

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



Análise do comportamento tensão-deformação de uma areia uniforme reforçada com fibra polimérica

Murilo Pereira da Silva Conceição

Mestre do PPEC, UFBA, Salvador, Brasil, pereiramurilossc@mail.com

Miriam de Fátima Carvalho

Professora, UFBA, Salvador, Brasil, miriam.machado@ufba.br

Sandro Lemos Machado

Professor, UFBA, Salvador, Brasil, smachado@ufba.br

RESUMO: Esta pesquisa aborda um estudo experimental com areia uniforme reforçada com fibra de copolímero, realizado por meio de ensaios triaxiais consolidados isotopicamente drenados (CID), com o objetivo de avaliar o efeito da inclusão de fibras no comportamento tensão-deformação da matriz de areia. Foram utilizadas amostras com dimensões superiores as convencionais (100 x 200mm) e diferentes comprimentos (12,5, 25 e 51mm) e teores (0, 5%, 1, 0%) de fibra, em busca de avaliar a influência das destas variáveis no comportamento mecânico do compósito. Os ensaios de compressão triaxial foram executados em duplicata para quatro confinantes (50, 100, 200 e 400kPa) e 4 trajetórias de tensões dq/dp (3, 1, 5, 10 e -3), perfazendo um total de 60 ensaios triaxiais. A inclusão da fibra de copolímero na areia uniforme, proporciona o desenvolvimento de um compósito com novas propriedades mecânicas, as quais são fortemente influenciadas pelo comprimento e teor do reforço. De forma geral, há acréscimo da tensão desviadora de ruptura com a inclusão da fibra, de forma que todas as combinações testadas aumentaram os parâmetros de resistência ao cisalhamento em relação ao do solo puro. As deformações volumétricas são de pequena monta, ocorrendo um efeito dilatante durante o processo de ruptura.

PALAVRAS-CHAVE: Solo-fibra, Ensaio triaxial, Solo reforçado.

ABSTRACT: This research addresses an experimental study with copolymer fiber reinforced dune sand, through the execution of isotopically-drained consolidated triaxial tests, with the objective of evaluating the effect of the inclusion of polymeric fibers on the stress-deformation behavior in a uniform sand matrix. Profiles with larger dimensions were used as conventional (100 x 200mm) and different fiber lengths (12.5, 25 and 51mm) and contents (0.5%, 1, 0%), in order to evaluate the influence of the characteristics of the fiber in the mechanical behavior of the composite. The triaxial compression tests were previous in duplicate for four confines (50, 100, 200 and 400kPa), and 4 stress paths of dq / dp (3, 1, 5, 10 and -3), making a total of 60 triaxial tests. The inclusion of copolymer fiber in dune sand offers the development of a composite with new mechanical properties, which are strongly influenced by the length and content of the reinforcement. In general, there is an increase in shear strength with the inclusion of polymeric fiber as reinforcement, so that all tested solutions increased the shear strength parameters compared to pure soil. The volumetric deformations are of small amount, with expansion during the rupture process.

KEYWORDS: Soil-fiber; triaxial test, reinforced soils

1 Introdução

Por vezes, os solos naturais locais não atendem as especificações mínimas de projeto e técnicas de melhoramento de propriedades in situ são priorizadas devido a suprimir a necessidade de substituição do solo local, ocasionando uma redução nos impactos ambientais e possivelmente nos custos. Dentre as técnicas de melhoria dos solos, está o solo reforçado com fibra (SRF), que constitui na tecnologia de materiais compósitos, devido a mistura de dois materiais com diferentes propriedades, onde as fibras contribuem melhorando a resistência à tração, reduzindo a propagação de fissuras, além de tornar a ruptura do compósito mais dúctil,

com aumento de resistência ao cisalhamento de pico e limitação na redução da resistência ao cisalhamento pós-pico (DIAMBRA e IBRAIM, 2015; GAO, LU e HUANG, 2020).

Diambra e Ibraim (2015) complementam que para solos granulares, a eficiência da fibra é essencialmente governada pelo mecanismo de interação fibra/grão e que o desempenho dos solos granulares com inclusões de fibras é fortemente dependente do teor de fibras e das condições de ensaio como: níveis de tensão, trajetória de tensões e direção de carregamento, além de outras variáveis relacionadas às características físicas do solo granular e da fibra, como as dimensões da fibra e das partículas sólidas, distribuição granulométrica, propriedades friccionais entre os materiais, rigidez, forma e superfície da partícula e sua configuração espacial.

