



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, n° 2 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n2ID36735>



Comportamento hidromecânico e processo de formação de fissuras em solo expansivo reforçado com fibras de coco verde.

Hydromechanical Behavior and Crack Formation Process in Expansive Soil Reinforced with Green Coconut Fibers

Otávio Wesley Cavalcanti Faustino¹; Silvio Romero de Melo Ferreira²

- ¹ Universidade Federal de Pernambuco, PPGEC, Departamento Engenharia Civil, Recife/PE; Brasil. Email: otavio.faustino@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3392-1357>
- ² Universidade Federal de Pernambuco, PPGEC, Departamento Engenharia Civil, Recife/PE; Brasil. Email: silvio.mferreira@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5760-1494>

Resumo: As fibras de coco verde descartadas em locais não adequados tornam-se passivo ambiental. Nesta pesquisa, a viabilidade de reutilizar fibras de coco como reforço, em solo expansivo de Paulista/PE, é investigada através de experimentos laboratoriais, em amostra do solo compactado e em misturas com fibras de coco nas proporções em peso de 0,25%; 0,50%; 1,00% e 2,00%. Foram realizados os ensaios de: granulometria, limites de consistências, compressão, tensão de expansão, condutividade hidráulica e de análise de formação de fissuras por secagem. O potencial de expansão, com o acréscimo de fibras, há redução na tensão de expansão do solo de 101,7 kPa do solo natural para 25,8 kPa para o solo com 1% de fibra de coco, uma redução de 74,63%. A resistência à tração por compressão diametral cresce 42% ao se adicionar 2% de fibra ao solo natural. Em relação à compressão simples, apresentou aumento na tensão máxima de 57,49%. A condutividade hidráulica não se altera, os valores não excedem a permeabilidade de (10^{-10} m/s). O fator de intensidade da fissura (CIF) diminui à medida que o teor de fibras aumenta. A inserção de fibras de coco verde ao solo expansivo melhora todas as características geotécnicas investigadas do solo expansivo.

Palavras-chave: Comportamento Hidromecânico; Formação de Fissuras; Solo Expansivo.

Abstract: Green coconut fibers discarded in unsuitable locations become environmental liabilities. In this research, the feasibility of reusing coconut fibers as reinforcement in expansive soil in Paulista/PE is investigated through laboratory experiments, in a sample of compacted soil and in mixtures with coconut fibers in weight proportions of 0.25%; 0.50%; 1.00% and 2.00%. Tests were carried out on: granulometry, consistency limits, compression, expansion tension, hydraulic conductivity and analysis of crack formation due to drying. The potential for expansion, with the addition of fibers, there is a reduction in the soil expansion tension from 101.7 kPa for natural soil to 25.8 kPa for soil with 1% coconut fiber, a reduction of 74.63%. The tensile strength due to diametral compression increases 42% when adding 2% fiber to the natural soil. In relation to simple compression, it showed an increase in maximum tension of 57.49%. Hydraulic conductivity does not change, values do not exceed permeability (10^{-10} m/s). The crack intensity factor (CIF) decreases as the fiber content increases. The insertion of green coconut fibers into the expansive soil improves all investigated geotechnical characteristics of the expansive soil.

Keywords: Hydromechanical Behavior; Crack Formation; Expansive Soil.

Recebido: 26/06/2024; Aceito: 26/08/2024; Publicado: 13/10/2024.

1. Introdução

Solos não saturados são comuns na natureza e são encontrados na maioria das infraestruturas geotécnicas, incluindo encostas de terra, pavimentos, aterros, barragens de terra, canais de irrigação e, às vezes, solos expansivos naturais ou compactados sujeitos à variação de umidade (sucção). O clima desempenha um papel significativo no comportamento do solo não saturado. Por exemplo, durante a estação seca com baixa precipitação, o solo apresenta níveis de umidade mais baixos, conduzindo, potencialmente, à dessecação e à elevada sucção, o que pode afetar a resistência do solo. Em contrapartida, nos períodos chuvosos, há aumento das chuvas e da umidade do solo, reduzindo a sucção e, conseqüentemente, a resistência do solo.

Em solos expansivos, rachaduras ou fissuras características são observadas no campo durante as estações secas, enquanto durante as estações chuvosas, pode haver expansão. De acordo com Zhang *et al.* (2020), Solos expansivos, compostos por materiais altamente hidrofílicos como montmorilonita e illita, são sensíveis a mudanças na sucção. Conforme demonstrado por Ng *et al.* (2003), o clima pode impactar, significativamente, o comportamento hidromecânico de solos expansivos, causando potencialmente danos graves às estruturas construídas sobre eles. Nelson *et al.* (1992) relataram que, num ano típico nos Estados Unidos, solos expansivos podem causar maiores perdas financeiras aos proprietários do que terremotos, inundações, tornados e furacões juntos. Driscoll *et al.* (2000) observaram que o custo médio anual, estimado para a Associação Britânica de Seguros para sinistros relacionados aos solos expansivos, no setor de seguros, excede 400 milhões de libras.

Por outro lado, o alto consumo de coco verde, valorizado por sua nutrição, conteúdo mineral e sabor entre os brasileiros, gera um problema ambiental substancial devido ao volume e peso significativos das cascas de coco. O Brasil, responsável por quase 5% da produção global de coco, é o quarto maior produtor. É fundamental que a sustentabilidade seja discutida em todas as áreas e atividades do conhecimento, buscando incluir processos, materiais e metodologias mais sustentáveis, reduzindo assim, o consumo e o reaproveitamento dos resíduos gerados nos processos. Nesse sentido, Misra *et al.* (2011), a engenharia geotécnica não deve ser excluída deste debate e deve buscar formas e tecnologias mais sustentáveis, devido à sua importância primordial em um projeto de construção civil.

Kar e Pradhan (2011) estudaram a resistência à compressão simples e a resistência ao cisalhamento direto de um solo argiloso, localizado em Burla na Índia, misturado com fibras de coco e com fibras de polipropileno, os teores usados foram 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% e 1%. Para o ensaio de compressão simples, houve melhores resultados para 0,6% de fibra, alcançando uma resistência à compressão simples de aproximadamente 160 kPa, diminuindo essa resistência para 140 kPa a partir do teor de 0,8%. Narani, *et al.* (2019) estudaram o comportamento hidromecânico de um solo argiloso expansivo, localizado na cidade Tehran no Iran, misturado com fibras de nylon nas proporções de 0,1%, 2%, 3% e 4%. Observaram um aumento da resistência e uma diminuição do potencial de expansão com o acréscimo de fibras até um percentual de 3%. Também observaram que, com o aumento do teor de fibras, houve um aumento do teor de umidade ótima e uma diminuição do peso específico máximo aparente seco das misturas na curva proctor. Chaduvula *et al.* (2016) realizaram ensaios de ressecamento em uma argila de Nanded na Índia, com o reforço de fibras sintéticas de PET nas proporções de 0, 0,25%, 0,50% e 0,75%. O solo não reforçado apresentou fissuras uniformes, longas e espessas, e o solo reforçado apresentou menos fissuras de menor área fissurada, além do aparecimento de fissuras terem sido retardado. Na tentativa de encontrar uma alternativa para mitigar os problemas dos solos expansivos na Engenharia Geotécnica e também fornecer uma solução para a utilização de fibras de coco verde, reduzindo um passivo ambiental, esta pesquisa tem como objetivo investigar o comportamento hidromecânico de solos expansivos no município de Paulista, PE, Brasil, reforçado com fibras de coco verde. O objetivo geral desta pesquisa foi investigar o comportamento hidromecânico de um solo expansivo de Paulista/PE, reforçado com fibra de coco verde e analisar a viabilidade de incorporação de tal material, com ênfase no desempenho dessas misturas quanto à formação e à propagação de fissuras.

