

Estudo da capacidade de suporte da estabilização de solos para pavimentação rodoviária

José Breno Ferreira Quariguasi 1

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, brenoquariguasi@det.ufc.br

Haikel Buganem Busgaib Gonçalves 2

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, haikelbusgaib@gmail.com

Francisco Heber Lacerda de Oliveira 3

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, heber@det.ufc.br

Marcos Fábio Porto de Aguiar 4

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil, marcosfpa@hotmail.com

RESUMO: Dada a importância da pavimentação rodoviária nas atividades necessárias da sociedade e diante de um cenário não muito distante em que será preciso encontrar materiais que possam viabilizar as obras viárias, este artigo tem como objetivo analisar a utilização de fibras de polipropileno, cal hidratada e cimento Portland, misturados aos solos, em obras rodoviárias. Para tanto, foi coletado um solo na Região Metropolitana de Fortaleza e, em seguida foram realizados ensaios de laboratório, tais como compactação e Índice de Suporte Califórnia, e, assim, fazer comparações entre as diferentes misturas de materiais e o solo *in natura* de caráter areno-argiloso. Percebeu-se que as misturas de solo, fibras e cimento apresentaram os melhores aumentos de capacidade de suporte; já as amostras com cal foram melhores quanto a estabilização da expansão volumétrica. Porém, todas as misturas analisadas proporcionaram alguma melhoria ao solo estudado.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentação, Solo, Fibras, Cal, Cimento.

1 INTRODUÇÃO

A pavimentação rodoviária é um elemento importante quando se trata da infraestrutura de transportes. Desde a civilização egípcia, segundo Saunier (1936, *apud* Bernucci *et al.*, 2008), tem-se registros do uso da pavimentação para o transporte de cargas. Porém, foi atribuída ao Império Romano a arte maior do planejamento e construção viária, com um sistema robusto construído com elevado nível de critério técnico. De acordo com Hagen (1955, *apud* Bernucci *et al.*, 2008), os romanos exploraram a pavimentação para fins militares, facilitando o deslocamento das tropas para manter e ampliar seu território.

Atualmente, a população mundial enfrenta dificuldades para encontrar formas sustentáveis

de executar as suas construções. Para poder aproveitar melhor as áreas de ocupação disponíveis ou por motivos econômicos, surge a necessidade de reforçar solos com baixa capacidade de suporte.

O reforço pode ser entendido como uma melhoria das características do solo por meio de processos físicos ou químicos. Essas técnicas podem ser aplicadas com a adição de cimento Portland, de materiais geossintéticos, tais como as fibras de politereftalato de etileno, sisal e polipropileno, além das raspas de pneus e de aditivos (químicos e orgânicos).

A aplicação da fibra de polipropileno é amplamente estudada em concretos estruturais. Segundo Dobbin Junior e Rocha (2011), essas fibras demonstraram-se eficazes em proporcionar aos concretos, mesmo após o

aparecimento das primeiras fissuras e ruptura, uma capacidade de resistir ao carregamento deformando-se e mantendo a sua capacidade de suporte. Tal feito é essencial para um acréscimo de segurança em estruturas de concreto como pontes, túneis e edificações em geral.

Já a adição de cimento ao solo é um método definido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006) como um estabilizante químico, tornando-o menos sensível aos efeitos da água e diminuindo a sua plasticidade.

Para Rosa (2009), a cal é um dos estabilizantes de maior utilização e abundância, bem como o mais econômico usado para estabilização de solos, com aplicação em pavimentação e aterros. A sua eficiência foi comprovada através de vários estudos sobre a utilização da cal no melhoramento de solo para pavimentação, apresentando bons resultados em relação a sua capacidade de suporte e na redução de recalques.

