



AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E APLICABILIDADE DE MATERIAIS ALTERNATIVOS COMO NOVOS MATERIAIS GEOTÉCNICOS. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA AREIA SILTOSA REFORÇADA COM FIBRAS DE CURAUÁ (ANANAS ERECTIFOLIUS)

Larissa Victoria dos Santos Veloso (*), Matheus Machado Lopes, Michéle Dal Toé Casagrande

* Universidade de Brasília, larissa.victoria.s.veloso@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho buscou avaliar o uso de fibras de curauá com 1,5 cm de comprimento para reforço de solos aplicados a área da geotecnia. Para analisar o comportamento mecânico de uma areia siltosa reforçada com fibras de curauá foram realizados ensaios de cisalhamento direto com compósitos solo-fibra nas proporções de 0,5% e 1,0% de fibra com relação ao peso do solo seco com 50% de densidade relativa. Os resultados obtidos mostram que os compósitos solo-fibras tiveram um aumento no ângulo de atrito e o intercepto coesivo do solo, sendo estes resultados significativos do ponto de vista geotécnico.

PALAVRAS-CHAVE: Fibras de Curauá, Ensaio de Cisalhamento, Materiais Alternativos, Fibras Naturais

ABSTRACT

The present work sought to evaluate the use of curauá fibers to reinforce conceptual soils in the geotechnical area. To analyze the mechanical behavior of silty sand reinforced with curauá fibers, direct shear tests were performed with soil-fiber composites in the proportions of 0.5% and 1.0% of fiber in relation to the weight of the dry soil with 50% of relative density. The results obtained show that the soil-fiber composites have an increase in the angle of friction and the cohesive intercept of the soil, these results being obtained from the geotechnical point of view.

KEY WORDS: Curauá Fibers, Shear Test, Alternative Materials, Natural Fibers

INTRODUÇÃO

O engenheiro ambiental é um profissional que procura criar soluções sustentáveis para a resolução de problemas. Deste modo, na área da geotecnia é importante que um engenheiro ambiental encontre novos materiais geotécnicos que resolvam empecilhos de estabilização do solo de modo sustentável, economicamente viável e tão promissor quanto os materiais sintéticos.

Por ser um material heterogêneo de bastante complexidade e variável, ocorre de maneira costumeira que o solo não atenda as exigências totais ou parciais de um projeto. Desta maneira, o engenheiro para tornar o projeto viável financeiramente, pode retirar o solo existente no território e trocá-lo por outro material que se enquadre nas características necessárias para atender o projeto (Casagrande, 2005).

Atualmente, existe uma grande quantidade de novos materiais sendo desenvolvidos, geralmente com base em alguns já existentes, mas com a incorporação de algum elemento como forma de reforço, porém é necessário o conhecimento prévio das propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição e a maneira como eles possam ser combinados (Palacios, 2012).

Incorporar fibras ao solo pode ser considerada uma boa técnica de melhoria, dependendo da interação entre o solo e as mesmas, visto que esta pode possibilitar a redução de fissuração, assim como o aumento da ductilidade do solo, para que as fibras atuem é necessário que haja uma certa presença de fração granular (Sales, 2011). A influência da adição de fibras ao solo proporciona o desenvolvimento de um novo material geotécnico com características próprias, observado pela melhoria das propriedades mecânicas do novo material (Casagrande, 2005).

Apesar de as fibras de origem sintéticas serem as mais utilizadas quando comparadas com as fibras de origem natural, as de origem natural apresentam algumas relevâncias quando comparadas com as de origem sintética, sendo elas: as fibras naturais são de baixo custo, possuem boas propriedades mecânicas, requerem menos energia no processo de produção, são de fontes renováveis, não geram grandes quantidades de resíduos e empregam tecnologias que são consideradas simples (Ghavami et al., 1999; Dittenber e Gangarao, 2012; Martins, 2014; Silveira, 2018; Lopes e Casagrande, 2019).



Encontrar novos materiais que possam ser utilizados como materiais geotécnicos é imprescindível para o campo da geotecnia, como no caso das fibras de curauá as quais vem sendo estudadas como reforços de solos, e de acordo com os estudos já realizados estas fibras apresentam diversas vantagens ao serem utilizadas como reforços nos solos.