2. Metodologia

As amostras deformadas de solo argiloso expansivo são provenientes do Brasil, Estado de Pernambuco, município de Paulista, coletadas na Estação de Tratamento de Esgoto da Companhia de Saneamento do Estado de Pernambuco (COMPESA). As fibras de coco foram obtidas, na forma processada, de uma empresa sediada em Fortaleza/CE, Brasil. Atualmente, a tecnologia empregada para processar resíduos de casca de coco e extrair fibras de coco envolve o uso de máquinas. Por fim, o material prensado é classificado, as fibras longas são separadas das fibras curtas e do pó em um aparelho de triagem, que utiliza martelos helicoidais fixos e uma folha perfurada. Neste estudo, foram utilizadas fibras curtas, pois não possuem tanta aplicabilidade quanto as fibras longas. Todos os dados foram obtidos experimentalmente

em laboratório, utilizando os métodos descritos por Abbaspour *et al.* (2019). A Tabela 1 apresenta a caracterização física do solo e das fibras.

Tabela 1 – Caracterização Físicos e Mecânica dos materiais utilizados.

ÍNDICES FÍSICOS e Classificação Geotécnica	SOLO	FIBRA DE COCO VERDE
Peso Específico Aparente Seco Máximo (kN/m ³)	16,04	
Umidade Ótima (%)	21,30	
Absorção (%)	-	414,00
Peso Específico Real (kN/m ³)	26,70	12,60
(%) Areia	31	
(%) Silte	31	
(%) Argila	38	
Limite de Liquidez	52	
Limite de Plasticidade	21	
Índice de Plasticidade	31	
Índice de Atividade	0,76	
Classificação AASHTO	A-7-6	
Classificação SUCS	CH	
Resistência à Tração (MPa)	-	239,71
Módulo de Elasticidade (GPa)	-	2,16

Fonte: Faustino (2022).

2.1 Programa Experimental

São apresentados os procedimentos metodológicos no programa de investigação geotécnica de um solo expansivo no município de Paulista/PE, Brasil, com o objetivo de obter a caracterização física, reológica e o comportamento hidromecânico do solo natural e suas misturas com fibras de coco verde (solo-0,25%Fibra, solo-0,5%Fibra, solo-1%Fibra e solo-2%Fibra). O programa foi dividido em 4 etapas.

A primeira envolve o preparo do solo e das fibras utilizadas na pesquisa, bem como a caracterização física desses materiais por meio de testes realizados em laboratório, seguindo as normas Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2016a, 2016b, 2016c, 2016d, 2016e) e da American Society for Testing and Materials ASTM (2021).

Na segunda etapa, os percentuais de fibras de coco verde foram definidos. As proporções utilizadas são 0,25%; 0,50%; 1,00%; 2,00%. O diâmetro da fibra é de 0,3 mm (compreendido entre 0,27 e 0,50 mm, e seu comprimento é de 20 mm compreendido entre 10 e 30 mm), atendendo as indicações de Abbaspour *et al.*, (2019), Kodicherla *et al.*, (2019) e Mandeep *et al.*, (2020). A mistura foi iniciada com adição de 50% do volume total de água destilada ao solo para atingir a umidade desejada para a mistura. A adesão, induzida no solo por esta quantidade de água, facilita a distribuição aleatória das fibras (Abbaspour *et al.*, 2019) posteriormente, foi adicionada a quantidade designada de fibras (0,25%; 0,5%; 1,00%; 2,00%) junto com a quantidade restante de água. A mistura foi homogeneizada até haver uma uniformidade visual do solo com as fibras. As misturas foram mantidas em sacos plásticos impermeáveis e hermeticamente fechados por 48 horas para garantir a uniformidade do teor de água na mistura.

Na terceira etapa, foram realizados ensaios hidráulicos e mecânicos no solo natural e nas misturas compactadas na umidade ótima e peso específico seco máximo respectivos. O coeficiente de permeabilidade foi avaliado pela norma ABNT NBR 14545/2000 por meio de um permeante de carga variada de parede flexível Tri-flex 2 em amostras de 127 mm de altura e 100 mm de diâmetro. A saturação dos corpos de prova foi realizada por contrapressão, aplicada por estágio. de 50 kPa com duração de 6 horas até a 200 kPa. Após a saturação, foi aplicada uma tensão confinante de consolidação de 220 kPa, manteve-se a tensão de 200 kPa na base da amostra e uma redução da pressão no topo da amostra para 50 kPa, gerando um gradiente hidráulico de 150 kPa para percolação da água no sentido vertical e ascendente das amostras.

Os ensaios de expansão “livre” e de tensão de expansão seguiram as recomendações da norma D 4546 (ASTM, 2021). Os ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral foram realizados segundo as normas NBR 12770 (ABNT, 2011) e NBR 7222 (ABNT, 2011). A Figura 1 mostra detalhes dos ensaios de permeabilidade, expansão “livre” compressão simples e de tração por compressão diametral.

