



## 45ª RAPv – REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO 19º ENACOR – ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA

Brasília, DF – de 20 a 23 de Setembro de 2016

### ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE SOLOS CARACTERÍSTICOS DO DISTRITO FEDERAL REFORÇADOS COM FIBRAS DE SISAL E POLIPROPILENO PARA O USO EM PAVIMENTAÇÃO: ESTUDO DE CASO

*Darym Júnior Ferrari de Campos*<sup>1</sup>; *Hugo Fernando Soares Pedroso*<sup>2</sup>; *Jairo Furtado Nogueira*<sup>3</sup>; *José Camapum de Carvalho*<sup>4</sup>

**RESUMO:** Nos últimos anos diversas técnicas que visam à modificação e melhoramento das propriedades do solo vêm se consolidando no meio técnico-científico e estas são capazes de gerar um novo material, que atenda às exigências das normas vigentes. Uma das possíveis técnicas de melhoria do comportamento do solo é a inclusão de fibras sintéticas ou naturais. Partindo desse pressuposto, o presente trabalho estuda o comportamento de um solo característico do Distrito Federal com a inclusão de dois tipos de fibras (Sisal e Polipropileno). As análises foram verificadas por meio de ensaios geotécnicos de laboratório. Primeiramente, realizaram-se os ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica dos grãos, granulometria do solo e ensaio de metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical) sob três condições: solo em estado natural, solo após secagem prévia e solo com adição de areia. Posteriormente, foram realizados os ensaios de compactação, expansão e Índice de Suporte de Califórnia (ISC), incluindo o uso das fibras. De um modo geral, a pesquisa avaliou que, com exceção da inclusão de fibras de polipropileno, os demais materiais atenderam os pré-requisitos para a utilização em sub-base de pavimentos flexíveis. Ressalta-se que as análises e os resultados obtidos nesta pesquisa estão limitados ao estudo experimental apresentado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilização de Solos, Fibras de Sisal, Fibras de Polipropileno, Ensaios Laboratoriais.

**ABSTRACT:** In recent years several techniques aimed at modification and improvement of soil properties have been consolidating in the technical-scientific area and these are able to generate a new material that meets the requirements of the current regulations. One of the possible techniques of improving soil behavior is the inclusion of synthetic or natural fibers. Starting from this assumption, this paper studies the behavior of a characteristic soil of Distrito Federal with the inclusion of two types of fibers (Sisal and polypropylene). The analyses were verified through practical geotechnical laboratory. First of all, there were performed the liquidity and the plasticity limit tests, specific weight of the grains, soil granulometry and MCT (Tropical Compressed Miniature) under three conditions: the soil in its natural state, after prior drying and with addition of sand. Finally, there were performed compression, expansion and California Support Index (ISC), including the use of fibers. In General, the research evaluated that with the exception of the inclusion of polypropylene fibers, the other materials have attended the requirements for use in flexible flooring subfloor. It should be noted that analyses and the results obtained in this research are limited to experimental study presented.

**KEYWORDS:** Soil Stabilization, Sisal Fibers, Polypropylene Fibers, Laboratory Tests.

1 Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, [darymjuniior@gmail.com](mailto:darymjuniior@gmail.com)  
2 Engenheiro Civil, Centro Universitário de Brasília, [engcivilhugo@gmail.com](mailto:engcivilhugo@gmail.com)  
3 Professor do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Brasília, [jairofurtado@yahoo.com.br](mailto:jairofurtado@yahoo.com.br)  
4 Professor titular do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, [camapumdecarvalho@gmail.com](mailto:camapumdecarvalho@gmail.com)

## INTRODUÇÃO

Desde a década de 50 a utilização de solos finos em estruturas de pavimentos é utilizada, pois tornou-se uma alternativa técnica e economicamente viável.

Tendo em vista a possibilidade de um solo natural não atingir as características exigidas em projeto, técnicas como estabilização química ou com inclusão de fibras sintéticas ou naturais podem ser capazes de conduzir o solo a atender tais exigências.

Recentemente, Sales (2011), Consoli *et al.* (2006 e 2009), Donato (2007) e Trindade *et al.* (2006) estudaram a incorporação de fibras para a melhoria do comportamento e resistência à tração dos solos. Vale ressaltar que os resultados dependerão da interação entre o solo e a fibra, visto a possibilidade de redução de fissuração, assim como a possibilidade do aumento da ductibilidade e da tenacidade do solo. Segundo os mesmos autores, geralmente, faz-se necessário a presença de certa fração granular para se obter um melhor reforço no solo analisado.

Neste contexto, o presente trabalho analisa como se comportam as propriedades do solo de uma amostra deformada coletada em um empreendimento residencial em construção de Brasília-DF. Primeiramente foram realizados ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica dos grãos, granulometria do solo e ensaios de metodologia MCT sob três condições: em estado natural, após secagem prévia e com adição de areia.

