

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM COMPÓSITO AREIA-FIBRA EM EXTENSÃO AXIAL

Miguel Angel Parodi Palacios

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil.
E-mail: <crespho@hotmail.com>.

Michéle Dal Toé Casagrande

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil.
E-mail: <michele_casagrande@puc-rio.br>.

Daiane Folle

Faculdade Meridional, IMED, Passo Fundo, Brasil.
E-mail: <daiane.folle@imed.edu.br>.

Jonas Anversa

Faculdade Meridional, IMED, Passo Fundo, Brasil.
E-mail: <jonas.anv@gmail.com>.

RESUMO

O artigo apresenta o estudo do comportamento tensão-deformação de um solo arenoso reforçado e não reforçado com fibras de polipropileno, através da realização de ensaios triaxiais drenados, com extensão axial. Busca-se estabelecer padrões de comportamento que possam explicar a influência da adição de fibras, relacionando-a com os parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformação do solo quando submetidos a esforços de extensão. Ensaios triaxiais foram realizados em amostras compactadas a uma densidade relativa de 50%, com 0,5% de teor de fibra de 12 mm de comprimento e 0,03mm de diâmetro. Foram aplicadas tensões efetivas médias iniciais de 20 a 600 kPa. Observa-se uma taxa única de crescimento de resistência a partir do momento em que as fibras são mobilizadas, que independe das tensões efetivas iniciais e se apresenta de forma linear e constante para o solo reforçado. Os resultados foram satisfatórios para aplicação do solo reforçado em obras geotécnicas que estejam sujeitas a cargas de extensão.

Palavras-chave: Fibras de polipropileno, solo reforçado, ensaios triaxiais de extensão.

INTRODUÇÃO

Devido à não homogeneidade dos solos, muitas vezes encontramos solos que não oferecem uma boa resistência frente às solicitações de carga de alguns projetos. Uma alternativa disponível ao engenheiro geotécnico é remover o material existente no local e substituí-lo por outro com características adequadas ou modificar e melho-

rar as propriedades do solo existente por meio da adição de algum elemento de reforço (p.ex. fibras de polipropileno), de modo a obter um material compósito com características de resistência e deformabilidade adequadas para garantir o bom desempenho do material para constituir o solo de fundação em obras de engenharia.

No presente artigo pretende-se estudar o comportamento do material compósito submetido a solicitações de extensão. Dentro deste contexto,

o presente trabalho busca contribuir para uma melhor interpretação e compreensão do comportamento do solo com a inserção de fibras de polipropileno, podendo potencializar a sua utilização em projetos geotécnicos.

Para a realização dos ensaios triaxiais de extensão foi montado um equipamento do tipo Bishop e Wesley (1975). Ressalta-se que o equipamento foi desenvolvido na PUC-Rio pelo professor Tácio de Campos, sendo este equipamento de maiores dimensões, quando comparado aos equipamentos triaxiais convencionais, o que é muito importante, pois quanto maior for a amostra ensaiada, maior será a representatividade do material em estudo.

PROGRAMA EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTO TRIAXIAL

O equipamento utilizado (Figura 1) é um tipo de equipamento similar ao desenvolvido na Imperial College of Science and Technology (London) no ano 1975 por Bishop e Wesley, o qual é um equipamento triaxial hidráulico que permite a realização de uma extensiva gama de ensaios em diferentes trajetórias de tensões. O equipamento consta basicamente de duas partes, a câmara superior similar à de um equipamento triaxial convencional, e a parte inferior que é o elemento característico diferenciado. O sistema de aplicação de carga axial é feito através de uma membrana (Bellofram) situada abaixo do pedestal, que se move para cima ou para baixo fazendo com que a amostra entre em contato com uma célula de carga interna na parte superior da câmara, que por sua vez mede a carga aplicada. Então, a carga axial é aplicada aumentando-se a pressão na interface situada sob o pedestal.

O tamanho do equipamento permite realizar ensaios com amostras de 4" de diâmetro por 8" de altura, o qual é uma grande vantagem quanto à representatividade dos solos a serem testados.

A primeira fase compreende os ensaios triaxiais de compressão realizados na areia não reforçada e reforçada com fibras de polipropileno no teor de 0,5% em relação ao peso seco da matriz de areia, para logo aferir o funcionamento do equipamento triaxial desenvolvido. A segunda fase compreende os ensaios triaxiais de extensão realizados com o objetivo de avaliar o comporta-

mento da areia e da mistura areia-fibra sob sollicitações de extensão.

