

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/624

Estudo da Influência do Envelhecimento e Tratamento de Fibras de Coco no Comportamento Tensão-Deformação de Solo Reforçado

Laíse de Jesus Almeida
Estudante, UFBA, Salvador, Brasil, laisej.almeida@gmail.com

Luana dos Santos Reinaldo
Estudante, UFBA, Salvador, Brasil, luanadsantosr@outlook.com

Sandro Lemos Machado
Professor, UFBA, Salvador, Brasil, smachado@ufba.br

Miriam de Fátima Carvalho Machado
Professora, UFBA, Salvador, Brasil, miriam.machado@ufba.br

RESUMO: Este artigo avalia como as curvas tensão-deformação obtidas de amostras de solo puro e de compósitos fabricados com fibras de coco tratadas e não tratadas foram afetadas pelas intempéries ao longo do tempo. Resultados de ensaios triaxiais consolidado drenado (CD) realizados em compósitos expostos há quase dois anos nas condições ambientais foram avaliados e comparados com dados já publicados por Reis *et al.* (2023) no tempo zero e com 5 meses de exposição, para o mesmo compósito, variando o tratamento das fibras (hornificação, tratamento com NaOH, tratamento acoplado - hornificação + NaOH e fibras sem tratamento). Todas as condições estudadas apresentaram redução significativa de resistência ao fim do período de exposição, significando que o envelhecimento natural reduziu a contribuição das fibras de coco para a resistência ao cisalhamento do compósito, quer sejam em virtude da degradação e/ou perda de interação da matriz reforço.

PALAVRAS-CHAVE: Fibras envelhecidas, Reforço de solos, Degradação de fibras, Ensaio triaxial.

ABSTRACT: This article evaluates how the stress-strain curves obtained from pure soil samples and composites manufactured with treated and untreated coconut fibers were affected by weathering over time. Results of drained consolidated triaxial tests (CD) carried out on composites exposed for almost two years under environmental conditions are evaluated and compared with data already published by Reis *et al.* (2023) at time zero and with five months of exposure for the same composite, varying the treatment of the fibers (hornification, treatment with NaOH, coupled treatment hornification + NaOH and fibers without treatment). All conditions studied showed a significant reduction in strength at the end of the exposure period, meaning that natural aging reduced the contribution of coconut fibers to the strength of the composite, whether due to degradation or loss of interaction with the reinforcement matrix.

KEYWORDS: Aged fibers, Soil reinforcement, Fiber degradation, Triaxial test.

1 INTRODUÇÃO

No caso de inserção de fibras em solo, sintéticas ou naturais, muitos estudos (Casagrande, 2005; Diambra *et al.*, 2010; Bolaños, 2013; Castilho, 2017; Oliveira Jr. *et al.*, 2019; Menezes *et al.*, 2019; Silveira *et al.*, 2021; Conceição *et al.*, 2023) reportam ganho significativo das propriedades mecânicas dos compósitos em relação as do solo, com aumento de resistência de pico, da ductilidade e tenacidade, redução das perdas de resistência pois pico, além de redução na possibilidade de trincamento e propagação de fissuras pré existentes, já que as fibras trabalham resistindo as tensões de tração. Muitos fatores contribuem para

obtenção desta melhoria: a) fatores relacionados à fibra como teor, comprimento, resistência à tração, módulo de elasticidade e orientação; b) relacionados à matriz, como tipo do solo, umidade, densificação, tensão de confinamento e aderência entre fibra e matriz. Contudo, o emprego dessa técnica é acompanhado por obstáculos em aplicações práticas, por exemplo, métodos de mistura, compactação em campo e a degradação natural com o tempo no caso das fibras vegetais.

As fibras naturais (coco, juta, sisal, dentre outras) tem o inconveniente em relação às fibras sintéticas (PET, polipropileno, fibra de vidro) de sofrer alterações dimensionais devido a absorção de água do solo e das mudanças das condições ambientais. De acordo com Ghavami *et al.* (1999), ao absorver água, a fibra natural incha, afastando o solo à sua volta e ao perder umidade, retorna ao seu tamanho inicial, deixando vazios ao seu redor, ainda que de forma microscópica, prejudicando assim a interação matriz reforço, como mostrado esquematicamente na Figura 1.