Posteriormente, foram incorporadas as fibras vegetais de sisal e sintéticas de polipropileno no solo com areia previamente adicionada e, finalmente, ensaiou-se a amostra submetida à compactação, expansão e ISC. No mesmo local de coleta da amostra foi projetada uma saída de garagem, portanto, as análises foram feitas com intuito de avaliar a possibilidade do uso das misturas solo-fibra na melhoria do solo a ser usado na rampa de acesso ao edifício.

## MATERIAIS UTILIZADOS

### Área de Estudo

As realizações dos ensaios laboratoriais iniciaram-se após a coleta de uma amostra deformada de um solo superficial localizado em Brasília-DF. A amostra foi retirada de um empreendimento residencial situado no Plano Piloto, Asa Norte, com coordenadas geográficas latitude 15°44'19.51" Sul e longitude 47°53'39.88" Oeste. Na Figura 1 expõe-se o processo de retirada da amostra coletada.



Figura 1. Retirada da amostra deformada de solo.

## Amostra Coletada

A amostra foi estrategicamente coletada em campo no local representado pela saída da garagem do edifício, sendo o solo identificado como um material predominantemente argiloso, típico da região. De acordo com o objetivo do trabalho, caracterizou-se inicialmente o solo coletado em três condições diferentes. Primeiramente, em seu estado encontrado em campo, preservando suas características e evitando alterações de umidade (Solo 1). Em seguida, caracterizou-se outra parte do mesmo solo conforme as recomendações da NBR 6457/86 de preparação de amostras (Solo 2) e finalmente, a última parte do solo com a adição de 25% de areia (Solo 3).

## Fibras Utilizadas

Utilizaram-se dois tipos de fibras para os ensaios de compactação, expansão e ISC, presentes na pesquisa. Na Tabela 1 apresentam-se os tipos e características das fibras e na Figura 2 expõem-se as respectivas fibras utilizadas em laboratório.

Tabela 1. Tipos de fibras utilizadas.

Tipos de fibra	Características
Fibra de polipropileno (PP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comprimento: 6mm;</li> <li>• Descrição: Fibras sintéticas, quimicamente inertes, estáveis, não absorve água, não oxida e baixa condutividade elétrica/hidráulica.</li> </ul>
Fibra de sisal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comprimento: 15mm;</li> <li>• Descrição: Fibras vegetais, podem gerar benefícios aos solos e maior resistência a tração</li> </ul>

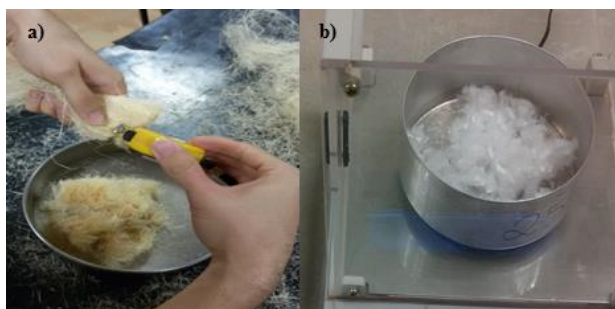


Figura 2. a) Fibra de sisal; b) Fibra de polipropileno.

A escolha dos dois tipos de fibra serviu para uma melhor avaliação e para o comparativo em relação ao comportamento no solo estudado.

## Areia Utilizada

Com o objetivo de oferecer maior ancoragem das fibras a matriz do solo, a areia adicionada foi coletada no próprio canteiro de obras. Neste contexto, duas amostras foram analisadas, resultando em uma granulometria com módulo de finura média, conforme apresentado na Figura 3.

A massa específica da areia foi determinada por meio do frasco de Chapman e partir das leituras realizadas segundo a NBR 9776/87, encontrou-se valor médio final de 2,65 g/cm<sup>3</sup>.

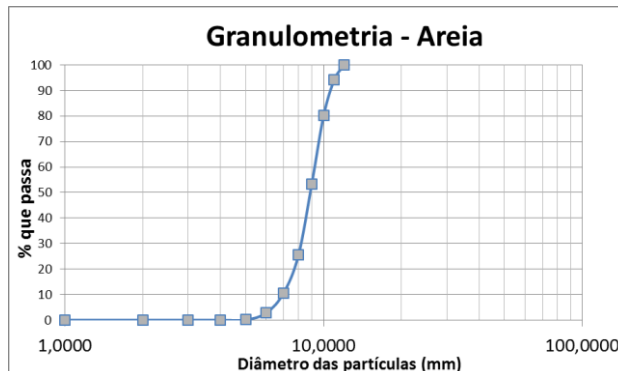


Figura 3. Curva granulométrica da areia.

## METODOLOGIA

### Preparação da Amostra

De acordo com a NBR 9603/86, as amostras foram devidamente coletadas e, posteriormente preparadas conforme as recomendações da NBR 6457/86 para os ensaios de caracterização e compactação.

### Caracterização do Solo

Para os ensaios de análise granulométrica, as orientações seguiram os procedimentos preconizados na norma NBR 7181/84. Posteriormente, as três diferentes condições do solo foram submetidas aos procedimentos de ensaio de peneiramento e sedimentação, com e sem a adição do defloculante hexametáfosfato de sódio.

