

TIAGO PINTO DA TRINDADE

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE TRÊS SOLOS RESIDUAIS  
ESTABILIZADOS QUIMICAMENTE COM VISTAS A APLICAÇÕES EM  
GEOTECNIA RODOVIÁRIA E AMBIENTAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2006

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

T833c  
2006

Trindade, Tiago Pinto da, 1977-

Caracterização tecnológica de três solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em geotecnia rodoviária e ambiental / Tiago Pinto da Trindade. – Viçosa : UFV, 2006.

xv, 254f. : il. algumas col. ; 29cm.

Orientador: Dario Cardoso de Lima.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Mecânica do solo. 2. Estradas - Projetos e construção. 3. Solos - Poluição. 4. Solos - Compactação. 5. Solos - Testes. 6. Química do solo. 7. Proteção ambiental. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 624.15136

TIAGO PINTO DA TRINDADE

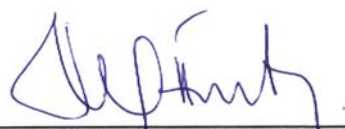
**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE TRÊS SOLOS RESIDUAIS  
ESTABILIZADOS QUIMICAMENTE COM VISTAS A APLICAÇÕES EM  
GEOTECNIA RODOVIÁRIA E AMBIENTAL**

Tese apresentado à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 14 de junho de 2006.




Prof. Carlos Ernesto G. R. Schaefer  
(Co-Orientador)



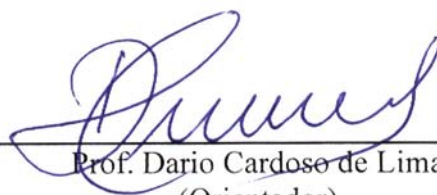
Prof. Maurício Paulo Ferreira Fontes  
(Co-Orientador)



Prof. Márcio Marangon



Profª. Terezinha Cássia de Brito Galvão



Prof. Dario Cardoso de Lima  
(Orientador)

**Aos meus pais,  
Antônio “In memoriam” e Sirlene  
À minha esposa,  
Arlete**

**Dedico**

# Agradecimentos

A Deus, por iluminar o meu caminho.

Aos meus pais Antônio “In memoriam” e Sirlene, pela vida, pela criação, pela ajuda nos momentos mais difíceis, bem como pelos conselhos e incentivos.

À Arlete, pelo afago, companheirismo e apoio durante todos os acontecimentos desta etapa da minha vida.

A toda a minha família, em especial à minha irmã Rachel, pelo carinho.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realização dos Cursos de Graduação e de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Aos Departamentos de Engenharia Civil (DEC) e de Solos (DPS), bem como ao Núcleo de Microscopia e Microanálise (NMM) da UFV, pela disponibilização da infra-estrutura necessária à realização desta pesquisa.

À Sociedade de Investigações Florestais (SIF), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelas bolsas de estudo concedidas durante a realização do presente trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro fornecido.

À empresa Tecflora (Tecnologia Florestal Avançada S.A.), que até 2003 foi representante do estabilizante químico RBI Grade 81 no Brasil, e à empresa *Anyway Solid Environmental Solutions Ltd. Kerem Maharal*, fabricante do produto, que forneceram amostras do estabilizante para a realização do presente trabalho.

Ao Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas (IQ/UNICAMP), pela possibilidade do uso de suas instalações na condução dos estudos de microanálise.

Ao professor Dario Cardoso de Lima, pela amizade, pelos incentivos, pelos ensinamentos, pela orientação e paciência durante a realização desse trabalho, bem como pelo exemplo de profissionalismo.

Aos professores co-orientadores Carlos Alexandre Braz de Carvalho, Carlos Cardoso Machado, Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer e Maurício Paulo

Ferreira Fontes, pelas críticas, pelas sugestões e pelos ensinamentos, que indubitavelmente contribuíram de forma ímpar no presente trabalho.

Ao Professor Paulo Sérgio de Almeida Barbosa, pelas sugestões apresentadas e pela dedicação, principalmente, na realização dos experimentos conduzidos no Laboratório de Engenharia Civil da UFV.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV, pelo apoio, pelo incentivo e pelos ensinamentos durante o Curso.

À Cláudia Alencar Vanetti, técnica de Nível Superior do Núcleo de Microscopia e Microanálise da UFV (NMM), e ao Professor José Lino Neto do Departamento de Biologia Geral, pela ajuda nas análises microscópicas.