Diante do exposto, este artigo tem como objetivo analisar a influência na capacidade de suporte de misturas de um solo misturado com fibras de polipropileno, cal hidratada e cimento Portland como reforço em um solo para uso em camadas de pavimentação rodoviária. Para tanto, utilizou-se como comparativo pesquisa iniciadas por Lima Neto (2016) e, assim, realizar análises entre solo *in natura*, solo com fibra, solo com fibra e cal e solo com fibra e cimento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O reforço de solos com fibras é uma técnica há muito conhecida e empregada pelo homem. As muralhas da Mesopotâmia (1400 a.C.), existentes ainda hoje, foram construídas empregando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Índícios do emprego desta técnica também são encontrados em partes da Grande Muralha da China e em estradas construídas pelos Incas, no Peru, através do emprego de lã de lhama como reforço. Uma das aplicações que mais se aproxima de um geossintético dos dias atuais foi a utilização de

mantas de algodão pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul – EUA, em 1926, como reforço de camadas asfálticas em pavimentos (PALMEIRA, 1992).

Segundo Casagrande (2001), a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada uma das fases no comportamento do material compósito como um todo é fundamental para a definição do tipo e da quantidade de fibra a ser empregado. Esta definição dependerá fundamentalmente das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante.

McGown *et al.* (1978) procurando compreender a interação entre solo e fibra, estabeleceu uma analogia entre o elemento de reforço de solo e uma estaca cravada, Figura 1. Em sistemas de estacas pode-se existir estacas comprimidas ou tracionadas, dependendo das forças externas aplicadas a estas. As estacas, por sua vez, induzem deformações ao solo.

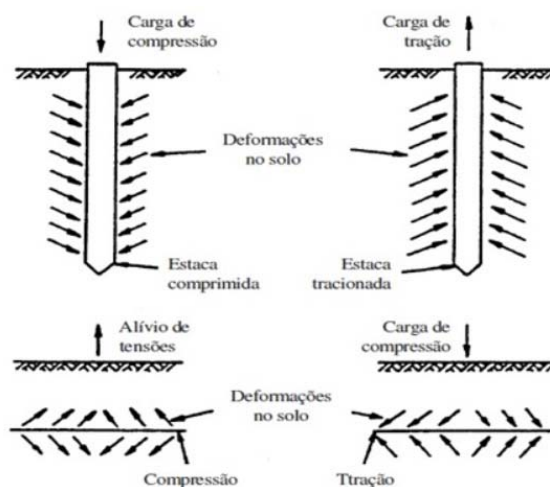


Figura 1. Comparação de estaca com elemento de reforço de solo. (McGown *et al.*, 1978)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico estão descritos os materiais e os métodos utilizados nesta pesquisa.

3.1 Solo utilizado

O solo analisado foi recolhido de uma jazida

localizada próxima da Av. Eta Gavião, em Itaitinga, na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), estado do Ceará. Também pode ser localizado através das coordenadas 3° 52' 43" S / 38° 32' 20" O. A extração do material foi feita com aproximadamente três metros de profundidade, sendo retirados cerca de 400 kg de solo. A amostra possui uma coloração variegada com predominância do vermelho, além da presença de torrões e pedregulhos.

O ensaio de granulometria foi feito conforme a ABNT (1984a). Já os ensaios de Limites de Liquidez e Plasticidade foram realizados de acordo com a ABNT (1984b; 1984c). Estes ensaios foram realizados para fazer a classificação do solo pelo *Transportation Research Board* (TRB), que resultou em A-2-4, ou seja, um solo arenoso com presença de pedregulhos. A Figura 2 e a Tabela 1 apresentam o resumo granulométrico do ensaio realizado.

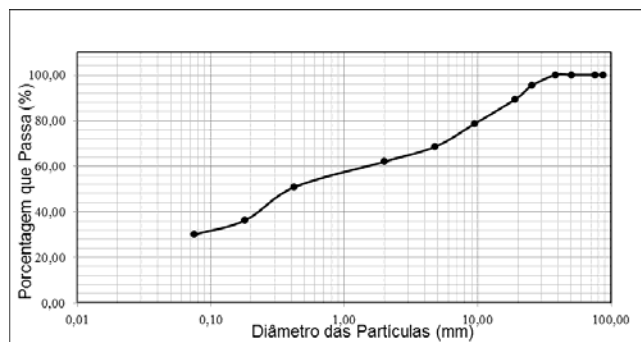


Figura 2. Resultado do ensaio de granulometria por peneiramento.

Tabela 1. Resumo granulométrico do solo.