Os limites de Atterberg foram obtidos por meio dos ensaios de limite de liquidez (NBR 6459/84) e limite de plasticidade (NBR 7180/84).

Finalmente, pelo fato de se lidar com a presença de solos tropicais na região, foram realizados ensaios expeditos para classificação MCT – Miniatura Compactado Tropical, recomendado por Nogami e Villibor (1994).

### Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados com a aplicação da energia *Proctor* intermediária, como forma de verificar a possibilidade de utilizar o material como camada de sub-base de um pavimento flexível.

Durante a realização dos ensaios, acondicionou-se o Solo 1 em sacos plásticos hermeticamente fechados, buscando preservar suas características naturais e evitar alterações de umidade.

Iniciaram-se os ensaios de compactação de acordo com o preconizado na NBR 7182/86, com a moldagem de corpos de prova. Para tal, foram realizadas as curvas de compactação com cinco pontos em cada, sendo pelo menos 2 em cada ramo da curva de compactação.

Para a presente pesquisa e observando os resultados obtidos por Sales (2011), optou-se por avaliar o Solo 3 com a inclusão de 0,25% e 0,50% de fibra de polipropileno e sisal em relação à massa do solo seco, além da avaliação do Solo 1 e Solo 2, que representam o mesmo solo, mas sem a presença de areia e fibra.

## Expansão e Índice de Suporte Califórnia

Após a compactação dos corpos de prova, realizou-se o ensaio de expansão com base na norma NBR 9895/87. Posteriormente, realizado o ensaio de expansão, deu-se início ao Índice de Suporte Califórnia, regido pela mesma normatização.

Para o uso em estruturas de pavimentos os ensaios têm que atender aos requisitos expostos no Manual de Pavimentação do DNIT (2006). Para a classificação dos materiais de sub-base, a expansão necessita ser menor ou igual a 1%, Índice de Grupo igual a 0 e o C.B.R maior ou igual a 20%.

## RESULTADOS E ANÁLISES

### Análise Granulométrica

Ao analisar as curvas granulométricas dos três diferentes estados do solo, observou-se primeiramente a Figura 4, representada pelo Solo 1.

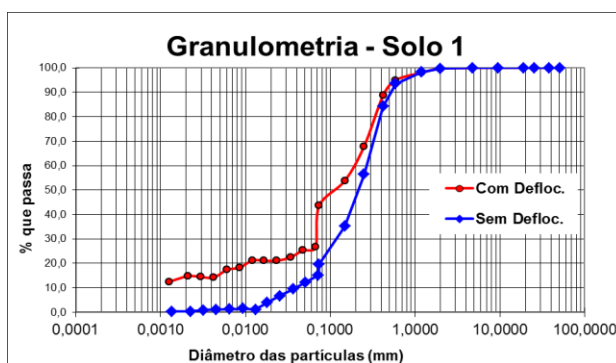


Figura 4. Curva Granulométrica com e sem Defloculante.

O Solo1, mesmo com a utilização do defloculante hexametáfosfato de sódio, apresentou-se com predominância arenoso-siltoso, com cerca de 4,60% de areia grossa, 34,10% de areia média, 35,70% de areia fina, 11,07% de silte e 14,50% de argila. Sem o uso do defloculante resultou em 6,00% de areia grossa, 47,70% de areia média, 32,40% de areia fina, 13,20% de silte e ainda 0,30% de argila, classificando-se como uma areia siltosa. Observou-se na Figura 5 a análise do Solo 2.

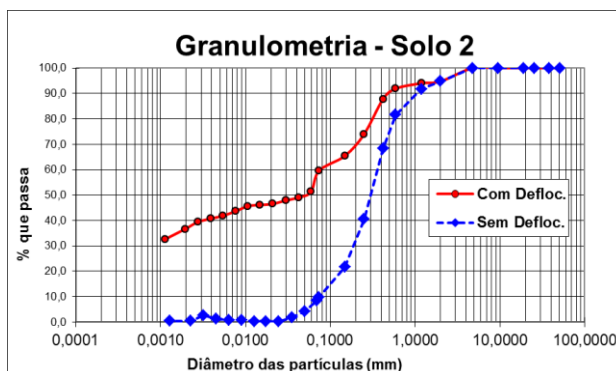


Figura 5. Curva Granulométrica com e sem Defloculante.





Nota-se uma mudança no resultado em relação ao Solo 1. O ensaio com a utilização do defloculante apresentou-se com uma maior quantidade de argila (provavelmente devido à quebra das partículas ao destorroar a amostra e pela desagregação do solo com o uso do hexametáfosfato de sódio). Esse comportamento já havia sido observado por Camapum de Carvalho (2004) para solos do Distrito Federal.

O material consistiu em 2,8% de areia grossa, 22,2% de areia média, 18,40% de areia fina, 14,50% de silte e 36,90% de argila. Sem o uso do defloculante e ressaltando o fato das partículas de argila possuírem uma grande dificuldade de desagregação, o solo voltou a apresentar-se como arenoso-siltoso, com 13% de areia grossa, 50,60% de areia média, 24,80% de areia fina, 5,60% de silte e apenas 0,40% de argila.