Ao Professor Laércio Couto, pelo incomensurável apoio dado na fase inicial do presente trabalho.

Aos grandes amigos Reinaldo Francisco Teófilo e Valdir Fernandes Trindade, pelo companheirismo, pelos momentos de diversão e pela sinceridade.

Aos eternos companheiros da UFV, Alyson, Fabiano, Guilherme (Tsé), Hugo (Brown), Joaquim (Esquilo), José Francisco, José Humberto (Russo), Lincon, Marlon Esposti, Robson (Binladen), Rodrigo (Merreca), Sergio Caixeta, Xerxes, pela presença amiga e pelos ótimos momentos vividos em Viçosa.

Aos amigos Andréia Lopes, Danilo Rezende, Fabrício França, Fernando Caneschi, Flávio Crispim, Gisele Custódio, Gersonito Vieira, Luís Otávio, Reginaldo Pereira, Giovani Sant'Anna, Rodrigo'Z Velten, Simone Cristina, Thatiana Lelis e Victor Damasceno, pelo excelente convívio e pelas ótimas recordações sobre os bons tempos de Laboratório de Engenharia Civil da UFV.

A todos os colegas de Curso (aos níveis de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Civil), pelo agradável trato diário.

À Cristina Beatriz Schemes Costa (secretária da Pós-Graduação em Engenharia Civil), pela paciência, atenção e presteza.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Civil da UFV Francisco Martins Moreira, José Mario Duarte, José Tarcísio do Nascimento, Julio Carlos dos Santos, Paulo Afonso da Silva e Vicente de Paulo Silva Paiva, bem como aos técnicos do Departamento de Solos da UFV Antônio Carlos Alves Pinto, Carlos Antônio da Fonseca, Cláudio Márcio Brustolini, Geraldo Robésio Gomes, João José de Miranda

Milagres, Jorge Luiz de Almeida Orlando, José Alberto Cardoso, José Roberto Valente, José Francisco Dias e Zélia Estevão Barbosa, pela expressiva colaboração.

Enfim, a todos não citados, mas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## **Biografia**

TIAGO PINTO DA TRINDADE, filho de Antônio Silva da Trindade e Sirlene Pinto Trindade, é natural de Campo Belo, Minas Gerais.

Em março de 1997, ingressou no Curso de Engenharia Civil na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais. Foi bolsista de Iniciação Científica e Tecnológica no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa no período de 1999-2001, sob a orientação dos professores Dario Cardoso de Lima e Carlos Alexandre Braz de Carvalho. Em maio de 2002, graduou-se Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa.

Em maio de 2002, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Área de Concentração em Geotecnia, ao nível de mestrado, passando em março de 2004 para o nível de doutorado, submetendo-se à defesa de tese em junho de 2006.

# Conteúdo

	Página
<b>Resumo.....</b>	<b>xii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>xiv</b>
<b>1. Introdução geral.....</b>	<b>1</b>
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Organização do trabalho.....	8
Referências bibliográficas.....	10
<b>2. 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.....</b>	<b>13</b>
2.1. Introdução.....	14
2.2. Materiais e métodos.....	15
2.2.1. Materiais empregados.....	15
2.2.2. Preparação de amostras e programa de ensaios.....	16
2.2.2.1. Ensaio de compactação.....	16
2.2.2.2. Moldagem dos corpos-de-prova.....	17
2.2.2.3. Ensaio de compressão não-confinada.....	17
2.3. Resultados e discussão.....	17
2.4. Conclusões.....	21
Referências bibliográficas.....	21
<b>3. Influência do tipo de cura (selada e exposta) e da imersão em água na resistência mecânica de misturas solo-RBI Grade 81 com vistas à aplicação em estradas florestais.....</b>	<b>23</b>
3.1. Introdução.....	24
3.2. Materiais e métodos.....	25
3.2.1. Materiais utilizados.....	25