A areia estudada possui 2,63 de densidade real dos grãos, índice de vazios mínimo e máximo de 0,6 e 0,9, respectivamente e diâmetro efetivo de 0,09mm e diâmetro médio de 0,16mm. A areia seca foi primeiramente misturada com as fibras e depois de uma homogeneidade visível era acrescentada a água.

3 RESULTADOS

Os ensaios tiveram a finalidade de testar o funcionamento do equipamento triaxial desenvolvido, já que os resultados obtidos nesses ensaios foram comparados com os resultados obtidos por Casagrande (2005), com a mesma areia e o mesmo teor de fibras dentro da mistura.

As Figuras 2 e 3 exibem uma comparação dos resultados. Ressalta-se que os gráficos estão apresentados em diferentes escalas. Casagrande (2005) observou uma linearidade quase perfeita, enquanto na mistura areia-fibra obteve-se uma envoltória curvilínea-linear cruzando a origem é hipoteticamente prevista, não havendo a imposição de um intercepto coesivo à mistura areia-fibra. Pode ser observado o ponto de inflexão entre as partes inicial e final das mesmas.



Figura 1. Vista geral do equipamento triaxial de maiores dimensões

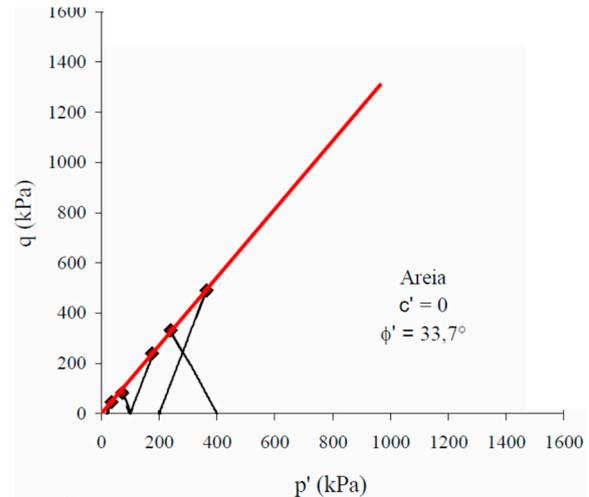
Pode-se observar uma similitude nos parâmetros de resistência, a variação nos parâmetros encontra-se na taxa de 2,3% no caso da areia. No caso da mistura areia-fibra o resultado obtido encontra-se na média das duas envoltórias en-

contradas por só areia. Essa variação obtida em ambos os estudos é atribuída a vários fatores descritos a seguir:

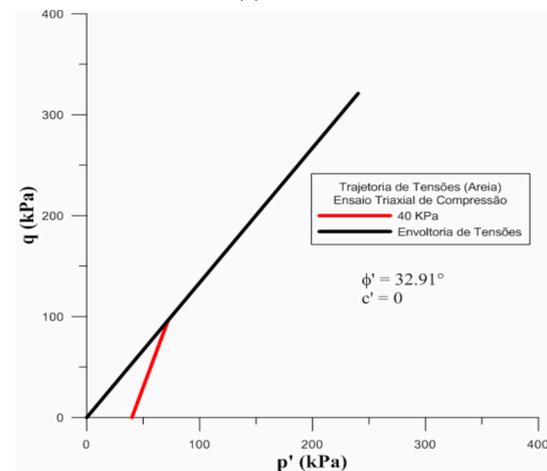
- ◆ Compactação dos corpos de prova: a compactação em ambos os estudos foi realizada manualmente sem levar em consideração o número e a força dos golpes em cada camada compactada;
- ◆ O tamanho das amostras: as amostras testadas por Casagrande (2005), tinham 1,5" de diâmetro por 3" de comprimento, enquanto as amostras testadas na presente pesquisa foram de 4" de diâmetro por 8" de comprimento;
- ◆ Saturação da amostra: a saturação dos corpos de prova foi conferida com a variação de volume observada em cada estágio de aplicação de contrapressão, quando a variação de volume apresentava entre 0 e 0,5 cm³, assumia-se que o solo encontrava-se saturado, mesmo ele apresentando um parâmetro B de Skempton no máximo de 0,80, enquanto Casagrande (2005), atingiu valores de B na taxa de 0,95;
- ◆ Tamanho das fibras: o tamanho das fibras empregadas por Casagrande (2005) foi de 24 mm quando as fibras empregadas na presente pesquisa tiveram um comprimento de 19,3 mm.