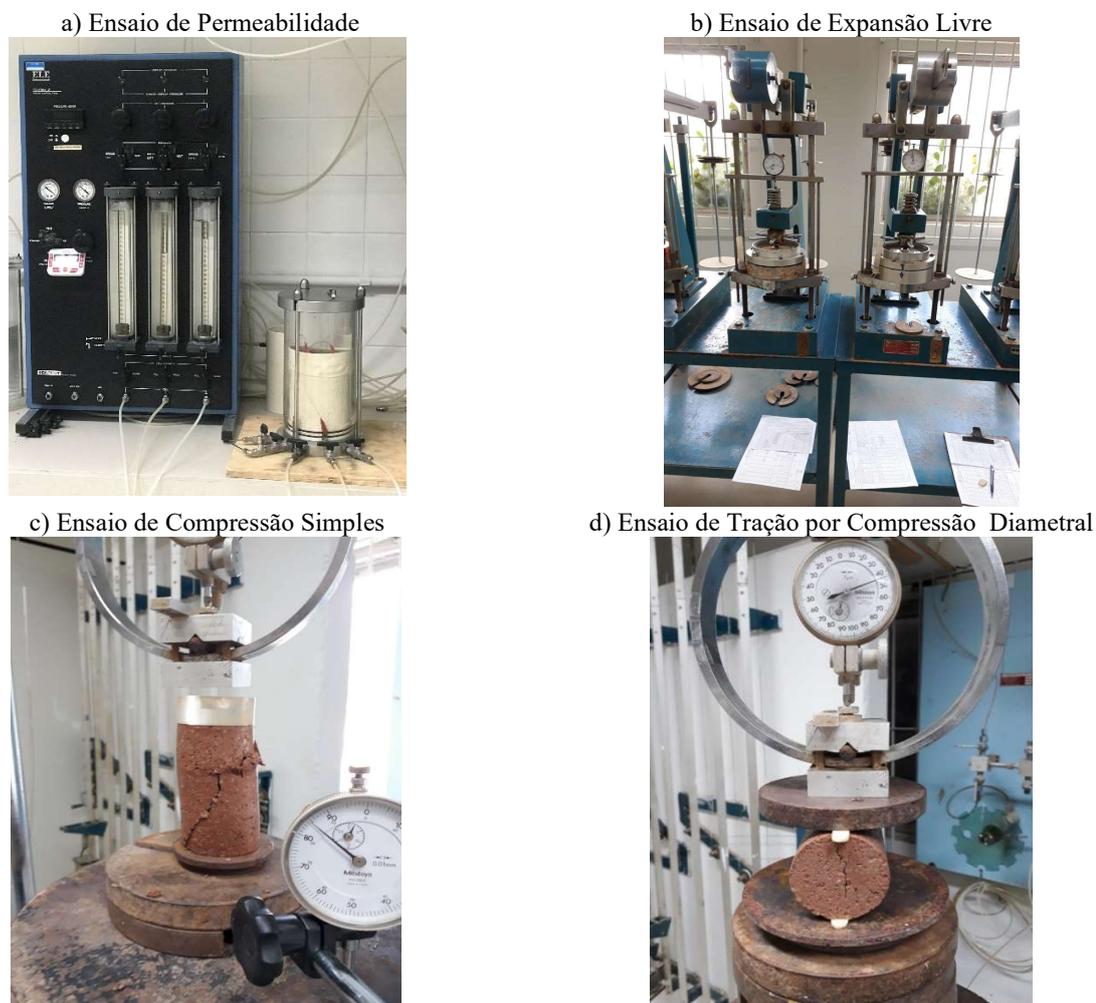


Figura 1 – Ensaios Hidromecânicos : a) Ensaio de Permeabilidade; b) Ensaio de Expansão “Livre”; c) Ensaio de Compressão Simples e d) Ensaio de Tração por Compressão Diametral.
Fonte: Autores (2024).

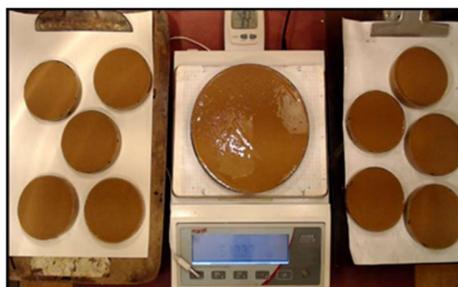
Na quarta etapa, é avaliada a influência da adição das fibras de coco verde no processo de propagação de fissuras do solo expansivo e das misturas. É utilizado o aparato e a metodologia proposta por Ferreira *et al.* (2020). O aparato montado é capaz de monitorar a temperatura do ambiente, umidade relativa do ar do ambiente e a variação de umidade da amostra, submetida a ciclos de secagem e de molhagem, Figura 2. Amostras dos solos e das misturas foram homogeneizadas para equilíbrio uniforme de umidade a 1,1 vezes do valor do Limite de liquidez, compactadas em placas Petri com 150 mm de diâmetro e 15 mm de altura com o auxílio de um soquete plástico, que serviu para espalhar o solo no molde e retirar bolhas de ar. O conjunto placa-solo/mistura foi colocado, apoiado em balança de capacidade 2.000 g e sensibilidade 0.01g. Este procedimento permitia a obtenção do peso do conjunto em tempo real, possibilitando assim o cálculo de umidade do solo em qualquer instante. Lâmpadas incandescentes e o condicionador de ar do laboratório foram ligados antes do início da moldagem (aproximadamente 2 h antes do início do ensaio propriamente dito) de modo a estabilizar a temperatura inicial do ambiente. Todo o conjunto é abrigado dentro do armário de Medium Density Fiberboard (MDF) de modo a garantir o isolamento parcial do meio e a evitar interferência externa como manipulação inadequada. Para acompanhar o processo de formação de fissuras, as imagens foram obtidas por meio de uma webcam Logitech C922 PRO STREAM Full HD ligada a um notebook. Através do software livre Auto Screenshot Capture foi possível controlar a captura automática de imagens por um tempo predeterminado de 10 min. A análise de imagens foi realizada no software ImageJ.exe o que permitiu realizar

comparações entre os padrões de fissuração das amostras ensaiadas, determinar o tempo para o surgimento das primeiras fissuras de cada imagem 2D, os índices geométricos: a) o Crack Intensity Factor – CIF, que corresponde à intensidade da fissuração em uma amostra por meio da relação entre a sua área superficial que sofreu a trinca em qualquer tempo e a área superficial da amostra no estado inicial; b) a largura da trinca é calculada pela distância mais curta de um ponto estocástico de uma borda ao limite oposto de um segmento de trinca; c) o comprimento total de fissura é calculado, contando o número total de pixels branco após a imagem ter sido esqueletizada; d) O número de segmentos de fissuras, os elementos entre duas interseções adjacentes são definidos como um segmento de fissuras, conforme Tang *et al.* (2019).

a) Captura automática da tela do computador



b) Estágio inicial do processo de propagação de fissuras



c) Estado final do processo de propagação de fissuras



d) Estágios do processamento de imagem



Figura 2 – Monitoramento do processo de formação e propagação de fissuras por ressecamento.
Fonte: Autores (2024).

Ainda na quarta etapa, foram realizados ensaios para determinação da curva de retenção de água no solo e nas misturas. Placas menores que também foram colocadas dentro do aparato, porém fora da balança para determinação da sucção. A sucção total do solo e das misturas foi medida por meio da técnica de papel filtro durante o processo de fissuras, seguindo as diretrizes estabelecidas na norma ASTM D5298 (ASTM, 2010). Buscou-se avaliar a influência da adição de fibras de coco na retenção de água do solo estudado. A curva de retenção de água foi construída através da secagem das amostras e do papel filtro, utilizado Whatman nº 42. Partindo da condição saturada, as amostras foram secadas, no aparato de formação de fissuras, sendo que a cada secagem de 5% de umidade gravimétrica, eram retiradas as placas menores e colocados papéis filtros em contato direto com amostras para determinação da sucção matricial correspondente ao conteúdo de água na amostra. Após essa etapa, as amostras com os papéis filtros foram envolvidas em camadas de papel filme plástico (PVC) e papel alumínio. Foi adotado um período de equalização de umidade do conjunto amostra-papel de 7 dias. Durante este período, as amostras foram conservadas em uma caixa de isopor. Em seguida, os papéis filtros e parte do solo úmido foram pesados e colocados em cápsulas e levados à secagem em estufa a 100°C por 24 horas. Posteriormente, foram pesados em balança de sensibilidade de 0,001m para determinação da umidade do solo e das misturas no equilíbrio.

3. Resultados

A influência da adição de fibras de coco verde no comportamento hidromecânico e no processo de formação de fissuras ao solo expansivo do muninípio de Paulista-PE são aqui analisados.

3.1 Influência da adição de fibras de coco verde no comportamento hidromecânico do solo

A adição de fibra de coco verde nas proporções de 0,25%; 0,50%; 1,00%; 2,00% ao solo expansivo de Paulista/PE, Brasil não modifica, significativamente, a densidade real e a distribuição granulométrica. Observação similar foi encontrada por Menezes *et al.* (2019). Tanto o solo quanto as misturas solo-fibra apresentam alta plasticidade ($IP > 15\%$). O limite de liquidez (LL) aumenta de 52,56% (solo) para 69,40% (solo-2% fibra), e o limite plástico (LP) também aumenta de 21,81% (solo) para 27,63% (solo-2% fibra). À medida que o LL aumenta mais do que o LP, o índice de plasticidade aumenta de 30,75% (solo) para 41,77% (solo-2% fibra), conforme mostrado na Tabela 2. Resultados semelhantes foram encontrados por Abbaspour *et al.* (2019) e Mandeep *et al.* (2019), ao analisarem o comportamento de uma argila expansiva da Índia, reforçada com fibra de coco.

