2021).

Vale ressaltar que, sob o aspecto histórico, a concepção de reforçar matrizes terrosas não constitui uma prática isolada da modernidade. Diversas civilizações antigas já empregavam materiais naturais, como galhos, raízes e palhas, para conferir estabilidade às suas estruturas (Imbark *et al.*, 2025; Narayan *et al.*, 2025). Um marco clássico dessa engenhosidade empírica é a Grande Muralha da China, construída há mais de dois milênios com o emprego pioneiro de sistemas de solo reforçado com elementos vegetais (Sotomayor & Casagrande, 2018; Imbark *et al.*, 2025).

Contudo, a sistematização científica e a técnica moderna de reforço de solos consolidaram-se apenas na década de 1960, a partir dos trabalhos do engenheiro francês Henri Vidal. Em suas investigações, Vidal demonstrou que a inserção de inclusões (como fitas metálicas) na matriz gerava um atrito interfacial capaz de promover um aumento expressivo na resistência global ao cisalhamento do maciço (Imbark *et al.*, 2025). Essa descoberta culminou no desenvolvimento do sistema patenteado *Terre Armée* (terra armada), que revolucionou os paradigmas da engenharia geotécnica contemporânea (Senez, 2016).

Desde então, impulsionada pelo constante avanço das investigações em laboratório e *in situ* (Natário, 2017), a técnica evoluiu para englobar uma vasta diversidade de materiais e geometrias. Os elementos de reforço contemporâneos abrangem matrizes metálicas (e.g., aço, alumínio), poliméricas (e.g., geossintéticos, termoplásticos e fibras sintéticas) e orgânicas/naturais (e.g., fibras vegetais e madeira).

Quanto à disposição executiva, esses materiais podem ser conformados como elementos contínuos e orientados (e.g., tiras, geogrelhas, mantas) ou como inclusões discretas caracterizadas por uma dispersão randômica no maciço (e.g., micro-âncoras e fibras curtas) (Patil *et al.*, 2016; Mozumder *et al.*, 2025). Reforços planares contínuos, contudo, induzem potenciais planos horizontais de fraqueza e possuem eficiência estritamente condicionada ao seu posicionamento em profundidades críticas específicas. A dispersão aleatória, por outro lado, contorna essa limitação, garantindo uma armadura isotrópica ativa em toda a extensão do bulbo de tensões (Imbark *et al.*, 2025; Sotomayor & Casagrande, 2018).

Tendo isso em vista, quando fibras discretas são distribuídas aleatoriamente no interior da matriz, o comportamento mecânico resultante difere substancialmente dos sistemas convencionais. O ganho de resistência decorre da interação desenvolvida na interface solo-fibra, responsável pela transferência de esforços por atrito e aderência. Nesse sistema tridimensional, cada filamento atua como uma microancoragem individual, interceptando superfícies potenciais de ruptura em múltiplas direções. Essa arquitetura promove uma redistribuição mais homogênea das tensões internas e restringe a propagação de deformações localizadas (Tang *et al.*, 2007; Correia *et al.*, 2021), resultando em melhorias simultâneas na resistência ao cisalhamento e na capacidade de absorção de energia em comparação às matrizes não reforçadas.

Além do incremento estrutural na resistência ao cisalhamento, diversos estudos demonstram que a inclusão de fibras influencia fortemente os parâmetros mecânicos e deformacionais do solo. Dependendo do teor incorporado, do índice de vazios, da adição de agentes cimentantes e das características geométricas das inclusões, observam-se alterações relevantes na rigidez, na

ductilidade e na variação volumétrica do compósito. Isso evidencia que o desempenho do sistema não é governado apenas pela resistência de pico, mas pela capacidade de absorção de energia (tenacidade) e pela resposta deformacional global do material frente às solicitações impostas (Consoli *et al.*, 2010; Festugato *et al.*, 2017; Silveira, 2018).

A adoção dessa técnica em obras de engenharia proporciona benefícios técnicos, operacionais e econômicos quando confrontada com métodos convencionais de contenção ou fundação maciça. Segundo Palacios *et al.* (2015) e Adegoke *et al.* (2025), a excelência dessa relação custo-benefício tem impulsionado a aplicação de solos reforçados em projetos de variadas escalas e complexidades.

2.3 MATERIAIS FIBROSOS PARA REFORÇO DE SOLOS

Na engenharia geotécnica contemporânea, o reforço de solos por meio da inserção de fibras distribuídas de forma randômica viabiliza intervenções estruturais em diversos cenários, abrangendo desde a estabilização de encostas até a construção de fundações rasas. O crescente interesse por essa tecnologia em âmbito global deriva da vasta diversidade de inclusões disponíveis, viabilizando a transformação de resíduos em soluções de alto desempenho.

Pesquisas bibliométricas recentes, como a de Santos *et al.* (2022), evidenciam o crescimento expressivo de publicações sobre o tema, com a China, a Índia e o Irã liderando a produção científica. Neste mesmo contexto, Ang *et al.* (2026) mapearam a produção científica sobre biomateriais, indicando um crescimento exponencial no número de publicações na última década, consolidando o interesse definitivo da comunidade geotécnica por alternativas ecológicas em substituição aos polímeros sintéticos.

As fibras dividem-se, essencialmente, em inclusões de origem industrial (sintéticas e minerais) e biológica (naturais). O escopo industrial engloba também minerais como o basalto e tradicionais filamentos poliméricos, a exemplo do polipropileno, poliéster e vidro (Jamshaid *et al.*, 2023; Ozsoy *et al.*, 2026; Adegoke *et al.*, 2025). Em contraponto, as investigações voltadas às fibras vegetais exploram materiais lignocelulósicos como bambu, juta, coco e sisal (Silveira *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2026).

Corroborando esse cenário, a revisão sistemática conduzida por Santos *et al.* (2022) constatou que as fibras sintéticas de polipropileno ainda são, de forma absoluta, as mais estudadas e aplicadas na engenharia geotécnica. Conforme elucidam Carvalho *et al.* (2014), essa preferência histórica fundamenta-se em suas superiores propriedades físico-químicas e inércia biológica (Abood & Shakir, 2023). Todavia, o próprio levantamento de Santos *et al.* (2022) destaca que a fabricação contínua desses polímeros impõe severos passivos ecológicos:

a produção do polipropileno, por exemplo, emite cerca de 1,58 kg de equivalentes de CO_2 por quilograma produzido, gerando riscos de contaminação a longo prazo (Abood & Shakir, 2023; Mozumder *et al.*, 2025).

Diante da urgência na mitigação de impactos ambientais, consolida-se na literatura uma transição em prol de soluções sustentáveis, impulsionando os materiais provenientes de biomassa (Santiago, 2011; Liu *et al.*, 2015). Nesse contexto, as fibras naturais apresentam vantagens potenciais: baixa densidade, expressiva flexibilidade, baixo custo, capilaridade local e menor abrasividade aos equipamentos (Liu *et al.*, 2026; Pinheiro, 2008). Sob o viés da sustentabilidade, o uso de plantas fotossintéticas ainda viabiliza que projetos geotécnicos atinjam um balanço de carbono neutro ou até negativo (Adegoke *et al.*, 2025).

Aprofundando os motivos qualitativos dessa transição sustentável, o estudo de Ang *et al.* (2026) traça um paralelo direto entre o estágio de maturidade de diferentes biomateriais. O mapeamento demonstra que as pesquisas com fibras de coco já atingiram considerável prontidão tecnológica, concentrando-se em aplicações de campo em longo prazo (como estabilização de encostas e aterros), o que é justificado pelo seu alto teor de lignina que retarda a decomposição. Por outro lado, o uso de fibras como a juta, que possui uma rápida taxa de biodegradabilidade, avança primordialmente em investigações microestruturais e laboratoriais voltadas para obras de caráter temporário.

Além dos benefícios ambientais, a literatura demonstra que diversas fibras vegetais alcançam desempenhos geomecânicos comparáveis aos observados para as sintéticas tradicionalmente empregadas. Esses resultados reforçam que a escolha do material não deve se basear exclusivamente em parâmetros mecânicos isolados, mas englobar critérios de sustentabilidade, disponibilidade regional, custo de produção e a vida útil requerida para a obra.

A literatura documenta que a eficácia geotécnica dessas fibras biológicas não se restringe a solos finos coesivos (argilas e siltes). Em solos granulares desprovidos de coesão intrínseca, por exemplo, a alta rugosidade superficial das inclusões naturais maximiza o atrito de interface (*interlocking*), elevando expressivamente a resistência ao cisalhamento do compósito. Esse fenômeno foi corroborado pelas investigações de Silveira & Casagrande (2021) com o uso de fibras de sisal e curauá, que atestaram a notável capacidade desses materiais em atuar como elementos de ancoragem robustos mesmo em matrizes estritamente arenosas.

O referido estudo demonstrou que, embora o curauá apresente maior resistência à tração inicial, o sisal destaca-se por sua maior durabilidade frente ao intemperismo, mas ambas as fibras mantiveram os parâmetros de resistência superiores aos do solo arenoso puro mesmo após meses de degradação ambiental. De modo análogo, em matrizes predominantemente

argilosas ou de alta plasticidade, inclusões vegetais como o coco (Costa, 2024) e o bambu (Mozumder *et al.*, 2025) têm sido extensivamente empregadas para atenuar problemas de compressibilidade e compensar a baixa resistência natural da matriz à tração.

A eficiência técnica de ambos os materiais (fibras sintéticas ou biológicas) fundamenta-se na otimização da transferência de esforços. Independentemente da origem da fibra, o desempenho do reforço é fortemente condicionado por parâmetros morfológicos, tais como o teor de inclusão, comprimento, relação de aspecto, rugosidade superficial e módulo de elasticidade. Nesse sentido, conforme ressaltam Santos *et al.* (2022), a literatura demonstra a inexistência de um teor ou comprimento de fibra universalmente ideal. A dosagem ótima é altamente variável e multifatorial, dependendo intrinsecamente do tipo de fibra, da geometria, da matriz do solo e do uso de eventuais aditivos.

A título de exemplo, enquanto a resistência ao cisalhamento em areias reforçadas com polipropileno frequentemente atinge picos de eficiência com teores próximos a 1% e comprimentos de até 19 mm (Sonmezer, 2019), o uso de fibras naturais como o sisal pode apresentar melhores resultados em teores consideravelmente menores, variando de 0,4% a 0,8% (Bai *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020; Silveira & Casagrande, 2021).

Em nível micromecânico, a elevação da resistência ao cisalhamento e da capacidade de carga ocorre primariamente devido ao chamado “efeito ponte” (*bridging effect*). Nesse fenômeno, os filamentos interceptam potenciais planos de ruptura e criam um robusto intertravamento, restringindo o deslocamento relativo das partículas (Tang *et al.*, 2023; Ozsoy *et al.*, 2026; Lv & Liu, 2023). Essa ancoragem redistribui as tensões, transformando cinemáticas inerentemente frágeis em comportamentos notavelmente mais dúcteis e resilientes (Adegoke *et al.*, 2025; Correia, 2021).

Contudo, a magnitude desses ganhos é condicionada pelas características conjuntas da mistura. Embora não exista uma dosagem universal aplicável a todos os cenários, a literatura aponta que, para cada arranjo específico de solo e fibra, há um limite ótimo de teor e de comprimento para maximizar a resistência (Abood & Shakir, 2023; Wu *et al.*, 2025). A transgressão desses limiares particulares provoca o emaranhamento e a formação de aglomerados (*clusters*) de fibras no interior da matriz. Investigações como a conduzida por Reis *et al.* (2023) confirmaram que teores excessivos geram deficiências de homogeneização que penalizam a resistência global e a repetibilidade do sistema.

Além da dosagem, a eficiência do reforço depende estritamente da interação mecânica entre a rigidez da fibra e a granulometria do solo hospedeiro, visto que, em matrizes granulares, o filamento precisa ter flexibilidade para se dobrar e envolver as partículas sólidas, garantindo a

ancoragem adequada. A aglomeração excessiva gera macroporos instáveis e estabelece superfícies de fraqueza pautadas pelo predomínio de contatos fibra-fibra (em detrimento da ligação ideal solo-fibra), penalizando a compactação e a resistência do compósito (Liu *et al.*, 2026; Wang *et al.*, 2024; Yazici & Keskin, 2024).

A transposição de polímeros por biomassa impõe, além de tudo, um desafio hídrico. Por serem materiais biológicos compostos por celulose, hemicelulose e lignina, as fibras vegetais possuem uma natureza altamente hidrofílica, o que amplia a absorção de água intersticial e pode prejudicar a adesão física interfacial, além de torná-las suscetíveis à degradação biológica e hidrolítica, exigindo tratamentos superficiais para aplicações estruturais definitivas (Silveira, 2018; Costa, 2024; Lv & Liu, 2023; Azevedo *et al.*, 2025).

Essa transição para biomateriais evidencia o imenso potencial ecológico da técnica. Contudo, a consolidação definitiva dessas matrizes biológicas na prática de engenharia ainda demanda investigações focadas no monitoramento de longo prazo e em avaliações de ciclo de vida (ACV), garantindo que as intervenções sejam, de fato, estrutural e ambientalmente sustentáveis, conforme as diretrizes apontadas por Ang *et al.* (2026).

A análise dos parâmetros de dosagem e a escolha entre fibras sintéticas e naturais, contudo, exigem um aprofundamento nas propriedades específicas desses materiais, o que é realizado no tópico seguinte.

2.4 FIBRAS NATURAIS

Impulsionada pela urgência na mitigação de passivos industriais, a crescente incorporação dos princípios da sustentabilidade à engenharia geotécnica alavancou o desenvolvimento de pesquisas voltadas ao emprego de materiais renováveis. Nesse contexto, fibras vegetais oriundas de resíduos agroindustriais passaram a receber atenção especial por aliarem desempenho mecânico satisfatório, ampla disponibilidade regional e reduzido impacto ambiental.

Trabalhos desenvolvidos no Brasil e em diversos países têm demonstrado resultados promissores com fibras de sisal, coco, curauá, juta, bambu, cânhamo e açaí aplicadas ao reforço de solos arenosos, siltosos e argilosos (Silveira *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2022; Costa, 2024; Mozumder *et al.*, 2025; Santos *et al.*, 2026). Tal evolução científica contribuiu para consolidar as fibras naturais como uma das principais e mais inovadoras linhas de pesquisa na atualidade, evidenciando seu potencial como alternativa técnica aos reforços sintéticos convencionais.

Tendo isso em vista, essas fibras vegetais, aqui designadas como fibras naturais, exibem propriedades geomecânicas e físicas diretamente influenciadas por sua origem morfológica na

anatomia da planta. Classicamente, dividem-se em três categorias primárias: (i) fibras extraídas do caule ou bastão (e.g., juta, bambu e cânhamo); (ii) fibras foliares (e.g., sisal, curauá e agave); e (iii) fibras provenientes do fruto ou semente (e.g., coco, algodão e açaí) (Jamshaid *et al.*, 2023; Lv & Liu, 2023).

Santiago (2011) destaca que a rigidez dessas inclusões difere consideravelmente em função dessa gênese: enquanto as fibras de caule tendem a ser consideradas mais macias e historicamente propícias a fins têxteis, as fibras foliares são mais grossas e mais rígidas, característica que as consagra como elementos de ancoragem ideais em matrizes de reforço estrutural.

No âmbito do reforço de solos, a origem botânica das fibras naturais dita comportamentos mecânicos distintos, os quais são reflexos diretos de suas características microestruturais. As fibras de caule, a exemplo da juta (Corchorus sp.), apresentam elevadas proporções celulósicas e baixos ângulos microfibrilares, atributos que lhes conferem alta resistência à tração e rigidez longitudinal. Em contrapartida, as fibras foliares, como o sisal (Agave sisalana) e o curauá (Ananas erectifolius), destacam-se por possuírem maiores ângulos microfibrilares que lhes garantem uma expressiva capacidade de deformação e comportamento dúctil, maximizando a absorção de energia do compósito. Por fim, as fibras oriundas de frutos, como o coco (Cocos nucifera), notabilizam-se por sua excepcional tenacidade e alta rugosidade superficial, favorecendo a formação de redes tridimensionais de ancoragem complexa (Silveira, 2018; Santos *et al.*, 2022; Costa, 2024).

Para orientar a seleção geotécnica desses biomateriais frente aos equivalentes industriais, é fundamental comparar diretamente suas propriedades termomecânicas quando avaliadas de forma isolada. Nesse contexto, historicamente, polímeros sintéticos como o polipropileno e o poliéster têm dominado o mercado não apenas por sua inércia biológica, mas também por sua consistência dimensional e capacidade de deformação plástica. Conforme documentado em trabalhos clássicos e recentes (Hejazi *et al.*, 2012; Gowthaman *et al.*, 2018; Costa, 2024; Crippa, 2025), os filamentos sintéticos apresentam alongamentos na ruptura que frequentemente variam de 10% a 70%, conferindo expressiva ductilidade intrínseca.

Em contraste, as fibras naturais, em geral, exibem caráter mais frágil sob tração isolada, com alongamentos usualmente limitados à faixa de 1,5% a 7,0% para o sisal, o curauá e a juta (Wambua *et al.*, 2003; Silveira, 2018; Costa, 2024), de aproximadamente 7,8% para o açaí (Santos *et al.*, 2026), e de até 51,4% para o coco (Gowthaman *et al.*, 2018; Costa, 2024), cujo comportamento dúctil é influenciado pelo seu alto teor de lignina e elevado ângulo microfibrilar (Costa, 2024). Todavia, a despeito da menor ductilidade individual de grande parte das fibras

vegetais, elas demonstram um desempenho específico (relação resistência/densidade) notavelmente competitivo. Wambua *et al.* (2003) mostram que as propriedades específicas de fibras como o sisal e a juta são comparáveis às da própria fibra de vidro.

A Tabela 2.1 compila as principais fibras naturais e sintéticas reportadas na literatura, apresentando suas propriedades físicas e mecânicas para fins comparativos. Nela, se evidencia que materiais como o curauá, o sisal e a juta alcançam resistências à tração equivalentes, ou até superiores, às do polipropileno convencional. Complementarmente, constata-se que o coco e o açaí, embora apresentem resistências à tração intrínsecas mais modestas, destacam-se por atributos estruturais singulares: a fibra de coco exibe um alongamento elevado (de até 51,4%), enquanto o açaí alia uma expressiva capacidade inicial de deformação (~7,8%) a densidades consideravelmente baixas (atingindo 0,74 g/cm³). Somado a isso, a baixa densidade volumétrica da biomassa como um todo garante a obtenção de compósitos estruturalmente mais leves, um atrativo técnico para obras executadas sobre solos compressíveis.

Tabela 2.1- Propriedades físicas e mecânicas comparativas entre fibras naturais e sintéticas

Tipo de fibra	**Fibra**	**Densidade (g/cm³)**	**Resistência à tração (MPa)**	**Alongamento na ruptura (%)**	**Absorção de umidade (%)**
Sintética	Polipropileno (PP)	0,90 – 0,91 (Gowthaman *et al.*, 2018)	300 – 450 (Costa, 2024; Hejazi *et al.*, 2012)	15,0 – 25,0 (Hejazi *et al.*, 2012)	Quase Nula (Hejazi *et al.*, 2012)
Sintética	Poliéster (PET/PET Reciclado)	1,21 – 1,45 (Crippa *et al.*, 2025; Costa, 2024)	81 – 880 (Crippa *et al.*, 2025; Costa, 2024)	7,0 – 70,0 (Crippa *et al.*, 2025; Costa, 2024)	Muito Baixa (Hejazi *et al.*, 2012)
Natural	Sisal	0,75 – 1,50 (Silveira, 2018; Hejazi *et al.*, 2012)	270 – 700 (Silveira, 2018; Costa, 2024)	2,0 – 7,0 (Silveira, 2018; Costa, 2024)	Alta (~ 70 a 515) (Silveira, 2018)
Natural	Curauá	1,11 – 1,40 (Silveira, 2018; Costa, 2024)	460 – 1100 (Silveira, 2018; Costa, 2024)	2,0 – 4,5 (Silveira, 2018; Costa, 2024)	Muito Alta (~ 110 a 709) (Silveira, 2018)
Natural	Juta	1,30 – 1,50 (Lv *et al.*, 2023; Wambua *et al.*, 2003)	300 – 800 (Lv *et al.*, 2023; Wambua *et al.*, 2003)	1,5 – 3,5 (Wambua *et al.*, 2003)	Baixa (~ 12) (Gowthaman *et al.*, 2018)
Natural	Coco (Coir)	1,15 – 1,52 (Gowthaman *et al.*, 2018; Costa, 2024)	82 – 250 (Costa, 2024)	12,0 – 51,4 (Gowthaman *et al.*, 2018; Costa, 2024)	Alta (~ 100 a 180) (Costa, 2024)
Natural	Açaí	0,74 – 1,30 (Lopes, 2019; Santos *et al.*, 2026)	~ 250 (Santos *et al.*, 2026)	~ 7,8 (Santos *et al.*, 2026)	Alta (~ 93) (Santos, 2023)

Essas propriedades mecânicas são um reflexo direto da composição bioquímica e da organização estrutural das fibras. Sob o escopo bioquímico, as fibras vegetais são entidades

biológicas lignocelulósicas compostas predominantemente por celulose, hemicelulose e lignina, acompanhadas por parcelas menores de pectina e ceras (Kabir *et al.*, 2012; Lv & Liu, 2023). A celulose atua como o arcabouço esquelético primário do material. Formada por anéis de piranose unidos por ligações covalentes, organiza-se em cadeias lineares conectadas por fortes pontes de hidrogênio (Jamshaid *et al.*, 2023). Esse arranjo origina microfibrilas com um elevado grau de cristalinidade (50% a 90%), conferindo à fibra a sua inata e elevada resistência à tração, além de insolubilidade em álcalis e proteção inicial contra fluidos intersticiais (Jamshaid *et al.*, 2023; Mühlethaler, 1961).

Interligando essas microfibrilas, a hemicelulose atua como um polímero amorfo, ramificado e altamente reativo, formando uma rede de ligação elástica. Envolvendo e selando todo esse esqueleto estrutural encontra-se a lignina, uma macromolécula fenólica que atua como um adesivo natural de caráter hidrofóbico. Juntamente com a pectina, a lignina é a principal responsável por conferir tenacidade geométrica ao filamento, além de estabelecer a barreira primária inibidora contra a biodegradação microbiana (Brunšek *et al.*, 2023; Jamshaid *et al.*, 2023; Nurazzi *et al.*, 2021).

A organização estrutural desses constituintes químicos ocorre em múltiplas escalas de fibrocélulas interligadas (Mühlethaler, 1961). Cada fibrocélula é constituída por paredes celulares sobrepostas que circundam um canal central oco denominado *lúmen*. De fora para dentro, essas camadas são classificadas em primária e secundárias, conforme ilustrado no esquema da Figura 2.1.

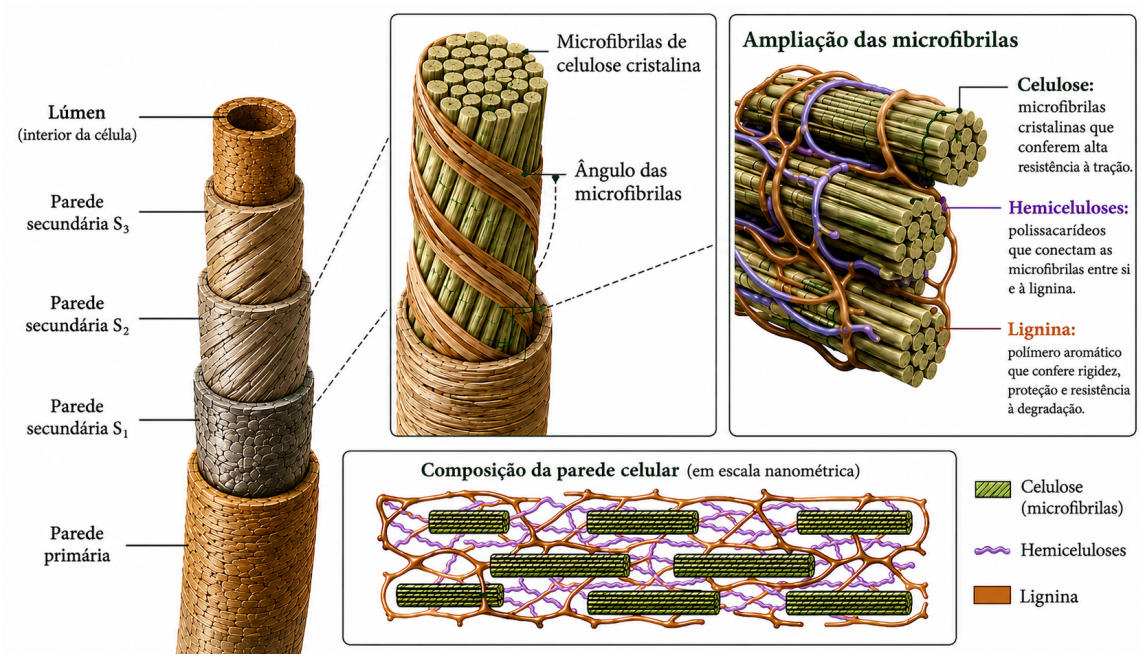


Figura 2.1- Estrutura da parede celular de fibras vegetais: destaque para as camadas da parede primária e secundária, orientação das microfibrilas e sua composição lignocelulósica (adaptado de Kabir *et al.*, 2012).

A gênese do filamento inicia-se pela parede celular primária, que é fina, altamente flexível e densamente preenchida por lignina, hemicelulose e pectina (Barbosa, 2011; Kabir *et al.*, 2012; Santana, 2024). O elevado acúmulo de lignina nessa região periférica institui o primeiro escudo mecânico contra ataques biológicos e agressões físico-químicas provenientes da solução do solo.

Abaixo dessa barreira consolida-se a parede celular secundária, espessa e subdividida em três camadas concêntricas estruturais: S1, S2 e S3 (Cosgrove, 2016). Conforme elucidado por Kabir *et al.* (2012) e Brunšek *et al.* (2023), o teor de celulose atinge a sua concentração máxima na camada S2. Por abrigar as microfibrilas alinhadas em um baixo ângulo helicoidal em relação ao eixo de estiramento da fibra, a subcamada S2 determina micromecanicamente a elevada tenacidade e a rigidez longitudinal observadas na mecânica de ruptura desses materiais (Bledzki & Gassan, 1999; Brunšek *et al.*, 2023).

Embora a morfologia elementar de lúmen e paredes celulares seja compartilhada por todos os filamentos vegetais, cada espécie manifesta propriedades mecânicas singulares governadas pela proporção de seus constituintes bioquímicos. Essa variabilidade foi sumarizada por Santana (2024) (Tabela 2.2), que destaca o sisal por seu alto desempenho no reforço geotécnico, com teores de celulose próximos a 70%, que aliado à baixa inclinação microfibrilar maximiza as propriedades de tração do compósito (Asim *et al.*, 2015; Jamshaid *et al.*, 2023).

Tabela 2.2- Teores dos componentes estruturais de fibras vegetais (Adaptado de Santana (2024))

Tipo de fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Linho	64,1	16,7	12,0
Algodão	82,7	5,7	-
Abacá	62,5	21,0	12,0
Bambu	34,5	20,5	26,0
Sisal	68,2	13,7	12,3
Coco	31,0	19,2	29,7
Dendê	65,0	-	19,0
Rami	68,6	13,1	0,6
Bananeira	31,5	15,0	15,0

A análise estrutural e bioquímica sumarizada na Tabela 2.2 permite estabelecer a correlação direta entre a microestrutura da fibra e a sua durabilidade em campo. Fibras com maiores teores de celulose (e.g., curauá e sisal) apresentam maior potencial tracional no estado virgem, contudo, a literatura adverte que esse pico de desempenho inicial pode ser drasticamente atenuado pela degradação. Ao avaliarem comparativamente a degradação natural de ambas as fibras, Silveira & Casagrande (2021) constataram que o curauá, apesar de superior no tempo zero, sofreu um declínio estrutural sensivelmente mais pronunciado que o sisal após a exposição.

Ao contrário do que se poderia supor, esse fenômeno não está atrelado à presença de macroporos ou lúmens amplos, que são quase imperceptíveis no curauá, mas sim ao seu reduzido diâmetro transversal. Conforme detalha Silveira (2018), por possuírem uma menor área de seção transversal, exige-se uma quantidade muito maior de filamentos de curauá para compor uma mesma massa de reforço. Consequentemente, o sistema adquire uma elevada superfície específica, traduzida em uma área total de contato fibra-matriz muito mais ampla. Esse excesso de área exposta torna o material consideravelmente mais suscetível à rápida absorção de água e à proliferação de ataques microbianos generalizados, o que justifica a sua alta taxa de degradação e compromete de forma severa o intertravamento interfacial com a matriz terrosa ao longo do tempo.

Em contrapartida a essa vulnerabilidade, investigações encontradas na literatura técnica trazem um marco importante ao avaliarem o desempenho de fibras naturais estritamente curtas, frequentemente oriundas da casca de frutos e resíduos agroindustriais. Desafiando premissas micromecânicas clássicas, nas quais o reduzido comprimento induziria à falha prematura por escorregamento e arrancamento na matriz (*pullout*), conforme descrito por Maher & Ho (1994), os resultados evidenciam elevado atrito de interface, mitigando as limitações impostas pelo reduzido comprimento das fibras (Monteiro *et al.*, 2006; Costa, 2024). Como um exemplo representativo desse comportamento estrutural, compósitos reforçados com fibras curtas do caroço do açaí demonstram que essa conjunção morfológica viabiliza expressivos ganhos de resistência inicial em diferentes matrizes terrosas. Em meios granulares, a armadura promoveu o incremento do intercepto coesivo em até 450% (Lopes & Casagrande, 2022), enquanto em matrizes argilosas a resistência à compressão não confinada saltou a patamares superiores a 200% (Santos et al., 2026).

No que tange à durabilidade desse grupo de biomateriais de dimensões reduzidas, embora ocorram perdas mecânicas associadas à degradação natural de compostos celulósicos nos primeiros meses de exposição, a literatura documenta uma tendência de estabilização de suas propriedades a médio e longo prazo. Essa dinâmica garante que o compósito preserve sua função de ancoragem, atuando em patamares de resistência continuamente superiores aos do solo não reforçado (Santos, 2023; Santos *et al.*, 2026).

Apesar dessa estabilização relatada para inclusões específicas, é possível observar que a própria matriz orgânica que assegura a resistência tracional impõe um obstáculo patológico aos compósitos. A elevada incidência de grupos hidroxila (-OH) livres na celulose amorfa e na hemicelulose confere uma natureza intrinsecamente hidrofílica ao filamento (Azevedo *et al.*, 2025). Essa hidrofilicidade exacerba a sorção capilar, promove o inchamento volumétrico das

fibras quando imersas no solo, e facilita o transporte de íons alcalinos destrutivos para o interior do lúmen, acelerando os processos de degradação química e termobiológica a longo prazo (Azevedo *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2026).

Para contornar essa vulnerabilidade inata sem renunciar à sustentabilidade, a engenharia geotécnica contemporânea tem direcionado seus esforços para a prospecção de espécies vegetais dotadas de defesas bioquímicas mais robustas, que aliem morfologia favorável ao intertravamento a teores excepcionais de lignina. É nesse nicho exploratório que a biodiversidade amazônica desponta como um celeiro de novos materiais, oferecendo resíduos agroindustriais de alto potencial estrutural e durabilidade superior, cujo maior expoente e objeto central desta investigação é a fibra do caroço de açaí.

2.4.1 FIBRAS DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea*)

O açaí (*Euterpe oleracea*) é um fruto de elevada relevância socioeconômica, especialmente na região amazônica, que responde pela quase totalidade da produção nacional. Dados mais recentes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2026) indicaram uma produção superior a 1,7 milhão de toneladas do fruto, só no ano de 2024. O processamento para a extração da polpa gera uma quantidade massiva de resíduos, constituídos primariamente pelos caroços e pelas fibras a eles aderidas (Figura 2.2).



Figura 2.2- Caroços e fibras de açaí.

Estima-se que esses coprodutos correspondam a pelo menos 70% do volume total produzido (Bufalino *et al.*, 2018), sendo que a camada fibrosa que envolve a semente representa, isoladamente, cerca de 5,3% da massa do fruto (Polidori *et al.*, 2024). A destinação inadequada dessa biomassa constitui um desafio logístico e ambiental, visto que a ausência de um sistema de logística reversa e descarte específico frequentemente transfere o ônus da destinação aos próprios produtores (Santos *et al.*, 2019). Transformar esse passivo ambiental em um material

de engenharia de alto valor agregado configura-se, portanto, como uma intervenção duplamente sustentável.

Apesar da sua ampla disponibilidade, dados disponíveis na literatura acerca de uma caracterização mais avançada das fibras de açaí ainda são relativamente escassos. A fibra de açaí destaca-se por sua leveza, com uma densidade da ordem de 1,3 g/cm^3 (Santos *et al.*, 2023), cujas propriedades são compiladas na Tabela 2.3, com suas propriedades físicas principais.

Tabela 2.3- Propriedades físicas das fibras de açaí

Densidade (g/cm^3)	**Diâmetro (mm)**	**Comprimento (mm)**	**Referência**
-	0,1-0,18	6-20	Santos *et al.* 2026
-	0,12 ± 0,03	21,2 ± 7,5	Azevedo *et al.* (2021)
-	0,08	20	Pessoa *et al.* (2010)
1,11	0,129	18,41	Lima Júnior (2007)
0,74	0,104	15,32	Gehlen (2014)
1,36	0,11	22	Mesquita (2013)

Em termos dimensionais, as fibras de açaí apresentam uma variabilidade intrínseca à sua origem biológica, com dimensões que as enquadram na categoria de fibras curtas. Já com relação à composição bioquímica, fator determinante para a durabilidade e a resistência da fibra frente aos processos de degradação do solo, estudos reportam que o açaí apresenta uma configuração química diversa (Tabela 2.4), caracterizada geralmente por teores expressivos de celulose associados a uma robusta proporção de lignina (Santos *et al.,* 2023; Lima *et al.*, 2021; Gehlen, 2014; Martins *et al.*, 2009; Mesquita, 2013).

Tabela 2.4- Teores de lignina, celulose e hemicelulose em fibras de açaí

Lignina (%)	**Celulose (%)**	**Hemicelulose (%)**	**Referência**
25	46	27	Santos *et al.* (2023)
35	27	18	Lima *et al.* (2021)
39	28	14	Gehlen (2014)
33	33	37	Martins *et al.* (2009)
30	46	19	Mesquita (2013)

Quando comparadas a outras fibras vegetais tradicionalmente empregadas em geotecnia, as fibras de açaí apresentam uma combinação pouco usual. Enquanto fibras como o sisal e o curauá frequentemente se destacam pelos elevados teores de celulose, as fibras de açaí distinguem-se pela coexistência de um arcabouço celulósico satisfatório com concentrações elevadas de lignina, atingindo patamares de até 39%.

Nesse contexto, esse expressivo teor de lignina desempenha um papel protetor crítico. Por atuar como um polímero predominantemente hidrofóbico e de difícil quebra enzimática, a lignina funciona como um escudo estrutural. Segundo Passos (2005), essa barreira protege os componentes celulares mais reativos (como a hemicelulose), retardando a taxa de degradação

biológica e conferindo uma sobrevida notável às fibras quando imersas em ambientes úmidos e hostis.

Do ponto de vista micromecânico, o açaí destaca-se por sua elevada resistência mecânica, reflexo da morfologia de sua parede celular. Análises morfológicas transversais revelaram que a parede celular dessas fibras ocupa uma fração superior a 90% de sua seção, conferindo-lhes uma elevada rigidez estrutural, contando com uma estrutura praticamente maciça, com lúmen reduzido e baixa flexibilidade (Lima Júnior, 2007). Esse robusto esqueleto lignocelulósico reflete-se diretamente em seu comportamento sob esforços: o material atinge uma resistência média à tração de aproximadamente 250 MPa, combinada a um impressionante módulo de elasticidade (Módulo de Young) de 3,73 GPa (Santos *et al.*, 2026). Trata-se de um desempenho biomecânico altamente competitivo, com módulo de elasticidade equiparável ao de fibras consagradas na geotecnia, como a fibra de sisal (Silveira *et al.*, 2022).

Essa singularidade estrutural também ajuda a explicar o desempenho aparentemente contraintuitivo das fibras de açaí quando incorporadas ao solo. Conforme abordado, modelos clássicos de interação solo-fibra sugerem que filamentos de reduzido comprimento estariam mais suscetíveis à extração prematura da matriz (*pullout*), limitando a mobilização de sua resistência à tração (Maher & Ho, 1994). Contudo, a elevada rugosidade superficial das fibras de açaí, somada à integridade estrutural garantida por sua composição lignocelulósica, induz uma boa ancoragem mecânica. Essas irregularidades geométricas garantem que o filamento curto não deslize passivamente, mas participe ativamente da redistribuição de tensões, convertendo matrizes frágeis em meios com elevada ductilidade (Costa, 2024; Santos *et al.*, 2026).

O elevado potencial estrutural desse resíduo já foi atestado na engenharia civil na formulação de argamassas e compósitos cimentícios, onde apresentou boa compatibilidade físico-química e notável estabilidade térmica (Natalli *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023; Guedes *et al.*, 2021). Na engenharia geotécnica, a aplicação do açaí ainda se encontra em expansão, com investigações preliminares apontando resultados transformadores, como Lopes & Casagrande (2019; 2022) que, ao incorporarem teores de 0,5% a 1,0% em matrizes arenosas e argilosas tropicais, constataram aumentos na resistência ao cisalhamento, enquanto Santos *et al.* (2026) registraram excelentes resultados quanto à compressão não confinada em comparação ao solo natural. Além de elevar a capacidade de suporte, a distribuição aleatória das fibras alterou o mecanismo de ruptura, convertendo a matriz frágil em um meio com elevada ductilidade e expressiva resistência residual pós-pico.

Embora a caracterização isolada ateste o bom potencial das fibras de açaí, ancorado em sua morfologia espessa, rugosidade e blindagem natural por lignina, a eficácia da sua aplicação na engenharia depende da resposta global do sistema compósito. Para compreender de forma ampla a magnitude desses ganhos, faz-se necessária a análise dos fenômenos que regem a interação mecânica entre a matriz terrosa e as fibras. É a partir desse embasamento material que se estabelecem as premissas teóricas para o comportamento de solos reforçados, tema que será aprofundado a seguir.

2.5 COMPORTAMENTO DE SOLOS REFORÇADOS COM FIBRAS

A influência da adição de fibras no comportamento do solo já se manifesta no processo de mistura e compactação, uma vez que as fibras atuam como um obstáculo mecânico e conferem resistência ao rearranjo denso do material compósito. Pinto (2008) observou que amostras contendo fibras vegetais demandaram um maior esforço de compactação em comparação ao material sem reforço. Esse efeito se reflete nos resultados dos ensaios de compactação, que, muitas vezes, indicam uma redução na massa específica aparente seca máxima e respectivo aumento na umidade ótima, tendência amplamente documentada em estudos clássicos (Leocádio, 2005; Bolaños, 2013; Sarbaz *et al.*, 2014) e ratificada por investigações contemporâneas (Merville & Soares, 2024; Liu *et al.*, 2026). A redução da massa específica ocorre primariamente pela substituição de partículas minerais densas por filamentos mais leves, enquanto o aumento da umidade ótima é impulsionado pela natureza hidrofílica das fibras naturais, que absorvem parte da água de compactação (Mozumder *et al.*, 2025; Santos *et al.*, 2026).

Além da redução da massa específica seca máxima e do aumento da umidade ótima, a adição de fibras também está associada a um incremento da porosidade, refletido geralmente no aumento do índice de vazios. Esse comportamento foi constatado inclusive na incorporação de fibras de açaí em solo argiloso, nos estudos de Silva *et al.*(2024), Lopes & Casagrande (2022) e Santos *et al.* (2026). Entretanto, essa tendência não é absoluta: estudos como os de Bueno *et al*. (1996) e Heineck (2002) relatam ausência de mudanças significativas ou variações pouco expressivas nos parâmetros de compactação, demonstrando que a magnitude do efeito pode depender de fatores como tipo de solo, teor e formato das fibras na matriz solo-fibra. A literatura adverte, em consonância com os mecanismos de interação física descritos no tópico 2.3, que a extrapolação do teor ótimo de adição invariavelmente leva à formação de *clusters* (emaranhamento), prejudicando severamente a eficiência da compactação e a densificação da matriz (Wang *et al.*, 2024).

No que tange à resistência ao cisalhamento, os estudos demonstram que a adição de fibras pode promovê-la significativamente. Pesquisas conduzidas por Zhao *et al.* (2019), Castro (2020), Valipour *et al.* (2021) e Freitas (2022) relataram aumentos expressivos de resistência ao cisalhamento, tendendo a majorar o ângulo de atrito e/ou o intercepto coesivo. Apesar disso, a literatura apresenta diferentes tendências: alguns estudos relatam aumento exclusivo do ângulo de atrito (Teodoro, 1999; Heineck, 2002), enquanto outros observaram elevação tanto no atrito quanto na coesão (Hoare, 1979; Nataraj *et al.*, 1997; Aguilar, 2015).

O consenso atual aponta que as fibras interagem com a matriz do solo criando um sistema de reforço tridimensional fundamentado no efeito ponte. O mecanismo micromecânico desse fenômeno está ilustrado esquematicamente na Figura 2.3, que detalha o comportamento estrutural do compósito desde o estado inicial até a mobilização das tensões sob carregamento externo.

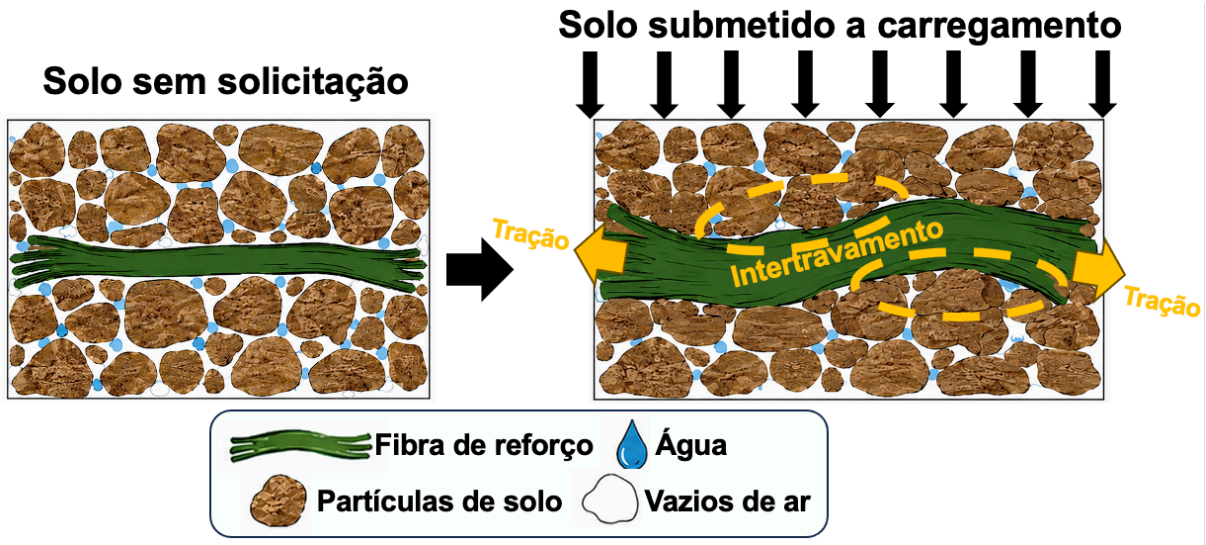


Figura 2.3- Representação esquemática do mecanismo micromecânico de reforço: estágio inicial da mistura e estágio de deformação sob carregamento (Adaptado de Gowthaman et al., 2018).

Conforme ilustrado, a aplicação de tensões induz o rearranjo e a deformação da matriz terrosa. Durante esse processo, a rede orgânica é tensionada, ativando intensas zonas de atrito e intertravamento mecânico na interface solo-fibra. É exatamente essa aderência que mobiliza a elevada resistência à tração da fibra, permitindo a interceptação de microfissuras, limitando a propagação de falhas e dissipando as tensões de forma mais eficiente (Tang *et al.*, 2023; Adegoke *et al.*, 2025; Mozumder *et al.*, 2025; Ozsoy *et al.*, 2026). Esse comportamento tem sido atestado por revisões e estudos abrangentes recentes (Gowthaman *et al.*, 2018; Correia *et al.*, 2021; Jamshaid *et al.*, 2023), os quais indicam tendências consistentes no aumento da resistência, da ductilidade pós-pico e da tenacidade em solos de diferentes granulometrias.

A atuação do reforço é fortemente governada pelo estado de tensões atuantes, comportamento frequentemente representado por envoltórias bilineares de resistência (Heineck, 2002). Em condições de baixos níveis de confinamento, de forma geral, a interação solo-fibra é governada pelo atrito interfacial, de modo que a resistência do compósito é controlada, em grande parte, pelo mecanismo de arrancamento das fibras (*pullout*). Por outro lado, quando as tensões confinantes ultrapassam um valor crítico, o aumento da pressão normal restringe o deslizamento relativo entre o solo e a inclusão. Nessa condição, as fibras passam a mobilizar de forma mais efetiva sua resistência à tração, predominando mecanismos associados ao alongamento e, eventualmente, à ruptura do filamento (Casagrande, 2005). Essa mudança de mecanismo restringe a deformação e transfere a contribuição do reforço quase que exclusivamente para ganhos de coesão aparente, mantendo o ângulo de atrito semelhante ao do solo não reforçado (Heineck, 2002; Zhao *et al.*, 2015). Embora esse comportamento tenha sido fundamentado e documentado em matrizes granulares (Zhao *et al.*, 2015), também foi observado de maneira análoga por Correia *et al.* (2021) no reforço de argilas.

A influência da granulometria do solo deve ser considerada, uma vez que a forma das partículas afeta diretamente a ancoragem do compósito. Stauffer & Holtz (1995), ao realizarem ensaios triaxiais em areias reforçadas, constataram que a matriz bem graduada apresentou maior resistência em comparação à de granulometria uniforme, indicando que o melhor arranjo intergranular otimiza o travamento da fibra.

Estudos específicos sobre diferentes tipos de fibra e solo ilustram essas tendências e também revelam divergências metodológicas importantes. Em solo areno-argiloso reforçado com fibras de coco, Costa (2024) avaliou a resistência mecânica por meio de ensaios triaxiais, constatando aumento significativo desde o tempo inicial, atribuído principalmente ao fortalecimento da matriz e à melhor redistribuição de tensões.

Lopes & Casagrande (2019) e Silva *et al.* (2024), em contrapartida, investigaram compósitos de açaí em argila e areia por meio de ensaios de cisalhamento direto, e evidenciaram resultados mais complexos. No solo argiloso, ambos observaram aumento no ângulo de atrito, porém Lopes & Casagrande (2019) constatou redução da coesão ao longo do tempo, enquanto Silva *et al.* (2024) verificou perda progressiva da coesão com o aumento dos teores. No solo arenoso, as divergências persistiram: Lopes & Casagrande (2019) relatou aumento significativo da coesão, ao passo que Silva *et al.* (2024) identificou ganhos discretos para alguns teores (0,75% e 1%) e reduções paradoxais para outros (0,5% e 1,5%). Tais discrepâncias ressaltam uma limitação inerente ao ensaio de cisalhamento direto: a imposição de um plano de ruptura forçado restringe a atuação onidirecional da malha, reforçando que o uso de ensaios mais abrangentes,

como o triaxial, é essencial para a caracterização realista de matrizes fibrosas (Kong *et al.*, 2025).

A incorporação de fibras altera muito além do pico de resistência, influenciando significativamente o comportamento frente à fissuração. Taylor (1994) destaca que, embora não impeça o surgimento de fissuras, a presença de fibras atua no controle da abertura e propagação destas, aumentando a resistência à tração. Nesse sentido, Curcio (2008) observou que a adição de PET reciclado reduziu expressivamente a extensão das fissuras, retardou seu avanço e favoreceu a integridade estrutural do compósito.

Com relação ao estado pós-fissuração e ao modo de ruptura, a armadura confere substancial ductilidade. Casagrande (2005) e Silveira *et al.* (2022) verificaram que matrizes reforçadas exibem maior resistência pós-pico e um comportamento elasto-plástico com endurecimento progressivo (*strain-hardening*), corroborando os achados clássicos de McGown *et al.* (1978). Consequentemente, Costa (2024), Specht (2000) e Montardo (1999) observaram que amostras de solo puro apresentam um plano de cisalhamento bem definido e frágil (banda de cisalhamento), enquanto os compósitos solo-fibra exibiram ruptura distribuída por abaulamento (*barrelling*), dificultando a formação de planos de escorregamento nítidos e transicionando o colapso para um estado dúctil.

No que se refere aos esforços de compressão não confinada (UCS), o reforço demonstra impacto contundente. Santos *et al.* (2026) e Aldaood *et al.* (2020) confirmaram aumentos expressivos, com destaque para o trabalho de Santos *et al.* (2026) com fibras de açaí: enquanto a argila pura rompia abaixo de 400 kPa, o reforço elevou a resistência para cerca de 1300 kPa, superando, inclusive, os incrementos de 63,5% relatados por Liu *et al.* (2020) com fibras de algodão. Além disso, Festugato (2008), Martins (2014) e Santos *et al.* (2026) corroboram que a fibra assegura elevada resistência residual pós-pico, reduzindo a fragilidade estrutural.

O desempenho macroscópico descrito é regido pela micromecânica do arrancamento. Modelos analíticos (Li & Zornberg, 2013) postulam que fibras excessivamente curtas tendem a falhar prioritariamente por *pullout*, escorregando na matriz antes de mobilizar plenamente os esforços de tração. No entanto, investigações contemporâneas demonstram que a morfologia superficial pode mitigar o critério de comprimento. Santos *et al.* (2026), ao investigarem o açaí, constataram que, mesmo enquadrando-se como fibras curtas, a rugosidade do filamento e seu consequente travamento na argila previniram a falha precoce, assegurando extração máxima de tenacidade antes do colapso.

A compressibilidade e as propriedades de adensamento também sofrem drásticas alterações, variando conforme a matriz e as características da inclusão (geometria, rigidez, rugosidade,

entre outros). Oliveira Júnior *et al.* (2019) e Gomes (2018) verificaram que a incorporação de fibras (coco e PET) tende a elevar o índice de vazios, o índice de compressão (Cc) e a deformabilidade primária em solos argilosos. Celestino, Mendonça & Sobral (2023) advertem, contudo, que essa relação é não linear: ao usar fibra de coco em areia argilosa, a adição de 1% induziu maiores adensamentos, enquanto teores de 2% reduziram significativamente os recalques. Adicionalmente, o uso de adições estruturadas demonstrou comportamentos distintos, como a redução da compressibilidade e maior estabilidade volumétrica verificadas no uso de poliéster (Reis & Junior, 2011), pó de PET (Ribeiro, 2018), biochar de coco (Tavares, 2024) e borracha de pneu (Jaramillo, 2016).

A transposição dessas dinâmicas elasto-plásticas para aplicações práticas tem sido explorada na relação carga-recalque. Ferreira *et al.* (2021) demonstraram, por meio de provas de carga em placa em modelos físicos, que as fibras quase dobraram a capacidade de suporte do solo e reduziram massivamente os recalques. No entanto, Girardello (2010) e Donato (2007) advertem que as fibras não atuam no módulo puramente elástico inicial do maciço, elas só passam a influenciar o comportamento a partir do momento em que a matriz cede o suficiente para que a rede seja cinematicamente tracionada e mobilizada. Essa dependência de estiramento é central na mecânica dos micro-reforços (Adegoke *et al.*, 2025), embora Robertson (1986) ressalte que a limitação da prova de placa no controle de trajetória de tensões torna os ensaios triaxiais complementares e indispensáveis.

Por fim, a investigação da condutividade hidráulica revela que a inclusão de fibras altera a rede de fluxo interconectada. Diversos estudos relatam aumento da permeabilidade, atribuindo o fenômeno à criação de caminhos preferenciais na interface fibra-solo (Maher & Ho, 1994; Aguilar, 2015; Curcio, 2008; Xi *et al.*, 2024). Por outro lado, Gomes (2018) e Costa (2024) verificaram diminuição ou ausência de alterações significativas. Essa dualidade é elucidada por Oliveira Júnior *et al.* (2019) e Al Wahab & El-Kedrah (1995), que constataram que teores baixos (1%) mantinham o fluxo inalterado, enquanto o salto para 2% elevava expressivamente a vazão devido à dominância de contatos diretos fibra-fibra, que interligam macroporos e facilitam a drenagem global do sistema.

Visando sintetizar o amplo escopo do estado da arte, a Tabela 2.5 consolida investigações contemporâneas relevantes acerca do comportamento de solos reforçados com fibras naturais. O quadro sistematiza as evidências experimentais agrupando-as pela natureza granulométrica da matriz terrosa, detalhando as metodologias aplicadas e os impactos diretos da inserção da biomassa nos mecanismos de ruptura, na deformabilidade e na resistência ao cisalhamento.