Dos resultados obtidos podemos chegar à conclusão que o equipamento encontra-se em ótimas condições para iniciar os ensaios triaxiais de extensão. Foram realizados oito ensaios triaxiais de extensão, quatro para a areia e quatro na mistura areia fibra. As tensões efetivas de confinamento empregadas nos ensaios foram de 50, 100, 200 e 300 kPa. Para as misturas foram fixados o teor de fibra de 0,5%, calculado em relação à massa seca da matriz da areia, comprimento das fibras de 19,3 mm, diâmetro das fibras de 0,03 mm, peso específico aparente seco (15 kN/m³ correspondente a uma densidade de 50%) e umidade de 10%.

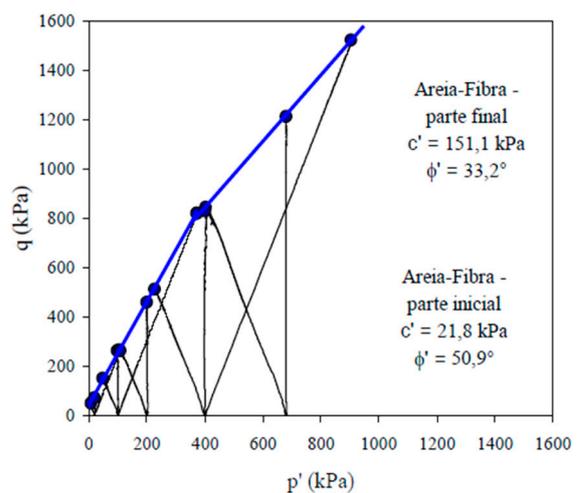
A Figura 4 apresenta os mecanismos de deformação de uma amostra de areia sem reforço e reforçada com fibras de polipropileno submetida a ensaios triaxiais de extensão. Observa-se a presença de uma superfície de ruptura na diagonal da amostra da areia, essa superfície de ruptura foi gerada na base da amostra, enquanto no caso da mistura de areia-fibra observa-se uma compressão das amostras na base que se expande até o centro da amostra.



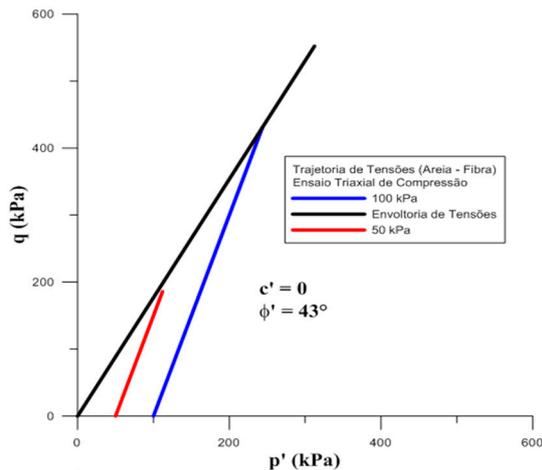
(a) Areia



(b) Mistura areia-fibra

Figura 2. Parâmetros de resistência da areia submetida a ensaios de compressão (Casagrande, 2005)


(a) Areia



(b) Mistura areia-fibra

Figura 3. Parâmetros de resistência da mistura submetida a ensaios de compressão (Casagrande, 2005).



Figura 4. Mecanismo de deformação.

A Figura 5 apresenta os resultados comparativos da tensão desviadora vs deformação axial dos ensaios triaxiais drenados de extensão realizados na areia e na mistura areia-fibra, a diferentes tensões efetivas de confinamento observar que a inclusão das fibras de polipropileno ao solo altera o comportamento resistente da matriz do solo quando submetido a solicitações de extensão, porém essa alteração não gera um aumento nos parâmetros de resistência da matriz do solo, pelo contrário, origina uma queda nos parâmetros de resistência em todas as comparações dos ensaios triaxiais de extensão realizados na areia e na mistura areia-fibra, para cada tensão efetiva de confinamento. Essa diminuição na tensão de ruptura encontra-se na taxa de 25% da tensão obtida nos ensaios realizados na areia.

A deformação axial atingida na ruptura, na mistura areia-fibra, é maior do que as deformações atingidas pela areia, isso quer dizer que mesmo não oferecendo uma maior resistência, a fibra permite que o solo consiga uma maior deformação antes deste se romper.

