

INFLUÊNCIA DO TIPO DE CURA (SELADA E EXPOSTA) E DA IMERSÃO EM ÁGUA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MISTURAS SOLO-RBI GRADE 81 COM VISTAS A APLICAÇÕES EM ESTRADAS FLORESTAIS¹

Tiago Pinto da Trindade², Dario Cardoso de Lima³, Carlos Cardoso Machado⁴, Carlos Alexandre Braz de Carvalho³, Maurício Paulo Ferreira Fontes⁵, Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer⁵ e Fernando Paulo Caneschi⁶

RESUMO – No presente artigo, analisou-se a influência das condições de cura e da imersão em água na resistência mecânica de misturas de três solos típicos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, Brasil, estabilizados com o aditivo químico RBI Grade 81, para aplicações em estradas florestais. Trabalhou-se com um solo residual maduro (solo 1) e dois solos residuais jovens (solos 2 e 3) de gnaíse. O programa de ensaios de laboratório englobou: (i) teores de RBI Grade 81: 2, 4 e 6% em relação ao peso de solo seco; (ii) energia de compactação: Proctor Modificado; (iii) parâmetros de resistência mecânica: resistência à compressão não-confinada; (iv) tempo de cura dos corpos-de-prova: 7 dias em câmara climatizada; (v) condições de cura dos corpos-de-prova na câmara climatizada: sem proteção e com proteção de sacos plásticos; (vi) realização dos ensaios de compressão não-confinada: sem imersão e com imersão por 4 h em água. Os resultados obtidos comprovaram que: (i) as condições de cura e a imersão em água dos corpos-de-prova influenciaram significativamente a resistência mecânica das misturas; (ii) a selagem dos corpos-de-prova em sacos plásticos levou a se subestimar a resistência mecânica das misturas no campo; e (iii) a não-imersão em água dos corpos-de-prova levou a superestimar a resistência mecânica das misturas no campo.

Palavras-chave: Condições de cura, estabilização de solos, RBI Grade 81, estradas florestais e resistência à compressão não-confinada.

INFLUENCE OF THE CURING TYPE (SEALED AND EXPOSED) AND WATER SUBMERSION ON THE MECHANICAL STRENGTH OF SOIL-RBI GRADE 81 MIXTURES FOR FOREST ROADS APPLICATIONS

ABSTRACT – *This paper focuses on the study of the influence of the parameters curing type and water submersion on the mechanical strength of RBI Grade 81 mixtures of three typical soils from the Zona da Mata Norte de Minas Gerais, Brazil, for forest roads applications. A mature (soil 1) and two young (soils 2 and 3) gneiss residual soils were used throughout the study. Description of the laboratory testing program is as follow: (i) RBI Grade 81 content: 2, 4 and 6% regarding soil dry mass; (ii) compaction effort: Modified Proctor; (iii) mechanical strength: non-confined compression strength; (iv) mixture specimens curing time: 7 days in acclimatized room; (v) mixture specimens curing conditions: specimen sealed in plastic bags, and specimen exposed to air in acclimatized room; (vi) non-confined compression strength tests: specimens tested dry and*

¹ Recebido em 30.03.2004 e aceito para publicação em 20.04.2005.

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

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

⁴ Departamento de Engenharia Florestal da UFV, Viçosa-MG, Brasil. E-mail: <machado@ufv.br>.

⁵ Departamento de Solos da UFV, Viçosa-MG, Brasil.

⁶ Graduação em Engenharia Civil, DEC-UFV, Viçosa-MG, Brasil.

after 4 hours water immersion. The laboratory testing program data supported that: (i) curing conditions and water immersion affected significantly the mechanical strength of the tested mixtures; (ii) the sealed curing condition led to underestimate the field mixtures' mechanical strength; (iii) the mechanical strength of mixture specimens tested without previous immersion in water overestimated the field mixtures' mechanical strength.