Nesse contexto, o presente trabalho visa avaliar o efeito a inclusão de uma fibra de copolímero com distribuição aleatória como reforço em um solo granular de grão uniforme, assim como analisar os efeitos na resistência ao cisalhamento do compósito com o aumento do comprimento e teor de fibra na massa do solo.

2 Metodologia

Para realização da pesquisa foi utilizada uma areia de granulometria uniforme da região metropolitana de Salvador-BA (Figura 1a), fibra de copolímero 100% virgem (junção dos monômeros de etileno e propileno), fornecida pela empresa Viapol (Figura 1b). A fibra foi escolhida devido a sua disponibilidade no mercado, o seu uso corrente em aplicação de argamassa e concreto, por apresentar características propriedades do material bem definidas pelo fabricante, além de ser inerte quimicamente, o que facilita sua utilização em aplicações práticas de engenharia. A mistura areia/ fibra é apresentada na Figura 1c.



Figura 1. (a) Areia estudada. (b) Fibra nos comprimentos de 12,5mm, 25mm e 51mm. (c) Mistura solo fibra.

A Fibra possui diâmetro médio de 0,51 mm, massa específica de 0,91g/cm³, módulo de elasticidade de 5 GPa e resistência a tração média de 500 MPa. No laboratório, a areia foi exposta ao ambiente para secagem, até atingir a umidade higroscópica, homogeneizada e então acondicionada em sacos. Os ensaios de caracterização da areia constaram de: Análise granulométrica (NBR 7181/2016); massa específica dos sólidos (NBR 6458/2016); determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos (NBR 12004/1990); determinação do índice de vazios mínimo (NBR 12051/1991).

O estudo do comportamento tensão-deformação da areia uniforme e dos compósitos areia/fibra foi realizado através da execução de ensaios triaxiais empregando corpos de prova de tamanhos maiores que o convencional, com 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro, em busca de resultados mais representativos de um maciço de solo reforçado, com teores de fibras de 0%, 0,5% e 1,0% e comprimento de 12,5 mm, 25 mm e 51 mm. Os ensaios são do tipo consolidado isotropicamente drenado (CID), com tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa, e 4 trajetórias de tensões dq/dp (3, 1, 5, 10 e -3). Os ensaios com trajetórias de tensões não convencionais foi realizado apenas para uma consolidação com $\sigma_3=100$ kPa. Para todas as combinações foi realizado duas repetições válidas, de forma a reduzir a influência que possíveis erros de montagem ou de execução do ensaio, totalizando 60 ensaios triaxiais.

Os corpos de prova (CP) foram preparados seguindo procedimentos exibidos na Figura 2, usando um molde bipartido de aço inoxidável (diâmetro interno de 100 mm e altura de 200 mm), fixado na base da célula triaxial, onde o material foi acomodado em camadas, buscando obter uma densidade relativa (D_r) de 60% para os CP de areia, valor que corresponde a um índice de vazios de 0,613 e a uma massa específica seca de 1,647 g/cm³.

Os compósitos areia/fibra também foram densificados buscando manter o índice de vazios em 0,613, dessa forma considerou-se a fibra como parte do sólido e calculou-se a massa específica dos sólidos ponderada para cada combinação de porcentagem de fibra nos compósitos. Após a membrana de látex ser inserida no molde metálico e colocação de um geotêxtil no fundo do molde, aplica-se uma sucção de cerca de 20 kPa na linha de base da célula com o auxílio de uma bomba de vácuo e inicia-se a inserção da massa de material no interior do molde, usando um funil para o caso da areia pura e uma concha para a areia/fibra, em quatro camadas e procede-se a acomodação do material com uma sapata até obter a altura definida (Figura 2a). Apoia-se outro geotêxtil e o cabeçote sobre a última camada de material, prendendo a membrana ao cabeçote com auxílio de borrachas de látex, garantindo a vedação do conjunto, mantendo a sucção na base e aplicando-a também no topo do CP, o que permite retirar o molde metálico evitando a desestruturação do CP (Figura 2b). Com bomba de vácuo ainda aplicando a sucção, o molde é removido tomando-se todas as precauções para que não ocorra deformações no corpo de prova (Figura 2c). Fecha-se a célula triaxial e insere-se água na parte externa da célula, aplica-se uma pequena pressão externa no CP com um auxílio de um reservatório para manter um leve confinamento na amostra e fecha-se a válvula da aplicação de vácuo (Figura 2d).

O CP segue para saturação por fluxo e avaliação 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.