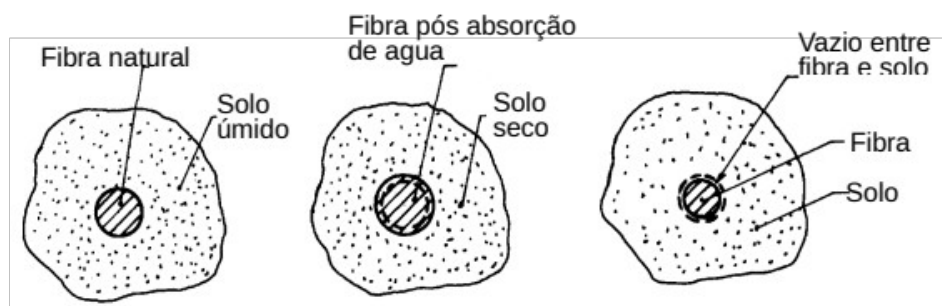


Figura 1. Representação esquemática da perda de interação matriz reforço devido as variações dimensionais da fibra resultantes de ciclos de umedecimento e secagem do solo

Com o passar do tempo e exposição às condições ambientais além da variação de umidade, as fibras estão sujeitas aos ataques de microrganismos presente no solo, causando não apenas redução das propriedades mecânicas da própria fibra, mas também, perda massa Silveira *et al.* (2021) e, conseqüentemente, o envelhecimento natural das fibras vegetais. Esse processo dificulta a utilização das fibras naturais como elemento de reforço, pois reduz sua eficácia e afeta sua durabilidade. As fibras vegetais possuem uma alta capacidade de absorção de água (entre 100% e 200% para a fibra de coco, por exemplo) que, conforme já exposto, é o principal fator contribuinte para sua degradação (Jairaj *et al.* (2018).

Segundo Babu e Vasudevan (2008), as fibras de coco mesmo quando umedecidas retêm grande parte das tensões de tração, com redução de até 20% na retenção quando estão incorporadas em argila por pelo menos 6 meses (Hejazi *et al.*, 2012). Contudo, de acordo com Chauhan *et al.* (2008) as fibras de coco apresentam-se mais resilientes e com maior atrito que as fibras sintéticas. Em comparação com outras fibras naturais, a fibra de coco é a que apresenta o melhor desempenho mecânico a longo prazo, devido ao teor de lignina de 38,0% - 45,84%, que age como uma barreira protetiva contra a degradação própria e de outros componentes celulares (Tomczak, 2010; Mukkulath e Thampi, 2012).

Para amenizar os efeitos advindos da degradação da fibra vegetal com o tempo, quase todos relacionados à absorção de água, alguns tratamentos superficiais são propostos para a fibra, como por exemplo, imersão em soluções alcalinas com hidróxido de cálcio ou hidróxido de sódio (Toledo *et al.*, 2000; Jaraj *et al.*, 2018), aplicação de polímeros (Fidelis, 2014; Jaraj *et al.*, 2018), sílica (Silveira *et al.*, 2022), betume (Ramesh, Krishna e Mamatha, 2010), hornificação (Ferreira *et al.*, 2017), entre outros. A mercerização (nome dado a tratamentos com soluções alcalinas) é um dos processos de modificação de fibras naturais mais utilizados, é um tratamento químico superficial no qual as fibras são imersas em uma solução alcalina que permite a remoção de impurezas e a solubilização de hemicelulose e lignina, possibilitando a cristalização da fibra, aumentando a rugosidade da superfície da fibra e, conseqüentemente, melhorando sua aderência (Freitas, 2022). Além disso, há um aumento da área superficial efetiva, causado pela separação das fibras, afetando positivamente o comportamento mecânico do compósito (Saha *et al.*, 2012). A hornificação é um tipo de tratamento que consiste na aplicação de ciclos de molhagem e secagem alternados nas fibras, controlando o tempo de saturação e secagem, bem como a temperatura de secamento (cerca de 80°C), (Ferreira *et al.*, 2017). Esse tratamento promove a redução na capacidade de absorção de água, melhoraria na interação solo-fibra e, conseqüentemente, na instabilidade volumétrica e nas suas propriedades mecânicas, retardando o envelhecimento.