Keywords: Cure conditions, soil stabilization, RBI Grade 81, forest roads, and unconfined compression strength.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os recursos destinados por empresas florestais para a conservação de estradas constituem parte expressiva de seus orçamentos. A adoção de técnicas de estabilização de solos com materiais alternativos, como é o caso do RBI Grade 81, em substituição aos tradicionais materiais de jazidas de empréstimo, pode trazer significativas contribuições no que diz respeito à minoração dos custos de manutenção das vias florestais, além de reduzir os impactos provenientes da exploração das referidas jazidas.

Segundo Lima (1981), em se tratando de estradas, a estabilização de um solo significa conferir-lhe a capacidade de resistir às ações erosivas naturais e aos esforços e desgastes induzidos pelo tráfego sob as condições mais adversas consideradas no projeto. São vários os critérios de classificação dos processos de estabilização dos solos para fins de engenharia, podendo-se referir ao uso do tipo de energia, como se segue: mecânica, química, elétrica e térmica (SILVA, 1968). No presente artigo, aborda-se a estabilização química dos solos, que é uma técnica rotineira para a construção de rodovias.

Os mecanismos de estabilização química de um solo consistem nas alterações produzidas em sua massa pela introdução de uma pequena quantidade de aditivo químico, o qual lhe confere certas propriedades de engenharia pré-definidas em projeto (LIMA, 1981; LIMA et al., 1983).

Comumente, em laboratório, realiza-se a cura de corpos-de-prova de misturas estabilizadas quimicamente em câmara climatizada, os quais, de modo geral, são envolvidos por sacos plásticos (cura selada) para evitar o contato com o ar. No entanto, essas misturas são submetidas ao processo de cura exposta, quando empregadas como revestimento primário de estradas. A partir dessas constatações, destaca-se a importância da realização de um estudo para avaliar a influência dos tipos de cura (selada e exposta) na resistência mecânica de misturas solo-RBI Grade 81.

O principal objetivo do presente trabalho foi analisar a influência do tipo de cura (selada e exposta) e da imersão em água na resposta mecânica das misturas de três solos típicos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais com o aditivo químico RBI Grade 81. Buscou-se, também, avaliar o efeito da adição do RBI Grade 81 nos parâmetros de compactação (peso específico aparente seco máximo e umidade ótima) dos solos estudados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Material utilizado

2.1.1. Solos

Trabalhou-se com materiais comuns na microrregião de Viçosa, Minas Gerais, empregando um solo residual de gnaiss maduro, pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (solo 1), e dois solos residuais de gnaiss jovens (solos 2 e 3). Esses materiais foram estabilizados com 2, 4 e 6% de RBI Grade 81 em relação ao peso de solo seco, considerando-se um período de cura em câmara úmida das misturas de sete dias.

O solo 1 é representativo do manto superficial maduro, horizonte B, bastante intemperizado e classificado como A-7-5 (20), de acordo com a classificação do Transportation Research Board (TBR) e LG', segundo a Metodologia MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1995). A sua textura é areno-argilo-siltosa (61% de argila, 14% de silte e 25% de areia), com LL de 74% e IP de 35%. As amostras foram coletadas em um talude de corte localizado no lado direito da rodovia que liga os municípios de Viçosa e Paula Cândido, no Estado de Minas Gerais, nas proximidades da usina de pré-misturado a frio da cidade de Viçosa.

O solo 2 refere-se ao manto saprolítico, horizonte C, abundante na microrregião de Viçosa, espesso e apresentando argilominerais do grupo das micas. A sua classificação pelo TBR é A-6 (1) e pela Metodologia

MCT, NS'. Apresenta textura areno-silto-argilosa (15% de argila, 22% de silte e 63% de areia), LL de 38% e IP de 13%. As amostras relativas a essa ocorrência foram coletadas em um talude de corte situado no lado esquerdo da rodovia que liga Viçosa a Paula Cândido, em frente da entrada do Bairro Romão dos Reis, na cidade de Viçosa.

