

Análise Comparativa da Resistência ao Cisalhamento de Areia e de Solo Areno-siltoso Reforçados com Fibras Naturais e Sintéticas

Vital Matos Batista

Mestrando, PPEC-UFBA, Salvador-BA, Brasil, vitalmatosbatista@gmail.com

Italo Santos Silva

Mestrando, PPEC-UFBA, Salvador-BA, Brasil, italosantossilva5@gmail.com

Sandro Lemos Machado

Professor, UFBA, Salvador-BA, Brasil, sandrolemosmachado@gmail.com

Miriam de Fátima Carvalho

Professora, UFBA, Salvador-BA, Brasil, mfcmachado@gmail.com

RESUMO: O comportamento mecânico de solo reforçado depende das características individuais do solo e da fibra, além da interação entre eles. Neste contexto este artigo apresenta um estudo comparativo do ganho de resistência obtido para dois solos (SP e SM) com dois tipos de fibras (coco e polipropileno), no teor de 1% em relação a massa do solo seco. Resultados de ensaios triaxiais consolidados drenados (CD) executados para a areia com fibra de coco e solo areno-siltoso com fibra de polipropileno são apresentados e analisados conjuntamente com dados já publicados por Pinto (2021) e Reis (2022) para estes materiais. O tipo de fibra (coco ou polipropileno) não alterou o comportamento tensão-deformação nos compósitos de areia, porém para o solo areno-siltoso com fibras de polipropileno, as curvas tensão-deformação apresentaram leve endurecimento por deformação. A adição de fibras melhorou a resistência ao cisalhamento em ambos os solos, sendo que os melhores resultados ocorreram em compósitos reforçados com fibras de polipropileno. O comportamento de deformação volumétrica não foi alterado, e as amostras apresentaram, de forma geral, compressão seguida de dilatação.

PALAVRAS-CHAVE: Compósito, Solo reforçado, ensaios triaxiais, fibras.

ABSTRACT: The mechanical behavior of reinforced soil depends on the soil and fiber's individual characteristics, and the interaction between them. In this context, this paper presents a comparative study of the resistance gain obtained for two soils (SP and SM) with two types of fibers (coir and polypropylene) at a content of 1% (dry mass). Results of drained consolidated triaxial tests (CD) performed for sand with coir fiber and silty sandy soil with polypropylene fiber are presented and analyzed together with data already published by Pinto (2021) and Reis (2022) for these materials. The type of fiber (coir or polypropylene) did not change the stress-strain behavior in the sand composites; however, for the sandy-silty soil with polypropylene fibers, the stress-strain curves showed slight strain hardening. The addition of fibers improved the shear resistance in both soils, with the best results occurring in composites reinforced with polypropylene fibers. The volumetric deformation behavior was not changed, and the samples generally showed compression followed by expansion.

KEYWORDS: Composite, Reinforced soil, triaxial test, fibers.

1 INTRODUÇÃO

A execução de obras de terra é um campo da engenharia civil que exige conhecimentos dos engenheiros sobre o solo e seu comportamento mecânico. Nestes casos, a realização bem-sucedida destas obras só será possível se os materiais utilizados possuírem propriedades e características hidromecânicas

adequadas, as quais devem ser determinadas previamente em laboratório. Em algumas situações os solos não possuem os comportamentos necessários na execução destas obras. Assim, a substituição do solo local por provenientes de outras jazidas pode inviabilizar a obra. Desse modo, o uso de processos para estabilização é uma opção aplicável e muitas vezes viável para a solução destas situações.

Os processos de estabilização dos solos podem se dar por meio mecânico - como a compactação, que propicia o aumento da resistência por meio da redução do índice de vazios -, químico - que causa a melhoria das propriedades dos solos por meio da adição de componentes como cimento e cal - e físicos - por meio de inclusões nos solos, que podem ser isoladas como grampos, direcionadas como geossintéticos e imersas na matriz como as fibras, combinando dois ou mais materiais. Esta última gera o compósito fibroso ou solo reforçado com fibra (SRF), que é constituído da combinação de uma matriz de enchimento, neste caso o solo e um material de reforço, as fibras, juntos formarão um compósito com propriedades distintas dos materiais iniciais, promovendo a melhora das propriedades mecânicas do solo, como aumento da sua resistência de pico, redução da queda pós pico e prevenção na propagação de trincas e fissuras.