O desempenho dos tratamentos e durabilidade das fibras a longo prazo podem ser avaliados por métodos comparativos de comportamento antes e depois do envelhecimento natural (exposição dos compósitos às condições ambientais) ou acelerado (ciclagem de umedecimento/secagem em laboratório ou uso de agentes agressivos). Contudo, os efeitos biológicos resultantes da ação de fungos e bactérias nas fibras são difíceis de serem reproduzidos nos métodos acelerados. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é investigar o efeito do envelhecimento natural no comportamento tensão-deformação de solo reforçado com fibra (SRF) de coco com e sem tratamento a longo prazo. Um extenso programa laboratorial para levantar o comportamento mecânico foi executado em compósitos expostos em condições climáticas tropicais. Neste artigo são apresentados resultados de compósitos com 20 meses de exposição, que são analisados conjuntamente com os publicados por Reis *et al.* (2023) para os mesmos compósitos no tempo zero e 5 meses de exposição.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

O solo utilizado no estudo é um solo areno-siltoso proveniente dos Sedimentos Terciários da Formação Barreiras, oriundo do Aterro Sanitário Metropolitano Centro, Salvador. A caracterização geotécnica, realizada por Reis (2022) a partir de 4 amostras ensaiadas, permite classificar o solo, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS, como uma areia-siltosa (SM), apresentando valores médios de 70% de areia, 8% de silte, 22% de argila, massa específica dos grãos (ρ_s) de 2,676 g/cm³, índice de plasticidade (IP) de 4% (WL=21% e WP=17%) e pH igual a 6. Quando compactado na energia do proctor normal (EPN) obteve uma umidade ótima de 11,05% e massa específica seca máxima (ρ_d) de 1,936 g/cm³ para o solo.

As fibras vegetais de coco usadas, conhecidas como fibroso, são provenientes de resíduos das cascas do fruto e foram fornecidas pela empresa Saturno Fibras, localizada em Conde-BA. Apresentam composição gravimétrica com 80 % das fibras com comprimentos (L) entre 1 e 5 cm, 16 % com L < 1 e apenas 4% com L > 5 cm Reis *et al.* (2023), massa específica de 1,492 (g/cm³) e capacidade de absorção de água de 147%.

As fibras passaram por três tipos de tratamento: hornificação com 10 ciclos de molhagem e secagem em estufa por 16 horas à 70°C, a mercerização com solução de 1% de NaOH por 60 minutos e o tratamento duplo que consiste na aplicação em conjunto dos dois citados anteriormente, também foram utilizadas fibras sem tratamento para servir como parâmetro de comparação. Detalhes sobre as técnicas adotadas nos tratamentos pode ser encontrada em Freitas (2022).

O estudo foi realizado em compósitos de solo puro e solo reforçado com 1% de fibra de coco (em relação ao peso seco do solo), nas condições não tratada e com tratamento por hornificação, com solução alcalina de NaOH e com tratamento duplo (hornificação +NaOH) e mantidas nas condições ambientais para envelhecimento por tempos distintos (t=0 ensaiadas logo após moldadas, t=5 meses e t=20 meses). Os corpos de prova usados nos testes foram moldados de amostras compactadas em caixas de madeira com 35x100x35 (largura x comprimento x altura), com teor de umidade de 11,05% e mantendo o índice de vazios de 0,383 em todas as situações (valor obtido para o ponto de máximo da curva de compactação do solo na EPN), 1% de fibra (considerando a fibra como um sólido). As caixas foram expostas às condições ambientais no prédio anexo da Escola Politécnica da UFBA por um período de 20 meses, monitorando a média de precipitações, umidade relativa do ar e temperatura de Salvador durante esse mesmo período. Os resultados obtidos foram comparados com os encontrados por Reis *et al.* (2023) que abrange os períodos de 0 e 5 meses de exposição. A Figura 2 mostra as condições climáticas mensais no período de exposição às intempéries.