Na Figura 6, com base nos resultados realizados por Sales (2011), realizou-se a análise granulométrica do Solo 3 com adição de uma fração granular. O objetivo foi verificar a possibilidade do uso em camada de sub-base de pavimento flexível.

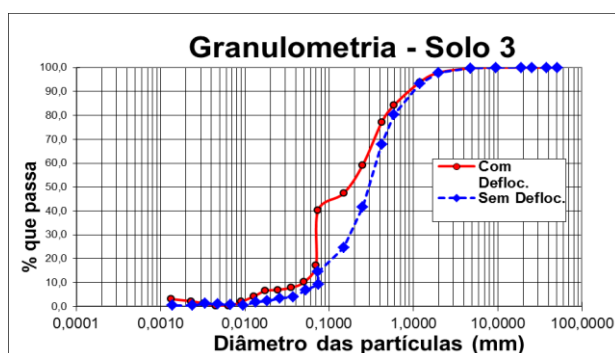


Figura 6. Curva Granulométrica com e sem Defloculante

Quando comparado o resultado do percentual de argila (2,5%) e silte (11,2%), com o Solo 1 e 2 após o uso do defloculante, notou-se os menores valores da fração fina até então. Como esperado, devido ao acréscimo de areia, 13,5% do material consiste em areia grossa, 31,1% em areia média e 39,7% em areia fina. Sem o uso do defloculante, a adição de areia praticamente não alterou a granulometria, pois o material apresentou 17,3% de areia grossa, 47,4% de areia média, 25,50% de areia fina, 7,20% de silte e apenas 0,50% de argila.

Em resumo, os três ensaios apresentaram resultados semelhantes sem o uso do defloculante, provavelmente pelo fato do solo de Brasília apresentar-se como laterítico, e no caso estudado, os agregados ou concreções constituintes não sofreram notavelmente desagregação em água durante as prévias preparações da amostra, apresentando certa resistência a água destilada. Já os ensaios com o uso de defloculante tiveram diferença nos resultados, confirmando a influência do poder de desagregação do solo com o uso químico do hexametáfosfato de sódio, separando as frações de argila das de areia e silte para cada caso analisado. Destaca-se, no entanto, que assim como o solo mostrou-se susceptível a alteração sob ação de agente químico, ele também poderá com a secagem ser degradável pela ação mecânica da compactação.

### Massa Específica Real dos Grãos

O ensaio da massa específica real dos grãos foi necessário para a obtenção dos resultados da sedimentação, mostrado anteriormente. Sua fundamentação teórica se baseia no princípio de Arquimedes, segundo o qual um corpo submerso num líquido desloca um volume deste igual ao



volume do próprio corpo.

Na Tabela 2 apresentaram-se os valores da massa específica real dos grãos em  $\text{g/cm}^3$  para os três diferentes estados de solo, a partir da média de três ensaios.

Tabela 2. Massa Específica Real dos Grãos.

	Gs (1)	Gs (2)	Gs (3)	Gs (média)
Solo 1	2,68	2,67	2,69	2,68
Solo 2	2,66	2,66	2,65	2,66
Solo 3	2,65	2,66	2,65	2,65

### Limites de Atterberg

Na Tabela 3 apresentaram-se os resultados dos ensaios de limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) dos três diferentes estados de solo, bem como os valores do índice de plasticidade (IP). Ao analisar os resultados, verificaram-se as duas primeiras condições do solo (Solo 1 e Solo 2) com plasticidade média e o Solo 3 com plasticidade baixa, devido a adição de areia.

Tabela 3. Limites de Atterberg.

	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)
Solo 1	39,8%	25,67%	14,2%
Solo 2	43,5%	31,7%	11,7%
Solo 3	31,7%	24,7%	7,0%

Os resultados obtidos para o Solo 2, solo com pré-secagem, apontam para o efeito de quebra de agregados com liberação de partículas de argila para interagir com a água. Esse fenômeno, no entanto, nem sempre ocorre, pois depende do volume de microporos no agregado. Por exemplo, Carvajal *et al* (2005) mostraram para um perfil de solo o equilíbrio entre o volume de microporos e o efeito da liberação de partículas. Outro aspecto a ser realçado nos resultados obtidos é que a plasticidade do Solo 2, se ponderada com os 25% de acréscimo de areia, fornece de modo muito aproximado os valores experimentalmente obtidos para o Solo 3, ou seja, com o LL de 32,6% e o LP igual a 23,8%.

### Classificações tradicionais do solo

Os sistemas de classificação têm por finalidade expressar de forma sucinta as características dos solos. Embora existam diversos sistemas de classificação, atualmente, para fins geotécnicos, dois deles são mais elaborados, considerando a distribuição granulométrica e os limites de Atterberg. São eles: o Sistema de Classificação da Associação Americana de Rodovias Estaduais e Autoridades de Transporte (AASHTO) e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) (FDAS, 2011). Os resultados pelos dois sistemas de classificação são encontrados na Tabela 4.