Pedregulho (>2,00mm)	38,06%
Areia Grossa (2,00-0,42mm)	11,25%
Areia Fina (0,42-0,075mm)	20,81%
Silte, Argila (<0,075mm)	29,88%
Total	100,00%

O solo apresentou um Limite de Liquidez (LL) de 31,5%, Limite de Plasticidade (LP) de 23,77% e Índice de Plasticidade (IP) de 7,73%.

O ensaio de Compactação foi realizado conforme a ABNT (1986), com energia intermediária (26 golpes por camada). Com isso,

foi possível a elaboração da curva de compactação, em que encontrou-se uma umidade ótima do solo de 14,5% e o peso específico aparente seco máximo de 1,980 gf/cm³, conforme demonstrado na Figura 3.

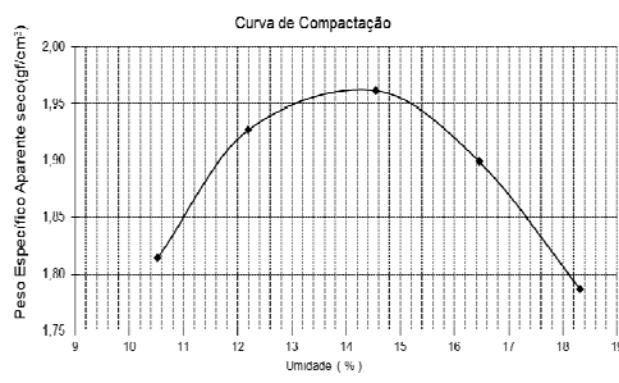


Figura 3. Curva de compactação solo *in natura*.

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou (*California Bearing Ratio CBR*), tem como finalidade conhecer a capacidade de suporte do solo e sua expansão volumétrica. O ensaio foi realizado conforme a norma DNER 049/94, em que se deve compactar uma amostra de solo utilizando a umidade ótima, encontrada no ensaio de compactação. Foram feitos três corpos de prova para o solo *in natura*, cujos resultados são apresentados na Tabela 2. Ressalta-se que o valor de 31% foi desconsiderado, uma vez que é muito divergente dos demais e o mesmo pode estar associado a erros durante a execução do ensaio.

Tabela 2 Resultados de ISC para o solo *in natura*

CP	ISC (%)	Expansão (%)
1	19	0,24
2	21	0,25
3	31	0,21

3.2 Fibra de polipropileno

Foram utilizadas fibras de polipropileno de comprimento de 24 mm e diâmetro de 18 µm em seção circular, apresentando área de superfície específica de 244 m²/kg. Alguns

dados adicionais de propriedades físicas e mecânicas estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3. Características da fibra (Maccaferri, 2008).

Propriedades Físicas	
Diâmetro	8 µm
Seção	circular
Comprimento	24 mm
Alongamento	80%
Matéria-prima	polipropileno
Peso Específico	0,91 g/cm ³
Propriedades Mecânicas	
Temperatura de fusão	160 °C
Temperatura de ignição	365 °C
Resistência à tração	300 MPa
Módulo de Young	3000 MPa

3.3 Cal hidratada

Nesta pesquisa utilizou-se a cal hidratada do tipo CH-I. A escolha deveu-se por ser considerada a de maior pureza (92,5%) e qualidade. Este material possui uma densidade de 2,7 g/cm³, umidade inferior ou igual a 2,0% e densidade aparente de 0,55 a 0,65 g/cm³, segundo Carbomil (2016).

Para a dosagem da cal foi utilizada como referência os estudos de Lopes Júnior (2007). Utilizou-se a quantidade mínima de cal, de 1,0%, para modificação de solos considerados pedregulho argiloso bem graduado, conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Dosagem da cal (Lopes Júnior, 2007).

Tipo de solo	Teor de cal (%)
	Para modificação
Pedra finamente britada	2 a 4
Pedregulho argiloso bem graduado	1 a 3
Areias	Não recomendado
Argila arenosa	Não recomendado
Argila siltosa	1 a 3
Argilas	1 a 3
Solos orgânicos	Não recomendado

3.4 Cimento Portland

Devido à sua capacidade de adquirir propriedades de resistência e deformabilidade favoráveis em curto espaço de tempo, optou-se pelo uso do cimento Portland de alta resistência inicial (ARI) Tipo CP V ARI RS.