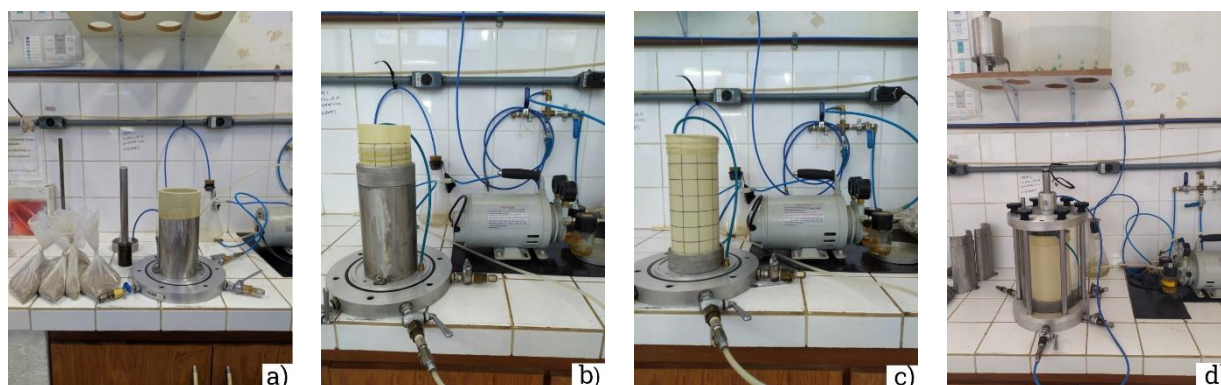


Figura 2. Montagem do CP. a) Solo e sapata de compactação. b) Retirada do molde e aplicação de sucção. c) CP Pronto sob sucção. d) CP na câmara sob leve confinamento.

A prensa triaxial utilizada na pesquisa consiste num sistema confeccionado no GEOAMB - Laboratório de Geotecnia Ambiental da UBFA, que permite a realização de ensaios com amostras de diferentes tamanhos e realização de ensaios triaxiais do tipo CID-consolidado drenado, CIU-consolidado não drenado e UU-não consolidado não drenado, ensaios em amostras não saturadas, além da possibilidade da tensão confinante da câmara variar em função da tensão desviadora, ou seja, permite realizar ensaios sob diferentes trajetórias de tensões (dq/dp).

Os procedimentos gerais adotados na preparação e execução dos ensaios triaxiais seguiram os princípios descritos por Bishop e Henkel (1962) e Head e Epps (2014). Os CPs que atenderam as variações do coeficiente de permeabilidade, medidos após a saturação por fluxo, seguiram para a saturação por contrapressão, com medida do parâmetro B de Skempton (1954) superior a 0,90. Procede-se o confinamento conforme a tensão efetiva desejada e seguida da ruptura com uma taxa de carregamento de 0,667 mm/min num tempo de cerca de 60 minutos. Maiores informações sobre execução do ensaio e moldagem do corpo de prova pode ser visto em Conceição (2021).

3 Resultados e Análises

A areia estudada apresentou os seguintes índices caracterizadores: $\rho_s = 2,657 \text{ g/cm}^3$, $C_u = 1,79$, $C_c = 1,23$, $D_{10} = 0,176 \text{ mm}$, $D_{50} = 0,29 \text{ mm}$, $e_{min} = 0,523$ e $e_{max} = 0,748$. De acordo com a NBR 6502 da ABNT (1995), a areia estudada é classificada com uma areia média (84%), fina (16%) e muito uniforme ($C_u < 5$). Segundo a SUCS o solo é classificado como SP, areia mal graduada.

A análise do comportamento mecânico do material foi estudada através das curvas tensão-deformação e deformação volumétrica-deformação axial apresentadas nas Figuras 3 e 4, de forma conjunta para areia pura e para SRF no teor de 0,5% e 1%, respectivamente. No que se refere a areia estudada, sendo seus grãos uniformes e arredondados, a condição de índice de vazios mínimo (densa) e máximo (fofa) ocorre com pequena amplitude de variação. Assim, pequena alteração no índice de vazios, quer seja no ato de moldagem ou execução do ensaio, pode provocar considerável alteração na estrutura e por consequência na forma de ruptura. De uma forma geral, a areia estudada apresentou comportamento típico de areia densa, ficando este mais evidente quando se observam as curvas deformação volumétrica versus deformação axial. As deformações volumétricas são de pequena monta, ocorrendo um efeito dilatante durante o processo de ruptura.

Em relação ao compósito solo-fibra, pode-se observar que o aumento do teor e do comprimento de fibras ocasiona um aumento na tensão desviadora de ruptura do compósito, com algumas particularidades para as diferentes confinantes.