3.2.1.1. Solos.....	25
3.2.1.2. Aditivo químico .....	26
3.2.2. Preparação de amostras e programa de ensaios .....	26
3.2.2.1. Ensaio de compactação .....	27
3.2.2.2. Moldagem dos corpos-de-prova .....	28
3.2.2.3. Ensaio de compressão não-confinada .....	28
3.3. Resultados e discussão .....	28
3.4. Considerações finais .....	31
Referências bibliográficas.....	32
<b>4. Estudo da durabilidade de misturas solo-RBI Grade 81 com vistas à aplicação em estradas florestais e pavimentos convencionais.....</b>	<b>34</b>
4.1. Introdução .....	35
4.2. Materiais e métodos .....	36
4.2.1. Materiais utilizados .....	36
4.2.2. Preparação de amostras e programa de ensaios .....	38
4.2.2.1. Ensaio de compactação .....	39
4.2.2.2. Moldagem dos corpos-de-prova .....	39
4.2.2.3. Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem .....	40
4.3. Resultados e discussão .....	40
4.4. Conclusões .....	45
Referências bibliográficas.....	46
<b>5. Chemical stabilization of tropical soils: mechanical characterization using CBR, unconfined compression and Brazilian tensile strength laboratory tests .....</b>	<b>48</b>
5.1. Introduction.....	49
5.2. The soil stabilizer RBI Grade 81 .....	50
5.3. Experimental program.....	52
5.3.1. Materials.....	52
5.3.2. Methods.....	53
5.3.2.1. Soils sampling.....	53
5.3.2.2. Compaction tests.....	54

5.3.2.3. Mixtures specimens preparation for mechanical strength tests .....	54
5.3.2.4. Mechanical strength tests.....	55
5.4. Results and analysis .....	57
5.4.1. Compaction .....	57
5.4.2. CBR and swelling .....	62
5.4.3. Unconfined compression and Brazilian tensile strength tests.....	67
5.5. Conclusions.....	77
References.....	78
<b>6. Chemical stabilization of tropical soils: shear strength and elastic properties characterization using triaxial test.....</b>	<b>82</b>
6.1. Introduction.....	82
6.2. Soil stabilization.....	84
6.2.1. Background .....	84
6.2.2. Soil-cement stabilization.....	85
6.2.3. Soil-lime stabilization .....	87
6.2.4. Soil-RBI Grade 81 stabilizer mixtures .....	88
6.3. Experimental program.....	91
6.3.1. Materials.....	91
6.3.2. Methods.....	92
6.3.2.1. Soils sampling.....	92
6.3.2.2. Compaction tests.....	92
6.3.2.3. Mixtures specimens preparation for triaxial tests .....	93
6.3.2.4. Triaxial tests.....	94
6.4. Results and analysis .....	95
6.4.1. Compaction parameters.....	95
6.4.2. Shear strength and elastic properties.....	96
6.5. Conclusions.....	113
References.....	113

<b>7. Chemical stabilization of tropical soils: physical, chemical, mineralogical and microstructural characterization .....</b>	<b>118</b>
7.1. Introduction.....	119
7.2. Materials and experimental methods .....	120
7.2.1. Materials.....	120
7.2.2. Methods.....	120
7.2.2.1. Soils sampling.....	120
7.2.2.2. Physical and chemical characterization .....	121
7.2.2.3. Mineralogical characterization.....	122
7.2.2.4. Microstructural characterization .....	122
7.3. Results and evaluation .....	125
7.3.1. Physical and chemical properties of the soils and mixtures.....	125
7.3.2. Mineralogical characterization of soils and mixtures .....	133
7.3.3. Microstructural characterization of soils and mixtures.....	139
7.4. Conclusions .....	151
References.....	152
<b>8. Sorção/precipitação de Cd, Cu e Zn em misturas de solos tropicais com o estabilizante químico RBI Grade 81.....</b>	<b>157</b>
8.1. Introdução .....	158
8.2. Ensaio de equilíbrio em lote .....	161
8.3. Materiais e métodos .....	162
8.3.1. Materiais.....	162
8.3.2. Métodos .....	163
8.3.2.1. Coleta e preparação das amostras .....	163
8.3.2.2. Ensaio de compactação .....	164
8.3.2.3. Ensaio de permeabilidade.....	165
8.3.2.4. Análises químicas e eletroquímicas.....	165
8.3.2.5. Ensaio de equilíbrio em lote realizados com Cd, Cu e Zn .....	168
8.4. Resultados e discussão .....	171
8.4.1. Compactação e permeabilidade.....	171
8.4.2. Caracterização química e eletroquímica .....	175