Tabela 2.5- Investigações sobre o comportamento geomecânico de solos reforçados com fibras naturais

Referência	Principais Achados Mecânicos
Carvalho (2019); Carvalho *et al.* (2023)	Solo: areia; Fibra(s): Curauá e Coco; Cisalhamento Direto (Média e Larga escala): Aumento expressivo dos parâmetros de cisalhamento e da ductilidade em comparação à areia sem reforço. Compósitos com maior teor e maior comprimento de fibra apresentaram os maiores ganhos.
Jishnu *et al.* (2020)	Solo: areia; Fibra(s): Folha de Coco; Triaxial: A inserção de 3% de fibras curtas (2,5 cm) gerou um Fator de Melhoria de 3,3 na resistência. Esse ganho foi governado por um salto expressivo no intercepto coesivo, embora acompanhado de redução no ângulo de atrito. A adição alterou o colapso do material, induzindo o modo de ruptura por abaulamento, com o ganho de resistência sendo mais eficiente sob baixas pressões de confinamento.
Santiago (2011)	Solo: areia; Fibra(s): Curauá e Sisal; Triaxial (CID): A inclusão das fibras (teor de 0,5%) induziu comportamento de endurecimento (*strain-hardening*), aumentando a resistência de pico, o intercepto coesivo, o ângulo de atrito e o módulo de deformabilidade secante da areia. O ganho mecânico foi proporcional ao aumento do índice de aspecto (comprimento) da fibra, constatando-se que a interação solo-fibra ocorreu exclusivamente por deslizamento, sem ruptura por tração dos filamentos.
Lopes & Casagrande (2022)	Solo: areia; Fibra(s): Açaí; Cisalhamento direto: A incorporação de 0,5% e 1,0% de fibras em areia pura (testada nas compacidades relativas de 50% e 75%) elevou a resistência de pico ao cisalhamento e diminuiu a queda de resistência pós-pico. Houve também o aumento do intercepto coesivo e do ângulo de atrito.
Costa (2024)	Solo: areno-argiloso; Fibra(s): Coco; Triaxial (CIU): Houve alteração no modo de ruptura de frágil para dúctil (abaulamento) e atestou-se ganho imediato de resistência ao cisalhamento, elevando a coesão efetiva (de 22,1 para 26,9 kPa) e o ângulo de atrito (de 33,9° para 39,8°) em relação ao solo natural.
Lopes (2019)	Solo: argiloso laterítico; Fibra(s): Açaí; Compressão Simples (UCS) e Cisalhamento Direto: A adição das fibras (0,5% e 1,0%) em solo argiloso laterítico proporcionou ganhos diretos na resistência de pico não confinada e nas envoltórias de cisalhamento, conferindo imediato ganho estrutural e tenacidade à matriz fina perante o carregamento.
Tran, Satomi & Takahashi (2018)	Solo: siltoso; Fibra(s): Seda de milho; Compressão Simples (UCS), Tração Indireta e Tenacidade : A adição das fibras (comprimentos de 10 a 50 mm e teores de 0,5% a 2%) aumentou drasticamente a resistência à compressão do solo siltoso. O compósito exibiu também ganhos expressivos na resistência à tração e na tenacidade (capacidade de absorção de energia) antes do colapso.
Xue *et al.* (2021)	Solo: silte eólico (Loess); Fibra(s): Palha Reciclada; Cisalhamento Direto em Larga Escala (Tensão e Deformação): A adição de fibras (testadas com comprimentos de 10, 30 e 50 mm) melhorou a resistência ao cisalhamento do silte eólico, cujo teor ótimo (0,45%) foi responsável pelo ganho máximo de resistência.
Bawadi *et al.* (2020)	Solo: argiloso; Fibra(s): Bananeira (microfibras);Triaxial e CBR: O teor de 1% maximizou o reforço: no triaxial, a resistência ao cisalhamento saltou de < 100 kPa para aprox. 350 kPa (confinamento de 210 kPa). No ensaio CBR, a força máxima de penetração (a 5 mm) subiu de 0,64 kN no solo puro para 2,09 kN no compósito, elevando o índice de capacidade de suporte que antes era < 3% para até 9%.
Kumar & Mir (2023)	Solo: argiloso; Fibra(s): Juta; Compressão Simples (UCS) e CBR (Saturado e Não saturado): A resistência não confinada saltou de 0,87 kg/cm² no solo puro para 1,16 kg/cm² (teor de 1% de fibra). Além disso, o compósito apresentou ganhos expressivos na capacidade de suporte (CBR), dobrando os valores de resistência tanto na condição não saturada (de 3,94% para 8,02%) quanto sob saturação (de 2,40% para 5,30%).
Mozumder (2025)	Solo: argila ; Fibra(s): Bambu; Compressão Simples (UCS) e Cisalhamento Direto: O teor ótimo de 0,75% e comprimento de 10 mm geraram incrementos de 75% na resistência não confinada e de 195% na coesão aparente da matriz. Comprimentos superiores a 10 mm reduziram a eficiência do compósito, induzindo perdas de resistência decorrentes de *pullout*.
Qu & Sun (2016)	Solo: argila; Fibra(s): Palha de trigo; Adensamento Unidimensional e Triaxial (CU): A inclusão das fibras aumentou a compressibilidade primária da matriz. Nos ensaios Triaxiais CU, o comprimento de 10 mm e o teor ótimo de 0,2% a 0,3% maximizaram o ângulo de atrito e a resistência ao cisalhamento. A armadura tridimensional restringiu a dilatância volumétrica, gerando maiores poropressões no sistema não drenado.

Kurt Albayrak & Özdemir (2023)	Solo: Argila; Fibra(s): Cânhamo; Compressão Simples (UCS) e Ciclos de Gelo-Degelo : A inclusão das fibras (destaque para o comprimento de 5 mm) aumentou expressivamente a resistência à compressão da matriz. O compósito demonstrou excelente durabilidade térmica, mitigando de forma eficiente a perda de resistência após sucessivos ciclos de congelamento e descongelamento.
Yazici & Keskin (2023)	Solo: Argila de baixa plasticidade; Fibra(s): Cânhamo;Triaxial (UU) e Absorção de água: Houve alteração no comportamento da argila de *strain-softening* para *strain-hardening*. O teor ótimo de 0,10% maximizou a tensão desviadora, a capacidade de absorção de energia (tenacidade) e o atrito. O revestimento das fibras com polímeros hidrofóbicos reduziu drasticamente a absorção de água, potencializando ainda mais a eficiência do reforço em longo prazo.

A análise da literatura consolidada na tabela evidencia que a inserção de fibras naturais altera substancialmente a física e a geomecânica das matrizes terrosas. Em termos de compactação, a introdução da biomassa porosa exige adequações no controle tecnológico, tipicamente reduzindo o peso específico seco máximo e elevando a umidade ótima do compósito, conforme atestado por Costa (2024). No que tange à resposta volumétrica, o comportamento é ditado pelas dimensões e pela flexibilidade da malha: Qu & Sun (2016) verificaram que a adição de fibras naturais pode aumentar a compressibilidade da matriz ao introduzir vazios intrínsecos, além de restringir a dilatância em ensaios não drenados.

Além disso, o impacto estrutural do reforço reside na alteração da cinemática de ruptura. Ao interceptarem as superfícies de falha incipientes, as fibras mobilizam esforços de tração pelo efeito ponte. Esse intertravamento converte o colapso do material, inerentemente frágil nos solos puros, para um comportamento marcadamente dúctil e com elevada tenacidade, eliminando planos de cisalhamento abruptos em prol de rupturas por abaulamento (*barrelling*) e induzindo o endurecimento contínuo por deformação (*strain-hardening*). Como consequência direta dessa nova arquitetura tridimensional, as matrizes experimentam expressivos saltos de capacidade de suporte. Sob a ótica das envoltórias de Mohr-Coulomb, a ancoragem física reverte-se em ganhos agudos na resistência. Mozumder (2025), por exemplo, registrou um salto massivo de 195% na coesão aparente de argilas, enquanto Costa (2024) corroborou a elevação imediata da coesão efetiva e do ângulo de atrito em solos mistos, consolidando, assim, a versatilidade mecânica instantânea e o poder estrutural dos biopolímeros na engenharia geotécnica contemporânea.

2.6 DEGRADAÇÃO DE FIBRAS NATURAIS E TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Apesar dos notáveis ganhos geomecânicos, a utilização de fibras naturais levanta uma questão crítica para a viabilidade do compósito a longo prazo: a sua degradação biológica e química. Compostas fundamentalmente por redes poliméricas (celulose, hemicelulose e lignina), as fibras orgânicas estão sujeitas ao ataque microbiano e à hidrólise quando imersas

na solução dos poros de solos úmidos. O pH do meio atua como gatilho primário da degradação (Wei, 2018): em matrizes tropicais sujeitas a alcalinização lenta, os íons hidroxila rompem as pontes de hidrogênio da hemicelulose, causando degradação estrutural (Jamshaid *et al.*, 2023) e impactando os parâmetros do compósito (Carvalho, 2014; Mwasha & Petersen, 2010).

Pesquisas recentes, entretanto, demonstraram que o reflexo dessa degradação orgânica sobre a capacidade de carga macrossistêmica tende a ser nuançado. Lopes & Casagrande (2019) e Santos *et al.* (2026) verificaram que a perda nas propriedades mecânicas do solo reforçado com açaí degradado estabiliza-se dentro de limites satisfatórios. Santos *et al.* (2026) aprofundaram essa tese, constatando que a UCS declina nos primeiros meses de exposição, mas atinge um limiar de sustentação residual. Essa preservação ocorre porque, durante o envelhecimento ambiental, os filamentos sofrem mineralização, interagindo química e fisicamente com os óxidos e argilominerais da matriz (Hodson & Evans, 2020), fato que preserva o intertravamento friccional passivo. Silveira *et al.* (2022) constatou dinâmica semelhante em compósitos climáticos de curauá e sisal, que mantiveram coesão e atrito superiores aos do solo puro, indicando que os benefícios da armadura persistem em estado residual.

Dado a degradação estrutural e a fragilização elástica intrínsecos a esse processo, que culminam inclusive no colapso dos lúmens (*fiber collapse* reportado por Nguyen *et al*., 2018), tratamentos de impermeabilização superficial têm sido implementados. Soluções orgânicas, como o poliestireno expandido (EPS) e o cimento asfáltico (CAP), foram aplicadas com sucesso para isolar a superfície hídrica do reforço (Leocádio, 2005; Santiago, 2011). Mais recentemente, o tratamento de base inorgânica com sílica coloidal demonstrou eficácia, tendo Silveira *et al.* (2022) comprovado que a sílica penetra nas microfissuras da biomassa e deposita uma barreira quimicamente inerte que neutraliza sítios reativos e protege o arcabouço celular, estendendo consideravelmente a rigidez longitudinal e a vida útil do material.

Em termos de interação solo-água, Aguilar (2015) demonstrou que as fibras de coco revestidas com sílica além de inibirem a degradação estrutural, atenuaram o fluxo intersticial em cerca de 50% frente aos compósitos sem tratamento. Isso consolida o revestimento inorgânico não apenas como uma defesa contra a biodegradação, mas como uma ferramenta de controle geomecânico vital para compósitos empregados em obras definitivas.

Visando sintetizar o escopo do estado da arte sobre essa vulnerabilidade e suas soluções tecnológicas, a Tabela 2.6 consolida estudos experimentais relevantes, focados na degradação estrutural e nos tratamentos de superfície de fibras naturais. São sistematizadas as evidências abordando o envelhecimento natural, a impermeabilização polimérica, tratamentos inorgânicos e a durabilidade frente a intemperismos extremos.

Tabela 2.6- Estudos experimentais e principais achados sobre a degradação estrutural e tratamentos de superfície em fibras naturais

Referência	Foco de Degradação/Tratamento	Principais Achados de Durabilidade
Bernardina (2019)	Fibras de Coco, Sisal e Curauá Condições ambientais (8 meses)	(Fibras *in natura*): A fibra de coco apresentou a menor taxa de degradação estrutural e resistência residual superior às demais, sendo a menos suscetível à biodegradação orgânica. A alta resistência inicial inerente à fibra de curauá foi penalizada pela rápida deterioração celular ocasionada pelo ataque ambiental.
Carvalho *et al.* (2014)	Fibras de Sisal, Banana e Coco Condições ambientais e solo ácido (90 dias)	(Fibras *in natura*): Fibras de sisal e banana perderam mais de 50% de sua resistência estrutural à tração de forma severa apenas nos primeiros 15 dias de exposição interna no solo. A degradação muito mais lenta exibida pelo coco foi fundamentada em sua elevada concentração natural de lignina protetora.
Costa (2024)	Fibras de Coco Condições ambientais (120 dias)	(Fibras *in natura*): A contínua exposição aos agentes climáticos resultou na natural fragilização orgânica das fibras de coco. Contudo, a degradação pontual foi mecanicamente compensada pela elevação da sucção da matriz argilosa, garantindo incrementos progressivos na resistência ao cisalhamento do compósito ao longo dos 120 dias.
Santos (2023)	Fibras de Coco, Açaí e Bambu Condições ambientais (6 meses)	(Fibras *in natura*): As misturas atestaram perda contínua de resistência mecânica durante os meses de intemperismo ativo devido à desintegração progressiva da biomassa. A despeito da deterioração, as amostras de coco e açaí resistiram e mantiveram tenacidade global superior à do solo não reforçado, figurando a taxa de esfarelamento do coco como a menor entre os filamentos.
Santiago (2011)	Fibras de Curauá e Sisal Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento Asfáltico (CAP)	(Fibras impermeabilizadas): A implantação de filmes plásticos poliméricos (EPS e CAP) recobriu fisicamente a superfície das fibras, apresentando elevada eficácia no processo de bloqueio à absorção de água. O recobrimento orgânico funcionou como um escudo isolante absoluto, blindando ambas as fibras do ataque de celulase liberada pelo fungo padrão *Trichoderma viride*.
Teja & Muttharam (2022)	Fibras de Coco Emulsão Betuminosa e Ácido Clorídrico (HCl)	(Fibras impermeabilizadas): Filamentos de coco tratados quimicamente com emulsão betuminosa sustentaram resiliência orgânica superior contra a biodegradação microbiana no interior de argilas ativas. A impermeabilização betuminosa estendeu a durabilidade da rede elástica, refletindo em altos ganhos de resistência ao puncionamento (CBR) frente a longos períodos de cura.
Yazici & Keskin (2023)	Fibras de Cânhamo Polímeros hidrofóbicos (ABS, Epóxi, Crystal PIB 907)	(Fibras com tatamento físico ou químicos inorgânicos): O revestimento contínuo empregando barreiras plásticas superou a restrição natural do cânhamo frente a colapsos por forte inchamento celular e encolhimento. Os banhos com compostos de Epóxi e Crystal PIB 907 garantiram viabilidade e estabilidade física perante as tensões de longo prazo.
Athira & Manju (2022)	Fibras de Coco Nanopartículas de $Ca(OH)_2$ (Precipitação Rápida)	(Fibras com tatamento físico ou químicos inorgânicos): A introdução estrutural de nanopartículas de $Ca(OH)_2$ solidificadas através dos canais de transporte dos lúmens aprimorou a integridade material durante sucessivos ciclos extremos de secagem e alagamento. A modificação na dimensão nano enrijeceu a resistência estrutural do sistema à hidrólise nos níveis alcalino e neutro.
Freitas (2022); Reis *et al.* (2023)	Fibras de Coco Hornificação (NaOH)	(Fibras com tatamento físico ou químicos inorgânicos): O tratamento cíclico de hornificação gerou o colapso intencional macroestrutural das finas paredes fibrocelulares, suprimindo o diâmetro da seção livre (lúmen) e bloqueando as frentes de capilaridade hídrica da fibra orgânica. Isso assegurou que o compósito de coco entregasse os maiores parâmetros cisalhantes residuais de resistência perante degradação em longo prazo.
Silveira (2018); Silveira *et al.* (2022)	Fibras de Sisal e Curauá Sílica Coloidal e Copolímero Estireno Butadieno	(Fibras com tatamento físico ou químicos inorgânicos): A imersão em solução aquosa de sílica formou fisicamente uma fina camada inorgânica de bloqueio (SiO_2) que protegeu das agressões ao núcleo dos espectros orgânicos, estabilizando as taxas de desintegração mineral e os parâmetros de resistência dos compósitos.

A análise consolidada das pesquisas reportadas evidencia que o envelhecimento natural impacta na integridade estrutural das fibras puras, embora a taxa de degradação seja dependente da composição bioquímica do filamento. Fibras com elevada concentração de lignina, a exemplo do coco, demonstram resiliência notável aos ataques biológicos e hidrolíticos, uma vez que esse polímero atua como um escudo químico protetor que retarda expressivamente a deterioração celular e a perda de massa (Bernardina, 2019; Carvalho *et al.*, 2014). Em contrapartida, filamentos de curauá e banana sofrem rápido colapso macroestrutural no interior da matriz terrosa, fragilizando o compósito em seus primeiros meses.

Apesar desse desgaste biológico inevitável, interações complexas podem atuar a favor do compósito no longo prazo. Costa (2024), por exemplo, atestou que a perda de seção orgânica pontual das fibras pode ser mecanicamente compensada pela elevação maciça da sucção da matriz argilosa, garantindo incrementos residuais contínuos na resistência ao cisalhamento mesmo após 120 dias de agressão climática.

Para viabilizar a utilização das fibras vegetais em obras geotécnicas definitivas, a impermeabilização superficial consolida-se como uma intervenção eficiente. O encapsulamento completo do filamento orgânico com filmes poliméricos impermeáveis cria uma barreira que isola o material dos fluxos hídricos e inibe o processo reativo de hidrólise. Santiago (2011) evidenciou que a aplicação de EPS e cimento asfáltico (CAP) blindou as fibras de curauá e sisal contra o ataque direto por fungos, enquanto Yazici & Keskin (2023) comprovaram que banhos poliméricos diminuem vigorosamente a capacidade de retenção capilar do cânhamo. Essa blindagem confere ao compósito elevada durabilidade, mitigando, inclusive, os danos causados por intemperismos físicos severos, como atestado por Albayrak & Özdemir (2023) na manutenção da integridade da matriz argilosa sob drásticos e sucessivos ciclos de gelo e degelo.

Para além da barreira sintética tradicional, a literatura valida a eficácia de tratamentos físicos e inorgânicos avançados na modificação da fibra vegetal. A hornificação atua por meio do estresse termofísico, induzindo o colapso irreversível dos canais de transporte dos lúmens, o que cessa o acesso hídrico nas fibras sem a adição de compostos externos e melhora as tensões cisalhantes no longo prazo (Freitas, 2022; Reis *et al.*, 2023).

Paralelamente, o tratamento inorgânico, seja com nanopartículas de hidróxido de cálcio (Athira & Manju, 2022) ou sílica coloidal (Silveira *et al.*, 2022), se demonstra capaz de instalar uma camada inerte e durável na superfície da fibra. Essa precipitação inorgânica estabiliza a desintegração biológica celular, enrijece o sistema da malha e confere às fibras orgânicas estabilidade superior, podendo posicionar os compósitos tratados no patamar de longevidade demandado pela engenharia geotécnica.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve o programa experimental desenvolvido para investigar o comportamento e a durabilidade de um solo tropical laterítico reforçado com fibras de açaí. Para atender aos objetivos da tese, a metodologia é apresentada de forma unificada e sequencial, iniciando-se com a descrição dos materiais empregados (solo, fibras e sílica coloidal para tratamento) e dos ensaios adotados para a sua caracterização. Na sequência, detalham-se os procedimentos de preparo e moldagem dos corpos de prova, além dos protocolos de exposição ambiental utilizados para a avaliação da durabilidade do compósito.

Por fim, são descritas as metodologias dos ensaios geomecânicos realizados, englobando compactação, porosimetria, adensamento, condutividade hidráulica, cisalhamento simples direto (DSS), compressão triaxial estática e prova de carga em placa.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 SOLO

O solo utilizado (Figura 3.1) neste estudo como matriz do compósito é característico de Brasília - DF, e foi coletado no campo experimental vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (PPGG-UnB). As amostras deformadas foram retiradas de profundidades entre 1,0 e 3,0 metros, sob as coordenadas geográficas 15°45'59.7" de Latitude Sul e 47°52'22.2" de Longitude Oeste.



Figura 3.1- Solo utilizado como matriz do compósito.

Após a coleta, o material foi submetido à secagem ao ar, até que fosse atingida a umidade próxima à higroscópica. Em seguida, os grãos foram destorroados utilizando-se almofariz e

mão de gral, de acordo com os procedimentos estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 6457 (ABNT, 2024), e homogeneizados.

3.1.2 FIBRA NATURAL DE AÇAÍ

Como material de reforço para o solo, foram utilizadas fibras vegetais provenientes do caroço do açaí (*Euterpe oleracea*), fruto amplamente disponível e comercializado na região amazônica devido à sua abundância. A escolha desse material também se justifica pela relevância socioeconômica da cadeia produtiva do açaí na região Norte do Brasil, responsável por aproximadamente 95% da produção nacional (IBGE, 2026), com destaque para os estados do Pará, Amazonas, Roraima e Rondônia.

As fibras de açaí (Figura 3.2) foram adquiridas de uma empresa especializada na comercialização de biomassa (Popinhak Açaí), localizada em Belém – PA, que propõe soluções sustentáveis com baixo custo.



Figura 3.2- Fibras de açaí utilizadas como elemento de reforço.

Essas fibras são um subproduto residual normalmente descartado após a extração da polpa. No entanto, a referida empresa consegue reaproveitar esse material comercialmente, oferecendo-o como fertilizante orgânico ou prensando-o em diversos artefatos de madeira para posterior venda. Para obtenção das fibras brutas, livres do caroço, são utilizados equipamentos que separam mecanicamente o mesocarpo fibroso do endocarpo por meio de secagem contínua a 200 °C dentro de grandes tambores de aço giratórios (Figura 3.3).



Figura 3.3- Maquinário utilizado no processamento do caroço de açaí para separação das fibras do mesocarpo fibroso por secagem e ação mecânica. (Fonte: Imagem fornecida pela empresa Popinhak Açaí, 2023).

Para fins de identificação e organização dos ensaios de caracterização, as fibras naturais (sem tratamento de impermeabilização superficial) foram denominadas FN0M, enquanto as fibras tratadas com sílica coloidal foram designadas FT0M. Essa nomenclatura foi estabelecida em função da condição de tratamento e do tempo de exposição ambiental das fibras. Assim, a letra "F" refere-se à fibra, "N" e "T" indicam, respectivamente, as condições natural e tratada, enquanto o número associado à letra "M" representa o tempo de exposição em meses. Desse modo, as designações FN0M e FT0M correspondem às fibras na condição inicial, sem exposição ambiental, ao passo que nomenclaturas como FN3M e FT3M representam fibras após três meses de exposição, seguindo a mesma lógica para os demais períodos avaliados.

3.1.3 SÍLICA COLOIDAL

Para fins de investigação comparativa, as fibras de açaí foram empregadas em duas condições experimentais distintas: no estado natural (*in natura*), servindo como grupo de controle, e submetidas a um tratamento superficial inorgânico para impermeabilização. Para esse tratamento, que teve como objetivo elevar a durabilidade e a resistência à biodegradação dos compósitos, adotou-se a sílica coloidal comercial LUDOX® TM-50 (fornecida pela Sigma-Aldrich). Este material consiste em uma suspensão aquosa estabilizada e levemente alcalina, composta por 50% em massa de nanopartículas de dióxido de silício (SiO_2) finamente dispersas.

A escolha desse agente inorgânico, cujo uso tem se mostrado crescente na literatura, deve-se à capacidade de suas nanopartículas penetrarem profundamente na estrutura da fibra. A função metodológica da sílica é depositar uma barreira física e inerte de SiO_2 sobre a parede

celular, reduzindo a absorção de água e blindando a biomassa contra a degradação estrutural e os ataques biológicos no solo.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

3.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

A determinação das propriedades físicas do solo foi conduzida respeitando-se os procedimentos normativos vigentes. Deste modo, a massa específica dos grãos do solo (ρs) foi obtida conforme a norma NBR 6458 (ABNT, 2016a), por meio do ensaio de picnômetro. Já a análise granulométrica do solo foi realizada tanto com o uso da solução dispersora de hexametafosfato de sódio quanto sem o uso dessa solução, seguindo os procedimentos estabelecidos pelas normas NBR 7181 (ABNT, 2025) e NBR 13602 (ABNT, 2020).

Quanto aos limites de consistência, o Limite de Liquidez (LL) foi determinado pelo uso do aparelho de Casagrande, conforme a norma NBR 6459 (ABNT, 2016b), enquanto o Limite de Plasticidade (LP) foi obtido conforme os procedimentos dispostos na norma NBR 7180 (ABNT, 2016c).

O enquadramento geotécnico do solo foi realizado de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), amparado pela norma ASTM D2487 (2017), e pelo método da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), seguindo as diretrizes da ASTM D3282 (2015).

De forma complementar, a matriz argilosa também foi submetida à metodologia de classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), em conformidade com a norma de ensaio DNIT-ME 258/2023 e a norma de classificação DNIT-CLA 259/2023. A aplicação dessa metodologia envolveu a realização de ensaios de compactação em dimensões reduzidas (Mini-MCV) acoplados aos testes de perda de massa por imersão (Pi), cujo processamento de dados possibilitou a extração do coeficiente angular da reta (d'), do coeficiente de argilosidade (c') e, por conseguinte, a determinação do índice de classificação do solo em estudo.

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO

Para a análise da composição química da matriz argilosa, utilizou-se o método de Fluorescência de Raios-X (FRX), que permitiu identificar e quantificar os elementos inorgânicos presentes no solo. O ensaio foi realizado empregando o equipamento modelo Rayny EDX 720HS, da marca Shimadzu, com tensão máxima de 50 kV e corrente máxima de

3 mA, cujas análises foram conduzidas na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de Brasília (UnB).

Adicionalmente, foi realizada a avaliação do pH do solo com o objetivo de determinar o seu grau de acidez ou alcalinidade, seguindo as diretrizes do Manual de Métodos de Análise de Solos da EMBRAPA (Teixeira *et al.*, 2017). O pH foi medido em duas condições: em suspensão aquosa preparada com água destilada e em solução de KCl, utilizando um pHmetro devidamente calibrado.

3.2.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO SOLO

A análise mineralógica do solo foi conduzida com o emprego da técnica analítica de Difração de Raios-X (DRX), visando identificar e caracterizar os minerais que compõem a matriz argilosa. Para a realização deste ensaio, a amostra de solo foi previamente preparada, utilizando-se material seco, destorroado e passado na peneira #200, com análises realizadas no Laboratório de Geociências do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB).

Utilizou-se um difratômetro da marca Rigaku, modelo Última IV, operando com radiação CuKα, configurado com parâmetros padrões para este tipo de material, compreendendo uma faixa de varredura 2θ de 2° a 40° e passo angular de 0,05°. A identificação mineralógica foi baseada no cruzamento dos difratogramas obtidos com padrões de referência de bancos de dados especializados.

3.2.4 TRATAMENTO SUPERFICIAL DAS FIBRAS

O protocolo de tratamento superficial nas fibras foi adaptado de métodos de hidrofobização previamente aplicados a fibras lignocelulósicas (Silveira *et al.*, 2022), incorporando procedimentos de imersão reportados para revestimento em fibras naturais (Nguyen-Tri *et al.*, 2019; Hasanzadeh *et al.*, 2022; Maia *et al.*, 2022).

Com base em protocolos estabelecidos para revestimento com sílica em fibras naturais, que recomendam a diluição de suspensões coloidais comerciais para equilibrar a espessura do revestimento e preservar a flexibilidade das fibras (Signorini *et al.*, 2018; Silveira *et al.*, 2022), duas proporções de diluição sílica:água destilada (1:1 e 1:2) foram avaliadas preliminarmente.

A definição da proporção adotada ao final (1:1), ocorreu com base na avaliação apoiada pelos resultados de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), enquanto o tempo de imersão (48h) foi definido com base no período de saturação determinado no ensaio de absorção de água, de modo a garantir a penetração uniforme da solução nos vazios superficiais.

Para o tratamento, as fibras secas ao ar foram pesadas (±0,001 g), totalmente imersas em solução de sílica coloidal, retiradas após o período de imersão, levemente secas com papel toalha para remoção do excesso de solução e, em seguida, levadas à estufa a 60 °C até massa constante.

Pelas imagens obtidas pelo MEV observou-se que as fibras tratadas superficialmente com sílica coloidal apresentaram morfologias de revestimento distintas, dependendo da concentração de sílica empregada (Figura 3.4a–b).

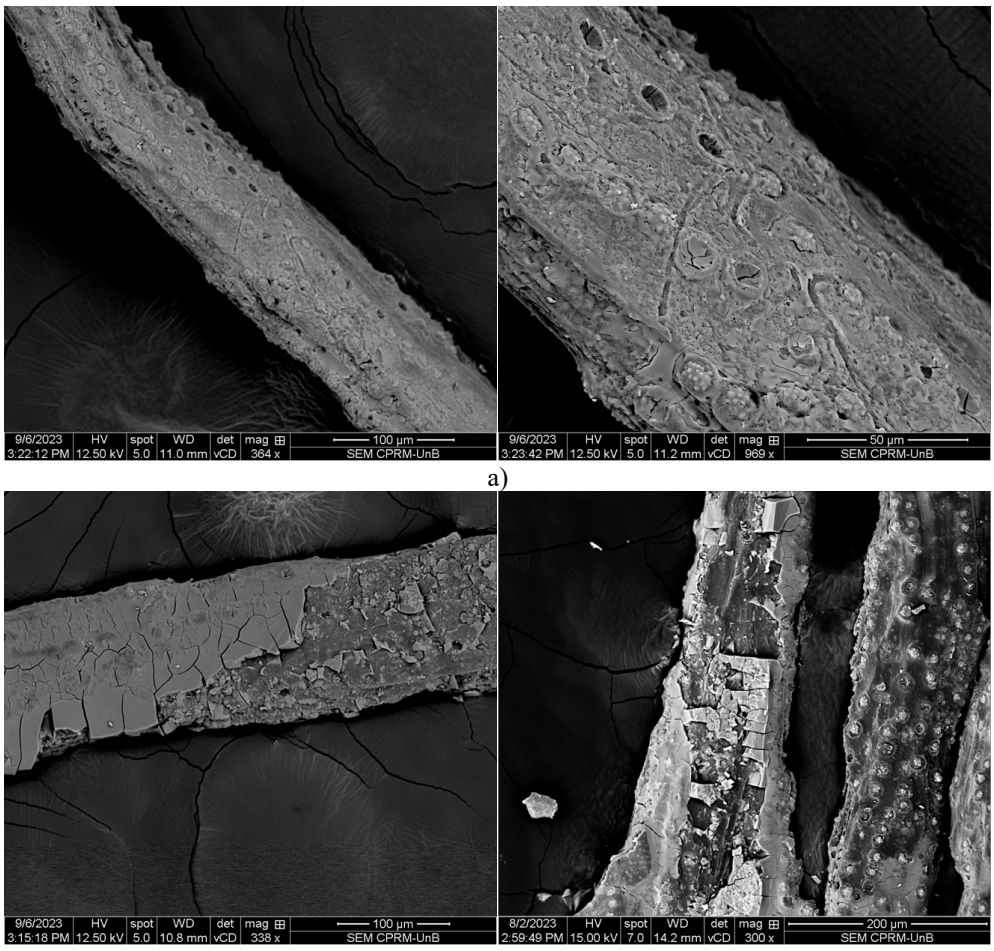


Figura 3.4- Fibras de açaí impermeabilizadas observadas por MEV na proporção de: a) 1:1; b) 1:2.

A diluição 1:1 de sílica coloidal (Figura 3.4a) produziu uma camada de revestimento contínua e aderente, como uma película protetora ao longo de toda a superfície, sem comprometer a integridade estrutural e a maleabilidade do material. Em contrapartida, a diluição 1:2 (Figura 3.4b) resultou em cobertura incompleta, deixando áreas da fibra descobertas e mais susceptíveis à degradação. Com base nessas observações, como antecipado, apenas as fibras tratadas com a diluição 1:1 foram consideradas para as análises posteriores.

A literatura aponta que a película de SiO_2 não altera primariamente a resistência intrínseca do núcleo lignocelulósico (Signorini *et al.*, 2018; Silveira *et al.*, 2022). Dessa forma, a hidrofobização atua diretamente na preservação da integridade interfacial, garantindo a estabilidade a longo prazo do reforço.

3.2.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DAS FIBRAS

A caracterização física das fibras de açaí foi realizada com o objetivo de identificar suas propriedades como densidade e capacidade de absorção de água, parâmetros fundamentais na avaliação do seu desempenho como elemento de reforço em compósitos geotécnicos.

A massa específica das fibras foi determinada em triplicata por picnometria gasosa, utilizando um picnômetro Pentapyc 5200e (Quantachrome intruments), conforme a ASTM D5550 (2023), no Laboratório de Geotecnia da UnB. Este método, realizado com o uso de gás hélio devido à sua capacidade de penetrar nos poros da amostra, permite obter o volume real com alta precisão.

Também foi realizado o ensaio de absorção de água, determinando o quantitativo de água absorvida e o tempo necessário para a saturação, fatores diretamente ligados à durabilidade e degradação natural das fibras. O procedimento experimental adotado seguiu metodologia semelhante à utilizada por Silveira (2018) e Santos (2023), sendo conduzido em triplicata, tanto para fibras não tratadas quanto para fibras tratadas superficialmente, utilizando amostras secas ao ar livre com peso inicial de 1 g, medido em balança analítica Shimadzu ATY224 (resolução de 0,0001 g).

As fibras foram imersas em água destilada à temperatura ambiente em intervalos pré-determinados: 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 24 h, 48 h, 72 h, 96 h e 120 h. Ao final de cada intervalo, elas foram retiradas e o excesso de água foi removido por rotação manual (tipo secador centrífugo doméstico) durante 2 minutos em filtro de papel, e então dispostas em papel toalha para remoção da água superficial, para serem novamente pesadas antes do retorno à imersão.

A Figura 3.5 apresenta as principais etapas do ensaio de absorção de água, abrangendo desde a pesagem inicial das fibras secas até o retorno das amostras à imersão após cada determinação de massa, ao longo dos tempos de exposição estabelecidos. O teor de àgua absorvida foi calculado pela relação entre o peso seco inicial e o peso úmido pós-imersão.

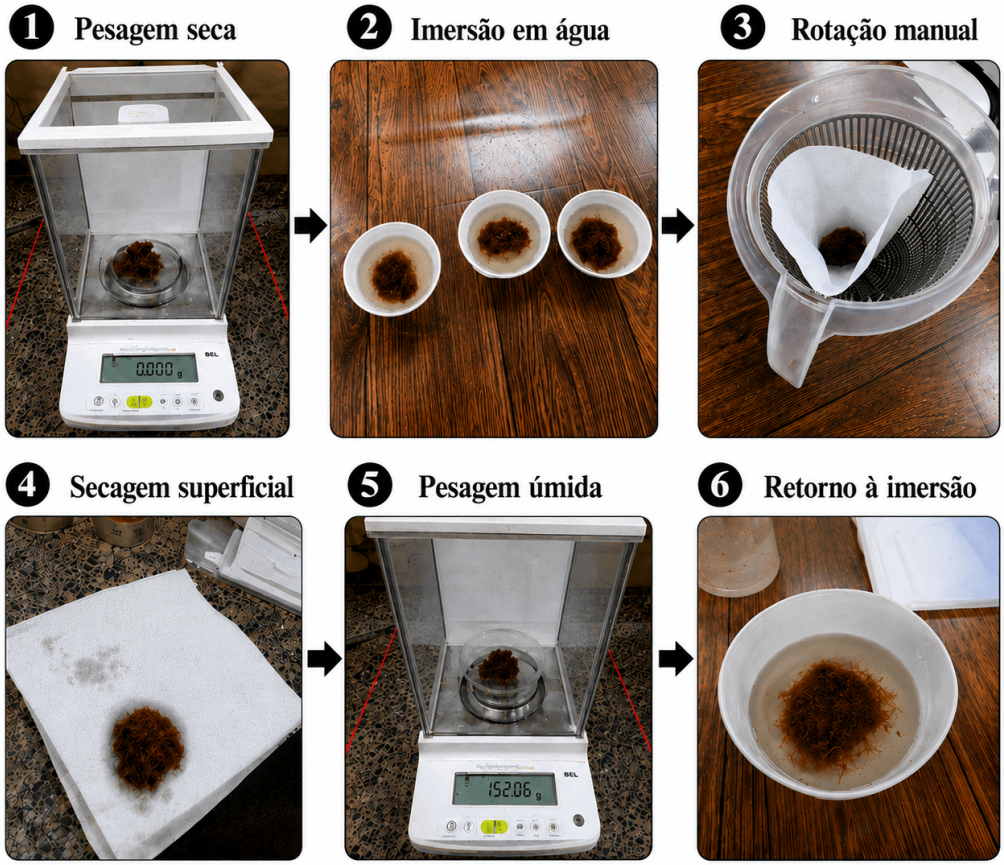


Figura 3.5- Etapas sequenciais do ensaio de absorção de água.

Quanto à caracterização mecânica das fibras de açaí, embora o ensaio de resistência à tração não tenha sido realizado diretamente neste estudo, foram considerados os dados obtidos por Santos *et al.* (2026), referentes às mesmas fibras utilizadas na presente tese.

O procedimento seguiu a norma ASTM C1557 (2020), utilizando máquina universal com velocidade de 0,1 mm/min, em fibras fixadas individualmente em molduras de papel cartão. Nesse contexto, as fibras de açaí apresentaram resistência média à tração de cerca de 250 MPa e módulo de Young de aproximadamente 3,7 GPa, com desempenho associado ao alto teor de lignina.

3.2.6 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DAS FIBRAS

A caracterização química e mineralógica das fibras de açaí foi conduzida com o objetivo de mapear a sua composição orgânica fundamental, identificar os grupos funcionais presentes e quantificar a fração inorgânica do material, fornecendo subsídios essenciais para compreender a sua estabilidade, potencial de degradação e os mecanismos de interação físico-química com a matriz do solo.

Para a caracterização estrutural orgânica, determinou-se os teores de celulose, hemicelulose e lignina pelo método de Gessner (2005), baseado na hidrólise com ácido sulfúrico a 72%.

Realizado no Instituto de Ciências Biológicas da UnB, o procedimento foi realizado em duplicata, conduzido em três etapas principais: remoção de extrativos**,** hidrólise ácida**,** e separação com quantificação dos constituintes.

Inicialmente, para garantir a análise restrita aos componentes estruturais, os extrativos solúveis (como açúcares e compostos fenólicos) foram removidos em um extrator Soxhlet, mediante extrações sequenciais com água destilada e etanol. Após a secagem, as fibras desengorduradas passaram por hidrólise ácida com ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado sob agitação controlada, promovendo a quebra das ligações celulósicas. O material foi então lavado com água quente até a neutralização, seco e submetido à incineração.

A quantificação dos constituintes ocorreu por balanço de massa: o teor de celulose foi determinado pela perda de massa após o tratamento ácido, enquanto a lignina correspondeu ao resíduo sólido remanescente pós-incineração. A hemicelulose, por sua vez, foi calculada de forma indireta, subtraindo-se os percentuais quantificados de extrativos, lignina e celulose da massa total inicial da amostra.

Foi realizada a avaliação do pH das fibras para indicar seu grau de acidez ou alcalinidade, conforme as diretrizes da EMBRAPA (Teixeira *et al.*, 2017). O pH foi determinado em duas condições (água destilada e solução de KCl) utilizando um pHmetro calibrado.

Paralelamente, a caracterização mineralógica foi realizada por meio do ensaio de teor de cinzas, determinado por meio da combustão das amostras em mufla (Fornitec F2-DM), de acordo com a ABNT NBR 13600 (ABNT, 2022). A temperatura foi elevada gradualmente a uma taxa de aproximadamente 10 °C/min até atingir 450 °C, sendo mantida por 12 h para garantir a completa incineração da matéria orgânica. Após a combustão, os cadinhos foram transferidos para um dessecador, onde permaneceram até atingir a temperatura ambiente, evitando a absorção de umidade antes da pesagem. O teor de cinzas, realizado em triplicata, foi calculado como a razão entre a massa final do resíduo e a massa seca inicial da amostra.

Aprofundando a investigação para níveis instrumentais, a Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foi aplicada no equipamento Bruker Alpha II, equipado com acessório de reflectância total atenuada (ATR), para identificar e caracterizar os grupos funcionais da estrutura química das fibras, detectando eventuais alterações pós-tratamento. As análises foram realizadas na faixa espectral de 600 a 3900 cm^{-1}, na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de Brasília (UnB).

Na sequência, o método de FRX foi empregado para identificar e quantificar os elementos inorgânicos nas fibras. O ensaio seguiu as mesmas condições experimentais e foi realizado com

o mesmo equipamento previamente descrito para as amostras de solo, conduzido na Central Analítica do Instituto de Química da UnB.

3.2.7 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DAS FIBRAS

A caracterização térmica das fibras de açaí foi realizada para fornecer informações sobre sua estabilidade térmica**,** decomposição e perda de massa em diferentes faixas térmicas. Para essa análise, foram conduzidos ensaios de Termogravimetria (TGA) e sua derivada, a DTG (Derivada Termogravimétrica), em equipamento DTG-60H (Shimadzu), sob atmosfera de nitrogênio, na faixa de 25 °C a 850 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min. Tais ensaios foram conduzidos na Central Analítica do Instituto de Química da UnB.

3.2.8 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS FIBRAS

Ensaios de DRX para avaliar a estrutura cristalina das fibras de açaí e determinar o índice de cristalinidade do material foram conduzidos na Central Analítica do Instituto de Química da UnB, utilizando um difratômetro D8 FOCUS (BRUCKER), operando na faixa 2θ de 10-70° com *step* de 0,05°e velocidade de 1°/min. O índice de cristalinidade foi calculado utilizando o método de Segal *et al.* (1959), considerando a intensidade máxima do pico cristalino e a intensidade correspondente ao halo amorfo, conforme a Equação 3.1:

$$IC = \frac{I_c - I_a}{I_c} x\ 100 \qquad \text{(Equação 3.1)}$$

Sendo:
IC = Índice de Cristalinidade (%);
I_c = Intensidade máxima do pico cristalino;
I_a = Intensidade correspondente ao halo amorfo.

A morfologia e a geometria das fibras foram caracterizadas utilizando um microscópio eletrônico de varredura Quanta 450 (FEI Company), operado a 15 kV em modo de baixo vácuo (10.200 Pa), no Instituto de Ciências Biológicas (IB) da UnB. Antes da aquisição das imagens, as fibras foram metalizadas com ouro por meio de um sistema Q150R ES Plus (Quorum Technologies). O software ImageJ (Schneider *et al.*, 2012) foi utilizado para delimitar os contornos das fibras e quantificar comprimento, diâmetro e área da seção transversal. Esse procedimento segue metodologias consolidadas para caracterização dimensional de fibras lignocelulósicas por meio de MEV e análise de imagens (Kargarzadeh *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2019).

3.3 ENSAIOS DE COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO E DE DURABILIDADE

3.3.1 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Previamente à realização dos ensaios de caracterização geomecânica dos materiais, foram elaboradas as curvas de compactação por meio de ensaios de compactação conduzidos de acordo com os procedimentos especificados pela norma ABNT NBR 7182 (ABNT, 2025), de modo a relacionar o teor de umidade e sua respectiva massa específica aparente seca (ρ_d). Foram realizados ensaios sem reaproveitamento do material, em cilindro Proctor sob Energia Normal.

A partir da determinação da massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$) e do teor de umidade ótimo ($\omega_{ót}$) do solo/compósito, esses parâmetros foram utilizados como referência para a moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios posteriores.

3.3.2 PREPARAÇÃO E MOLDAGEM DAS AMOSTRAS

Os compósitos solo-fibra (Figura 3.6) foram confeccionados a partir da mistura do solo estudado e de fibras de açaí aleatoriamente dispersas, cujo teor de fibras adotado foi de 1% em relação à massa de solo seco.



Figura 3.6- Compósito solo-fibra de açaí.

A definição do teor de fibras adotado baseou-se nos resultados de ensaios de cisalhamento direto (Figura 3.7) obtidos por Silva *et al.* (2024), que avaliaram o comportamento mecânico do solo natural brasiliense em comparação a compósitos com diferentes taxas de inclusão (1%, 1,5% e 2%), também com fibras de açaí.

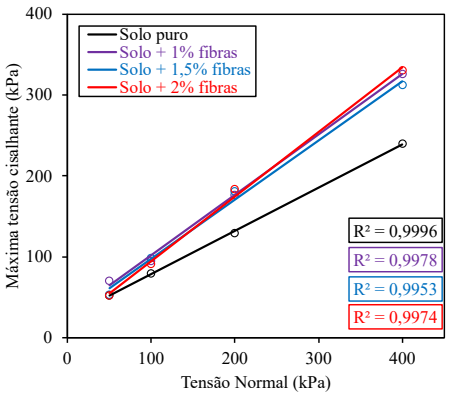


Figura 3.7- Envoltórias de resistência obtidas a partir de cisalhamento direto. (Fonte: Silva *et al.*, 2024).

A análise comparativa revelou que, independentemente da taxa adotada, a adição das fibras promoveu uma elevação substancial e semelhante no ângulo de atrito. O intercepto coesivo, contudo, apresentou um comportamento inversamente proporcional ao aumento da inclusão de fibras. Enquanto o compósito com 1% de fibra conseguiu manter a coesão equivalente à do solo puro, as misturas com teores maiores (1,5% e 2%) registraram quedas progressivas nesse parâmetro.

Somado a esse decréscimo, o incremento no volume de fibras prejudicava consideravelmente a homogeneização e a trabalhabilidade da mistura. Diante desse conjunto de fatores, o teor de 1% foi estabelecido como a dosagem ótima para o presente estudo, uma vez que maximiza os ganhos de atrito sem comprometer a estabilidade coesiva e a viabilidade executiva do material.

Para a confecção dos corpos de prova, a preparação do compósito solo-fibra seguiu um protocolo de homogeneização elaborado para garantir a máxima dispersão do reforço e o controle do teor de umidade. O procedimento consistiu, inicialmente, na adição da água destilada predeterminada ao solo, seguida de sua completa homogeneização manual. Apenas após a hidratação prévia da matriz argilosa, as fibras de açaí foram incorporadas, procedendo-se a uma nova etapa de homogeneização. Todo o processo foi conduzido no interior de sacos plásticos herméticos para prevenir qualquer perda de umidade por evaporação.

Cabe destacar que a sequência operacional adotada diverge de abordagens frequentemente encontradas na literatura, nas quais preconiza-se a mistura a seco do solo com as fibras antes da hidratação. Durante as etapas preliminares deste estudo, constatou-se experimentalmente que a adição de água sobre a mistura solo-fibra seca promovia elevada aglomeração das fibras (formação de grumos), prejudicando substancialmente a dispersão do material. Em contrapartida, a prévia umidificação da matriz argilosa facilitou a distribuição espacial e a incorporação homogênea do reforço no compósito.

Finalizado o processo de mistura, o material era devidamente acondicionado e selado nos sacos plásticos, permanecendo armazenado em câmara úmida pelo mínimo de 12 horas, garantindo o equilíbrio e a distribuição uniforme da umidade em toda a massa de solo-fibra antes que fossem submetidas aos procedimentos de compactação.

Para os ensaios de porosimetria, condutividade hidráulica e compressão triaxial estática, as amostras foram compactadas em moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, utilizando o equipamento Mini-MCV e compactação manual em três camadas. O número de golpes com soquete leve (2,27 kg) foi calculado para reproduzir a mesma energia de compactação específica do ensaio Proctor padrão, ajustando-se os parâmetros (massa do

soquete, altura de queda, número de golpes e camadas) para o volume do molde Mini-MCV. Esse procedimento garantiu a obtenção da massa específica aparente seca máxima com um grau de compactação mínimo de 98% e um desvio de ± 1% em relação ao teor de umidade ótimo.

Por sua vez, para os ensaios de adensamento unidimensional e DSS, cujas amostras demandam dimensões específicas (63,5 mm de diâmetro por 25,4 mm de altura), os materiais foram compactados em cilindro Proctor, e a partir dele os corpos de prova foram moldados pelo processo de talhagem.

Tomando como base a mesma lógica de nomenclatura já estabelecida para as fibras (FN e FT), os corpos de prova do solo e dos compósitos foram identificados de forma análoga. Assim, os prefixos "SP" (Solo Puro), "CN" (Compósito Natural) e "CT" (Compósito Tratado) designam o tipo de material, enquanto o sufixo numérico acompanhado de "M" mantém o mesmo significado já descrito, indicando o tempo de exposição ambiental em meses (ex.: 0M para a condição inicial, 3M para três meses, e assim por diante).

3.3.3 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (PIM)

Para investigar as alterações microestruturais na matriz argilosa e avaliar a potencial criação de macroporos decorrente da inserção das fibras de açaí, realizaram-se ensaios de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM), cujas análises comparativas englobaram tanto o solo puro compactado quanto os compósitos solo-fibra.

O princípio físico da técnica fundamenta-se na aplicação de pressões externas gradativas por mercúrio, para forçar a sua penetração nos vazios internos da amostra. Uma vez que a pressão requerida para a intrusão é inversamente proporcional ao tamanho do capilar acessado, o monitoramento contínuo do volume de mercúrio intrudido permite correlacionar a pressão aplicada à dimensão da cavidade, resultando no perfil da rede de vazios através do diâmetro médio dos poros e a sua frequência de distribuição.

Os procedimentos experimentais foram executados nas instalações do Laboratório do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo (IFSC-USP), empregando-se o equipamento Micromeritics Poresizer (modelo 9320 V2.04), sob as diretrizes metodológicas estabelecidas pela norma ASTM D4404 (ASTM, 2018).

3.3.4 ACONDICIONAMENTO E EXPOSIÇÃO DOS COMPÓSITOS

Para a condução da etapa de avaliação de durabilidade, os corpos de prova moldados foram confinados lateralmente com lona plástica para a proteção de sua integridade estrutural, em seguida identificados e depois alocados em caixas perfuradas, cujo fundo foi revestido com

geotêxtil não tecido, garantindo a retenção da fração fina do material e a livre circulação de ar e drenagem.

O sistema foi exposto de forma ininterrupta aos ciclos climáticos da cidade de Brasília/DF por um período de dois anos (janeiro de 2024 a janeiro de 2026), cujo arranjo se encontra representado na Figura 3.8.



Figura 3.8- Ilustração de compósitos compactados, da forma e local de exposição.

O material foi submetido a constantes ciclos de secagem e umedecimento, cujas variáveis meteorológicas monitoradas foram obtidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), estação Brasília (83377). Nesse contexto, a Figura 3.9 apresenta dados das condições ambientais de exposição (precipitação pluviométrica, temperatura média e umidade relativa do ar) ao longo dos 24 meses, cujas variações sazonais atuaram como os agentes termodinâmicos primários para a degradação lignocelulósica e as trocas iônicas no sistema.

Durante os 24 meses, o regime climático apresentou marcada sazonalidade, típica de Savana Tropical (Aw). O período seco (maio a setembro) teve precipitação nula ou ≤ 2 mm, umidade relativa mínima de 31,5% e temperatura máxima de 24,7 °C. Já o período chuvoso (outubro a abril) atingiu até 389,7 mm/mês, com umidade >75% e temperaturas amenas (≈ 22–23 °C).

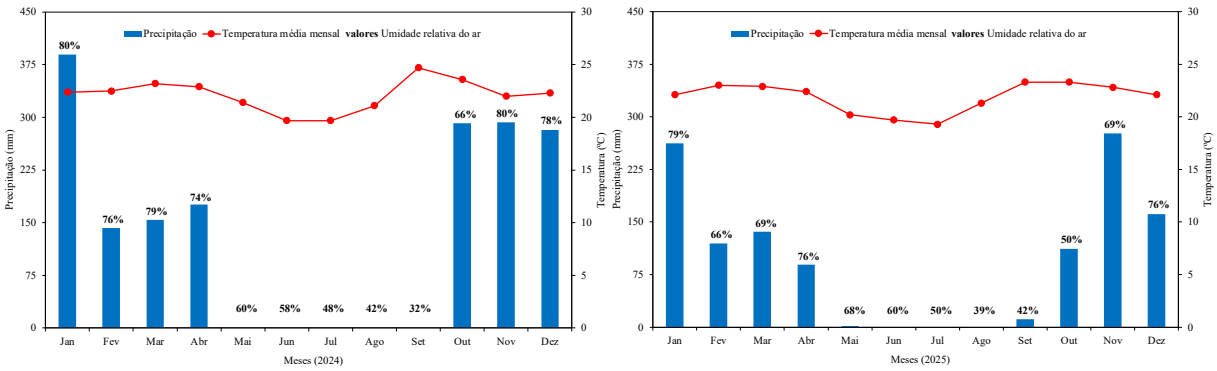


Figura 3.9- Gráfico de temperatura, precipitação e umidade registradas em Brasília para os anos de 2024 e 2025.

3.3.5 ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL

O ensaio de adensamento unidimensional, também conhecido como ensaio de compressão edométrica, foi realizado com o objetivo de avaliar as propriedades compressíveis do solo e do compósito solo-fibra. Tais experimentos foram conduzidos no laboratório *New Geotechnical Materials* (UnB), seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 16853 (ABNT, 2020) e utilizando o equipamento Sheartrac (GEOCOMP), representado na Figura 3.10, capaz de realizar tanto ensaios de adensamento quanto de DSS.

Foram realizados ensaios na condição inundada, desde o início, cujo procedimento incluiu estágios de carregamento e de descarregamento, com tensões normais aplicadas de forma incremental, nos seguintes níveis: 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa e 800 kPa. Durante os ensaios, foram monitoradas as variações de altura dos corpos de prova ao longo do tempo, permitindo a determinação de parâmetros fundamentais à compreensão do comportamento avaliado.