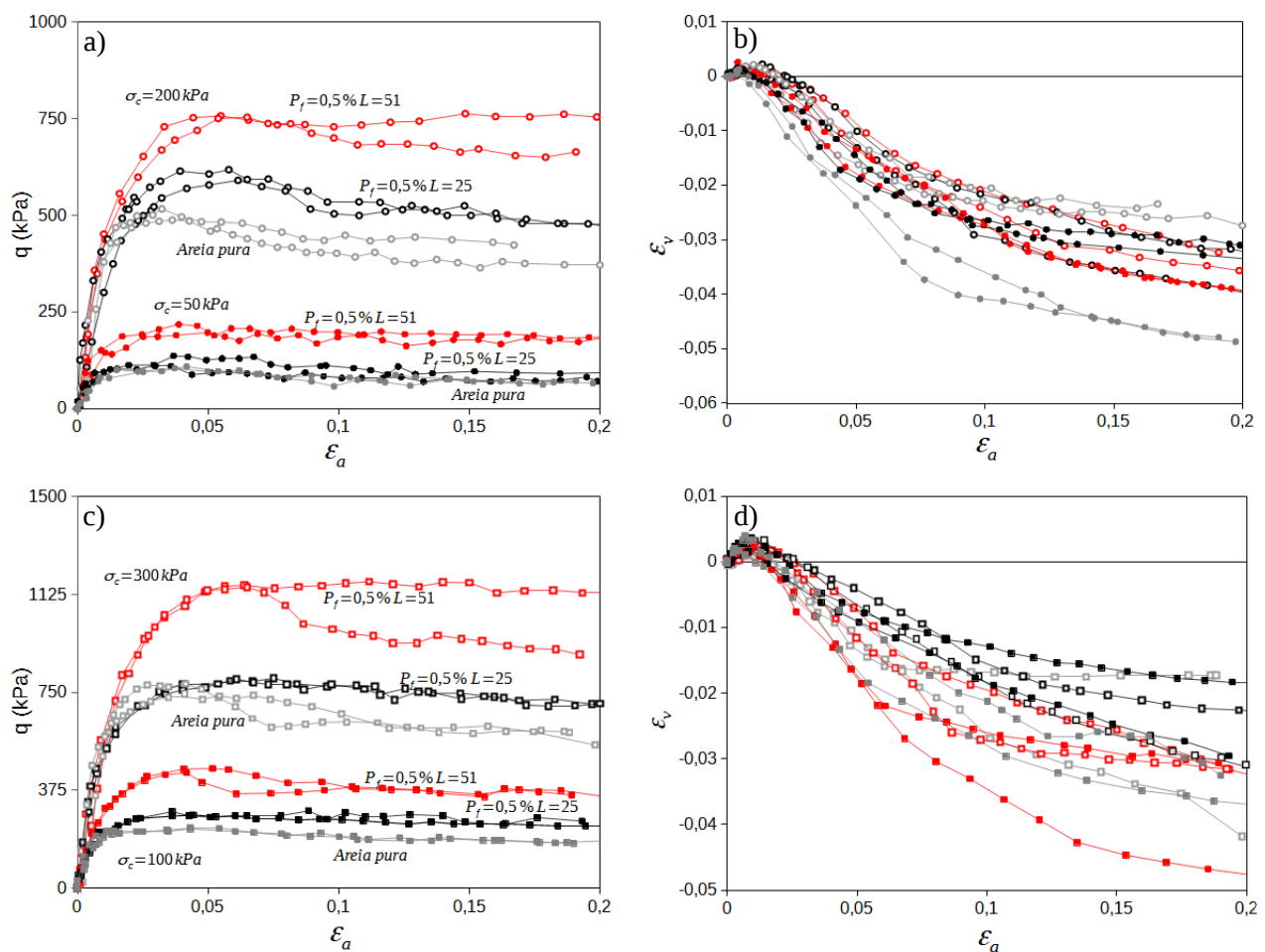


Figura 3. Resultados de ensaios CID para areia pura e areia reforçada com $P_f=0,5\%$, $L=25\text{mm}$ e 51mm . a) Curvas tensão deformação para confinantes de 50 e 200 kPa; b) Curvas deformação volumétrica-deformação axial para confinante de 50 e 200 kPa; c) Curvas tensão-deformação para confinantes de 100 e 300 kPa; d) Curvas deformação volumétrica-deformação axial para confinante de 50 e 200 kPa.

Da Figura 4 (a) e (c) observa-se para os compósitos com $P_f=0,5\%$ e $L=51\text{ mm}$ incremento na tensão desviadora de ruptura para todas as tensões confinantes em relação ao solo sem reforço. Já para os compósitos com $P_f=0,5\%$ e $L=25\text{mm}$, o incremento ocorre apenas para as tensões confinantes de 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa, embora para a tensão de confinamento de 300 kPa o incremento de resistência com relação à areia pura só se dê após cerca de 5% de deformação axial. Vale ressaltar que, conforme relatado por Diambra *et al.* (2010) a fibra pouco influi no comportamento do compósito para baixos valores de deformação, de forma que as curvas obtidas são normalmente semelhantes em seus trechos iniciais.