Tabela 2 – Valores dos limites de liquidez, limites de plasticidade e índices de plasticidade do solo com teores de fibras.

Teor de Fibra (%)	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)	Varição dos Índices de Plasticidade (%)
Solo Puro	52,56	21,81	30,75	-
Solo+0,25%Fibras	58,7	25,11	33,59	2,84
Solo+0,5%Fibras	59	24,94	34,06	3,31
Solo+1%Fibras	64,5	25,92	38,58	7,83
Solo+2%Fibras	69,4	27,63	41,77	11,02

Fonte: Autores (2024).

O peso específico aparente seco máximo diminui com o aumento da porcentagem de fibra. Isso pode ser resultado da fibra de coco ser um material leve e substituto do solo, o que ocasiona a redução das densidades da mistura, Kodicherla *et al.* (2019). À medida que aumenta o percentual de fibras de coco, há um aumento no teor ótimo de umidade da mistura, que pode ser baseado na adsorção de água pelas fibras, Shukla *et al.* (2017), Figura 3.

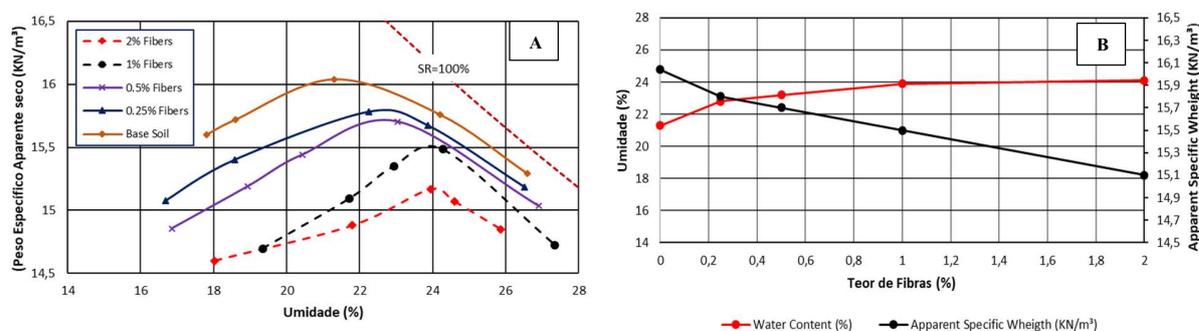


Figura 3 – Curvas de compactação do Solo Natural e misturas Solo-Fibra de Coco seco com teor de fibras. a) Curvas de compactação; b) variação da umidade e peso específico aparente.

Fonte: Autores (2024).

O solo natural apresenta coeficiente de permeabilidade de $2,64 \times 10^{-10}$ m/s. É perceptível que misturas com 0,25%, 0,5%, 1% e 2% de fibras de coco apresentaram valores dos coeficientes de permeabilidade semelhantes aos do solo natural, $3,45 \times 10^{-10}$ m/s, $2,76 \times 10^{-10}$ m/s, $2,99 \times 10^{-10}$ m/s e $2,62 \times 10^{-10}$ m/s, respectivamente. Assim, o teor de fibra não alterou significativamente a permeabilidade.

A Figura 4 mostra que o potencial de expansão foi restringido pelo reforço com fibra de coco. O potencial de expansão é reduzido em 4,91%, 22,09%, 38,39% e 46,42% para teores de fibra de 0,25%, 0,5%, 1% e 2%, respectivamente, em comparação ao solo natural. Tais tendências foram relatadas por outros pesquisadores e são frequentemente atribuídas à

interação solo-fibra. Esse efeito foi reduzido com teores de fibra extremamente elevados, conforme observado por Narani *et al.* (2019). Um teor de fibra de 2% pode ser considerado o nível no qual o potencial de expansão é reduzido de forma mais significativa.

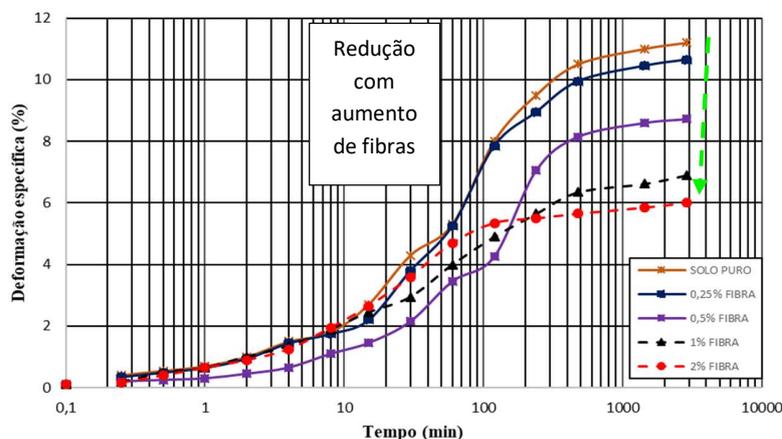


Figura 4 – Potencial de expansão do solo e misturas.

Fonte: Autores (2024).

A Tabela 3 apresenta a tensão de expansão obtida pelo método volume constante e das misturas solo-fibra nos percentuais 0,25%, 0,5%, 1% e 2%. O solo natural compactado na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo apresenta uma tensão de 101,70 kPa e a adição de fibras de coco resultou na redução gradativa da tensão de expansão à medida que aumentou o teor de fibras no solo. Para os percentuais estudados, não foi possível zerar a tensão de expansão, mas para o percentual de 1% de fibra de coco, a redução foi de 74,63%, o que pode ser administrado, dependendo do projeto estrutural a que o solo será exposto. Os valores da tensão de expansão no solo natural compactado na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, apresenta, segundo o critério de Jimenez Salas (1980), a possibilidade de ocorrência de danos graves. Com a adição gradativa das fibras de coco, nota-se a redução da tendência de fissuração ou danos às estruturas, passando de Fissuras Importantes (0,25%), Fissuras Pequenas (0,5%) até a possibilidade de não haver danos às estruturas (1% e 2%).

Tabela 3 – Valores das tensões de expansão pelo método do volume constante.

Amostra	Tensão de Expansão (kPa)	Redução (%)
Solo Natural	101,70	-
Solo+0,25% Fibra de Coco	77,50	23,79
Solo+0,50% Fibra de Coco	53,33	47,56
Solo+1,0% Fibra de Coco	25,80	74,63
Solo+2,0% Fibra de Coco	26,60	73,85

Fonte: Autores (2024).

Na Figura 5, observa-se que o padrão de ruptura nos corpos de prova e a resistência à compressão simples aumentam com a inserção de fibras do coco verde, com um aumento de 5,33% para um teor de 0,25% fibra, 39,79% para um teor de 0,5% de fibra, atingindo maior valor com 1% de fibra (54,21% maior do que o solo natural). As curvas de tensão axial *versus* deformação específica de cada amostra investigada são apresentadas na Figura 5. Com a obtenção da tensão máxima e da deformação axial de ruptura, observa-se que a crescente adição de fibras tende a aumentar o módulo de elasticidade, aumentando ainda a rigidez e apresentando uma ruptura mais plástica, provavelmente, devido à fibra ser um material mais flexível que o solo. A energia de tensão máxima (E_u) – Módulo de resiliência, que é a energia de deformação por volume necessária para tensionar um material de um estado sem carregamento até a sua tensão limite de escoamento, está representada nas setas azuis na Figura 5.