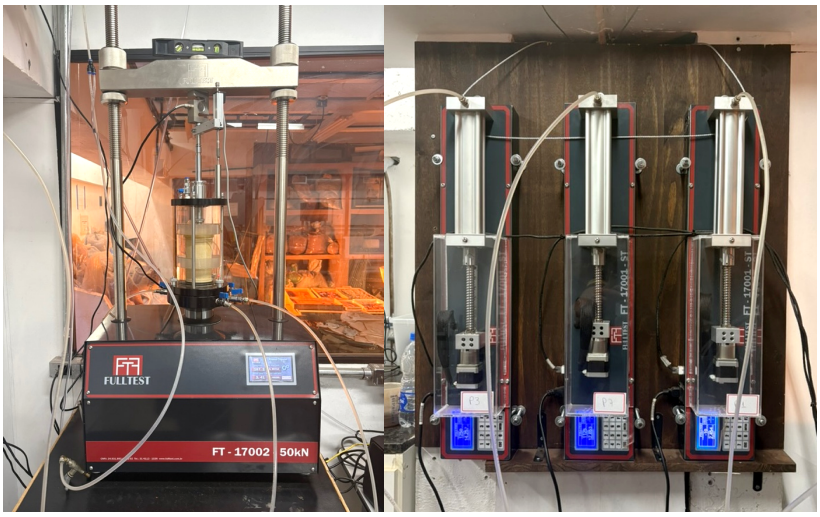


a) b)

Figura 3.10- Equipamento de adensamento (Geocomp): a) visão geral; b) câmara de adensamento.

3.3.6 TRIAXIAL MONOTÔNICO

A avaliação da resistência ao cisalhamento e condutividade hidráulica do solo e dos compósitos foi realizada por meio de ensaios triaxiais consolidados drenados (CD) do laboratório *New Geotechnical Materials* (UnB), no equipamento FT-17002 da Fulltest (Figura 3.11), que opera pressões confinantes de até 3,2 MPa. Esse tipo de ensaio caracteriza-se pela aplicação de um carregamento suficientemente lento de forma a garantir a completa dissipação das poropressões geradas, resultando na determinação direta dos parâmetros efetivos de resistência e no monitoramento da variação volumétrica ao longo do cisalhamento.



a) b)

Figura 3.11- Equipamento triaxial (Fulltest): a) prensa e câmara triaxial; b) pressurizadores.

A rotina experimental seguiu as premissas estabelecidas pela norma ASTM D7181 (2020) e consistiu na avaliação de tensões confinantes de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa, de modo a contemplar uma ampla faixa de confinamentos que representa diferentes cenários de aplicação prática, desde carregamentos superficiais (fundações rasas e aterros de pequena altura) até situações de maior solicitação (grandes aterros e fundações profundas). Nesse contexto, a condução dos ensaios englobou três etapas sequenciais: saturação, adensamento isotrópico e cisalhamento.

A saturação foi realizada pelo método de rampa, impondo-se uma diferença constante de 20 kPa entre a tensão confinante e a contrapressão, com aplicação sucessiva de 50 kPa por hora. O aceite do estado de saturação deu-se por meio da verificação do parâmetro B de Skempton (1954), exigindo-se valores de $B \geq 0{,}95$, calculado conforme a Equação 3.2:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \qquad \text{(Equação 3.2)}$$

Sendo:
Δu = Variação da poropressão;
$\Delta \sigma_3$ = Variação da pressão confinante.

Garantida a saturação, a etapa de consolidação foi iniciada elevando-se a tensão confinante até o valor nominal do ensaio, mantendo-se a contrapressão constante. Nessa etapa, a abertura da válvula de drenagem permitiu a dissipação gradual e total do excesso de poropressão, até sua estabilização. O monitoramento automático da variação volumétrica em função da raiz quadrada do tempo permitiu a determinação gráfica do tempo correspondente a 90% do adensamento primário (t_{90}), parâmetro que serviu de base para o cálculo da velocidade de cisalhamento (Equação 3.3), assegurando que o carregamento não induzisse subpressões:

$$v\ (\mathrm{mm/min}) = \frac{4\%.L}{10.t_{90}} \qquad \text{(Equação 3.3)}$$

Sendo:
L = altura do corpo de prova (mm);
t_{90} = tempo necessário para ocorrer 90% do adensamento primário (mm), considerando-se ensaios do tipo CD, sem a presença de drenos laterais.

Com base nesse cálculo, definiu-se a velocidade de cisalhamento padrão igual a 0,05 mm/min para todos os ensaios, velocidade esta confirmada pelo monitoramento da poropressão, que se manteve nula durante todo o trajeto de ruptura.

Na etapa final de cisalhamento, os corpos de prova foram submetidos à tensão desviadora até aproximadamente 20% de deformação axial, com a válvula de contrapressão permanentemente aberta para garantir as premissas do ensaio CD. Foram ensaiados 10 corpos de prova (5 de solo puro e 5 de compósito solo-fibra), para a condição inicial de referência (sem tratamento e sem envelhecimento), cujos dados subsidiaram a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (intercepto coesivo (c') e ângulo de atrito (φ')), fundamentais para avaliar o comportamento do solo e sua aplicação em projetos de engenharia geotécnica.

Especificamente para os ensaios triaxiais, um identificador numérico foi acrescentado ao final da sigla para representar a tensão de confinamento efetiva aplicada (em kPa). Desse modo, a identificação CN0M50, por exemplo, refere-se ao compósito natural no tempo zero, ensaiado sob uma tensão confinante de 50 kPa.

A análise da condutividade hidráulica foi realizada para avaliar a capacidade do solo e do compósito em permitir o fluxo de água através de sua estrutura, parâmetro essencial no comportamento hidráulico para aplicações geotécnicas, como barragens, aterros e fundações, onde o controle do fluxo de água é crítico para a estabilidade e o desempenho das estruturas.

Os ensaios foram realizados em condições de fluxo constante, sob as diretrizes da norma ASTM D5084 (ASTM, 2024a), conduzidos diretamente nos corpos de prova dos ensaios triaxiais, logo após a etapa de saturação, cujos coeficientes hidráulicos foram calculados com referência à temperatura de 20 ºC ($k_{20\,^{\circ}C}$).

O procedimento consistiu na aplicação de um gradiente hidráulico controlado (entre 2 e 6 kPa), sem que houvesse alterações na estrutura dos corpos de prova, com monitoramento contínuo do fluxo de água. Na prática, após a confirmação da saturação e aplicado o referido incremento, sendo este valor a diferença de pressão entre os pressurizadores do topo e da base, foi aberta a válvula de drenagem da base para que a água pudesse percolar. Em seguida, após a

estabilização do fluxo percolado, foram iniciadas as medições do volume deslocado, cujas leituras foram registradas a cada 5 minutos.

3.3.7 CISALHAMENTO SIMPLES DIRETO (DIRECT SIMPLE SHEAR - DSS)

De forma complementar à caracterização realizada no equipamento triaxial, executou-se uma campanha de ensaios de Cisalhamento Simples Direto (DSS - *Direct Simple Shear*) (Figura 3.12) com o intuito de refinar a análise de rigidez dos materiais. Enquanto o ensaio triaxial avalia a rigidez de maneira indireta sob compressão cilíndrica (cálculo de módulo secante a partir da curva tensão-deformação axial), o equipamento DSS permite a medição mais direta da rigidez ao cisalhamento, submetendo a amostra a um estado de tensões de corte contínuo.



a) b)

Figura 3.12- Ensaio de DSS (Geocomp): a) amostra em processo de montagem; b) amostra sob ensaio.

Cabe ressaltar, contudo, que por exigência normativa, as condições de contorno diferem substancialmente entre as duas metodologias. Diferentemente dos ensaios triaxiais CD, nos quais há variação volumétrica, o programa experimental do DSS consistiu em ensaios monotônicos não inundados executados sob controle de volume, correspondente à resposta não drenada do material.

Os procedimentos seguiram as diretrizes da norma ASTM D6528 (ASTM, 2024b), empregando o equipamento ShearTrac (Geocomp). Assim como nos ensaios triaxiais, foram ensaiados 10 corpos de prova (5 de solo puro e 5 de compósito solo-fibra), na condição inicial de referência (sem tratamento e sem envelhecimento), aplicando-se uma taxa de deslocamento de 0,021 mm/min, determinada em conformidade com os critérios da referida norma.

3.3.8 AVALIAÇÃO MULTIESCALA DA DURABILIDADE

Ao longo de todo o período analisado (24 meses), os corpos de prova foram coletados em recortes temporais pré-estabelecidos e submetidos ao programa de ensaios, cujos procedimentos executivos e normas aplicáveis já foram detalhados anteriormente. Neste tópico, portanto, apresentam-se os detalhes metodológicos específicos de cada investigação no âmbito da exposição ambiental prolongada.

Para assegurar uma progressão lógica entre as diferentes escalas de investigação, o programa experimental de durabilidade foi estruturado partindo das evidências visuais, avançando para a caracterização físico-química e culminando na avaliação do desempenho mecânico. Dessa forma, os ensaios seguiram a seguinte ordem estratégica:

- Inspeção Visual e Macroscópica: consistiu no ponto de partida para avaliar a integridade física das fibras e das matrizes dos corpos de prova após a exumação. Para tanto, os corpos de prova foram destorroados e o material foi passado em peneira, retendo-se as fibras para inspeção enquanto o solo fino era descartado, permitindo o contraste visual entre o aspecto do material natural e o tratado;
- Potencial Hidrogeniônico (pH): realizado em suspensões de água e solução de KCl para mapear a evolução da alcalinidade do ambiente de confinamento ao longo do tempo, de forma a identificar o momento de virada do pH que atua como gatilho cinético para a hidrólise das cadeias poliméricas;
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): conduzida tanto em amostras intactas quanto em fibras exumadas para visualizar a evolução estrutural em escala micrométrica, com foco na investigação da morfologia das fibras envelhecidas e o monitoramento do estado de conservação do intertravamento intergranular com a matriz terrosa;
- Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM): aplicada não apenas para avaliar a integridade da rede de macroporos, mas com o objetivo central de determinar o colapso estrutural das fibras naturais;
- Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR): empregada para investigar a dinâmica de deterioração em nível molecular, com avaliação de potenciais alterações nos espectros associados à lignina, hemicelulose e celulose nas fibras naturais, em paralelo à aferição da estabilidade química do revestimento inorgânico de sílica;
- Fluorescência de Raios-X (FRX): utilizada para quantificar a intensidade da dinâmica biogeoquímica na interface solo-fibra ao longo da exposição, mapeando potenciais

processos de lixiviação de elementos nativos e a incorporação interativa de minerais oriundos da argila circundante;

- Ensaios de Compressão Triaxial (CD): etapa da investigação com objetivo de mensurar a repercussão do envelhecimento ambiental sobre as propriedades de engenharia do compósito ao longo do tempo, focando na quantificação da resistência ao cisalhamento (envoltórias), rigidez inicial, resposta volumétrica e capacidade de absorção de energia (tenacidade). As tensões confinantes de 50, 100, 200, 400 e 800 kPa foram mantidas em relação ao ensaio de referência no tempo zero, e para cada período de exposição e condição de compósito (natural e tratado) foram ensaiados 5 corpos de prova. A estratégia de amostragem contemplou coletas mensais do 1º ao 6º mês e, a partir desse período, coletas trimestrais até o fim dos 24 meses. Essa periodicidade foi estabelecida para capturar, com maior resolução, eventuais alterações nos estágios de degradação que poderiam refletir no comportamento geomecânico dos compósitos envelhecidos. Embora tenham sido executados em todas as coletas mensais do primeiro semestre, os resultados triaxiais obtidos para os meses consecutivos iniciais não apresentaram variações significativas nos parâmetros de resistência, optando-se, dessa forma, por apresentar os dados geomecânicos em intervalos trimestrais, garantindo a clareza gráfica e a objetividade da análise, sem perda de informações relevantes;
- Condutividade Hidráulica: ensaios sob fluxo constante executados para avaliar a manutenção da viabilidade drenante da rede e investigar a influência das alterações microestruturais ou volumétricas das fibras sobre a permeabilidade global do sistema. Os ensaios foram realizados nos mesmos tempos de exposição dos corpos de prova triaxiais, uma vez que foram conduzidos após a etapa de saturação destes, garantindo a correlação direta entre a evolução da permeabilidade e os demais parâmetros geomecânicos ao longo do envelhecimento.

3.4 PROVA DE CARGA EM MODELO FÍSICO REDUZIDO

Para avaliar o comportamento carga-recalque e os mecanismos de ruptura, foram realizados ensaios de prova de carga em placa em um modelo físico reduzido, em que as camadas de solo argiloso e de compósito solo-fibra foram compactadas em uma caixa cúbica de acrílico (75x75x75 cm) enrijecida com cantoneiras metálicas. Embora a maioria dos estudos em modelos físicos reduzidos com provas de carga em placa concentre-se em solos granulares, investigações em solos finos são significativamente mais escassas, o que torna a presente pesquisa um avanço na compreensão do comportamento carga-recalque desses materiais. As

singularidades da matriz argilosa laterítica impõem respostas distintas das observadas em areias, justificando a necessidade de estudos específicos em escala reduzida para solos finos tropicais.

O sistema de aplicação de carga consistiu em um pórtico servo-motor automatizado (Owntec) (Figura 3.13) equipado com célula de carga de 100 kN, cujo modelo empregou uma placa circular de aço (D = 15 cm e espessura de 2,54 cm) sobre um leito de solo com 50 cm de espessura.

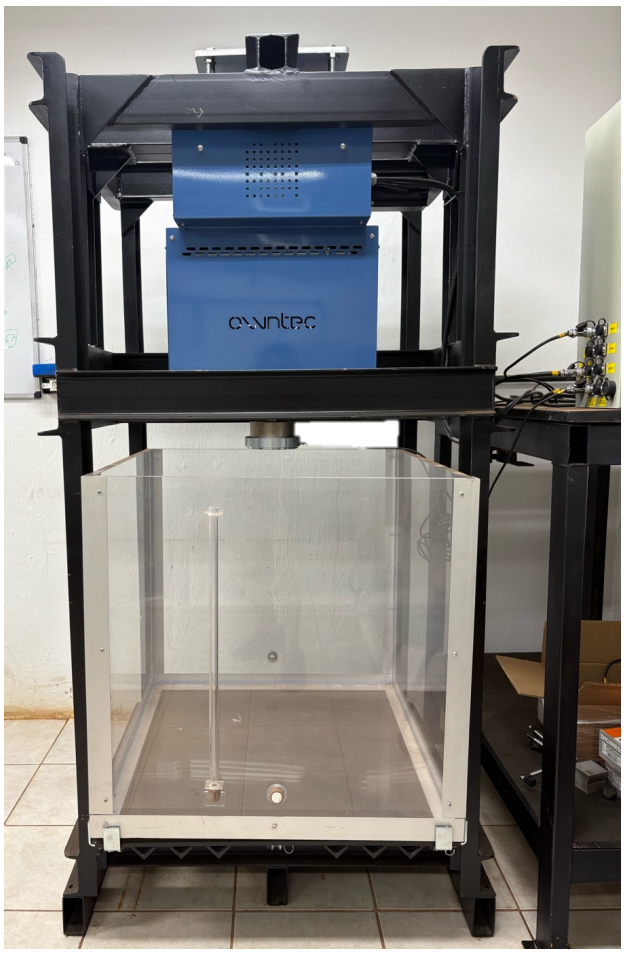
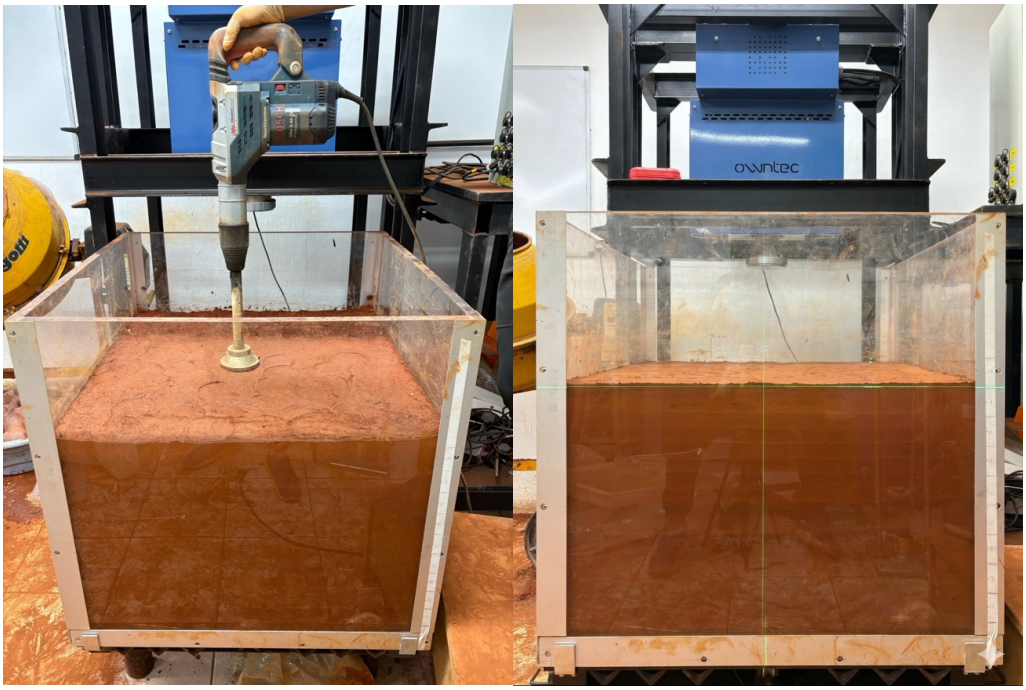


Figura 3.13- Pórtico com sistema automatizado de aplicação de carga em placa (Owntec).

Avaliou-se o solo natural e o compósito, sem envelhecimento e sem fibras tratadas, cujas misturas foram homogeneizadas da seguinte forma: para o solo não reforçado, o solo seco e o volume integral de água foram inseridos na betoneira, com posterior acionamento do equipamento para a homogeneização, com tempo padronizado em 5 minutos. Para os compósitos, foi adotada a seguinte sequência executiva: (i) inserção de todo o solo seco no equipamento; (ii) adição de aproximadamente 50% do volume de água calculado e homogeneização na betoneira (5 minutos); e (iii) inserção das fibras de açaí e do volume restante de água até a completa homogeneização na betoneira (5 minutos).

A estruturação de cada modelo consumiu cerca de 500 kg de material, compactado por martelete vibratório elétrico (Bosch) (Figura 3.14a), em 10 camadas escarificadas de 5 cm. O rigoroso controle de massa, volume e cota (via nível a laser, Figura 3.14b) garantiu um grau de compactação alvo de 90% da massa específica aparente seca máxima e a manutenção da umidade ótima. A adoção de 90% simula condições operacionais realistas de subleitos e justifica-se pela dificuldade de compactação em laboratório (Taha *et al.*, 2020). Simultaneamente, o controle do teor de umidade foi atestado por meio da coleta de amostras de todas as camadas, garantindo a permanência na faixa de projeto.

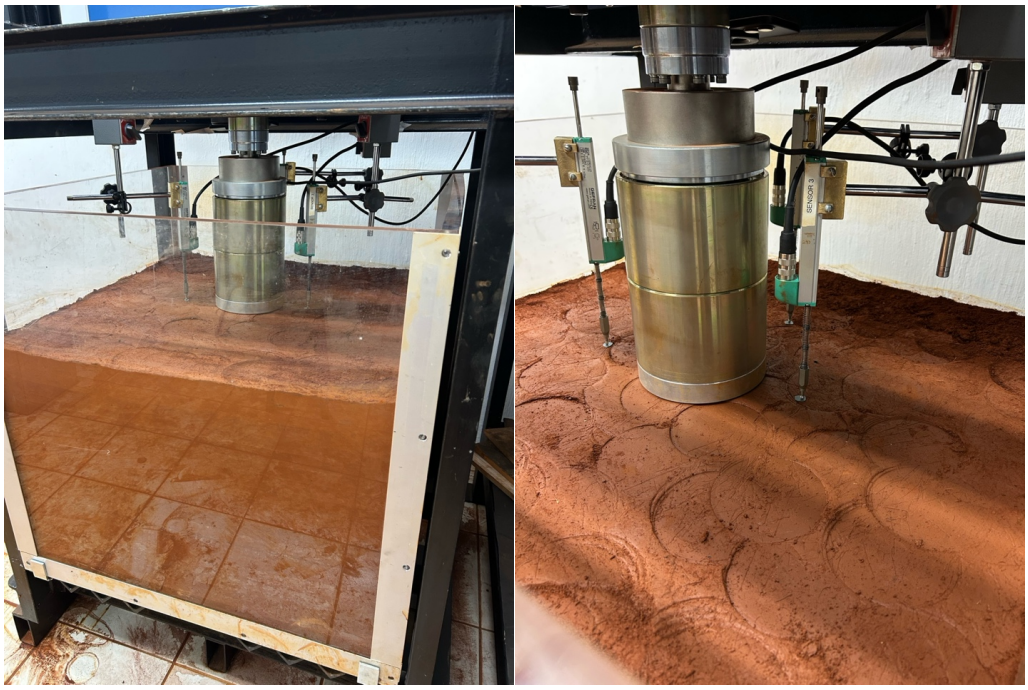


a) b)

Figura 3.14- Execução da compactação dos modelos: a) martelete vibratório elétrico aplicado à última camada; b) controle de nivelamento do topo da camada com nível a laser.

Em virtude de restrições no curso livre do equipamento em relação à cota de topo do estrato compactado, foram acoplados espaçadores metálicos rígidos de mesma seção transversal sobre a placa (Figura 3.15a), conectando-a efetivamente à célula de carga e assegurando a transmissão vertical e perpendicular dos esforços.

O recalque central foi registrado pelo atuador, enquanto o levantamento da bacia de deslocamentos superficiais foi realizado por três transdutores lineares (LVDTs Gefran PY2F), posicionados radialmente a 5 cm, 7,5 cm e 10 cm da borda da placa (Figura 3.15b). Esse mapeamento periférico é essencial para identificar a cinemática da falha (ruptura geral, local ou puncionamento), corroborando metodologias consolidadas de análise de interação solo-reforço (Consoli *et al.*, 2003; Ferreira *et al.*, 2021; Mirzababaei *et al.*, 2017; Sotomayor & Casagrande, 2018).



a) b)

Figura 3.15- Montagem do ensaio de placa: a) visão geral dos espaçadores metálicos sobre a placa; b) detalhe do arranjo dos transdutores externos posicionados radialmente.

O procedimento de carregamento atendeu à ABNT NBR 6489 (ABNT, 2019), com estágios sucessivos limitados a 20% da tensão de ruptura prevista. A estabilização do estágio ocorreu quando a variação entre leituras consecutivas não excedeu 5% do recalque total vigente. O carregamento estendeu-se ininterruptamente além da ruptura, esgotando o curso do equipamento para garantir o monitoramento do comportamento em grandes deformações.

Para isolar o efeito de escala do equipamento e avaliar as propriedades constitutivas intrínsecas do material, o Módulo de Deformabilidade inicial (E_s) foi derivado pela solução clássica de Boussinesq (1885) para placa circular rígida em semi-espaço elástico, conforme a Equação 3.4:

$$E_s = \frac{\kappa . \pi . B . (1 - \nu^2)}{4} \qquad \text{(Equação 3.4)}$$

Sendo:

κ = rigidez inicial da curva tensão-recalque (kPa/m);

B = 0,15 m, referente ao diâmetro da placa utilizada no ensaio; e

ν = 0,40, referente ao coeficiente de Poisson adotado.

A rigidez inicial (κ) foi extraída por regressão linear, aplicada ao terço inicial da carga última, cuja escolha restringe a estimativa à fase pseudo-elástica, correspondente às tensões de trabalho reais de uma fundação com fator de segurança 3, o que valida a teoria elástica antes da

plastificação (Das, 2010). O emprego da regressão linear neste trecho foi crucial para suprimir o viés de redução provocado pelo afundamento inicial de adaptação da placa ao solo (*seating error*), garantindo a captura da verdadeira rigidez estrutural. A partir da fase pós-elástica, os módulos secantes sucessivos foram calculados iterativamente utilizando os respectivos pares de tensão-recalque. Já o valor adotado de $\nu = 0{,}40$ é amplamente recomendado na literatura (Bowles, 1996; Das, 2010) como representativo para solos argilosos compactados, onde a dilatação volumétrica direcional é permitida.

4 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E DAS FIBRAS

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

A massa específica dos sólidos (ρ_s), parâmetro fundamental na caracterização física dos solos, determinada pelo ensaio de picnômetro, apresentou resultado igual a 2,67 g/cm³, correspondendo a um peso específico dos sólidos (γ_s) de 26,17 kN/m³ e a uma densidade relativa dos sólidos (G_s) de aproximadamente 2,67. Os valores encontrados são consistentes com a densidade usualmente reportada na literatura para solos argilosos, semelhante aos trabalhos de Pierozan (2018) e Santos (2023), que utilizaram o solo coletado na mesma localidade e em profundidades semelhantes.

A distribuição granulométrica do solo é ilustrada na Figura 4.1, onde constam as curvas granulométricas obtidas com e sem o uso de defloculante.

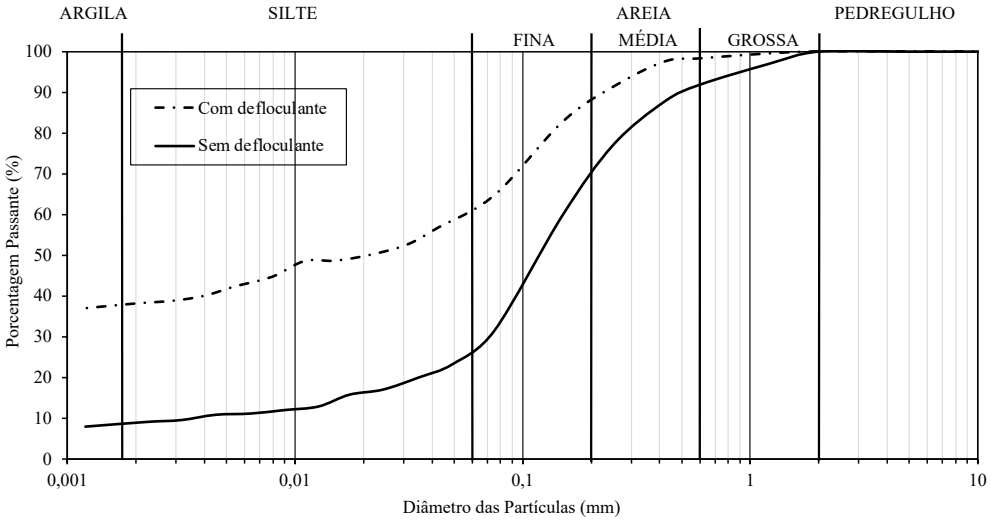


Figura 4.1- Curvas granulométricas do solo investigado (com e sem defloculante).

A curva granulométrica indica que o solo analisado com uso de agente dispersor é predominantemente composto por frações finas, com um elevado percentual de partículas classificadas como silte e argila. Esse comportamento é característico de solos coesivos, em que é esperada uma menor permeabilidade e maior capacidade de retenção de água.

Sem o uso de dispersante químico, a análise granulométrica subestimou a fração argilosa devido à tendência das partículas finas a se aglomerarem em agregações, formando estruturas de maior tamanho aparente. Consequentemente, a fração predominante indicada foi a areia, o que poderia levar a uma classificação imprecisa do solo. Esse comportamento é típico de solos tropicais lateríticos, especialmente aqueles com presença de óxidos de ferro e alumínio, nos quais as partículas finas apresentam forte tendência à agregação, dificultando sua completa dispersão durante o ensaio.

A Tabela 4.1 apresenta, com base nos limites convencionais (ABNT NBR 7181, 2016), a separação entre a argila (<0,002 mm), o silte (0,002 – 0,075 mm) e a areia (0,075 –2 mm), com e sem o uso do agente dispersor, considerando a porcentagem respectiva presente na amostra.

Tabela 4.1- Porcentagem de frações granulométricas do solo

Material	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Solo com uso de defloculante	38,98	23,24	37,78
Solo sem uso de defloculante	72,85	18,21	8,94

A análise granulométrica confirmou que o solo estudado possui predominância de frações finas (61,02%), considerando o parâmetro D < 0,075 mm, sugerindo tratar-se de um solo com elevada proporção de argila.

Com relação aos Limites de Atterberg, que representam parâmetros fundamentais para a caracterização da plasticidade e do comportamento mecânico dos solos finos, a Tabela 4.2 indica os valores obtidos para os Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), além do Índice de Plasticidade (IP) do solo analisado.

Tabela 4.2- Limites de Atterberg e índice de plasticidade do solo

Material	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo de Brasília	40	28	12

Os valores obtidos para os Limites de Atterberg estão em conformidade com os estudos de Pierozan (2018) e Santos (2023), que também analisaram o solo da região de Brasília, apresentando características similares. Observa-se que o índice de plasticidade é relativamente baixo em relação à porcentagem de argila obtida na análise granulométrica com uso de defloculante, comportamento característico de solos tropicais em que parte da fração classificada como argila não corresponde necessariamente a argilominerais ativos.

Com bases nos resultados supracitados, o sistema SUCS classifica este solo como ML, inerente a solo siltoso de baixa plasticidade. Já pelo sistema AASHTO, o solo se enquadra no grupo A-6(6), sugerindo baixa capacidade de suporte. Essas classificações corroboram com os resultados obtidos de Pierozan (2018), cujas características semelhantes foram apontadas para o mesmo solo.

Considerando as limitações dos sistemas tradicionais na representação do comportamento de solos tropicais, a classificação do solo foi realizada pela metodologia MCT. Essa abordagem permite uma caracterização adaptada às condições típicas de formação dos solos em regiões tropicais e subtropicais, cujas particularidades não são plenamente contempladas por sistemas desenvolvidos para solos de clima temperado (Villibor & Alves, 2019). Nesse contexto, o solo

foi classificado como LG', representativo de solo laterítico argiloso de baixa expansividade, baixa perda de suporte e baixa permeabilidade.

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO

O ensaio de FRX no solo permitiu a quantificação dos principais óxidos presentes na amostra, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Composição química presente no solo pelo ensaio de FRX

Composição química (%)										
Al_2O_3	**SiO_2**	**Fe_2O_3**	**TiO_2**	**K_2O**	**MgO**	**CaO**	**P_2O_5**	**Na_2O**	**MnO**	**P.F.**
37,99	23,24	16,21	2,18	0,19	0,08	0,06	0,05	0,04	0,01	19,96

Nota: P.F. = Perda ao Fogo.

A análise por FRX revelou a presença majoritária de óxidos inorgânicos, com destaque para Al_2O_3 (37,99%), SiO_2 (23,24%) e Fe_2O_3 (16,21%), seguidos por menores teores de TiO_2 (2,18%), K_2O (0,19%) e outros elementos cujos quantitativos são muito baixos.

A perda ao fogo, determinada a 1000°C, foi de 19,96%, indicando uma fração significativa de componentes voláteis, como água adsorvida, água de constituição de minerais argilosos e matéria orgânica presente no solo. Estudos anteriores reportaram a importância da perda ao fogo de solos argilosos, como a pesquisa de Torres *et al.* (2018), cuja perda ao fogo foi associada ao conteúdo de carbonatos e à liberação de água dos argilominerais e minerais hidratados.

Neste estudo, a perda ao fogo aferida sugere a presença de minerais argilosos hidratados e/ou água estrutural associada a hidróxidos, típicos de solos argilosos. A baixa concentração de CaO (0,06%) e P_2O_5 (0,05%) descarta contribuição relevante de carbonatos ou matéria orgânica residual, reforçando que a perda ao fogo está predominantemente ligada à desidratação de argilas.

Os valores de pH medidos em água destilada e em solução de KCl fornecem informações complementares sobre as características químicas do solo. Neste estudo, o pH do solo argiloso foi de 6,20 em água destilada e de 6,67 em KCl, indicando que o solo apresenta um caráter levemente ácido, característica comum a solos brasileiros, pela grande lixiviação das bases e alta intemperização (Ernani, 2008). Essa diferença, com o pH medido em KCl sendo ligeiramente superior, pode ser atribuída à liberação de cátions básicos presentes no solo durante o contato com a solução de KCl, que neutralizam potenciais cargas superficiais e influenciam o equilíbrio iônico da amostra.

A ausência de minerais alcalinos e os baixos teores de CaO (0,055%) e MgO (0,076%) indicam a inexistência de um efeito tamponante significativo, mantendo o pH do solo em níveis

moderadamente ácidos. Esses resultados sugerem que o solo possui uma capacidade moderada de troca catiônica, e sua estrutura mineral contribui para um equilíbrio químico relativamente estável. Em termos práticos, esse comportamento é vantajoso para aplicações geotécnicas, uma vez que um pH próximo da neutralidade tende a reduzir o potencial de agressividade química ao concreto e a favorecer a estabilidade das interações solo-estrutura.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO SOLO

A análise mineralógica do solo feita pelo DRX revelou a presença dos principais minerais encontrados no solo, conforme a Figura 4.2.

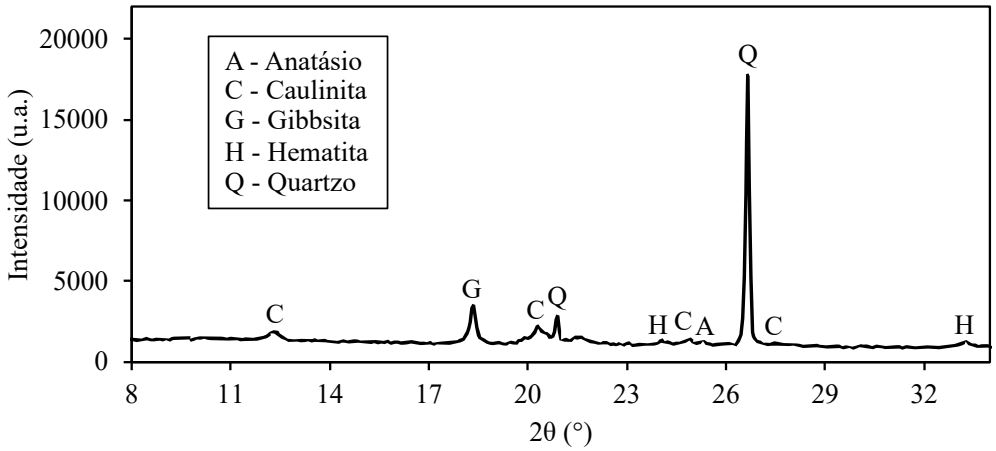


Figura 4.2- Mineralogia do solo investigado por DRX.

Os resultados mostrados no difratograma indicaram a presença de caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), gibbsita ($Al(OH)_3$), quartzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3) e anatásio (TiO_2) como minerais constituintes da porção analisada.

A presença do quartzo indica que uma parcela do silício está presente na forma de SiO_2 livre, enquanto a presença de caulinita, mineral argiloso conhecido por suas baixa plasticidade e compressibilidade, reforça a classificação realizada no solo como argiloso (LG'). Além disso, como destacado por Medeiros *et al.* (2019), o mineral caulinita é um componente típico de solos lateríticos, corroborando com o comportamento estudado em Brasília, cujo material é amplamente conhecido dessa maneira.

A identificação de gibbsita reforça o elevado grau de intemperismo e oxidação do material, sendo este mineral um produto da hidrólise de minerais alumino-silicatados da rocha-mãe, típica de solos tropicais evoluídos como os da região de Brasília. Esta observação encontra-se em consonância com os resultados de Guimarães (2002), que constatou, também para este mesmo solo estudado, um processo de intemperismo intenso até aproximadamente 6 metros de profundidade, resultando na formação e acumulação significativa de gibbsita.

A ocorrência de hematita está associada à coloração avermelhada do solo, enquanto o anatásio, uma das formas cristalinas do dióxido de titânio, se mostra compatível com os resultados obtidos por FRX e, assim como os óxidos de ferro e alumínio, o TiO_2 também atua como um marcador de intemperismo elevado, pois sua alta estabilidade química promove seu enriquecimento residual à medida que os minerais primários são lixiviados.

A análise mineralógica por DRX evidencia que o solo apresenta uma composição mineralógica diversificada, onde destaca-se a presença de argilominerais e óxidos típicos de solos tropicais, enquanto o quartzo aparece como fase comum associada à fração silicatada.

4.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DAS FIBRAS

A massa específica das fibras de açaí obtida pela picnometria gasosa foi de 0,89 ± 0,03 $g \cdot cm^{-3}$, cujo valor posiciona a fibra de açaí entre os reforços lignocelulósicos mais leves, confirmando sua natureza de baixo peso. É comparável às fibras de coco e significativamente mais leve que a juta ou o sisal (Nguyen & Indraratna, 2023). Em solos reforçados, essa característica pode ser vantajosa para reduzir o peso específico de aterros e taludes, mantendo, ao mesmo tempo, um desempenho mecânico adequado.

O comportamento de absorção de água das fibras não tratadas e daquelas revestidas com sílica coloidal é apresentado na Figura 4.3.

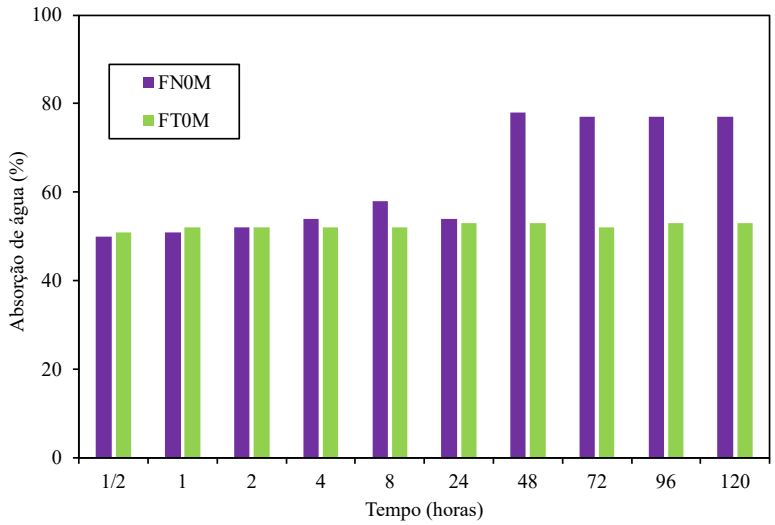


Figura 4.3- Gráfico de absorção de água pelo tempo decorrido.

Inicialmente, ambos os materiais apresentaram um ganho de massa rápido e semelhante (≈ 53%), indicando que o recobrimento de sílica não impede totalmente a entrada de água, permitindo-a através de microfissuras e poros superficiais, comportamento característico de difusão fickiana (absorção inicial rápida, que desacelera gradualmente até a saturação) (Geng & Cai, 2024). Contudo, após essa fase, os comportamentos divergiram significativamente.

As fibras não tratadas exibiram um aumento contínuo e acentuado, atingindo cerca de 80% de absorção em 48 horas. Esse ganho tardio decorre da migração profunda da água para o lúmen e paredes celulares (Eleutério *et al.*, 2025). Em contraste, o recobrimento de sílica bloqueou o acesso aos lúmens e reduziu os grupos hidroxila livres (Shifa *et al.*, 2024), estabilizando o ganho de massa com apenas 2% de acréscimo subsequente nas 48 horas seguintes.

Resultados análogos de impermeabilização (com reduções de 30% a 50% na umidade) são amplamente reportados na literatura para o uso de sílica no sisal (Silveira, Ferreira & Casagrande, 2022), e em outras fibras amazônicas tratadas com polímeros (Oliveira *et al.*, 2020), processos de esterificação (Punyamurthy *et al.*, 2013) ou bases naturais, como óleo de tungue (Kick *et al.*, 2017).

Do ponto de vista geotécnico, essa redução de absorção contribui para a durabilidade do compósito. A limitação da difusão de umidade inibe o inchamento volumétrico, a lixiviação de hemiceluloses e a delaminação celular sob ciclos de umedecimento e secagem, processos que tipicamente degradam o intertravamento mecânico da fibra com o solo (Lv *et al.*, 2023; Oun *et al.*, 2022). Dessa forma, a hidrofobização atua diretamente na preservação da integridade interfacial, garantindo a estabilidade a longo prazo do reforço.

Para a compreensão do comportamento mecânico do reforço, retomam-se os parâmetros obtidos por Santos *et al.* (2026) para o material *in natura*. A resistência média à tração das fibras de açaí (~250 MPa) insere-se na faixa típica dos reforços naturais (Pickering *et al.*, 2016), cujo desempenho supera materiais como coco, kenaf e fique (Hasan *et al.*, 2021; Martinelli *et al.*, 2023; Huang *et al.*, 2025; Radzuan *et al.*, 2020; Muñoz-Blandón *et al.*, 2023), sendo apenas 8% inferior ao do sisal (Silveira *et al.*, 2022). Esse notável equilíbrio mecânico atrela-se ao seu alto teor de lignina e cristalinidade moderada.

Quanto à rigidez à tração, o módulo de elasticidade de 3,7 ± 0,33 GPa proporciona um contraste ideal com as matrizes de solo, cujos módulos são usualmente inferiores a 1 GPa (SCDOT, 2022). Esse contraste assegura uma transferência de tensões eficiente e boa compatibilidade mecânica. Além disso, uma deformação média de ruptura de 7,8%, aproximadamente 50% maior que os 5,2% registrados para a sisal, proporciona uma resposta dúctil, permitindo que as fibras possam acomodar recalques e deformações do solo sem ruptura abrupta.

A combinação de resistência à tração moderada e alto alongamento na ruptura nessas fibras oferece um bom equilíbrio para aplicações de reforço de solo, onde módulos de elasticidade excessivamente elevados podem induzir concentrações de tensão e ruptura frágil.

Embora os ensaios mecânicos tenham se concentrado em fibras não tratadas para definir as propriedades de base do reforço, cabe esclarecer que tratamentos superficiais inorgânicos, como a aplicação de sílica coloidal, atuam primariamente na formação de uma barreira de proteção (SiO_2). Conforme reportado na literatura sobre modificação superficial de fibras naturais com sílica coloidal (e.g. Signorini *et al.* 2018; Silveira *et al.* 2022), o intuito principal desses revestimentos não é o incremento da resistência à tração da fibra isolada, mas sim a garantia de sua durabilidade. Assim, o uso da sílica consistiu prioritariamente na prevenção do inchamento hidrolítico e da biodegradação, para consequente preservação das propriedades mecânicas originais do núcleo lignocelulósico quando submetido a condições adversas ao longo do tempo.

4.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DAS FIBRAS

As proporções relativas de lignina, celulose e hemicelulose, obtidas por hidrólise ácida, assim como os teores de matéria orgânica obtidos no ensaio de teor de cinzas para as fibras são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4- Resultados da composição estrutural e teor de cinzas de fibras de açaí

Propriedade	Parâmetro	FN0M	FT0M
Componentes estruturais (%)	Celulose	31	-
	Hemicelulose	12	-
	Lignina	45	-
Teor de cinzas (%)	Matéria orgânica	98	83
	Matéria inorgânica	2	17

A composição estrutural das fibras de açaí alinha-se à faixa típica reportada na literatura para materiais lignocelulósicos da mesma origem: 27–46% de celulose, 22–39% de lignina e 14–37% de hemicelulose (Azevedo *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2008; Mesquita *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2024; Pessoa *et al.*, 2010; Rodrigues Filho *et al.*, 1993; Santos *et al.*, 2023).

O material analisado neste estudo destaca-se por uma configuração química específica: é notavelmente rico em lignina e deficiente em hemicelulose, mantendo um teor mediano de celulose. Do ponto de vista de aplicações geotécnicas, essa configuração química oferece vantagens expressivas, uma vez que o elevado teor de lignina (45%) atua como uma matriz polimérica natural que não apenas incrementa a rigidez intrínseca do reforço, mas também lhe confere uma robusta resistência inerente à degradação microbiana (Bordoloi *et al.*, 2017). Adicionalmente, a baixa fração de hemicelulose (12%) reduz a suscetibilidade da fibra à degradação hidrolítica durante sucessivos ciclos de umedecimento e secagem.

Sendo a hemicelulose o constituinte mais hidrofílico e termodinamicamente instável da parede celular vegetal, ela fornece abundantes sítios reativos para ligações de hidrogênio com moléculas de água. A literatura aponta que a degradação desse componente amórfico sob exposição cíclica à umidade pode deteriorar severamente o desempenho mecânico de compósitos naturais, acarretando perdas de até 70% na resistência à tração (Castro *et al.*, 2022; Lv *et al.*, 2023). Dessa forma, a limitação natural dessa fração vulnerável na composição do açaí reflete-se diretamente no aumento de sua estabilidade dimensional e na redução da sua higroscopicidade (Zhang *et al.*, 2011), assegurando maior durabilidade a longo prazo quando inserida na matriz de solo.

Com relação à quantificação do resíduo inorgânico após a combustão da matéria orgânica, conforme apresentado na Tabela 4.1, o teor de cinzas da fibra *in natura* foi de aproximadamente 2%, valor condizente com a faixa típica (0,5–3%) reportada para diversos reforços lignocelulósicos, como algodão, cânhamo, juta e sisal (Bilcati *et al.*, 2018; Eleutério *et al.*, 2025).

Após o tratamento com sílica, observa-se aumento significativo do teor de cinzas para 17%, confirmando a deposição de SiO_2 na superfície das fibras. Diferentemente de tratamentos térmicos, que tendem a remover frações minerais (Tavares *et al.*, 2020), o revestimento com sílica promoveu o enriquecimento mineral. Geotecnicamente, maior fração mineral traz consigo: (i) maior durabilidade, que atua como barreira à degradação biológica (Silveira, Ferreira & Casagrande, 2022); e (ii) melhor comportamento interfacial, pois superfícies mineralizadas aumentam atrito e intertravamento com o solo (Kadhim & Alyounis, 2024).

Quanto aos resultados de pH, ferramenta importante na avaliação das propriedades superficiais das fibras, apresenta-se na Tabela 4.5 os valores obtidos para as fibras. Ademais, também são apresentados os valores referentes ao solo puro para subsidiar a interpretação da interação fibra-solo, considerando que o pH do meio influencia as cargas superficiais e, consequentemente, a adesão entre os materiais.

Tabela 4.5- Resultado das medições de pH das fibras de açaí

Amostra	pH H_2O	pH KCl	ΔpH (KCl – H_2O)	Predomínio de carga superficial
FN0M	5,80	5,28	-0,52	Carga líquida negativa
FT0M	6,92	5,96	-0,96	Carga líquida negativa
SP0M	6,20	6,67	+0,47	Carga líquida positiva

As fibras não tratadas apresentam caráter levemente ácido (pH ≈ 6), de forma semelhante aos estudos de Lima Júnior (2007), que identificaram o pH de fibras de açaí próximo a 6. Esse comportamento é típico de materiais lignocelulósicos, que possuem grupos funcionais ácidos,

como carboxilas (COOH) e fenóis (OH), provenientes de componentes como hemiceluloses e lignina. A diferença entre os valores de pH em água e KCl pode ser atribuída à maior capacidade do KCl em neutralizar cargas superficiais, resultando em um pH ligeiramente mais baixo.

Após o revestimento com sílica, observa-se aumento do pH em suspensão aquosa para valores próximos da neutralidade (6,9) e elevação do pH em KCl para cerca de 6,0, indicando que o SiO_2 atua na neutralização de sítios ácidos. Esse comportamento é particularmente vantajoso em solos alcalinos, pois reduz a hidrólise catalisada por prótons e melhora a estabilidade da interface fibra-solo.

Além disso, o ΔpH negativo das fibras indica predominância de cargas superficiais negativas, o que favorece a interação eletrostática com as partículas do solo, de carga oposta, melhorando a adesão e a transferência de tensão na interface solo-fibra (Crippa *et al.*, 2025). Em particular, o tratamento com sílica promoveu a formação de uma camada superficial hidrofóbica rica em silício que intensificou a carga negativa (ΔpH de -0,96), potencializando a atração eletrostática e promovendo uma melhor integração com o solo de carga positiva.

A caracterização por espectros de FTIR das fibras de açaí em estado natural e após tratamento superficial, ambas no tempo zero de exposição, apresentada na Figura 4.4, segue os protocolos estabelecidos para materiais lignocelulósicos, em que faixas específicas de número de onda correspondem a grupos funcionais característicos. As modificações sistemáticas observadas nas bandas de absorção relativas fornecem evidências quantitativas da eficácia do revestimento com sílica coloidal.

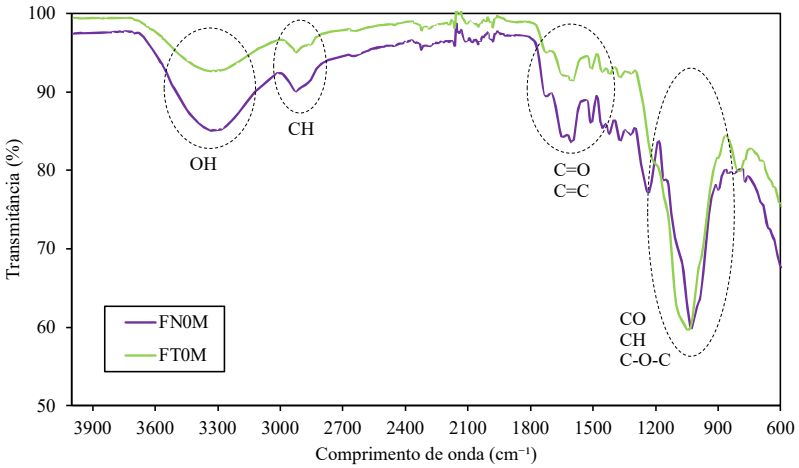


Figura 4.4- Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier nas fibras de açaí.

O amplo envelope hidroxila, ocorrendo entre 3700 e 3000 cm^{-1} e relacionado ao estiramento O–H (Bakri & Jayamani, 2016), apresenta uma diminuição substancial em sua intensidade relativa (profundidade do pico em relação à linha de base local) após o revestimento. Essa

atenuação indica o mascaramento parcial dos grupos –OH superficiais pela camada de SiO_2, sugerindo uma consequente redução na afinidade por água. Uma atenuação semelhante da banda O–H foi relatada por Azevedo *et al.* (2021) para fibras de açaí tratadas quimicamente, atribuída à ruptura ou bloqueio das pontes de hidrogênio na celulose amorfa.

Na região entre 2900 e 2800 cm^{-1}, correspondente ao estiramento C–H de grupos metil e metileno associados à lignina (Gañán & Mondragón, 2003), bem como na região de estiramento aromático C=C (1605–1505 cm^{-1}), as intensidades relativas de absorção permanecem inalteradas. Esse comportamento confirma a preservação química do arcabouço alifático e aromático da lignina após o tratamento.

Para a banda de 1740 a 1710 cm^{-1}, que é tipicamente atribuída ao estiramento das ligações C=O de grupos cetona, éster ou carboxílicos não conjugados, presentes na hemicelulose (Oliveira *et al.*, 2018), nos espectros avaliados observa-se uma atenuação para a fibra revestida. Esse comportamento reflete o efeito de recobrimento físico promovido pela deposição de sílica sobre essas funcionalidades carbonila originais, mascarando o sinal superficial da hemicelulose.

A evidência mais contundente da modificação superficial encontra-se na região entre 1200 e 900 cm^{-1}. Embora a transmitância mínima absoluta atinja valores próximos em ambas as amostras (~59%), a elevação da linha de base global da fibra tratada revela que o mergulho do pico (absorbância) é bem mais intenso após o revestimento. Esse aumento na intensidade de absorção é consistente com a introdução de ligações Si–O–Si sobrepostas às vibrações celulósicas (β-glicosídicas e C–O–C), conforme observado por Ovalle-Serrano *et al.* (2018).

Em síntese, os espectros sugerem que a modificação superficial ocorreu predominantemente por um mecanismo de recobrimento físico. A deposição da sílica introduziu ligações Si–O–Si intensas e mascarou os sítios hidrofílicos originais da celulose e hemicelulose, preservando o arcabouço alifático e aromático da lignina, condição fundamental para a manutenção da capacidade de reforço das fibras.

Por fim, os resultados elementares obtidos pela técnica de FRX, apresentados na Tabela 4.6, corroboram e complementam de forma direta os achados da análise espectral de FTIR. Os dados revelam diferenças significativas na assinatura química do material, refletindo a eficácia da barreira física gerada pelo processo de revestimento com sílica coloidal.

Tabela 4.6- Constituintes elementares das fibras, resultantes do FRX

Amostra	**Constituintes elementares (%)**								
	Fe	K	Si	Ca	Mn	S	Cr	P	Al
FN0M	27,6	20,5	20,5	14,4	5,5	4,2	2,9	2,5	1,9
FT0M	1,5	1,3	90,9	2,6	0,5	1,4	0,2	-	1,6

A fibra natural (FN0M), em seu estado original (tempo zero), apresentou uma composição diversificada, com destaque para os elevados teores de Ferro (27,6%), Potássio (20,5%), Silício (20,5%) e Cálcio (14,4%).

Após o tratamento superficial, a composição elementar sofreu uma mudança perceptível: o elemento Silício (Si) passou a compor quase a totalidade da fração aferida, elevando-se para aproximadamente 91%, enquanto os níveis de Fe, K e Ca caíram para valores inferiores a 3% cada. É fundamental destacar que, em consonância com o que foi detectado no FTIR, onde a sílica mascarou o sinal dos grupos hidroxila e carbonila, essa mudança drástica no FRX não resulta da lixiviação ou remoção dos elementos originais da fibra. Pelo contrário, reflete o encapsulamento físico promovido pela formação de uma espessa camada de dióxido de silício (SiO_2), que mascara os elementos durante a varredura da superfície.