Para a confinante de 50 kPa, não foi verificado incremento na tensão desviadora de ruptura com a inclusão do reforço. O incremento na tensão desviadora para o solo reforçado ensaiado nas confinantes intermediárias (100 kPa e 200 kPa) pode ser explicado pela melhor interação entre o solo e a fibra, promovendo uma ancoragem mais efetiva da fibra entre os grãos do solo. Para $\sigma_3=50$ kPa, não houve um confinamento suficiente para promover uma ancoragem entre os grãos da areia e fibra.

Em relação a Figura 4 (b) e (d), verifica-se que a fibra não alterou o comportamento de deformação volumétrica da areia, com todas as confinantes apresentando comportamento dilatante. Observa-se também, que os resultados não apresentaram uma diferença de comportamento claro entre inclusão da fibra de $L=25$ e 51 mm para $P_f=0,5\%$ na deformação volumétrica.

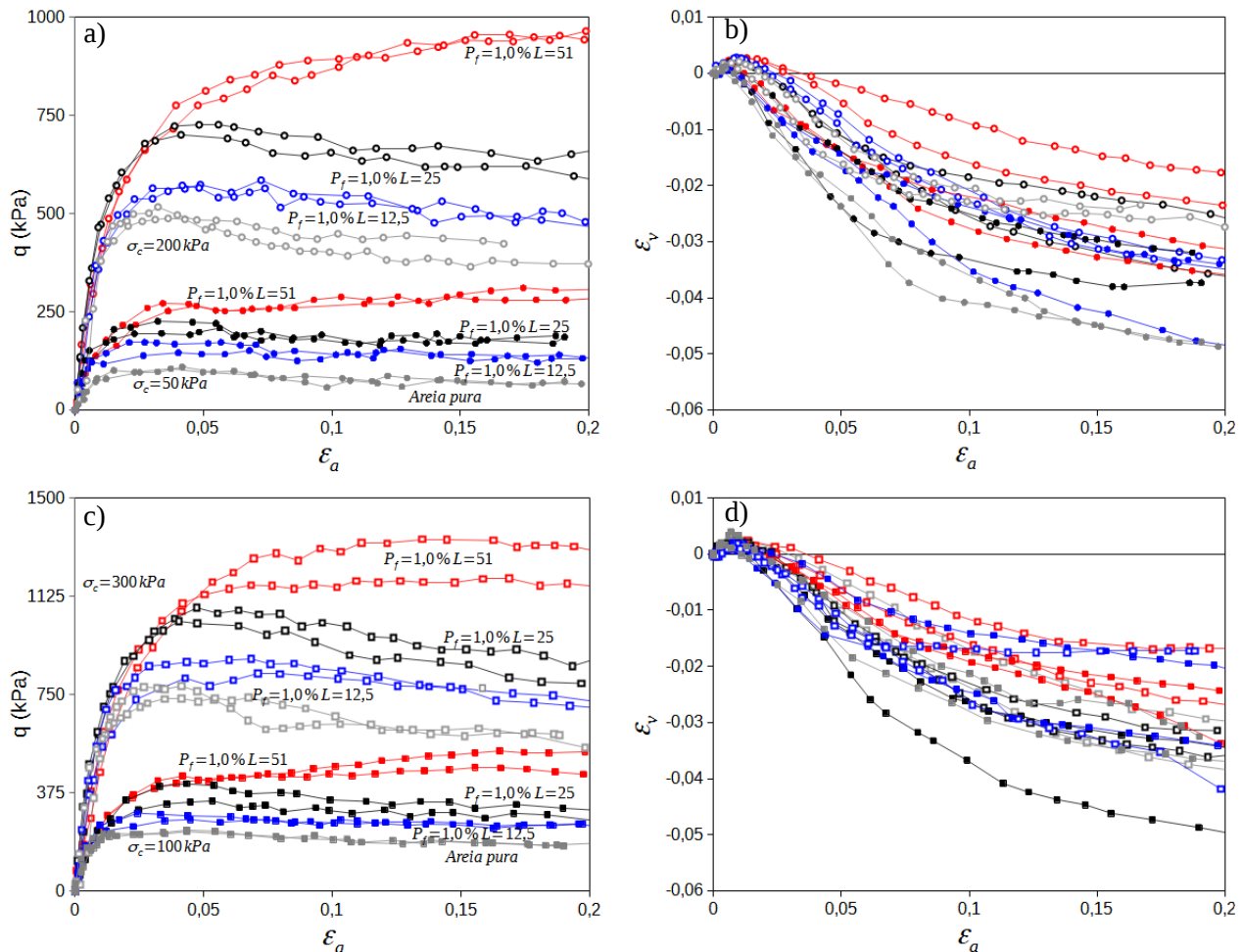


Figura 4. Resultados de ensaios triaxiais CD para areia pura e areia reforçada com $P_f = 1,0\%$ e $L = 12,5$, 25 e 51 mm. a) Curvas tensão-deformação para confinantes de 50 e 200 kPa; b) Curvas deformação volumétrica-deformação axial para confinante de 50 e 200 kPa; c) Curvas tensão-deformação para confinantes de 100 e 300 kPa; d) Curvas deformação volumétrica-deformação axial para confinante de 50 e 200 kPa.

De acordo com a Figura 4, observa-se que as amostras de areia reforçada com $P_f = 1\%$ apresentaram incremento na tensão desviadora com aumento do comprimento das fibras. Os compósitos com $L = 12,5$ e 25 mm apresentaram o mesmo comportamento típico de ruptura do solo sem reforço, apresentando uma tensão máxima de ruptura e suave queda de resistência após o pico, sendo que, a deformação para tensão de pico, foi aumentando com o aumento do comprimento da fibra. Este tipo de comportamento não foi observado para a areia reforçada com $L = 51$ mm, em que o compósito apresentou um comportamento de endurecimento (hardening), aumentando a tensão desviadora com o aumento da deformação axial. Essa mesma tendência de endurecimento, para maiores comprimentos de fibras, também foi reportada por Diambra e Ibraim (2015).

Verifica-se também que a deformação para o início do incremento de resistência ao cisalhamento devido a inclusão de fibra foi aumentando para as maiores tensões confinantes. Para $\sigma_3=50$ kPa o acréscimo de tensão desviadora iniciou para pequenas deformações ($\approx 0,005$), resultando num aumento de rigidez inicial para esta tensão confinante. Para as outras tensões confinantes testadas o acréscimo de resistência iniciou aproximadamente para $\epsilon_a=0,02$, não havendo diferenças na rigidez inicial do material.

