

ESTUDOS LABORATORIAIS DO COMPORTAMENTO DE UM SOLO RESIDUAL ARENOSO REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO, VISANDO À APLICAÇÃO EM ESTRADAS FLORESTAIS¹

Tiago Pinto da Trindade², Israel Iasbik², Dario Cardoso de Lima³, Enivaldo Minette³, Cláudio Henrique de Carvalho Silva³, Carlos Alexandre Braz de Carvalho³, Benedito de Souza Bueno⁴ e Carlos Cardoso Machado⁵

RESUMO – Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento mecânico da mistura de um solo residual jovem de textura predominantemente arenosa reforçado com fibras de polipropileno, com vistas à aplicação em estradas florestais. Como ponto de partida, determinou-se, mediante os resultados de ensaios de compressão não-confinada, realizados em corpos-de-prova compactados na energia do ensaio Proctor Normal, que o quantitativo de 0,75% de fibras com 20 mm de comprimento foi a combinação responsável pelo maior ganho de resistência. Com a mistura solo-fibra composta por essa combinação, foram realizados ensaios triaxiais do tipo CID/Sat em corpos-de-prova compactados na energia anteriormente referida. Através desta pesquisa, foi possível avaliar: (i) a influência da variação da umidade nos parâmetros de resistência mecânica do solo e das misturas solo-fibra e (ii) a influência das fibras nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo em estudo. Analisando os resultados, pôde-se concluir que o uso de fibras de polipropileno promoveu um ganho da ordem de 110% na resistência à compressão não-confinada e de 560% na coesão de intercepto do solo estudado.

Palavras-chave: Estradas florestais, reforço de solos, solo-fibra e resistência mecânica.

LABORATORY TESTING OF A POLYPROPYLENE FIBER REINFORCED RESIDUAL SANDY SOIL FOR FOREST ROAD APPLICATION

ABSTRACT – *The purpose of this study was to analyze the mechanical behavior of a polypropylene fiber-reinforced young residual sandy soil for forest road application. The first step was to determine the best combination of fiber content and length that would give the greatest increase in unconfined compressive strength of mixture specimens compacted at the Standard Proctor effort. The best combination resulting from the laboratory test program was 0.75% fiber content and fiber 20-mm length. The next step in the testing program was to run triaxial CID/Sat tests in mixture specimens prepared with the best combination and compacted at the Standard Proctor effort. From the laboratory testing program data it was possible to evaluate the influence of the water content in the mechanical response of the soil and fiber-reinforced soil, and to assess the influence of the fibers on the soil shear strength parameters. Data supported that soil reinforcement with polypropylene fiber was responsible for 110% increase in the unconfined compressive strength and 560% increase in the intercept cohesion of the studied soil.*

Keywords: Forest roads, soil reinforcement, fiber-reinforced soil, and mechanical strength.

¹ Recebido em 27.02.2003 e aceito para publicação em 10.11.2005.

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do DEC/UFV, 36570-000 Viçosa-MG, Brasil. E-mail: <tprindade@vicosa.ufv.br>.

³ Departamento de Engenharia Civil da UFV, Viçosa-MG, Brasil. E-mail: <declima@ufv.br>.

⁴ Departamento de Geotecnia da EESC-USP, São Carlos-SP, Brasil. E-mail: <bsbueno@sc.usp.br>.

⁵ Departamento de Engenharia Florestal da UFV, Viçosa-MG, Brasil. E-mail: <machado@ufv.br>.

1. INTRODUÇÃO

Registros superficiais do uso de fibras naturais para aumentar a capacidade de carga de fundações rasas e a estabilidade de maciços compactados pelos antigos foram mencionados por Kerisel (1985) e Yamamuchi (1993). Existem relatos da aplicação de fibras de juta, piaçava e sisal, dentre outras, em obras de engenharia. O inconveniente maior dessas fibras naturais é a sua fácil deterioração no tempo. Com o advento do grande avanço das indústrias químicas, materiais sintéticos passaram a ter prioridade de aplicação, haja vista suas maiores facilidades de obtenção em larga escala e sua resistência a agentes externos.