Tabela 4. Classificação do solo.

	AASHTO	SUCS
Solo 1	Solo Argiloso com $IG=10$	CL – Argila de baixa compressibilidade
Solo 2	Solo Argiloso com $IG=6$	ML – Silte de baixa compressibilidade
Solo 3	Solo Siltoso com $IG=0$	SM – Areia Siltosa

### Classificação MCT

Segundo a classificação do método MCT expedito, método das pastilhas (Nogame e Vilibor, 1994), as três diferentes condições do solo foram classificadas como LA'-LG' (Figura 7), no qual representam respectivamente arenoso laterítico e argiloso laterítico, solos predominantes da região. Vale ressaltar que o Solo 3 deslocou-se em direção ao domínio arenoso devido ao teor de areia e ele misturado. Já o Solo 2 apresentou-se perto do domínio argiloso, provavelmente pelos procedimentos de preparação de amostra, ocorrendo uma maior desagregação das partículas, transformando-as em frações mais finas.

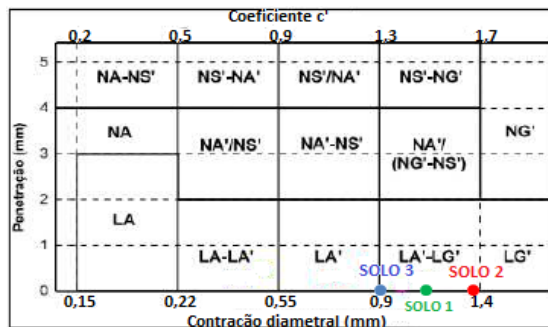


Figura 7. Localização dos resultados no gráfico pelo método das pastilhas.

Após os prévios resultados de classificação dos solos, foram realizados os ensaios de compactação, expansão e ISC, a fim de se obter informações referentes ao comportamento geomecânico do material. Com base nestas respostas devem-se esclarecer os benefícios referentes ao uso de fibras no processo de melhoramento do solo estudado.

### Resultados dos Ensaios de Compactação

Para uma melhor análise das curvas de compactação, dividiram-se os resultados em 3 gráficos distintos, conforme apresentado nas Figuras 8 a 11, respectivamente.

Na Figura 8 plotou-se as diferentes curvas de compactação com o intuito de comparar os resultados obtidos do Solo 1, Solo 2, Solo 3 e do material com a inclusão de 0,25% e 0,50% de fibra de sisal em relação à massa do solo seco.

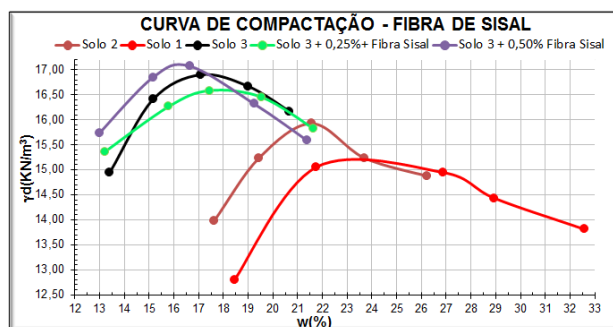


Figura 8. Comparação entre as curvas de compactação.

Em princípio, as fibras trabalham resistindo à compactação, mas nesse caso encontrou-se o comportamento esperado para a incorporação de 0,25% de fibra de sisal. Com a incorporação de



0,5% o comportamento foi o contrário do esperado, apontando para uma perda de atrito pela incorporação das fibras.

Na Figura 9 compararam-se os resultados obtidos para o Solo 1, Solo 2, Solo 3 e com a inclusão de 0,25% e 0,50% de fibra de polipropileno em relação à massa do solo seco. Nestes ensaios observou-se um comportamento análogo àquele apresentado pela adição de fibras de sisal. Ressalta-se que este estudo retrata apenas o universo das amostras ensaiadas no laboratório, necessitando de uma maior amostragem para obter-se conclusões generalizadas relacionadas ao uso destas fibras.

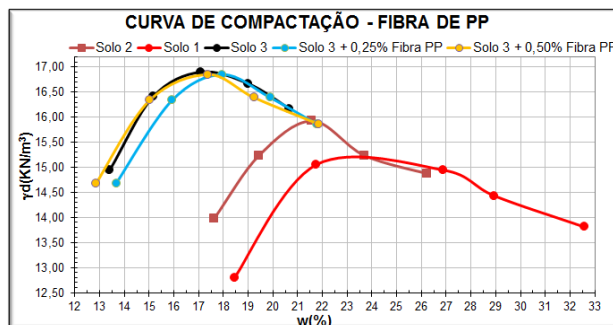


Figura 9. Comparação entre as curvas de compactação.

Embora em menor grau, observa-se que ao passar de 0,25% para 0,5% de fibra de polipropileno ocorreu uma elevação da curva de compactação no ramo seco até a umidade ótima.