Aumentos expressivos semelhantes no silício superficial também foram documentados por Silveira *et al.* (2022) para fibras de sisal tratadas com sílica coloidal. Do ponto de vista geotécnico, a consolidação desta nova composição de superfície tende a ser altamente benéfica. A dominância de uma camada de SiO_2 introduz uma barreira quimicamente inerte que atua em duas frentes: (i) limita a troca iônica com água intersticial quando inserida no solo; e (ii) fundamenta a drástica queda na absorção de água previamente discutida, garantindo a estabilidade volumétrica e a durabilidade do compósito solo-fibra.

4.6 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DAS FIBRAS

A Figura 4.5 apresenta as curvas TGA e DrTGA das fibras de açaí, revelando três estágios de perda de massa que refletem a degradação sequencial típica de materiais lignocelulósicos: hemicelulose (200–300°C), celulose (300–400°C) e lignina (300–650°C) (Díez *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2007).

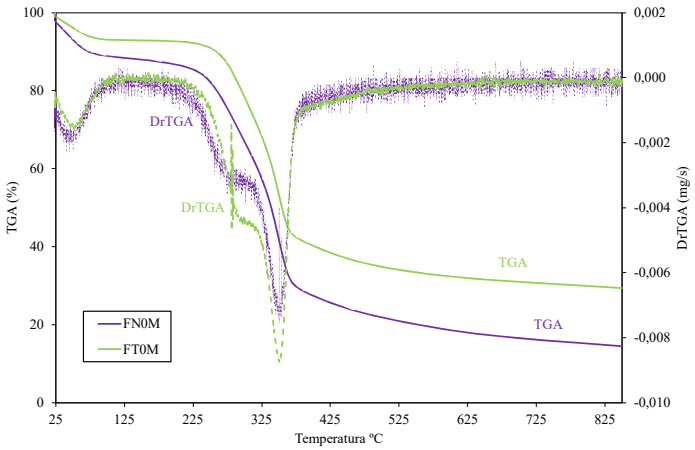


Figura 4.5- Gráficos de termogravimetria (TGA/DTG) em fibras de açaí.

As fibras não tratadas permanecem estáveis até cerca de 200°C, onde as fibras não tratadas retiveram aproximadamente 87% de sua massa, frente a 93% para as fibras tratadas, devido à evaporação da umidade residual e compostos voláteis. Esse comportamento alinha-se à variabilidade das fibras naturais (Neto *et al.*, 2021) e aproxima-se do coco (Seo *et al.*, 2019).

Até cerca de 400°C, onde ocorre a perda total de celulose e parte da lignina, a perda acumulada de massa para as fibras foi de 73% para as fibras naturais e 60% para as fibras tratadas, indicando degradação mais lenta e melhor preservação da celulose e da lignina.

A persistência da lignina acima de 450°C reflete o alto teor de lignina do material e produz um resíduo de carvão de ≈ 14% a 850°C, valor que se assemelha aos encontrado por Martins *et al.* (2009), também em fibras de açaí. Tal fração excede o teor inorgânico determinado pelo ensaio de cinzas, mas essa diferença corresponde ao carvão carbonáceo proveniente da estrutura aromática, como enfatizado por Zhang *et al.* (2018): a lignina é um agente eficaz na formação de carvão devido ao seu alto teor de anéis aromáticos, permitindo atingir rendimentos de carvão de até 42,59% a 600°C. Dessa maneira, essa diferença encontrada corresponde ao carbono residual remanescente da estrutura aromática, que só é removido em atmosferas oxidantes.

Enquanto isso, as fibras tratadas exibiram maior resíduo final, de aproximadamente 29%, indicando maior estabilidade térmica. O ganho dessa estabilidade e a maior capacidade de carbonização promovidos pela sílica corroboram as tendências de tratamentos de superfície em compósitos naturais. Em regra, tratamentos químicos suprimem constituintes instáveis e elevam as temperaturas de decomposição (Nurazzi *et al.*, 2021; Neto *et al.*, 2021), a exemplo do uso de silano em fibras de kenaf/abacaxi (Asim *et al.*, 2018). Embora existam exceções pontuais de desestabilização dependentes da interface (El-Shekeil *et al.*, 2012), a impermeabilização do açaí demonstrou-se termicamente vantajosa, retardando a degradação de seu núcleo celulósico e lignínico.

Do ponto de vista prático, a temperatura de início de degradação (≈200°C) atende confortavelmente às exigências do processamento geotécnico convencional. Além disso, esse limite térmico viabiliza o uso da fibra em matrizes processadas a quente, como misturas asfálticas. A literatura reporta que a incorporação de fibras celulósicas, minerais (basalto) e lignina em asfaltos (como SMA-13 e asfalto poroso) mitiga fissuras, evita a drenagem do ligante e melhora a resistência à deformação (Zhang *et al.*, 2024; Harries *et al.*, 2023). Portanto, o perfil termogravimétrico do açaí evidencia o elevado potencial desse resíduo para além dos solos, incluindo possíveis aplicações avançadas na infraestrutura viária.

4.7 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Os resultados de DRX, mostrados na Figura 4.6, fornecem informações importantes sobre a estrutura cristalina das fibras de açaí, permitindo calcular o índice de cristalinidade (IC) delas, parâmetro importante para compreender sua organização estrutural e, consequentemente, suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

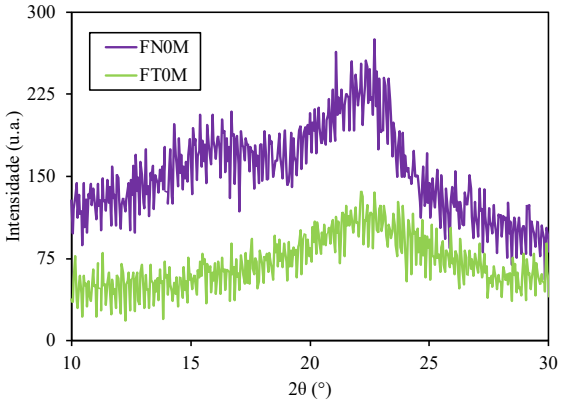
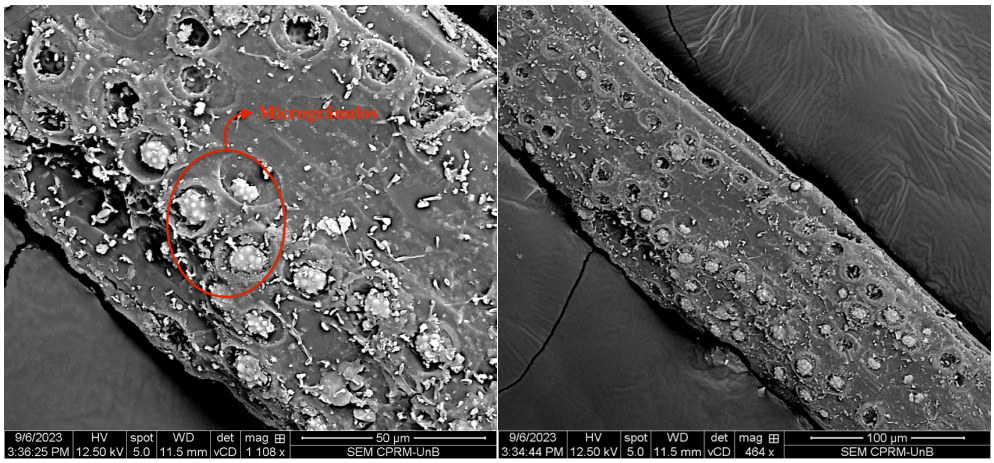


Figura 4.6- Gráfico de intensidade vs. 2θ para cálculo da cristalinidade das fibras.

A partir destes resultados, foi calculado um índice de cristalinidade (IC) de 47% para as fibras não tratadas, valor que se enquadra na faixa de 40-60% tipicamente relatada para a maioria das fibras vegetais (Lima *et al.*, 2021; Poletto *et al.*, 2014; Segal *et al.*, 1959). Após o tratamento com sílica coloidal, o IC aumentou para 49%, aumento semelhante observado em fibras de eucalipto tratadas com álcali e em fibras branqueadas (Santos *et al.*, 2024), atribuído geralmente ao preenchimento de poros e espaços amorfos na superfície da fibra. Esse comportamento sugere que a sílica atua predominantemente na superfície, sem alterar a estrutura interna da fibra, fenômeno alinhado com as observações de Cruz & Fangueiro (2016), que destacam a capacidade de materiais impermeabilizantes de modificar a superfície de fibras naturais sem comprometer sua integridade estrutural.

Para aplicações geotécnicas, mesmo um aumento modesto no IC pode contribuir com o aumento de durabilidade das fibras, visto que maior cristalinidade correlaciona-se com superior resistência à tração e reduzida capacidade de retenção de umidade em condições de equilíbrio higroscópico.

A inspeção por MEV na superfície longitudinal (Figura 4.7) revelou que as fibras de açaí exibem uma morfologia alongada com superfície heterogênea densamente povoada por microgrânulos de SiO_2, com textura marcadamente rugosa consistente com observações de outros pesquisadores (Azevedo *et al.*, 2021; Tavares *et al.*, 2020).

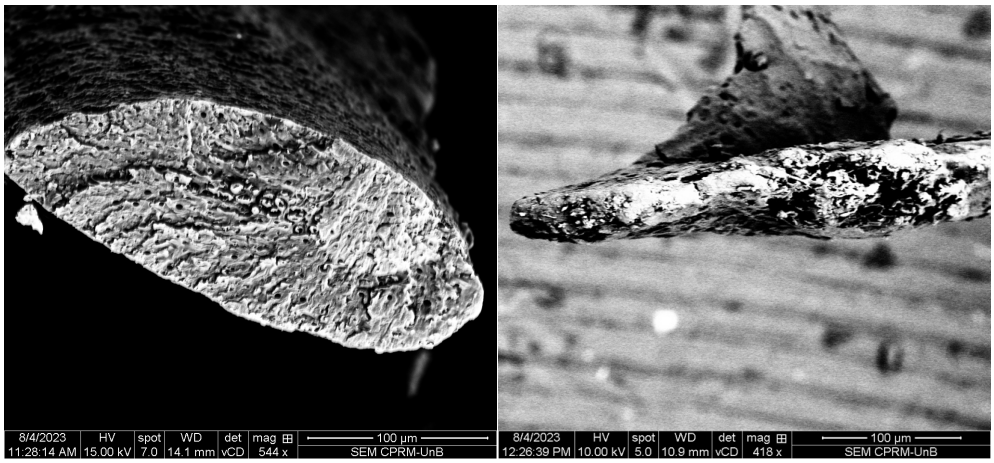


a) b)

Figura 4.7- Morfologia das fibras de açaí: a) superfície rugosa povoada por micrograânulos de SiO_2; b) morfologia alongada.

Corpos de sílica semelhantes também foram relatados por Mesquita *et al.* (2018), que os associaram ao aumento da rigidez estrutural da parede celular. Esses micrograânulos de sílica criam uma topografia texturizada, favorecendo maior atrito interfacial e intertravamento mecânico em compósitos solo-fibra, conforme demonstrado em estudos que associam o aumento da rugosidade superficial à melhor resistência ao cisalhamento da interface e ângulos de atrito interfacial (Abu Qamar & Suleiman, 2022; Han *et al.*, 2018; Pathak *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2025). Ademais, vazios internos detectados estão provavelmente associados a canais de lúmen responsáveis pelo transporte de fluidos e nutrientes ao longo do eixo da fibra, conforme observado por Carvalho *et al.* (2014).

Duas formas recorrentes de seção transversal foram observadas: aproximadamente cilíndricas e distintamente achatadas (Figura 4.8).



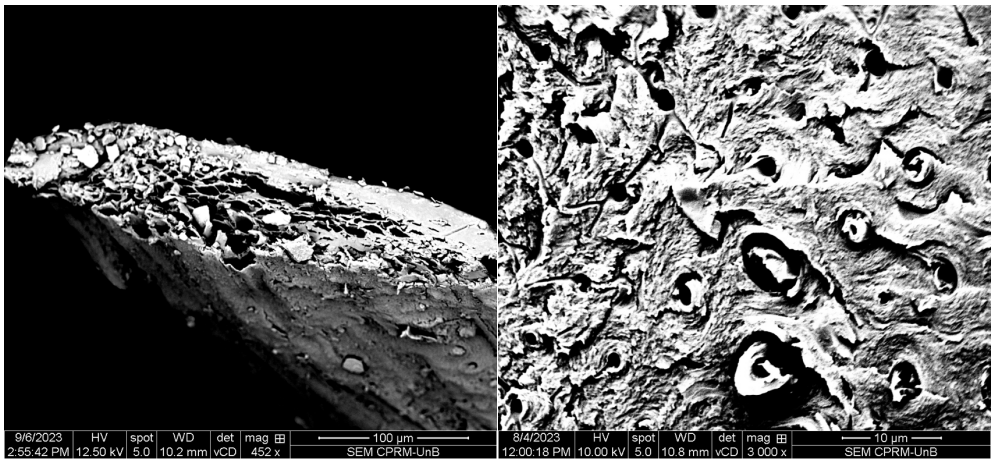
a) b)

Figura 4.8- Formas transversais recorrentes: a) aproximadamente elíptica; b) distintamente achatada.

Tal variabilidade é típica de reforços lignocelulósicos e reflete a estrutura anatômica e as condições de crescimento das fibras naturais, com morfologia variando de circular a elíptica,

dependendo da espécie e dos métodos de extração (Garat *et al.*, 2018). A geometria da seção transversal afeta a interação fibra-matriz: seções achatadas ou elípticas aumentam a área de contato e o intertravamento mecânico, enquanto o diâmetro da fibra e a configuração do feixe influenciam a resistência ao cisalhamento interfacial e a transferência de carga em matrizes reforçadas por fibras (Garat *et al.*, 2018; Huzni *et al.*, 2022; Vincenzini *et al.*, 2021). Portanto, espera-se que a heterogeneidade morfológica das fibras de açaí impacte positivamente tanto a ligação interfacial quanto a dispersão durante a mistura com o solo.

Cortes transversais, realizados manualmente com um bisturi, revelaram lúmens alongados que frequentemente colapsavam ou se deformavam devido ao estresse mecânico pelo processo de corte (Figura 4.9).



a) b)

Figura 4.9- Seção transversal da fibra de açaí: a) visão geral; b) lúmens em close-up.

Esses canais ocos, frquentes em fibras vegetais, fornecem caminhos para a entrada de água e têm sido associados à degradação biológica acelerada quando as fibras permanecem não tratadas. A irregularidade deles é consistente com as observações relatadas para juta, sisal e linho por Pickering *et al.* (2016). Ademais, variabilidade semelhante na estrutura do lúmen foi documentada em outros materiais lignocelulósicos (Gabriel *et al.*, 2021), refletindo a heterogeneidade morfológica típica que contribui para a anisotropia mecânica dessas fibras. Ademais, Gabriel *et al.* (2021) isolaram nanocristais de celulose de diversos resíduos lignocelulósicos e encontraram nanoestruturas com dimensões variáveis, evidenciando a mesma heterogeneidade morfológica que contribui para a anisotropia mecânica das fibras de açaí.

A determinação dos parâmetros dimensionais das fibras foi realizada por meio de processamento digital de imagens, empregando o software ImageJ sobre as micrografias obtidas por MEV. Para garantir a representatividade estatística da amostra e capturar a

variabilidade intrínseca do material, foram realizadas medições individuais em 30 fibras para a definição do diâmetro e em 150 fibras para o comprimento, cuja análise estatística descritiva dos dados forneceu um diâmetro médio (D_f) de 0,136 ± 0,04 mm e um comprimento médio (L_f) de 9,432 ± 2,83 mm (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 - Parâmetros dimensionais das fibras de açaí

D_f (mm)	**L_f (mm)**	**Referência**
0,136 ± 0,04	9,432 ± 2,83	Trabalho atual
0,12 ± 0,03	21,2 ± 7,5	Polidori *et al.* (2024)
0,11 ± 0,03	22 ± 8,7	Mesquita *et al.* (2018)
0,164 ± 0,052	-	Oliveira *et al.* (2019)
~0.3	~25	Marvila *et al.* (2020)
~0.08	~20	Pessoa *et al.* (2010)

O comprimento e o diâmetro obtidos indicam dimensões relativamente reduzidas quando comparadas a outras fibras vegetais e a alguns dados da própria literatura do açaí, influenciadas possivelmente pelo método de extração ou processamento do lote avaliado. Contudo, além dos valores médios, a análise estatística do atual estudo evidenciou uma expressiva amplitude nos dados. Os diâmetros variaram entre um mínimo de 0,08 mm e um máximo de 0,22 mm, enquanto os comprimentos registraram extremos de 3,77 mm a 18,91 mm.

As medianas encontradas para o diâmetro (0,128 mm) e para o comprimento (9,40 mm) apresentam-se muito próximas às respectivas médias, sugerindo uma distribuição razoavelmente simétrica e centralizada dos dados. Entretanto, o coeficiente de variação de aproximadamente 30% para ambas as dimensões reflete a elevada heterogeneidade morfológica inerente aos materiais lignocelulósicos. Do ponto de vista geotécnico, compreender essa variabilidade é fundamental, uma vez que a dispersão dimensional afeta diretamente a área específica de contato e otimiza os mecanismos de intertravamento mecânico na matriz do solo.

5 COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO

Este capítulo aborda o comportamento geomecânico do solo puro e dos compósitos solo-fibra em sua condição inicial de controle (tempo zero), previamente a qualquer exposição ambiental. O escopo das investigações aqui apresentadas compreende os ensaios de compactação, porosimetria, adensamento unidimensional, condutividade hidráulica, cisalhamento direto simples (Direct Simple Shear - DSS), compressão triaxial monotônica e prova de carga em placa em modelo reduzido (carga-recalque).

5.1 COMPACTAÇÃO

As curvas de compactação do solo puro e do compósito formado pela adição de 1% de fibras de açaí são apresentadas na Figura 5.1, assim como as curvas de saturação (Sr = 80, 90 e 100%), onde evidencia-se a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca.

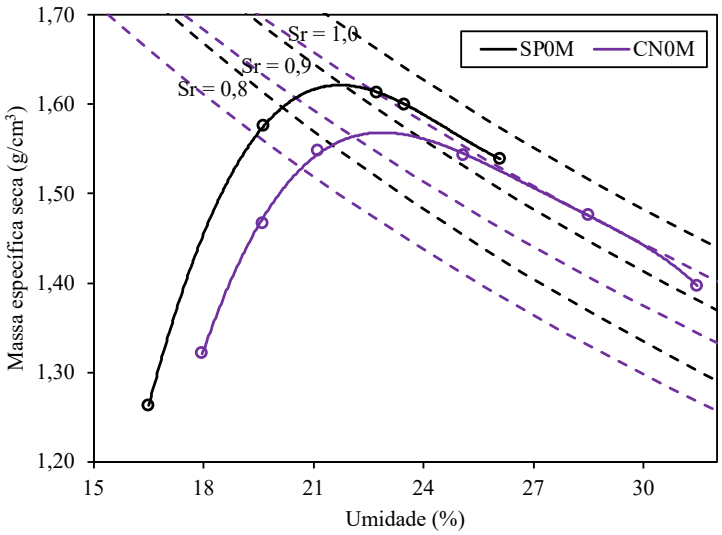


Figura 5.1- Curvas de compactação do solo puro e do compósito solo-fibra.

A avaliação da resposta à compactação dos materiais evidenciou que a adição das fibras de açaí altera sensivelmente os parâmetros ótimos de compactação. Conforme sistematizado na Tabela 5.1, a curva de compactação do solo sem reforço exibiu uma massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d,máx}$) superior e um teor de umidade ótimo ($\omega_{ót}$) inferior, em comparação ao compósito solo-fibra, tendência esta amplamente observada em estudos recentes com solos tropicais e fibras vegetais (e.g. Lawer *et al.*, 2021; Menezes *et al.*, 2019; Merville & Soares, 2024; Ojefia *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2026).

Tabela 5.1- Parâmetros de compactação do solo puro e do compósito solo-fibra

Amostra	Teor de umidade ótimo ($\omega_{ót}$) (%)	Massa específica seca máxima ($\rho_{d,máx}$) (g/cm^3)	Índice de vazios ótimo ($e_{ót}$)	Grau de saturação ótimo ($Sr_{ót}$) (%)
SP0M	21,7	1,62	0,648	89
CN0M	22,8	1,58	0,661	90

A redução da massa específica aparente seca máxima de 1,62 g/cm³ (solo puro) para 1,58 g/cm³ (compósito) deve-se a dois mecanismos físicos primordiais. O primeiro é de natureza gravimétrica: a substituição de uma fração das partículas minerais pesadas por fibras vegetais significativamente mais leves reduz a massa específica global da mistura (Oliveira Junior *et al.*, 2019; Lawer *et al.*, 2021; Menezes *et al.*, 2019). O segundo é de natureza volumétrica e estrutural: a presença das fibras atua como um obstáculo mecânico (intertravamento e atrito), dificultando o rearranjo denso dos grãos de argila sob a ação do soquete, induzindo a formação de uma estrutura com maior porosidade.

Consequentemente, esse arranjo menos denso gerado pelas fibras manifesta-se no aumento do índice de vazios na umidade ótima, que subiu de 0,648 no solo natural para 0,661 no compósito. Para viabilizar a lubrificação dessa nova estrutura interna, mais porosa e dotada de material orgânico com alta capacidade de retenção hídrica, o compósito demandou um acréscimo no teor de umidade ótimo, atingindo o pico de compactação em 22,8% (frente aos 21,7% do solo puro). Esse comportamento é atribuído à natureza higroscópica das fibras naturais, que absorvem parte da água de compactação, exigindo um aporte maior de umidade para atingir o estado de máxima densidade (Lawer *et al.*, 2021; Ojefia *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2026).

Por fim, ao analisar os parâmetros nas curvas teóricas de saturação, nota-se que, apesar da semelhança no formato das curvas de compactação de ambos os materiais, a dinâmica de preenchimento dos vazios por água é sutilmente alterada. O grau de saturação na condição ótima apresentou um leve acréscimo, passando de 89% no solo puro para 90% no compósito. Esse aumento discreto, aliado à elevação da umidade ótima, reflete a complexidade da matriz do compósito. As fibras de açaí, por sua natureza hidrofílica, tendem a absorver e reter parte da água em sua própria microestrutura. Consequentemente, para que o sistema alcance o estado de lubrificação ideal para a compactação máxima, exige-se um volume de água ligeiramente superior. Assim, ela altera o estado de empacotamento inicial, configurando um sistema com maior índice de vazios que, no entanto, encontra-se proporcionalmente mais saturado na condição ótima.

5.2 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (PIM)

A análise da distribuição do tamanho dos poros permitiu compreender como a introdução das fibras afetou a organização dos vazios no compósito. Para materiais orgânicos degradáveis, esse ensaio assume caráter predominantemente qualitativo, sendo um indicador da compressibilidade e da capacidade das inclusões de resistir ao colapso sob pressão. Fard *et al.* (2022) reforça essa natureza qualitativa ao observar que os índices de vazios derivados do PIM podem diferir das medições de massa-volume devido ao tamanho reduzido das amostras, que podem não capturar a totalidade dos poros maiores criados pelas fibras.

A Figura 5.2 apresenta a comparação entre a distribuição de poros do solo puro e do compósito em seu estado inicial (tempo zero).

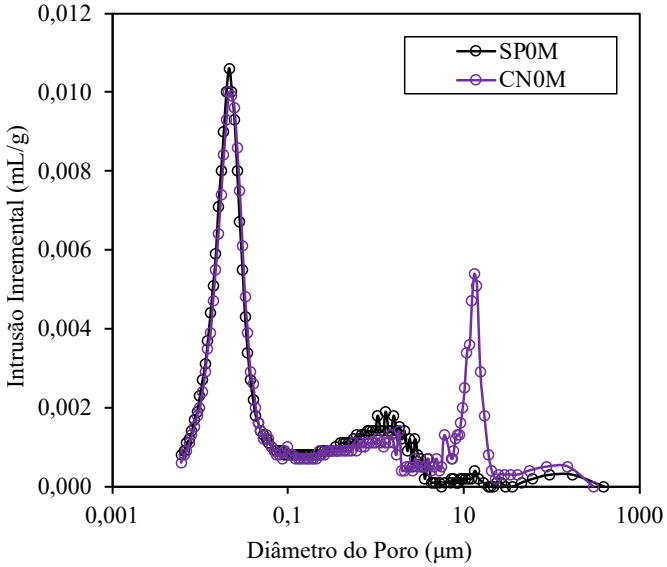


Figura 5.2- Curvas de distribuição do tamanho dos poros (PIM) (tempo zero).

A análise deste comportamento inicial revela que a introdução das fibras de açaí cria uma porosidade secundária evidente, caracterizada pelo surgimento expressivo de macroporos que não existiam na matriz de solo não reforçado. Este fenômeno de alteração estrutural é corroborado por Wang & Wang (2024), que demonstraram que a inserção de fibras transforma microporos finos e dispersos em macroporos maiores e conectados. De forma semelhante, Gomes *et al.* (2023) verificaram que o aumento do teor de fibras de coco levaram a um incremento não linear na proporção de macroporos dentro da matriz de solo.

Estes vazios representam a interface física estruturada entre o solo e o elemento de reforço. Conforme observado por Fard *et al.* (2022), a presença de fibras naturais aumenta significativamente o volume cumulativo de vazios, enquanto Wang & Wang (2024) destacam

que essa inclusão tende a consolidar uma distribuição na rede de poros com um incremento expressivo na escala dos macroporos.

Neste estágio, a fibra possui rigidez estrutural intrínseca suficiente para manter estes macroporos abertos, resistindo de forma eficaz às pressões severas de injeção de mercúrio durante o ensaio. Conforme aponta Laibi *et al.* (2017), essa manutenção da integridade estrutural é garantida pela adesão mecânica e pela alta resistência à tração das fibras, o que permite que as inclusões melhorem as características físicas e a resistência à compressão do compósito, apesar do aumento da porosidade total induzida pelo ar aprisionado durante a mistura. Adicionalmente, Fard *et al.* (2022) explicam que essa estabilidade decorre da atuação das fibras como uma rede tridimensional que trava os grãos de solo, formando uma matriz coerente que restringe deslocamentos internos.

5.3 ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL

A análise do ensaio de adensamento unidimensional revelou diferenças importantes na compressibilidade entre o solo puro e o compósito solo-fibra. A maior porosidade inicial do compósito, já evidenciada pela PIM e pelos dados de compactação, refletiu-se em um índice de vazios inicial (e_0) mais elevado, efeito atribuído à formação de macroporos induzidos pela presença das fibras. Consequentemente, esse maior e_0 acarretou, no adensamento, uma maior variação do índice de vazios (Δe) ao longo do carregamento.

Esse comportamento contrasta com o relatado por Lawer & Boadu (2017), que observou redução nos vazios ao reforçar laterita com fibras flexíveis de coco. Essa divergência fortalece a premissa de que a fibra de açaí, por seu menor comprimento, não consegue se curvar o suficiente para se alojar nos interstícios, diferentemente de fibras mais longas e maleáveis, que se moldam aos contornos das partículas e preenchem os vazios.

Para facilitar a comparação visual das taxas de deformação dadas essas diferenças iniciais, adotou-se a normalização da curva oedométrica (e/e_0), uma abordagem amplamente respaldada na literatura (Sajini & Niranjana, 2021; Widianti *et al.*, 2023), conforme ilustrado na Figura 5.3.

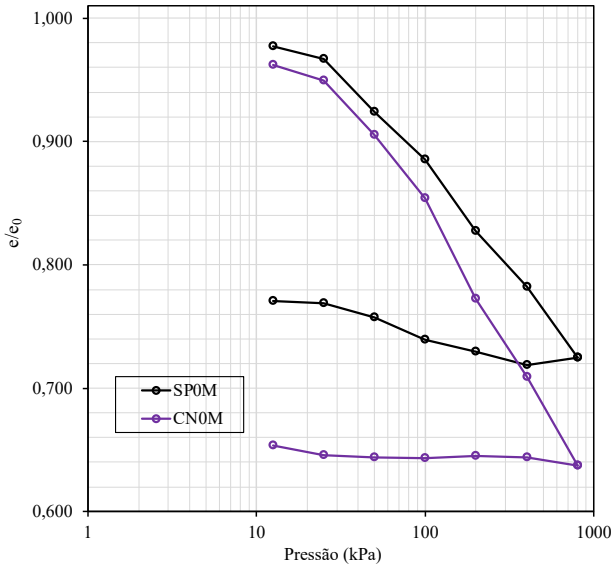


Figura 5.3- Índice de vazios (e/e_0) *x* pressão aplicada (tempo zero).

A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros de compressibilidade calculados para ambos os materiais.

Tabela 5.2- Parâmetros de compressibilidade do solo e compósito sem exposição às condições climáticas

Parâmetro	**SP0M**	**CN0M**
σ'_p (kPa)	35,5	37,5
Cc	0,101	0,147
Cr	0,022	0,030
Cd	0,010	0,003
D (kPa)	6501	4777
mv (kPa^{-1})	0,00015	0,00021
av (kPa^{-1})	0,00021	0,00029

Conforme apresentado na Tabela 5.2, o valor de tensão de pré-adensamento (σ'_p) obtido para o solo puro (35,5 kPa) converge com o histórico local reportado por Pérez (2022) e Pierozan (2018). Com a inclusão das fibras, nota-se um leve aumento nesse parâmetro (para 37,5 kPa), tendência similar à observada por Tao *et al.* (2025) ao utilizarem fibras de lignina em solo argiloso.

O fato de o compósito suportar essa tensão inicial sem colapsar, mesmo sendo mais poroso que o solo puro, é atribuído à morfologia espessa e à elevada integridade estrutural das fibras de açaí, que conferem resistência ao colapso dos macroporos sob baixas tensões. Esse efeito, conforme Arabani *et al.* (2023) e Oliveira Júnior *et al.* (2019), está associado ao elevado teor de lignina e à rigidez intrínseca da parede celular. Contudo, superada a memória de compactação (> 50 kPa), a matriz já passa a denotar uma deformabilidade superior à do solo puro (Gomes, 2018).

A partir de 100 kPa, a divergência entre os materiais se eleva drasticamente. Fisicamente, as tensões superam a capacidade de sustentação da rede porosa, fazendo com que os caminhos preferenciais (macroporos) criados pelas fibras colapsem (Baldin *et al.*, 2023). Isso se reflete no aumento de 46% no Coeficiente de Compressão (Cc), de 40% no Coeficiente de Variação Volumétrica (mv) e na queda de 27% no Módulo Oedométrico (D). Tais resultados alinham-se aos achados de Gomes (2018) ao associar fibras PET ao aumento da compressibilidade em solos argilosos.

A magnitude dessa compressibilidade pode estar atrelada ao teor adotado, uma vez que, estudos como os de Lachache *et al.* (2026) (fibras de trigo), Rajeena & Jeyapriya (2018) (polipropileno) e Sajini & Niranjana (2021) (fibras de coco) demonstraram um comportamento onde a compressibilidade diminui até um determinado teor (em torno de 0,5% a 0,6%). Superado esse limite, a adição de fibras passou a gerar maior porosidade, voltando a elevar a deformabilidade do solo.

Avançando para pressões elevadas (800 kPa), o compósito atinge e/e_0 de aproximadamente 0,64 (contra 0,73 do solo puro). A deformação volumétrica e aumento de recalque observados divergem das observações de Celestino, Mendonça & Sobral (2023), ao relatarem redução de recalques em solos reforçados com teores moderados de fibras de coco. No caso das fibras de açaí, sob altas tensões de confinamento unidimensional, a presença da fibra não previne a deformação vertical. Essa compressibilidade em altas pressões permite um rearranjo massivo da rede tridimensional, resultando em um empacotamento final mais denso (Widianti *et al.*, 2023).

Por outro lado, a fase de descarregamento revelou um benefício estrutural crucial do compósito. O solo puro possui uma recuperação elástica pronunciada, evidenciada pelo seu Coeficiente de Descompressão (Cd) de 0,010, comparado a apenas 0,004 do compósito. Esse baixo Cd indica que as fibras de açaí, após colapsarem, travam a expansão do material e impedem sua recuperação volumétrica. Esse efeito restritivo converge com a literatura recente, como Rajeena & Jeyapriya (2018) ao atestarem a redução drástica do potencial de inchamento em matrizes reforçadas e Zubair *et al.* (2023) ao reportarem uma redução de 48% no potencial de expansão com o uso de fibras de banana e poliéster.

Conforme apontam Noaman *et al.* (2022), a compreensão dessa dualidade mecânica é fundamental para a engenharia: embora a fibra eleve a compressibilidade vertical inicial devido à macroporosidade, ela atua ativamente inibindo a expansão no descarregamento e elevando a resistência ao cisalhamento do maciço. Ademais, a variabilidade no comportamento de solos reforçados reportado pela literatura evidencia que o impacto da adição de fibras na

compressibilidade, assim como sua recuperação elástica, é fortemente dependente não apenas das propriedades mecânicas do reforço, mas também da mineralogia e da estrutura da matriz que recebe o reforço.

Vale ressaltar que a maior compressibilidade verificada não inviabiliza o uso geotécnico, podendo ser compensada via estabilização físico-química combinada, caso ela seja considerada excessiva (e.g. Jayawardane *et al.*, 2020; Owino *et al.*, 2022).

5.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A análise da condutividade hidráulica dos compósitos solo-fibra evidenciou um comportamento que reforça a influência das fibras na estrutura porosa do solo. Nesse contexto, a Tabela 5.3 apresenta os coeficientes de permeabilidade ($k_{20°C}$) dos materiais não expostos às condições climáticas.

Tabela 5.3- Coeficientes de permeabilidade do solo e compósito sem exposição às condições climáticas

Material	**$k_{20°C}$ (cm/s)**
SP0M	$3{,}71 \times 10^{-6}$
CN0M	$2{,}87 \times 10^{-5}$

O coeficiente de permeabilidade obtido para o solo puro corrobora os achados recentes na literatura. Araújo (2026), ao caracterizar hidraulicamente o mesmo solo típico de Brasília, reportou valor igual a $3{,}18 \times 10^{-6}$ cm/s, muito similar ao desta pesquisa. Com a adição de fibras, contudo, observa-se um aumento expressivo da permeabilidade no compósito, atingindo valores cerca de uma ordem de grandeza superiores em relação ao solo puro. Esse comportamento é associado a alterações microestruturais e geométricas no esqueleto do solo, como a criação de caminhos preferenciais de fluxo.

O acréscimo nessa condutividade corrobora achados na literatura, associado por Xi *et al.* (2024) ao fato de a distribuição aleatória de fibras na massa do solo aumentar as passagens internas de percolação. Consequentemente, elevando-se o teor de inclusões, também eleva-se a conectividade dos canais de infiltração, aumentando a permeabilidade saturada. Esse mecanismo é reforçado por Ma *et al.* (2020), que, ao analisarem argilas siltosas com fibras vegetais, verificaram que a criação de caminhos preferenciais facilitou significativamente a drenagem do sistema.

Esse fenômeno está intrinsecamente ligado à alteração da estrutura de compactação. Merville & Soares (2024) apontam que a presença de fibras dificulta o arranjo ideal das partículas argilosas durante a compactação, cuja perturbação gera macroporos e vazios adicionais. Complementarmente, Wang *et al.* (2023) destacam que essa alteração na porosidade

global do compósito, aliada ao aumento do conteúdo de fibras, eleva naturalmente a condutividade, embora advirtam que fibras excessivamente longas possam sofrer dobramentos e emaranhados que afetam o fluxo. No estágio inicial (tempo zero), contudo, a tendência dominante é a melhoria da drenabilidade através de canais contínuos (Yuan *et al.*, 2022).

A magnitude do aumento do coeficiente de permeabilidade depende diretamente das características físicas da inclusão. Shaker *et al.* (2021) demonstraram que fibras com superfícies rugosas ou protuberâncias, característica da fibra de açaí em sua condição natural, facilitam a criação de mais caminhos de drenagem na interface solo-fibra, em comparação com inclusões de superfície lisa. Além disso, Tao *et al.* (2023) advertem que a má distribuição ou concentrações localizadas de fibras podem criar superfícies de partição entre as partículas de solos finos, quebrando a integridade da matriz impermeável e gerando canais vantajosos para a rápida penetração da água.

Para contextualizar o comportamento do compósito de açaí, é importante confrontar esses resultados com estudos que reportaram redução na permeabilidade. Abdul Rahman *et al.* (2024), por exemplo, observaram diminuição do fluxo em um silte argiloso reforçado com fibras de kenaf, atribuída à elevada capacidade de absorção hídrica da fibra. Ainda que esse comportamento possa ocorrer em compósitos com fibras naturais, reduções na condutividade hidráulica são mais comumente associadas a sistemas com aditivos cimentantes ou tratamentos impermeabilizantes, nos quais há preenchimento de poros e vedação do esqueleto do solo (Chien, 2021; Li *et al.*, 2023; Paul & Sarkar, 2022).

Elevado o coeficiente de permeabilidade para a faixa de 10^{-5} cm/s, o compósito aumenta sua viabilidade técnica para diversas aplicações estruturais e ambientais. Esse incremento confere ao material uma maior capacidade de drenagem, o que favorece a dissipação de poropressões induzidas por carregamento, que corresponde a um dos principais desafios em obras geotécnicas, especialmente em solos sujeitos a solicitações rápidas.

Conforme os critérios de projeto estabelecidos por Albright *et al.* (2010) para camadas de cobertura de aterros, por exemplo, valores de condutividade hidráulica inferiores a 1×10^{-7} m/s (equivalente a 10^{-5} cm/s) são frequentemente aceitáveis. Desse modo, o compósito argila-fibra de açaí situa-se em uma faixa estratégica de desempenho, sugerindo que possíveis ganhos em resistência mecânica possam atuar em equilíbrio com parâmetros de drenagem aceitáveis para obras de terra.

5.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A análise inicial da resistência ao cisalhamento triaxial compreendeu as alterações impostas à matriz do solo puro após a compactação, em amostras sem exposição ambiental. Nessa condição, a Figura 5.4 apresenta as curvas de tensão desviadora (σ_d) *versus* deformação axial (ε_a), além da deformação volumétrica (ε_{vol}) *versus* deformação axial (ε_a), obtidas nos ensaios triaxiais para o solo puro e para o compósito solo-fibra sem tratamento. As trajetórias ilustram o comportamento destes materiais sob as diferentes condições de confinamento (50, 100, 200, 400 e 800 kPa).

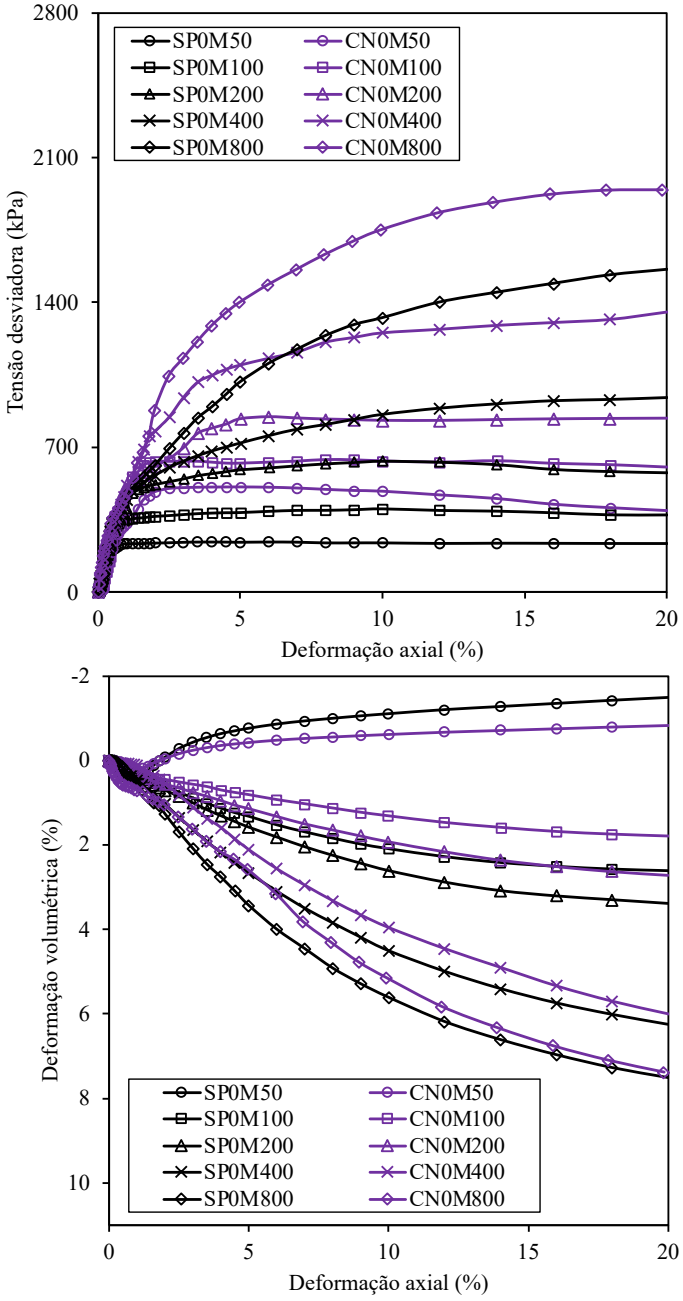


Figura 5.4- Curvas de tensão desviadora e deformação volumétrica *versus* deformação axial.

A análise das curvas de tensão-deformação revela uma clara transição de comportamento governada pela tensão confinante em ambos os materiais. Sob baixos e médios confinamentos (50 a 200 kPa), mobiliza-se uma resistência de pico seguida de decréscimo (*strain-softening*), resposta que se traduz visualmente na formação de um plano de ruptura diagonal localizado, conforme ilustra a Figura 5.5a. Em contrapartida, sob tensões mais altas (400 e 800 kPa), a resposta mecânica transita para um ganho contínuo de resistência sem pico definido (*strain-hardening*). Fisicamente, essa ausência de pico reflete-se em uma ruptura dúctil sem plano de falha preferencial, caracterizada pelo abaulamento cilíndrico (*barrelling*) do corpo de prova (Figura 5.5b). Essa clássica transição de ruptura frágil para dúctil em função do confinamento é típica de solos tropicais compactados (Crippa *et al.*, 2025) e amplamente validada na literatura para matrizes finas reforçadas com fibras vegetais (Abou Diab *et al.*, 2018; Correia *et al.*, 2021).



a) b)

Figura 5.5- Modos de ruptura pós-ensaio: (a) plano de cisalhamento diagonal; (b) deformação por abaulamento.

A análise comparativa revela que a inclusão das fibras elevou a capacidade de carga da matriz em todas as tensões avaliadas, sendo os ganhos relativos superiores nos confinamentos menores e decrescendo progressivamente com o aumento da tensão confinante, sem, contudo, perder expressividade nos níveis mais elevados. Sob tensões baixas a médias (50 a 200 kPa), os ganhos foram expressivos: a 50 kPa, a tensão desviadora máxima do compósito mais que dobrou em relação ao solo puro, superando inclusive a resistência da matriz não reforçada ensaiada a 100 kPa. Contudo, sob confinamento mais alto (800 kPa), o acréscimo relativo atenuou-se para cerca de 25%. Essa tendência de atenuação tensional, formalizada por Wang *et al.* (2023) sob o conceito de confinamento equivalente, é amplamente ratificada na literatura para diferentes tipos de fibras (Abou Diab *et al.*, 2018; Correia *et al.*, 2021; Wang, 2020), atestando que a contribuição mecânica do reforço decresce à medida que a pressão da câmara se eleva.

Micromecanicamente, esse fenômeno é governado pelo nível de travamento estrutural do sistema. Em baixos confinamentos, a relativa liberdade cinemática do esqueleto mineral permite a mobilização plena das tensões de tração, otimizando o papel de ancoragem da rede

de fibras (Consoli *et al.*, 1998; Li & Zornberg, 2013). Em contrapartida, sob a pressão de 800 kPa, a aproximação dos grãos enrijece a matriz e sobrepõe a interface solo-solo à interação solo-fibra. Essa supressão mecânica por esmagamento dos contatos (Calaunan, 2022), aliada a uma potencial ruptura física da malha orgânica sob altas tensões efetivas (Correia *et al.*, 2021), justifica o declínio da eficiência relativa do compósito nesses cenários.

A avaliação da deformação volumétrica (ε_{vol}) evidencia que a atuação mecânica da rede de fibras é estritamente condicionada pelo nível de confinamento: sob a menor tensão avaliada (50 kPa), ambos os materiais exibiram leve compressão inicial seguida de pronunciada dilatação volumétrica, resposta clássica de solos compactados densos em fase de cisalhamento. No entanto, o compósito restringiu substancialmente a expansão volumétrica, atingindo uma dilatação final de -0,84%, contra -1,49% do solo puro.

Essa redução da dilatância notada indica a mobilização da resistência à tração das fibras (efeito tirante). Conforme amplamente respaldado na literatura (Abou Diab *et al.*, 2018; Baldin *et al.*, 2023; Calaunan, 2022), a malha orgânica atua suprimindo tendências dilatantes excessivas por redistribuir tridimensionalmente as tensões, o que resulta, visual e fisicamente, em um menor abaulamento lateral (*bulging*) das amostras reforçadas e uma deformação mais uniforme em comparação ao solo não reforçado, reflexo da redistribuição tridimensional de tensões promovida pela rede de fibras (Abou Diab *et al.*, 2016; Correia *et al.*, 2021). Cabe ressaltar que a eficácia desse travamento depende das características da inclusão: enquanto elementos altamente compressíveis, como borracha, aumentam a dilatância (Yang *et al.*, 2024), a fibra de açaí, por sua morfologia espessa e reduzido comprimento, atua como um elemento de ancoragem friccional, cuja eficácia do reforço volumétrico é governada pela extensão das fibras (Szypcio *et al.*, 2023).

Fisicamente, essa contenção radial no ensaio triaxial elucida a divergência de comportamento em relação à compressibilidade oedométrica. No adensamento unidimensional, o anel metálico inibe a deformação lateral e, por consequência, inviabiliza o tracionamento horizontal da fibra, induzindo a compressibilidade vertical dos macroporos. No aparato triaxial, a flexibilidade da membrana permite a expansão diametral do corpo de prova: é justamente esse abaulamento radial inicial que estica a rede de fibras de açaí, ativando a sua resistência à tração e formando um esqueleto estrutural apto a refrear a dilatação do compósito.

A partir da tensão confinante de 100 kPa, a dilatância é suprimida. Sob confinamento moderado (200 kPa), o compósito ainda denota maior estabilidade que o solo puro, exibindo menor deformação compressiva (2,71% contra 3,38%), uma vez que a malha tensionada continua absorvendo parte dos esforços. Esta menor compressibilidade ocorre porque as fibras

absorvem parte das tensões, restringindo a redução dos vazios da matriz e contendo o colapso estrutural (Szypcio *et al.*, 2023).

À medida que a tensão confinante é elevada sob patamares mais elevados (400 e 800 kPa), o comportamento volumétrico de ambos os materiais se estreita gradativamente (7,38% no compósito contra 7,51% no solo puro a 800 kPa). Esta convergência demonstra que, sob tensões confinantes mais elevadas, a capacidade de sustentação da rede porosa é superada pelas tensões efetivas maiores e, a partir deste ponto, o desempenho volumétrico passa a ser governado quase integralmente pela compressibilidade intrínseca da matriz argilosa.

A observação das curvas tensão-deformação (σ_d x ε_a) revela uma dependência do nível de deformação para a mobilização do reforço. Inicialmente, até cerca de 0,5% de deformação axial, nota-se uma superposição das curvas do solo puro e do compósito (Figura 5.6a-b), indicando que as fibras não participam ativamente da resposta elástica inicial. Esse retardo transiente na ativação decorre da macroporosidade induzida pelas fibras (Evangelou *et al.*, 2023).

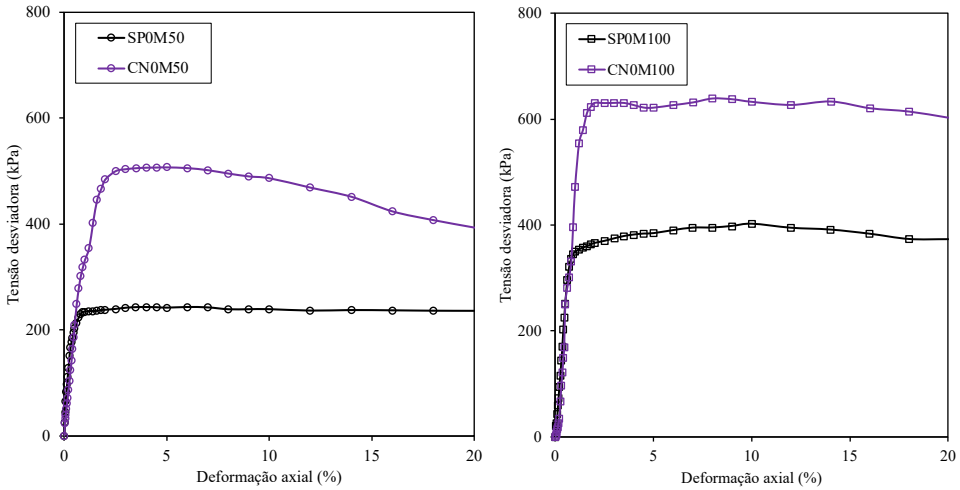


Figura 5.6- Curvas de tensão desviadora x deformação axial: a) confinante de 50 kPa; b) confinante de 100 kPa.

O retardo na ativação mecânica e a ausência de ganhos na porção elástica inicial encontram forte respaldo na literatura. Wang (2020), ao avaliar compósitos reforçados, concluiu que a adição de fibras não exerce influência na inclinação elástica (ε_a muito inicial), mas atua mobilizando a resistência em deformações subsequentes. Da mesma forma, Abou Diab *et al.* (2016; 2018) reportaram que a inclusão de fibras pode ter um impacto inicial nulo ou levemente negativo devido à macroporosidade transiente, corroborando que o esqueleto mineral necessita de um nível de deformação mínimo para que a rede seja estruturalmente tracionada.

Contudo, superada a consolidação inicial dos macroporos, a partir de $\varepsilon_a \approx 1\%$, a matriz atinge níveis de deformação suficientes para tracionar plenamente as fibras de açaí. Nesse estágio, as

inclusões assumem protagonismo, retardando a formação de planos de cisalhamento e alterando a resposta global para um comportamento expressivamente mais dúctil (Tang *et al.*, 2023).

Essa efetiva ancoragem após 1% de deformação é alavancada pela rigidez à tração da fibra de açaí (Módulo de Young de 3,73 GPa; Santos *et al.*, 2026). As fibras passam a atuar como elementos de ancoragem, absorvendo os esforços de tração pelo efeito ponte sobre microplanos de ruptura incipientes (Tang *et al.*, 2023). Essa transição ajusta-se perfeitamente ao modelo constitutivo segmentado de Duncan-Chang para solos reforçados (Yang *et al.*, 2023), no qual a rigidez secante inicialmente governada pela matriz cede lugar a um estágio secundário ancorado pelo tracionamento da malha orgânica.

Quantitativamente, após essa ativação, a eficiência da rigidez secante revelou-se inversamente proporcional ao nível de confinamento. A 50 kPa, o compósito apresentou um incremento expressivo de 42% na rigidez frente ao solo puro, contudo, sob 800 kPa, essa contribuição decresceu drasticamente para ínfimos 1,9%. Essa queda atesta uma competição de mecanismos: enquanto sob baixas pressões a liberdade cinemática favorece o estiramento e o *pullout* da fibra, em confinamentos extremos ocorre o travamento progressivo do esqueleto mineral, que restringe os deslocamentos relativos, inibindo a atuação da rede (Wang *et al.*, 2024; Zhao & Zheng, 2022). Este decréscimo progressivo da eficiência do módulo em relação à tensão efetiva foi igualmente verificado em ensaios CD por Correia *et al.* (2021).

De forma independente, os ensaios de cisalhamento simples direto (DSS) corroboraram essa dinâmica tensional. A avaliação do módulo de cisalhamento secante (G) confirmou a superioridade do compósito e o idêntico padrão de decréscimo com o confinamento (de um ganho de 9% a 50 kPa para cerca de 3% a 800 kPa), reiterando a tese do travamento mineral (Calaunan, 2022; Consoli *et al.*, 2002).

A evolução do módulo G (Figura 5.7) evidencia que, sob grandes deformações (> 5%), há uma restrição na degradação estrutural que confere uma resposta mais resiliente ao compósito, mitigando a perda abrupta de sustentação típica da matriz não reforçada (Seyyedrezaie *et al.*, 2025). Tal comportamento é atribuído à restrição imposta pela rede 3D, que mitiga a degradação brusca da matriz (Kong *et al.*, 2025).

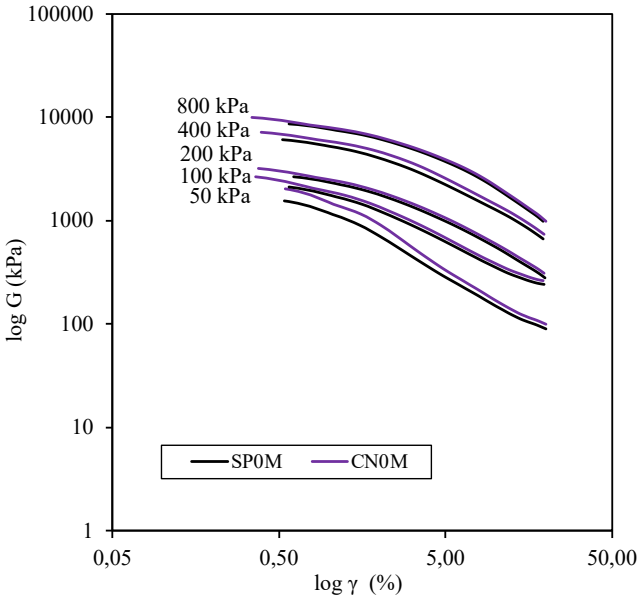


Figura 5.7- Evolução do módulo de cisalhamento secante (G) para solo e compósito.