A redescoberta da fibra como elemento de reforço de maciços compactados está certamente associada à prática já consagrada de reforço de solos com inclusões direcionais (fitas, barras, mantas, grelhas) (BUENO, 1996) e à tradição da engenharia geotécnica em executar correção granulométrica por misturas de dois ou mais solos (SOUTO SILVEIRA e SILVEIRA, 1964; DSIRRL, 1957) ou de serviços de estabilização química dos solos (SILVA, 1968; BUENO et al., 1994; LIMA et al., 1996).

Nos últimos 20 anos, tem-se observado um número crescente de relatos sobre a utilização de fibras de aço, vidro, borracha e de plástico em pesquisas de laboratório, na área geotécnica. Como exemplos de trabalhos desenvolvidos na área, pode-se referir a Gray e Ohashi (1983), Al-Refeai (1986), Teixeira et al. (1994), Bueno et al. (1997), Iasbik et al. (2000), Casagrande et al. (2002) e Trindade et al. (2004; 2005). A grande maioria desses trabalhos atestam ganhos de resistência e confirmam a ação das fibras como meio de aumentar a ductilidade do solo. Relatos de trabalhos de campo são mais escassos, mas, de modo similar, comprovam a facilidade de execução e de compactação e o bom desempenho do fibrossolo (AUSTIN et al., 1993; TRINDADE et al., 2005). No entanto, só recentemente as bases tecnológicas do fibrossolo vêm sendo paulatinamente estabelecidas em nível internacional (BUENO et al., 1997).

Uma constatação que surge de estudos experimentais de laboratório é a de que a presença das fibras modifica o comportamento dos solos, gerando um material mais dúctil, mais coesivo e levemente mais compressível (BUENO, 1996). Esse autor destacou que há, notadamente, ganho significativo de coesão de intercepto que nem sempre é acompanhado por melhoria no ângulo

de atrito interno do solo (BUENO et al., 1997). Destacou, ainda, que a incorporação de fibras também afeta, levemente, a permeabilidade dos solos, reduz o coeficiente de permeabilidade dos solos mais permeáveis e provoca efeito inverso nos menos permeáveis.

Segundo Iasbik et al. (2000), há muitas situações em que o solo reforçado com fibras irá se mostrar extremamente competitivo com outras soluções tradicionais, apesar de ter em seu custo final a parcela de custo referente ao preço das fibras, que no Brasil, no começo do século XXI, era em torno de R\$3,00 a 4,50/kg. Com base nessas constatações, acredita-se que um dos campos de aplicação que se mostram promissores para as misturas de solos com fibras de polipropileno é o seu emprego como reforço de terraplenos de estradas e em camadas estruturais de rodovias não pavimentadas, englobando-se nessa categoria estradas florestais.

Considerando-se o grande potencial do uso de solos reforçados com fibras em estradas florestais, o presente artigo buscou abordar os resultados de um estudo de laboratório dirigido à análise dos seguintes fatores: (i) influência do quantitativo e comprimento das fibras de polipropileno na resistência à compressão não-confinada de um solo residual jovem de textura predominantemente arenosa; (ii) influência da variação da umidade na resistência à compressão não-confinada do solo e da mistura ótima de solo-fibra, entendida como o quantitativo de fibras de determinado comprimento responsável pelo maior incremento na resistência à compressão não-confinada do solo em estudo; e (iii) análise das mudanças nos parâmetros de resistência ao cisalhamento (ângulo de atrito interno e coesão de intercepto) do solo e da mistura ótima solo-fibra determinados através de ensaios triaxiais do tipo CID/Sat.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material utilizado

Trabalhou-se com um solo de textura predominantemente arenosa, composto por 8% de argila, 11% de silte e 81% de areia, classificado pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT) como A-2-4(0) e bastante comum na região de Viçosa, localizada na Zona da Mata Norte de Minas Gerais, Brasil. A amostra desse solo foi coletada entre as profundidades de 5,80 e 6,20 m, a contar do topo de um talude de corte existente

próximo à Vila Secundino, localizada no Campus da Universidade Federal de Viçosa em Viçosa, MG.