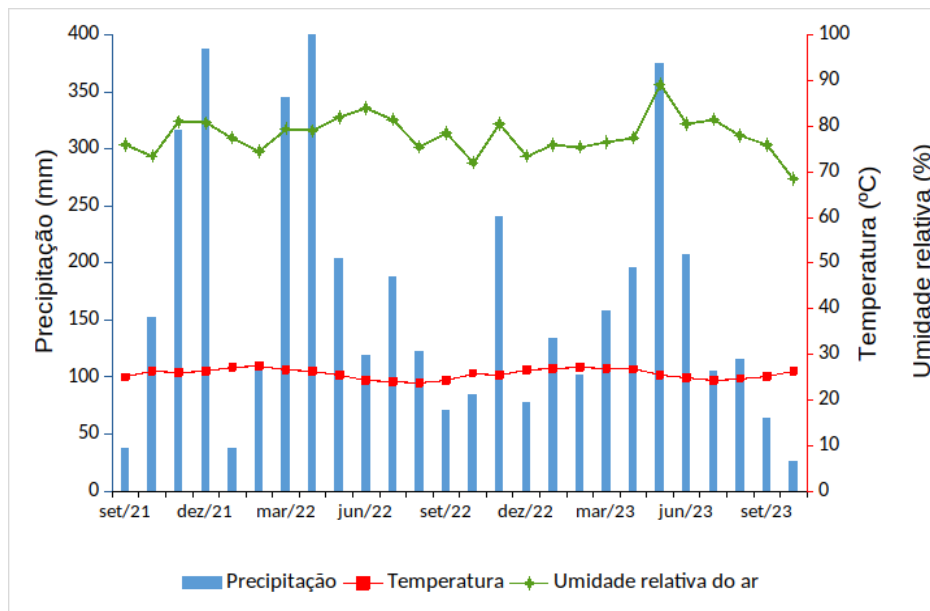


Figura 2. Condições climáticas mensais durante os meses de exposição dos compósitos ao meio ambiente.

2.2 Ensaios triaxiais

Ensaios de compressão triaxial consolidados drenados do tipo CD foram executados em corpos de provas talhados das caixas expostas ao ambiente, com dimensões de 200 mm de altura de 100 mm de diâmetro em diferentes tempos de exposição (0, 5 e 20 meses). Neste trabalho refere-se a parte do estudo para o tempo de 20 meses de exposição, cujos resultados foram analisados conjuntamente com os publicados por Reis *et al.* (2023) para os tempos de 0 e 5 meses. Os dados do solo puro e de compósitos no tempo zero foram considerados como base de comparação para o estudo da eficácia do reforço.

O ensaio consistiu na saturação dos corpos de prova por percolação de água. Para isso, as amostras foram submetidas à uma tensão efetiva de cerca de 20 kPa e o fluxo ascendente. Após a saturação por percolação, foi realizada a saturação por contrapressão, objetivando eliminar as bolhas de ar existente e obter uma adequada saturação da amostra. Foi adotado um parâmetro B (razão entre o excesso poro-pressão gerado e o acréscimo de pressão externa aplicado) acima de 0,90 como adequado para prosseguimento do ensaio para a fase de consolidação.

Tensões confinantes efetivas de 50, 100 e 200 kPa foram usadas. Nessa etapa, notou-se que as variações volumétricas por adensamento cessavam nos primeiros dez minutos de ensaio, assim adotou-se um tempo de adensamento mínimo de 60 minutos. Em seguida, inicia-se a fase de cisalhamento por meio da aplicação da tensão desviadora. De acordo com Head (1994), a velocidade do cisalhamento para ensaios do tipo CD deve levar a um tempo de ruptura de cerca de 8,6 vezes o tempo de consolidação (t_{100}), respeitando o tempo de ruptura mínimo de 120 minutos. Logo, foi determinado o tempo de 120 minutos para o solo concluir a fase de cisalhamento. A taxa de deslocamento utilizada foi de 0,33 mm/min e o critério utilizado para conclusão do ensaio foi o de deformação axial de 20%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 apresenta, para uma mesma tensão confinante, os resultados de tensão desviadora e deformação volumétrica em função da deformação axial para o solo sem reforço ($P_f=0\%$), sem e com envelhecimento e para os compósitos com diferentes tipos de fibras (sem tratamento, hornificada, NaOH, hornificada + NaOH), envelhecidos no tempo de 20 meses. Para as amostras envelhecidas não foi possível realizar repetições de cada ensaio, devido a quantidade limitada de material.