O solo 3 é oriundo de um perfil de intemperismo de solos desenvolvidos do gnaiss do Pré-Cambriano. Refere-se, também, ao manto saprolítico, sendo classificado pelo TRB como A-2-4 (0) e NG' pela Metodologia MCT. Apresenta coloração acinzentada, com granulometria areno-silto-argilosa (13% de argila, 17% de silte e 70% de areia), LL de 29% e IP de 9%. O local de coleta da amostra é um talude de corte localizado na Vila Secundino, no Campus da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

2.1.2. Aditivo químico

O aditivo químico RBI Grade 81 atualmente é produzido pela empresa Anyway Solid Environmental Solutions LTD. Kerem maharal, em Israel e no Canadá, com representação no Brasil, até fins de 2003, pela empresa Tecflora S.A., que gentilmente forneceu amostras desse produto para a realização deste trabalho. Segundo o fabricante, o produto é composto por substâncias inorgânicas que agem nos solos para produzir material resistente à ação das intempéries, estáveis sob a ação de cargas e relativamente impermeáveis (ANYWAY, 2002).

2.2. Preparação de amostras e programa de ensaios

Os procedimentos empregados na preparação das misturas obedeceram às recomendações do fabricante do produto (ANYWAY, 2003) apenas adotando-se uma variação que incluiu a determinação, por meio dos resultados de ensaios de laboratório apresentados no trabalho de Trindade et al. (2005), dos tempos ótimos decorridos entre mistura e compactação dos solos considerados no presente estudo. Foram realizados ensaios de compressão não-confinada, com corpos-de-prova dos solos 1, 2 e 3 estabilizados com 4% de RBI Grade 81, moldados nos parâmetros ótimos (w_{ot} e $\gamma_{dmáx}$) do ensaio de compactação Proctor Modificado, adotando-se os períodos entre mistura e compactação de 0, 4, 8 e 24 horas. Os tempos ótimos decorridos entre mistura e compactação de cada um dos solos foram os que se associaram aos maiores valores de resistência à compressão não-confinada. Segundo

Trindade et al. (2005), os períodos de tempo ótimos determinados em laboratório resultaram em: (i) 4 horas nos solos 1 e 2; e (ii) compactação imediatamente após a mistura no solo 3. Nas misturas, adicionou-se o aditivo nos teores de 2, 4 e 6% em relação ao peso de solo seco, fez-se a homogeneização da massa estabilizada, adicionou-se água a ela com posterior homogeneização, e procedeu-se ao acondicionamento das amostras em sacos plásticos impermeáveis, considerando: (i) os tempos de repouso das misturas antes da compactação previamente determinados; (ii) moldagem de corpos-de-prova das misturas nos parâmetros ótimos (w_{ot} e $\gamma_{dmáx}$) da energia de compactação do ensaio Proctor Modificado; (iii) corpos-de-prova sem proteção (cura exposta) e com proteção de sacos plásticos (cura selada); e (iv) cura dos corpos-de-prova das misturas em câmara climatizada (com umidade relativa do ar superior a 95%) por um período de sete dias. Após a cura dos corpos-de-prova, procedeu-se à realização de ensaios de compressão não-confinada sem e com imersão em água por um período de 4 horas.

2.2.1. Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados na energia do ensaio Proctor Modificado, segundo a metodologia Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e descrita na Norma NBR 7182 (ABNT, 1986), para determinação do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) e da umidade ótima (w_{ot}) dos solos e das misturas.

2.2.2. Moldagem dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de compressão não-confinada foram moldados nos parâmetros ótimos (w_{ot} e $\gamma_{dmáx}$) da energia de compactação anteriormente citada. Os corpos-de-prova foram compactados por processo dinâmico em cinco camadas iguais, aplicando-se 27 golpes com um soquete de massa igual a 4,536 kg e altura de queda de 45,72 cm em cada camada e utilizando-se o molde do ensaio de compactação Proctor, ou seja, um molde cilíndrico de 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura (aproximadamente, 1.000 cm³ de volume). Para aceitação dos corpos-de-prova foram fixados os seguintes limites em sua preparação (DNER, 1994b): peso específico aparente seco máximo $\pm 0,30$ kN/m³ e umidade ótima $\pm 0,5\%$.