Por fim, a aparente discrepância na magnitude dos ganhos de módulo entre os ensaios (42% no Triaxial contra 9% no DSS a 50 kPa) é diretamente elucidada pelas condições de contorno normativas de cada equipamento. No triaxial, a membrana flexível permite o abaulamento radial, movimento tridimensional expansivo que traciona e mobiliza a plenitude estrutural da malha de açaí. No equipamento DSS (operado sob volume constante e condição não drenada em função da norma ASTM D6528), a amostra encontra-se delimitada por anéis metálicos rígidos que impedem qualquer deformação lateral. Uma vez que essa restrição artificial do equipamento assume intrinsecamente a função de contenção geométrica da matriz, a atuação tridimensional das fibras é suprimida e limitada à resistência puramente no plano horizontal de cisalhamento. Essa restrição limita a real capacidade de ancoragem do reforço, justificando a escala conservadora dos acréscimos registrados no DSS em comparação ao triaxial.

A Figura 5.8 apresenta as trajetórias de tensões efetivas no espaço p' x q até a ruptura, considerando-se como critério de ruptura a tensão máxima registrada ao longo da deformação axial de até 20%. Fica nítido que as trajetórias do compósito atingem valores máximos de tensão cisalhante consistentemente superiores aos do solo puro, para um mesmo confinamento, evidenciando a expressiva contribuição estrutural das fibras antes do início do escoamento plástico.

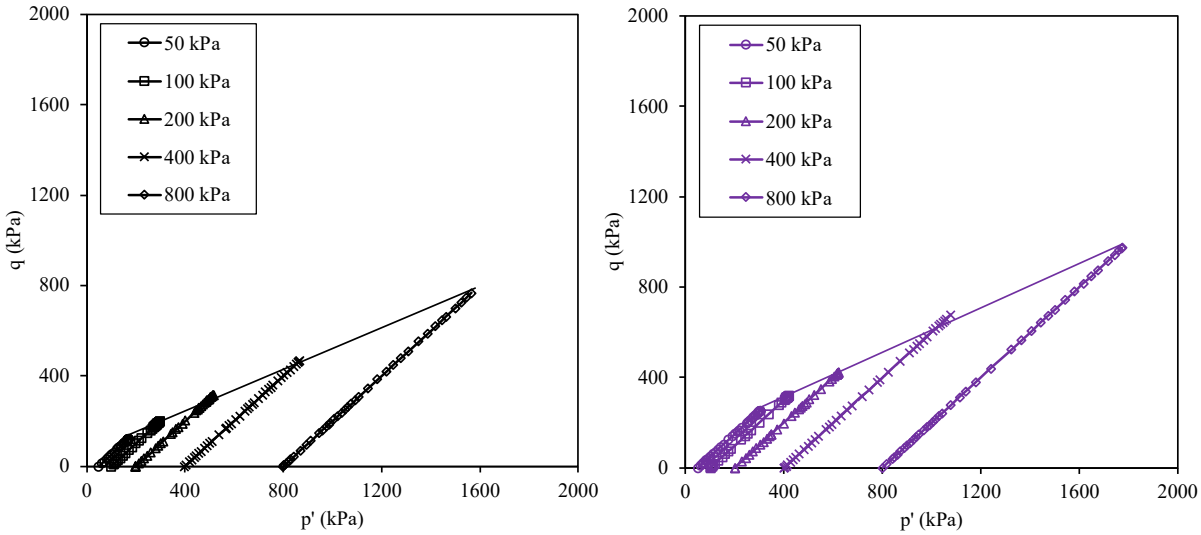


Figura 5.8- Trajetórias de tensões efetivas: a) solo puro; b) compósito solo-fibra.

A partir dos pontos de ruptura dessas trajetórias, derivaram-se as envoltórias globais de resistência sob o critério linear de Mohr-Coulomb (50 a 800 kPa), ilustradas na Figura 5.9.

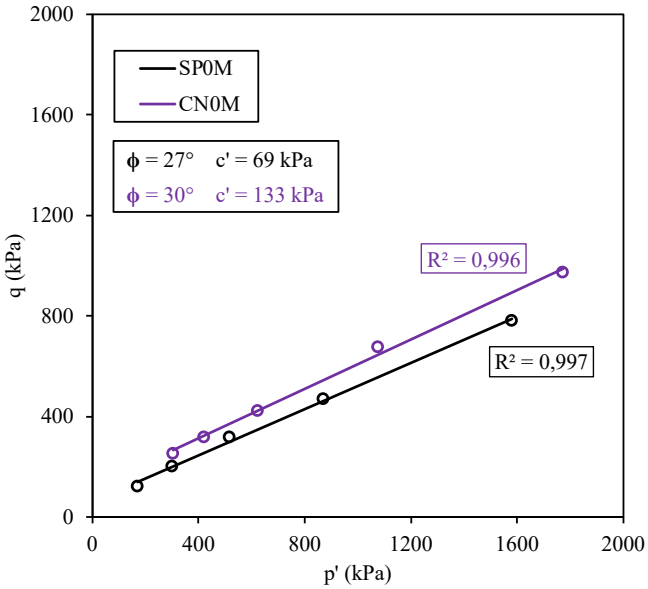


Figura 5.9- Envoltórias globais de resistência para o solo puro e para o compósito sem exposição.

Os parâmetros de intercepto coesivo e ângulo de atrito obtidos para o solo puro condizem com os achados por Garcia *et al.* (2021), que realizaram ensaios triaxiais (CD) no solo da mesma localidade. A decisão de investigar a aplicação de reforço nesta matriz laterítica, já intrinsecamente competente, fundamenta-se na escassez de estudos sobre solos finos estruturados e na sua complexidade geomecânica que, diferentemente das areias, engloba adesão físico-química e uma macroporosidade suscetível a colapsos.

Mesmo partindo dessa matriz complexa, o impacto do reforço é notável: a inserção das fibras promoveu um aumento expressivo de 93% no intercepto coesivo, enquanto o ângulo de atrito

interno sofreu um acréscimo de 3°. Esse padrão, onde a malha orgânica atua predominantemente pela geração de coesão aparente via tração, sem alterar drasticamente a natureza friccional intergranular da matriz, é um comportamento validado na fenomenologia dos reforços inseridos aleatoriamente na massa de solo.

A literatura atesta essa dinâmica tanto para inclusões sintéticas quanto naturais. Avaliando materiais poliméricos, Correia *et al.* (2021) (fibras de polipropileno em argilas de alta plasticidade - CH) e Yang *et al.* (2024) (fibras de borracha) confirmaram que o reforço se reflete em saltos substanciais de coesão (de até 52%) com ângulo de atrito praticamente inalterado.

Entre as fibras vegetais, o mecanismo se repete: Abou Diab *et al.* (2018), em compósitos de argila com fibras de cânhamo, e Bhatt *et al.* (2017), com fibras de coco em ensaios triaxiais, reportaram exatamente a mesma estabilidade do ângulo de atrito acompanhada por acréscimos notáveis no intercepto coesivo. Cabe ressaltar que, a depender da morfologia transversal do elemento e da mineralogia do solo, algumas inclusões naturais podem elevar o ângulo de atrito interno em até 20° (Liu *et al.*, 2026). Contudo, no compósito de açaí, a sutil variação de ϕ atesta que o ganho mecânico provém quase integralmente da mobilização à tração das fibras ao longo dos planos de cisalhamento.

Micromecanicamente, a magnitude dessa melhoria é governada por dois fenômenos simultâneos. Inicialmente, o ganho deriva do atrito de oclusão (*interlocking*) na interface solo-fibra, ativado progressivamente com a deformação (Jiang *et al.*, 2022). Em paralelo, a rede tridimensional intercepta as potenciais superfícies de ruptura, inibindo a propagação de trincas por meio do efeito de ponte espacial (*bridging effect*), amplamente documentado por Tang *et al.* (2023).

O expressivo incremento de 93% na coesão, numericamente superior aos ganhos de muitas matrizes sintéticas (e.g. Correia *et al.*, 2021), atesta a excepcionalidade mecânica do material adotado. Diferentemente das inclusões poliméricas altamente compressíveis (como a borracha de Yang *et al.*, 2024), a elevada rigidez à tração e a resistência inicial das fibras de açaí (Santos *et al.*, 2026), combinadas à sua elevada rugosidade superficial, garantem uma transferência de tensões mecânicas altamente eficiente. É esta ancoragem friccional eficiente que confere o ganho de coesão aparente ao compósito, melhorando a integridade estrutural da matriz sem descaracterizar a sua resposta friccional de base.

Para contextualizar a magnitude e a relevância geomecânica desses resultados, a Tabela 5.4 confronta os parâmetros de resistência do presente estudo com dados da literatura para solos finos reforçados. Visando garantir o rigor comparativo, selecionaram-se exclusivamente

investigações em matrizes argilosas ensaiadas sob idêntica condição de drenagem (Triaxial CID).

Tabela 5.4- Parâmetros de resistência ao cisalhamento em ensaios triaxiais: presente estudo versus literatura

Referência	Teor (%)	c' sem fibra (kPa)	c' com fibra (kPa)	ϕ sem fibra (°)	ϕ com fibra (°)
Presente estudo (Açaí)	1	69	133	27	30
Baldin *et al.* (2023) (Arroz)	1	76	71	27	26
Reis *et al.* (2023) (Coco)	1	20	46	31	36
Correia *et al.* (2021) (Polipropileno)	0,25	76	116	28	32
El Ahmad *et al.* (2018) (Cânhamo)	1	-	+ 7 a 10	-	+ 3 a 7

A avaliação analítica destaca a excepcionalidade da ancoragem proporcionada pela fibra de açaí. A adição de 1% de fibras elevou a coesão efetiva da matriz laterítica em cerca de 93%. Embora fibras de coco (Reis *et al.*, 2023) tenham apresentado um ganho percentual superior (130%), partindo de uma coesão inicial muito inferior, o incremento promovido pelo açaí é substancialmente mais expressivo em termos absolutos. Em comparação, fibras de cânhamo (El Ahmad *et al.*, 2018) proporcionaram ganhos inferiores a 10%, enquanto o reforço com polipropileno (Correia *et al.*, 2021) gerou um acréscimo de aproximadamente 53%. Cabe observar, ainda, que a casca de arroz (Baldin *et al.*, 2023), por restrições morfológicas, induziu uma redução de cerca de 7% na coesão e perda de atrito na matriz.

Esse desempenho não decorre de uma variável isolada, mas da alta sinergia entre o reforço e a matriz. Por um lado, a morfologia transversal da fibra de açaí, dotada de superfície altamente rugosa e irregular, promove excepcional aderência mecânica por atrito. Por outro, a natureza pedogenética da argila atua como fator catalisador: conforme elucidado por Crippa *et al.* (2025), matrizes lateríticas altamente intemperizadas apresentam minerais amorfos, desbalanço de cargas elétricas e uma estruturação macroporosa inerentemente aberta. Essa conjunção entre os macroporos pré-existentes da laterita e a alta rugosidade da malha maximiza o entrelaçamento radicular e o travamento físico, conferindo ao arranjo um salto ímpar na capacidade de absorção de energia sob tensões de cisalhamento.

Para finalizar a avaliação do desempenho geotécnico no tempo zero, procedeu-se à análise da ductilidade do sistema por meio da quantificação da sua tenacidade. Expressa fisicamente pelo trabalho mecânico necessário para deformar o material, a tenacidade corresponde à energia de deformação absorvida até o limite axial ensaiado (20%), representada pela área sob as curvas tensão-deformação (Figura 5.10). A pertinência de quantificar essa energia até grandes

deformações é respaldada pela metodologia de Wang (2020), que documentou que a tensão desviadora de solos reforçados se eleva de forma contínua sem colapso frágil, maximizando a área integrada.

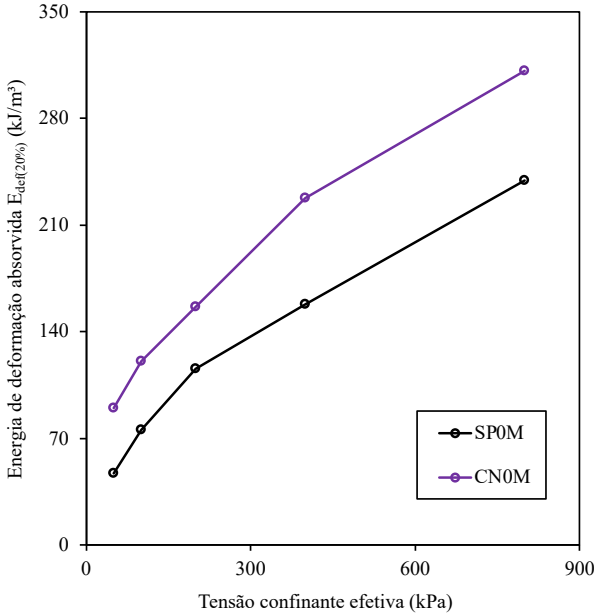


Figura 5.10- Energias de deformação absorvidas no tempo zero.

A análise crítica da literatura revela uma lacuna metodológica importante: a maioria dos estudos restringe-se a relatar a tenacidade de forma puramente qualitativa ou em incrementos percentuais relativos. Ao extrair os valores absolutos (kJ/m³), o presente estudo consolida uma base quantitativa fundamental. Sob a tensão confinante de 50 kPa, o solo puro absorveu 47 kJ/m³, enquanto o compósito atingiu 90 kJ/m³. Esse salto de 91% praticamente duplica a capacidade de dissipação de energia do sistema e situa-se na extremidade superior do espectro documentado, superando amplamente ganhos de 34,7% reportados para argilas reforçadas com polipropileno (Yazici & Keskin, 2024).

Esse ganho massivo de tenacidade é a prova em grandezas de energia do efeito ponte já discutido. A rede tridimensional intercepta a propagação de superfícies de ruptura e restringe a translação maciça das partículas após a plastificação (Ozsoy *et al.*, 2026; Tang *et al.*, 2007). Segundo Tang *et al.* (2023), essa dissipação por atrito envolve um processo sequencial de (i) mobilização da tração, (ii) redistribuição de tensões para a rede e (iii) arrancamento gradual (*pull-out*).

A expressiva superioridade energética do compósito de açaí frente aos polímeros sintéticos citados na literatura é atribuída a uma conjunção de três fatores primordiais:

- Integridade Estrutural: As fibras de açaí possuem resistência média à tração inicial elevada, alta rigidez longitudinal e superfície rugosa (Santos *et al.*, 2026). Essa

tenacidade inata permite que a malha suporte e redistribua níveis de tensão muito superiores antes do arrancamento. Essa premissa de que fibras vegetais da Amazônia conferem maior ductilidade e prolongam a integridade de blocos e matrizes cimentantes foi recentemente atestada por Barbosa *et al.* (2025), ao avaliarem diferentes inclusões e comprovarem que a superior adesão física da biomassa amazônica mantém a conectividade estrutural sob elevados níveis de deslocamento, retardando o colapso macroscópico de forma substancialmente mais eficaz que as microfibras sintéticas de polipropileno.

- Condição de Drenagem: O ensaio consolidado drenado (CD) permite a mobilização plena do atrito efetivo e do travamento, em oposição a ensaios não drenados (UU/CU) onde a geração de poropressões limita drasticamente a capacidade de absorção de energia da matriz (Yazici & Keskin, 2024);
- Dosagem Estrutural: A adoção de 1% atua como o teor ótimo do reforço, variável apontada por Yang *et al.* (2024) como crítica para maximizar a energia absorvida sem induzir falhas precoces por aglomeração.

Por fim, mantendo a consistência com os parâmetros de rigidez e resistência, o ganho de tenacidade demonstrou ser estritamente dependente do confinamento. Os incrementos atenuam-se progressivamente, variando de 60% a 35% nos confinamentos intermediários (100 a 200 kPa) e caindo para 28% sob o extremo de 800 kPa (onde o compósito absorveu 306 kJ/m³ frente aos 239 kJ/m³ do solo puro). Embora a malha continue garantindo maior ductilidade global, essa atenuação ratifica que o severo travamento do esqueleto mineral restringe a liberdade cinemática da fibra em absorver grandes deformações elasto-plásticas, convergindo com o modelo de tensão de confinamento equivalente (Wang *et al.*, 2024).

6 DURABILIDADE E EVOLUÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO SOB DEGRADAÇÃO

A investigação da durabilidade do compósito teve como premissa o entendimento das alterações morfológicas e físicas do material de reforço após o tempo de exposição ambiental. O ponto de partida para essa compreensão consistiu na exumação e inspeção visual macroscópica das amostras após 24 meses de exposição ambiental. A avaliação inicial, conduzida nas fibras pós-extração, confrontou o estado inicial (tempo zero) com o período final de envelhecimento para as matrizes naturais e tratadas, conforme ilustra a Figura 6.1.



a) b) c)

Figura 6.1- Aspecto macroscópico das fibras: a) tempo zero; b) 24 meses (naturais); c) 24 meses (tratadas).

A análise evidencia a integridade física de ambos os materiais. Diferentemente da desintegração ou esfarelamento total frequentemente relatado para outros reforços vegetais, tanto a fibra de açaí natural quanto a impermeabilizada sobreviveram fisicamente aos dois anos de exposição no solo. Essa sobrevivência macroscópica é ratificada pela inspeção das seções transversais dos corpos de prova (Figura 6.2), que permite observar as fibras *in situ* e abundantemente distribuídas na matriz de solo.



a) b)

Figura 6.2- Seção transversal e aspecto dos compósitos após 24 meses: a) natural; b) tratado com sílica coloidal.

Apesar da presença das fibras confirmada em ambos os casos, o compósito com fibras tratadas (Figura 6.2b) exibiu elementos de aspecto íntegro e robusto, enquanto as fibras naturais (Figura 6.5a) apresentaram um aspecto visualmente fragilizado, com uma discreta redução de seu volume físico (afinamento transversal) dentro da matriz de solo. Esse afinamento superficial da fibra natural indica que a interação desprotegida com a umidade e a microbiota do solo pode ter deflagrado o seu processo de desgaste.

Estudos recentes e específicos sobre fibras de açaí expostas ao envelhecimento em solos tropicais (Santos *et al.*, 2026) relataram essa mesma dinâmica: a degradação atinge primariamente a fração de celulose e eleva a rugosidade superficial, resultando em perda de massa e no perceptível afinamento visual. Esse desgaste periférico, que culmina na alteração de componentes e na perda gradual de resistência mecânica ao longo da exposição, corrobora integralmente os mapeamentos morfológicos conduzidos por Silveira & Casagrande (2021).

A preservação física da estrutura principal (ausência de esfarelamento total da fibra desprotegida) é amparada pela própria composição química das fibras. Brunšek *et al.* (2023) e Nguyen *et al.* (2018) constataram que o elevado teor de lignina intrínseco a determinados polímeros naturais atua como um escudo protetor resistente à maioria das bactérias do solo, ditando a taxa de biodegradação e retardando o colapso do esqueleto fibroso externo.

A essencialidade dessa matriz de lignina para a sobrevivência a longo prazo é confirmada experimentalmente por Chen *et al.* (2017), cujos ensaios demonstraram que a perda da integridade macroestrutural e o esfarelamento imediato no solo só ocorrem de forma considerável quando a fibra é previamente submetida a tratamentos químicos agressivos de remoção da lignina (deslignificação).

Para compreender a origem da degradação morfológica, avaliou-se a evolução da agressividade química do ambiente de confinamento. A durabilidade de polímeros naturais em obras geotécnicas é fortemente condicionada pela química da solução do solo, em especial pelo seu potencial hidrogeniônico. Variações neste parâmetro governam a taxa de solubilização e a hidrólise dos componentes lignocelulósicos, impactando diretamente a integridade do elemento de reforço.

A Tabela 6.1 apresenta a evolução temporal do pH (avaliado em H_2O e em solução de KCl) dos compósitos ao longo dos 24 meses de exposição às condições climáticas.

Tabela 6.1- Evolução do pH ao longo de 24 meses de exposição às condições climáticas

	CN0M	**CN6M**	**CT6M**	**CN12M**	**CT12M**	**CN24M**	**CT24M**
pH (H_2O)	5,44	5,46	5,91	6,78	6,60	7,57	7,38
pH (KCl)	6,14	5,91	6,10	6,53	6,64	6,26	6,49

Os resultados revelam uma transição química contínua no ambiente de confinamento. Até o sexto mês, o meio preservou um caráter tipicamente ácido (pH em H_2O na faixa de 5,4 a 5,9). Essa acidez é uma assinatura pedogenética característica de solos tropicais em seu estado natural, decorrente do intemperismo intenso e da decomposição de matéria orgânica nativa (Cardoso, 2002). Sob essas condições originais levemente ácidas, a rede lignocelulósica das fibras vegetais tende a desfrutar de estabilidade química razoável.

A partir do 12º mês, contudo, consolida-se uma trajetória de alcalinização, culminando aos 24 meses em um ambiente neutro a levemente alcalino (pH em H_2O atingindo 7,57 no compósito natural e 7,38 no tratado). Essa elevação indica uma transição para um meio de elevada agressividade à matéria orgânica, uma vez que o pH alcalino favorece a degradação acelerada das cadeias de celulose e hemicelulose, deflagrando a perda de rigidez mecânica dos filamentos.

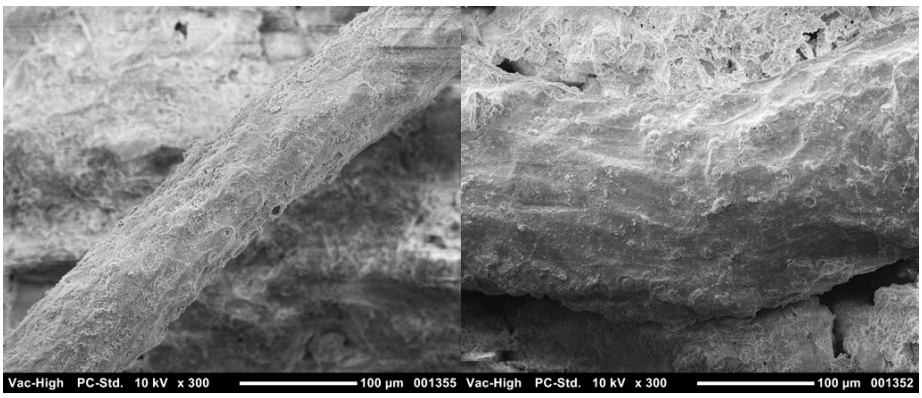
A mecânica dessa deterioração é governada por processos estritamente dependentes do pH. Wei (2018) atesta que o aumento da concentração de íons OH^- é o gatilho cinético primário para a hidrólise das cadeias poliméricas da celulose. Esse ataque químico, de acordo com as investigações de Lv & Liu (2023), ocorre em estágios sequenciais de fora para dentro: a solução alcalina dissolve inicialmente a hemicelulose e a lignina periféricas, desprotegendo as microfibrilas de celulose e franqueando o avanço da hidrólise rumo ao núcleo estrutural do material.

Em nível molecular, o impacto dessa exposição aos meios alcalinos é significativo. Martinelli *et al.* (2023) e Jamshaid *et al.* (2023) destacam que as reações alcalinas atacam diretamente os constituintes orgânicos ao quebrarem as pontes de hidrogênio que unem a rede tridimensional de celulose e lignina. É precisamente a cisão progressiva dessas ligações estruturais que justifica, do ponto de vista da química de materiais, a degradação contínua e a queda de tenacidade que serão observados no compósito natural.

Por fim, destaca-se que os valores finais de pH alcançados são equivalentes para ambos os compósitos, cujo paralelismo comprova que o revestimento de sílica coloidal não altera a alcalinidade global da solução do solo, atuando exclusivamente como uma barreira física na superfície da fibra. Consequentemente, ambas as inclusões (tratadas e naturais) permaneceram expostas ao mesmo ambiente químico alcalino.

Para avaliar os efeitos da agressividade química na morfologia das fibras e investigar possíveis alterações em sua estrutura interna, análises de MEV aplicadas a fibras e corpos de prova intactos (não submetidos a tensões de cisalhamento) evidenciaram as manifestações do envelhecimento ambiental na interface.

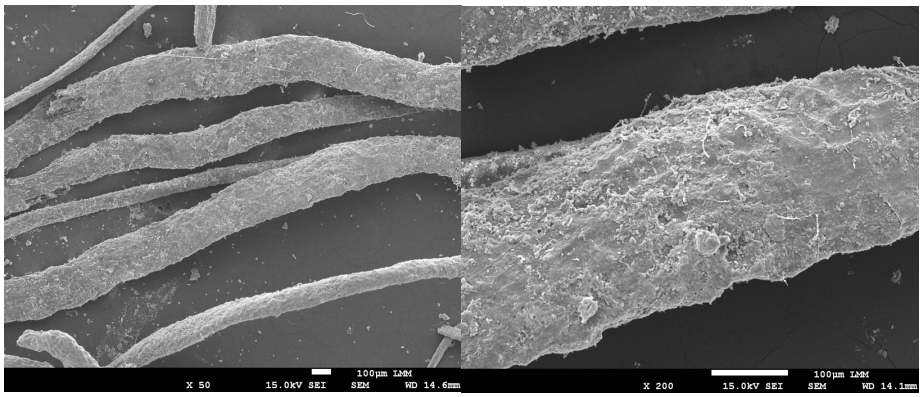
A avaliação microestrutural após o primeiro ano de exposição confirmou um estágio de estabilidade preliminar. Em consonância com as medições prévias de pH, que apontavam um ambiente ainda próximo à neutralidade, as micrografias da Figura 6.3 não evidenciam degradação das fibras de açaí, independentemente do tratamento superficial aplicado. A macroestrutura manteve-se visualmente íntegra e análoga ao estado inicial. Observou-se, contudo, a formação de uma fina camada de argila recobrindo a superfície das amostras, principalmente nas fibras não tratadas, indicando forte interação de contato com a matriz.



a) b)

Figura 6.3- MEV em fibra de açaí após 12 meses de exposição: a) natural; b) tratada.

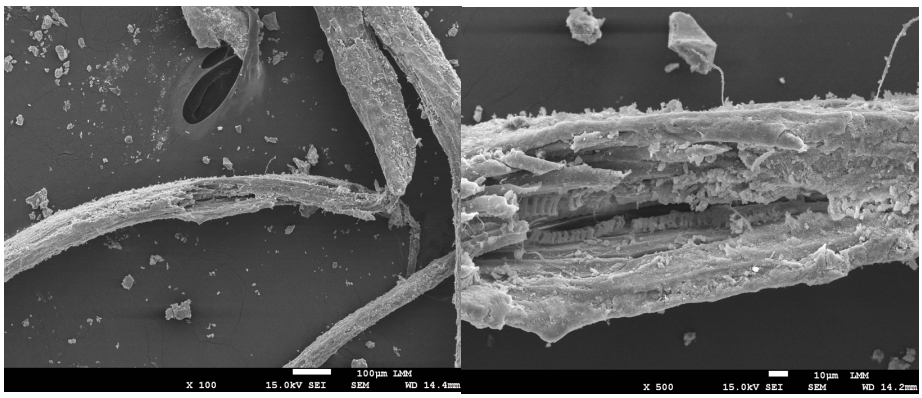
Ao final de 24 meses, período que coincide com a consolidação de um pH alcalino na solução dos poros, a análise microestrutural evidenciou uma nítida divergência de comportamento entre os materiais. Nas fibras naturais, a Figura 6.4a-b revela a manifestação de uma intensa incrustação de argilominerais recobrindo a superfície, obscurecendo quase por completo a textura original das fibras de açaí. A formação dessa crosta e a deposição de substâncias minerais/gelatinosas sobre a periferia degradada alinham-se perfeitamente aos mecanismos de mineralização interfacial documentados por Li *et al.* (2026) e Wei (2014).



a) b)

Figura 6.4- MEV em fibra natural após 24 meses de exposição: a) visão geral de superfície incrustada por argilominerais e com pontos de fratura; b) close-up.

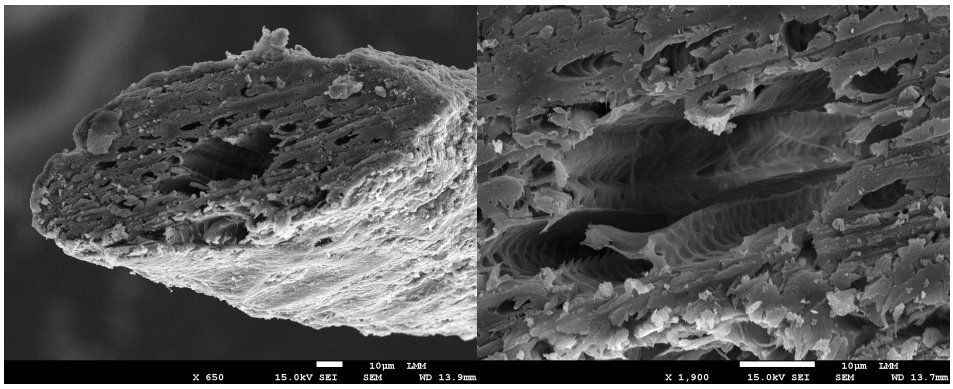
Para além das alterações superficiais, a Figura 6.5a-b evidencia o ataque estrutural sofrido pela fibra desprotegida, marcado pelo surgimento de pontos de fratura ao longo do eixo, nos quais os lúmens celulares apresentam aspecto oco e consumido. Conforme descrito por Lv & Liu (2023), esse aspecto oco atua como via preferencial, facilitando a penetração da solução alcalina e acelerando a hidrólise de dentro para fora.



a) b)

Figura 6.5- Evidências de degradação estrutural, pontos de fratura e lúmens ocos: a) visão geral; b) close-up.

Para aprofundar a investigação dessa degradação estrutural, análises complementares na seção transversal das fibras foram conduzidas. A Figura 6.6a-b ratifica visualmente a degradação interna na fibra desprotegida: observa-se a formação de uma expressiva cavidade central (aspecto oco), indicando o consumo preferencial do núcleo da matriz celular. Nota-se que a região circundante a essa grande cavidade ainda preserva a estrutura de alguns lúmens, sugerindo que a degradação não expôs totalmente a seção de imediato, mas que o ataque se concentra em corroer o interior do filamento.



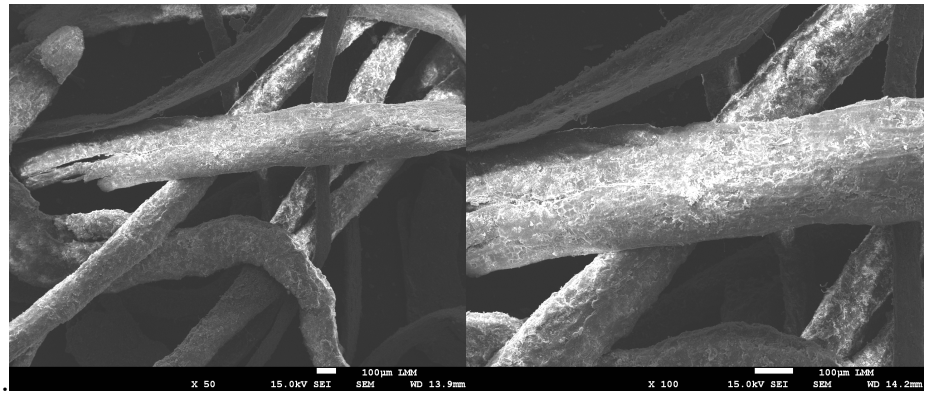
a) b)

Figura 6.6- MEV da seção transversal (fibra natural) após 24 meses de exposição: a) visão geral - cavidade central (aspecto oco) e lúmens circundantes; b) close-up na cavidade degradada.

Esse esvaziamento interno e a consequente perda de rigidez observados corroboram os achados de Jamshaid *et al.* (2023) e Santos *et al.* (2026), que associam a exposição ambiental e

química à degradação da celulose e à formação de microfissuras. Esse ataque compromete primordialmente a parede celular secundária, convertendo a fibra, outrora mecanicamente rígida, em um material excessivamente complacente e maleável (Silveira *et al.*, 2022).

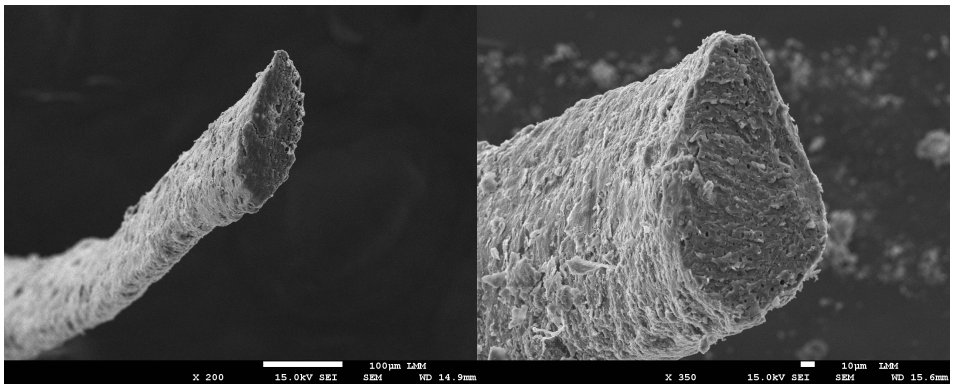
Em elevado contraste, a Figura 6.7a-b ilustra o comportamento blindado da fibra tratada sob idênticas condições de severidade alcalina. A deposição de partículas de solo é notavelmente reduzida e a superfície mantém-se limpa. De maior relevância estrutural, não foram observadas fraturas, rupturas longitudinais ou o colapso dos lúmens internos. Essa preservação morfológica alinha-se aos resultados recentes obtidos por Barbosa *et al.* (2025), que, ao investigarem fibras naturais amazônicas submetidas a tratamentos hidrofóbicos à base de compostos silicosos, constataram por meio de MEV que a deposição inorgânica consolida a superfície e inibe o surgimento de microfissuras e fraturas sob exposição alcalina severa.



a) b)

Figura 6.7- MEV em fibra tratada após 24 meses de exposição: a) visão geral de superfície limpa, ausência de fraturas e lúmens preservados; b) close-up.

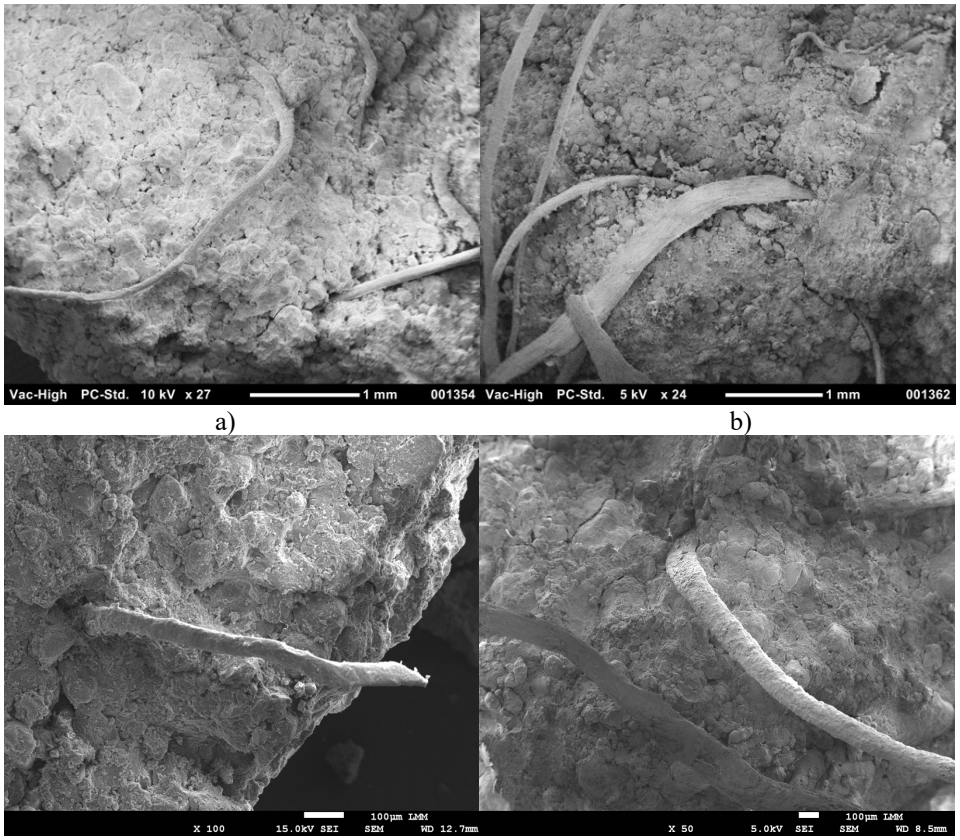
A integridade dessa blindagem inorgânica é definitivamente comprovada pela análise da seção transversal da fibra tratada (Figura 6.8). Diferentemente do material natural, a matriz interna apresenta-se maciça e plenamente preservada, sem qualquer indício de formação de cavidades centrais ou esvaziamento estrutural provocado pela hidrólise. Esse cenário corrobora as conclusões de Silveira *et al.* (2022) de que o tratamento com sílica coloidal atua não apenas superficialmente, mas estabelece-se como uma barreira interna efetiva contra a degradação, salvaguardando a integridade física e mecânica do filamento em sua totalidade.



a) b)

Figura 6.8- MEV da seção transversal (fibra tratada) após 24 meses de exposição: a) e b) fibras apresentando preservação total da matriz interna, com ausência de cavidades ou esvaziamento.

No que tange à interação físico-mecânica com a matriz terrosa, a análise das amostras revelou um comportamento semelhante para ambos os materiais. A Figura 6.9a-d comprova que, tanto aos 12 quanto aos 24 meses, os compósitos mantiveram excelente adesão e intertravamento mecânico com a argila circundante.



a) b)

c) d)

Figura 6.9- Adesão e intertravamento mecânico entre fibras e argila: a) fibra natural (12 meses); b) fibra tratada (12 meses); c) fibra natural (24 meses); d) fibra tratada (24 meses)

A sustentação dessa interface é fundamentada pela micromecânica de ancoragem. Conforme demonstrado em análises de microscopia por Tang *et al.* (2010), os elementos de reforço são envelopados pelos grãos finos, criando uma forte zona de atrito que se mantém ativa mesmo

diante do avanço de alterações químicas em sua superfície. O próprio confinamento imposto pela argila às irregularidades das fibras inibe o deslizamento relativo precoce, garantindo que a mistura continue operando como um corpo integrado ao longo do tempo, fenômeno igualmente reportado por Moslemi *et al.* (2022).

Diante dessas constatações, torna-se possível inferir que possíveis diferenças no comportamento geomecânico de longo prazo não podem associar-se a uma falha de interface ou à perda de contato entre a fibra e o solo, cuja mudança de performance decorreria da preservação (ou não) de sua integridade estrutural interna. Isso porque, enquanto a fibra tratada permaneceu estruturalmente íntegra e apta a combater tensões como um elemento de reforço ativo, a fibra natural sofreu degradação celular, mantendo seu bom intertravamento de forma meramente passiva no interior do compósito.

Para avaliar as repercussões do colapso estrutural interno sobre a compressibilidade da estrutura interna e na organização tridimensional dos macroporos sob elevadas tensões, recorreu-se à análise de porosimetria por intrusão de mercúrio. Tomando como referência o comportamento inicial estabelecido (tempo zero), no qual a introdução das fibras promoveu uma nítida porosidade secundária associada à interface solo-reforço, a Figura 6.10 apresenta a evolução e o contraste da rede de macroporos para os compósitos após 24 meses de exposição.

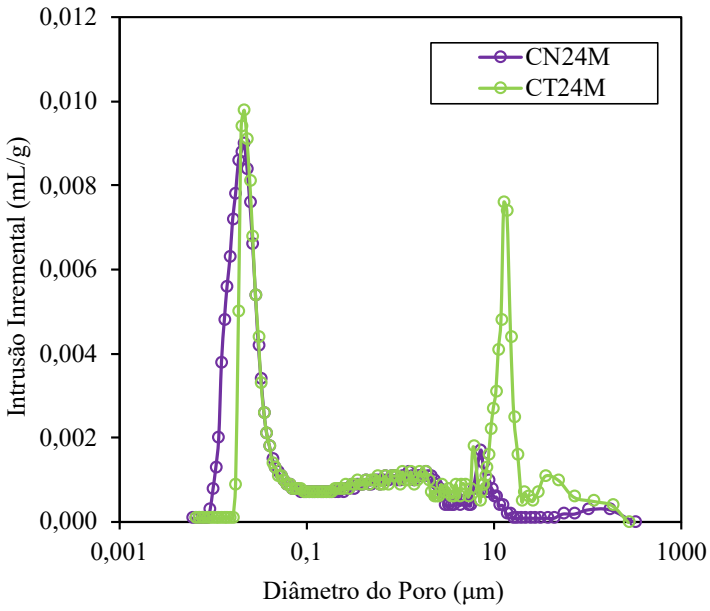


Figura 6.10- Curvas de distribuição do tamanho dos poros após 24 meses de envelhecimento.

Os resultados aos 24 meses revelam comportamentos opostos: no compósito com fibras naturais, observa-se uma redução drástica e a supressão aparente da macroporosidade, com a curva de intrusão regredindo ao comportamento típico do solo puro. À primeira vista, essa tendência poderia sugerir a degradação total ou o desaparecimento físico das fibras. Entretanto,

como as inspeções visuais e microestruturais já comprovaram a presença abundante e a continuidade das inclusões no interior do compósito, conclui-se que o mascaramento desses macroporos pode indicar, na verdade, um artefato mecânico inerente ao próprio método de PIM.

Conforme adverte a diretriz normativa do ensaio (ASTM D4404), a validade físico-matemática da injeção de mercúrio pressupõe que a matriz porosa avaliada seja estritamente rígida e indeformável sob altas tensões. A violação dessa premissa em materiais brandos e compressíveis leva à distorção da leitura. Estudos clássicos e contemporâneos atestam que a elevada pressão hidrostática do equipamento induz o esmagamento das gargantas de acesso (*pore throats*) antes que o fluido denso possa invadi-las, subestimando o volume real de vazios e obliterando a detecção dos macroporos estruturais (e.g. Klaver *et al.*, 2015; Penumadu & Dean, 2000).

No contexto de matrizes reforçadas, elementos de natureza orgânica são altamente suscetíveis à deformação elasto-plástica durante as leituras porosimétricas, exigindo extrema cautela interpretativa (Li *et al.*, 2021). Mais especificamente, a macroestrutura oca e fibrosa dos elementos vegetais, quando submetida a essas pressões isostáticas extremas, sofre o fenômeno de flambagem (*buckling*) e o colapso de sua seção transversal (Rutledge *et al.*, 2009). Esse esmagamento, consolidado na micromecânica como colapso volumétrico da fibra (*fiber collapse*) (Yamauchi, 2007), resulta no fechamento forçado dos lúmens celulares, mascarando completamente os canais reais de condução.

Em síntese, a supressão dessa macroporosidade na curva de PIM é a prova física indireta do elevado processo de degradação da amostra desprotegida. A degradação alcalina comprometeu o esqueleto de lignina e celulose, convertendo a fibra em um elemento maleável, incapaz de resistir ao esmagamento imposto pelas pressões de intrusão do mercúrio.

Em completo contraste, o compósito com fibras tratadas exibiu a preservação integral da sua rede de macroporos, mantendo o perfil característico do estado de reforço inicial, comportamento que comprova a eficácia do bloqueio físico-químico promovido pela sílica coloidal, isolando a matriz orgânica do ambiente agressivo e impedindo sua degradação. Como resultado prático, a inclusão tratada conservou a sua rigidez intrínseca e integridade estrutural, resistindo às severas pressões do ensaio e preservando a arquitetura tridimensional da interface solo-fibra.

Para compreender a origem molecular da degradação estrutural detectada pela porosimetria e evidenciar quimicamente a eficácia protetora da sílica, as análises espectroscópicas elucidam os mecanismos de degradação estrutural. Nesse contexto, a avaliação por FTIR foi conduzida

comparativamente entre o estado inicial de referência (FN0M e FT0M) e o estágio crítico de degradação (FN24M e FT24M), cuja evolução espectral é ilustrada nas Figuras 6.11 e 6.12.

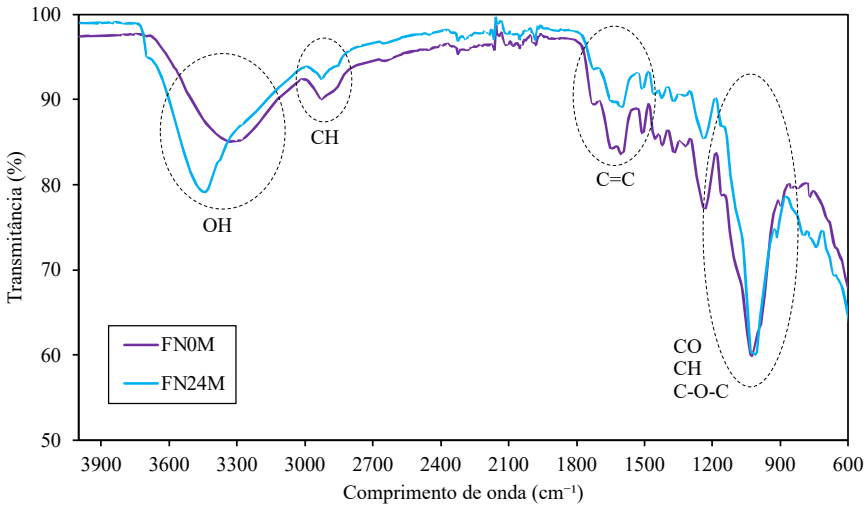


Figura 6.11- FTIR comparativo - estado inicial e 24 meses de envelhecimento (fibras naturais).

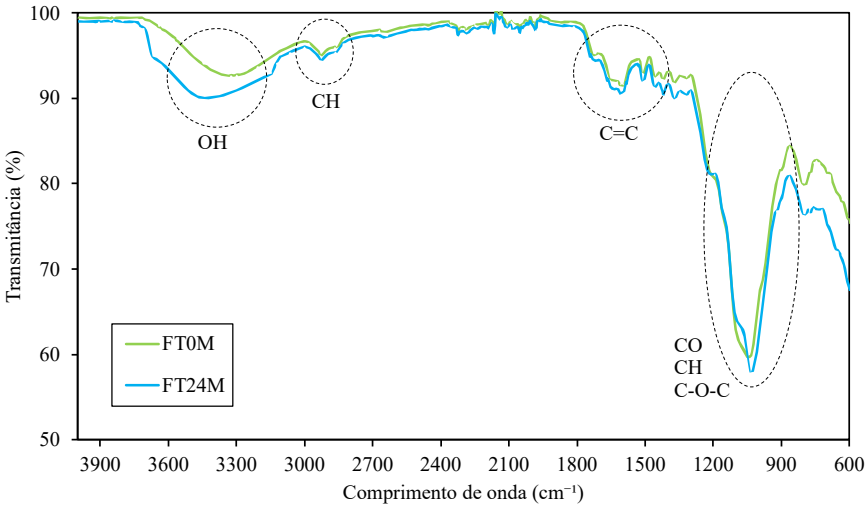


Figura 6.12- FTIR comparativo - estado inicial e 24 meses de envelhecimento (fibras tratadas).

Na região do estiramento O–H (3200–3600 cm^{-1}), o envelhecimento da fibra natural promoveu um aprofundamento relativo do pico de absorção, indicando maior hidratação e a formação de novos sítios hidroxílicos associados à degradação superficial do material. Em contraste, a fibra tratada apresentou menor intensidade de absorção após 24 meses, atestando a eficácia do revestimento inorgânico em restringir o acesso da umidade ambiente às microfibrilas de celulose.

A análise das bandas associadas à matriz de lignina, compreendendo o estiramento C–H (2800–3000 cm^{-1}) e as vibrações aromáticas do anel de benzeno em C=C (1605–1505 cm^{-1}), reforça a divergência comportamental. Conforme Zhang *et al.* (2022) e Chen *et al.* (2017), o decréscimo de intensidade na região de 1505 cm^{-1} é um marcador direto da degradação e

lixiviação dos componentes da lignina sob exposição ambiental. Enquanto a fibra natural exibe claras alterações químicas nesse esqueleto estrutural devido à exposição prolongada, as fibras tratadas apresentam curvas virtualmente sobrepostas entre o tempo zero e os 24 meses. Esse paralelismo espectral demonstra que a camada de sílica atuou como uma barreira impermeabilizante absoluta, preservando a química intrínseca do polímero natural.

A discrepância mais incisiva manifesta-se na região de 1200–900 cm^{-1}. Na fibra natural, ocorre um rebaixamento da linha de base, indicando maior amplitude de absorção decorrente das severas alterações e do desgaste na superfície exposta ao ambiente alcalino. Em contrapartida, as curvas da fibra tratada permanecem sobrepostas ao longo de toda a região espectral correspondente às ligações da sílica. Essa estabilidade denota a ausência de lixiviação do revestimento, corroborando os achados de Silveira *et al.* (2022). Tais autores demonstraram que a base inorgânica impregna a superfície formando uma película quimicamente estável que isola as microfibrilas dos agentes biológicos e químicos sem alterar os modos de vibração lignocelulósicos originais.

O somatório dessas variações espectrais comprova, em escala molecular, as dinâmicas de deterioração macroscópicas previamente levantadas. Na fibra desprotegida, a degradação atinge progressivamente a fração estrutural de celulose (Santos *et al.*, 2026), fenômeno que ocorre simultaneamente à hidrólise alcalina da lignina e da hemicelulose periféricas (Wei, 2018). É justamente a quebra das regiões amorfas e o rompimento contínuo das pontes de hidrogênio da rede polimérica (Jamshaid *et al.*, 2023) que geram os novos sítios hidroxílicos observados no FTIR, explicando o enfraquecimento físico e a degradação estrutural do reforço submetido ao envelhecimento ambiental (Wei, 2014).

A estabilidade química da barreira de sílica, previamente evidenciada pela espectroscopia FTIR, é corroborada pela evolução da composição elementar das superfícies das fibras, rastreada por FRX. Nesse contexto, a Tabela 6.2 apresenta o balanço elementar das amostras naturais e tratadas entre o tempo zero e os 24 meses de exposição às condições climáticas, mapeando a intensidade das trocas iônicas na interface solo-fibra.

Tabela 6.2- Evolução da composição elementar superficial das fibras após exposição às condições climáticas

Amostra	**Constituintes elementares (%)**											
	Fe	K	Si	Ca	Mn	S	Cr	P	Al	Ru	Ti	Ba
FN0M	27,6	20,5	20,5	14,4	5,5	4,2	2,9	2,5	1,9	-	-	-
FN24M	22,3	0,6	25,1	10,2	0,2	1,6	-	-	35,1	2,1	2,0	0,8
FT0M	1,5	1,3	90,9	2,6	0,5	1,4	0,2	-	1,6	-	-	-
FT24M	9,5	0,5	57,3	15,2	0,1	2,1	0,1	-	12,4	2,0	0,8	-

Para as fibras naturais desprotegidas, a exposição ambiental resultou em uma profunda reconfiguração da sua assinatura química superficial. Elementos nativos altamente solúveis, notadamente o Potássio (K), sofreram lixiviação quase completa, despencando de 20,5% para exíguos 0,6%. Conforme elucidado por Jamshaid *et al.* (2023), a exposição ambiental prolongada deflagra a quebra progressiva da rede estrutural lignocelulósica, franqueando a mobilidade de cátions originalmente fixados na matriz celular e permitindo que sejam carreados para a solução do solo.

Em paralelo a essa evasão mineral interna, a superfície degradada passou a atuar como um sumidouro para os constituintes da laterita. Isso é evidenciado pela invasão massiva do Alumínio (Al), que saltou de apenas 1,9% para 35,1%, tornando-se o elemento predominante na incrustação da fibra. Essa dinâmica bidirecional de troca iônica é validada por Santos *et al.* (2026) em seu estudo sobre fibras de açaí envelhecidas em argilas tropicais: os autores mapearam via FRX a lixiviação severa do potássio nativo, sucedida pela impregnação maciça da microestrutura por partículas coloidais de alumínio e ferro provenientes dos óxidos pedogenéticos. Essa intensa incrustação interfacial também se alinha aos espectros de EDS e mapeamentos microestruturais recentemente reportados por Wang *et al.* (2024).

Do ponto de vista biogeoquímico, esse agressivo fenômeno de mineralização possui sólido respaldo nos estudos de Hodson & Evans (2020), que atestam a forte afinidade química interfacial que induz a coprecipitação de complexos de alumínio e silício (hidroxialuminossilicatos) tanto no interior quanto na superfície das paredes celulares vegetais. A alteração morfológica e o drástico ganho de aderência gerados pela precipitação desses compostos, como o $Al(OH)_3$, encontram paralelo direto nos trabalhos de Anggraini *et al.* (2016), justificando a acentuada rugosidade mineral adquirida pelo material no contato com a matriz.

Em elevado contraste, as fibras tratadas apresentaram uma blindagem química contundente. No tempo zero, a proporção elevada do Silício (90,9%) comprovou o recobrimento da fibra pela película de sílica coloidal. Após 24 meses, embora o valor absoluto apresente redução, o Silício preservou-se como elemento majoritário (57,3%), indicando a persistência estrutural do revestimento. Essa variação percentual não traduz uma lixiviação da película estrutural, mas sim um efeito de diluição estatística no balanço composicional decorrente da natural deposição de argilominerais sobre a barreira.