Por fim, acoplaram-se todas as curvas de compactação na Figura 10 e notou-se que a inclusão de fibras pode ser uma técnica adequada para o melhoramento de solos finos em obras de pavimentação, pois afeta pouco a curva de compactação. Apesar da falta de representativa estatística, ressalta-se que este tipo de tratamento também foi estudado com êxito nas pesquisas de Sales (2011), Consoli *et al.* (2006 e 2009), Donato (2007) e Trindade *et al.* (2006).

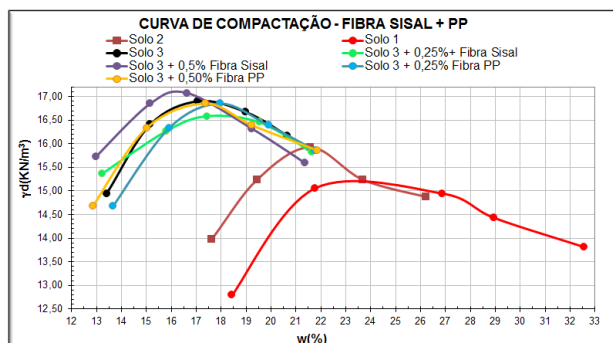


Figura 10. Comparação entre as curvas de compactação.

Esse conjunto de resultados mostra ainda que a introdução de areia gerou um incremento significativo na curva de compactação. Considerando-se que as curvas granulométricas sem o uso de defloculante dos Solos 2 e 3 são semelhantes, não é possível atribuir melhoria à estabilização granulométrica, mas sim mineralógica com impacto direto na sucção, que diminui com a incorporação da areia facilitando a compactação. Outro aspecto importante nesses resultados com impacto prático diz respeito ao aumento dos pesos específicos obtidos para o Solo 2, pré-seco, em relação ao Solo 1, não submetido a secagem, confirmando a fragilização e quebra dos agregados com a secagem e compactação. Logo, os resultados obtidos em laboratório com secagem prévia do

solo pode dificultar a obtenção do grau de compactação em campo, situação na qual o solo não se submete a pré-secagem.

## Resultados Ensaio de Expansão

Após a imersão dos corpos de prova em água, durante 96h, procederam-se as respectivas leituras e as expansões para todos os pontos da curva de compactação. Os resultados obtidos da expansão foram analisados em função da umidade de compactação (Figura 11) e do peso específico aparente seco a ele correspondente (Figura 12).

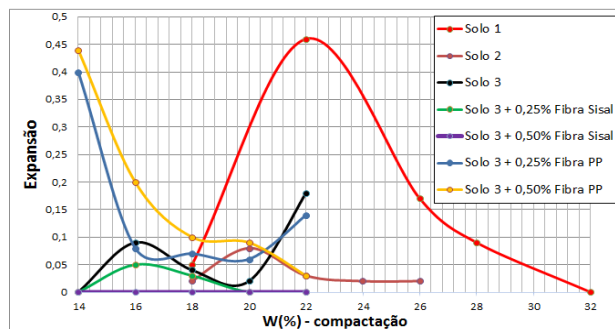


Figura 11. Comparação das expansões e umidades de compactação.

A Figura 11 coloca em destaque para os Solos 1 e 2 que a expansão é maior no ramo seco, colocando em evidência a sua influência na sucção e porosidade. Observa-se ainda que a secagem inibiu a expansão apesar dos maiores pesos específicos aparentes secos e menores porosidades registradas na curva de compactação do Solo 2 em relação à obtida para o Solo 1. A menor expansão do Solo 2 pode estar ligada a quebra de agregados no processo de compactação. Analisando-se agora o efeito de fibras se observa que as fibras de sisal inibem a expansão, enquanto as fibras sintéticas a liberam, confirmando o que já se havia observado quanto à compactação e comparado com o Solo 3. Vale ressaltar que apesar da importância das análises feitas quanto à expansão, elas foram pequenas, não sendo em nenhum caso impeditivas do uso desses materiais nas estruturas de pavimento como um todo.

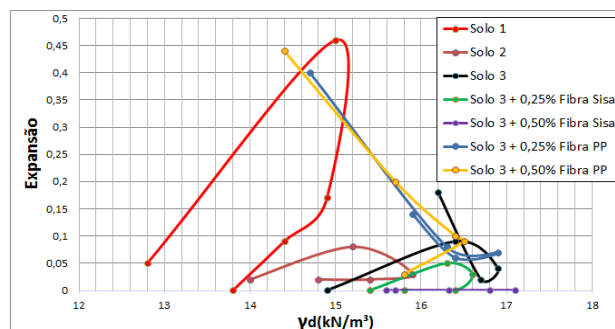


Figura 12. Comparação das expansões e pesos específicos aparentes secos.

A Figura 12 coloca em maior evidência a importância da sucção no comportamento dos dois solos, pois para pesos específicos aparentes secos semelhantes, a expansão foi maior no ramo seco, podendo ainda se questionar sobre eventuais diferenças estruturais no que tange a orientação de partículas de argila individualizadas, no entanto, por se tratar de solos lateríticos agregados, tal

efeito é geralmente pequeno.