2.2.3. Ensaios de compressão não-confinada

Foi utilizada a metodologia proposta pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1994a) na realização dos ensaios de compressão não-confinada. Para execução desses ensaios, considerou-se a energia de compactação do ensaio Proctor Modificado, o período de cura em câmara úmida de sete dias e os teores de RBI Grade 81 de 2, 4 e 6% em relação ao peso de solo seco. 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. Nos casos em que o desvio-padrão superou o valor preestabelecido, procedeu-se à moldagem e execução do ensaio de outros três corpos-de-prova, aumentando-se, assim, o número de amostras e, conseqüentemente, a confiabilidade dos resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados no Quadro 1 indicam que a adição de RBI Grade 81 promoveu redução nos valores de peso específico aparente seco máximo e aumento nos valores de umidade ótima, dos solos 1, 2 e 3, quando compactados na energia do ensaio Proctor Modificado.

Analisando os resultados apresentados na Figura 1, notou-se que o aumento do teor de aditivo químico proporcionou acréscimos significativos nos valores de resistência à compressão não-confinada das misturas. Os ensaios realizados com corpos-de-prova moldados nos parâmetros ótimos (w_{ot} e $\gamma_{dmáx}$) da energia de compactação do Proctor Modificado forneceram valores médios de resistência à compressão não-confinada para os solos 1, 2 e 3, respectivamente, de 877, 638 e 292 kPa. Considerando-se os corpos-de-prova submetidos à cura selada, os dados ilustrados na Figura 1 evidenciam que as misturas dos solos com 6% de RBI Grade 81 foram as que apresentaram os maiores

valores de resistência à compressão não-confinada, sendo os ganhos de resistência em relação aos solos 1, 2 e 3, respectivamente, de 62, 202 e 187%. No que diz respeito aos corpos-de-prova submetidos à cura exposta, observou-se, também, que os maiores valores de resistência à compressão não-confinada se associaram às misturas dos solos com 6% de RBI Grade 81, e os ganhos de resistência em relação aos solos 1, 2 e 3 foram, respectivamente, de 203, 692 e 728% (Figura 1).

A partir dos resultados ilustrados na Figura 1 foi possível constatar que as únicas amostras que não resistiram à imersão em água por um período de 4 horas, no ensaio de compressão não-confinada, foram as que se seguem: solo 2, natural e quando estabilizado com 2% de RBI Grade 81; e solo 3, natural. Esses resultados apontam que o aditivo químico em estudo promoveu maior estabilidade aos solos quando submetidos à imersão em água. No entanto, em todas as condições avaliadas neste estudo, notou-se uma queda de resistência mecânica quando foram comparadas as resistências de corpos-de-prova ensaiados após a imersão em água com aqueles ensaiados sem imersão. Houve casos em que a imersão foi responsável por quedas de até 62%, podendo-se citar, como exemplo, o solo 1 estabilizado com 4% de RBI Grade 81 quando submetido à cura exposta ao ar.

Os dados apresentados na Figura 1 revelam que o tipo de cura mostrou-se um fator de importância significativa na resposta mecânica das misturas estabilizadas. Em todos os casos analisados, à exceção do solo 3 com 4% de RBI Grade 81, foi observado que os corpos-de-prova que foram submetidos à cura exposta apresentaram melhor desempenho em comparação com aqueles em que a cura foi selada. Merecem destaque as misturas do solo 1 com RBI Grade 81, em que os ganhos de resistência das amostras submetidas à cura exposta em comparação com aquelas que foram submetidas à cura selada chegaram a valores na ordem de 86%.