A eficácia dessa blindagem é provada matematicamente pela limitação da contaminação iônica: enquanto a fibra natural permitiu uma impregnação de 35,1% de Alumínio, a tratada restringiu essa invasão a apenas 12,4%. Estudos de Wei & Meyer (2017) e Wei (2018) atestam

que o bloqueio físico da parede celular inibe a mineralização severa, isto é, a precipitação cristalina profunda nos lúmens das fibras, prevenindo o colapso estrutural que inevitavelmente assola filamentos orgânicos sob ataque alcalino.

Em síntese, os resultados de FRX materializam as evidências obtidas por FTIR: a fibra natural sofreu lixiviação de seus componentes orgânicos e mineralização substitutiva, enquanto o revestimento de sílica atuou como uma muralha físico-química eficiente, minimizando a troca iônica e preservando a integridade original do material.

Com os mecanismos químicos de degradação e as dinâmicas de proteção estrutural devidamente elucidados em nível microscópico, torna-se necessário avaliar suas repercussões macrossistêmicas. Nesse contexto, a análise da condutividade hidráulica dos compósitos solo-fibra constitui um parâmetro fundamental para validar o comportamento físico do material sob fluxo de água e aferir a integridade funcional da rede de macroporos a longo prazo.

Para compreender o impacto da degradação na manutenção dessa rede de drenagem, a Tabela 6.3 apresenta a evolução dos coeficientes de permeabilidade ($k_{20°C}$) do estado inicial aos 24 meses de exposição.

Tabela 6.3- Evolução do coeficiente de permeabilidade dos compósitos ao longo do tempo de exposição ao clima

Amostra	SP0M	CN0M	CN6M	CT6M	CN12M	CT12M	CN24M	CT24M
$k_{20°C}$ (cm/s)	$3{,}7x10^{-6}$	$2{,}9x10^{-5}$	$8{,}4x10^{-5}$	$7{,}1x10^{-5}$	$1{,}2x10^{-5}$	$1{,}0x10^{-5}$	$1{,}2x10^{-5}$	$1{,}7x10^{-5}$

Conforme estabelecido no estado de referência (tempo zero), a inclusão das fibras elevou a permeabilidade do maciço para a ordem de 10^{-5} cm/s, em função da alteração da estrutura de compactação e da formação de macroporos interconectados (Ma *et al.*, 2020; Merville & Soares, 2024; Shaker *et al.*, 2021; Xi *et al.*, 2024). A gênese dessa rede de drenagem é dupla: a inserção cria caminhos preferenciais na zona de interface solo-fibra (Bordoloi *et al.*, 2017) e, simultaneamente, a microestrutura vazada atua como conduto ativo, permitindo fluxo longitudinal através dos canais capilares (Ni *et al.*, 2019).

A evolução temporal até os seis meses evidencia uma dinâmica de acomodação hídrica e estabilização da interface, gerando um pico transitório de vazão, seguido pela convergência e estabilização dos valores a partir do 12º mês.

O resultado geotecnicamente mais expressivo desta análise emerge do confronto direto com a porosimetria. Enquanto o ensaio de intrusão sugeriu o fechamento aparente dos macroporos na amostra natural, a condutividade hidráulica prova a manutenção do fluxo a baixas pressões: a permeabilidade aos 24 meses permanece semelhante à do 12º mês ($1{,}2x10^{-5}$ cm/s) e expressivamente superior à do solo puro ($3{,}7x10^{-6}$ cm/s). Esse comportamento confirma que as fibras continuam presentes e intertravadas na matriz, sustentando vias de drenagem.

O aparente desaparecimento observado na porosimetria ratifica-se, portanto, como um mero artefato da perda de integridade estrutural da fibra sob as altíssimas tensões do mercúrio. Essa constatação é amparada pelas investigações de Nguyen *et al.* (2018) em drenos de fibras naturais biodegradadas. Os autores comprovaram que filamentos orgânicos envelhecidos e degradados mantêm intacta a sua capacidade de descarga hídrica sob baixas pressões confinantes (como ocorre no ensaio de permeabilidade), sofrendo colapso estrutural obstrutivo apenas quando submetidos a elevadas pressões espaciais (condição análoga à imposta pelo porosímetro).

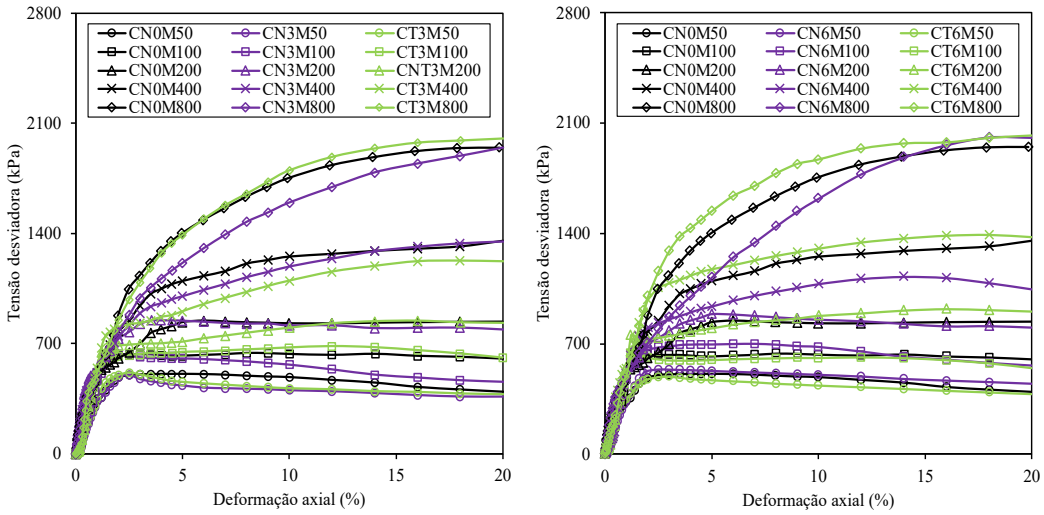
No estágio crítico de 24 meses, a sutil diferença final de permeabilidade entre os materiais elucida a eficácia do tratamento superficial. O compósito tratado apresenta drenagem ligeiramente superior à do natural, desempenho associado à preservação da integridade estrutural da parede celular promovida pelas barreiras inorgânicas de sílica (Silveira *et al.*, 2022), mantendo a geometria da seção transversal e os caminhos de fluxo firmemente abertos sob as tensões do maciço.

Em contrapartida, a ligeira redução na vazão do compósito natural envelhecido decorre do chamado efeito esponja, em que a introdução de filamentos eleva a capacidade de retenção de umidade (Yang & Jin, 2024). Contudo, a degradação da hemicelulose e a remoção da matriz de lignina acentuam esse fenômeno ao alterarem os mecanismos de sorção capilar, gerando novos espaços vazios interfibrilares de alto poder de retenção (Pejic *et al.*, 2008). Em nível microscópico, o rompimento das redes amorfas promove o inchamento contínuo da fibra, que absorve e retém capilarmente a água livre em seus lúmens deteriorados (Garat *et al.*, 2020; Le Duigou *et al.*, 2015).

Esse inchamento torna as cavidades excessivamente hidrofílicas, levando ao preenchimento físico dos poros da matriz circundante, o que atua como limitador da condutividade hidráulica global (Moslemi *et al.*, 2022). Somado a isso, a fibra degradada torna-se incapaz de suportar plenamente as tensões geomecânicas do fluxo contínuo. A degradação parcial dessa macroestrutura, frequentemente associado à lixiviação de biomassa e ao entupimento parcial (*clogging*) dos canais interfibrilares, reduz a eficiência dos macroporos originais como vias de drenagem (Nguyen *et al.*, 2018).

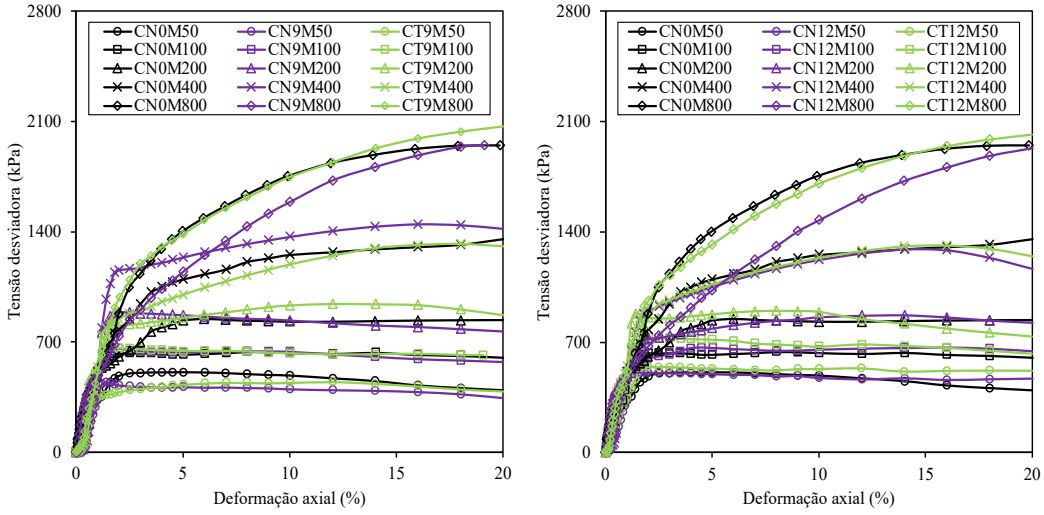
Apesar dessa reconfiguração micromecânica, em termos de desempenho prático global, ambos os compósitos mantêm a sua viabilidade técnica a longo prazo. Embora a degradação estrutural interna e o inchamento da fibra natural limitem marginalmente o fluxo, essas alterações não comprometem a função drenante do estrato estruturado em sua totalidade.

A análise da resistência ao cisalhamento dos compósitos ao longo do tempo foi retratada pela evolução das trajetórias de tensão desviadora (σ_d) versus (ε_a), mapeadas semestralmente. As Figuras 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16 apresentam essa progressão do 1º ao 4º semestre, ilustrando o contraste direto entre o estado inicial (tempo zero) e os estágios de envelhecimento.



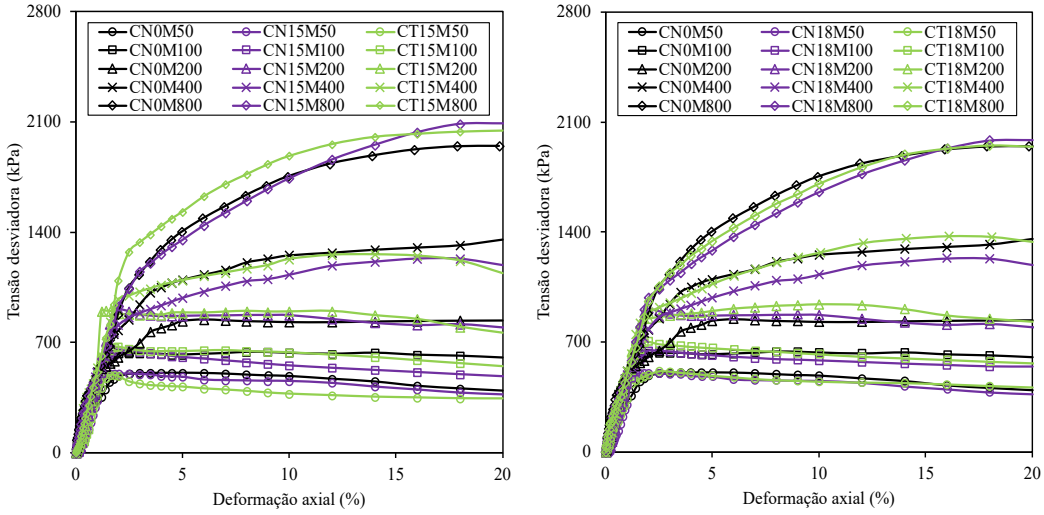
a) b)

Figura 6.13- Evolução temporal das curvas de tensão desviadora *x* deformação axial: a) 3 meses; b) 6 meses.



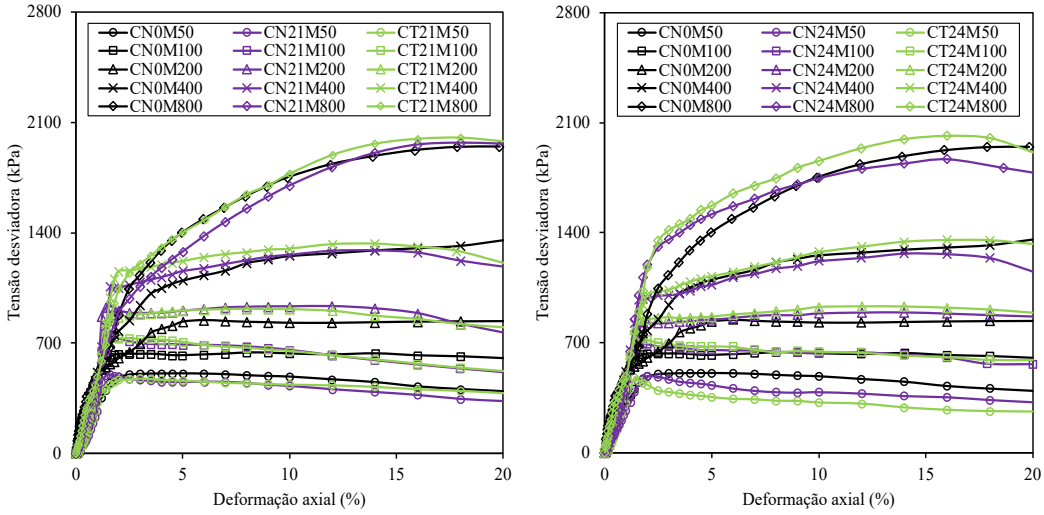
a) b)

Figura 6.14- Evolução temporal das curvas de tensão desviadora *x* deformação axial: a) 9 meses; b) 12 meses.



a) b)

Figura 6.15- Evolução temporal das curvas de tensão desviadora *x* deformação axial: a) 15 meses; b) 18 meses.



a) b)

Figura 6.16- Evolução temporal das curvas de tensão desviadora *x* deformação axial: a) 21 meses; b) 24 meses.

De maneira geral, o padrão macroscópico de resposta mecânica foi preservado ao longo de todo o processo de degradação. Em coerência com o tempo zero, ambos os compósitos mantiveram forte dependência do nível de confinamento: sob 50 e 100 kPa, ocorre a mobilização de resistência de pico seguida de sua redução (*strain-softening*), enquanto sob pressões maiores (400 e 800 kPa), o comportamento evolui para *strain-hardening*, sem pico definido de ruptura, fenômeno tipicamente documentado para matrizes reforçadas sob alta restrição espacial (Correia *et al.*, 2021).

A principal evidência quantitativa desta seção refere-se à sustentação da tensão desviadora. Diferentemente do enfraquecimento mecânico esperado para materiais orgânicos degradáveis, os valores de tensão desviadora máxima permaneceram estáveis após dois anos. Sob 50 kPa, a resistência do compósito tratado (487 kPa) e do natural (478 kPa) manteve-se emparelhada ao valor inicial de referência (507 kPa), e sob o maior confinamento (800 kPa), os desempenhos

aos 24 meses (2014 kPa para o tratado e 1868 kPa para o natural) oscilaram dentro da margem de variabilidade experimental frente ao estado inicial (1946 kPa).

Essa estabilidade da resistência de pico na fibra natural, frente à degradação molecular atestada pelo FTIR e ao colapso estrutural capturado pelo PIM, é elucidada pelo mecanismo cinemático do cisalhamento. A resistência macroscópica mobilizada independe da rigidez do núcleo da fibra, sendo governada pelo atrito interfacial e pelo intertravamento intergranular. Conforme previamente provado pelo MEV e pela incrustação mineral do FRX, a fibra natural permaneceu fisicamente presente e firmemente ancorada à argila, consequentemente o seu processo de degradação interna não suprimiu a sua interface de atrito no plano de ruptura.

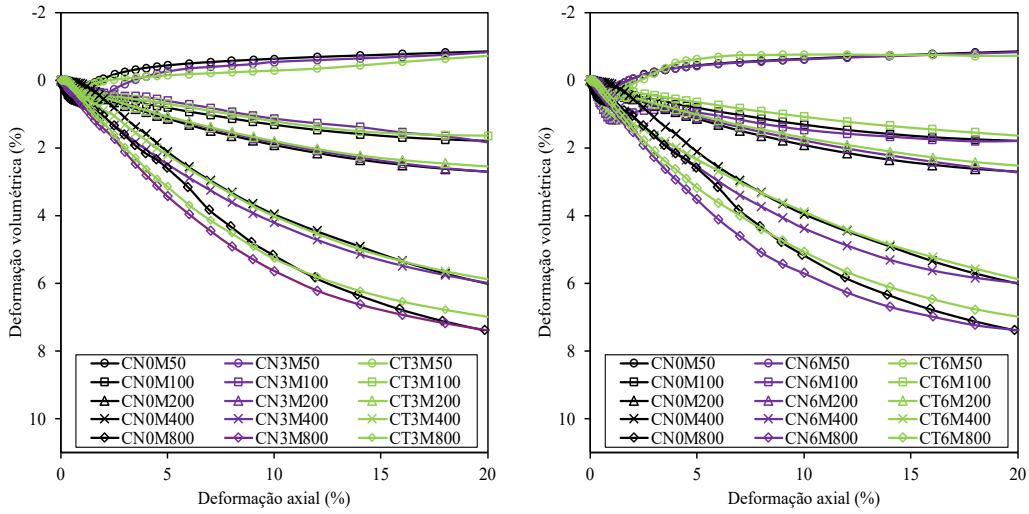
Cabe destacar que o teor de fibras adotado (1%) também pode ter contribuído para essa resiliência mecânica. A densidade da malha fibrosa garante uma ancoragem distribuída e múltiplos caminhos de transferência de tensões, de modo que mesmo fibras parcialmente degradadas continuam a interceptar os planos de cisalhamento e a redistribuir os esforços. Em teores menores, como os 0,5% frequentemente reportados na literatura para outros reforços vegetais, a eficiência da malha pode ser comprometida pela reduzida quantidade de filamentos, tornando o compósito mais suscetível à perda de desempenho quando a degradação atinge individualmente as fibras. Assim, a combinação entre o teor de 1% e a preservação da interface fibra-solo, mesmo com a degradação interna do filamento, pode explicar a manutenção dos valores de tensão desviadora ao longo dos 24 meses de exposição.

A sustentação dessa resistência corrobora as dinâmicas de longo prazo mapeadas por Reis *et al.* (2023), os quais atestam que uma fibra envelhecida e maleável necessita de maiores deformações axiais para ser estirada, mas que a preservação do seu intertravamento residual garante ao maciço o alcance de tensões máximas estatisticamente idênticas às de sua contraparte intacta. Esse fenômeno pode ser potencializado pela atividade biológica: Silveira *et al.* (2022) demonstram que, mesmo sofrendo biodegradação, o compósito tem sua perda de rigidez compensada pela formação de biofilme microbiano na superfície orgânica, elevando a adesão e o intercepto coesivo.

Adicionalmente, pela ótica da micromecânica de arrancamento (*pull-out*), Tang *et al.* (2010) comprovam que a resistência ao cisalhamento é controlada primariamente pela área efetiva de contato, pela força de rearranjo e pela rugosidade perimetral, superando amplamente a mera dependência do Módulo de Young elástico do filamento. Cabe ressaltar que a resiliência estrutural da fibra de açaí assume proporções excepcionais quando confrontada com o estado da arte: enquanto a literatura contemporânea reporta o declínio drástico e a perda de resistência em argilas reforçadas com outras fibras vegetais (e.g. cânhamo) após 3 semanas de exposição

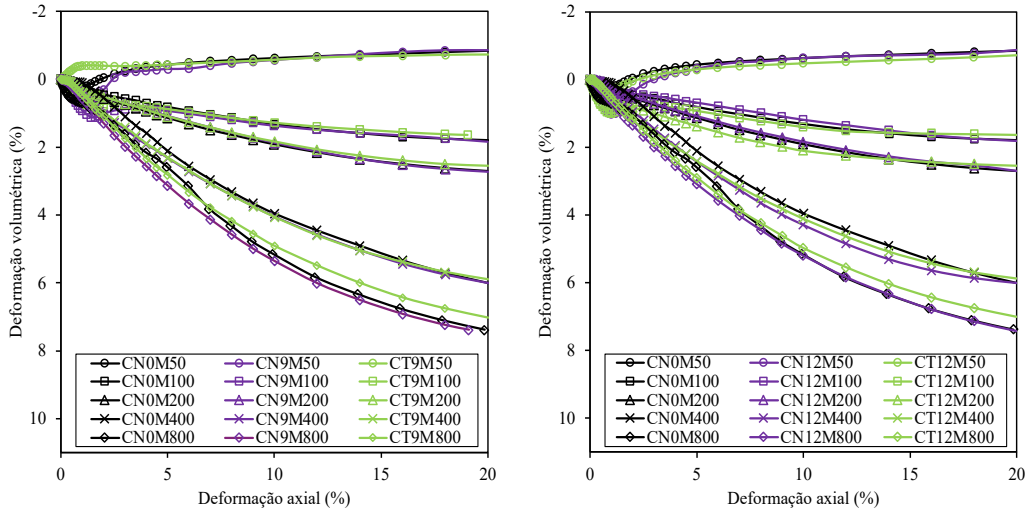
ambiental (El Ahmad *et al.*, 2024), o compósito de açaí aqui avaliado sustentou sua tensão máxima praticamente inalterada por 24 meses.

Embora a degradação estrutural interna da fibra de açaí natural não tenham induzido a queda da resistência de pico, suas consequências manifestaram-se na alteração da resposta deformacional, evidenciando um comportamento de matriz significativamente mais compressível. Essa dinâmica pode ser observada nas curvas de deformação volumétrica (ε_{vol}) registradas ao longo do tempo de exposição, apresentadas nas Figuras 6.17 a 6.20.



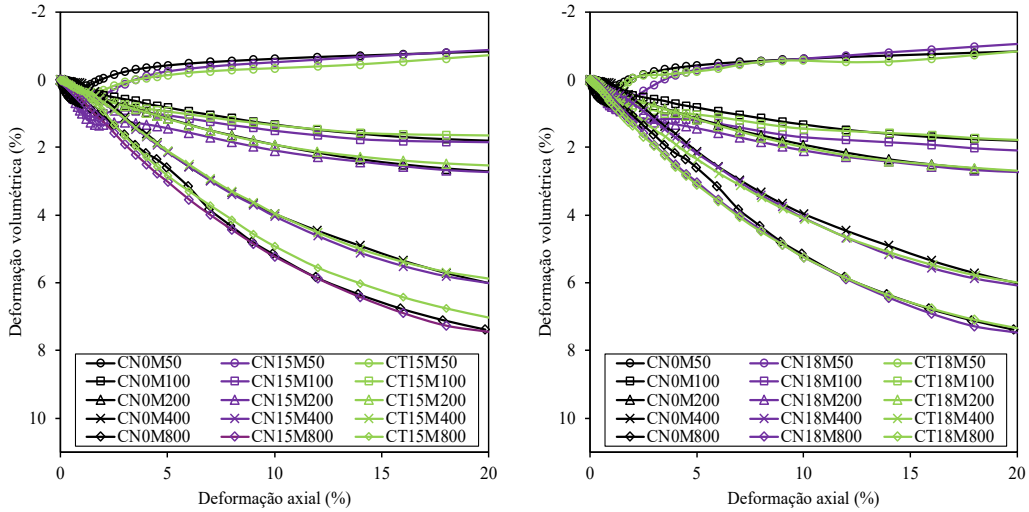
a) b)

Figura 6.17- Evolução temporal das curvas de deformação volumétrica *x* deformação axial: a) 3 meses; b) 6 meses.



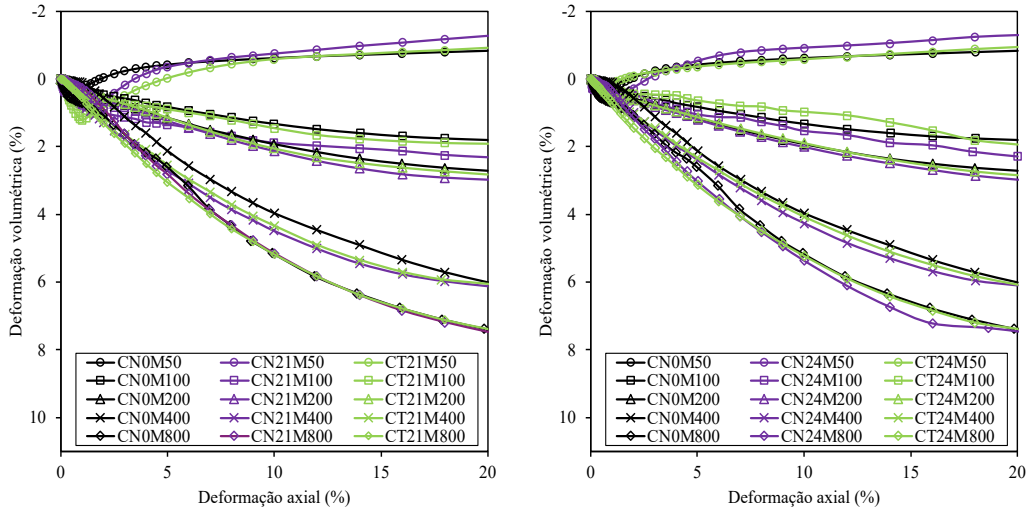
a) b)

Figura 6.18- Evolução temporal das curvas de deformação volumétrica *x* deformação axial: a) 9 meses; b) 12 meses.



a) b)

Figura 6.19- Evolução temporal das curvas de deformação volumétrica *x* deformação axial: a) 15 meses; b) 18 meses.



a) b)

Figura 6.20- Evolução temporal das curvas de deformação volumétrica *x* deformação axial: a) 21 meses; b) 24 meses.

No estado inicial, a eficácia volumétrica do reforço derivava diretamente da integridade estrutural e da morfologia das fibras, que, aliadas à sua ancoragem friccional, atuavam restringindo a dilatação radial sob baixos confinamentos e limitando a compressão severa da matriz sob pressões moderadas. Ao analisar as trajetórias volumétricas após o processo de degradação, constata-se que o compósito tratado (CT24M) preservou esse comportamento integralmente. A manutenção dessa integridade estrutural, garantida pela película de sílica que inibe o ataque à parede celular (Silveira *et al.*, 2022), permitiu que a fibra continuasse operando como uma inclusão estrutural geometricamente ativa. Consequentemente, sob 50 kPa, o compósito tratado continuou a mobilizar plenamente o efeito tirante, restringindo a expansão plástica de forma análoga ao tempo zero.

Em contraponto, o compósito natural (CN24M) sofreu uma clara transição cinemática: a fibra desprotegida demonstrou uma expressiva supressão de sua capacidade de contenção volumétrica. Observou-se uma acentuada tendência à compressibilidade, com a matriz cedendo mais facilmente às pressões da câmara, afastando-se do comportamento rígido de ancoragem e aproximando-se da resposta deformável inerente ao solo puro não reforçado (Silveira *et al.*, 2022).

Esse salto de compressibilidade devido à degradação é um fenômeno convergente na literatura. O ataque microbiano e hidrolítico destrói gradativamente a resistência à tração e o esqueleto de sustentação do material orgânico (Carvalho *et al.*, 2014; Silveira & Casagrande, 2021). Desprovida dessa integridade, a inclusão converte-se em um elemento mais maleável e perde a sua capacidade fundamental de atuar como tirante. Consequentemente, sob o incremento das tensões radiais confinantes, a macroestrutura enfraquecida e oca da fibra é facilmente colapsada e rearranjada no interior dos poros (Nguyen *et al.*, 2018).

Aos 24 meses, a fibra natural perdeu sua função estrutural de estabilização de vazios, tornando-se um corpo de preenchimento volumetricamente passivo. Sob confinamentos extremos (800 kPa), onde o esmagamento estrutural da argila já governa o comportamento macroscópico desde o tempo zero, a presença do filamento degradado torna-se mecanicamente irrelevante na contenção do fluxo plástico.

Dessa forma, consolida-se a funcionalidade do tratamento: enquanto a inclusão natural sofreu colapso de lúmens e degradação estrutural interna progressivamente, abdicando da estabilidade volumétrica do maciço, a fibra revestida com sílica coloidal preservou a sua rigidez intrínseca e, com ela, a integridade da interface solo-fibra, assegurando a excelência do desempenho geomecânico a longo prazo.

A análise da perda de resistência de suporte de longo prazo consolida-se com a determinação das envoltórias de resistência ao cisalhamento, derivadas a partir das trajetórias de tensões efetivas (p' x q). Conforme atestado no estado inicial, a inclusão de fibras vegetais na matriz argilosa promoveu um salto expressivo no intercepto coesivo (c'), alavancado pelo efeito ponte e pela mobilização de tensões na interface, com variações muito mais discretas ou quase nulas no ângulo de atrito interno (ϕ) (Correia *et al.*, 2021; Moslemi *et al.*, 2022).

Para rastrear o impacto da biodegradação sobre essa mecânica, a Tabela 6.4 sintetiza a evolução quantitativa desses parâmetros globais ao longo dos 24 meses de exposição.

Tabela 6.4- Evolução dos parâmetros globais de resistência (c' e ϕ) ao longo da exposição ao clima

Material	c' (kPa)	ϕ (°)
SP0M	69	27
CN0M	133	30
CN12M	140	29
CT12M	148	29
CN24M	147	28
CT24M	142	30

A Figura 6.21 ilustra essa evolução de forma integrada, combinando barras para o intercepto coesivo e linhas para o ângulo de atrito. Visualmente, a coesão efetiva mantém-se em patamares elevados para ambos os compósitos ao longo de todo o período, com valores entre 133 e 148 kPa para o compósito tratado (CT) e entre 133 e 147 kPa para o compósito natural (CN). O ângulo de atrito, por sua vez, apresenta uma ligeira tendência de redução para o compósito natural (de 30° para 28° aos 24 meses), enquanto o compósito tratado mantém seu ângulo de atrito praticamente inalterado durante todo o período avaliado.

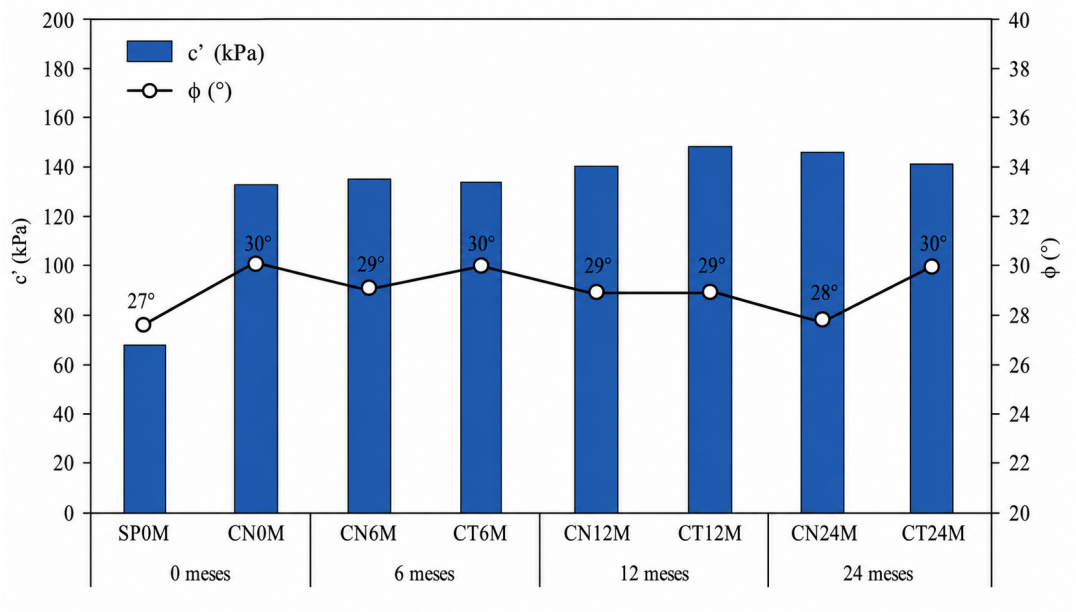


Figura 6.21- Evolução c' e ϕ ao longo do tempo.

Já a Figura 6.22 apresenta as trajetórias de tensões efetivas e as respectivas envoltórias de ruptura para os compósitos no estágio intermediário (12 meses) e no estágio crítico (24 meses). As envoltórias confirmam o padrão observado na Tabela 6.4: ambos os compósitos mantêm interceptos coesivos elevados ao longo do tempo, com ligeira redução da inclinação (ângulo de atrito) para o compósito natural no estágio final.

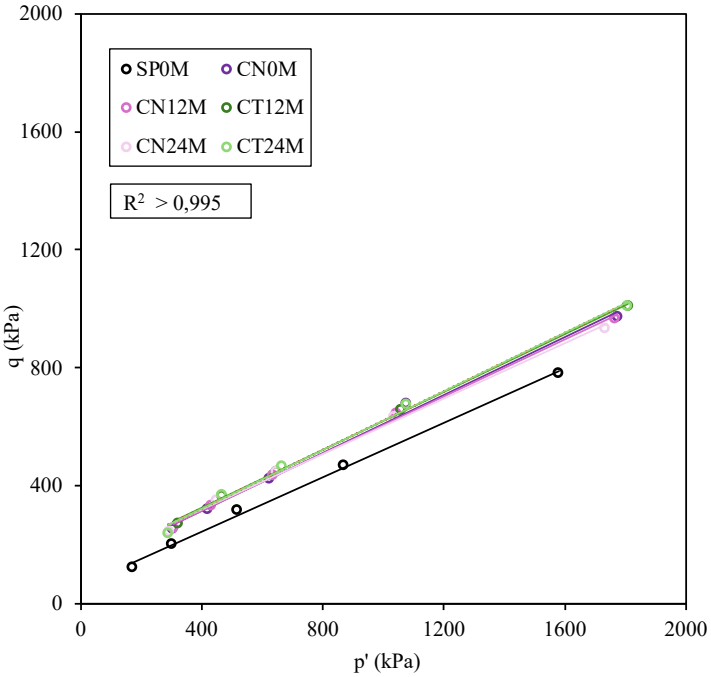


Figura 6.22- Envoltórias globais de resistência ao cisalhamento para compósitos expostos ao clima.

No estágio intermediário (12 meses), ambos os compósitos mantêm, e até ampliam, o intercepto coesivo, indicando uma fase contínua de acomodação e fortalecimento da interface solo-fibra. Aos 24 meses, entretanto, a consolidação do envelhecimento ambiental deflagra comportamentos distintos entre os tratamentos: no compósito natural (CN24M), constata-se a manutenção de uma elevada coesão (c' = 147 kPa), simultaneamente acompanhada por uma penalização do ângulo de atrito (que decai de 30° para 28°), fazendo com que a resposta friccional volte a se aproximar daquela inerente ao solo puro.

A preservação da coesão, mesmo diante de uma fibra envelhecida, fundamenta-se na permanência física do elemento orgânico na matriz. A fibra degradada mantém-se enraizada e aderida à argila, operando como um elemento de ligação que intercepta o plano de ruptura e garante que o compósito sustente parâmetros globais superiores aos do solo natural (Silveira & Casagrande, 2021). Adicionalmente, essa sustentação coesiva frente à biodegradação pode ser potencializada por um mecanismo biológico: a formação de redes de biofilme microbiano que atua elevando a adesão e a coesão aparente na interface, compensando mecanicamente a perda de integridade estrutural do filamento (Silveira *et al.*, 2022).

Por outro lado, a redução do ângulo de atrito interno (ϕ) é uma consequência estrita da perda de integridade estrutural: sob o contínuo ataque ambiental, a parede celular secundária é degradada e a inclusão, outrora mecanicamente rígida, converte-se em um elemento excessivamente compressível. Com essa degradação estrutural, a fibra perde a sua capacidade de absorver e transferir as tensões de trabalho de forma eficaz durante o deslizamento

intergranular (Silveira *et al.*, 2022). Em suma, a inclusão natural ainda contribui massivamente para a coesão por ancoragem passiva, mas abdica da sua eficiência como elemento de travamento friccional ativo.

Em contraste, o compósito tratado com sílica (CT24M) preserva integral e simultaneamente ambos os parâmetros de resistência (c' = 142 kPa e ϕ = 30°), retendo um comportamento virtualmente equivalente ao seu estado inicial recém-compactado. Esse desempenho referenda as conclusões de Mota (2022) e Silveira *et al.* (2022), os quais demonstraram que os revestimentos inorgânicos de sílica atuam como barreiras absolutas contra a hidrólise alcalina, salvaguardando a incompressibilidade da fibra e blindando a envoltória de resistência a longo prazo.

Em síntese, a análise tensional evidencia trajetórias divergentes: enquanto a fibra natural cedeu em rigidez mecânica e abdicou de parte de sua contribuição friccional, a fibra tratada preservou o seu papel estrutural em plenitude.

A análise do comportamento elasto-plástico avança para a quantificação da rigidez inicial da matriz estruturada, avaliada por meio do módulo secante a 1% de deformação axial ($E_{sec1\%}$). Conforme estabelecido na caracterização de referência (tempo zero), esse patamar de deformação marca a efetiva ativação das fibras por tração. É nesse momento que se consolida o efeito ponte, dinâmica na qual as inclusões preenchem os vazios e atuam como micropilares tensores, restringindo a formação e a abertura das fissuras incipientes da matriz (Lv & Liu, 2023; Tang *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024).

A Figura 6.23 ilustra a evolução desse parâmetro estrutural para os compósitos e para o solo puro ao longo da exposição às condições climáticas.

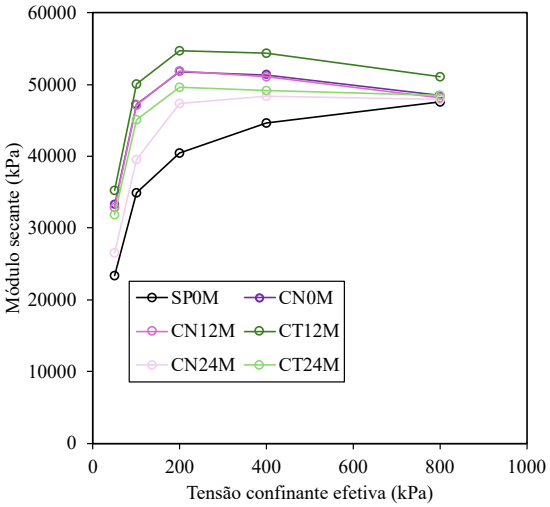


Figura 6.23- Evolução do módulo secante (1% de deformação axial) dos compósitos ao longo da exposição às condições climáticas.

No estágio intermediário (12 meses), constata-se a manutenção da rigidez inicial do compósito natural (CN12M), com valores praticamente idênticos ao tempo zero sob todos os confinamentos. O compósito tratado (CT12M) apresenta, inclusive, um franco incremento em sua rigidez inicial, comportamento atestado na literatura como resultado do sutil aumento da rugosidade superficial e da otimização da adesão na interface fibra-solo que ocorrem nos estágios intermediários de cura (Silveira *et al.*, 2022).

Contudo, ao avançar para o estágio crítico de 24 meses, a divergência de performance é evidenciada. Os resultados revelam uma perda severa da rigidez inicial no compósito natural (CN24M): sob 50 kPa, o módulo secante despenca a ponto de aproximar-se da resposta natural do solo puro, cuja queda traduz macroscopicamente a falência da estrutura celular da fibra. Ao ser solicitada no primeiro 1% de deformação, a inclusão degradada cede elasticamente junto com a matriz, não possuindo mais a integridade estrutural necessária para atuar como tirante e frear o escoamento incipiente do solo.

A supressão desse efeito tirante e a consequente necessidade de impor maiores deformações axiais para conseguir estirar e mobilizar o reforço orgânico envelhecido são reflexos diretos da expressiva queda do módulo elástico das próprias fibras após o ataque ambiental (Reis *et al.*, 2023). Consequentemente, a inabilidade em restringir as deformações iniciais e o colapso dos lúmens suprimem de forma gradual o comportamento de ganho de resistência com a deformação precoce que caracterizava as misturas recém-compactadas (Silveira, Ferreira & Casagrande, 2022).

Em comportamento oposto, o compósito tratado (CT24M) sustentou a sua elevada rigidez inicial, preservando a capacidade de pronta-resposta das fibras. A estabilidade desse parâmetro comprova que a película de sílica protege a integridade elástica do material, permitindo que a ancoragem tracional seja mobilizada precocemente mesmo após o longo período de exposição.

Por fim, mantendo o padrão mapeado no estado inicial, a influência do reforço na rigidez elástica diminui progressivamente com o aumento do confinamento. Sob a tensão extrema de 800 kPa, todos os materiais convergem para módulos equivalentes, independentemente do nível de degradação. Esse fenômeno ocorre porque, sob altas tensões efetivas, a matriz terrosa sofre violenta contração, fazendo com que a área de contato relativa grão-grão supere amplamente a área de contato solo-fibra. Nesse estado densificado, a resposta pseudo-elástica inicial passa a ser ditada predominantemente pela rigidez intrínseca do esqueleto mineral, obliterando a contribuição macroestrutural primária das inclusões (Correia *et al.*, 2021; Mirzababaei *et al.*, 2017).

A avaliação do desempenho geomecânico de longo prazo culmina na análise da tenacidade do compósito, grandeza governada pela capacidade de absorção de energia do maciço. Quantificado pela integração da área sob as curvas de tensão desviadora *versus* deformação axial, esse parâmetro reflete a aptidão do material em redistribuir esforços e dissipar energia por meio de mecanismos conjugados de tração, fricção e arrancamento das inclusões. É essa dinâmica energética que previne a formação precoce de planos de fraqueza e retarda a ruptura frágil da matriz terrosa (Moslemi *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2024).

Para elucidar essa resposta, a Figura 6.24 ilustra a evolução temporal das energias de deformação absorvidas ao longo de 24 meses de exposição.

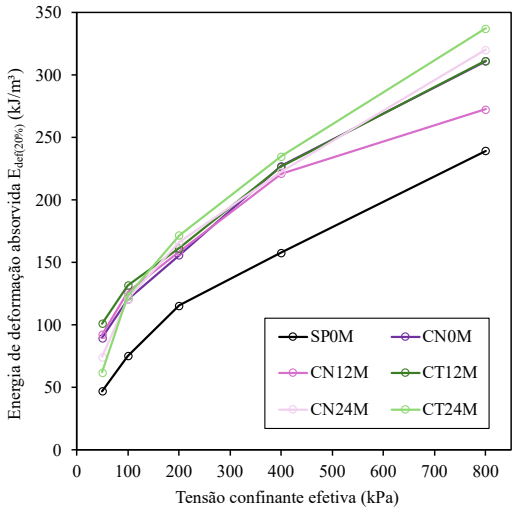


Figura 6.24- Energia de deformação absorvida entre o solo puro e os compósitos ao longo da exposição às condições climáticas.

Conforme estabelecido no estado inicial, a elevada resistência à tração e a eficiente ancoragem das fibras de açaí proporcionaram um aumento superlativo da tenacidade do compósito (sob 50 kPa, por exemplo, a energia absorvida praticamente dobrou em relação ao estrato não reforçado). No estágio intermediário (12 meses), observa-se a plena manutenção e, em casos específicos, o incremento dessa tenacidade, em coerência com a preservação microestrutural comprovada na época.

Destaca-se o compósito tratado (CT12M), que atingiu o seu pico de dissipação sob baixo confinamento, indicando uma franca otimização da interface solo-fibra, dinâmica na qual o avanço do tempo de cura atua diretamente na melhoria contínua da capacidade de absorção de energia do sistema reforçado (Moslemi *et al.*, 2022).

Contudo, ao atingir o estágio crítico de 24 meses, as sequelas mecânicas da degradação tornam-se incontestáveis. No compósito natural (CN24M), verifica-se uma considerável redução da tenacidade sob baixos confinamentos (50 kPa), com a energia caindo de 90 para

74,4 kJ/m³. Essa expressiva quebra na capacidade de absorção consiste no reflexo macroscópico direto da hidrólise e da deterioração dos lúmens discutidos previamente, os quais culminam na redução gradual da resistência à fratura do compósito (Lv & Liu, 2023).

Ao sofrer colapso estrutural celular interno e a perda drástica de seu Módulo de Young elástico, a fibra desprotegida passa a ceder plasticamente. Ao invés de atuar como um tirante que dissipa a energia de deformação por tração, o filamento maleável simplesmente se alonga de forma inerte, fenômeno que confirma a fragilização e a consequente perda de ductilidade de longo prazo relatadas para elementos orgânicos expostos ao envelhecimento ambiental (Reis *et al.*, 2023).

Ainda assim, é crucial ressaltar que o compósito natural mantém um desempenho superior ao do solo puro, absorvendo cerca de 58% a mais de energia. Esse ganho residual comprova que o intertravamento físico e a mera presença das fibras no plano de ruptura continuam contribuindo ativamente para mitigar o colapso abrupto do maciço.

Em contraste absoluto, o compósito tratado com sílica coloidal (CT24M) apresentou um desempenho de excelência, especialmente sob maiores confinamentos. A preservação irrestrita da integridade estrutural da fibra permitiu uma maior mobilização de mecanismos friccionais e de interação intergranular com a matriz argilosa densificada. Como resultado, o material atingiu níveis de energia absorvida que superam, inclusive, os valores originais do seu estado recém-compactado.

Dessa forma, a análise de tenacidade encerra a investigação de durabilidade atestando uma dicotomia funcional: enquanto o compósito natural sofre perda parcial de eficiência em regimes dominados por tração (sobrevivendo ancorado em sua ductilidade residual), o compósito tratado com base inorgânica preserva, blinda e amplia a sua capacidade tridimensional de dissipação de energia ao longo do tempo.

7 COMPORTAMENTO CARGA-RECALQUE EM MODELO REDUZIDO

Os ensaios em modelo físico reduzido evidenciaram uma alteração profunda na resposta carga-recalque do sistema com a inclusão de 1% de fibras de açaí. A Figura 7.1 ilustra que a aplicação de carga sobre o solo natural apresentou comportamento frágil típico: a ruptura iniciou-se entre 295 e 394 kPa, culminando no escoamento contínuo com recalque final de ~140 mm e capacidade de carga última ($q_{últ}$) de 476 kPa. Em contrapartida, o compósito exibiu um ganho de 173%, alcançando uma ($q_{últ}$) de 1297 kPa com processo de ruptura iniciando no patamar de 997 kPa.

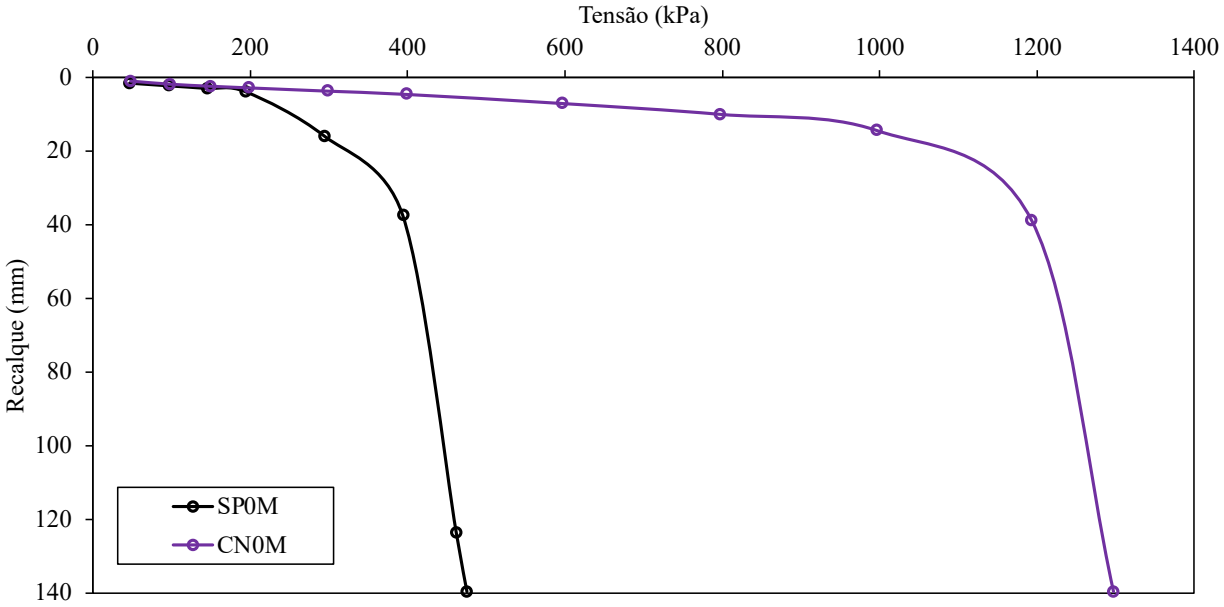


Figura 7.1- Curvas de tensão-recalque central para o solo e para o compósito.

Esse desempenho absoluto supera expressivamente as melhorias na capacidade de suporte reportadas para matrizes argilosas estabilizadas com resíduos de construção (Cabalar *et al.*, 2021) e com fibras sintéticas de polipropileno (Cherian & George, 2021). O mérito dessa superioridade reside na distribuição aleatória das fibras na matriz, que forma uma malha de reforço atuante em múltiplas direções.

Reforços planares tradicionais, como geotêxteis em argilas (e.g. Thageel & Abd Shaia, 2024) ou geogrelhas em leitos granulares (e.g. Akbar *et al.*, 2021), induzem planos horizontais de fraqueza e possuem eficiência estritamente condicionada ao posicionamento em profundidades críticas específicas, tornando-se negligenciáveis se instalados fora da zona primária de cisalhamento (Hassan & Shakir, 2022; Imbark *et al.*, 2025). A dispersão aleatória das fibras biológicas contorna essa limitação executiva, garantindo um reforço ativo em todas as direções ao longo do bulbo de tensões, o que altera o mecanismo de ruptura de um colapso localizado

para uma falha mais distribuída e dúctil (Consoli *et al.*, 2003; Diambra & Ibraim, 2015; Mirzababaei *et al.*, 2017; Sotomayor & Casagrande, 2018).

Como desdobramento da análise de deslocamentos, a Tabela 7.1 evidencia a eficácia progressiva dessa malha (Adegoke et al., 2025; Ferreira et al., 2021) na mitigação dos recalques centrais. Até o patamar de 200 kPa, onde as curvas carga-recalque se sobrepõem e a matriz opera em fase pseudo-elástica, a contenção dos deslocamentos é moderada (em torno de 20% a 27%). O impacto do reforço manifesta-se sob altos níveis de solicitação. Aos 400 kPa, enquanto o solo natural atinge a ruptura com afundamento profundo (37,43 mm), a rede tridimensional restringe o deslocamento do compósito a menos de 5 mm. Essa expressiva redução de 87,8% atesta a eficácia da transferência de tensões por efeito ponte em altos níveis de cisalhamento, dinâmica balizada por modelos de estabilização de encostas e fundações (Krishna & Magi, 2025; Tang *et al.*, 2010).

Tabela 7.1- Evolução do recalque central e percentual de redução de recalque pela inclusão das fibras

Tensão Normal (kPa)	**Recalque central no solo puro (mm)**	**Recalque central no solo reforçado (mm)**	**Redução de recalque (%)**
50	1,48	0,93	37,2
100	2,22	1,79	19,4
150	2,93	2,34	20,1
200	3,85	2,79	27,5
300	15,89	3,68	76,8
400	37,43	4,56	87,8

Nota: A comparação foi limitada a 400 kPa, patamar que antecede a ruptura do solo puro.

Esse controle de deformação é uma das principais características do uso de fibras inseridas aleatoriamente na massa de solo. Em ensaios de placa recentes, Adegoke *et al.* (2025) evidenciaram que a adição de fibras discretas e aleatórias ao solo desempenha um papel superior na mitigação de afundamentos verticais (quando comparadas a feixes ou mantas contínuas), justamente porque a sua distribuição espacial intercepta os potenciais planos de cisalhamento em todas as direções.

Para avaliar analiticamente a evolução desse ganho estrutural, calculou-se o Fator de Melhoria da Capacidade de Carga (BCR), cuja formulação mensura a razão direta entre as pressões suportadas ($q_{compósito}/q_{puro}$) para idênticos recalques (Binquet & Lee, 1975). Nesse contexto, a evolução do BCR ao longo do ensaio é apresentada na Figura 7.2.

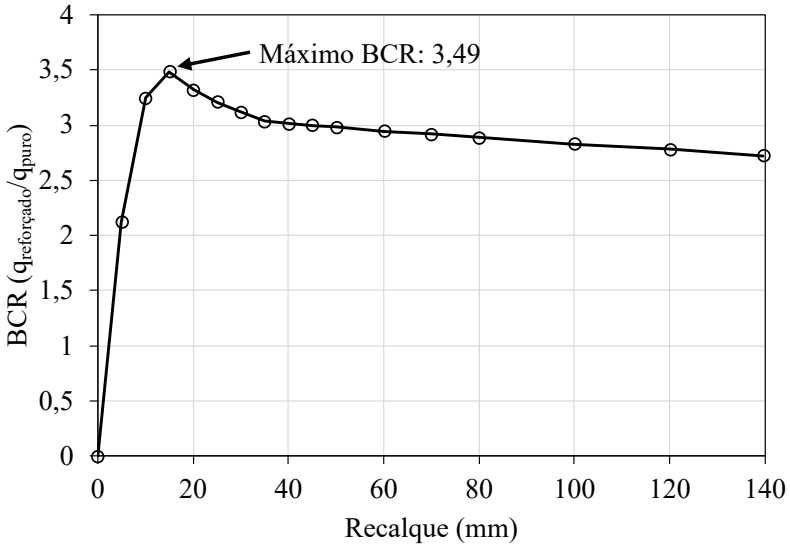


Figura 7.2- Evolução do BCR em função do recalque da placa central.