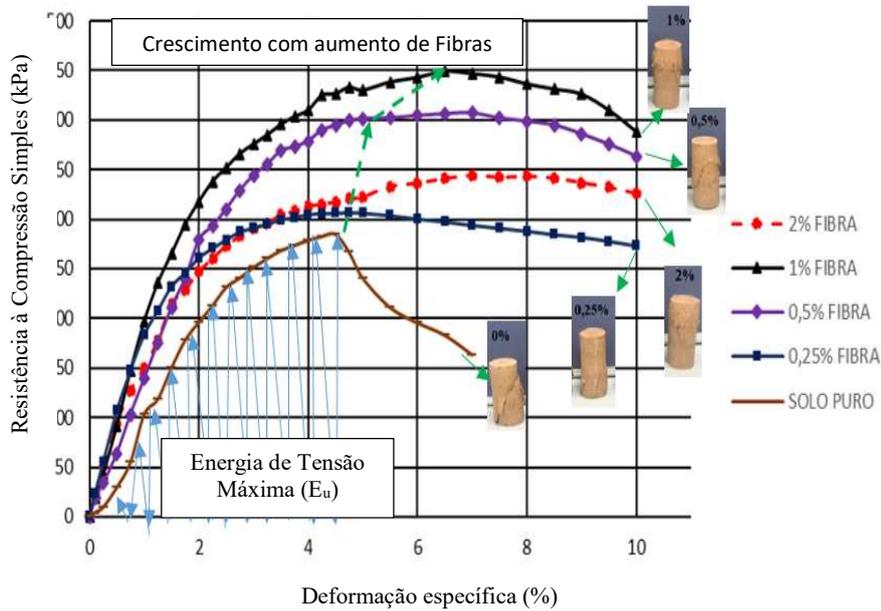


Figura 5 – Resistência à Compressão Simples do solo e misturas
Fonte: Autores (2024)

A resistência à tração por compressão diametral aumenta com a inserção de fibras do coco verde (Figura. 6), com aumento de 6,20% para um teor de fibra de 0,25%, 19,03% para um teor de fibra de 0,5%, 32,05% para um teor de 1 %, atingindo valor superior com 2% de fibra, 41,93% superior ao solo natural. As fibras aumentam a resistência máxima e induzem o comportamento de endurecimento por deformação na mistura, controlando e mitigando a tensão pela transferência de tensão através das fissuras para as fibras, que compartilham esforços nas solicitações de tração.

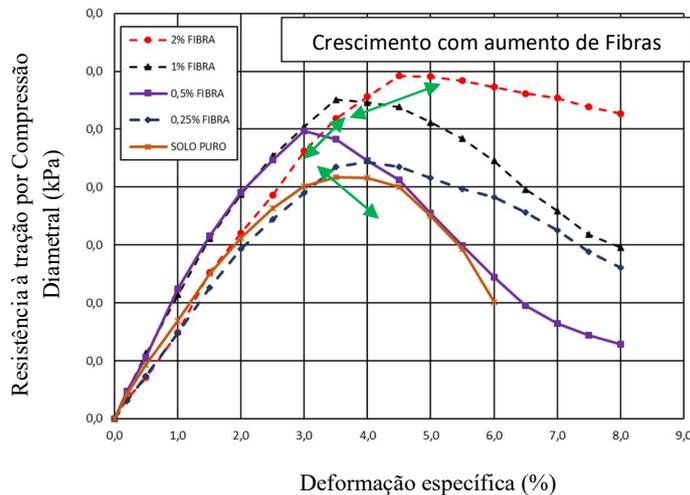


Figura 6 – Resultados da resistência à tração por compressão diametral para o solo natural e as diferentes misturas
Fonte: Autores (2024).

O solo apresenta comportamento de pico, típico de material friável, sendo registrado um aumento da resistência quando a deformação está em 4,5%, Figura 6. Após essa deformação, ocorre um decréscimo das tensões aplicadas. Para as misturas, verifica-se um comportamento plástico com pequeno amolecimento. Também houve um aumento do módulo de

elasticidade com o incremento de fibras até 1%. Observações similares foram obtidas por Kar *et al.* (2014) e Sarah *et al.* (2019).

A Figura 7 apresenta imagens da interação fibra solo após a compactação para a mistura solo+1%. Fibra vista através de um microscópio óptico com ampliação de 100x, que foi utilizado para analisar a interação solo-fibra após a compactação. Verifica-se que as fibras estavam distribuídas de forma aleatória no solo, havendo uma boa interação física. Nota-se também que, com o corte ao cisalhamento, as fibras se deslocaram, deixando reentrâncias.

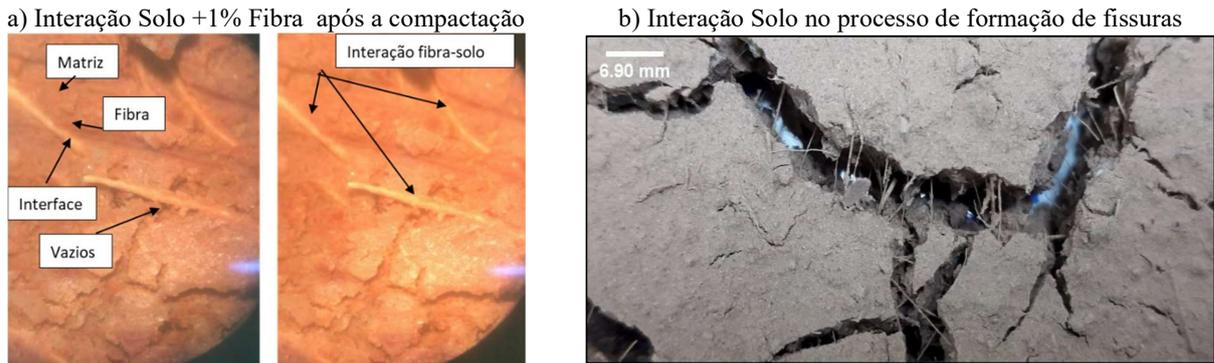


Figura 7 – Interação Solo fibra: a) após a compactação para um solo+1% Fibra; b) Processo de formação de fissuras. Fonte: Autores (2024).

3.2 Influência da adição de fibras de coco verde no processo de formação e propagação de fissuras por secagem

O processo de formação de fissura por secagem se inicia no interior da amostra juntamente com a contração do solo irradiando para a parte interior com maior intensidade. O padrão sequencial das fissuras ocorre simultaneamente em toda a superfície do solo, provocando subdivisão da área inicial. A perda gradual de umidade leva à propagação das fissuras em direções desviadas até causar bifurcações em alguns pontos das trincas. As formas dos traçados das fissuras na intersecção são predominantes em forma de “X” ou “Y”, formando elementos geométricos. As fissuras primárias e depois a propagação do centro para os bordos contribuíram para o desenvolvimento da rede superficial das fissuras, Figura 8. Foram selecionadas imagens para avaliar a evolução das fissuras e a determinação do CIF a secagem das amostras. Há em todos os testes mudança da cor do solo úmido para a cor do solo, após a secagem ao final dos testes (através da análise das fotografias). Nenhuma mudança significativa de cor ocorreu nos estágios iniciais de secagem. Isto indica que a perda de umidade foi uniforme em toda a superfície da amostra no estado inicial de secagem.