O uso de fibras como material de reforço dos solos é uma alternativa atraente para atender as características geotécnicas necessárias à execução de obras de terra, empregando o solo local. As fibras podem ser sintéticas ou vegetais. Dentre as fibras sintéticas, as de polipropileno se destacam e são bastante utilizadas em diversas pesquisas para solos reforçados, pois os compósitos formados com o uso destas fibras costumam apresentar alta resistência de pico e pós-pico quando submetidos a ensaios de cisalhamento. Entre as fibras vegetais, as de coco são bastante promissoras, uma vez que possuem alta concentração de lignina, a qual retarda o processo de degradação, sendo de ótima aplicação em reforços de obras provisórias, (SUBAIDA, CHANDRAKARAN, SANKAR, 2009). As fibras vegetais têm o inconveniente de absorverem água do solo, sofrerem variações dimensionais, inchamento/retração, reduzindo a interação solo-fibra (GHAVAMI et al., 1999), além de estarem sujeitas aos ataques de microrganismos do solo. Diversos estudos realizados nas últimas décadas contribuem para entender o mecanismo de reforço das fibras em solos (CASAGRANDE, 2005; DIAMBRA et al., 2010; SILVEIRA et al., 2021; CONCEIÇÃO et al., 2023; REIS et al., 2023).

Os compósitos provenientes da adição de fibras ao solo têm seu comportamento regido pela interação entre suas duas fases constituintes. A falta de adesão entre a matriz e o reforço, na zona onde efetivamente ocorre o contato entre os elementos do compósito, ou seja, a interface solo-fibra, é um dos principais fatores que influenciam na falha no comportamento mecânico desses materiais. Em solos arenosos, o mecanismo de adesão é controlado pelo atrito entre a matriz e o reforço, que por sua vez sofre influência das características da fibra e de sua superfície, propriedades e textura do solo utilizado. Já em solos argilosos, além da parcela do atrito, existe também uma parcela devido à coesão, uma vez que muitas partículas de solo se fixam à superfície da fibra o que contribui para a resistência da interface (MCGOWN; ANDRAWES; AL-HASANI, 1978; IOZZI et al., 2010; WANG et al., 2018).

Gray e Ohashi (1983) realizaram uma série de ensaios de cisalhamento direto em areias fofas e densas reforçadas com fibras naturais, sintéticas e fios metálicos. A partir de seus estudos foi possível criar um modelo teórico de reforço, com análise simples do equilíbrio de forças, para as fibras em areia. Primeiro toma-se uma longa fibra elástica que se estende por um comprimento igual em ambos os lados do plano de cisalhamento potencial em uma areia, de tal modo que as fibras possam ser orientadas perpendicularmente ao plano de cisalhamento ou em um ângulo qualquer, i , conforme apresentado na Figura 1. O cisalhamento provoca a distorção da fibra, mobilizando assim a sua resistência à tração, que por sua vez pode ser decomposta em componentes normais e tangenciais.

A componente normal tem o papel de aumentar a tensão de confinamento no plano de ruptura, contribuindo para a mobilização da resistência ao cisalhamento da matriz, enquanto a componente tangencial resiste diretamente ao cisalhamento. A fibra é fina a ponto de ser desconsiderada ou pouco considerada na resistência ao deslocamento causada pela sua rigidez à flexão. A presença abundante de fibras exige o cálculo da área de seção transversal das mesmas, e a razão de área das fibras pela área total da seção transversal é dada por A_R/A .

A tração desenvolvida na fibra ao longo do plano cisalhante é condicionada por muitos parâmetros e variáveis. O tipo e comprimento da fibra é um deles, de modo que a fibra deve ter um comprimento longo o suficiente para evitar o seu arrancamento do solo e deve ser capaz de curvar em torno dos grãos de solo. A tensão confinante é outra variável que deve ser levada em consideração, e esta deve ser suficiente para evitar

o arrancamento das fibras pelos esforços cisalhantes desenvolvidos na interface entre as partículas sólidas e as fibras.

Algumas variáveis das fibras como o índice de aspecto (dado pela razão entre comprimento e diâmetro), a rigidez, a porcentagem de fibras na matriz, a variação do comprimento, a interação da interface dos grãos do solo com a fibra e a orientação das fibras em relação ao plano de ruptura, afetam significativamente o comportamento mecânico dos solos reforçados com fibras (MICHALOWSSKI; CERMÁK, 2003; CONSOLI; CASAGRANDE; COOP, 2005; CONCEIÇÃO et al., 2023). O carregamento é um outro fator que afeta a interação solo/fibra, quando as fibras estão posicionadas no sentido perpendicular à direção do carregamento elas trabalham sob tração e contribuem consideravelmente para a resistência do compósito, contudo quando submetidas à compressão não podem contribuir adequadamente para a resistência (DIAMBRA et al., 2007, IBRAIM et al., 2012, DIAMBRA et al., 2010; GAO & ZHAO, 2013; MICHALOWSKI & CERMAK, 2002).