O reforço do solo arenoso foi viabilizado mediante o emprego de fibras de polipropileno de distribuição aleatória, com comprimentos de 10, 15, 20 e 30 mm, largura de 1,2 mm e espessura de 0,016 mm (massa linear de 0,1168 g/m). As fibras foram fornecidas nas dimensões já referidas, pela empresa ORPEC – Indústria e Comércio Ltda., sediada na cidade de Curitiba, Paraná, na forma de laminetes. A amostra de solo, no estado natural e quando estabilizada com fibras, foi caracterizada geotécnicamente via ensaios de compactação, compressão não-confinada e triaxiais do tipo CID/Sat.

2.2 Preparação de amostras e programa de ensaios

Foram analisadas amostras do solo em estudo e das suas misturas com fibras de polipropileno distribuídas aleatoriamente, englobando os ensaios geotécnicos apresentados nos itens subseqüentes.

2.2.1 Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados na energia do ensaio Proctor Normal, conforme metodologia descrita na norma NBR 7182, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1986), para fins de determinação do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (W_{ot}) do solo estudado e de suas misturas com fibras de polipropileno com comprimento de 10, 15, 20 e 30 mm. Trabalhou-se com os quantitativos de fibras de 0,25; 0,50; e 0,75%, em relação ao peso de solo seco, ou seja, foram analisadas 12 misturas (3 percentuais x 4 comprimentos).

2.2.2 Moldagem dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram moldados na energia anteriormente citada, para a realização dos ensaios de compressão não-confinada e triaxiais CID/Sat. Foram compactados por processo dinâmico em três camadas iguais, considerando-se os seguintes limites fixados em sua preparação: dimensões: $10 \pm 0,05 \times 5$ cm; umidade: umidade desejada $W_i \pm 0,3\%$; e grau de compactação: $100 \pm 0,3\%$.

2.2.3 Ensaios de compressão não-confinada

Os ensaios de compressão não-confinada foram realizados segundo a metodologia proposta por Head (1982), para fins de determinação da mistura ótima de solo-fibra (quantitativo de fibras de determinado

comprimento responsáveis pelo maior incremento na resistência à compressão não-confinada do solo em estudo), considerando-se a energia de compactação do ensaio Proctor Normal. A determinação da resistência à compressão não-confinada foi realizada pela média das tensões de ruptura de três corpos-de-prova, admitindo-se uma tolerância de $\pm 10\%$ em torno da média, segundo procedimento corriqueiro em trabalhos de estabilização de solos para fins rodoviários.

Foram realizados também ensaios de compressão não-confinada, em corpos-de-prova compactados em diferentes umidades ($W_{ot} - 2\%$, W_{ot} e $W_{ot} + 2\%$), com o solo e a mistura ótima de solo-fibra obtida a partir dos ensaios descritos no parágrafo anterior, também considerando-se três repetições.

2.2.4 Ensaios triaxiais consolidados drenados

Os ensaios de compressão triaxial foram do tipo CID/Sat, também realizados de acordo com a metodologia descrita por Head (1982), ou seja, o ensaio triaxial foi executado em corpos-de-prova saturados e, em seguida, submetidos a um adensamento para, então, dar-se início ao ensaio, quando se permitiu a drenagem da água presente no corpo-de-prova. Esses ensaios foram conduzidos em amostras do solo em estudo e na mistura ótima de solo-fibra, considerando-se os parâmetros ótimos de compactação ($\gamma_{dm\acute{a}x}$ e W_{ot}) determinados na energia do ensaio Proctor Normal e a moldagem de apenas um corpo-de-prova para cada ponto da envoltória de resistência, segundo o procedimento-padrão em trabalhos geotécnicos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O comprimento das fibras mostrou-se fator preponderante nos resultados dos ensaios de compactação, bem como homogeneidade e umidade da mistura. Quando se trabalhou, por exemplo, com fios longos (como fibras com 30 mm de comprimento), foi difícil a compactação do compósito, uma vez que ele se tornou quebradiço, formando planos preferenciais de ruptura. Tal fenômeno, conhecido por laminação, mostrou-se mais freqüente à medida que aumentavam o quantitativo e o comprimento das fibras. Foi, também, possível observar que as fibras tenderam a se posicionarem em planos preferencialmente horizontais, absorvendo parte da energia despendida no processo de compactação, dando ao material um comportamento resiliente.