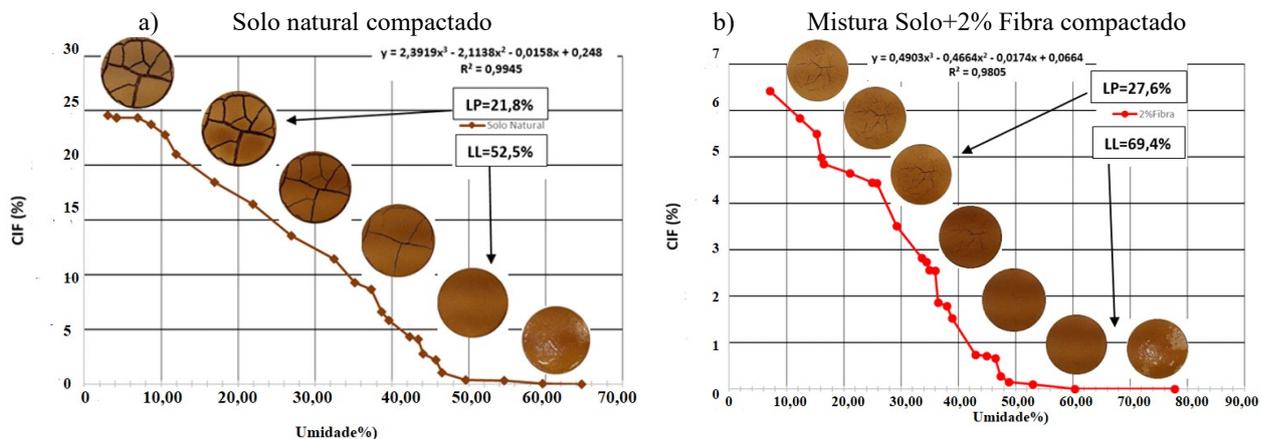


Figura 8 – Curva CIF versus Umidade em: a) Solo Natural compactado e b) Mistura Solo+2% Fibra compactado. Fonte: Autores (2024).

A umidade inicial do ensaio com solo natural é de 57,8 % (correspondente a 1,1 vezes o limite de liquidez) e índice de vazios de 1,51. A sequência de imagens da Figura 8a mostra o aparecimento e evolução das fissuras ao longo de aproximadamente 28 horas de ensaio. Esse ensaio teve o surgimento de fissuras com direcionamento da borda para o centro, a partir da contração do solo. Considerando que o ensaio teve duração de 28 horas, que as primeiras fissuras apareceram a 7,1 horas e que após 24 horas de observação, praticamente, não se observava mais desenvolvimento de fissuras, o processo de fissuração teve duração de 9,3 horas. À medida que a umidade do solo foi reduzindo, ocorreu contração e propagação de fissuras secundárias em toda a superfície do solo. De modo geral, uma fissura secundária tem origem em uma fissura primária, mostrando o formato “T” ou “Y”, semelhante ao encontrado por Tang *et al.*, (2012) e Ferreira *et al.*, 2020.

A umidade inicial da mistura solo+2% Fibra é de 76,34 % (correspondente a 1,1 vezes o limite de liquidez) e índice de vazios de 1,51. A sequência de imagens da Figura 8b mostra o aparecimento e evolução das fissuras ao longo de aproximadamente 30 horas de ensaio. Esse ensaio teve o surgimento de pequenas fissuras com direcionamento da borda para o centro, a partir da contração do solo. Considerando que o ensaio teve duração de 30 horas, que as primeiras fissuras apareceram depois de 10 horas e que, após 24 horas de observação, praticamente não houve mais desenvolvimento de fissuras, o processo de fissuração teve duração de 14 horas. À medida que a umidade do solo diminuiu, ocorreu a contração e propagação de fissuras secundárias em toda a superfície do solo. De modo geral, uma fissura secundária tem origem em uma fissura primária, mostrando o formato “Y” e “X” porém bem menores em relação às misturas anteriores. Houve uma grande redução do CIF em todo o trecho em relação ao solo natural compactado, (Figura 8b). O CIF final do Solo natural compactado é de 24,3% enquanto o CIF do solo reforçado com 2% Fibra é de 6,43%, apresentando uma redução de 73,53%. Nas Figuras 16 e 17, na curva CIF versus Umidade, observa-se aumento linear do CIF com a perda de umidade, a partir de 48,84% até 7,13% de umidade onde o CIF tem uma tendência de estabilização.

No solo não reforçado, as fissuras primárias começam na superfície, quando o limite de resistência à tração do solo é atingido devido à sucção induzida pela secagem e, devido à ausência de qualquer reforço de tração, estendem-se por toda a profundidade, Signes *et al.* (2016). Este comportamento pode ser observado na Figura 9, mostrando um aumento da área fissurada com o aumento da sucção da amostra.

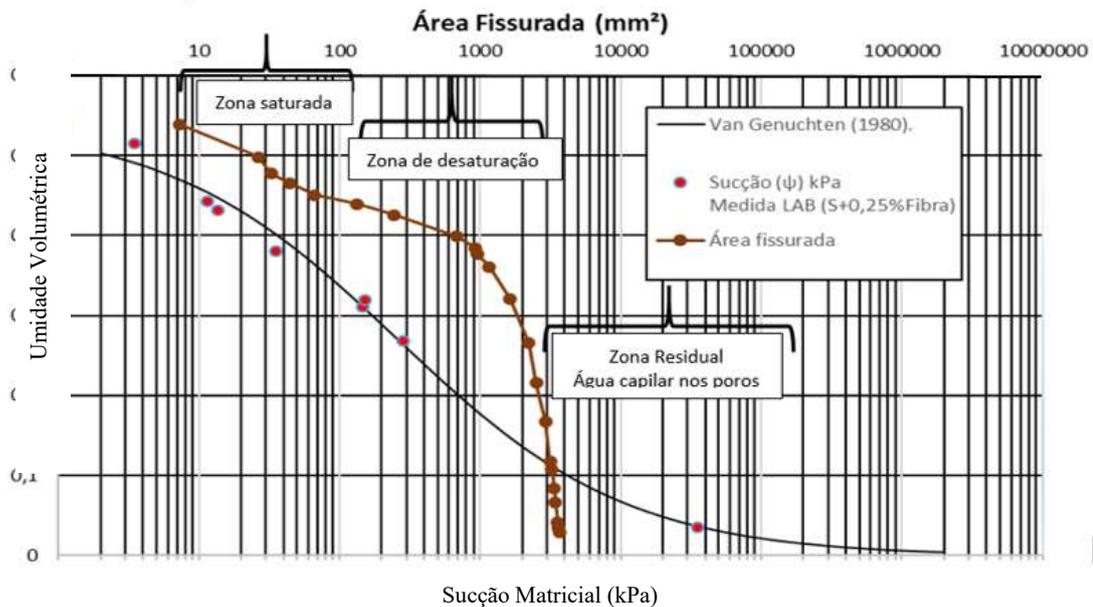


Figura 9 – Interação Fibra de coco e o solo no processo de formação de fissuras
Fonte: Autores (2024).