Observa-se que após 20 meses de envelhecimento natural, as amostras reforçadas com fibras sem tratamento e tratadas com NaOH (submetidas a confinantes mais altas) apresentaram tensões desviadoras inferiores à do solo sem reforço. Quanto às deformações volumétricas, de uma forma geral as amostras

foram menos dilatantes com o aumento da confinante, exceto nos compósitos com a fibra tratada com o NaOH e tensão confinante de 200 kPa, onde obteve apenas dilatação. Já nos compósitos formados pelas fibras hornificadas e não tratadas também para a confinante de 200 kPa obteve apenas comportamento de compressão volumétrica.

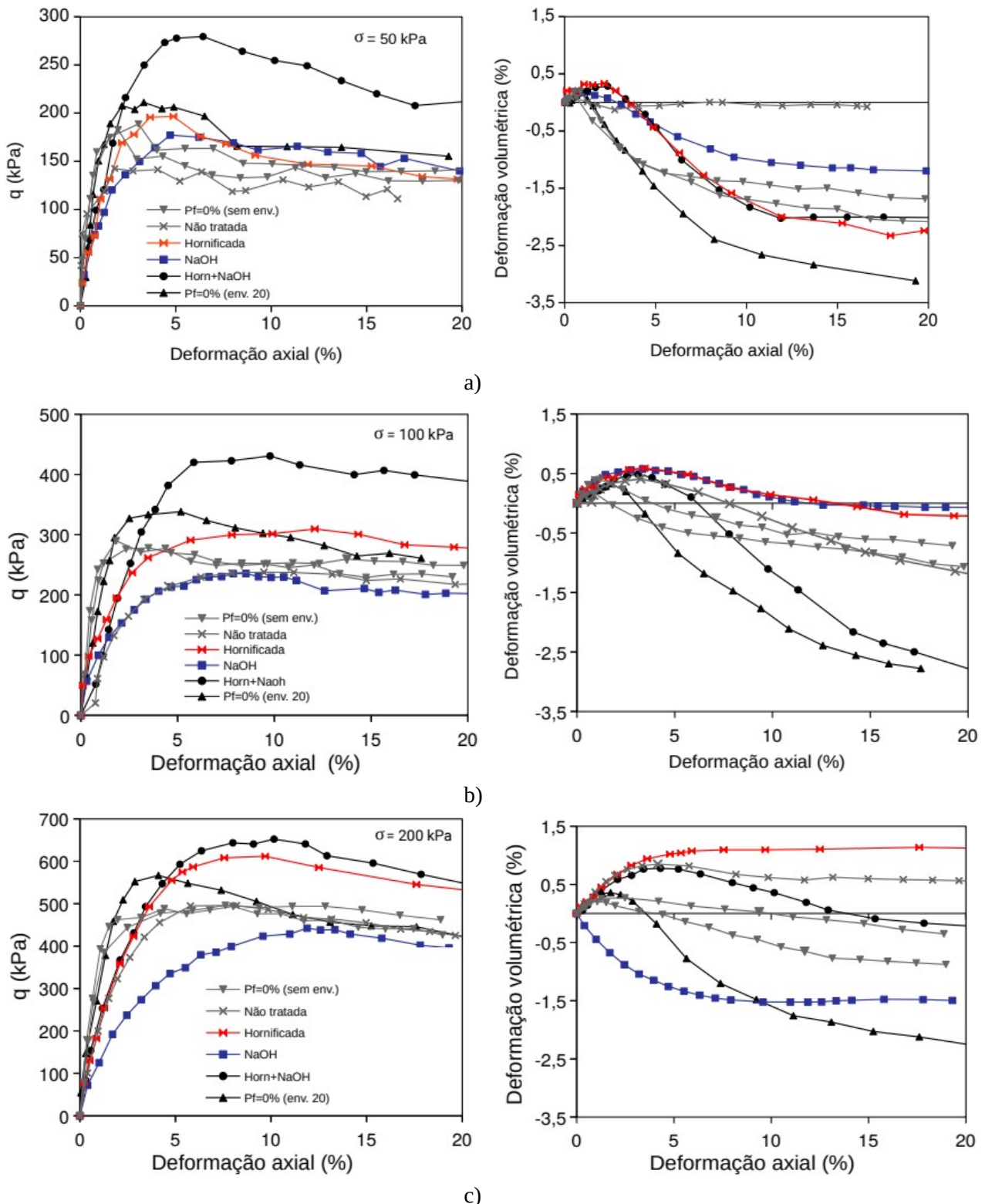


Figura 3. Curvas tensão-deformação de compósitos envelhecidos por 20 meses, bem como solo puro sem e com envelhecimento para diferentes confinantes. a) 50 kPa, b) 100 kPa, c) 200 kPa

Resultados de tensões desviadoras apresentadas nas Tabelas 1 e 2 são usados para analisar o efeito do envelhecimento da fibra na resistência ao cisalhamento do compósito e o efeito do tratamento. Os dados obtidos para 20 meses de exposição são acrescentados aos dados publicados por Reis *et al* (2023) referente às condições de tempo zero (sem envelhecimento) e 5 meses de exposição às intempéries. Nestas tabelas os dados em tom de cinza foram usados como referência para calcular a variação na tensão desviadora, sendo que na Tabela 1 foi usado os dados do solo puro, sem reforço e sem envelhecimento e na Tabela 2 foram usados como referência os dados iniciais ($t = 0$) para cada tipo de compósito (fibras tratadas ou não no tempo zero).

Tabela 1. Valores de tensão desviadora máxima para o solo puro e para os compósitos e variação da tensão desviadora em relação ao solo puro em diferentes tempos de envelhecimento natural.