No presente estudo, trabalhou-se com a inclusão de fibras de polipropileno de 10, 15, 20 e 30 mm de comprimento, nos quantitativos de 0,25; 0,50; e 0,75% em relação ao peso do solo seco, não se notando variações significativas no peso específico aparente seco máximo e nas umidades ótimas das misturas solo-fibra em comparação com o solo.

Os resultados dos ensaios de compactação forneceram uma umidade ótima de 14,04% e um peso específico aparente seco máximo de 18,11 kN/m³ para o solo pesquisado. Valor esse também adotado nas misturas solo-fibra.

Na Figura 1, apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão não-confinada realizados com corpos-de-prova compactados nos parâmetros ótimos ($\gamma_{dm\acute{a}x}$ e W_{ot}) da energia de compactação do ensaio Proctor Normal, a fim de determinar o quantitativo e comprimento ótimos de fibras e avaliar a influência da variação da umidade na resistência à compressão não-confinada do solo e da mistura ótima de solo-fibra.

Os resultados apresentados na Figura 1a indicam que a máxima resistência à compressão não-confinada foi observada na combinação do quantitativo de 0,75% de fibras com comprimento de 20 mm. Nessa combinação ótima, as fibras promoveram um ganho de resistência à compressão da ordem de 110%.

A umidade de moldagem dos corpos-de-prova mostrou-se fator de grande importância para definição da resposta mecânica das misturas solo-fibra, como se observa na Figura 1b. Através dos resultados de ensaios de compressão não-confinada realizados com o solo e com a mistura ótima de solo-fibra e considerando diferentes umidades de moldagem dos corpos-de-prova ($W_{ot} - 2\%$, W_{ot} e $W_{ot} + 2\%$), foi possível observar um máximo de resistência associado à umidade ótima para a mistura ótima solo-fibra. Em contrapartida, constatou-se um máximo relacionado ao ramo seco, para o solo.

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os resultados dos ensaios triaxiais consolidados e isotropicamente drenados (CID/Sat) realizados em corpos-de-prova do solo em estudo e da sua mistura com 0,75% de fibras de 20 mm de comprimento, moldados nos parâmetros ótimos ($\gamma_{dm\acute{a}x}$ e W_{ot}) do ensaio de compactação Proctor Normal.

Os dados apresentados na Figura 2 indicam, claramente, que a mistura do solo com 0,75% de fibras de 20 mm apresenta aumento da tensão de pico e tendência de redução na queda de tensão pós-pico em relação ao solo não-reforçado, em concordância com observações de Bueno et al.(1997).