Analisando as imagens dos ensaios com amostras de solo natural, Solo+0,25% Fibra, Solo+0,5% Fibra, Solo+1% Fibra e Solo+2% Fibra, observa-se que as fissuras seguem um padrão diferente para cada percentual de fibra de coco adicionada ao solo compactado (Figura 10). Há redução significativa da área fissurada do solo argiloso expansivo Paulista/PE com o aumento das fibras de coco verde, que mostram a comparação entre o solo natural e o solo reforçado, Figura 10.

4 Discussões

Foram realizados testes de laboratório para avaliar o potencial de fissuração e o comportamento hidromecânico de um solo expansivo de Paulista, Pernambuco, não reforçado e reforçado com proporções variadas de fibra de coco verde. A densidade real da mistura permaneceu praticamente inalterada. Observação similar foi encontrada por Menezes *et al.* (2019). A adição das fibras de coco ao solo aumenta mais o LL do que o LP, resultados semelhantes foram encontrados por Abbaspour *et al.* (2019) e Mandeep *et al.* (2019), ao analisarem o comportamento de uma argila expansiva da Índia reforçada com fibra de coco.

A condutividade hidráulica permaneceu inalterada e é da ordem de 10^{-10} m/s, tanto no solo natural quanto nas misturas, indicando que o acréscimo do teor de fibra não alterou, de forma significativa, a permeabilidade. Nota-se que a matriz fina do solo envolveu as fibras, não criando caminhos preferenciais de percolação. É importante ressaltar que, embora a fibra de coco seja um material de difícil biodegradação, testes devem ser realizados para avaliar o comportamento da condutividade hidráulica e de outras propriedades ao longo do tempo.

A expansão “livre” e a tensão de expansão diminuem com a adição de fibras de coco verde para valores até 2% de adição. Os valores da tensão de expansão obtidos pelo método a volume constante é elevado (101,70 kPa) para edificações de pequeno e médio porte e para muitas obras de infraestrutura da engenharia geotécnica, podendo causar danos graves, segundo critério de Jimenez Salas (1980). Com a adição das fibras de coco ao solo, há redução do processo de fissuração e os danos estruturais vão reduzindo, passando de Fissuras Importantes (0,25%), Fissuras Pequenas (0,5%) até a possibilidade de não haver danos às estruturas (1% e 2%), segundo o mesmo critério.

A curva tensão versus deformação nos ensaios à compressão simples apresenta comportamento de pico, típico de material friável, sendo registrado um aumento da resistência quando a deformação está em 4,5%, Figura 5. Após essa deformação, ocorre um decréscimo das tensões aplicadas. Para as misturas, verifica-se um comportamento plástico com pequeno amolecimento. Também houve um aumento do módulo de elasticidade com o incremento de fibras até 1% comportamentos similares foram obtidos por Kar, Pradhan e Naik (2014) e Sarah e Hussein (2019).

A resistência à tração no ensaio de compressão diametral aumenta com o acréscimo do teor de fibras, sendo o melhor percentual de 2%, resultando em um aumento de 42% na resistência à tração em relação ao solo natural compactado. Os estudos mostraram que a incorporação de fibras de coco pode reduzir significativamente a ocorrência de fissuras durante o processo de secagem. A Figura 10 mostra que a adição de fibras reduz a espessura das fissuras, retarda o tempo para o aparecimento das fissuras, resistindo a uma maior tensão de tração (Figura 6), havendo uma maior interação solo fibra (Figura 7). O fator de intensidade de fissuras (CIF) diminui com o aumento do teor de fibra, atingindo a maior redução no nível de 2% de fibra (Figura 11).

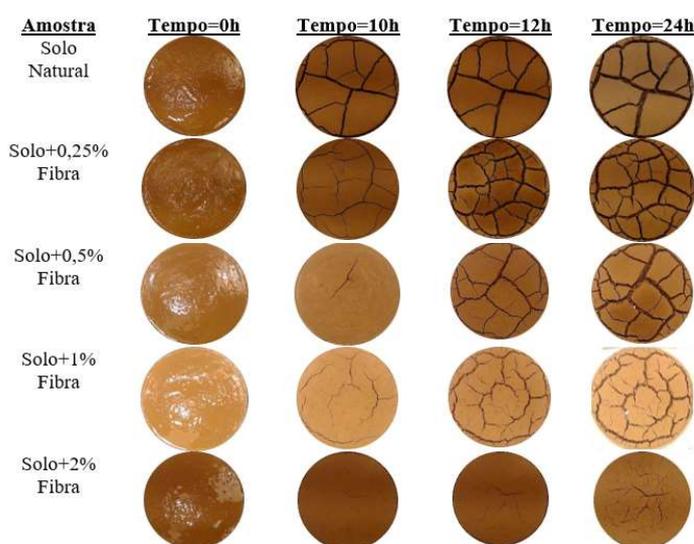


Figura 10 – Comparativo da formação e propagação das fissuras e o tempo no solo e misturas.

Fonte: Autores (2024).

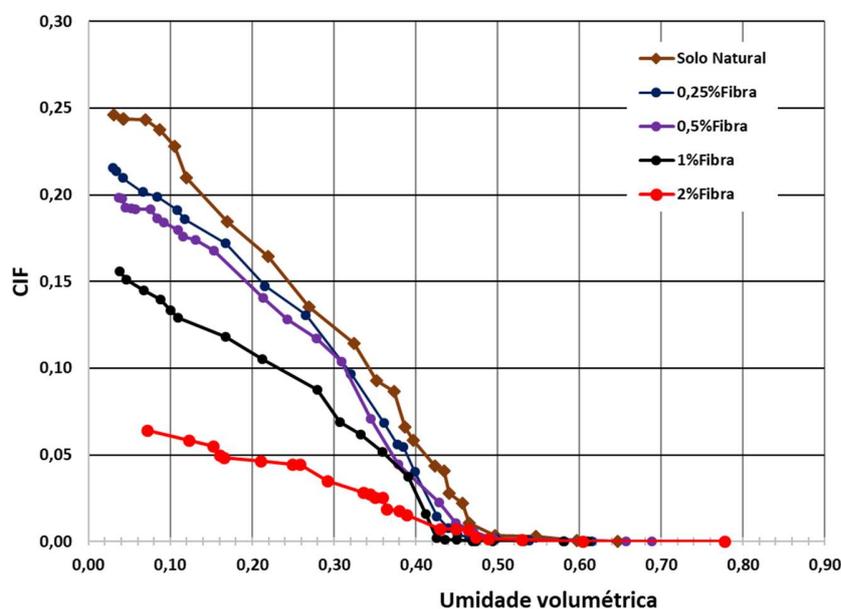


Figura 11 – Evolução do Cif versus Umidade do solo natural e misturas solo+fibras
Fonte: Autores (2024).