Essa propriedade do cimento foi importante para que se pudesse verificar algum possível aumento na capacidade de suporte do compósito, já que o ensaio de ISC leva quatro dias para ser realizado, enquanto os cimentos de forma geral demoram cerca de 28 dias para adquirir a sua resistência máxima. Como é mostrado na Figura 4, o CP V consegue obter maiores resistências à compressão que os demais cimentos após 3 ou 4 dias de seu preparo.

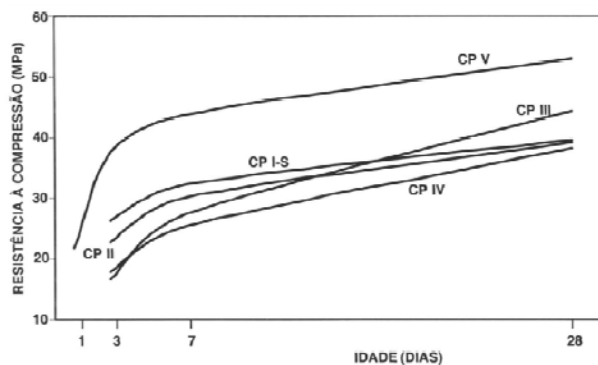


Figura 4. Evolução de resistência à compressão dos tipos de cimento Portland.

A porcentagem de cimento analisada neste trabalho é equivalente a 2% da massa seca da amostra de solo. Essa porcentagem foi escolhida pois, segundo DNIT (2006), as porcentagens entre 2% e 4% garantem que a camada seja considerada como flexível, denominando, assim, o compósito como solo adicionado de cimento.

3.5 Métodos

Nesta pesquisa foram realizados ensaios de Compactação e de Índice de Suporte Califórnia em um determinado solo adicionado de 1,0% e 2,0% de fibra de polipropileno e 1,0% de cal, também foram realizados ensaios com solo-cimento, teor de 2,0%, e com fibra de polipropileno nos teores de 0,5% e 1,0% mais

2,0% de cimento. Ressalta-se que as fibras de polipropileno foram distribuídas de forma aleatória nos corpos de prova. Com os resultados, foram feitas análises comparativas com solo *in natura* e solo adicionado de 0,5%, 1,0% e 2,0% de fibra, dados obtidos de pesquisa de Lima Neto (2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico estão descritos os resultados e as discussões sobre a pesquisa.

4.1 Solo e fibras de polipropileno

De acordo com os resultados obtidos por Lima Neto (2016), quando adicionado fibra ao solo houve um aumento considerável da resistência em relação ao solo *in natura*. É importante salientar que o valor de ISC de 31% para o solo *in natura* foi descartado por ser muito divergente dos demais, para tanto considerou-se o ISC de 21%. Conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5. Resumo do ensaio de ISC para solo e fibra.

Teor de fibra (%)	ISC (%)	Expansão (%)
0,0	21	0,24
0,5	29	0,23
1,0	31	0,05
	31	0,08
2,0	33	0,32
	36	0,28

4.2 Solo, fibras de polipropileno e cal hidratada

Os resultados dos ensaios de compactação realizados com fibras apresentaram pouca diferença quando comparado ao solo *in natura*, como mostrado na Tabela 6. No entanto, percebe-se uma pequena tendência de diminuição no peso específico aparente seco máximo e na umidade ótima à medida que aumenta-se o teor de fibra. Porém, para efeitos comparativos, optou-se pelo mesmo método adotado por Lima Neto (2016) em que foi considerado os resultados de compactação do

solo *in natura* para a realização do ensaio de ISC.

Tabela 6. Resumo do ensaio de compactação.

Teor de fibra (%)	Peso Específico	
	Aparente Seco Máximo (gf/cm ³)	Umidade Ótima (%)
Solo <i>in natura</i>	1,98	14,5
Solo + 0,5% de fibra	1,93	14,2
Solo + 1,0% de fibra	1,90	13,2
Solo + 1,0% de cal	1,909	17,3
	1,887	16,7

Vale ressaltar, também, que foram utilizados dois modos de homogeneização nas pesquisas de Lima Neto (2016), em que no primeiro modo adicionava-se fibra ao solo e depois se homogeneizava com água, já no segundo modo, o solo era misturado com água e em seguida homogeneizado com fibra. De acordo com os resultados encontrados, o segundo modo de homogeneização demonstrou ser mais eficiente. Portanto, esta pesquisa foi executada utilizando o segundo modo de homogeneização.