Tempo exposição (mês)	σ_3 (kPa)	Solo Puro σ_d (kPa)	Tratamento das Fibras							
			Sem tratamento		Hornificada		NaOH		Horn+NaOH	
			σ_d (kPa)	$\Delta\sigma_d$ (%)	σ_d (kPa)	$\Delta\sigma_d$ (%)	σ_d (kPa)	$\Delta\sigma_d$ (%)	σ_d (kPa)	$\Delta\sigma_d$ (%)
0	50	188,8	314,2	66,4	360,8	91,1	289,1	53,1	277,6	47,0
	100	284,0	493,6	73,8	540,7	90,4	457,4	61,1	408,3	43,8
	200	494,9	751,3	51,8	800,4	61,7	703,7	42,2	703,9	42,2
5	50	144,1	275,2	45,8	319,7	69,3	248,5	31,6	216,6	14,7
	100	286,1	436,1	53,6	475,1	67,3	369,3	30,0	309,0	8,8
	200	483,9	726,8	46,9	821,2	65,9	629,8	27,3	505,3	2,1
20	50	211,1	142,6	-24,5	196,5	4,1	177,3	-6,1	279,5	48,0
	100	338,2	237,7	-16,3	309,5	9,0	235,5	-17,1	430,8	51,7
	200	566,8	495,9	0,2	611,9	23,6	442,4	-10,6	652,4	31,8

σ_d : tensão desviadora (σ_1 - σ_3); $\Delta\sigma_d$: variação da tensão desviadora em %

Tabela 2. Valores de tensão desviadora máxima para o solo puro e para os compósitos e variação da tensão desviadora em relação as condições iniciais de cada compósito em diferentes tempos de envelhecimento natural.

Tempo de exposição (mês)	σ_3 (kPa)	Solo Puro σ_d (kPa)	Tratamento das Fibras							
			Sem tratamento		Hornificada		NaOH		Horn+NaOH	
			σ_d (kPa)	$\Delta\sigma_d$ (%)	σ_d (kPa)	$\Delta\sigma_d$ (%)	σ_d (kPa)	$\Delta\sigma_d$ (%)	σ_d (kPa)	$\Delta\sigma_d$ (%)
0	50	188,8	314,2		360,8		289,1		277,6	
	100	284,0	493,6		540,7		457,4		408,3	
	200	494,9	751,3		800,4		703,7		703,9	
5	50	144,1	275,2	-12,4	319,7	-11,4	248,5	-14,0	216,6	-22,0
	100	286,1	436,1	-11,7	475,1	-12,1	369,3	-19,3	309,0	-24,3
	200	483,9	726,8	-3,2	821,2	2,6	629,8	-10,5	505,3	-28,2
20	50	211,1	142,6	-54,6	196,5	-45,5	177,3	-38,7	279,5	0,7
	100	338,2	237,7	-51,8	309,5	-42,8	235,5	-48,5	430,8	5,5
	200	566,8	495,9	-34,0	611,9	-23,6	442,4	-37,1	652,4	-7,3