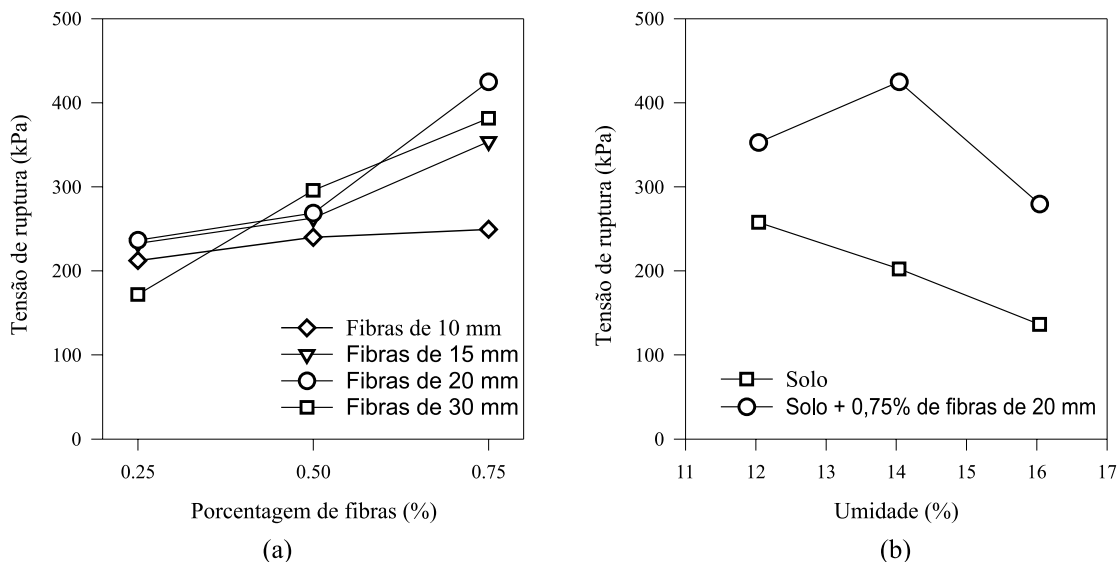
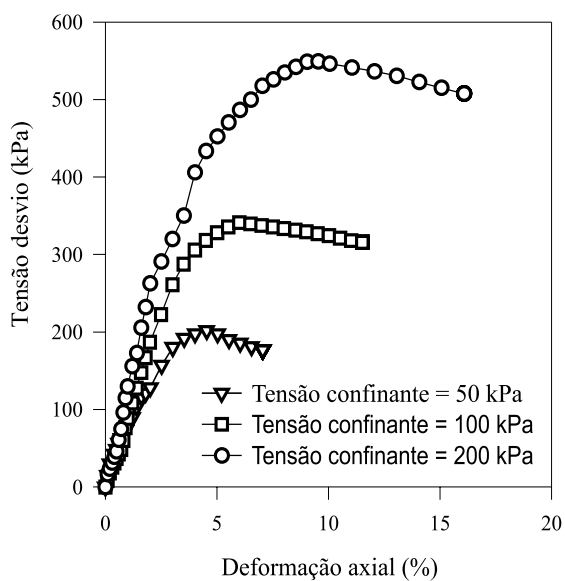
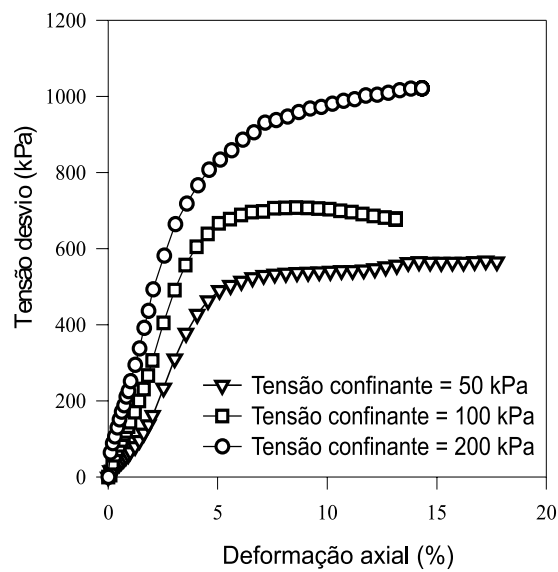


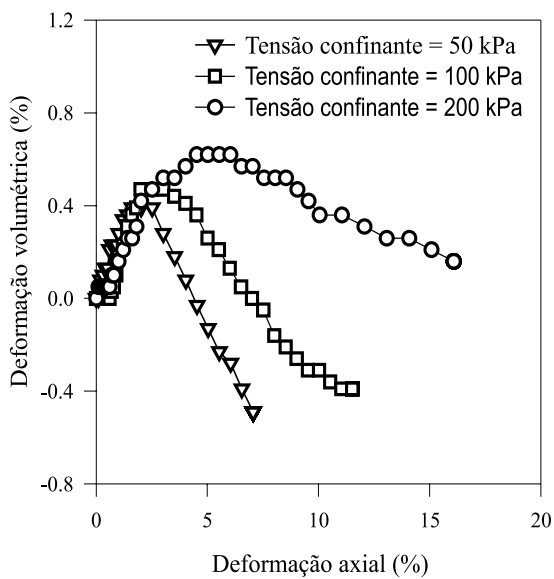
Figura 1 – Resultados dos ensaios de compressão não-confinada.
Figure 1 – Data from unconfined compression tests.