Para os ensaios de ISC com a mistura de solo, fibra e cal, em que foram utilizados primeiramente 1,0% de fibra e 1,0% de cal, os resultados apresentaram aumento de resistência se comparado ao solo *in natura*, porém houve uma pequena redução na resistência se comparado à mistura solo e 1,0% de fibra. Para a mistura solo, fibra e cal utilizando as porcentagens de 2,0% de fibra e 1,0% de cal os resultados apresentados foram melhores, uma vez que houve aumento de resistência em comparação ao solo *in natura* e à mistura solo e 2,0% de fibra. A expansão volumétrica dos ensaios realizados com solo, fibra e cal foi menor do que em relação ao solo *in natura*. A mistura solo e fibra apresentou aumento de expansão quando se aumentou o teor de fibra de 1,0% para 2,0%, mas não há aumento de expansão quando se adicionou cal à mistura. A Tabela 7 expressa os resultados do ISC obtido

com solo, fibra e cal, foram feitos 3 corpos de prova para as duas misturas.

Tabela 7. Resumo do ensaio de ISC para a mistura solo, fibra e cal

Teor de fibra e cal	ISC (%)	Expansão (%)
1,0% fibra + 1,0% cal	28	0,11
	61	0,12
	27	0,11
2,0% fibra + 1,0% cal	40	0,12
	42	0,12
	46	0,13



Figura 5. Corpo de prova com cimento e fibra.

O valor de ISC igual a 61% foi descartado por ser muito divergente dos demais, portanto pode estar associado a erros na execução do ensaio. De acordo com os resultados, pode-se perceber que a cal reagiu melhor na presença de um teor maior de fibra.

4.2 Solo, fibras de polipropileno e cimento Portland

Devido ao cimento tratar-se de um material granular, espera-se uma alteração nos parâmetros de compactação da amostra. O solo melhorado com cimento possui uma umidade ótima de 14%, adquirindo um peso específico aparente seco de aproximadamente 2,05g/cm³.

Em seguida foram realizados os ensaios de ISC, conforme exposto na Tabela 8 e na Figura 5.

Tabela 8. Resultados dos ensaios de ISC para Solo, cimento e fibra.

Cimento	Fibra	ISC (%)	Expansão(%)
2,0%	0,0%	116	0,26
2,0%	0,5%	120	0,25
2,0%	1,0%	147	0,29

4.3 Análise dos resultados

A Figura 6 mostra um comparativos entre as curvas de compactação obtidas através dos ensaios realizados com solo *in natura*, solo misturado com cal e solo com cimento.

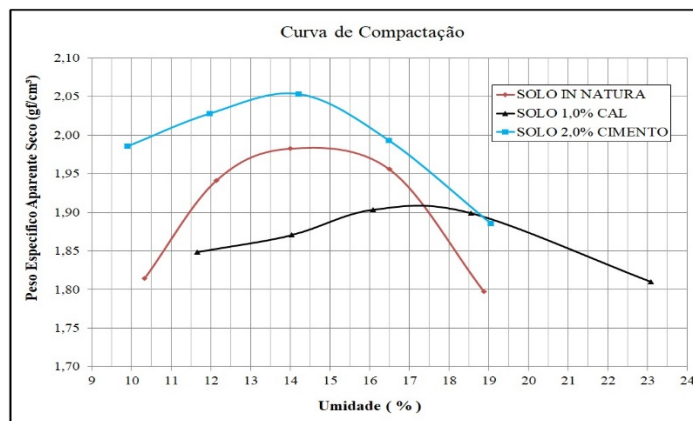


Figura 6. Comparativo entre as curvas de compactação.

Percebe-se que o solo *in natura* apresentou a maior variação em seu peso específico aparente seco quando adicionado água, se comparado às demais misturas. Contudo, o solo misturado ao cimento foi o corpo de prova que apresentou o maior peso específico aparente seco dentre as misturas analisadas. Já o solo misturado de cal apresentou a maior variação de umidade dentre os materiais estudados.