Quadro 1 – Resultados dos ensaios de compactação
Table 1 – Compaction tests data

Porcentagem de RBI Grade 81	Solo 1		Solo 2		Solo 3	
	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)	w_{ot} (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)	w_{ot} (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)	w_{ot} (%)
0	15,17	27,32	17,49	14,31	19,68	9,95
2	15,05	27,56	17,37	14,70	19,19	10,72
4	14,94	28,44	17,09	15,09	18,30	12,06
6	14,35	30,35	16,92	16,11	18,12	12,10

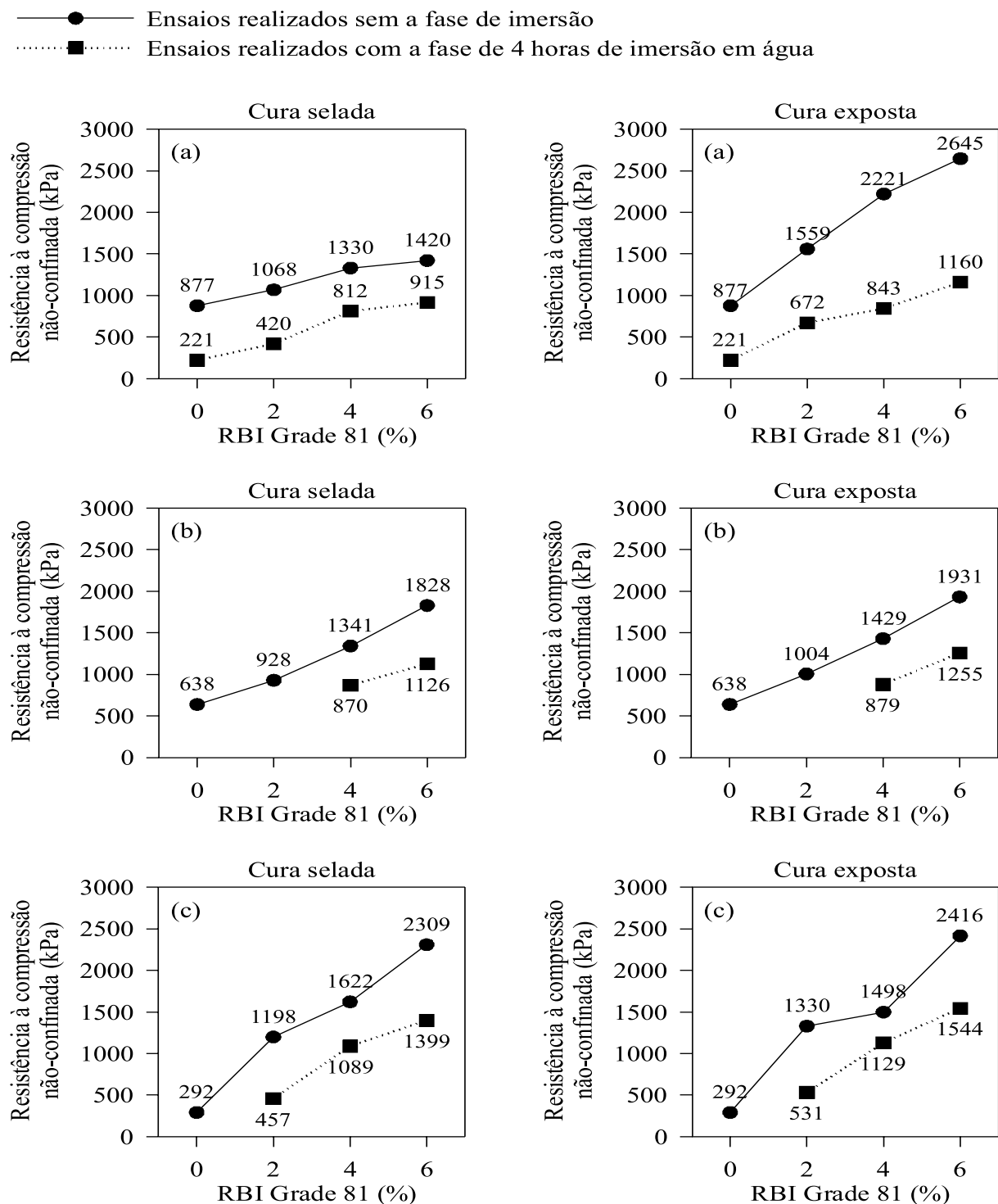


Figura 1 – Resultados dos ensaios de compressão não-confinada: (a) solo1, (b) solo2, e (c) solo 3.
Figure 1 – Unconfined compression tests data: (a) soil 1, (b) soil 2, and (c) soil 3.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas condições da presente pesquisa, pode-se afirmar que a resistência à compressão não-confinada das misturas dos três solos estudados com o aditivo químico RBI Grade 81 é significativamente influenciada pelas variáveis: tipo de cura (selada e exposta), porcentagem de RBI Grade 81 e imersão em água.

Os resultados apontaram que os ensaios realizados em laboratório sem a fase de imersão em água superestimaram os valores de resistência à compressão não-confinada. No entanto, deve-se destacar que em possíveis condições adversas de campo podem ocorrer períodos prolongados de chuvas intensas que, conseqüentemente, podem levar o revestimento primário a condições semelhantes àquelas vivenciadas em laboratório nos ensaios com imersão em água.

Os valores de resistência à compressão não-confinada determinados de maneira tradicional (cura selada) subestimaram, no entanto, a resistência mecânica das misturas solo-RBI Grade 81 com relação às condições de cura exposta ao ar em câmara climatizada, situação essa mais próxima das condições de campo.

Por fim, apesar dos resultados obtidos se mostrarem promissores e qualificarem o RBI Grade 81 como um produto de potencial significativo para aplicação em estradas florestais, conclusões definitivas só serão possíveis pela realização de pesquisas que abranjam maior gama de solos, bem como através da construção e do acompanhamento do desempenho de trechos experimentais executados com as misturas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam os seus