OBJETIVOS

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento mecânico de compósitos solo-fibra após a inclusão de fibras naturais de curauá em um solo arenoso, no qual as fibras possuem 1,5 cm de comprimento e foram distribuídas de maneira aleatória na porção do solo. Além disso, analisar as influências dos teores de fibras (0,5% e 1,0%), nos parâmetros de resistência dos compósitos estudados.

MATERIAIS

SOLO

A areia siltosa utilizada no presente trabalho foi adquirida em um estabelecimento comercial localizado na Região Administrativa – RA X, Guará, Distrito Federal. Após a coleta, as amostras utilizadas foram preparadas de acordo com os procedimentos indicados na Norma Brasileira – NBR 6458 (ABNT, 2016).

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do solo.

Tabela 1. Índices físicos da Areia Siltosa.

| Índices Físicos | Valor |
|------------------------------|---------|
| Densidade real dos grãos | 2,68 |
| Índices de vazios | 0,74 |
| Diâmetro efetivo | 0,18 mm |
| Diâmetro médio | 0,39 mm |
| Coefficiente de uniformidade | 2,4 |
| Coefficiente de curvatura | 1,06 |
| Índice de vazios máximo | 0,894 |
| Índice de vazios mínimo | 0,586 |

Este solo é classificado como uma areia média pela NBR 6502 (ABNT, 1995) e de acordo com o Sistema de Classificação dos Solos- SUCS, uma areia bem graduada (SW), sem características plásticas. A partir da curva granulométrica mostrada abaixo pode-se observar que o solo estudado é composto de 95,9% de areia, 2,6% de silte e 1,5% de argila.

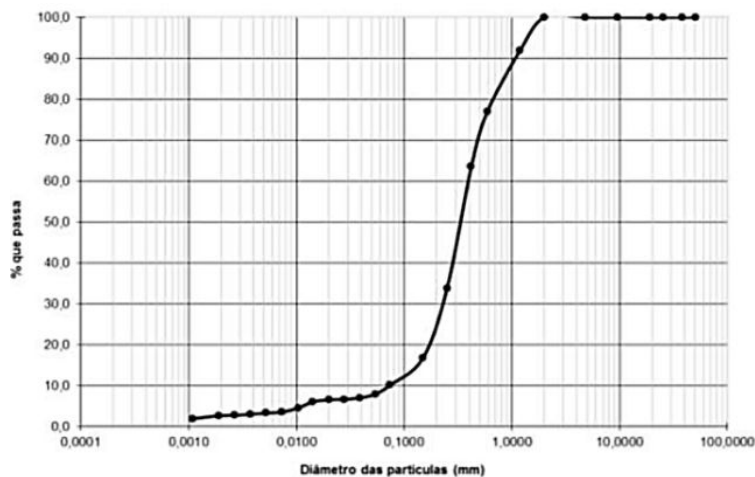


Figura 1: Curva da análise granulométrica do solo. Fonte: Carvalho, 2019



FIBRAS

As fibras utilizadas para reforçar o solo são de origem vegetal obtidas a partir da folha do curauá (*Ananas erectifolius*). A fibra de curauá desperta bastante interesse em sua utilização como reforço, pois por ser originada por meio das folhas, esta tende a ser mais “dura” enquanto as fibras do talo são mais “macias”, sendo mais utilizadas para fins têxteis (Santiago, 2011).

O Curauá é uma espécie hidrofílica da região amazônica. Possui folhas duras, eretas e superfícies plana. A *Ananas erectifolius* não depende de solos altamente férteis, nascendo até mesmo em solos arenosos (Oliveira, 2010). As folhas do curauá podem chegar até a 1,5m de comprimento e 4,0 cm de largura (Santos, 2009).

Além disso, o cultivo da planta não provoca a degradação da mata nativa, contribui com a revitalização de terras desmatadas, não é exigente a fertilizantes químicos e pode ser consorciada com culturas alimentares, o que representa uma fonte alternativa de renda e garante também a segurança alimentar ao pequeno agricultor da região amazônica. (Santiago, 2011).