Não foi possível observar a orientação das fibras dentro nas amostras ensaiadas, mas segundo uma análise visual das faces laterais dos corpos de prova após os ensaios triaxiais drenados de extensão, foi observada essa orientação. A Figura 6 apresenta o estado final de um corpo de prova submetido a ensaios triaxiais drenados de extensão, onde pode-se observar algumas fibras com uma orientação quase horizontal. Essa observação corrobora as observações de Diambra et al. (2007), podendo atribuir o efeito da queda da resistência a esse fator.

A Figura 7 ilustra os gráficos de deformação volumétrica vs. deformação axial. Pode-se observar que o comportamento da areia sem reforço apresenta um comportamento inteiramente dilatante ao longo de todos os ensaios triaxiais de extensão. Esse comportamento é típico de uma areia densa

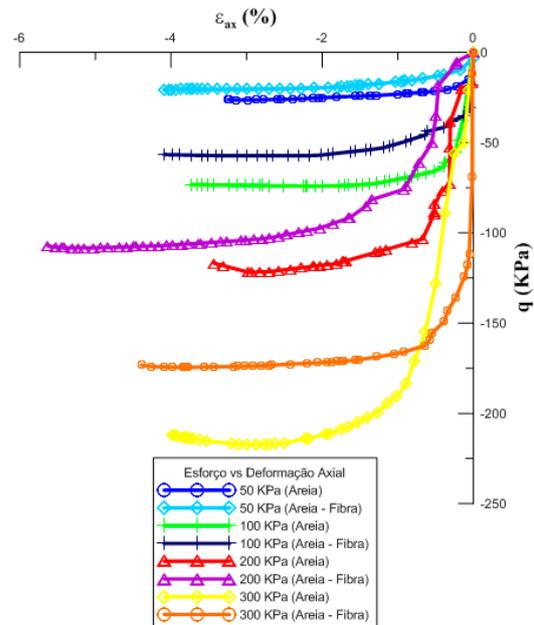


Figura 5. Tensão desviadora vs. deformação axial.

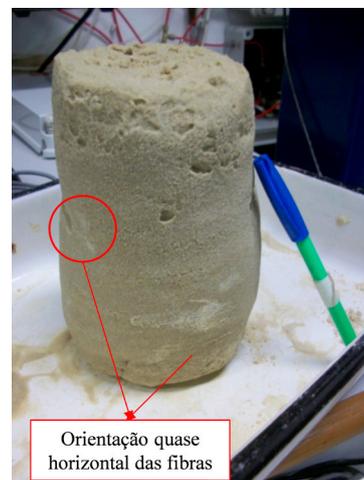


Figura 6. Estado final do corpo de prova mistura-areia-fibra.

Enquanto, na mistura areia – fibra inicialmente apresenta um comportamento expansivo até atingir a ruptura, a partir desse ponto a mistura começa a se comprimir muito de maneira súbita. Esse efeito pode ser conferido de maneira visual com a deformação que sofre o corpo de prova durante a fase de cisalhamento. Só no caso do ensaio de 200 *kPa* de tensão efetiva foi observado um comportamento compressivo quase constante na taxa de 0.5% do volume inicial do corpo de prova. De maneira geral pode-se dizer que a adição das fibras altera o comportamento da areia passando de um comportamento típico de uma areia densa a um comportamento de uma areia fofa.

A Figura 8 ilustra a comparação das envoltórias e dos parâmetros de resistência ao cisalhamento da areia e da mistura areia-fibra submetida a solicitação de extensão.

De maneira geral pode-se observar que tanto na areia quanto na mistura areia-fibra os parâmetros de resistência são maiores quando solicitados à compressão. Essa diferença dos parâmetros (basicamente no ângulo de atrito, já que a coesão foi nula) encontra-se na taxa de 27% no caso da areia e 57% no caso da mistura areia-fibra. Essa diferença também foi obtida por Cheng-Wei Chen (2010) em um estudo realizado em uma areia siltoosa reforçada e não reforçada com fibras de polipropileno.

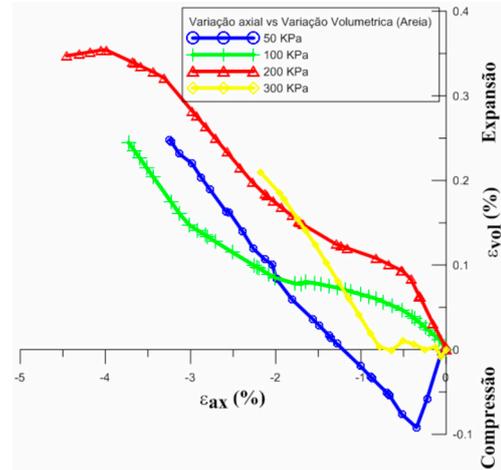
No caso dos ensaios triaxiais de extensão, foram obtidas envoltórias de resistência linear de acordo com os ensaios realizados, a diferentes tensões de confinamento, tanto na areia como na mistura areia-fibra. A areia apresenta parâmetros de resistência maiores do que os obtidos nos ensaios realizados na mistura areia-fibra. A diminuição no ângulo de atrito da mistura encontra-se na taxa de 11% do ângulo de atrito atingido pela areia.