A Figura 7 mostra a relação entre a tensão e o deslocamento provenientes dos resultados de ISC, fazendo um comparativo entre o solo *in natura*, o solo com fibra, o solo com fibra e cal e o solo com fibra e cimento. Percebe-se que as misturas adicionadas de cimento apresentaram

tensão significativamente mais elevada do que os demais materiais, principalmente quando analisado o corpo de prova ensaiado com 2,0% de cimento e 1,0% de fibra de polipropileno. Contudo, verifica-se que todos os materiais estudados proporcionaram aumento de resistência ao solo *in natura*, pois as misturas com solo e fibra e, também, as misturas com solo, fibra e cal apresentaram aumento de capacidade de suporte. Os corpos de provas analisados com a cal apresentaram

comportamento de tensão x deslocamento semelhante aos demais, com exceção dos materiais com cimento, porém com uma resistência um pouco superior ao solo adicionado de fibra e significativamente melhor ao solo *in natura*.

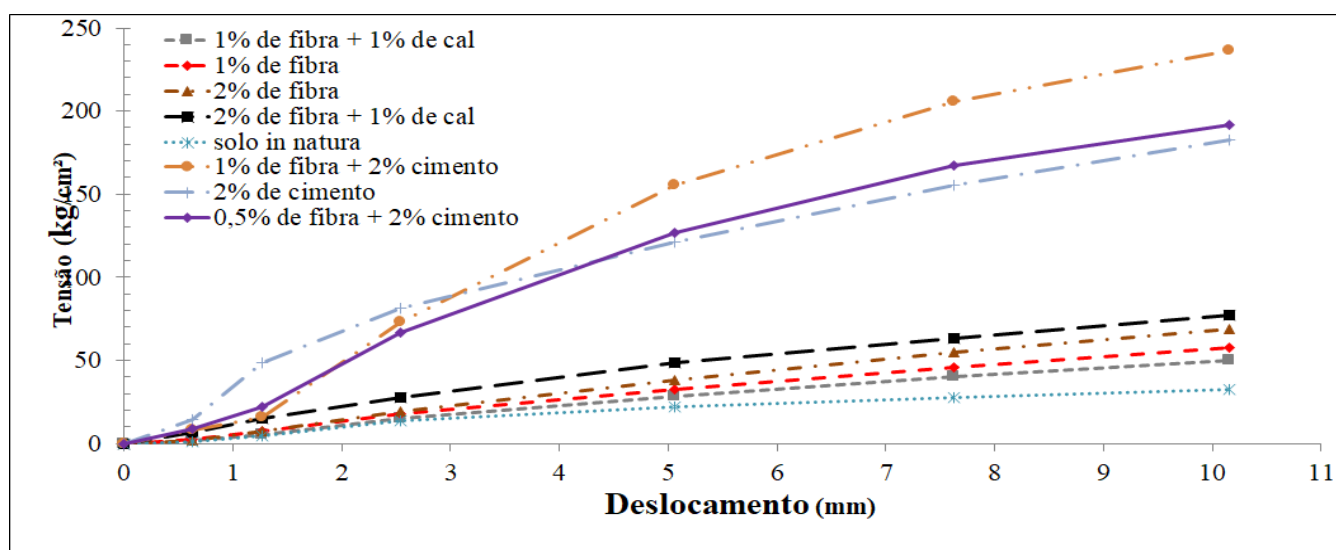


Figura 7. Relação Tensão (kg/cm²) x Deslocamento (mm)

Analisando os resultados quanto à expansão volumétrica, percebe-se que a cal proporcionou certa estabilização, pois houve um aumento da expansão quando se observa os corpos de prova com 1,0% e 2,0% de fibra, e esse comportamento não foi observado quando se adicionou cal, embora, inicialmente, a mistura de solo, fibra e cal tenha sido um pouco superior ao solo com fibra. As misturas com cimento, em geral, apresentaram expansões superiores aos demais corpos analisados, com exceção do material solo com 2,0% de fibra, que foi o material com maior expansão observada. A Figura 8 expressa o comparativo dos dados analisados.