As fibras utilizadas na elaboração deste trabalho foram cortadas no comprimento de 15mm e passaram por um processo de preparação com limpeza. Este processo de limpeza resume-se em colocá-las em uma panela com água na temperatura de 100°C por um período de 30 minutos e depois colocar as fibras para secar ao ar livre.



Figura 2: Plantação de curauá. Fonte: Santiago, 2011.



Figura 3: Seleção e corte das fibras. Fonte: Carvalho, 2019.



Figura 4: Lavagem das fibras na água com a temperatura de 100 °C. Fonte Carvalho, 2019.



Figura 5: Secagem das fibras ao ar livre. Fonte: Carvalho, 2019.

METODOLOGIA

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto para a avaliação do comportamento mecânico de compósitos solo-fibra. Os ensaios foram feitos em amostras de solo puro e misturas de solo com fibras, para duas diferentes porcentagens de fibras, sendo elas 0,5% e 1,0% de fibra. As fibras foram distribuídas no solo de maneira aleatória e uniforme. Além disso, vale ressaltar que a densidade relativa utilizada no solo foi de 50% e as tensões de confinamento estabelecidas durante os ensaios foram de 50, 100 e 200 kPa.

ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio de cisalhamento direto é um teste de ângulo de atrito onde uma parte do solo se move sobre a outra por conta do aumento de tensões cisalhantes horizontais, enquanto uma carga constante é aplicada sobre o plano normal, relativo ao movimento (Head, 1994; Lopes, 2019).

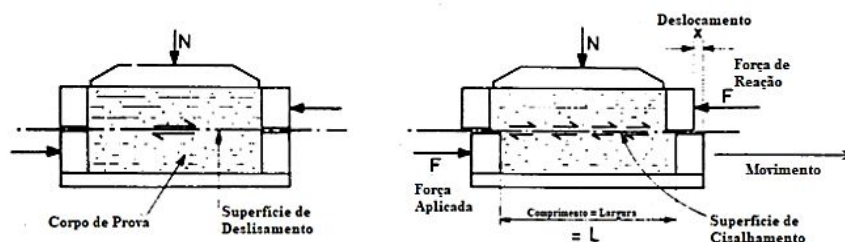


Figura 6: Princípios do cisalhamento direto. Fonte: adaptado de Head, 1994; Lopes 2019.



Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados para avaliar a influência do teor de fibras de curauá 0,5% e 1,0% no solo arenoso. Foram realizados variando a tensão normal entre os valores de 50, 100 e 200 kPa. Os corpos de prova foram feitos dentro de uma caixa de cisalhamento com as dimensões de 60mm x 60 mm x 25 mm.

A densidade relativa dos compósitos foi mantida em 50% e o comprimento das fibras em 15mm. As fibras foram distribuídas de maneira aleatória, pois a disposição dispersa minimiza o surgimento de qualquer tipo de anisotropia e não induz planos preferencias de fraqueza (Gray & Al-Refai, 1986; Gray & Maher, 1989; Maher & Gray, 1990; Silveira, 2018).



Figura 7: Equipamento cisalhamento direto. Fonte: Lopes, 2019.

RESULTADOS

Os compósitos mostrados nas figuras a seguintes, foram identificados da seguinte maneira:

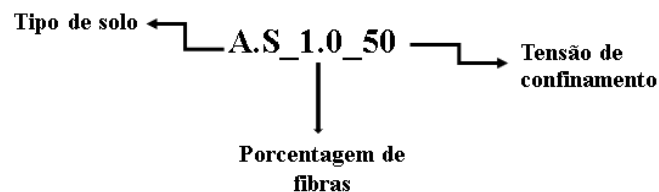


Figura 8. Explicação da legenda dos compósitos.

A Figura 9 mostra os resultados do ensaio de cisalhamento direto para os compósitos com a areia siltosa, diante disso, pode-se observar que as curvas do compósito solo-fibras de 0,5 e de 1% continuam crescentes para todas as tensões de confinamento, isso mostra que caso fosse possível continuar aumentando o deslocamento provavelmente, para todas as tensões, os compósitos solo-fibras 1,0% poderiam se sobressair em comparação ao de 0,5%.