8.4.3. Ensaio de equilíbrio em lote .....	188
8.5. Conclusões .....	201
Referências.....	202
<b>9. Influência da adição de diferentes estabilizantes químicos e da variação do pH na retenção de Cd, Cu e Zn em solo residual maduro .....</b>	<b>210</b>
9.1. Introdução .....	211
9.2. Sorção competitiva e comportamento dos metais pesados Cd, Cu e Zn nos solos.....	214
9.3. Materiais e métodos .....	216
9.3.1. Materiais.....	216
9.3.2. Métodos.....	220
9.3.2.1. Coleta e preparação das amostras .....	220
9.3.2.2. Ensaio de equilíbrio em lote.....	221
9.4. Resultados e discussão .....	224
9.5. Conclusões .....	242
Referências.....	243
<b>10. Conclusão geral .....</b>	<b>250</b>
<b>11. Recomendações para trabalhos futuros.....</b>	<b>254</b>

## Resumo

TRINDADE, Tiago Pinto da, D.S., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2006.

**Caracterização tecnológica de três solos residuais estabilizados quimicamente com vistas a aplicações em geotecnia rodoviária e ambiental.** Orientador: Dario Cardoso de Lima. Co-Orientadores: Maurício Paulo Ferreira Fontes, Carlos Ernesto Gonçalves Reynoud Schaefer, Carlos Alexandre Braz de Carvalho e Carlos Cardoso Machado.

Nesta pesquisa se introduziu e se avaliou o potencial técnico de um estabilizante químico, o RBI Grade 81, na estabilização de três solos da Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil, para aplicações em geotecnia rodoviária e em geotecnia ambiental. Os aspectos inovadores envolveram a caracterização de um produto com potencial de: (i) emprego na estabilização de solos granulares e coesivos, para fins de construção rodoviária; (ii) redução do movimento de metais pesados nos solos, com significância para a sua aplicação em misturas com solos locais nas funções de camadas de pavimentos rodoviários, barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários e lagoas de estabilização, bem como em outras obras geotécnicas de caráter ambiental. Quanto aos estudos ambientais, realizou-se, também, uma abordagem da influência da adição desse estabilizante em comparação com o carbonato de cálcio, a cal hidratada e o cimento Portland na sorção e precipitação de metais pesados em um dos solos analisados. Os estudos dirigidos à pavimentação rodoviária abrangeram os seguintes tópicos: (i) determinação das características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais dos solos; (ii) estudos básicos sobre o efeito do aditivo nos solos, englobando a avaliação da influência do período decorrido entre mistura e compactação na resistência mecânica das misturas e a comparação entre a resistência à compressão não-confinada das misturas determinada via corpos-de-prova submetidos às curas selada e exposta ao ar; (iii) caracterização tecnológica dos solos e misturas, envolvendo a determinação dos parâmetros de resistência mecânica (CBR, resistência à compressão não-confinada, resistência à tração por compressão diametral e resistência ao cisalhamento) e de durabilidade, considerando-se os melhores resultados obtidos nos estudos básicos quanto ao tempo decorrido entre mistura e compactação; (iv) comparação entre os valores de CBR e resistências à compressão não-confinada e tração por compressão diametral dos solos e misturas determinados via ensaios

realizados com e sem a fase de imersão em água; e (iv) caracterização física, química, mineralógica e microestrutural das misturas. Os estudos ambientais foram dirigidos a: (i) realização de ensaios de equilíbrio em lote ou batelada (*batch equilibrium test*), com o objetivo de avaliar a influência da adição de teores crescentes de RBI Grade 81 na capacidade máxima de retenção (sorção/precipitação) dos metais pesados Cd, Cu e Zn nos solos em estudo, utilizando-se soluções mono-espécie de cada um dos referidos contaminantes; e (ii) realização de estudo direcionado à análise da influência das variações do pH de equilíbrio e da adição de carbonato de cálcio, cal hidratada, cimento portland e RBI Grade 81 na capacidade máxima de retenção de metais pesados em um dos solos pesquisados, utilizando-se soluções multi-espécie contendo Cd, Cu e Zn. Os resultados obtidos no presente estudo levaram às seguintes conclusões: (i) o estabilizante químico promoveu mudanças significativas nas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais dos solos analisados; (ii) a adição do estabilizante RBI Grade 81 aos solos foi responsável por aumentos significativo nos seus parâmetros de resistência mecânica. O tempo decorrido entre mistura e compactação, condições de cura, esforço de compactação e imersão em água influenciaram significativamente a resistência mecânica das misturas; (iii) análise dos resultados dos ensaios de durabilidade realizados indicou que a estabilização de solos com aditivo químico estudado pode vir a ser uma técnica viável e de interesse para fins rodoviários. No entanto, o emprego desse produto, em especial considerando-se os solos argilosos, requer estudos prévios de dosagem em laboratório para cada tipo de solo considerado; (iv) o pH e a competição iônica mostraram-se importantes fatores no controle da geodisponibilidade dos metais pesados analisados; (v) a estabilização de um dos solos em estudo com a cal hidratada, o cimento Portland e o RBI Grade 81 aumentou significativamente a sua capacidade de retenção dos íons metálicos Cd, Cu e Zn, sendo que, pautando-se em critérios técnicos, econômicos e especialmente ambientais, os resultados preliminares obtidos sugerem que a adição de pequenas porcentagens destes estabilizantes pode contribuir significativamente para a diminuição do movimento de metais pesados no perfil do solo de fundação de aterros sanitários e lagoas de estabilização, bem como de outras obras de caráter ambiental.