5 CONCLUSÕES

As misturas analisadas trouxeram benefícios ao solo estudado, principalmente quanto ao aumento da capacidade de suporte proporcionado pelo cimento Portland e pela fibra. Contudo, apesar da cal hidratada e a fibra não melhorarem a resistência tanto quanto as misturas com cimento, elas ainda propiciaram uma resistência superior ao solo *in natura*, assim como, também, estabilizou a expansão volumétrica.

Destaca-se que a cal apresentou resultados mais satisfatórios quando adicionado de mais fibras, (2,0%), do que a quantidade inicial de 1,0%. Haja vista que seu ISC aumentou significativamente. Porém, salienta-se que apenas os corpos de prova com cimento atingiram o Índice de Suporte Califórnia superiores a 100%.

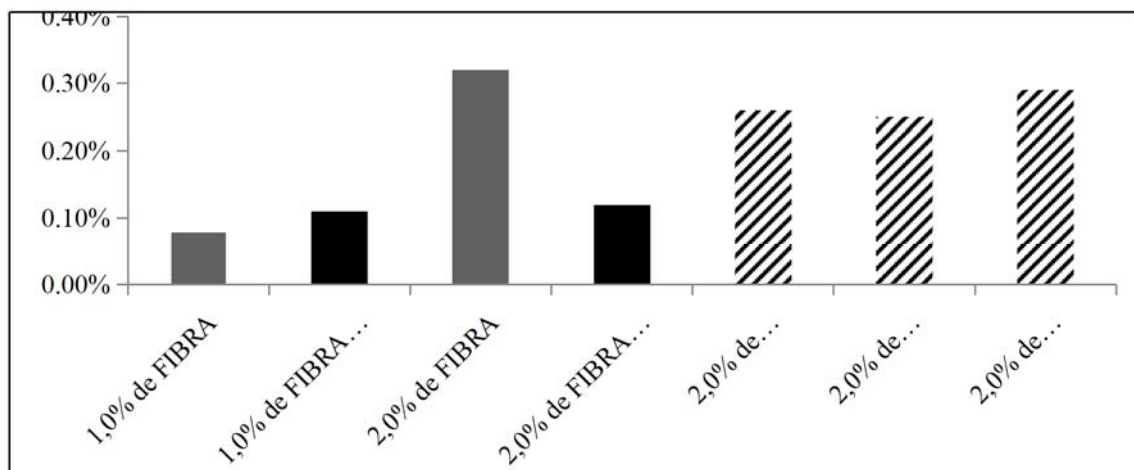


Figura 8. Comparativo da expansão volumétrica entre as misturas.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.NBR-7181 (1984a): Análise granulométrica. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.NBR-6459 (1984b): Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.NBR-7180 (1984c): Determinação dos limites de Atterberg. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.NBR-7182 (1986): Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.
- Bernucci, L. B., Mota, L. M. G., Ceratti, J. A. P. e Soares, J. B. (2008) *Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros*. Petrobras. Abeda, Rio de Janeiro.
- Carbomil. (2016) dados da cal: acesso em 9 de outubro de 2016. <<http://www.carbomil.com.br/portfolio-item/cal-hidratada-ch-i/>>
- Casagrande, M. D. T. (2001) *Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) – DNER-ME 049. *Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006) - DNIT. *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro.
- Dobbin Júnior, E. S.; Rocha, L. F. S. (2011). *Estudo de concreto com adição de fibra de polipropileno para controle da fissuração*. TCC – Curso de Engenharia Civil, Universidade da Amazônia. Belém.
- Lima Neto, P. S. (2016). *Utilização de fibras de polipropileno como reforço em solo para pavimentação rodoviária*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Fortaleza. Fortaleza.
- Lopes Júnior, L. S. (2007). *Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 147 p.
- Maccaferri (2008). *FibroMac 24: Fibras para Reforço do Concreto*. Jundiaí, São Paulo.
- McGown, A.; Andrawes, K. Z.; Al-Hasani, M. M. (1978) *Effect of inclusion properties on the behavior of sand*. Geotechnique, London, v.28, n.3, p.327-346.
- Palmeira, E. M. (1992). *Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos*. In: Seminário sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia. Geossintéticos 92. Brasília, p.1-12.
- Rosa, A. D. (2009). *Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal*. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.