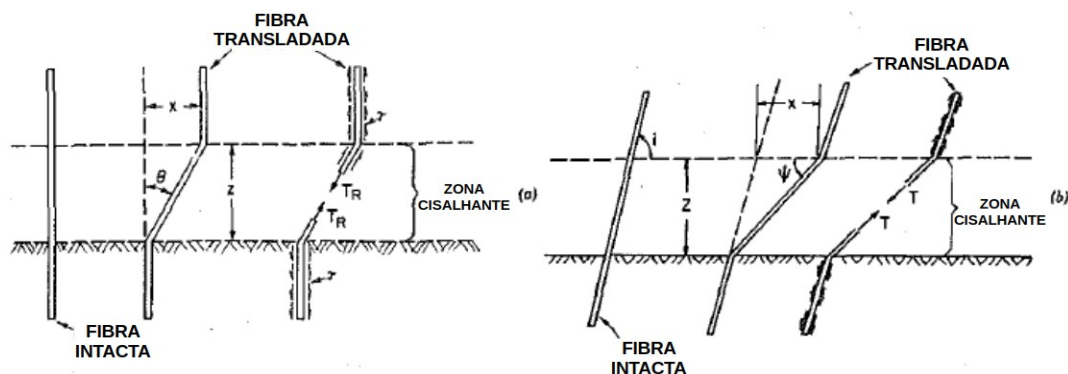


Figura 1. Modelo de reforço de fibra: (a) Orientação perpendicular à superfície de cisalhamento; (b) Fibra orientada em ângulo i à superfície de cisalhamento. Adaptado de GRAY E OHASHI (1983).

Neste contexto este artigo apresenta um estudo comparativo do efeito da adição de reforços, fibras de coco e polipropileno, no teor de 1%, para dois tipos de solos (areia aluvionar e solo areno-siltoso), objetivando avaliar a influência do tipo de fibra no comportamento tensão-deformação do compósito.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os solos estudados são encontrados no estado da Bahia, os quais possuem distribuição granulométrica distintas e serão referidos como areia de rio e solo barreiras. A areia de rio, obtida na região de Maragogipe-BA e o solo areno-siltoso, proveniente dos Sedimentos Terciários da Formação Barreiras obtido no Aterro Metropolitano Centro, Salvador-BA, foram caracterizados geotecnicamente segundo as normas brasileiras (NBR 6458-2016, NBR 7181-2016, NBR 12004-1990, NBR 12051-1991, NBR 7182-2016) por Pinto (2021) e Reis (2022), respectivamente, conforme consta na Tabela 1. Estes resultados são valores médios obtidos a partir de 4 amostras ensaiadas. A areia de rio tem 10% de pedregulho fino, 62% de areia grossa e 28% de areia fina e grãos com forma subangular e foi classificada segundo o Sistema Unificado de classificação de solos – SUCS, como SP (areias mal graduadas e muito uniforme). Já o solo Barreiras segundo a SUCS foi classificado como uma areia-siltosa (SM), apresentando valores médios de 70% de areia, 8% de silte, e 22% de argila e índice de plasticidade de 4%.

Duas fibras foram usadas na produção dos compósitos, uma natural, de coco (obtida na Saturno fibras-Conde-BA) e a outra sintética, de polipropileno (Empresa Viapol). A fibra de polipropileno, constituída de um copolímero 100% virgem, composta por monômeros de etileno e propileno, é considerada inerte e por ser industrializada apresenta dimensões regulares, com comprimento de 51 mm e diâmetro médio de 0,51 mm, massa específica de 0,91 g/cm³, módulo de elasticidade de 5 GPa e resistência a tração média de 500 MPa (parâmetros indicados pelo fabricante). Já a fibra de coco tem dimensões variadas, apresentando em sua maior parte (cerca de 85%) comprimento entre 1 e 5 cm, aproximadamente 13% com comprimentos inferiores a 1 cm e apenas 1% com comprimento superior a 5 cm, massa específica de 1,492 g/cm³, resistência a tração média de 75 MPa e absorção de água de 147%, segundo ensaios realizados por Reis

(2022). As fibras vegetais quando expostas ao ambiente absorvem água, na maioria das vezes sofrem variações dimensionais e processos de degradação com o tempo. Dentre as fibras naturais, a de coco são as mais resistentes por apresentarem em sua composição teor de lignina variando de 20 a 40%.