A análise elucida que o BCR varia dinamicamente: partindo de 2,12 para pequenos deslocamentos e atingindo um pico de 3,49 entre 15 e 20 mm de afundamento. Esse ganho dinâmico corrobora que a mobilização plena da ancoragem (*strain-hardening*) exige uma deformação mínima da matriz terrosa para ativar o atrito interfacial, momento no qual a rede passa a interceptar ativamente as microfissuras e absorver as tensões de tração (Ahmad, 2022; Estabragh *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2023).

Nesta etapa de transferência interfacial, a fibra de açaí demonstra sua superioridade mecânica: em inclusões sintéticas, como geotêxteis, a baixa rugosidade polimérica induz um deslizamento inicial (*initial sliding*) que atrasa a mobilização da tração (Imbark & Omar, 2025; Zamani *et al.*, 2023). A alta rugosidade intrínseca da fibra de açaí sobrepuja essa deficiência, garantindo um ancoramento mecânico robusto. Como resultado, o compósito atinge um BCR de 3,49 operando em regime puramente friccional (sem aditivos cimentícios), rivalizando diretamente com inclusões biológicas potentes a solos argilosos, como o bambu (3,44) (Pinka *et al.*, 2021). Além disso, supera o teto de BCR (1,88) reportado para triplas camadas de geotêxtil (Thageel & Abd Shaia, 2024) e de BCR equivalente de 3,38 (incremento de capacidade de carga de 238%) para colunas granulares reforçadas com geossintéticos (Krishna & Magi, 2025).

A evolução do Módulo de Deformabilidade inicial (E_s) em função da tensão aplicada é apresentada na Figura 7.3.

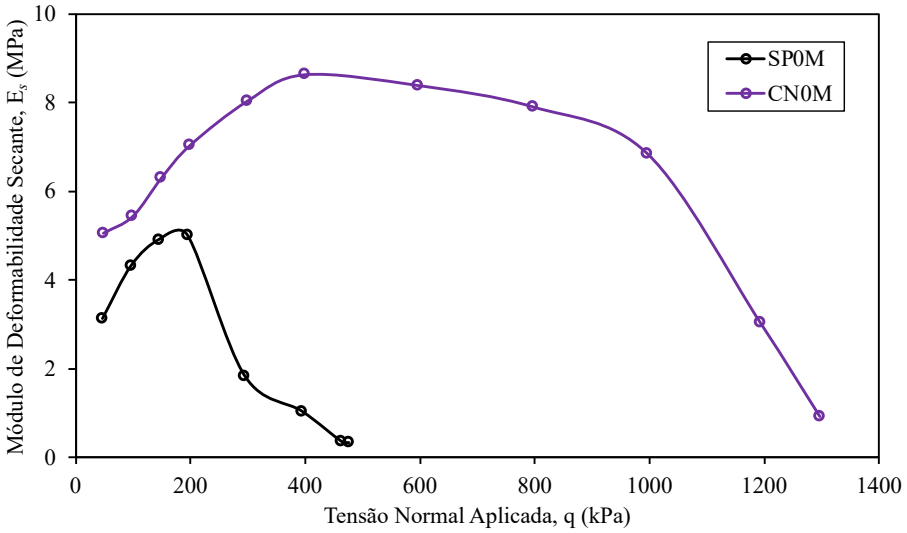


Figura 7.3- Evolução do módulo de deformabilidade inicial (E_s).

A análise constitutiva revela o impacto do reforço na rigidez inicial dos materiais: o compósito apresentou ganho expressivo em relação ao solo puro, com incremento da ordem de 46% no Módulo de Deformabilidade inicial ($E_{s,inicial}$). Esse ganho, que rivaliza em ordem de grandeza com polímeros industriais como o PET (Ferreira *et al.*, 2021) e o polipropileno (Adegoke *et al.*, 2025), bem como com fibras de coco (Sotomayor & Casagrande, 2018), atesta que a malha de açaí restringe a deformação lateral das partículas desde os primeiros milímetros de acomodação (Taha *et al.*, 2020).

Contudo, a principal divergência mecânica entre os materiais materializa-se na degradação secante sob altas tensões de projeto. No estrato não reforçado, o cisalhamento leva a rigidez a despencar para críticos 1,04 MPa aos 394 kPa. Em elevado contraste, exatamente no patamar de tensão onde a matriz pura sofre degradação severa (~400 kPa), a ativação tracional plena da rede de fibras garante que o compósito atinja sua rigidez secante máxima (8,64 MPa), mantendo valores acima de 6 MPa até cargas extremas de 1000 kPa por meio do endurecimento por deformação (*strain-hardening*).

Consequentemente, a razão de módulos ($E_{s,compósito}/E_{s,puro}$) evolui de 1,46 na fase pseudo-elástica para um pico expressivo superior a 8,0 na iminência da ruptura do solo. Essa discrepância, fundamentada pelo arcabouço de Zornberg (2002), elucida que a contribuição do reforço se torna criticamente pronunciada justo quando a matriz entra em colapso plástico. Micromecanicamente, a teia de filamentos atua espraiando tensões e ponteando microfissuras, retardando o desenvolvimento das bandas de cisalhamento (Isazadeh-Khiav *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2024; Tang *et al.*, 2010).

Sob a ótica de dimensionamento estrutural, essa manutenção da rigidez indica que as fibras alteram o regime de distribuição de base da fundação. Ao elevarem majoritariamente a

resistência tracional do maciço (Correia *et al.*, 2015), as inclusões assumem os esforços de tração e flexão radiais gerados pelo carregamento de topo, prevenindo a perda elástica prematura que assola as matrizes argilosas tradicionais (Abraham *et al.*, 2022; Gao *et al.*, 2023).

Para investigar as alterações na resposta estrutural no domínio pós-escoamento e a transição do comportamento de ruptura frágil para dúctil sob o modelo físico, determinou-se a tenacidade estática do sistema. Essa grandeza foi mensurada pela integração numérica (método dos trapézios) da área sob as curvas globais de tensão-recalque, representando a energia total passível de dissipação pelo maciço até o deslocamento máximo de ruptura. Os resultados comparativos estão sumarizados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2- Tenacidade estática e fator de melhoria de tenacidade do solo puro e do compósito

Condição do Estrato	Energia de Deformação Absorvida (kJ/m²)	Fator de Melhoria de Tenacidade
SP0M	55	1
CN0M	160	2,90

A avaliação quantitativa atesta que a capacidade de dissipação de energia saltou de 55 kJ/m² (argila pura) para 160 kJ/m² no compósito, resultando em um Fator de Melhoria de Tenacidade de 2,90. Essa triplicação da energia absorvida materializa a alteração intrínseca na cinemática de ruptura do sistema de fundação descrita por Consoli *et al.* (2009). Em vez de colapsar abruptamente, a matriz fibrosa atua como um verdadeiro "sumidouro de energia" (*strain energy sink*) impulsionado por um evidente efeito de tenacificação (*toughening effect*). Ao retardar a localização das bandas de cisalhamento e absorver plasticamente as tensões de corte, a rede permite que o maciço suporte cargas pós-pico substanciais antes da falha definitiva, fenômeno amplamente validado na literatura para inclusões discretas biológicas (Ferreira *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2024; Patel & Singh, 2021).

Sob a ótica aplicada, materiais geotecnicamente dúcteis com tamanha magnitude de absorção de energia transcendem a eficiência do mero suporte de cargas estáticas. O retardamento do colapso catastrófico e a resiliência aprimorada indicam um comportamento estrutural altamente favorável frente a solicitações dinâmicas (Consoli *et al.*, 2003; Festugato *et al.*, 2015).

Conforme sustentam os teóricos de micro-reforços (Patel & Singh, 2021; Zornberg, 2002), essa tenacidade ampliada é a chave para minimizar colapsos sob ações cíclicas. Consequentemente, essa notável capacidade de amortecimento credencia a rede de fibras de açaí como uma alternativa promissora não apenas para sapatas prediais, mas como estrato redistribuidor para bases de pavimentos e fundações de máquinas industriais sujeitas a tráfego repetitivo e vibrações (Adegoke *et al.*, 2025).

Para mapear a transferência lateral de tensões e compreender a cinemática da falha, a instrumentação do modelo físico contou com sensores radiais a 5, 7,5 e 10 cm da borda da placa. A avaliação inicial deu-se pela Razão de Deslocamento Normalizada ($I_d = s_d/s_0$), em que s_d é o recalque registrado pelos sensores radiais, enquanto s_0 corresponde ao recalque central medido no atuador. Esse parâmetro atua de forma análoga ao fator de influência de Boussinesq, evidenciando o volume de solo adjacente mobilizado. A evolução dessa razão em função da tensão aplicada está expressa na Figura 7.4.

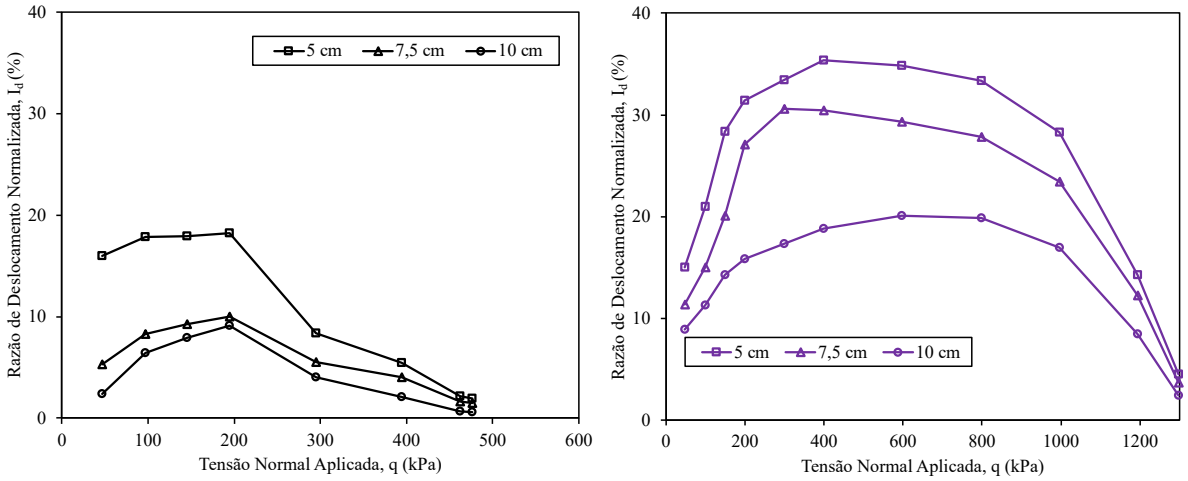


Figura 7.4- Razão de deslocamento normalizada em função da tensão aplicada: a) solo puro; b) compósito.

No estrato de solo puro, a distribuição de carga ratifica a ocorrência de um cisalhamento localizado. A razão I_d a 5 cm manteve-se estável em 18% até 200 kPa, enquanto os sensores a 7,5 e 10 cm estagnaram abaixo de 10%, indicando inércia periférica. Em contraste absoluto, o compósito exibiu uma configuração espacial excepcionalmente solidária: a curva I_d cresceu de forma suave e contínua, atestando a transferência ativa de tensões para zonas lateralmente distantes promovida pela rede de fibras.

Complementando a análise normalizada, as Figuras 7.5 e 7.6 ilustram a distribuição transversal das magnitudes absolutas dos recalques radiais (s_d), elucidando a transição do mecanismo de falha estrutural.

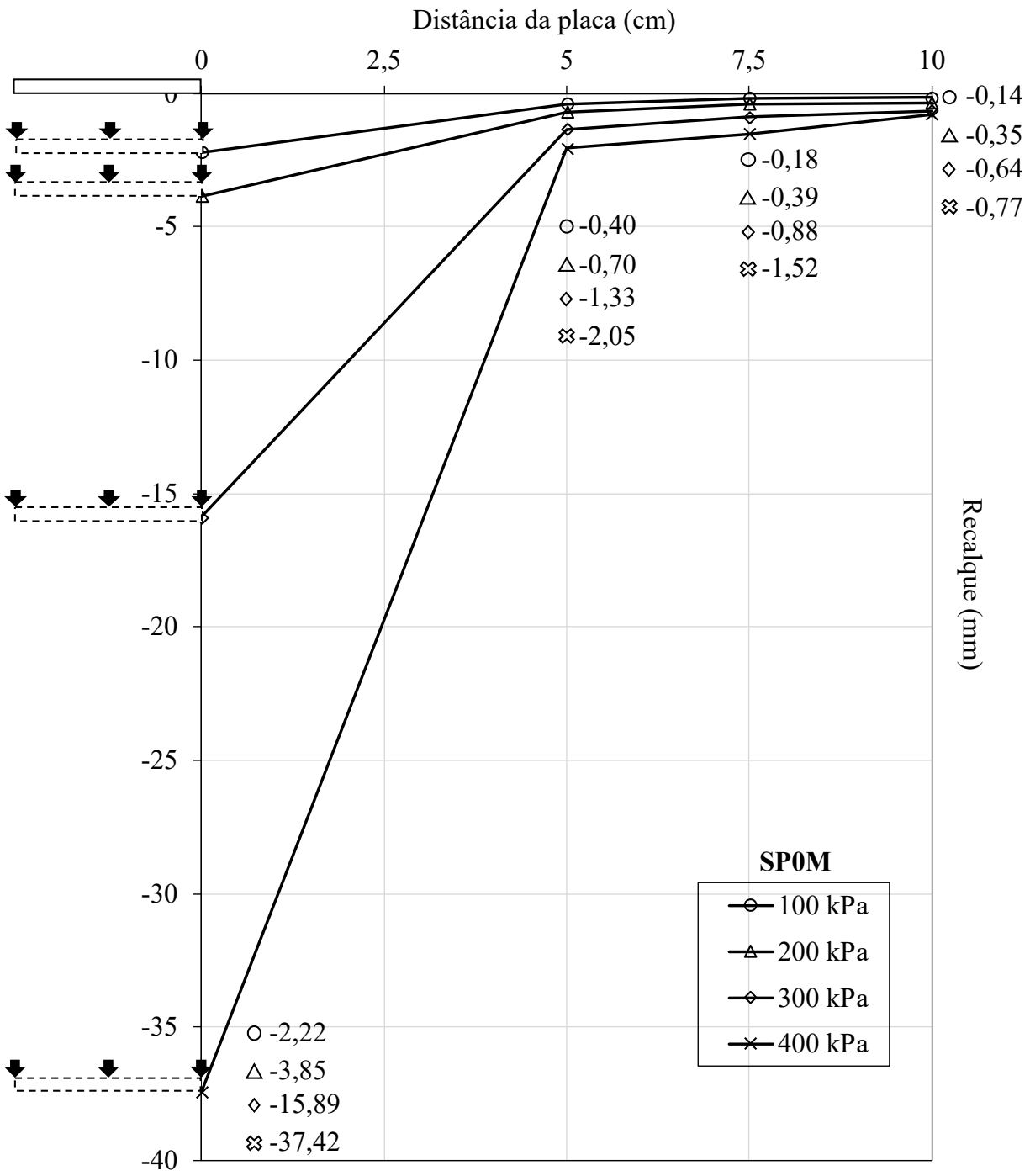


Figura 7.5- Distribuição transversal dos recalques radiais (s_d) para o solo puro.

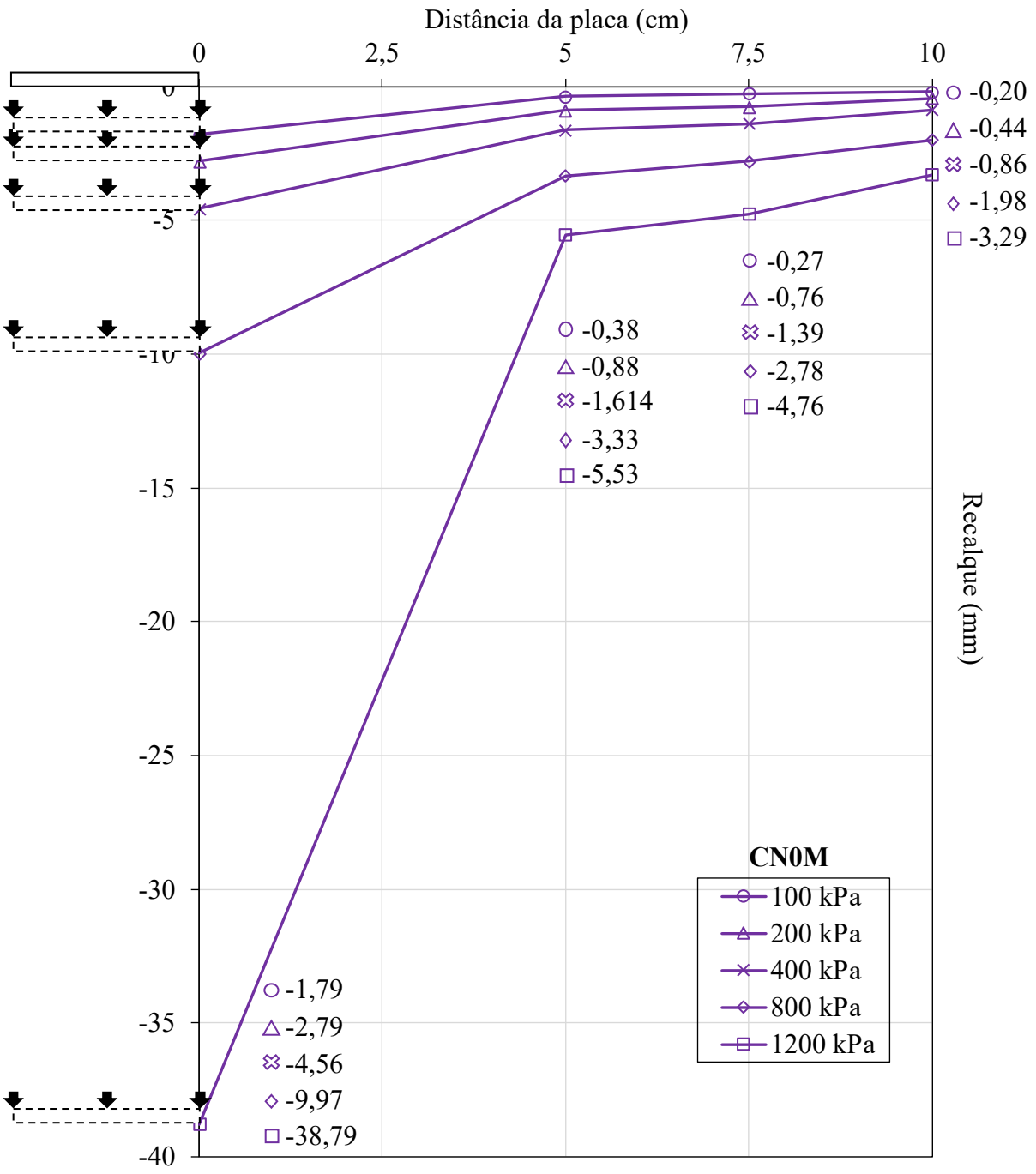


Figura 7.6- Distribuição transversal dos recalques radiais (s_d) para compósito.

Aos 400 kPa, a inércia periférica do solo puro materializou-se em uma descontinuidade anômala: sob a placa concentrou-se um deslocamento severo (s_0 = 37,4 mm), enquanto a borda externa permaneceu praticamente imóvel (s_{10} = 0,77 mm). Esse gradiente é característico do mecanismo de puncionamento descrito por Vesić (1973). Já no compósito, sob a mesma tensão crítica de 400 kPa, a deformação central foi mitigada (s_0 = 4,56 mm). O contraste definitivo ocorreu no carregamento massivo de 1200 kPa: para um afundamento central de s_0 = 38,78 mm, o estrato a 10 cm da placa foi arrastado em expressivos 3,29 mm, evidenciando o engajamento de um bulbo de tensões altamente abrangente.

Macroscopicamente, esse engajamento de uma região mais ampla do maciço refletiu-se de forma direta no mapeamento visual do padrão de fissuração radial desenvolvido na superfície dos corpos de prova após os ensaios, conforme apresentado na Figura 7. 7.



a) b)

Figura 7.7- Padrão de fissuração radial desenvolvido na superfície: a) solo puro; b) compósito.

No solo não reforçado, o puncionamento estrito induziu fissuras finas e superficiais confinadas exclusivamente ao entorno imediato da placa, culminando em um colapso central abrupto de 139,6 mm aos 476 kPa sem mobilizar o solo do entorno. Inversamente, o compósito exibiu fissuras diagonais largas e profundas que se estenderam até os limites físicos do modelo (vértices da caixa).

A formação dessas fissuras robustas na borda não indica fragilidade do material, mas sim o pleno engajamento mecânico da malha fibrosa e o atraso na localização da falha (Wu *et al.*, 2025). Esse quadro enquadra-se nas definições de Vesić (1973) para rupturas onde as superfícies de deslizamento iniciam-se internamente e só alcançam o topo do terreno após um deslocamento vertical apreciável (que se aproximou de 140 mm no final do teste). A ruptura mais abrangente só se materializou na superfície quando a energia de 1297 kPa superou a capacidade de tração da rede em um volume estendido.

Fisicamente, essa transição fenomenológica atesta que, embora a alta compressibilidade argilosa impeça o levantamento de superfície (*heaving*), o mecanismo de falha foi completamente alterado. O cilindro sob a placa deixa de ceder isoladamente, e a carga passa a ser distribuída por um bulbo abrangente. A rede de fibras de açaí cria uma ancoragem

distribuída (Consoli *et al.*, 2009; Sotomayor & Casagrande, 2018), transferindo ativamente as tensões cisalhantes para zonas lateralmente estáveis, dinâmica comprovada em compósitos via Velocimetria por Imagem de Partícula (Mirzababaei *et al.*, 2017). Confirma-se, assim, a eficácia da distribuição das fibras em mitigar a propagação de bandas localizadas, convertendo o puncionamento em uma falha distribuída, coesa e altamente tenaz (Falorca & Pinto, 2011; Ferreira *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2024).

Em síntese, a análise integrada dos parâmetros avaliados revela que a inclusão das fibras de açaí não promove apenas melhorias numéricas isoladas, mas uma reestruturação completa na mecânica de transferência de carga do sistema. Os resultados apresentados comunicam-se de forma sequencial e interdependente, descrevendo a evolução cinemática da ruptura desde as pequenas deformações até o colapso do maciço.

Na fase inicial, correspondente aos primeiros milímetros de acomodação, o intertravamento físico da malha de fibras promoveu um aumento de 46% na rigidez inicial do sistema, que atuou como a responsável direta pela mitigação dos deslocamentos verticais, reduzindo o recalque central em quase 90% antes de o solo puro atingir a sua falha.

À medida que o carregamento avançou para o domínio plástico, patamar em que o solo natural sofreu ruptura localizada por puncionamento, a alta rugosidade da fibra de açaí ativou o endurecimento por deformação (*strain-hardening*), cuja mobilização tracional refletiu-se analiticamente no pico do BCR. A eficácia dessa ancoragem, por sua vez, é fisicamente comprovada pela evolução da razão de deslocamento normalizada (I_d) e pelo mapeamento do padrão de fissuras de superfície, onde constatou-se que, em vez de o maciço ceder centralmente, a malha de reforço interceptou as tensões de corte e as distribuíram para as extremidades do modelo, engajando um bulbo de tensões bem mais amplo e solidário.

Como consequência direta desse espraiamento, o engajamento de um volume maior de solo transformou a matriz em um sumidouro de energia, retardando a formação e a propagação das superfícies de deslizamento, triplicando sua capacidade de absorção plástica, quantificada pela tenacidade estática. Dessa maneira, a ação combinada desses mecanismos explica o maior desempenho mecânico do compósito: a rigidez inicial restringe os recalques, a ativação do atrito interfacial força o espraiamento lateral da carga e, consequentemente, o maior volume de solo mobilizado garante a altíssima absorção de energia do maciço.

7.1 ORIENTAÇÕES PARA APLICAÇÃO PRÁTICA

Os ensaios em modelo físico reduzido, ao reproduzirem a operação de mistura de grandes volumes de solo e fibras, a compactação em camadas e o controle de umidade, aproximam-se

mais diretamente da escala de aplicação em campo do que outros ensaios de laboratório convencionais. Essa aproximação permite extrair, a partir do comportamento observado, orientações práticas para a concepção e a execução de camadas de solo reforçado com fibras de açaí. Com base nesse comportamento, propõem-se as seguintes orientações para a aplicação prática:

Orientação 1 - Fracionamento hídrico e homogeneização: Durante a execução com maquinário de terraplenagem, a mistura do solo com a fibra não deve ocorrer a seco, recomendando-se o fracionamento em etapas: umidificar primeiramente o solo com cerca de metade da água de projeto, adicionar as fibras na dosagem ótima (1%), e completar a homogeneização com a água restante. A pré-hidratação evitará a aglomeração (grumos) observada em misturas secas, garantindo a dispersão necessária, cuja homogeneização eficiente potencializará ao máximo o intertravamento mecânico.

Orientação 2 - Adaptação do esforço de compactação e controle de umidade: A umidade de rolagem no campo deve ser controlada e ajustada para evitar o excesso de deformação elástica (efeito borrachudo). Por possuírem menor peso específico e maior capacidade de absorção hídrica, as fibras promovem uma natural queda na massa específica aparente seca máxima da mistura, elevando a demanda pela umidade ótima de projeto. O desrespeito a esses novos parâmetros de compactação poderá prejudicar a transferência de carga dos rolos compressores e inviabilizar o alcance do grau de compactação de projeto.

Orientação 3 - Investigações *in situ* e avaliação de integridade: Obras reforçadas com estas fibras não deverão ser inspecionadas quanto à sua capacidade drenante ou integridade estrutural utilizando ensaios de alta pressão isostática. Pressões elevadas de confinamento laboratorial causam o colapso dos lúmens e a flambagem da estrutura celular da fibra natural degradada, mascarando artificialmente a porosimetria e sugerindo, de forma equivocada, o desaparecimento dos poros. Para aferir a real eficácia do reforço envelhecido, recomenda-se priorizar ensaios macroscópicos com liberdade de deformação e testes de permeabilidade sob baixo gradiente, que capturam o verdadeiro comportamento funcional da rede.

Os resultados do modelo físico reduzido, ao reproduzirem em escala mais próxima da aplicação os ganhos de resistência, ductilidade e controle de recalques identificados nos ensaios triaxiais, possibilitam o embasamento para recomendações de aplicação prática para distintos cenários:

Recomendação 1 (Reforço de fundações superficiais): O desempenho observado no ensaio de prova de carga em placa em modelo reduzido ratifica a viabilidade do compósito como base de suporte para fundações superficiais. A inserção tridimensional das fibras alterou a cinemática de ruptura do sistema, convertendo falhas por puncionamento localizado em mecanismos de ruptura globalizada, o que garantiu um incremento substancial na capacidade de carga última. Tal comportamento comprova que a rede de fibras atua como um estrato eficiente na redistribuição tridimensional de tensões, consolidando-se como uma solução técnica para o reforço de solos para fundações superficiais.

Recomendação 2 (Estabilização de taludes e encostas): O emprego da fibra em seu estado natural (não tratada) demonstra segurança geotécnica para a estabilização de estruturas provisórias, como taludes não definitivos. Embora suscetível à biodegradação hidrolítica sob a alcalinidade do meio, a inclusão envelhecida (após 24 meses) ainda apresenta parâmetros de estabilidade superiores aos do solo puro sob baixo confinamento. Contudo, para obras de contenção definitivas que exigem a mobilização da resistência à tração a baixos níveis de deformação inicial, recomenda-se a adoção da fibra tratada. A blindagem inorgânica resguarda o Módulo de Young intrínseco do material e previne o colapso estrutural, mitigando o risco de deformações plásticas excessivas da encosta ao longo da vida útil.

Recomendação 3 (Aterros sobre solos moles e obras de grande porte): Sob elevadas tensões operacionais, o compósito tratado consolida-se como uma alternativa sustentável e robusta para a base de estruturas pesadas. O material preserva a capacidade de dissipação de energia e mitiga recalques diferenciais, resistindo ao esmagamento estrutural que comumente afeta reforços orgânicos ao longo dos anos. Ao atuar como uma barreira química contra a hidrólise alcalina, o tratamento das fibras previne a perda de ancoragem a longo prazo. Geotecnicamente, do ponto de vista de projeto, isso se traduz na possibilidade de otimização dos fatores de redução global (comumente aplicados para prever a degradação de geossintéticos e materiais naturais) durante o dimensionamento de obras definitivas de grande porte.

8 CONCLUSÕES

O presente trabalho investigou de forma contundente o comportamento geomecânico, a durabilidade e a microestrutura de um solo tropical laterítico reforçado com fibras de açaí (*Euterpe oleracea*), avaliando o impacto do processo de degradação ao longo de 24 meses e a eficácia da impermeabilização com sílica coloidal. Com base no extenso programa experimental e no rigor das análises conduzidas, destacam-se as seguintes conclusões fundamentais:

- Biomecânica da Fibra de Açaí: A caracterização isolada do reforço revelou um geomaterial de elevado desempenho. A espessa parede celular e o elevado teor de lignina (45%) conferem à fibra uma excepcional rigidez elástica (Módulo de Young de 3,73 GPa) e uma proteção bioquímica natural contra o ataque bacteriano prematuro, credenciando-a como uma alternativa sustentável superior a diversas inclusões biológicas tradicionais.
- Transição do Comportamento Geomecânico Inicial: A inserção da dosagem ótima de 1% de fibras alterou a compactação da matriz, gerando macroporos e elevando a condutividade hidráulica para a ordem de 10^{-5} cm/s, facilitando o processo de drenagem e contribuindo com a a dissipação de poropressão. Macroscopicamente, a rede orgânica interceptou microfissuras e transformou o comportamento frágil do solo em uma resposta altamente dúctil (*strain-hardening*), quase dobrando a capacidade de dissipação de energia (tenacidade) do maciço recém-compactado.
- Capacidade de Suporte e Intercepto Coesivo: Sob tensões cisalhantes, a ancoragem da fibra de açaí promoveu um salto expressivo (acréscimo de 93%) no intercepto coesivo efetivo da matriz. A avaliação em modelo físico reduzido comprovou a transposição desse benefício para a escala real: o compósito atingiu um Fator de Melhoria da Capacidade de Carga (BCR) de 3,49 e reduziu o recalque central em 87,8% sob 400 kPa, alterando o mecanismo de colapso de um puncionamento local frágil para uma ruptura globalizada e tenaz.
- Processo de degradação na Fibra Natural (24 Meses): A longa exposição ao ambiente laterítico deflagrou a alcalinização da solução do solo, induzindo a hidrólise da celulose e a degradação celular da fibra não tratada. Esse ataque resultou na perda de rigidez elástica da inclusão, refletida na redução volumétrica da macroporosidade

(fenômeno de *fiber collapse* no ensaio de PIM) e na queda do módulo secante do compósito ($E_{sec1\%}$) em deformações iniciais.

- Resiliência Estrutural Passiva da Inclusão Natural: Apesar do colapso estrutural interno, a fibra natural provou não esfarelar ou desaparecer do maciço. O intertravamento físico e a ancoragem residual mantiveram-se operantes. Como resultado, mesmo após 24 meses de degradação, o compósito desprotegido sustentou integralmente a sua resistência de pico, assegurando que o colapso microscópico da fibra não se traduza em colapso catastrófico da capacidade de carga da obra.
- Eficácia do Revestimento de Sílica Coloidal: O tratamento superficial com suspensão de sílica coloidal (1:1) estabeleceu-se como uma barreira inorgânica definitiva. Análises espectroscópicas (FTIR) e elementares (FRX) comprovaram que a formação de ligações Si–O–Si mascarou as hidroxilas, bloqueou a lixiviação orgânica e impediu o colapso interno sob ataque alcalino. O compósito tratado preservou, ao longo de 24 meses, a sua incompressibilidade estrutural, a integridade da rede de macroporos, a rigidez elástica inicial e a plenitude de suas envoltórias de cisalhamento, consolidando-se como uma tecnologia segura para obras geotécnicas definitivas.

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente tese estabeleceu um arcabouço conceitual e experimental robusto que comprova a eficácia e a viabilidade mecânica do compósito com fibras de açaí, tanto em sua aplicação imediata quanto em sua durabilidade a longo prazo. Considerando a consistência das descobertas alcançadas, o compósito apresenta elevada maturidade tecnológica. Para expandir os horizontes de aplicação deste material e refinar os parâmetros de projeto em cenários dinâmicos, sugerem-se as seguintes frentes de investigação para trabalhos futuros:

- Avaliação do Comportamento sob Cargas Cíclicas e Dinâmicas: Dada a elevada capacidade de dissipação de energia (tenacidade) e o alto Fator de Melhoria da Capacidade de Carga (BCR) atestados nos ensaios estáticos, sugere-se a realização de ensaios de Módulo Resiliente (MR) e de Deformação Permanente. Essa investigação poderá chancelar e normatizar o uso seguro do compósito em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários e ferroviários sujeitos a tráfego intenso.
- Ensaios Micromecânicos Diretos em Fibras Exumadas: Embora a tese tenha rastreado a perda de rigidez do compósito global e as alterações físico-químicas no

envelhecimento, recomenda-se a execução de ensaios de tração direta em filamentos individuais de açaí exumados após diferentes períodos de exposição ao clima. Essa micromedição permitirá traçar uma correlação entre a perda de resistência à tração da fibra e a sustentação residual coesiva na envoltória de ruptura do maciço.

- Monitoramento em Trecho Experimental de Campo (*In Situ*): Com o comportamento em modelo físico reduzido já consolidado em ambiente controlado, o estágio subsequente ideal consiste na execução de um trecho experimental instrumentado a céu aberto (e.g., um aterro rodoviário ou camada de cobertura). O monitoramento prolongado de tensões, poropressões e recalques ao longo das estações climáticas validará as dinâmicas de longo prazo sob condições reais de carregamento, precipitação pluviométrica irrestrita e tráfego.
- Análise Não Destrutiva por Microtomografia Computadorizada: Para complementar as evidências de porosimetria por intrusão, que sofrem com o artefato de *fiber collapse* sob alta pressão isostática, recomenda-se o uso de imagens de μCT de raios-X. Essa técnica avançada permitirá o mapeamento e a visualização tridimensional da rede de macroporos, a evolução do inchamento da fibra e o rastreamento da matriz cimentante em tempo real, sem submeter as fibras envelhecidas à destruição mecânica.
- Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Balanço de Carbono: Embora a sustentabilidade do compósito esteja fortemente alicerçada no reaproveitamento de um volumoso passivo orgânico da Amazônia, faz-se necessária a quantificação formal de sua pegada ecológica. Recomenda-se a condução de um estudo de ACV para mapear o consumo energético, a emissão de gases de efeito estufa inerentes ao processo de tratamento com sílica coloidal e o balanço de carbono final. Essa modelagem poderá comprovar numericamente a ecoeficiência da tecnologia em relação às soluções geotécnicas convencionais, como o emprego de geossintéticos poliméricos ou estabilizações químicas tradicionais com cimento Portland.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELDJOUAD, L., ASADI, A., BALL, R.J., NAHAZANAN, H. & HUAT, B.B.K. (2019). Application of alkali-activated palm oil fuel ash reinforced with glass fibers in soil stabilization. Soils and Foundations, 59(5): 1552-1561.

ABDUL RAHMAN, A.S., HAFEZ, M., SIDEK, N., FADZIL, M.A. & MUDJANARKO, S.W. (2024). Performance of kenaf for landfill liner system improvement. Applied Mathematics & Information Sciences, 18(3): 679-684.

ABOOD, M.J. & SHAKIR, R.R. (2023). Strength characteristics of clay soil reinforced with natural fibers. Basrah Journal for Engineering Sciences, 23(1): 43-49.

ABOU DIAB, A., NAJJAR, S.S., SADEK, S., TAHA, H., JAFFAL, H. & ALAHMAD, M. (2018). Effect of compaction method on the undrained strength of fiber-reinforced clay. Soils and Foundations, 58: 462–480.

ABOU DIAB, A., SADEK, S., NAJJAR, S. & ABOU DAYA, M.H. (2016). Undrained shear strength characteristics of compacted clay reinforced with natural hemp fibers. International Journal of Geotechnical Engineering, 10(3): 263–270.

ABRAHAM, D., RAKENDU, R. & ISAAC, D. (2022). Bearing capacity of square footing on hybrid geosynthetic reinforced granular fill over soft soil. Proceedings of SECON'21, G.C. Marano, S.R. Chaudhuri, G.U. Kartha, P.E. Kavitha, R. Prasad & R.J. Achison (eds.), Lecture Notes in Civil Engineering, 171: 283–294. Springer.

ABU QAMAR, M.I. & SULEIMAN, M.T. (2022). Evaluating the influence of surface roughness on interface shear strength of cohesive soil–structure interface subjected to axial monotonic loading. Geo-Congress 2022: 264-273.

ADEGOKE, A.H., NXUMALO, S. & FELIX, O. (2025). Performance of polypropylene fiber in compacted residual soil for pavement applications. Discover Civil Engineering, 2: 172.

AGUILAR, J.R.T. (2015). Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso Reforçado com Fibras de Coco. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 114 p.

AHMAD, H. (2022). Sustainability effect of geogrid reinforced tire-shred sand mixtures on the load pressure-settlement response of shallow footing. Heliyon, 8(12): e11743.

AKBAR, A., BHAT, J.A. & MIR, B.A. (2021). Plate load tests for investigation of the load–settlement behaviour of shallow foundation on bitumen-coated geogrid reinforced soil bed. Innovative Infrastructure Solutions, 6: 80.

AL WAHAB, R.M. & EL-KEDRAH, M.A. (1995). Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in a compacted clay. Geoenvironment 2000, Characterization, Containment, Remediation and Performance in Environmental Geotechnics, ASTM, New Orleans, USA, v.1: 791-805.

ALBRIGHT, W.H., BENSON, C.H. & WAUGH, W.J. (2010). Water Balance Covers for Waste Containment: Principles and Practice. ASCE Press, Reston, VA, USA.

ALDAOOD, A., KHALIL, A. & ALKIKI, I. (2020). Impact of randomly distributed hay fibers on engineering properties of clay soil. Jordan Journal of Civil Engineering, 14(3): 406–416. alkali-activated palm oil fuel ash reinforced with glass fibers in soil stabilization. Soils and

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2015). D3282: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. West Conshohocken, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2017). D2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2018). ASTM D4404-18: Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. West Conshohocken, PA, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2020). ASTM D7181-20: Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. West Conshohocken, PA, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2020). C1557: Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers. West Conshohocken, PA, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2023). D5550-23: Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer. West Conshohocken, PA, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2024a). ASTM D5084-24: Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. West Conshohocken, PA, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2024b). ASTM D6528-24: Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils. West Conshohocken, PA, USA.

ANG, A. S. T., CHAN, S. M. O., PATERNO, C. A. T. & UY, E. E. S. (2026). Mapping Research on Coir and Jute Fibers for Soil Reinforcement: A Comparative Review. DLSU Senior High School Research Congress Conference Proceedings, v. 5, n. 2, Artigo 2679.

ANGGRAINI, V., ASADI, A., FARZADNIA, N., JAHANGIRIAN, H. & HUAT, B.B.K. (2016). Reinforcement benefits of nanomodified coir fiber in lime-treated marine clay. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(6): 04015016.

ARABANI, M., SHALCHIAN, M.M. & RAHIMABADI, M.M. (2023). The influence of rice

fiber and nanoclay on mechanical properties and mechanisms of clayey soil stabilization. Construction and Building Materials, 407: 133542.

ARAÚJO, F.A. (2026). Desafios da Estabilização Enzimática no Comportamento Mecânico de Solo Tropical para Aplicações Geotécnicas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 126 p.

ASIM, M., ABDAN, K., JAWAID, M., NASIR, M., DASHTIZADEH, Z., ISHAK, M.R. & HOQUE, M.E. (2015). A review on pineapple leaves fibre and its composites. International Journal of Polymer Science, 2015: 950567.

ASIM, M., PARIDAH, M.T., SABA, N., JAWAID, M., ALOTHMAN, Y., NASIR, M. & ALMUTAIRI, Z. (2018). Thermal, physical properties and flammability of silane treated kenaf/pineapple leaf fibres phenolic hybrid composites. Composite Structures, 202: 1330-1338.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2016a). NBR 6458: Grãos de Solo Retidos na Peneira de 4,8 mm — Determinação da Massa Específica, da Massa Específica Aparente e da Absorção de Água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2016c). NBR 7180: Solo — Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2019). NBR 6489: Solo — Prova de carga estática em fundação direta. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2020). NBR 13602: Solo — Determinação da Dispersividade — Ensaio do Furo de Agulha (Pinhole Test). Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2020). NBR 16853: Solo — Ensaio de Adensamento Unidimensional. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2022). NBR 13600: Solo — Determinação do Teor de Matéria Orgânica por Queima a 440 °C. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2024). NBR 6457: Solos — Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2025). NBR 7181: Solo — Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2025). NBR 7182: Solos — Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2025.

AZEVEDO, A.R.G., MARVILA, M.T., TAYEH, B.A., CECCHIN, D., PEREIRA, A.C. &

MONTEIRO, S.N. (2021). Technological performance of açaí natural fibre reinforced cement-based mortars. Journal of Building Engineering, 33: 101675.

AZEVEDO, J.D.L., GIACON, V.M. & BORTOLETO, J.R.R. (2025). Composites of natural rubber with curaua fibers. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 35(2): e20250015.

BAI, Y.; LIU, J.; SONG, Z.; CHEN, Z.; JIANG, C.; LAN, X.; SHI, X.; BU, F.; KANUNGO, D. P. (2019). Unconfined compressive properties of composite sand stabilized with organic polymers and natural fibers. Polymers, 11(10).

BAKRI, M.K. & JAYAMANI, E. (2016). Comparative study of functional groups in natural fibers: fourier transform infrared analysis (ftir). Futuristic Trends in Engineering, Science, Humanities, and Technology, 1ª ed., Cap. 30: 167-174.

BALDIN, C.R.B., KAWANAMI, M.Y., COSTA, W.G.S., BORDIGNON, V.R., LUZ, C.C. & IZZO, R.L.S. (2023). Mechanical properties of a clay soil reinforced with rice husk under drained and undrained conditions. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 15: 2676-2686.

BARBOSA, A.P. (2011). Características Estruturais e Propriedades de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Buriti. Tese de Doutorado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, 141 p.

BARBOSA, C.E.S.M., KEMP, T.K., SILVA, T.R., GONZAGA, L.B.T., RIBEIRO, F.R.C., PIEROZAN, R.C. & OLIVEIRA, V.C. (2025). Feasibility of amazonian natural fibers as sustainable alternatives for mortar reinforcement. Waste and Biomass Valorization, 16: 6075–6097.

BAWADI, N.F.; ALHAMIDI, M.A.A.; MANSOR, A.F. & ANUAR, S.A. (2020). Influence of Banana Fiber on Shear Strength of Clay Soil. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 864(1): 012099.

BHATT, H., JAUHARI, N. & VARSHNEY, H. (2017). Performance and analysis of coir fibre as soil reinforcement. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, 5(XI).

BILCATI, G.K., MATOSKI, A., TRIANOSKI, R. & LENGOWSKI, E.C. (2018). Effects of pre-treatment of curuá fibers on compatibility with portland cements. Revista Matéria, 23(3): e-12190.

BINQUET, J. & LEE, K.L. (1975). Bearing capacity tests on reinforced earth slabs. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101(12): 1241–1255.

BLEDZKI, A.K. & GASSAN, J. (1999). Composites reinforced with cellulose-based fibers. Progress in Polymer Science, 24(2): 221-274.

BOLAÑOS, R.E.Z. (2013). Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Reforçado com Fibras de Coco. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 143 p.

BORDOLOI, S., GARG, A. & SEKHARAN, S. (2017). A review of physio-biochemical

properties of natural fibers and their application in soil reinforcement. Geotechnical and Geological Engineering, 35(6): 2615-2634.

BORDOLOI, S., HUSSAIN, R., GARG, A., SREEDEEP, S. & ZHOU, W.H. (2017). Infiltration characteristics of natural fiber reinforced soil. Transportation Geotechnics, 12: 37–44.

BOSZCZOWSKI, R.B. (2023). Laboratório de Mecânica dos Solos — Ensaios Especiais. 239 p.

BOUSSINESQ, J. (1885). Application des Potentiels à l'Étude de l'Équilibre et du Mouvement des Solides Élastiques. Gauthier-Villars, Paris.

BOWLES, J. E. (1996). Foundation analysis and design (5th ed.). McGraw-Hill.

BRUNŠEK, R., KOPITAR, D., SCHWARZ, I. & MARASOVIĆ, P. (2023). Biodegradation properties of cellulose fibers and pla biopolymer. Polymers, 15: 3532.

BUDINSKI, K. (1996). Engineering Materials, Properties and Selection. Prentice Hall International, New Jersey, USA, 653 p.

BUENO, B.S., LIMA, D.C., TEIXEIRA, S.H.C. & RIBEIRO, N.J. (1996). Soil fiber reinforcement: basic understanding. International Symposium on Environmental Geotechnology, San Diego, USA, 1: 878-884.

BUFALINO, L., GUIMARÃES, A.A., SILVA, B.M.S., SOUZA, R.L.F., MELO, I.C.N.A., OLIVEIRA, D.N.P.S. & TRUGILHO, P.F. (2018). Local variability of yield and physical properties of açaí waste and improvement of its energetic attributes by separation of lignocellulosic fibers and seeds. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 10(5): 053102.

CABALAR, A. F., ABDULNAFAA, M. D., & ISBUGA, V. (2021). Utilization of construction and demolition materials with clay for road pavement subgrade. Arabian Journal for Science and Engineering, 46, 4239–4250.

CALAUNAN, J.M.F.V. (2022). Evaluation of Swelling Pressure and Shear Strength of Inorganic Microfiber-reinforced Bentonite for the Engineered Barrier System. Dissertação de Mestrado, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE, EUA, 132 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.C. & GITIRANA JÚNIOR, G.F.N. (2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils. Soils and Rocks, 44(3): e2021068121. Camapum de Carvalho *et al.*, 2015 (primeira ocorrência)

CAMAPUM DE CARVALHO, J.C., REZENDE, L.R., CARDOSO, F.B.F., LUCENA, L.C.F.L., GUIMARÃES, R.C. & VALENCIA, Y.G. (2015). Tropical soils for highway construction: peculiarities and considerations. Transportation Geotechnics, 5: 3-19.

CARDOSO, F.B.F. (2002). Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 416 p.

CARVALHO, L.M.C. (2019). Comportamento Mecânico De Um Solo Arenoso Reforçado

Com Fibras Naturais Submetido A Ensaios De Cisalhamento Direto Em Média Escala. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 106 p.

CARVALHO, A., XAVIER, G.C., ALEXANDRE, J., PEDROTI, L.G., AZEVEDO, A.R.G., VIEIRA, C.M.F. & MONTEIRO, S.N. (2014). Environmental durability of soil-cement block incorporated with ornamental stone waste. Materials Science Forum, 798–799: 548–553.

CARVALHO, L.M.C.; MONTEIRO, F.F. & CASAGRANDE, M.D.T. (2023). Large-scale direct shear testing in coir fibers reinforced sand. Soils and Rocks, 46(1): e2023002822.

CARVALHO, R., FANGUEIRO, R. & NEVES, J. (2014). Durability of natural fibers for geotechnical engineering. Key Engineering Materials, 634: 447–454.

CARVALHO, R., NEVES, J. & FANGUEIRO, R. (2014). Durabilidade de fibras naturais para geotecnia. I Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, CLBMCS, Guimarães, Portugal, 2: 237-245.

CASAGRANDE, M. (2005). Comportamento de Solos Reforçados com Fibras Submetidos a Grandes Deformações. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, RS.

CASTRO, C.L. (2020). Comportamento Hidromecânico de Solos Reforçados com Fibras Considerando a Condição Não Saturada. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 121 p.

CASTRO, C.L., SOARES, A.B. & AGUIAR, M.F.P. (2022). Soil–water characteristic curve of polypropylene fibre-reinforced sandy soil. Soils and Rocks, 45(3): e2022070021.

CELESTINO, A.C.S., MENDONÇA, D.C. & SOBRAL, A.C.S. (2023). Análise da influência da adição de fibra de coco nas características físicas do solo. Ciências Exatas e Tecnológicas, 8(1): 38-56.

CHEN, C., YIN, W., CHEN, G., SUN, G. & WANG, G. (2017). Effects of biodegradation on the structure and properties of windmill palm (trachycarpus fortunei) fibers using different chemical treatments. Materials, 10(5): 514.

CHERIAN, S. K., & GEORGE, T. S. (2021). Studies on performance of isolated footing with load transfer platform. In G. C. Marano, S. Ray Chaudhuri, G. Unni Kartha, P. E. Kavitha, R. Prasad, & R. J. Achison (Eds.), Advances in sustainable construction and resource management (Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 171, pp. 49–58). Springer.

CHIEN, P.T. (2021). Experimental studies on hydraulic conductivity of different straw fiber cement treated muds. Journal of Materials and Construction, 11(2).

CONSOLI, N. C., CASAGRANDE, M. D. T., PRIETTO, P. D. M., & THOMÉ, A. (2003). Plate load test on fiber-reinforced soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(10), 951–955.

CONSOLI, N. C., CASAGRANDE, M. D. T., THOMÉ, A., DALLA ROSA, F., & FAHEY,

M. (2009). Effect of relative density on plate loading tests on fibre-reinforced sand. Géotechnique, 59(5), 471–476.

CONSOLI, N.C., MONTARDO, J.P., PRIETTO, P.D.M. & PASA, G.S. (2002). Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste fibers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128(6): 462–473.

CONSOLI, N.C., PRIETTO, P.D.M. & ULBRICH, L.A. (1998). Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(12).

CORREIA, A. A. S., VENDA OLIVEIRA, P. J., & CUSTÓDIO, D. G. (2015). Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders. Geotextiles and Geomembranes, 43(2), 97–106.

CORREIA, N.S., ROCHA, S.A., LODI, P.C., & MCCARTNEY, J.S. (2021). Shear strength behavior of clayey soil reinforced with polypropylene fibers under drained and undrained conditions. Geotextiles and Geomembranes, 49(5), 1419-1426.

COSTA, S.V. (2024). 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 de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 144 p.

CRIPPA, M.T., VENDRAME, P.R.S., FERREIRA, J.W.S. & TEIXEIRA, R.S. (2025). Hydro-mechanical behavior of tropical soils reinforced with recycled pet fibers: influence of weathering on fiber-matrix interaction. Geotechnical and Geological Engineering, 43: 91.

CRUZ, J. & FANGUEIRO, R. (2016). Surface modification of natural fibers: a review. Procedia Engineering, 155: 285-288.

CURCIO, D.S. (2008). Comportamento Hidromecânico de Compósito Solo-Fibra. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 169 p.

DAS, B. M. (2010). Principles of foundation engineering (7th ed.). Cengage Learning.

DELGADO, A.K.C. (2007). Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Tropicais Característicos do Distrito Federal para Uso na Pavimentação Rodoviária. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). (2023). DNIT 258/2023-ME: Solos — Compactação Mini-MCT — Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). (2023). DNIT 259/2023-CLA: Solos — Classificação MCT — Procedimento. Rio de Janeiro, RJ.

DIAMBRA, A., & IBRAIM, E. (2015). Fibre-reinforced sand: Interaction at the fibre and grain scale. Géotechnique, 65(4), 296–308.

DÍEZ, D., URUEÑA, A., PIÑERO, R., BARRIO, A. & TAMMINEN, T. (2020). Determination of hemicellulose, cellulose, and lignin content in different types of biomasses by thermogravimetric analysis and pseudocomponent kinetic model (tga-pkm method). Processes, 8(9): 1048.

DONATO, M. (2007). Medidas Diretas de Tensão em Solo Reforçado com Fibras de Polipropileno. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, RS, 162 p.

DUARTE, I.M.R. & RODRIGUES, C.M.G. (2018). Residual soils. Encyclopedia of Engineering Geology, P.T. Bobrowsky & B. Marker (eds.), Springer.

EL AHMAD, M., NAJJAR, S. & SADEK, S. (2018). Drained triaxial response of natural clay reinforced with natural hemp fibers. International Journal of Geomechanics, 24(7): 04021110.

EL AHMAD, M., NAJJAR, S. & SADEK, S. (2024). Drained triaxial response of natural clay reinforced with natural hemp fibers. International Journal of Geomechanics, 24(7): 04024110.

EL-SHEKEIL, Y.A., SAPUAN, S.M., KHALINA, A., ZAINUDIN, E.S. & AL-SHUIA'A, O.M. (2012). Effect of alkali treatment on mechanical and thermal properties of kenaf fiber-reinforced thermoplastic polyurethane composite. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 109: 1435–1443.

ELEUTÉRIO, T., TROTA, M.J., MEIRELLES, M.G. & VASCONCELOS, H.C. (2025). A review of natural fibers: classification, composition, extraction, treatments, and applications. Fibers, 13: 119.

ERNANI, P.R. (2008). Química de Solo e Disponibilidade de Nutrientes. Paulo Ernani, Lages, SC, 230 p.

ESTABRAGH, A. R., NAMDAR, P., & JAVADI, A. A. (2011). Mechanical behavior of a clay soil reinforced with nylon fibers. Geotechnical & Geological Engineering, 29, 899–908.

EVANGELOU, E.D., MARKOU, I.N., VERYKAKI, S.E. & BANTRALEXIS, K.E. (2023). Mechanical behavior of fiber-reinforced soils under undrained triaxial loading conditions. Geotechnics, 3: 874–893.