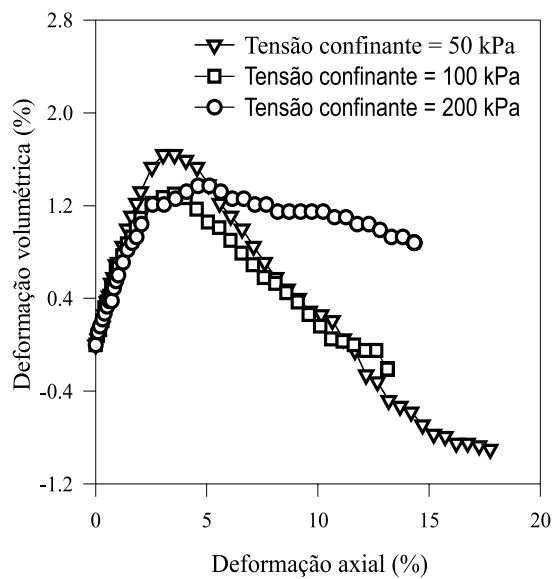
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2 – Resultados dos ensaios triaxiais consolidados drenados realizados com corpos-de-prova do solo (ac) e da mistura ótima de solo-fibra (bd).

Figure 2 – Data from soil (ac) and soil-optimum fiber mixture (bd) specimens tested under consolidated-drained triaxial compression.

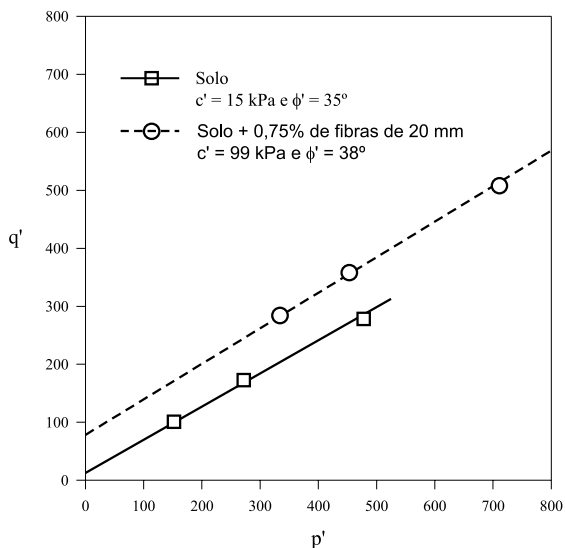


Figura 3 – Envoltórias de ruptura p' - q' determinadas para corpos-de-prova do solo e da mistura ótima de solo-fibra, através de ensaios triaxiais consolidados drenados.

Figure 3 – Peak failure envelopes in p' - q' space obtained for soil and soil-optimum fiber content specimens tested under consolidated-drained triaxial compression.

Observou-se também, nas envoltórias de resistência ao cisalhamento apresentadas na Figura 3, que a inclusão das fibras promoveu ganho na resistência ao cisalhamento do solo, predominantemente no parâmetro coesão de intercepto. Essa figura, que apresenta uma comparação da resposta mecânica em termos de resistência ao cisalhamento do solo estudado e da mistura ótima solo-fibra, ilustra que o parâmetro ângulo de atrito interno ficou praticamente inalterado, apresentando aumento de apenas 3 ou 8,5% à medida que o parâmetro coesão de intercepto teve um incremento de aproximadamente 560%.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos ensaios de compressão não-confinada realizados no presente trabalho, determinou-se que o quantitativo e o comprimento ótimos de fibras de polipropileno para o solo em estudo foram, respectivamente, de 0,75% e 20 mm, sendo essa dosagem responsável por aumentos da ordem de 110% na

resistência à compressão não-confinada do solo. Observou-se, também, que a máxima resistência à compressão não-confinada da mistura ótima solo-fibra relacionou-se com a umidade ótima, em contraposição ao que ocorreu com o solo, em que se verificou um máximo de resistência associado ao ramo seco da curva de compactação.

No que diz respeito à resistência ao cisalhamento do solo e da mistura solo-fibra, pôde-se verificar que a adição de 0,75% de fibras de 20 mm promoveu ganho significativo no parâmetro coesão de intercepto da ordem de 560% e, praticamente, não causou alterações no parâmetro ângulo de atrito interno.