agradecimentos à CAPES, pela concessão da bolsa de estudo ao primeiro autor; à Sociedade de Investigações Florestais (SIF), pelo apoio financeiro; à empresa Tecflora S.A., pelo fornecimento de amostras de RBI Grade 81 utilizadas no presente trabalho; e à Universidade Federal de Viçosa, através do Departamento de Engenharia Civil, por ter possibilitado a execução do presente trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7182**: Solo: ensaio de compactação: Procedimento. Rio de Janeiro: 1986. 10 p.

ANYWAY SOLID ENVIRONMENTAL SOLUTIONS LTD. KEREM MAHARAL. **Frequently asked questions**. Israeli Office, 50 Bezael Street, Ramat-Gan, 52521 Israel, 2002. 2 p.

ANYWAY SOLID ENVIRONMENTAL SOLUTIONS LTD. KEREM MAHARAL. **Guide to the construction of pavement layers and stabilized materials using RBI Grade 81 natural soil stabilizer**. Israeli Office, 50 Bezael Street, Ramat-Gan, 52521 Israel, 2003. 8 p. Disponível em <http://www.anywaysolutions.com/>. Acesso em: 22 mar. 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 201**: Solo-cimento: compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio. Rio de Janeiro: 1994a. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER-ME 202**: Solo-cimento: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio. Rio de Janeiro: 1994b. 7 p.

LIMA, D. C. **Algumas considerações relativas a aspectos da estabilização dos solos, em particular à estabilização solo-cal**. 1981. 171 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1981.

LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização dos solos II: técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1993. 32 p. (Caderno Didático, 333).

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995. 213 p.

SILVA, D. P. **Estudo do comportamento reológico de solos estabilizados com cimento: processos gerais de estabilização**. 1968. 343 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia Civil, Proc. 52/8/3048), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, 1968.

TRINDADE, T. P. et al. Estabilização química do subleito de estradas: influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação na resistência mecânica de misturas solo-RBI Grade 81. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 413-418, 2005.