FALORCA, I. M. C. F. G., & PINTO, M. I. M. (2011). Effect of short, randomly distributed polypropylene microfibres on shear strength behaviour of soils. Geosynthetics International, 18(1), 2–11.

FARD, H.S., KÖNIG, D. & GOUDARZY, M. (2022). Soil-water characteristics curve of fiber reinforced soils. Journal of GeoEngineering, 17(3): 153-163.

FERREIRA, J.W.S., SENEZ, P.C. & CASAGRANDE, M.D.T. (2021). Pet fiber reinforced sand performance under triaxial and plate load tests. Case Studies In Construction Materials, 2: e00741.

FESTUGATO, L. (2008). Análise do Comportamento Mecânico de um Solo Micro-Reforçado

com Fibras de Distintos Índices Aspecto. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, 146 p.

FESTUGATO, L., CONSOLI, N. C., & FOURIE, A. (2015). Cyclic shear behaviour of fibre-reinforced mine tailings. Geosynthetics International, 22(3), 196–206.

FOOKES, P.G. (ed.) (1997). Tropical Residual Soils: A Geological Society Engineering Group Working Party Revised Report. Geological Society, London, UK.
Foundations, 59(5), 1552-1561.

FREITAS, J.B., REZENDE, L.R. & GITIRANA JÚNIOR, G.F.N. (2020). Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. Engineering Geology, 270: 105580.

FREITAS, T.M. (2022). Comportamento Mecânico a Longo Prazo de um Solo Reforçado com Fibras de Coco. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 113 p.

GABRIEL, T., BELETE, A., HAUSE, G., NEUBERT, R.H.H. & GEBRE-MARIAM, T. (2021). Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from different lignocellulosic residues: a comparative study. Journal of Polymers and the Environment, 29(10): 2964–2977.

GAÑÁN, P. & MONDRAGÓN, I. (2003). Thermal and degradation behaviour of fique fiber reinforced thermoplastic matrix composites. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 73(3): 783-795.

GAO, B., CAO, S., & YILMAZ, E. (2023). Effect of content and length of polypropylene fibers on strength and microstructure of cementitious tailings-waste rock fill. Minerals, 13(2), 142.

GARAT, W., CORN, S., MOIGNE, N.L., BEAUGRAND, J. & BERGERET, A. (2018). Analysis of the morphometric variations in natural fibres by automated laser scanning: towards an efficient and reliable assessment of the cross-sectional area. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 108: 114–123.

GARAT, W., MOIGNE, N.L., CORN, S., BEAUGRAND, J. & BERGERET, A. (2020). Swelling of natural fibre bundles under hygro- and hydrothermal conditions: determination of hydric expansion coefficients by automated laser scanning. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 131: 105803.

GARCEZ, L.R., LIMA, M.S.S., RIBAS, L.F., BALESTRA, C.E.T., MONTEIRO, N.B.R., MELO FILHO, J.A. & RAMIREZ GIL, M.A. (2024). Characteristics of the açaí seed (Euterpe precatoria martius) after thermal processing and its potential in soil–cement brick. Case Studies in Construction Materials, 20: e02816.

GARCIA, J.A.B., RODRÍGUEZ, J.F.R., SANTOS, D.V.M., CAICEDO, B. & FARIAS, G.N.G. (2021). Experimental investigation of a load-transfer material for foundations reinforced by rigid inclusions. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 147: 04021110.

GEHLEN, L.R. (2014). Efeito da Utilização de Fibras Lignocelulósticas (Açaí e Curauá) em

Compósitos com Matriz de Resina Poliéster Insaturado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 104 p.

GENG, J. & CAI, Y. (2024). Influence of interface modification on the moisture absorption and thermal resistance of ramie fiber/degradable epoxy composites. Materials, 17: 1779. Geotextiles and Geomembranes, 49(5), 1419-1426.

GESSNER, M.O. (2005). Proximate lignin and cellulose. Methods to Study Litter Decomposition: A Practical Guide, M.A.S. Graça, F. Bärlocher & M.O. Gessner (eds.), Springer, pp. 115-120.

GHAZAVI, M. & GHAFFARI, J. (2008). Experimental investigation of aging effect on shear strength parameters of sand/geosynthetic interface. Proceedings of the 4th European Geosynthetics Conference (EuroGeo4), Edinburgo, Escócia, Paper 71.

GIDIGASU, M.D. (1971). The importance of soil genesis in the engineering classification of ghana soils. Engineering Geology, 5(2): 117-161.

GIDIGASU, M.D. (1972). Mode of formation and geotechnical characteristics of laterite materials of ghana in relation to soil forming factors. Engineering Geology, 6(2): 79-150.

GIRARDELLO, V. (2010). Ensaios de Placa em Areias Não Saturadas Reforçada com Fibras. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, 141 p.

GOMES, F.S., MOTTA, M.F.B., BERNARDES, G.P. & SOARES, P.V. (2023). Influence of coconut fiber on the microstructural, mechanical and hydraulic behavior of unsaturated compacted soil. Soils and Rocks, 46(2): e2023013322.

GOMES, N.C. (2018). Comportamento Hidromecânico de Solos Reforçados com Fibras PET para Aplicação em Barreiras de Contenção de Resíduos. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 60 p.

GOWTHAMAN, S.; NAKASHIMA, K. & KAWASAKI, S. (2018). A State-of-the-Art Review on Soil Reinforcement Technology Using Natural Plant Fiber Materials: Past Findings, Present Trends and Future Directions. *Materials*, 11(4): 553.

GUEDES, C.E.G., OLIVEIRA, D.N.P.S., BEZERRA, J.B., PENIDO, C.A.F.O., FERREIRA, N.S., BORGES, W.L., BUFALINO, L. & SOUZA, T.M. (2021). Exploiting the amazonian açaí palm leaves potential as reinforcement for cement composites through alkali and bleaching treatments. Journal of Natural Fibers, 19(13): 6947-6960.

GUIMARÃES, R.C. (2002). Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao Estudo do Desempenho de Estacas Escavadas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183 p.

HAN, F., GANJU, E., SALGADO, R. & PREZZI, M. (2018). Effects of interface roughness, particle geometry, and gradation on the sand–steel interface friction angle. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 144(12): 04018084.

HARRIES, L., SCHÜTZ, M., KEMPF, D. & LIU, J. (2023). Investigation of the permeability

of fibre-modified water permeable asphalt with methods of asphalt petrology. Proceedings of the 8th International Conference on Civil Structural and Transportation Engineering (ICCSTE'23), Paper No. 144.

HASAN, K.M.F., HORVÁTH, P.G., BAK, M. & ALPÁR, T. (2021). A state-of-the-art review on coir fiber-reinforced biocomposites. RSC Advances, 11: 10548–10571.

HASANZADEH, M., FAR, H.S., HAJI, A. & ROSACE, G. (2022). Surface modification of polyester/viscose fabric with silica hydrosol and amino-functionalized polydimethylsiloxane for the preparation of a fluorine-free superhydrophobic and breathable textile. Coatings, 12(3): 398.

HASSAN, H. A. J., & SHAKIR, R. R. (2022). Ultimate bearing capacity of eccentrically loaded square footing over geogrid-reinforced cohesive soil. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 31(1), 337–344.

HEINECK, K.S. (2002). Estudo do Comportamento Hidráulico e Mecânico de Materiais Geotécnicos para Barreiras Impermeáveis Horizontais. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, RS, 275 p.

HEJAZI, S.M., SHEIKHZADEH, M., ABTAHI, S. M., & ZADHOUSH, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. Construction and building materials, 30, 100-116.

HOARE, D.J. (1979). Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibres. International Conference on Soil Reinforcement, Paris, France, 1: 47–52.

HODSON, M.J. & EVANS, D.E. (2020). Aluminium–silicon interactions in higher plants: an update. Journal of Experimental Botany, 71(21): 6719-6729.

HUANG, Y., SULTAN, M.T.H., SHAHAR, F.S., ŁUKASZEVICZ, A., OKSIUTA, Z. & GRZELĄ, R. (2025). Kenaf fiber-reinforced biocomposites for marine applications: a review. Materials, 18: 999.

HUZNI, S., IKRAMULLAH, I., IBRAHIM, I.B.M., FONNA, S., SUKHAIRI, T.A., AFRIZAL, A., MUKSIN, U., APRILIA, S. & RIZAL, S. (2022). The role of typha angustifilia fiber–matrix bonding parameters on interfacial shear strength analysis. Polymers, 14(5): 1006.

IMBARK, K., OMAR, E. A., & ABDELRAHMAN, S. (2025). Experimental study on soil stabilized with geotextile under a square footing. The International Journal of Engineering and Information Technology, 13(2), 71–80.

IMBARK, K., OMAR, E.A. & ABDELRAHMAN, S. (2025). Experimental study on soil stabilized with geotextile under a square footing. The International Journal of Engineering and Information Technology, 13(2): 71–80.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2026). Produção de Açaí (Cultivo) – Brasil. IBGE, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/acai-cultivo/br.

ISAZADEH-KHIAV, S., DEHGHANBANADAKI, A., & AREFNIA, A. (2022). Shear strength characteristics of fiber-reinforced clay. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 66(2), 469–479.

JAMSHAID, H., ALI, H., MISHRA, R.K., NAZARI, S. & CHANDAN, V. (2023). Durability and accelerated ageing of natural fibers in concrete as a sustainable construction material. Materials, 16: 6905.

JARAMILLO, N.A.D. (2016). Comportamento Mecânico de Solos Reforçados com Borracha de Pneus. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 112 p.

JAYAWARDANE, V.S., ANGGRAINI, V., EMMANUEL, E., YONG, L.L. & MIRZABABAEI, M. (2020). Expansive and compressibility behavior of lime stabilized fiber-reinforced marine clay. Journal of Materials in Civil Engineering, 32(11): 040203430.

JIANG, P., LI, N., ZHANG, Y., & LI, L. (2023). Mechanical properties and influence mechanism of coir fiber-reinforced red clay. Applied Sciences, 13(1), 556.

JIANG, X., GUO, J., YANG, H., BAO, S., WEN, C. & CHEN, J. (2022). Study on stress–strain relationship of coir fiber-reinforced red clay based on duncan–chang model. Applied Sciences, 13(1): 556.

JISHNU, V.P.; SANKAR, N. & CHANDRAKARAN, S. (2020). Strength behaviour of cohesionless soil reinforced with coconut leaf let as a natural material. Materials Today: Proceedings, 31(S3): S340–S347.

KABIR, M.M., WANG, H., LAU, K.T. & CARDONA, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: an overview. Composites Part B: Engineering, 43(7): 2883-2892.

KADHIM, H.K. & ALYOUNIS, M. (2024). Effect of surface roughness on interface shear strength parameters of sandy soils. Open Engineering, 14(1): 118–132.

KARGARZADEH, H., AHMAD, I., ABDULLAH, I., DUFRESNE, A., ZAINUDIN, S.Y. & SHELTAMI, R.M. (2012). Effects of hydrolysis conditions on the morphology, crystallinity, and thermal stability of cellulose nanocrystals extracted from kenaf bast fibers. Cellulose, 19: 855-866.

KICK, T., GRETHE, T. & MAHLTIG, B. (2017). A natural based method for hydrophobic treatment of natural fiber material. Acta Chimica Slovenica, 64(2): 373–380.

KLAVER, J., HEMES, S., HOUBEN, M., DESBOIS, G., RADI, Z. & URAI, J.L. (2015). The connectivity of pore space in mudstones: insights from high-pressure wood's metal injection, bib-sem imaging, and mercury intrusion porosimetry. Geofluids, 15: 577–591.

KONG, B.W., HE, H., YAN, Y.T., DING, Z. & ZOU, B.P. (2025). Liquefaction behavior of fiber-reinforced calcareous sand under cyclic simple shear tests. Acta Geotechnica, 20: 5139–5158.

KRISHNA, P., & MAGI, N. S. (2025). Bearing capacity improvement of soil using geosynthetic reinforced granular columns. Em Proceedings of the Second International Conference in Civil Engineering for a Sustainable Planet: ICCESP 2024 (AIJR Proceedings, Vol. 179). AIJR Publisher.

KUMAR, P. & MIR, F.A. (2023). Effect of Jute Fiber on Engineering Properties of Soil. In: SHUKLA, S.K. *et al.* (ed.). Recent Developments in Geotechnical and Structural Engineering: Proceedings of TRACE 2022. Singapore: Springer, p. 489–496.

KURT ALBAYRAK, Z.N. & ÖZDEMIR, B. (2023). Freezing and Thawing Resistance of Hemp Fiber Reinforced Clays. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(3): 822-828.

LACHACHE, R., KOULOUGHLI, S., BRAS, A. & BELHADAD, H. (2026). Feasibility study of fiber-reinforced dredged reservoir sediment for landfill cover applications. Geotechnics, 6: 32.

LAIBI, A., POULLAIN, P., LEKLOU, N., GOMINA, M. & SOHOUNHLOUÉ, D.K.C. (2017). Influence of the kenaf fiber length on the mechanical and thermal properties of compressed earth blocks (ceb). KSCE Journal of Civil Engineering: 242-259.

LATHA, G.M. & SOMWANSHI, A. (2009). Effect of reinforcement form on the bearing capacity of square footings on sand. Geotextiles and Geomembranes, 27(6): 409–422.

LAWER, A.K. & BOADU, S.D. (2017). Compressibility characteristics of coconut fiber reinforced lateritic subgrade soil. Proceedings of the 6th International Young Geotechnical Engineers' Conference (iYGEC6), Seul, Coreia do Sul.

LAWER, A.K., AMPADU, S.I.K. & OWUSU-NIMO, F. (2021). The effect of randomly distributed natural fibers on some geotechnical characteristics of a lateritic soil. SN Applied Sciences, 3: 642.

LE DUIGOU, A., BOURMAUD, A. & BALEY, C. (2015). In-situ evaluation of flax fibre degradation during water ageing. Industrial Crops and Products, 70: 204–210.

LEOCÁDIO, G. (2005). Reforço de Solo Laterítico com Fibras de Sisal de Distribuição Aleatória, Tratadas Superficialmente com EPS Reciclado. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG, 100 p.

LI, C. & ZORNBERG, J.G. (2013). Mobilization of reinforcement forces in fiber-reinforced soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139: 107-115.

LI, L.H., NING, T., ZHAN, Z.Q., GUI, Y.L. & ZHANG, C. (2026). Study on mechanical properties of fly ash and coir fiber improved expansive soil subgrade. Acta Geotechnica, 21: 745-765.

LI, Y., SONG, D., LIU, S., JI, X. & HAO, H. (2021). Evaluation of pore properties in coal through compressibility correction based on mercury intrusion porosimetry: a practical approach. Fuel, 291: 120130.

LI, Z., CHEN, F., REN, J. & CHEN, Z. (2023). Experimental study on the impermeability and micromechanisms of basalt fiber-reinforced soil-cement in marine environments. Coatings, 13: 532.

LIMA JÚNIOR, U.M. (2007). Fibras da Semente do Açaizeiro (Euterpe oleracea mart.): Avaliação Quanto ao Uso como Reforço de Compósitos Fibrocimentícios. Dissertação de Mestrado, PUC-RS, Porto Alegre, RS, 145 p.

LIMA, A.C.P., BASTOS, D.L.R., CAMARENA, M.A., BON, E.P.S., CAMMAROTA, M.C., TEIXEIRA, R.S.S. & GUTARRA, M.L.E. (2021). Physicochemical characterization of residual biomass (seed and fiber) from açaí (Euterpe oleracea) processing and assessment of the potential for energy production and bioproducts. Biomass Conversion and Biorefinery, 11: 925-935.

LIU, J.L., HOU, T.S., LUO, Y.S. & CUI, Y.X. (2020). Experimental study on unconsolidated undrained shear strength characteristics of synthetic cotton fiber reinforced soil. Geotechnical and Geological Engineering, 38(2): 1773–1783.

LIU, S., WANG, Y., TIAN, H., SUN, S., ZHANG, L., & ZHOU, R. (2024). Mechanical properties and toughening effect of rice straw fiber-reinforced soil. Case Studies in Construction Materials, 20, e03511.

LIU, W., XIE, T., QIU, R. & FAN, M. (2015). N-methylol acrylamide grafting bamboo fibers and their composites. Composites Science and Technology, 117(1): 100-106.

LIU, X.Y., YE, Y., LI, K. & WANG, Y.Q. (2023). Stress path efforts on palm fiber reinforcement of clay in geotechnical engineering. Water, 15: 4053.

LIU, Y., XIE, J., WU, N., MA, Y., MENON, C. & TONG, J. (2019). Characterization of natural cellulose fiber from corn stalk waste subjected to different surface treatments. Cellulose, 26(8): 4707-4719.

LIU, Z., NAIBI, W. & QU, J. (2026). Mechanical properties and micromechanisms of natural fiber-modified saline soil. Scientific Reports, 16: 2736.

LOPES, M.M. & CASAGRANDE, M. (2022). Mechanical improvement of a reinforced sand with açaí (Euterpe oleracea) fibers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1260(1): 012025.

LOPES, M.M. & CASAGRANDE, M.D.T. (2019). Mechanical behavior of a reinforced clay soil with açaí (Euterpe oleracea) fibers. 15th International Conference on Geotechnical Engineering, Lahore, Pakistan, pp. 265-269.

LV, C. & LIU, J. (2023). Alkaline degradation of plant fiber reinforcements in geopolymer: a review. Molecules, 28: 1868.

LV, C., HE, P., PANG, G. & LIU, J. (2023). Effect of wet–dry cycling on properties of natural-cellulose-fiber-reinforced geopolymers: a short review. Molecules, 28: 7189.

MA, Q., XIANG, J.C., WU, N.Z. & XIAO, H.L. (2020). Effect of microstructure change on permeability of flax fiber reinforced silty clay soaked with zinc ion solution. Scientific Reports, 10: 11296.

MAHER, M.H. & HO, Y.C. (1994). Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. Journal of Geotechnical Engineering, 120(8): 1381-1393.

MAIA, M.T., NORONHA, V.T., OLIVEIRA, N.C., ALVES, A.C., FARIA, A.F., MARTINEZ, D.T.S., FERREIRA, O.P. & PAULA, A.J. (2022). Silica nanoparticles and surface silanization for the fabrication of water-repellent cotton fibers. ACS Applied Nano Materials, 5: 4634-4647.

MARTINELLI, F.R.B., RIBEIRO, F.R.C., MARVILA, M.T., MONTEIRO, S.N., FILHO, F.C.G. & AZEVEDO, A.R.G. (2023). A review of the use of coconut fiber in cement composites. Polymers, 15: 1309.

MARTINS, A.P.S. (2014). Desenvolvimento, Caracterização Mecânica e Durabilidade de Compósitos Solo-Cimento Autoadensáveis Reforçados com Fibras de Sisal. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 297 p.

MARTINS, M.A., MATTOSO, L.H.C. & PESSOA, J.D.C. (2009). Comportamento térmico e caracterização morfológica das fibras de mesocarpo e caroço do açaí (Euterpe oleracea Mart.). Revista Brasileira de Fruticultura, 31(4): 1195-1202.

MARTINS, M.A., PESSOA, J.D.C., GONÇALVES, P.S., SOUZA, F.I. & MATTOSO, L.H.C. (2008). Thermal and mechanical properties of acai fiber/natural rubber composites. Journal of Materials Science Letters: 1-25.

MARVILA, M.T., AZEVEDO, A.R.G., CECCHIN, D., COSTA, J.M., XAVIER, G.C., CARMO, D.F. & MONTEIRO, S.N. (2020). Durability of coating mortars containing açaí fibers. Case Studies in Construction Materials, 13: e00406.

MASSOCCO, N.S. (2023). Avaliação do Efeito da Estrutura na Compressibilidade e na Resistência ao Cisalhamento de um Solo Laterítico. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169 p.

MCGOWN, A., ANDRAWES, K. & AL-HASANI, M. (1978). Effect of inclusion properties on the behaviour of sand. Geotechnique, 28(3): 327-346.

MEDEIROS, A.A.L., SILVA, M.F. & FURLAN, A.P. (2019). Avaliação comparativa dos métodos de dosagem do ph e de thompson para a estabilização com cal de dois solos tropicais. XXXIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Balneário Camboriú, SC.

MENEZES, L.C.P., SOUSA, D.B., FUCALE, S. & FERREIRA, S.R.M. (2019). Analysis of the physical-mechanical behavior of clayey sand soil improved with coir fiber. Soils and Rocks, 42(1): 31-42.

MERVILLE, A.K.F. & SOARES, A.B. (2024). Hydromechanical behavior of sandy-clayey soil mixtures with polypropylene fibers. Northeast Geosciences Journal, 10(2): ID36763.

MESQUITA, A.L. (2013). Estudos de Processos de Extração e Caracterização de Fibras do Fruto do Açaí (Euterpe oleracea Mart.) da Amazônia para Produção de Ecopainel de Partículas de Média Densidade. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 189 p.

MESQUITA, A.L.L., BARRERO, N.G., FIORELLI, J., CHRISTOFORO, A.L., FARIA, L.J.G. & LAHR, F.A.R. (2018). Eco-particleboard manufactured from chemically treated fibrous vascular tissue of acai (Euterpe oleracea mart.) fruit: a new alternative for the particleboard industry with its potential application in civil construction and furniture. Industrial Crops and Products, 112: 644–651.

MIRZABABAEI, M., MOHAMED, M.H.A. & MIRAFTAB, M. (2017). Analysis of strip footings on fibre reinforced slopes with the aid of particle image velocimetry (piv). Journal of Materials in Civil Engineering, 29(4): 04016254.

MONTARDO, J.P. (1999). Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do Efeito das Propriedades dos Materiais Constituintes. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, 150 p.

Monteiro, S.N.; Terrones, L.A.H.; Carvalho, E.A. & d'Almeida, J.R.M. (2006). Efeito da Interface Fibra/Matriz Sobre a Resistência de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Coco. Revista Matéria, 11(4): 395–402.

MOSLEMI, A., TABARSA, A., MOUSAVI, S.Y. & MONFARED, M.H.A. (2022). Shear strength and microstructure characteristics of soil reinforced with lignocellulosic fibers-sustainable materials for construction. Construction and Building Materials, 356: 129246.

MOTA, T.M. (2022). Comportamento Mecânico a Longo Prazo de um Solo Reforçado com Fibras de Coco. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 114 p.

MOZUMDER, R.S., BHUMIK, M.C. & SHEIKH, P. (2025). Influence of bamboo fiber reinforcement on the mechanical behavior of soft soil. Discover Civil Engineering, 2: 181.

MÜHLETHALER, K. (1961). Plant cell walls. The Cell, J. Brachet & A.E. Mirsky (eds.), Academic Press, New York, USA, 2, pp. 85-134.

MUÑOZ-BLANDÓN, O., RAMÍREZ-CARMONA, M., RENDÓN-CASTRILLÓN, L. & OCAMPO-LÓPEZ, C. (2023). Exploring the potential of fique fiber as a natural composite material: a comprehensive characterization study. Polymers, 15: 2712.

MWASHA, A. & PETERSEN, A. (2010). Thinking outside the box: the time dependent behaviour of a reinforced embankment on soft soil. Materials & Design, 31(5): 2360-2367.

NARAYAN, S., PRASAD, A., GOUNDAR, S.S. & NASREKANI, F.M. (2025). Performance of fiber-reinforced clay soil. Edelweiss Applied Science and Technology, 9(2): 496-515.

NATALLI, J.F., PEREIRA, I.S.A., JÚNIOR, E.R.G., MALAFAIA, S.A.A., BATISTA, I.D., BARBOSA, M.V., MARVILA, M.T., MARGEM, F.M., LIMA, T.E.S., MONTEIRO, S.N. & AZEVEDO, A.R.G. (2024). Performance evaluation of açaí fiber as reinforcement in coating

mortars. Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2024, Z. Peng *et al.* (eds.), Springer, Cham, Switzerland, pp. 587-594.

NATARAJ, M.S. & MCMANIS, K.L. (1997). Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers. Geosynthetics International, 4(1): 65-79.

NATÁRIO, P.J.G. (2017). Obras de melhoramento e reforço de solos. Geotecnia, 139: 77-98.

NETO, J.S.S., QUEIROZ, H.F.M., AGUIAR, R.A.A. & BANEA, M.D. (2021). A review on the thermal characterisation of natural and hybrid fiber composites. Polymers, 13: 4425.

NGUYEN-TRI, P., ALTIPARMAK, F., NGUYEN, N., TUDURI, L., OUELLET-PLAMONDON, C.M. & PRUD'HOMME, R.E. (2019). Robust superhydrophobic cotton fibers prepared by simple dip-coating approach using chemical and plasma-etching pretreatments. ACS Omega, 4: 7829-7837.

NGUYEN, T.T. & INDRARATNA, B. (2023). Natural fibre for geotechnical applications: concepts, achievements and challenges. Sustainability, 15(11): 8603.

NGUYEN, T.T., INDRARATNA, B. & CARTER, J. (2018). Laboratory investigation into biodegradation of jute drains with implications for field behavior. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 144(6): 04018026.

NI, J., BORDOLOI, S., GARG, A. *et al.* (2019). Simple model on water retention and permeability in soil mixed with lignocellulose fibres. KSCE Journal of Civil Engineering, 23: 138–146.

NOAMAN, M.F., KHAN, M.A. & ALI, K. (2022). Effect of artificial and natural fibers on behavior of soil. Materials Today: Proceedings, 64: 481–487.

NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1981). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, pp. 30-41.

NURAZZI, N.M., ASYRAF, M.R.M., KHALINA, A., ABDULLAH, N., AISYAH, H.A., RAFIQAH, S.A., SABARUDDIN, F.A., KAMARUDDIN, S.H., NORRAHIM, M.N.F. & ILYAS, R.A. (2021). A review on natural fiber reinforced polymer composite for bullet proof and ballistic applications. Polymers, 13: 646.

OJEFIA, F.E., EBEREMU, A.O. & AJIBOYE, S.T. (2024). The effect of coir fiber on the geotechnical properties of clayey soil, in wudil, northwest, nigeria. International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications, 6(2): 203-212.

OLIVEIRA JÚNIOR, A.I., JUCÁ, J.F.T., FERREIRA, J.A. & GUILHERME, L.C. (2019). Geotechnical behavior and soil-fiber interaction of clayey soil mixed with randomly dispersed coconut fibers. Soils and Rocks, 42(2): 127-138.

OLIVEIRA, A.M., OLIVEIRA, A.L.B., SILVA, J.L.M., MARQUES, M.G.S., VASCONCELOS, R.V. & OLIVEIRA, D.R.C. (2020). Influência de tratamentos superficiais

na absorção de água e na resistência à tração de fibras vegetais de ureana lobata linn. Revista Tecnia, 5(1): e983.

OLIVEIRA, D.N.P.S., CLARO, P.I.C., FREITAS, R.R., MARTINS, M.A., SOUZA, T.M., SILVA, B.M.S., MENDES, L.M. & BUFALINO, L. (2019). Enhancement of the amazonian açaí waste fibers through variations of alkali pretreatment parameters. Chemistry & Biodiversity, 16: e1900275.

OLIVEIRA, D.N.P.S., MATOS, L.C., SOUZA, T.M., ARÁUJO, E.S., SILVA, M.G., CABRAL, C.P.T., MENDES, L.M., ROCHA, Q.S. & BUFALINO, L. (2024). Methods for separating the lignocellulosic fibers from the açaí pulping waste: quality for kraft pulping. CERNE, 30: e-103376.

OLIVEIRA, M.S., COSTA, F.G.F., DEMOSTHENES, L.C.C., PEREIRA, A.C., LUZ, F. & MONTEIRO, S.N. (2018). Análise por espectroscopia de infravermelho de fibras de fique. ABM Proceedings: 989-995.

OTÁLVARO CALLE, I.F. (2013). Comportamento Hidromecânico de um Solo Tropical Compactado. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

OTÁLVARO, I.F., CORDÃO NETO, M.P. & CAICEDO, B. (2015). Compressibility and microstructure of compacted laterites. Transportation Geotechnics, 5: 20-34.

OTÁLVARO, I.F., CORDÃO NETO, M.P., DELAGE, P. & CAICEDO, B. (2016). Relationship between soil structure and water retention properties in a residual compacted soil. Engineering Geology, 205: 73-80.

OUN, A., MANALO, A., ALAJARMEH, O., ABOUSNINA, R. & GERDES, A. (2022). Long-term water absorption of hybrid flax fibre-reinforced epoxy composites with graphene and its influence on mechanical properties. Polymers, 14: 3679.

OVALLE-SERRANO, S., BLANCO-TIRADO, C. & COMBARIZA, M.Y. (2018). Exploring the composition of raw and delignified colombian fique fibers, tow and pulp. Cellulose, 25(1): 151-165.

OWINO, A.O., NAHAR, N., HOSSAIN, Z. & TAMAKI, N. (2022). Dimensional influence of basalt fiber reinforcements on the consolidation behaviour of rice husk ash stabilized soils. Construction and Building Materials, 339: 127686.

OWUSU, S.T., NG, C.W.W. & ZHOU, C. (2024). An experimental study of stress-dependent water retention behaviour of two lateritic clays with different minerals. Engineering Geology, 329: 107398.

OZSOY, E.A., ÖZMEN, H.B. & GÜLER, E. (2026). Investigation of the shear strength behavior of clay soil reinforced with basalt fiber using ring shear tests. Applied Sciences, 16: 21.

PALACIOS, M.A.P., CASAGRANDE, M.D.T., FOLLE, D. & ANVERSA, J. (2015). Estudo do comportamento de um compósito areia-fibra em extensão axial. Revista de Engenharia Civil IMED, 2(1): 33-39.

PASSOS, P.R.A. (2005). Destinação Sustentável de Cascas de Coco (Cocos nucifera) Verde: Obtenção de Telhas e Chapas de Partículas. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 186 p.

PATEL, S. K., & SINGH, B. (2021). Experimental study on strength behavior of clayey soil reinforced with glass fiber. Em Lecture Notes in Civil Engineering (pp. 1–9). Springer.

PATHAK, B., YIN, Z.Y., FU, Y. & LUO, Z. (2025). Evolution of surface roughness and particle breakage with interface shear behaviour of sand-epoxied gfrp against sand under elevated normal stress. Canadian Geotechnical Journal, 62: 1–28.

PATIL, P., MENA, I., GOSKI, S. & URS, Y. (2016). Soil reinforcement techniques. International Journal of Engineering Research and Application, 6(8): 25-31.

PAUL, S. & SARKAR, D. (2022). Performance evaluation of natural fiber reinforced laterite soil for road pavement construction. Materials Today: Proceedings, 62: 1246-1251.

PEJIC, B.M., KOSTIC, M.M., SKUNDRIC, P.D. & PRASKALO, J.Z. (2008). The effects of hemicelluloses and lignin removal on water uptake behavior of hemp fibers. Bioresource Technology, 99: 7152–7159.

PENUMADU, D. & DEAN, J. (2000). Compressibility effect in evaluating the pore-size distribution of kaolin clay using mercury intrusion porosimetry. Canadian Geotechnical Journal, 37(2): 393-405.

PÉREZ, A.C. (2022). Análise da Influência de Insumos Minerais no Comportamento de um Perfil de Solo Tropical. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 138 p.

PESSOA, J.D.C., ARDUIN, M., MARTINS, M.A. & CARVALHO, J.E.U. (2010). Characterization of açaí (e. oleracea) fruits and its processing residues. Brazilian Archives of Biology and Technology, 53(6): 1451-1460.

PICKERING, K.L., EFENDY, M.G.A. & LE, T.M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 83: 98-112.

PIEROZAN, R.C. (2018). Estudo da Resistência de Interface de Tiras Metálicas e Poliméricas em Diferentes Solos. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 315 p.

PINHEIRO, M.F.C.A. (2008). Compósitos Avançados Reforçados com Fibras Naturais para Construção. Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

PINKA, H. F., WIBOWO, D. E., ENDARYANTA, & MUNAWIR, R. (2021). The effect of reinforcement of bamboo matting, bamboo grids, and geotextiles non-woven increasing the carrying capacity of clay soil using the loading test. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 832, 012008.

PINTO, A.R.A.G. (2008). Fibras de Curauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 103 p.

POLETTO, M., ORNAGHI JÚNIOR, H.L. & ZATTERA, A.J. (2014). Native cellulose: structure, characterization and thermal properties. Materials, 7(9): 6105–6119.

POLIDORI, G., MURER, S., BEAUMONT, F., LACHI, M., BLIARD, C., NAIT-RABAH, O., BUFALINO, L. & BOGARD, F. (2024). An update on the waste management of the amazonian açaí berry for the civil engineering sector. Sustainability, 16: 8451.

PUNYAMURTHY, R., SAMPATHKUMAR, D., BENNEHALLI, B. & SRINIVASA, C.V. (2013). Influence of esterification on the water absorption property of single abaca fiber. Chemical Science Transactions, 2(2): 413–422.

QU, J. & SUN, Z. (2016). Strength Behavior of Shanghai Clayey Soil Reinforced with Wheat Straw Fibers. Geotechnical and Geological Engineering, 34: 515–527.

RADZUAN, N.A.M., THOLIBON, D., SULONG, A.B., MUHAMAD, N. & HARON, C.H.C. (2020). Effects of high-temperature exposure on the mechanical properties of kenaf composites. Polymers, 12: 1643.

RAJEENA, I. & JEYAPRIYA, S.P. (2018). Swell and consolidation characteristics of fiber reinforced cohesive soil. Asian Journal of Engineering and Applied Technology, 7(S1): 33-36.

REIS, A.F.S.M., FREITAS, T.M., CARVALHO, M.F. & MACHADO, S.L. (2023). Long-term behaviour of coir-fibre-reinforced soils. Environmental Geotechnics: 1–14.

REIS, K.H. & JUNIOR, I.R. (2011). Reforço de um solo residual expansivo com fibras de poliéster oriundas do pet. Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Centro Oeste, Geocentro 2011, Brasília, DF, 1: 212-220.

RIBEIRO, P.M. (2018). Comportamento Mecânico de uma Bentonita Reforçada com Borracha de Pneu e PET Triturado. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 109 p.

ROBERTSON, P.K. (1986). In situ testing and its application to foundation engineering. Canadian Geotechnical Journal, 23: 537-588.

RODRIGUES FILHO, J.A., CAMARÃO, A.P. & LOURENÇO JÚNIOR, J.B. (1993). Avaliação de Subprodutos Agroindustriais para a Alimentação de Ruminantes. EMBRAPA-CPATU, Belém, PA, 15 p.

RUTLEDGE, G.C., LOWERY, J.L. & PAI, C.L. (2009). Characterization by mercury porosimetry of nonwoven fiber media with deformation. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 4(3).

SABRI, M.M.S., VATIN, N.I., PONOMAREV, A.B., NURMUKHAMETOV, R.R. & KOSTYUKOV, I.I. (2022). Settlement of soil reinforced with vertical fiberglass micro-piles. Materials, 15: 4744.

SAJINI, K.S. & NIRANJANA, K. (2021). Effect of coir fiber on compressibility behavior of clayey soil. Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2019, IGC-2019, Vol. III: 581-589.

SANTANA, H.A. (2024). Durabilidade de Fibras Vegetais em Matrizes Álcali-Ativadas: Efeitos da Dosagem da Matriz e da Exposição ao Envelhecimento Natural. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 155 p.

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

SANTOS, G.O., CATUNDA, T.P., TAVARES, Q.E.S., LOPES, A.B. & TRAVASSOS, F.L.D. (2019). Potencial de aproveitamento do resíduo de açaí no município de Lábrea-AM. 30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Natal, RN, pp. 1-13.

SANTOS, I.S., SILVA, F.G., MOURA JÚNIOR, J.M., LAFAYETTE, K.P. & RABBANI, E.R.K. (2022). Reforço de solo erodível com utilização de fibras: uma revisão sistemática da literatura. Conjecturas, 22(6), 288–304.

SANTOS, L.B., MOREIRA, T.A., DALMASCHIO, C.J. & MACHADO, M.A. (2024). Preparação de biocompósito à base de amido termoplástico reforçado com fibras de eucalipto: avaliação do efeito do tamanho das fibras nas propriedades mecânicas e de sorção. Química Nova, 47(10): 1-9.

SANTOS, M.L.J. (2023). 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. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150 p.

SANTOS, M.L.J., LOPES, M.M., SILVA, A.B., FERREIRA, J.W.S. & CASAGRANDE, M.D.T. (2026). Mechanical performance and durability of açaí fibers as reinforcement in tropical clay soil. Journal of Natural Fibers, 23(1): 2595560.

SANTOS, M.M., PASOLINI, F.S. & COSTA, A.P.O. (2023). Caracterização físico-química do caroço e da fibra do açaí (euterpe oleracea mart.) via métodos clássicos e instrumentais. Brazilian Journal of Production Engineering, 9(2): 143-160.

SARBAZ, H., GHIASSIAN, H. & HESHMATI, A.A.C. (2014). Cbr strength of reinforced soil with natural fibres and considering environmental conditions. International Journal of Pavement Engineering, 15(7): 577–583.

SCHNEIDER, C.A., RASBAND, W.S. & ELICEIRI, K.W. (2012). Nih image to imagej: 25 years of image analysis. Nature Methods, 9(7): 671-675.

SEGAL, L., CREELY, J.J., MARTIN, A.E. & CONRAD, C.M. (1959). An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the x-ray diffractometer. Textile Research Journal, 29(10): 786-794.

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

SEO, E.S.M., SILVA, N.S., BARBOSA, I.T.F., ATHIE, A.A.R. & LUCA, A.C. (2019).

Obtenção de um copo mais sustentável: preparação e caracterização de fibras naturais e de bicompósitos. Ciência e Engenharia de Materiais e o Desenvolvimento Socioambiental, H.A. Holzmann & R.V.B. Biscaia (orgs.), 1: 61-73.

SEYYEDREZAIE, S.A., TABARSA, A., KERAMATI, M. & PORDELI, H. (2025). Dynamic behavior of microbial-induced calcite precipitation improved loess soil with basalt fiber reinforcement using cyclic direct simple shear test. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 85: 33.

SHAIA, H.A. & ABUEL-NAGA, H.M. (2016). Effect of ageing environment on fiber-reinforced polymer/granular interface shear behaviour. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 47(3).

SHAKER, A.A., AL-SHAMRANI, M.A., MOGHAL, A.A.B. & VYDEHI, K.V. (2021). Effect of confining conditions on the hydraulic conductivity behavior of fiber-reinforced lime blended semiarid soil. Materials, 14: 3120.

SHEN, Y. S., TANG, Y., YIN, J., LI, M. P., & WEN, T. (2021). An experimental investigation on strength characteristics of fiber-reinforced clayey soil treated with lime or cement. Construction and Building Materials, 294, 123537.

SHIFA, S.S., KANOK, M.M.H. & HAQUE, M.S. (2024). Effect of alkali treatment on mechanical and water absorption properties of biodegradable wheat-straw/glass fiber reinforced epoxy hybrid composites. Heliyon, 10: e35910.

SIGNORINI, C., NOBILI, A., GONZÁLEZ, E.I.C. & SILIGARDI, C. (2018). Silica coating for interphase bond enhancement of carbon and ar-glass textile reinforced mortar (trm). Composites Part B, 141: 191-202.

SILVA, A.B., GONZAGA, L.B.T., CAVALCANTE, A.L.B. & CASAGRANDE, M.D.T. (2024). Potencial uso geotécnico de fibras de açaí como reforço de solos argilosos: Estudo geotécnico experimental comparativo de resistência ao cisalhamento. XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, Balneário Camboriú, SC.

SILVA, T.R., MATOS, P.R., TAMBARA JÚNIOR, L.U.D., MARVILA, M.T., MONTEIRO, S.N. & AZEVEDO, A.R.G. (2023). Characterization of açaí fibers (Euterpe oleracea mart.) for application in cement composites. Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2023, T.R. Silva *et al.* (eds.), Springer, Cham, Switzerland, pp. 271-278.

SILVEIRA, M.V. (2018). Análise do Comportamento Mecânico e da Durabilidade em Compósitos de Areia Reforçada com Fibras Naturais de Curauá e Sisal. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 148 p.

SILVEIRA, M.V. & CASAGRANDE, M.D.T. (2021). Effects of degradation of vegetal fibers on the mechanical behavior of reinforced sand. Geotechnical and Geological Engineering, 39: 3875–3887.

SILVEIRA, M.V., FERREIRA, J.W.S. & CASAGRANDE, M.D.T. (2022). Effect of surface

treatment on natural aging and mechanical behavior of sisal fiber–reinforced sand composite. Journal of Materials in Civil Engineering, 34(6).

SKEMPTON, A.W. (1954). The pore-pressure coefficients a and b. Géotechnique, 4(4): 143–147.

SONMEZER, Y. B. Investigation of the liquefaction potential of fiber-reinforced sand. (2019). Geomechanics and Engineering, 18(5): 503–513.

SOTOMAYOR, J.M.G. & CASAGRANDE, M. (2018). The performance of a sand reinforced with coconut fibers through plate load tests on a true scale physical model. Soils and Rocks, 41(3): 361–368.

SOUTH CAROLINA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (SCDOT). (2022). Geotechnical Design Manual (GDM). Columbia, SC, USA.

SOWERS, G.F. (1963). Engineering properties of residual soils derived from igneous and metamorphic rocks. 2nd Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 1: 39-61.

SPECHT, L.P. (2000). Comportamento de Misturas de Solo-Cimento-Fibra Submetidos a Carregamentos Estáticos Visando à Pavimentação. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, 151 p.

STAUFFER, S. & HOLTZ, R.D. (1995). Stress-strain and strength behavior of staple fiber and continuous filament-reinforced sand. Transportation Research Record, 1474: 86-93.
strength characteristics of fiber-reinforced clayey soil treated with lime or cement.

SZYPCIO, Z., DOŁZYK-SZYPCIO, K. & CHMIELEWSKA, I. (2023). Stress–dilatancy behaviourof fibre-reinforced sand. Materials, 16: 609.

TAHA, M.M.M., FENG, C.P. & AHMED, S.H.S. (2020). Influence of polypropylene fibre (pf) reinforcement on mechanical properties of clay soil. Advances in Polymer Technology, 2020: 9512839.

TAKEDA, M.C. (2006). A Influência da Variação da Umidade Pós-Compactação no Comportamento Mecânico de Solos de Rodovias do Interior Paulista. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP.

TANG, C. S., SHI, B., & ZHAO, L. Z. (2010). Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. Geotextiles and Geomembranes, 28(1), 54–62.

TANG, C., SHI, B., GAO, W., CHEN, F. & CAI, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. Geotextiles and Geomembranes, 25: 194–202.

TANG, Y., WEI, S., LIU, X., LIU, W. & LIU, T. (2023). Mechanical analysis of palm-fiber-reinforced sand through triaxial tests. Sustainability, 15: 5461.

TAO, G., GUO, E., YUAN, J., CHEN, Q. & NIMBALKAR, S. (2023). Permeability and

cracking of compacted clay liner improved by nano-sio2 and sisal fiber. KSCE Journal of Civil Engineering, 27(12): 5109-5122.

TAO, Y., LI, Z. & XU, S. (2025). Enhancing the compressibility of seasonally frozen subgrade clay subjected to freeze-thaw cycles using lignin fibers. Sustainability, 17: 7303.

TAVARES, F.F.C., ALMEIDA, M.D.C., SILVA, J.A.P., ARAÚJO, L.L., CARDOZO, N.S.M. & SANTANA, R.M.C. (2020). Thermal treatment of açaí (Euterpe oleracea) fiber for composite reinforcement. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 30(1): e2020003.

TAVARES, V.L. (2024). Análise das Propriedades Geotécnicas de Misturas de Solo e Biochar de Casca de Coco para Aplicação em Camadas de Cobertura de Aterro Sanitário. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 87 p.

TAYLOR, G.D. (1994). Materials in Construction. Longman Scientific & Technical, Harlow, UK, 352 p.

TRAN, K.Q.; SATOMI, T. & TAKAHASHI, H. (2018). Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft soils. Transportation Geotechnics, 16: 76–84.

TEIXEIRA, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A. & TEIXEIRA, W.G. (eds.) (2017). Manual de Métodos de Análise de Solo. 3ª ed., Embrapa, Brasília, DF, 573 p.

TEODORO, J.M. (1999). Resistência ao Cisalhamento de Solos Reforçados com Fibras Plásticas. Dissertação de Mestrado, USP, São Carlos, SP, 137 p.

TERZAGHI, K. & PECK, R.B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice. 2ª ed., John Wiley & Sons, Nova Iorque, 729 p.

THAGEEL, S. S., & ABD SHAIA, H. A. (2024). Numerical and experimental study of effect woven geotextile on clay soil. University of Thi-Qar Journal for Engineering Sciences, 14(1), 41–51.

TORRES, M.M., CHRISTOFOLETTI, S.R., SARDINHA, D.S. & GODOY, L.H. (2018). Análise geoquímica de rochas sedimentares argilosas a partir do conteúdo dos elementos maiores, perda ao fogo e difração de raios x. Geociências, 37(1): 39-53.

TOWNSEND, F.C. (1985). Geotechnical characteristics of residual soils. Journal of Geotechnical Engineering, 111(1): 77-94.

UD-DIN, S., MARRI, A. & WANATOWSKI, D. (2011). Effect of high confining pressure on the behaviour of fibre reinforced sand. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 42(4).

VALIPOUR, M., SHOURIJEH, P.T. & MOHAMMADINIA, A. (2021). Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement. Transportation Geotechnics, 27.

VARGAS, M. (1985). The concept of tropical soils. 1st International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brasília, DF, 3: 101-134.

VAUGHAN, P.R. (1988). Characterising the mechanical properties of in-situ residual soil. II International Conference on Geomechanics in Tropical Soils, 2: 469-487.

VAUGHAN, P.R., MACCARINI, M. & MOKHTAR, S.M. (1988). Indexing the engineering properties of residual soil. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 21(1): 69-84.

VESIĆ, A. S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 99(1), 45-73.

VILLIBOR, D.F. & ALVES, D.M.L. (2019). Pavimentação de Baixo Custo para Regiões Tropicais: Projeto e Construção - Novas Considerações. Tribo da Ilha, Florianópolis, SC.

VINCENZINI, A., AUGARDE, C.E. & GIOFFRÈ, M. (2021). Experimental characterization of natural fibre–soil interaction: lessons for earthen construction. Materials and Structures, 54: 110.

WAMBUA, P.; IVENS, J. & VERPOEST, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?. *Composites Science and Technology*, 63(9): 1259-1264.

WANG, G., ZHANG, X., LIU, X., GAO, H., SONG, S. & LU, J. (2024). Enhancing mechanical properties of micaceous weathered granitic soil: a synergetic approach using natural fibers and fly ash. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 83: 257.

WANG, H., NI, W. & YUAN, K. (2023). Improvement of strength and impermeability of fiber reinforced loess by bentonite and polypropylene fibers: a response surface analysis. Environmental Earth Sciences, 82: 252.

WANG, J. (2020). The Engineering Properties and Mechanical Behaviour of Fibre Reinforced Clay. Tese de Doutorado, Durham University, Durham, Reino Unido, 252 p.

WANG, J., HUGHES, P.N. & AUGARDE, C.E. (2024). Towards a predictive model of the shear strength behaviour of fibre reinforced clay. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 28(2): 380–400.

WANG, T. & WANG, Y. (2024). Mechanical and microstructural changes in expansive soils treated with lime and lignin fiber from paper industry. Applied Sciences, 14(8): 3393.

WEI, J. (2014). Durability of Cement Composites Reinforced with Sisal Fiber. Tese de Doutorado, Columbia University, Nova Iorque, EUA, 253 p.

WEI, J. (2018). Degradation behavior and kinetics of sisal fiber in pore solutions of sustainable cementitious composite containing metakaolin. Polymer Degradation and Stability, 150: 1-12.

WEI, J. & MEYER, C. (2017). Degradation of natural fiber in ternary blended cement composites containing metakaolin and montmorillonite. Corrosion Science, 120: 42–60.

WESLEY, L.D. (2010). Geotechnical Engineering in Residual Soils. Wiley, Hoboken, USA.

WIDIANTI, A., DIANA, W. & BAHTI, F.N. (2023). Effect of fiber length on the consolidation parameters of coir fiber-reinforced soft clay. E3S Web of Conferences, 429: 04021.

WIDIANTI, A., WIANDRI, H.P., RAHMAWATI, A. & WIBOWO, D.E. (2024). Enhancement of shear strength properties of soft clay using coir fiber-coconut husk ash-wood ash mixture. Environment and Natural Resources Journal, 22(5).

WU, L.; WEI, Q.; LIU, J.; SONG, Z.; KANUNGO, D. P.; BAI, Y.; BU, F. (2020). Sisal fiber-polymer-treated sand mechanical properties in triaxial test. Environmental and Engineering Geoscience, 66 (1): 227–242.

WU, Z., XU, J., JI, Y. *et al.* (2025). Tensile strength and deformation properties of fiber-reinforced loess: laboratory and numerical investigation. Acta Geotechnica.

XI, Y., SUN, M., LI, H., LI, G., WANG, P. & LI, L. (2024). Permeability and disintegration characteristics of loess solidified by guar gum and basalt fiber. Materials, 17: 3150.

XUE, Z.F.; CHENG, W.C.; WANG, L. & SONG, G. (2021). Improvement of the Shearing Behaviour of Loess Using Recycled Straw Fiber Reinforcement. KSCE Journal of Civil Engineering, 25(9): 3319-3335.

YAMAUCHI, T. (2007). A method to determine lumen volume and collapse degree of pulp fibers by using bottleneck effect of mercury porosimetry. Journal of Wood Science, 53: 516–519.

YANG, B. & JIN, L. (2024). Fractal characteristics of natural fiber-reinforced soil in arid climate due to cracking. Fractal and Fractional, 8: 209.

YANG, H., LI, P., YANG, E., JIANG, X. & CHEN, J. (2023). The strength law of coir ber-reinforced soil based on modi ed duncan-chang model. Frontiers in Earth Science, 10: 1078624.

YANG, H., YAN, R., CHEN, H., LEE, D.H. & ZHENG, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel, 86(12–13): 1781–1788.

YANG, Z., WANG, R., SHI, W., SUN, Z. & LING, X. (2024). Investigation of the shear and pore structure characteristics of rubber fiber-reinforced expansive soil. Applied Sciences, 14: 5794.

YAZICI, M.F. & KESKIN, S.N. (2023). Enhancing Mechanical Properties of Low Plasticity Clay Soil Using Hemp Fibers: Effects of Fiber Content and Fiber Surface Coating. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 48: 961–975.

YAZICI, M.F. & KESKIN, S.N. (2024). Experimental investigation of the mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced clay soil and development of predictive models: effects of fiber length and fiber content. Arabian Journal for Science and Engineering, 49: 13593–13611.

YUAN, K.Z., NI, W.K., LÜ, X.F. & ZHU, M. (2022). Experimental study on the performance

of the modified loess by polypropylene fiber mixed with bentonite and cement. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81: 302.

ZAMANI, S., LAJEVARDI, S. H., YARIVAND, A., & ZEIGHAMI, E. (2023). Experimental study of the behavior of square footing on reinforced sand with treated geotextile. International Journal of Geo-Engineering, 14(1), 19.

ZHANG, X., LIU, X., WANG, G., XU, Y. & GAO, H. (2025). Causes of the high friction angle of diatomaceous soil: microscale and nanoscale insights. Géotechnique, 75(3): 362–378.

ZHANG, Y., HOSSEINAEI, O., WANG, S. & ZHOU, Z. (2011). Influence of hemicellulose extraction on water uptake behavior of wood strands. Wood and Fiber Science, 43(3): 244–250.

ZHANG, Y., ZHANG, Y., LI, B., KANG, A. & WANG, Y. (2024). Evaluation of cracking resistance of sma-13 hot recycling asphalt mixtures reinforced by basalt fiber. Materials, 17: 1762.

ZHANG, Y.H., MA, H.X., QI, Y., ZHU, R.X., LI, X.W., YU, W.J. & RAO, F. (2022). Study of the long-term degradation behavior of bamboo scrimber under natural weathering. Materials Degradation, 6: 63.

ZHANG, Y.M., ZHAO, Q., LI, L., YAN, R., ZHANG, J., DUAN, C.J., LIU, B.J., SUN, Z.Y., ZHANG, M.Y., HU, W. & ZHANG, N.N. (2018). Synthesis of a lignin-based phosphorus-containing flame retardant and its application in polyurethane. RSC Advances, 8: 32252–32261.

ZHAO, F. & ZHENG, Y. (2022). Shear strength behavior of fiber-reinforced soil: experimental investigation and prediction model. International Journal of Geomechanics, 22(9): 04021110.

ZHAO, L.S., ZHOU, W.H., SU, L.J., GARG, A. & YUEN, K.V. (2019). Selection of physical and chemical properties of natural fibers for predicting soil reinforcement. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(10).

ZHAO, Y., YANG, Y., LING, X., GONG, W., LI, G. & SU, S. (2021). Dynamic behavior of natural sand soils and fiber reinforced soils in heavy-haul railway embankment under multistage cyclic loading. Transportation Geotechnics, 28: 100507.

ZHAO, Y.Y., LING, X.Z., ZHANG, F., LI, P., LI, Q.L. & LI, Y. (2015). Effects of fiber parameters and confining pressure on mechanical properties of fiber reinforced aeolian sandy soil (in Chinese). Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(S2): 4426–4432.

ZORNBERG, J. G. (2002). Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. Géotechnique, 52(8), 593–604.

ZUBAIR, A., FAROOQ, Z., FAROOQ, K., MASOUD, Z., MUJTABA, H. & MOHAMED, A. (2023). Prediction of compression index from secant elastic modulus and peak strength of high plastic clay ameliorated by agro-synthetic waste fibers for green subgrade. Sustainability, 15: 15871.