A Figura 9 ilustra os dados de energia absorvida para a areia e para a mistura areia-fibra para os diferentes níveis de tensão empregados nos ensaios triaxiais realizados.

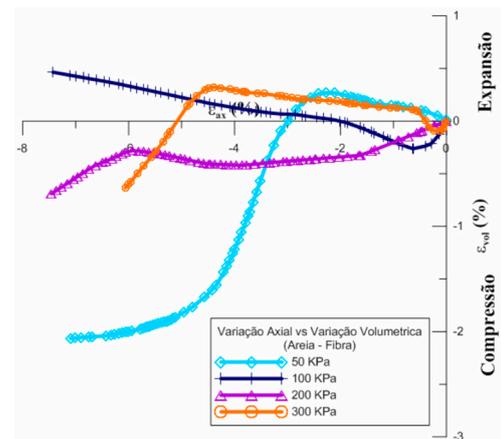
Observa-se que, para os níveis de tensão estudados, a taxa de aumento da energia de deformação absorvida não é linear. Pode-se observar também que a inclusão de fibras de polipropileno à matriz da areia estudada causa uma influência positiva na tenacidade para tensões efetivas médias iniciais abaixo dos 240 *kPa*, a partir de onde a matriz de areia apresenta uma maior energia de deformação.

Com a finalidade de conferir a trabalhabilidade das fibras dentro do compósito foi feita a medição do comprimento das fibras retiradas das

amostras após a execução dos ensaios triaxiais de extensão. Observa-se que as fibras se alongaram em todos os ensaios realizados. A Figura 10 apresenta a variação dos comprimentos das fibras para cada ensaio executado. Os resultados plotados resultaram da média de 100 medições de fibras escolhidas aleatoriamente do interior do corpo de prova ensaiado.

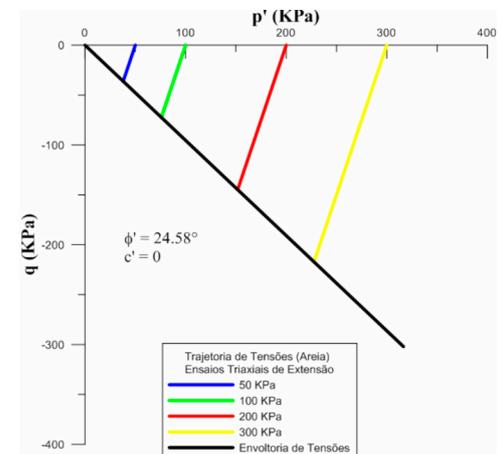


(a) Areia

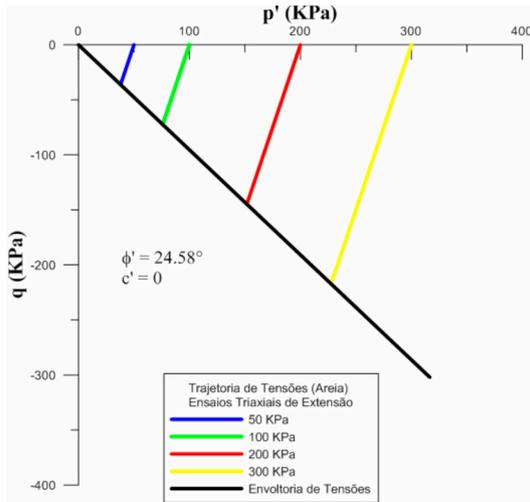


(b) Mistura areia-fibra

Figura 7. Variação volumétrica vs. deformação axial.



(a) Areia



(b) Mistura areia-fibra

Figura 8. Trajetória de tensões.