Conclui-se para as Figuras 11 e 12 que os valores atendem aos requisitos propostos pelo DNIT (2006) para a utilização em sub-base de pavimento flexível, constando expansão menor ou igual a 1%.

### Resultados do Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

As relações entre a pressão e penetração para as umidades ótimas na fase de compactação de todos os solos e misturas realizadas são expostas na Figura 13. Vale ressaltar que o Solo 1 apresentou maior valor de ISC em umidade diferente da ótima. Além disso, observa-se na Tabela 5 o resumo dos resultados obtidos.

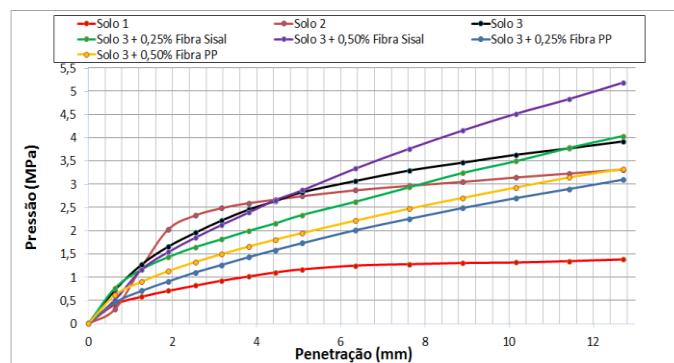


Figura 13. Curvas do Índice de Suporte Califórnia.

A Figura 13 mostra para todos os tipos e teores de fibras incorporadas que as mesmas desempenham um papel relevante na medida em que se amplia a deformação imposta ao solo, ou seja, as fibras podem desempenhar um papel relevante na prevenção contra trincas de tração ou simplesmente no combate às tensões de tração. Para melhor ilustrar esse efeito, apresenta-se na Figura 14 o gráfico comparativo das inclinações das curvas nos trechos pós plastificação considerando-se o intervalo compreendido entre 2 e 6mm de penetração.

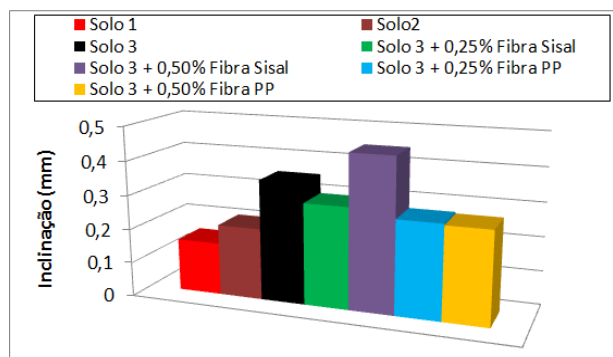


Figura 14. Comparação das inclinações das curvas nos trechos pós plastificação.

Finalmente, de forma análoga aos comparativos e análises anteriormente vistos na expansão, a Figura 15 correlaciona os resultados do ISC com as umidades de compactação e pesos específicos aparentes secos.

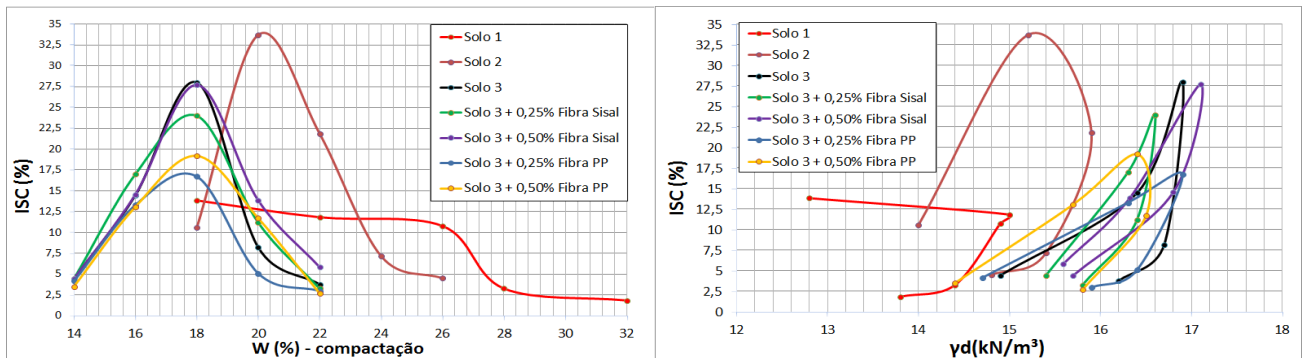


Figura 15. Comparação do ISC com as umidades de compactação e pesos específicos aparentes secos.