## Abstract

TRINDADE, Tiago Pinto da, D.S., Universidade Federal de Viçosa, June, 2006.

**Technological characterization of three residual soils chemically stabilized for highway and environmental geotechnical applications.** Advisor: Dario Cardoso de Lima. Co-Advisors: Maurício Paulo Ferreira Fontes, Carlos Ernesto Gonçalves Reynoud Schaefer, Carlos Alexandre Braz de Carvalho and Carlos Cardoso Machado.

In this research it was introduced and evaluated the technical potential of a chemical stabilizer, the RBI Grade 81 in the stabilization of three tropical soils from the *Zona da Mata* of Minas Gerais state, Brazil, for highway and geoenvironmental applications. The innovative aspects of this research involved the characterization of a product with potential of: (i) to stabilize granular and cohesive soils for road construction; (ii) to reduce heavy metal movement in soils for geoenvironmental applications directed to subgrade stabilization, landfill liner, liquid containment (pond) liner, as well as in others geoenvironmental engineering applications. Besides these analysis, it was also evaluated the efficiency of the addition of this stabilizer in the heavy metal sorption and precipitation capacity of one of the tested soils in comparison with calcium carbonate, hydrated lime and Portland cement. The highway engineering studies encompassed the following topics: (i) determination of the physical, chemical, microstructural and mineralogical characteristics of the tested soils; (ii) basic studies on the effect of the addition of the additive to the soils, including the evaluation of the influence of the time between mixture and compaction in the mechanical strength of the soil mixtures, as well as the influence of exposed and non-exposed to air cures in the unconfined compressive strength of the mixtures specimens; (iii) technological characterization of soils and mixtures, involving the determination of mechanical strength parameters (CBR, unconfined compressive strength, Brazilian tensile strength and triaxial shear strength) and of durability parameters considering the best data obtained in the basic studies involving the time between mixture and compaction; (iv) comparison between the CBR, unconfined compression strength and Brazilian tensile strength of soils and mixtures specimens tested before and after immersion in water; and (v) physical, chemical, microstructural and mineralogical characterization of the mixtures. The geoenvironmental studies were directed to: (i) to perform batch

equilibrium test in the soils and in the mixtures in order to evaluate the influence of the addition of increasing contents of RBI Grade 81 in the maximum retention capacity (sorption/precipitation) of the metals heavy Cd, Cu and Zn using mono-component solutions of each one of the tested contaminants; and (ii) to develop a study directed to the analysis of the influence of the pH ranging and of the addition of calcium carbonate, hydrated lime, Portland cement and RBI Grade 81 in the maximum retention capacity of one of the tested soils using multi-component solutions containing Cd, Cu and Zn. The data of the testing program supports the following conclusions: (i) the chemical stabilizer promoted considerable changes in all physical, chemical, mineralogical and microstructural properties of the studied soils; (ii) addition of the RBI Grade 81 stabilizer to the tested soils increased significantly their mechanical strength parameters. The elapsed time between mixture and specimen's compaction, mixtures curing conditions, compaction effort and water immersion affected significantly the mechanical strength of the tested mixtures; (iii) data from durability tests supported that RBI Grade 81 stabilization could be a recommended technique for road engineering applications. However, it should be emphasized that, mainly in clayey soils, the use of this product demands previous laboratory studies directed to the specific soil in analysis; (iv) the pH and ionic competition were significant controlling factors of the heavy metal mobility and geoavailability in soils; (v) the hydrated lime, Portland cement and RBI Grade 81 stabilization significantly increased the Cd, Cu and Zn retentions capacities one of the tested soils. From technical, economic and environmental perspectives, the preliminary testing data supported that addition of low percentage of this stabilizer to soils can become an effective tool to reduce heavy metals mobility in landfills and pounds foundation soils, as well as in other environmental engineering applications.