Além disso, os resultados obtidos para o solo arenoso com densidade relativa de 50%, mostram que os compósitos apresentaram melhorias nos parâmetros de resistência ao cisalhamento para as três tensões de confinamento (50, 100 e 200kPa), como pode ser observado no gráfico da Figura 9.

Analisando as curvas, de maneira geral pode-se observar que para as três tensões de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa as misturas areia-fibras ficaram crescentes, com uma certa diferença quando comparadas com o solo arenoso. O comportamento crescente das fibras era o resultado esperado, pois como foi comprovado por Casagrande (2005), depois do momento em que as fibras são mobilizadas existe uma taxa de crescimento de resistência, que é independente das tensões efetivas médias iniciais.

Para a tensão de 100 kPa as misturas areia-fibras mostram-se mais efetivas do que a areia siltosa. E para a tensão de confinamento de 200 kPa o compósito solo-fibra começou a ser mobilizadas a partir de 5 mm de deslocamento, quando ocorre a ruptura do solo arenoso, com a queda pós-pico.



Porém, analisando as curvas no pico, ou melhor, no deslocamento de 10mm, pois as curvas possuem um comportamento crescente e o equipamento utilizado tem uma limitação de até 10mm de deslocando. É possível notar que para a tensão de confinamento de 50 kPa, o compósito AS_0.5_50 teve resistência de pico de 37,0 kPa e o compósito AS_1.0_50 apresentou resistência de pico de 36,3 kPa, com aumento de 17,78% e 9,67%, respectivamente, em relação ao solo arenoso (AS_50) de 33,1 kPa.

Já para a tensão de confinamento de 100 kPa, o compósito AS_0.5_100 teve uma resistência de pico de 70,0 kPa e o composto AS_1.0_100 teve uma resistência de pico de 72,0 kPa, com 11,11% e 14,29%, respectivamente, maior do que a areia siltosa (AS_100) de 63,0 kPa.

Por fim, para a tensão de 200 kPa, o compósito AS_0.5_200 teve uma resistência de pico de 124,4 kPa, enquanto o compósito AS_1.0_200 teve uma resistência de pico de 130,0 kPa, com 14,65% e 19,82%, respectivamente, maior do que a areia siltosa (AS_200) de 108,5 kPa.

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que as fibras de curauá utilizadas como reforço em um solo arenoso com densidade relativa de 50% funciona bem para as porcentagens de 0,5% e 1,0% de fibras, porém para a tensão de 50 kPa a porcentagem de 0,5% teve um desempenho consideravelmente maior em comparação com a fibra de 1,0% para a mesma tensão. Já para as maiores tensões de 100 kPa e 200 kPa a porcentagem de 1,0% de fibra teve um desempenho superior ao de 0,5%.

A Figura 10 apresenta as envoltórias de resistência obtidas para a areia siltosa e compósitos solo-fibra de curauá, considerando os teores de fibras de 0,5% e 1,0%. Todos pontos do gráfico abaixo foram retirados a 10 mm de deslocamento, porque como dito anteriormente, o equipamento disponível no Laboratório de Geotecnia da UnB possui a limitação de 10mm de deslocamento, sendo assim, não foi possível realizar os ensaios até que os compósitos solo-fibras atingissem o pico.

Na Tabela 2 é possível observar e comparar as diferenças entre os parâmetros de ângulo de atrito e coesão entre o solo arenoso e os compostos solo-fibra, além disso, há também as equações e os parâmetros utilizados nos ajustes das retas, retrato pelo R².

É possível observar que a inserção das fibras garantiu um aumento positivo no parâmetro de resistência do solo arenoso. Ambos os teores obtiveram resultados semelhantes de ângulo de atrito, quando comparados com a areia siltosa, porém quando confrontados, o compósito areia-fibra 0,5% com o 1,0% é possível notar que o compósito de 1,0% foi um pouco mais efetivo, mas no geral os resultados foram praticamente iguais, mostrando que o teor de fibra quase não influenciou no ângulo de atrito do compósito, ambos resultados foram positivos.