Tabela 1. Caracterização geotécnica dos solos.

Parâmetros	Areia de rio	Parâmetros	Solo Barreiras
Forma das partículas	Subangular	Areia Grossa (%)	6
ρ_s (g/cm ³)	2,650	Areia Média (%)	34
e_{max}	0,790	Areia Fina (%)	30
e_{min}	0,520	Silte (%)	8
$e_{DR=60\%}$	0,628	Argila (%)	23
ρ_d (g/cm ³)	1,628	ρ_s (g/cm ³)	2,676
C_c	0,84	Limite de liquidez (%)	21
C_u	2,24	Limite de plasticidade (%)	17
d_{10} (mm)	0,43	Índice de plasticidade (%)	4
d_{30} (mm)	0,59	Atividade de Skempton	0,156
d_{50} (mm)	0,83	Umidade ótima (%)	11,05
d_{60} (mm)	0,96	ρ_{dmax} (g/cm ³)	1,936

Fonte: Pinto (2021) e Reis (2022).

Os compósitos de solo-fibra foram compactados no mesmo índice de vazios do solo sem reforço, considerado como amostra controle. Quando a matriz empregada foi a areia de rio, incorporou cerca de 3% de água para facilitar a aderência entre as fibras e a areia. O material foi acomodado em quatro camadas, num cilindro bipartido de dimensões nominais de 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento, buscando obter o índice de vazios de 0,623, valor que correspondente a uma densidade relativa (D_r) de 60% para a areia. A fibra foi considerada como parte dos sólidos e calculou-se a massa específica dos sólidos ponderada para obter 1% de fibra nos compósitos e as massas em cada camada. E quando a matriz foi o solo areno-siltoso, os compósitos foram compactados no mesmo índice de vazios obtido para o ponto de umidade ótima e massa específica seca máxima determinado para o solo no ensaio de compactação na Energia Proctor Normal (EPN). A fibra também foi considerada como parte dos sólidos e calculada a massa necessária para atender a condição de mesmo índice de vazios (0,382). Os compósitos com fibra de polipropileno foram compactados em 10 camadas, já que em ensaios preliminares observou a ocorrência de limitação da superfície de ruptura apenas na última camada quando se usava 4 camadas compactadas. Todos os compósitos foram fabricados com 1% de fibra (em relação a massa seca do solo).

Os compósitos de ambos os solos foram submetidos a ensaios de compressão triaxial do tipo CD em três confinantes (50, 100 e 200 kPa) e em duplicata, sendo considerado válido dois resultados similares. Os CPs foram saturados por fluxo e foi realizada a medida do coeficiente de permeabilidade, parâmetro adotado como o indicador de qualidade do processo de moldagem, devido a ser um parâmetro muito sensível às variações no índice de vazios. Atendendo o quesito de permeabilidade, as amostras eram saturadas por contrapressão até atingir um parâmetro B de Skempton acima de 0,90 e então eram confinadas com a pressão de interesse. Os procedimentos gerais adotados na preparação e execução dos ensaios triaxiais seguiram os princípios descritos por Head e Epps (2014).

A velocidade de ruptura foi de 0,67 mm/mim para os compósitos areia + fibra e de 0,33 mm/min para o areno siltoso + fibra até atingirem deformação axial de 20%.

3 RESULTADOS

As Figuras 2 e 3 apresentam para cada tensão confinante de ensaio (50, 100 e 200 kPa), curvas de tensão desviadora e de variação volumétrica *versus* deformação axial obtidas para compósitos de areia de rio e areno-siltoso, respectivamente, reforçados com 1% de fibras de coco e polimérica. Nestas figuras, para cada situação, também estão apresentados, para efeito de comparação, os resultados obtidos por Pinto (2021)

para mesma areia sem reforço e para compósitos com 1% de fibras de polipropileno e, no caso do solo areno-siltoso, dados publicados de Reis (2022) para solo sem reforço e compósitos com 1% de fibra de coco.