5 Conclusões

Está comprovado que a adição de fibra de coco pode reduzir, efetivamente, as áreas fissuradas durante o processo de secagem. O fator de intensidade de fissura (CIF) diminui à medida que o teor de fibra aumenta, levando a uma redução máxima de fissuras na mistura solo-fibras de 2%. Devido à resistência à tração das fibras, elas reduziram as fissuras, mantendo a amostra intacta com o reforço de 2% de fibra. As fibras de coco verde proporcionam a resistência à tração necessária em solos argilosos, superando fissuras de ressecamento, mostrando que o solo reforçado com fibra de coco verde pode ser considerado um método eficiente para resistir a fissuras de ressecamento. De acordo com os resultados mencionados, as fibras de coco verde podem ser efetivamente empregadas como agentes de reforço para melhorar as características geotécnicas de solos expansivos e utilizadas como revestimentos e coberturas impermeáveis em aterros de resíduos sólidos urbanos e seu uso, como técnica de melhoria, pode reduzir passivos ambientais.

De acordo com os resultados acima mencionados, pode-se inferir que as fibras de coco verde podem ser efetivamente utilizadas como agentes de reforço para melhorar as características geotécnicas de solos expansivos e de redução da expansividade do solo. Portanto, pode-se concluir que as fibras de coco verde são agentes de reforço eficazes para melhorar as propriedades geotécnicas de solos expansivos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Pernambuco pela ajuda na oportunidade de realizar experimentos em seu campus e à Comepsa pelo livre acesso a Estação de Tratamento de Esgoto do Janga para coleta das amostras e acompanhamento dos ensaios de campo.

Referências

Abbaspour, M. Narani, S.S, S.M.mir mohammad hosseini, E. Aflaki, F. Moghadas nejad, *Sustainable Reuse of Waste Tire Textile Fibers (WTTFs) as Reinforcement Materials for Expansive Soils: With a Special Focus on Landfill Liners/Covers*, Journal of CleanerProduction(2019),<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119151>.

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 12770: Solo coesivo – *Determinação da resistência à compressão não confinada – método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 21p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 14545: Solo – *Determinação de Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável*. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 16p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 7222: *Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 7p
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6458: *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.10p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6459: *Solo Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b. 5p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 7180: *Solo Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, ABNT, 2016c.. 3p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 7181: *Solo Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016d. 12p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: *Solo Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, ABNT, 2016e. 9p.
- ABNT - NBR 12770: *Solo Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo*. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 6p.
- ASTM American Society for Testing and Materials – ASTM, D5298: *Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper*. Philadelphia, PA1995. 6p.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM D 4546: *Standard test methods for one-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils*. West Conshohocken, USA, 2021. 10p.
- Babu, G. L. S., Vasudevan, A. K. (2008). *Strenght and stiffness response of coir fiber soil mixture*. Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 23, pp. 571-577. 2343823ja
- Chaduvula, U., Viswanadham, B. V. S., Kodikara, J. (2016). *Desiccation cracking behavior of geofiber-reinforced expansive clay*. In: geo-chicago 2016 sustainable geoenvironmental systems, 2016. Proceedings [...]. Virginia, American Society of Civil Engineers, 2016, p. 368-77.
- Costa S, Kodikara J, Shannon B (2013) *Salient factors controlling desiccation cracking of clay in laboratory experiments*. Géotechnique 63: 18–29. <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.105>
- Driscoll, R., Crilly, M., *Subsidence damage to domestic buildings, Lessons learned and questions asked*, London, Building Research Establishment, 2000.
- Faustino, O.W.C, *Análise do comportamento hidromecânico e o processo de formação de fissuras de solo expansivo reforçado com fibras do coco verde*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife/PE, p. 129. 2022.
- Ferreira, S. R. M.; Araújo, A. G. D.; Barbosa, F. A. S.; Silva, T. C. R.; Bezerra, I. M. L. *Analysis of changes in volume and propagation of cracks in expansive soil due to changes in water content*. Revista Brasileira de Ciência do Solo (no prelo). v. 44, Dec. 2020, p. e0190169.
- Gheni, A. A., Alghazali, H. H., ElGawady, M. A., Myers, J. J., Feys, D. (2019). *Durability properties of cleaner cement mortar with by-products of tire recycling*. J. Clean. Prod, Volume 213, pp. 1135–1146. 2343824ja

- Jimenez Salas, J. A. *Cimentaciones en terrenos expansivos o colapsables*. Geotecnia y cimientos, v. 3. 1 ed., Madrid: Editora Rueda, 1980. p. 533-650.
- Kar, R. K.; Pradhan, P. K. Strength and compressibility characteristics of randomly distributed fiber-reinforced soil. *International Journal of Geotechnical Engineering, IJGE*. N 5, p. 235-243. 2011.
- Kar, R. K.; Pradhan, P. K.; Naik, A. *Effect Of Randomly Distributed Coir Fibers on Strength Characteristics of Cohesive Soil*. *Electronic Journal Of Geotechnical Engineering, Ejge* V. 19, P. 1567-1583, 2014.
- Kodicherla, S. P. K., Nandyala, D. K. (2019). *Influence of randomly mixed coir fibres and fly ash on stabilization of clayey subgrade*. *Geo-Engineering*, Volume 10, issue 3. 182154op.
- Mandeep, S. B, Ramanathan, A. *Effect of human hair fiber reinforcement on shrinkage cracking potential of expansive clay*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.<https://doi.org/10.1007/s10064-019-01685-x> /Published online: 13 December 2019 (2020) 79:2159–2168.
- Menezes, L. C. P.; Sousa, D. B.; Fucale, S.; Ferreira, S. R. M. *Analysis of the physical-mechanical behavior of clayey sand soil improved with coir fiber*. *Soils and Rocks*, v. 42, n. 1, Apr. 2019. p. 31-42.
- Misra, A.; Basu, D. *Sustainability in geotechnical engineering*. Internal Geotechnical Report. Connecticut, 2011.
- Narani, S.S, M. Abbaspour, S.M.MIR Mohammad hosseini, E. Aflaki, F. Moghadas N, *Sustainable Reuse of Waste Tire Textile Fibers (WTTFs) as Reinforcement Materials for Expansive Soils: With a Special Focus on Landfill Liners/Covers*, *Journal of Cleaner Production*(2019),<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119151>.
- Nelson, J.D., Miller, D.J., *Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering*, New York, John Wiley & Sons, 1992.
- Ng,C.W.W, Zhan, I.T, Bao, C.G, Fredlund, D.G, Gong, B.W, (2003). *Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration*. *Geotechnique* 53(2):143–157.
- Sarah, H. e Hussein, A. A. Stabilization of Expansive Soils Using Polypropylene Fiber.*Civil Engineering Journal*. 2019
- Shukla, S. K. (2017). *Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering*, Developments in Geotechnical Engineering. Springer Nature, Singapore. 189738b.
- Signes, C. H., Garzon-Roca, J., Fernández, P. M., Torre, M. E. G., Franco, R. I. (2016). *Swelling Potential Reduction of Spanish Argillaceous Marlstone Facies Tap Soil through the Addition of Crumb Rubber Particles from Scrap Tyres*. *Appl. Clay Sci*. Volume 132, pp. 768–773. 2343825ja
- Tang, C.S., et al.. "Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber-reinforced clayey soil." *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 49, no. 9, 2012, p. 1088+. Gale Academic OneFile,.
- Tang, C.S., Zhu C., Leng, T., Shi, Bin, Cheng Q., Zeng,H. *Three-dimensional characterization of desiccation cracking behavior of compacted clayey soil using X-ray computed tomography*. *Engineering Geology* 255 (2019) 1–10.
- Zhang, J., Niu, G., Li, X. et al. *Hydro-mechanical behavior of expansive soils with different dry densities over a wide suction range*. *Acta Geotech*. 15, 265–278 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00874-y>