σ_d : tensão desviadora (σ_1 - σ_3); $\Delta\sigma_d$: variação da tensão desviadora em %

Da Tabela 1, observa-se que, logo após compactação ($t=0$), todos os tratamentos produziram considerável ganho de tensão desviadora (acima de 40%) quando comparado ao solo e, aos 5 meses de exposição, embora tenham sofrido reduções nas tensões desviadoras, elas continuavam com desempenho acima do solo puro. Os compósitos com fibras hornificadas + NaOH foram os que apresentaram menor resistência aos 5 meses de envelhecimento. Aos 20 meses de exposição, observa-se que apenas os compósitos com fibras tratadas com hornificação + NaOH e com fibras hornificada apresentaram desempenho superior ao do solo sem reforço e sem envelhecimento ($t=0$). Contudo, contrariando o esperado, aos 20 meses de exposição, os compósitos com hornificação + NaOH apresentaram tensões desviadoras maiores quando comparadas com as obtidas em 5 meses de exposição. Este resultado pode ser em decorrência destas amostras e, também as de solo envelhecido, terem apresentado mais densas com o

envelhecimento (cerca de 4% mais densa que a condição inicial de moldagem). Ainda não se tem nenhum argumento que possa explicar esta densificação. Os demais compósitos apresentaram massas específicas secas levemente menores aos 20 meses de exposição. Isto pode ser fruto de amostras retiradas mais na borda da caixa de compactação, onde a densificação pode ficar prejudicada, bem como alguma influência da perda de massa pela decomposição da fibra. Os compósitos com fibras sem tratamento e tratadas com NaOH apresentaram grande redução na tensão desviadora de ruptura com o tempo de exposição, sendo que aos 20 meses o ganho de resistência foi completamente anulado. Provavelmente a degradação da fibra devido a exposição às condições tropicais severas (ver Figura 2), como intensa precipitação (acima de 2000 mm por ano), alta umidade relativa (cerca de 80%) e alta temperatura (cerca de 26°C) são fatores importantes neste processo. Além disso, a perda de interação matriz reforço devido as variações dimensionais da fibra resultantes de ciclos de umedecimento e secagem do solo, como exposto por Ghavami *et al.* (1999) na Figura 1 estão sendo consideradas como as principais causas desta redução de resistência.

Da Tabela 2, considerando as condições iniciais ($t=0$) dos compósitos com fibras tratadas como referência, observa-se que a exposição às condições ambientais (envelhecimento natural) para os compósitos com fibras não tratadas, hornificadas e tratadas com NaOH uma redução significativa na resistência ao cisalhamento em relação a mesma condição não envelhecida. Contudo, para o tratamento acoplado, hornificação+NaOH não houve alteração significativa, o que pode ser em virtude das amostras terem se apresentado mais densas, como já apontado anteriormente. Os tratamentos com NaOH e hornificação não foram efetivos pois após a exposição, as fibras já perderam todo o acréscimo de resistência advindo do tratamento. Ensaio de tração e absorção de água nas fibras estão sendo realizados a fim de elucidar os achados. Similarmente, Silveira *et al.* (2022) obteve redução de resistência ao longo do tempo (8 meses de experimento) em compósitos com fibras de sisal sem e com tratamento a base de polímero e de sílica, sendo este último o mais eficiente.

4 CONCLUSÃO

Da comparação de desempenho mecânico obtido de compósitos com fibras com o mesmo tratamento superficial, com e sem exposição às intempéries obteve-se que as fibras não tratadas e para todos os tratamentos uma redução significativa de resistência ao fim do período de exposição, significando que o envelhecimento natural reduziu a contribuição das fibras de coco para a resistência do compósito, quer sejam em virtude da degradação e/ou perda de interação da matriz reforço. Estes efeitos estão sendo avaliados por meio de ensaios de tração nas fibras e absorção de água pelas fibras.