Ao analisar a Figura 15, considerando-se o Solo 2 utilizado nas misturas, a incorporação de areia e areia-fibra nos percentuais propostos nesta pesquisa, acarreta em uma diminuição do ISC. Este fato pode estar correlacionado com a perda de coesão devida à adição de areia na estrutura do solo. Entretanto, a secagem do solo tende a aumentar o ISC no ramo seco e a mantê-lo no ramo úmido. Com exceção dos valores de ISC obtidos da amostra do Solo 1 e do Solo 3 com inclusão de fibra de polipropileno, os demais resultados atendem aos requisitos mínimos exigidos para a utilização em sub-base de pavimentos flexíveis (ISC  $\geq$  20%).

Tabela 5. Resumo dos resultados obtidos no ensaio de Índice de Suporte Califórnia.

	Umidade ótima (%)	$\gamma_d$ máx. (kN/m <sup>3</sup> )	ISC na umidade ótima (%)	Umidade do ISC máx. (%)	ISC máx. (%)
Solo 1	23	15	12	18	14
Solo 2	22	15,9	21,9	21	34
Solo 3	18	16,9	28	18	28
Solo 3 +0,25% Fibra Sisal	18	16,6	24	18	24
Solo 3 +0,50% Fibra Sisal	18	17,1	28	18	28
Solo 3 +0,25% Fibra PP	18	16,9	17	18	17
Solo 3 +0,50% Fibra PP	18	16,5	19	18	19

## CONCLUSÕES

A partir dos objetivos traçados inicialmente, procurou-se verificar os parâmetros de estabilização do solo sob condições em estado natural, após secagem prévia e quando submetido a misturas com areia e inclusão de fibras. Com base nos resultados obtidos, relacionados unicamente com o universo das amostras coletadas e ensaiadas, pode-se concluir que:

- Embora não seja sempre o caso, para o solo estudado a secagem aumentou o peso específico do solo na compactação e os valores do ISC obtidos.
- A incorporação de fibra de polipropileno acarretou em uma maior expansão do solo. Em outro contexto, a adição de fibra de sisal impediu.
- Notou-se uma relação entre a diminuição do ISC e a incorporação de areia e de fibra.



(d) Com base no manual de pavimentação do DNIT (2006), considerado a umidade ótima de compactação, tanto o Solo 2, o Solo 3, o Solo 3 + 0,25% de fibra de sisal e o Solo 3 com 0,50% de fibra de sisal atenderam os requisitos para a devida utilização na camada de sub-base de pavimento flexível. Estes materiais atenderam ao requisito de apresentar  $ISC \geq 20\%$  e expansão menor que 1%.

(e) O Solo 1 e a mistura do Solo 3 com inclusão de 0,25% de fibra de polipropileno e do Solo 3 com 0,50% de fibra de polipropileno não atenderam ao requisito relacionado aos valores de ISC.

(f) As curvas de pressão em função da penetração mostrou que as fibras podem contribuir no combate as trincas de tração.

(g) As curvas de ISC em função da umidade e do peso específico aparente seco de compactação mostraram que para o solo estudado é importante o controle de compactação e dos materiais utilizados.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade de Brasília pelo apoio durante a pesquisa e ao Centro Universitário de Brasília pela disponibilidade de execução dos ensaios laboratoriais.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A. F. *Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com Cal, em Pó e em Pasta, para Aplicação em Rodovias do Estado do Ceará*. Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2009, 175 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7181/84: solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7182/86: solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7180/84: solo - Determinação do limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro. 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6457/86: Amostra de solos - Preparação para ensaio de caracterização e compactação*. Rio de Janeiro. 1986.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6459/84: solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro. 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9895/87: Índice Suporte California - CBR*. Rio de Janeiro. 1987.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J. *Propriedades e comportamento de solos tropicais não-saturados*. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 5. São Carlos, SP. 2004, p.597-616.
- CARVAJAL, HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ ; CAMAPUM DE CARVALHO, J. ; FERNANDES, GILBERTO . *Influência da desagregação nos limites de Atterberg*. In: II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, 2005, Goiânia, GO, v. 1. p. 217-225.
- CONSOLI, N. C.; ROTTA, G. V.; PRIETTO, P. D. M. *Yielding compressibility- strenght ralationship for an artificially cemented soil cured under stress*. *Géotechnique*, v. 56, N. 1, 2006, p. 69-72.
- DONATO, M. *Medidas Diretas de Tensão em Solo Reforçado com Fibras de Polipropileno*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.
- FDAS, Braja M. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. São Paulo: Thomson Learning, 2011.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. *Identificação expedita dos grupos de classificação MCT para solos tropicais*. *Anais do 10º COBRAMSEF – ABMS, Foz do Iguaçu, 1994. Vol. 4, p. 1293-1300*.
- SALES, K.C.S. *Melhoria de Solos Por Inclusão de Fibras Naturais*. Dissertação de Mestrado, Publicação GDM-203/2011, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2011, 97 p.
- TRINDADE, T. P.; IASBIK, I.; LIMA, D. C.; MINETTE, E.; SILVA, C. H. C.; CARVALHO, A. B.; BUENO, B. S.; MACHADO, C. C. *Estudo laboratorial do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em estradas florestais*. *Revista: Árvore, Viçosa-MG, 2006. v. 30, n. 02, p. 215-222*.