Com base nos resultados, pode-se concluir que o reforço do solo arenoso com fibras de polipropileno aumenta significativamente a sua resistência mecânica, podendo ele se tornar alternativa técnica de interesse para o projeto e construção de estradas florestais.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à FAPEMIG/FIEMG, pelas concessões de bolsas, respectivamente, ao primeiro e ao segundo autor; e à Universidade Federal de Viçosa, pela cessão do espaço para a realização do presente trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Solo: ensaio de compactação - Procedimento**. NBR 7182/86. Rio de Janeiro: 1986. 10p.
- AL-REFEAI, T.O. Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 10, n. 4, p. 319-333, 1986.
- AUSTIN, D.N.; SHRADER, S.L.; CHILL, D.S. Soil stabilization with discrete fibrillated polypropylene fibers. **Geotechnical Fabrics Report**, p. 4-10, 1993.
- BUENO, B.S.; LIMA, D.C.; MACHADO, C.C. **Estudo de dosagens de misturas solo-cal, cimento, DS-328 e fibras**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1994. 68p. (Relatório Técnico LMS-01/94).

- BUENO, B.S. **Aspectos de estabilização de solos com uso de aditivos químicos e de inclusões plásticas aleatórias**. 1996. 99 f. Texto Sistematizado (Livro Docência em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1996.
- BUENO, B.S. et al. The mechanical response of reinforced soils using short randomly distributed plastic strips. In: RECENTS DEVELOPMENTS IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, 1997, COPPE. 1997, Rio de Janeiro. **Proceedings...**, Rotterdam: A.A. Balkema, Rotterdam Geotechnical Engineering, 1997. p. 401-408.
- CASAGRANDE, M.D.T.; CONSOLI, N.C. Estudo do comportamento de um solo residual areno-siltoso reforçado com fibras de polipropileno. **Solos e Rochas: Revista Latino-Americana de Geotecnia**, v. 25, n. 3, p. 223-230, 2002.
- DEPARTMENT OF SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ROAD RESEARCH LABORATORY – DSIRRRRL. **Soil mechanics for road engineers**. London: Her Majesty's Stationary Office, 1957. 541p.
- GRAY, D.H.; OHASHI, H. Mechanics of fibers reinforced in sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 109, n. 3, p. 335-353, 1983.
- HEAD, K.H. **Manual of soil laboratory testing: permeability, shear strength and compressibility tests**. New York: John Wiley & Sons, 1982. 418 p. 2 v.
- IASBIK, I. et al. Resistência mecânica do solo-fibra: caracterização via ensaios de compressão não-confinada com vistas ao uso em estradas florestais, In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL SOBRE FLORESTAS, 6., (FOREST 2000), Porto Seguro, BA. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Ambiental Biosfera, 2000. p. 257-259.
- KERISEL, J. **The history of geotechnical engineering up until 1700**. San Francisco: ISSMFE, Golden Jubilee Book on History of Geomechanics, 50th Anniversary of ISSMFE, 1985. p.11-62.
- LIMA, D.C.; BUENO, B.S.; THOMASI, L. The mechanical response of soil-lime mixtures reinforced with short synthetic fibers. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GETECHNOLOGY, 3., 1996, San Diego. **Proceedings...** San Diego: 1996. p. 868-877.
- SILVA, D.P. **Estudo do comportamento reológico de solos estabilizados com cimento: processos gerais de estabilização**. 1968. 343 f. Tese (Especialista), Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, Proc. 52/8/3048. 1968.
- SOUTO SILVEIRA, E.B.; SILVEIRA, A. **Notas sobre a dosagem dos componentes na estabilização granulométrica**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 1964. 16p. (Publicação, 102).
- TEIXERA, S.H.C.; BUENO, B.S.; LIMA, D.C. Estudo do comportamento de solos reforçados com fibras. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, 1., 1994, Juiz de Fora, MG. **Anais...**, Juiz de Fora: Univesidade Federal de Juiz de Fora, 1994. p. 54-64.
- TRINDADE, T.P. et al. Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo em laboratório. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 57, n.1, p. 53-58, 2004.
- TRINDADE, T.P. et al. Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo realizado com amostras de grandes dimensões. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 58, n. 1, p.33-38, 2005.
- YAMAMUCHI, T. Historical review of geotextiles for reinforcement of earth works in Asia. In: OCHIAI, H.; OTANI. (Ed.). **Earth reinforcement practice**. Rotterdam: 1993. p. 737-751.