Para os compósitos fabricados com areia (Figura 2), as curvas de tensão versus deformação apresentam comportamento de pico pouco expressivo e, como esperado, quanto maiores as tensões confinantes maiores são as resistências apresentadas sejam qual for a combinação analisada. No caso de compósitos fabricados com solo areno-siltoso (Figura 3), as curvas tensão-deformação obtidas para o solo puro e solo com fibras de coco não apresentam pico para a tensão confinante de 200 kPa e apresentam um leve pico para as menores confinantes (50 kPa e 100 kPa). Esse comportamento está associado à tensão aplicada pelo processo de compactação que leva as amostras ensaiadas nas confinantes mais baixas a terem um desempenho similar a solos pré-adensados. No caso de compósitos preparados com o solo barreiras e fibras de polipropileno, até as deformações medidas, as curvas tensão-deformação exibiram um comportamento de leve endurecimento, assim, o ponto de ruptura foi admitido como o último ponto medido. O tipo de fibra (coco ou polipropileno) não alterou o comportamento tensão-deformação nos compósitos de areia. No entanto, para os compósitos com solo barreiras + fibras de polipropileno, o comportamento tensão-deformação passou a indicar um leve endurecimento por deformação.

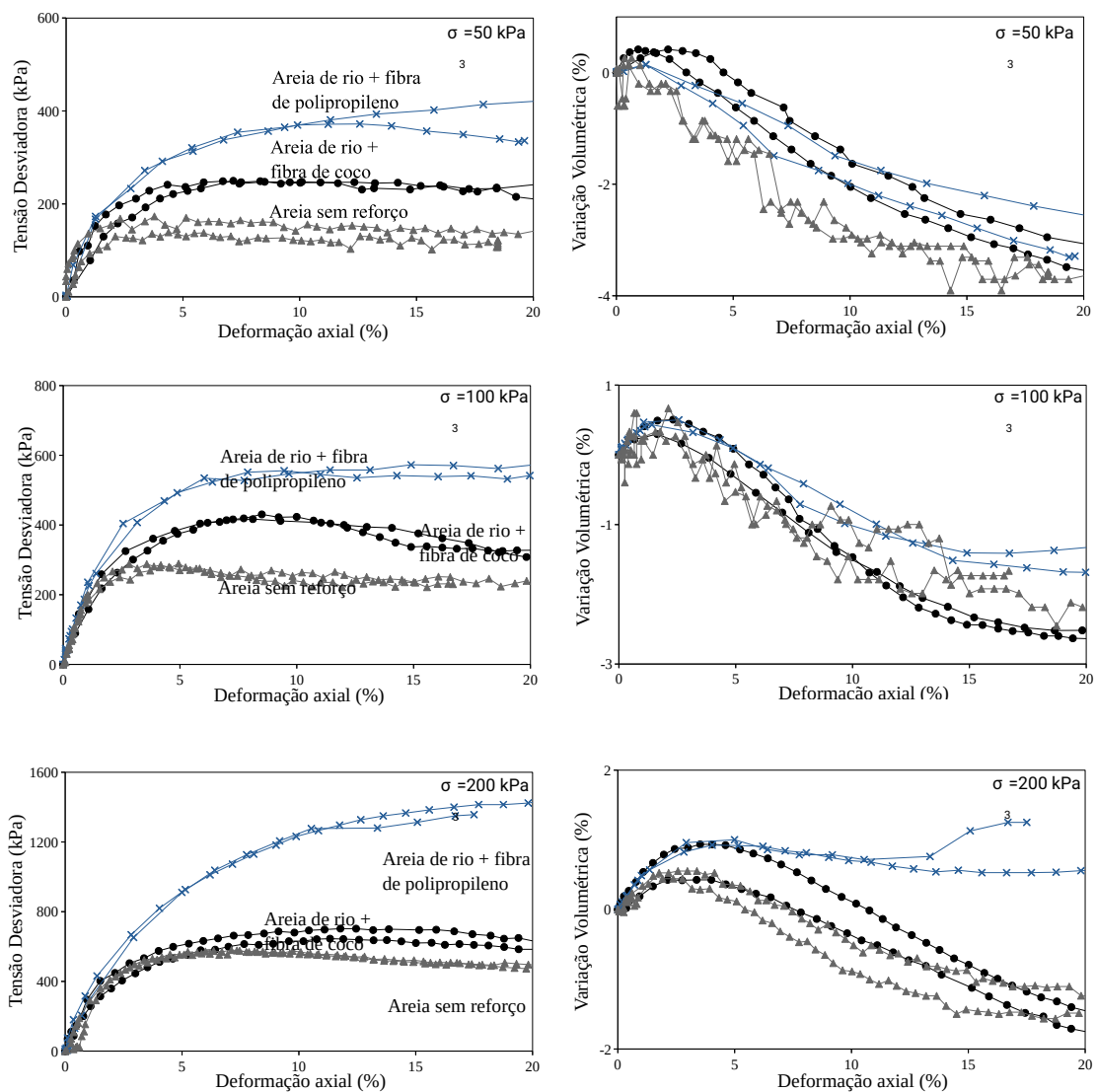


Figura 2. Curvas tensão desviadora e variação de volume versus deformação axial para areia de rio com e sem reforço, nas tensões confinantes (σ_3) de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa.