Ainda na Figura 4, comparando-se as curvas tensão desviadora vs deformação axial de $L=25$ mm e $L=51$ mm, verifica-se uma semelhança entre elas até a deformação axial de cerca de 0,04, sugerindo que a influência do comprimento excedente para $L=51$ mm, inicia sua contribuição no incremento de tensão desviadora para maiores deformações.

Em relação à deformação volumétrica, todas as amostras apresentaram comportamento semelhante à areia pura, apresentando pequena compressão inicial e dilatação no cisalhamento. Para o compósito com $L=51$ mm, foi observado uma redução mais evidente na dilatação em comparação a areia sem reforço, principalmente para tensão confinante de 50 kPa e 200 kPa.

Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros de resistência ao cisalhamento da areia sem reforço e de todas as combinações de SRF estudado, bem como a tensão desviadora máxima obtida no ensaio triaxial CID e o acréscimo em porcentagem de tensão desviadora da areia reforçada em relação a areia pura.

Tabela 1. Parâmetros de resistência da areia e dos compósitos e acréscimo na tensão desviadora máxima devido ao incremento de fibra

Material	σ_3 (kPa)	σ_{df} (kPa)	Acréscimo no σ_{df} (%)	c' (kPa)	$\phi(^{\circ})$	$\Delta\phi(^{\circ})$
Areia Pura	50	111,3	0	0	33,6	0
	100	230,0	0			
	200	503,0	0			
	300	760,3	0			
Pf=0,5% e L=25mm	50	128,5	15,5	0	35,8	2,2
	100	288,4	25,4			
	200	606,1	20,5			
	300	802,4	5,5			
Pf=0,5% e L=51mm	50	207,4	86,4	7,2	40,7	7,1
	100	454,1	97,4			
	200	758,5	50,8			
	300	1163,6	53,0			
Pf=1,0% e L=12,5mm	50	162,6	46,1	2,5	35,8	2,2
	100	284,8	23,9			
	200	578,1	14,9			
	300	857,8	12,8			
Pf=1,0% e L=25mm	50	217,1	95,1	8,3	36	2,4
	100	376,5	63,7			
	200	713,3	41,8			
	300	1055,6	38,8			
Pf=1,0% e L=51mm	50	299,3	169,0	23,9	41,8	8,2
	100	503,4	118,9			
	200	966,3	92,1			
	300	1268,4	66,8			

Os dados da Tabela 1 apontam acréscimo nos parâmetros de resistência do SRF em comparação com a areia sem reforço, em todas as combinações de adição de fibra testadas. O compósito com $P_f=1\%$ e $L=51$ mm apresentou os maiores acréscimos de σ_d para todas as confinantes testadas, chegando a possuir acréscimos acima de 100% para as confinantes de 50 kPa e 100 kPa, o que resultou num intercepto coesivo de 23,9 kPa, valor significativo considerando que a matriz é um material granular, e ângulo de atrito de 41,8°.