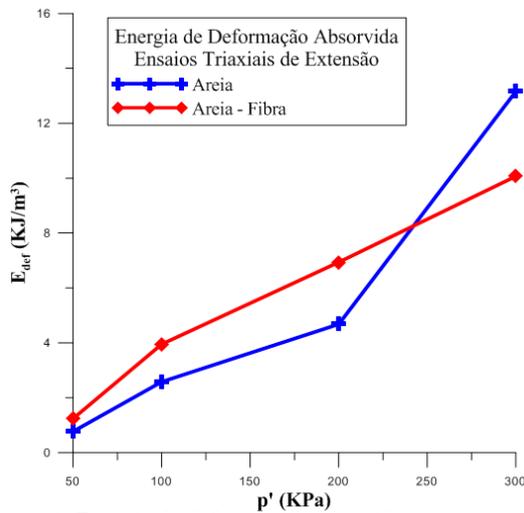
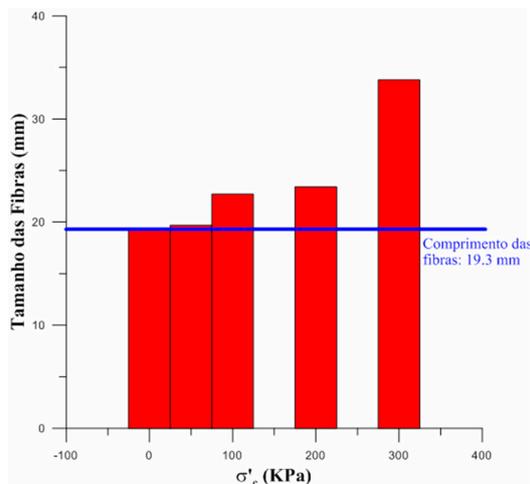


Figura 9. Energia de deformação absorvida.



Tensão Efetiva confinante	Comprimento final (mm)	% de alongamento
50	19,70	2,07%
100	22,70	17,64%
200	23,42	21,36%
300	33,78	75,06%

Figura 10. Alongamento das fibras.

O gráfico indica que as fibras atuam de forma significativa dentro da matriz da areia, mesmo assim elas não contribuem com o aumento da resistência do material composto, já que os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios triaxiais de extensão realizados na mistura areia-fibra resultaram menores do que os resultados executados na matriz de areia. O alongamento das fibras atingiu até 75% do comprimento inicial das fibras (19,3 mm), sendo a máxima extensão delas 80%, segundo dados do fabricante. Porém, espera-se que a maiores tensões de adensamento as fibras poderiam começar a romper. Neste trabalho foi observado que o alongamento das fibras é maior quando a tensão de adensamento aumenta. Não foi observada a ruptura das fibras em nenhum ensaio, mas possivelmente para maiores tensões de adensamento as fibras poderiam começar a romper.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível chegar as seguintes conclusões:

- O comportamento resistente do material composto é comandado pela matriz da areia e a presença das fibras dentro da matriz pode dificultar o contato entre as partículas do solo prejudicando a resistência do material sob solicitações de extensão;
- Os ensaios triaxiais de compressão e de extensão apresentam diferentes envoltórias de ruptura e parâmetros de resistência, sendo maior a resistência atingida pela areia e

pela mistura areia-fibra em ensaios de compressão. Essa diferença nos parâmetros de resistência da areia e a mistura areia-fibra encontra-se na taxa de 27% e 57% respectivamente;

- ♦ De maneira geral podemos concluir que a adição das fibras ao solo oferece uma queda na resistência do solo sob solicitações de extensão. Porém a utilização deste material compósito deveria ser limitado a projetos geotécnicos onde o solo vai ser solicitado a forças de compressão, onde a adição garanta um aumento considerável na resistência do material.

REFERÊNCIAS

Bishop, A.W. & Wesley, L.D. (1975) *A hydraulic tri-axial apparatus for controlled stress path testing*. Géotechnique, London, v. 25, n. 4, p. 657-660.

Casagrande, M.D.T. (2001). *Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais*. Porto Alegre, 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

Casagrande, M.D.T. (2005). *Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações*. Porto Alegre, 219p. Tese de Doutorado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

Diambra, A., Russell, A.R., Ibraim, E., & Muir Wood, D. (2007). *Determination of fibre orientation distribution in reinforced sand*. Geotechnique 57 (7), 623–628.

Cheng-Wei, C. (2010). *Triaxial compression and extension test for fiber-reinforced silty sand*. GeoShanghai. International Conference ASCE. Geotechnical Special Publication n° 207 p. 367-375.

Endereço de correspondência do autor:

PUC-Rio
Departamento de Engenharia Civil
Endereço
Rua Marquês de São Vicente 225
Edifício Cardeal Leme - sala 301
Gávea - Rio de Janeiro - Brasil
CEP: 22451-900