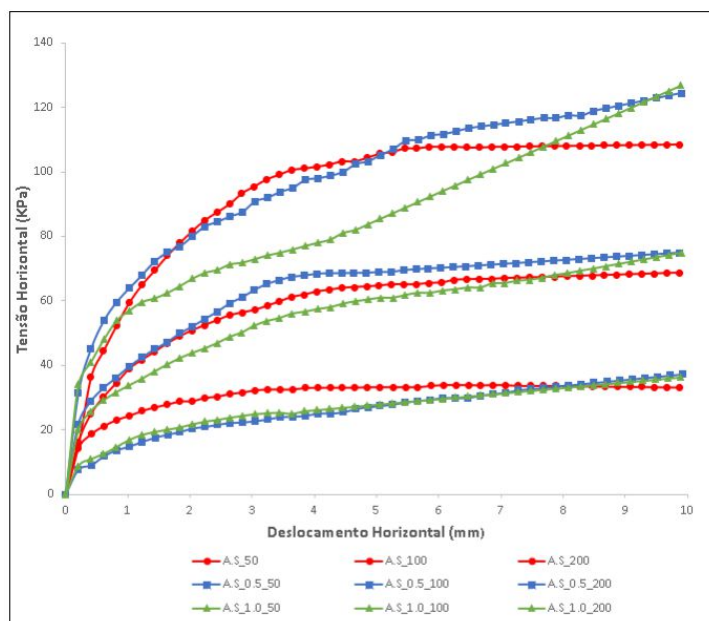


Figura 9: Curva das tensões de cisalhamento versus deslocamento horizontal dos compósitos

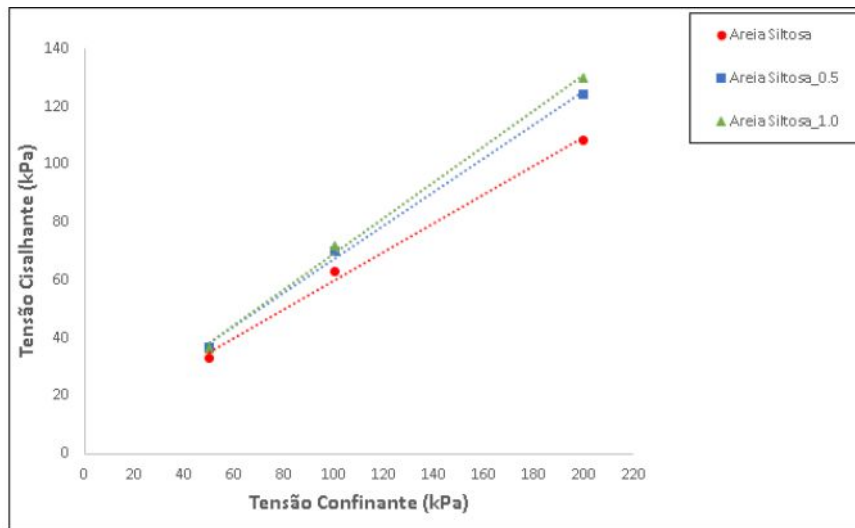


Figura 10: Envoltória de resistência para o solo arenoso e misturas solo-fibra de curauá.

Já para o parâmetro de resistência do solo, coesão, a inclusão das fibras proporcionou uma redução na mesma. Ambos os teores apresentaram queda na redução de coesão, porém o compósito com o teor de fibra de 1,0% se mostrou mais efetivo para diminuição da coesão. A redução nos valores de coesão obtidos, como se trata de coesão aparente e não de coesão verdadeira obtida para a areia siltosa, não representa uma perda de resistência com a inserção de fibras e sim um ajuste gráfico ocorrido devido ao aumento do ângulo de atrito dos compósitos solo-fibra.

Vale ressaltar que os valores dos ângulos de atrito deram altos porque a areia utilizada é angulosa, além de possuir grãos mais finos de silte entre os grãos de areia o que faz com que o índice de vazios diminua valorizando a resistência dos materiais.

Tabela 2 - Parâmetros das retas de tensão confinante versus tensão cisalhante.

| Compósito | Ângulo de atrito | Coesão (kPa) | Equação da reta | R ² |
|-------------------|------------------|--------------|------------------|----------------|
| Areia-Siltosa | 26,4 | 10,4 | $Y=0,50*X+10,38$ | 0,995 |
| Areia-Siltosa_0.5 | 30 | 9,8 | $Y=0,60*X+9,79$ | 0,998 |

CONCLUSÕES

A análise do reforço do solo arenoso com fibras naturais de curauá (*Ananas erectifolius*) demonstrou-se muito significativo, no qual os resultados mostraram uma verdadeira melhoria no solo estudado, de um ponto de vista geotécnico, cumprindo o seu papel na atuação sobre a resistência ao cisalhamento.