Para efeito de comparação, Pinto (2021), utilizando a mesma fibra da presente pesquisa e um solo aluvionar mais graduado que a areia uniforme estudada, obteve incrementos de 19,6kPa na coesão e 5,2° no ângulo de atrito, para o compósito com $P_f = 1\%$ e $L = 25\text{mm}$, incremento superior na coesão e semelhante no ângulo de atrito em comparação ao compósito com a areia uniforme estudada. Essa diferença ocorre devido a areia aluvionar ser mais graduada, o que permite uma melhor ancoragem entre a fibra e o grão da areia.

Na Figura 5 estão apresentados os resultados de testes triaxiais drenados realizados na areia uniforme, com e sem reforço, seguindo trajetórias de tensões dq/dp de 1,5, 10 e -3, adensados com $\sigma_3 = 100\text{ kPa}$. Os testes com diferentes trajetórias de tensão foram realizados apenas para o compósito com $P_f = 0,5\%$ e $L = 25\text{ mm}$. Para efeito de comparação, também estão apresentados na Figura 5 resultados obtidos de ensaios convencionais seguindo a trajetória $dq/dp = 3$.

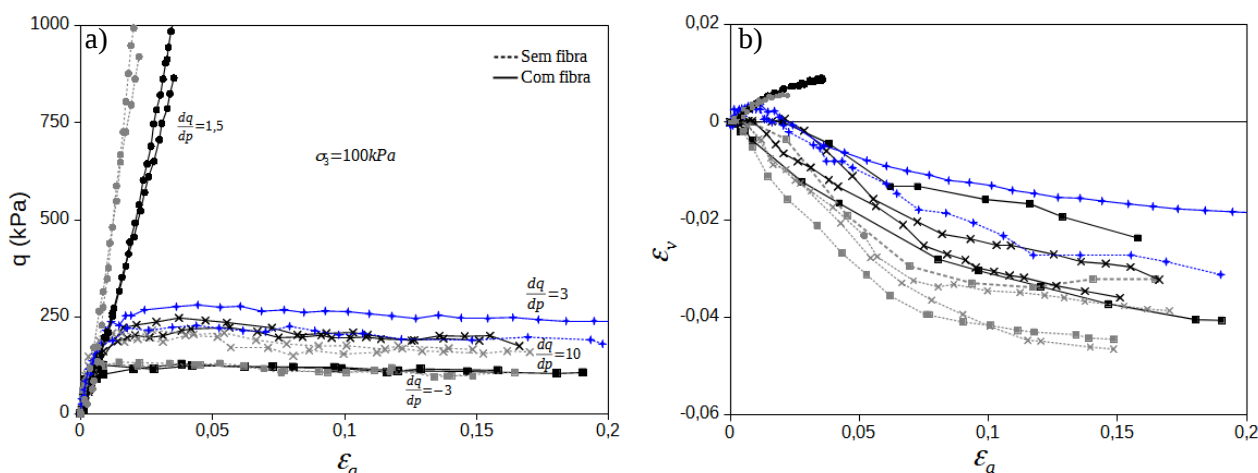


Figura 5. Teste triaxial com diferentes trajetórias de tensão (dq/dp) para uma tensão de adensamento ($\sigma_3 = 100\text{ kPa}$) e compósito com $P_f = 0,5\%$ e $L = 25\text{mm}$.

Analisando a Figura 5(a) observa-se que para a trajetória $dq/dp = 1,5$ (tensão confinante e desviadora crescentes durante o ensaio), a fibra não contribuiu com a resistência, inclusive com resultados de tensão desviadora inferior para a areia reforçada a partir de 0,01 de deformação axial. Comparando-se este resultado com o ensaio de $dq/dp = 3$ de $\sigma_3 = 300\text{ kPa}$, verifica-se que o compósito com a mesma combinação de L e P_f , quase que não apresentou acréscimo de resistência em relação ao solo puro (ver Figura 4 (c)), o que indica que para elevadas tensões confinantes há uma tendência de limitação no acréscimo de resistência ao cisalhamento devido a inclusão da fibra. Já para a $dq/dp = -3$ (redução na tensão confinante com maior velocidade e tensão desviadora crescente) não foi observado incremento de resistência da areia com a inclusão da fibra, provavelmente por conta das baixas tensões confinantes obtidas ao término dos ensaios, de forma similar ao que aconteceu no caso dos ensaios convencionais realizados com uma tensão confinante de 50 kPa para o mesmo teor e comprimento. Estes resultados sugerem que há uma faixa de tensão confinante para qual o solo e fibra estudado interagem com maior efetividade.