A adição de fibras melhorou a resistência ao cisalhamento em ambos os solos, sendo que os melhores resultados ocorreram em compósitos reforçados com fibras de polipropileno. Nos compósitos de solo barreiras + polipropileno, a tensão desviadora de ruptura aumentou aproximadamente 5 vezes em relação à do solo puro. Já nos compósitos de areia+ polipropileno o aumento foi superior a 2 vezes.

No que se refere às curvas de deformação volumétrica *versus* deformação axial, os compósitos mostram uma redução do volume inicial seguida de expansão da amostra, sendo que as maiores expansões foram obtidas para as menores tensões confinantes. No caso dos compósitos de areia de rio reforçados com fibras de polipropileno na tensão confinante de 200 kPa, não ocorreu expansão da amostra e isso pode ser explicado pelo fato do ganho de rigidez dessas amostras com a adição das fibras, fazendo com que o compósito tenda a se comportar como um solo normalmente adensado.

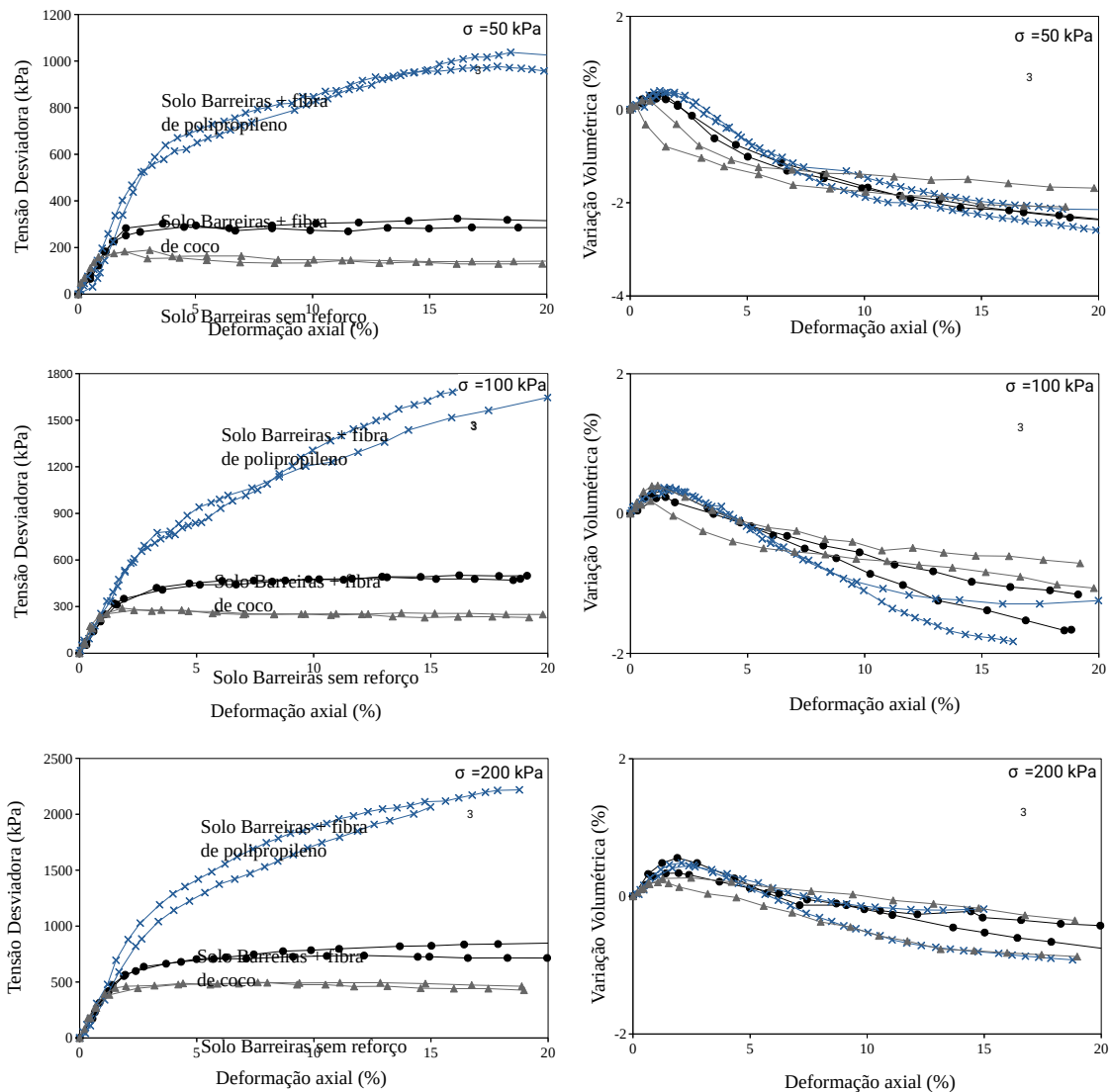


Figura 3. Curvas tensão desviadora e variação de volume *versus* deformação axial para solo areno-siltoso com e sem reforço, nas tensões confinantes (σ_3) de 50 kPa; 100 kPa e 200 kPa.

Na Figura 4 são apresentados os módulos de deformabilidade inicial para os diferentes compósitos, calculados considerando uma deformação em torno de 1%, dado pela inclinação inicial das curvas tensão-deformação. Como esperado em todos os casos estudados, o módulo de deformabilidade aumenta com o confinamento da amostra. Para a areia pura variou de 12 a 25 MPa para as confinantes de 50 a 200 kPa e para o solo barreiras de 15 a 36 MPa nas mesmas confinantes.