Para os compósitos com fibra de curauá nas porcentagens de 0,5% e 1,0% é possível observar que os valores do ângulo de atrito tiveram um aumento significativo quando comparado com os resultados obtidos para o solo areno-siltoso. Já para o intercepto coesivo a inclusão das fibras resultou em uma ligeira redução, sem impacto na resistência final do compósito, por ser uma coesão aparente.

Quando confrontados os resultados encontrados para os teores de fibra estudados, observa-se que estes tiveram um desempenho similar. Sendo que a porcentagem de 1,0% teve uma ligeira melhoria. Como as duas porcentagens de fibras tiveram resultados crescentes e positivos pode-se concluir que o teor de fibra (0,5%, 1,0%) não causou influências tão significativas na resistência.

Por fim, pode-se concluir que a adição das fibras de curauá ao solo areno-siltoso resultou na criação de um novo material geotécnico com características próprias, o que pode ser visto pelo incremento das propriedades mecânicas do solo, fazendo com que este se torne um melhor material para ser utilizado em aplicações geotécnicas, como por exemplo reforço de taludes e aterros.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (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, 10 p.
2. CARVALHO, L.M.C. (2019). Comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras naturais submetido a ensaios de cisalhamento direto em média escala. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-324/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105 p.
3. CASAGRANDE, M.D.T. (2005). Comportamento de solos reforçados com fibras submetidas a grandes deformações. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Brasil. 219p.
4. DITTENBER, D. B., GANGARAO, H. V. S. (2012). Critical Review of Recent Publications on Use of Natural Composites in Infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8), 1419- 1429.
5. GHAVAMI, K., TOLEDO FILHO, R. D., BARBOSA, N.P. (1999). Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites* 21.
6. GRAY, D.; AL-REFAI, T. Behaviour of fabric versus fibre-reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, v. 112, n. 8, p. 804–826, 1986.
7. GRAY, D.; MAHER, M. Admixture stabilization of sand with discrete randomly distributed fibers. In: *Proceedings of XII international conference on soil mechanics and foundation engineering, Rio de Janeiro, Brazil. [S.l.: s.n.], 1989. v. 2, p. 1363–1366.*
8. HEAD, K.H. (1994). *Manual of Soil Laboratory Testing – Volume 2*. John Wiley & Sons, New York, USA, 440 p.
9. LOPES, M. M., CASAGRANDE, M.D.T. (2019). Estudo do Comportamento de um Solo Reforçado com Fibras de Açaí (*Euterpe oleracea*). *Anais do Simpósio de Prática de engenharia geotécnica na região centro oeste (Geocentro 2019)*.
10. LOPES, M.M. (2019). Estudo do comportamento físico-mecânico de solos reforçados com fibras de açaí (*Euterpe oleracea*). Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 108 p.
11. MAHER, M.; GRAY, D. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, v. 116, n. 11, p. 1661–1677, 1990.
12. MARTINS, A.P.S. (2014). Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal. Tese (Doutorado) – UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro
13. OLIVEIRA A.F. Avaliação de desempenho de fibras lignocelulósicas na sorção de óleos diesel e biodiesel. Botucatu, 2010, 123p. Tese - Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp
14. PALACIOS, M. (2012). Comportamento de uma Areia Reforçada com Fibras de Polipropileno Submetida a Ensaios Triaxiais de Extensão. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
15. SALES, K. C. DOS S. (2011). Melhorias de Solos por Inclusão de Fibras Naturais. 113 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília. Programa de Pós Graduação em Geotecnia. Brasília.
16. SANTIAGO, G.A. (2011). Estudo do Comportamento Mecânico de Compósitos Solo-Fibras Vegetais Impermeabilizadas com Solução de Poliestireno Expandido (EPS) e Cimento 83 Asfáltico de Petróleo (CAP). Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Brasil. 130p.