Para as relações dq/dp igual a 3 e a 10 (redução na tensão confinante e tensão desviadora crescente) houve um aumento na tensão desviadora com a inclusão da fibra a partir de 2,5% de deformação axial. Além disso, é possível observar uma sobreposição das curvas da areia sem reforço com $dq/dp = 3$, e com reforço para $dq/dp = 10$, ou seja, apesar de no ensaio ocorrer uma redução na tensão confinante (de forma mais lenta que $dq/dp = -3$), a areia reforçada com fibra manteve o comportamento tensão-deformação semelhante ao de um ensaio que manteve o $\sigma_3 = 100\text{ kPa}$ constante.

Em relação a deformação volumétrica Figura 5(b) observa-se que, apenas para a trajetória $dq/dp = 1,5$ houve compressão durante todo o ensaio, com a areia reforçada e sem reforço indicando uma tendência de dilatância para maiores deformações. Este fenômeno não pode ser observado, pois, houve a necessidade de interromper os ensaios devido a limitação de aplicação da tensão confinante da prensa. Em todas as outras trajetórias, tanto na areia, quanto no compósito, o comportamento da deformação volumétrica apresentando, foi de areia compacta, com uma pequena compressão inicial e posteriormente expansão do CP. Verifica-se ainda a tendência de uma moderada redução na dilatância do CP com a adição de fibra para as trajetórias de dq/dp de 10 e -3.

4 Conclusão

A inclusão da fibra de copolímero na areia uniforme proporciona o desenvolvimento de um compósito com novas propriedades mecânicas, as quais são fortemente influenciadas pelo comprimento e teor do reforço. De forma geral, há acréscimo de resistência ao cisalhamento com a inclusão da fibra polimérica como reforço, de forma que todas as combinações testadas aumentaram os parâmetros de resistência em relação ao do solo. Pode-se notar que há aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento do comprimento e do teor nas faixas estudadas. Em relação tensão confinante, pode-se notar que na areia uniforme há uma tendência de limitação de acréscimo de resistência ao cisalhamento para confinantes elevadas (>300 kPa).

O compósito com o maior comprimento ($L=51\text{mm}$) e porcentagem ($P_f=1\%$) de fibras testados nesta pesquisa, foi o que apresentou melhores parâmetros de resistência ao cisalhamento, em que, foram obtidos acréscimos de 23,9kPa na coesão e $8,3^\circ$ no ângulo de atrito.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA – GEOAMB. À Viapol, por ter apoiado a pesquisa com o fornecimento das fibras poliméricas. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB, pela concessão de bolsa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990). NBR 12004. *Determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos*. 6 p. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). NBR 12051. *Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos*. 14 p. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). NBR 6502. *Rochas e solos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). 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.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. *Solo: Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Bishop, A. W., & Henkel, D. J. (1962). *The measurement of soil properties in the triaxial test*, 2 ed. London: E. Arnold.
- Conceição, M. P. S. (2021) *Análise do comportamento tensão-deformação de um solo reforçado com fibra*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da UFBA. 92 p.
- Diambra, A. & Ibraim, E. (2015) Fibre-reinforced sand: Interaction at the fibre and grain scale. *Geotechnique*, 65(4), 296-308.
- Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D. M., & Russell, A. R. (2010). Fibre reinforced sands: experiments and modelling. *Geotextiles and geomembranes*, 28(3), 238-250.
- Gao, Z., Lu, D., & Huang, M. (2020). Effective skeleton stress and void ratio for constitutive modeling of fiber-reinforced sand. *Acta Geotechnica*, 15, 2797-2811.
- Head, K. H., & Epps, R. J. (2014). *Manual of Soil Laboratory Testing*. Volume III: Effective Stress Tests. *Whittles, Caithness*.
- PINTO, C. M. T. *Estudo do comportamento mecânico de uma areia aluvionar reforçada com fibras*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da UFBA. 78 p.
- Skempton, A. W. (1954). The pore-pressure coefficients A and B. *Geotechnique*, 4(4), 143-147.