Os compósitos preparados com o solo barreiras, com ambas as fibras, apresentaram pequena variação no valor de módulo de deformabilidade em relação ao do solo puro para a confinante de 100 kPa, nas demais não houve alteração. Assim, a adição das fibras não proporcionou mudanças significativas na deformabilidade inicial, sendo a tensão confinante o principal fator de alteração desse parâmetro. Já no caso da areia, o módulo de deformabilidade aumentou com a inserção das fibras, sendo que no caso do reforço com fibras de polipropileno o aumento foi maior que em fibras de coco. Com o aumento da tensão confinante, eleva se também o atrito entre as fibras e as partículas de areia e isto provoca aumento do módulo de deformabilidade dos compósitos.

Na literatura não há consenso sobre a influência do reforço de fibras no módulo de deformabilidade do compósito, alguns autores, como Sivakumar e Vasudevan (2008) e Zhao *et al.*, (2020), apontam que o módulo inicial aumenta com o reforço e Falorca *et al.*, (2011) apontam a redução. Esta diferença pode ser atribuída aos materiais ensaiados e/ou as condições de ensaio.

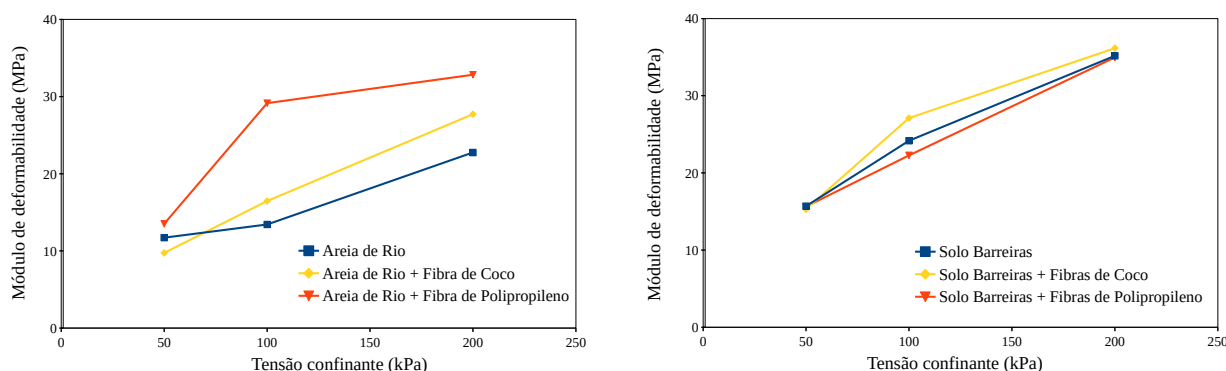


Figura 4. Módulo de deformabilidade inicial *versus* tensão confinante para areia de rio e o solo barreiras.