Quando o desempenho dos compósitos envelhecidos é comparado com os do solo puro sem envelhecimento, excluindo os dados obtidos para o tratamento acoplado com hornificação + NaOH que foram considerados anômalos, todas as outras situações estudadas mostram que os benefícios de reforço foram reduzidos com exposição às intempéries por 20 meses, aproximando do solo sem reforço.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelas bolsas de pesquisa concedidas e a Saturno Fibras pelas fibras cedidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Babu, G. L. S.; Vasudevan, A. K. (2008). Strength and stiffness response of coir fiber-reinforced tropical soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 20, n. 9, p. 571–577. ISSN 08991561. 3, 4
- Bolaños, R. E. Z. (2013) Comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com fibra de coco. Dissertação de Mestrado, Prog. de Pós-Graduação em Eng. Civil, Dep. de Eng. Civil da PUC/Rio, 143 p.
- Casagrande, M. D. T. (2005). *Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 219 p.
- Castilho, T. (2017). Resistência ao Cisalhamento de Solos com Fibras de Politereftalato de Etileno Reciclado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Unesp, 82 p.

- Conceição, M. P. S; Pinto, C. M. T; Carvalho, M. F.; Machado, S. L. (2023). Fiber reinforcement effectiveness in two different sand specimens. *Soils and Rocks*, v. 46, p. e2023012422.
- Diambra, A., Ibraim E, Muir Wood D and Russell AR, (2010). Fibre reinforced sands: experiments and modelling. *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (3), 238–250.
- Ferreira, S. R; Silva, F. A; Lima, P. R. L; Toledo Filho, R. D. (2017). Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. *Construction and Building Materials*, v. 139, p. 551–561.
- Fidelis, M. E. A. (2014). *Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta*. Tese (Doutorado) — UFRJ/COPPE, 266 p.
- Freitas, T. M. (2022). *Comportamento Mecânico a Longo Prazo De Um Solo Reforçado Com Fibras De Coco*. Dissertação de Mestrado. Prog. de Pós-Graduação em Eng. Civil, Escola Politécnica/UFBA, 95 p.
- Ghavami, K.; Toledo, R. D.; Barbosa, N. P. (1999). Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites*, v. 21, n. 1, p. 39–48. ISSN 09589465.
- Head KH. (1994). *Manual of Soil Laboratory Testing*. Vol. 2. Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Hejazi, S. M; Sheikhzadeh. M; Abtahi, S. M; Zadhoush, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fiber. *Construction and Building Mat.*, v.30, p.100–116. Pub: Elsevier Ltd.
- Jairaj, C., M. T. Prathap Kumar, and M. E. Raghunandan. 2018. Compaction characteristics and strength of BC soil reinforced with untreated and treated coir fibers. *Innovative Infrastruct. Solutions* 3(1): 1–11. <https://doi.org/10.1007/s41062-017-0123-2>.
- 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*, São Paulo, 42(1): 31-42.
- Mukulath, G.; Thampi, S. G. (2012) Biodegradation of Coir Geotextiles Attached Media in Aerobic Biological Wastewater Treatment. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, v. 3, n. 11.
- Oliveira Jr, 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.
- Ramesh, H.; Manoj, K.; Mamatha, H. (2010). *Effect of Lime-Coir Fiber on Geotechnical Properties of Black Cotton Soil*. Indian Geotechnical Conference-, v. 1, n. 1, p. 485–490,
- Reis, A. F. d. S. M. (2022). *Análise do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibra de coco*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil, Escola Politécnica /UFBA, 111 p.
- 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.
- Saha, P; Roy, D; Manna, S; Adhikari, B; Sen, R; Roy, S. (2012). Durability of transesterified jute geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, v.35, p.69–75.
- Silveira, M. V., and M. D. T. Casagrande. (2021). Effects of degradation of vegetal fibers on the mechanical behavior of reinforced sand. *Geotech. Geol. Eng.* 39 (5): 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), DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004237.
- Tolêdo Filho RD, Scrivener K, England GL, Ghavami K. Durability of alkalisensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement & Concrete Composite* 2000;22:127–43.
- Tomczak, F. (2010). *Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 135 p.