4 CONCLUSÕES

Este artigo apresenta um estudo comparativo do comportamento mecânico obtido para dois solos (SP e SM) reforçados com dois tipos de fibras (coco e polipropileno), no teor de 1% em relação a massa do solo seco. Resultados de ensaios triaxiais consolidados drenados (CD) executados para a areia com fibra de coco e solo areno siltoso com fibra de polipropileno são apresentados e analisados conjuntamente com dados já publicados por Pinto (2021) e Reis (2022) para estes materiais.

A adição de fibras melhorou a resistência ao cisalhamento em ambos os solos, sendo que os melhores resultados ocorreram em compósitos reforçados com fibras de polipropileno. Nos compósitos de solo barreiras + polipropileno, a tensão desviadora de ruptura aumentou aproximadamente 5 vezes em relação à do solo puro. Já nos compósitos de areia de rio + polipropileno o aumento foi superior a 2 vezes. O formato da curva tensão-deformação não apresentou modificação nos compósitos de areia para ambas as fibras. Para o caso do solo areno siltoso + fibra de polipropileno, a curva tensão-deformação passou a apresentar um leve endurecimento por deformação. Não houve mudança nos comportamentos de deformação volumétrica dos compósitos, marcado por pequena compressão seguida de expansão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão de bolsas de mestrado, ao PPEC/UFBA – Prog. de Pós Grad. em Eng. Civil e GEOAMB - Laboratório de Engenharia Ambiental pelo apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6458. Grãos de Pedregulho Retidos Na Peneira de Abertura 4,8 Mm - Determinação Da Massa Esp., da massa esp. Aparente e Da Absorção de Água. RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. Solo: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182 - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990). NBR 12004. Solo: Determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). NBR 12051. Solo: Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos. Rio de Janeiro.
- Casagrande, M. D. T. Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos à grandes deformações. Tese de doutorado, PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, p. 219, 2005.
- 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.
- Conceição, M. P. d. S. Análise do comportamento tensão-deformação de um solo reforçado com fibra. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Bahia, Salvador., p. 93, 2021.
- Consoli, N. C.; Casagrande, M. D.; Coop, M. R. Effect of Fiber Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, v. 131, n. 11, p. 1434–1436, 2005.
- Diambra, A., Ibraim E, Muir Wood D and Russell AR, (2010). Fibre reinforced sands: experiments and modelling. *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (3), 238–250.
- Falorca, I.M.C.F.G; Gomes, L. M. F.; Pinto, M. I. M. A full-scale trial embankment construction with soil reinforced with short randomly distributed polypropylene microfibres. *Geosynthetics International*, v. 18, n. 5, p. 280-288, 2011.
- 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.
- Gray, D. H.; Ohashi, H. Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand. *Journal of geotechnical engineering*, v. 109, n. 3, p. 335–353, 1983.
- Iozzi, M. A. et al. Estudo da influência de tratamentos químicos da fibra de sisal nas propriedades de compósitos com borracha nitrílica. *Polimeros*, v. 20, n. 1, p. 25–32, 2010.
- McGown, A.; Andrawes, K. Z.; Al-hasani, M. M. Effect of inclusion properties on the behaviour of sand. *Géotechnique*, v. 28, p. 327–346, 1978.
- Michalowski, R. L.; Čermák, J. Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, v. 129, n. 2, p. 125–136, fev. 2003
- Pinto, C. M. T. Estudo do comportamento mecânico de uma areia aluvionar reforçada com fibras. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Bahia, Salvador., 2021.
- Reis, A. F. d. S. M. Análise do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibra de coco. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Bahia, Salvador., p. 111, 2022.
- 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.
- 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.
- Sivakumar Babu, G. L.; Vasudevan, A. K. Strength and stiffness response of coir fiber-reinforced tropical soil. *Journal of materials in civil engineering*, v. 20, n. 9, p. 571-577, 2008.
- Subaida, E.; Chandrakaran, S.; Sankar, N. Laboratory performance of unpaved roads reinforced with woven coir geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 27, n. 3, p. 204–210, jun. 2009.
- Wang, Y. et al. Behavior and Modeling of Fiber-Reinforced Clay under Triaxial Compression by Combining the Superposition Method with the Energy-Based Homogenization Technique. *International Journal of Geomechanics*, v. 18, 2018.
- Zhao, Yingying et al. Mechanical properties of fiber-reinforced soil under triaxial compression and parameter determination based on the Duncan-Chang model. *Applied Sciences*, v.10, n.24, p.9043, 2020.