# 1

## Introdução geral

### 1.1. Generalidades

O presente trabalho apresenta duas vertentes de aplicações da técnica de estabilização química de solos em engenharia civil, uma delas direcionada à geotecnia rodoviária e a outra à geotecnia ambiental.

Em um passado recente, o sistema brasileiro de rodovias pavimentadas respondia por um total aproximado de 165.000 km (FELIPE, 1999). Esse dado foi confirmado pelo antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), hoje Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), em trabalho mais atual (DNER, 2001), onde a malha rodoviária brasileira pavimentada se encontrava distribuída da seguinte forma: 56.097,2 km de rodovias federais, 91.897,5 km de estaduais e 16.993,3 km de municipais. Desse total, 27,7% se encontravam em bom estado, 36,2% em estado regular e 36,1% em mau estado de conservação.

Em 2005, uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) avaliou 100% da malha rodoviária federal pavimentada e, também, os principais trechos pavimentados sob gestão estadual e sob administração terceirizada, perfazendo um total de 81.944 km em todo o país (CNT, 2005). Os resultados dessa pesquisa mostraram um cenário nacional com problemas onde, mesmo se considerando as melhores condições das malhas do sul e do sudeste, 72,0% da extensão total exibiam algum grau de imperfeição, com 31,8% deficientes, 22,0% ruins e 18,2% péssimos quando se consideravam, simultaneamente, aspectos da geometria viária, do pavimento e da sinalização. Nas rodovias pesquisadas verificou-se que 54,6% se encontravam com pavimento em estado deficiente, ruim ou péssimo (44.733 km), 60,7% exibiam sinalização em estado inadequado (49.715 km), 39,6% não possuíam acostamento (32.474 km), 18,6% não apresentavam placa de sinalização e tinham o acostamento tomado pelo mato (15.259 km), 37,7% exibiam afundamento, ondulação ou buraco,

desgaste, trinca e remendo (30.893 km), bem como 40,6% não apresentavam sinalização de velocidade máxima permitida (33.309 km).

Os dados ilustrados na Tabela 1.1 apresentam um histórico da qualidade das rodovias brasileiras pavimentadas, obtido através de pesquisas realizadas pela Confederação Nacional do Transporte na última década (CNT, 2005). Nota-se que, nos últimos quatro anos, provavelmente devido à privatização de algumas rodovias, houve um aumento da malha pavimentada classificada como ótima. Por outro lado, nos anos de 2003 a 2005, constatou-se redução das rodovias em estado bom e deficiente e um enorme aumento da malha pavimentada de qualidade ruim e péssima.

Tabela 1.1. Evolução do estado geral das rodovias no período de 1995-2005

Data da avaliação	Estado geral					Total
	Ótimo	Bom	Deficiente	Ruim	Péssimo	
	%					
1995	3,5	13,6	46,8	28,0	8,1	100,0
1996	0,1	6,3	88,9	3,5	1,2	100,0
1997	0,5	7,2	89,4	2,2	0,7	100,0
1998†	-	-	-	-	-	-
1999	2,8	19,7	72,8	4,1	0,6	100,0
2000	1,7	18,0	76,5	3,5	0,3	100,0
2001	2,9	28,4	66,2	2,2	0,3	100,0
2002	5,1	35,8	57,6	1,2	0,3	100,0
2003	10,0	16,0	38,4	21,5	14,1	100,0
2004	11,6	13,7	36,4	23,7	14,6	100,0
2005	11,0	18,0	31,8	22,0	18,2	100,0

† não houve pesquisa em 1998.

Fonte: CNT (2005)

Com relação à malha de rodovias vicinais, em 2000, o sistema brasileiro era constituído por, aproximadamente, 1.725.000 km (Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes - GEIPOT, 2001), dos quais 83,0% eram de origem municipal/secundário (aproximadamente, 1.430.000 km), sendo que destes apenas 1,2% apresentavam-se pavimentados. Com relação ao setor florestal, na década de 80, estimava-se a extensão da malha brasileira de rodovias em 600.000 km (MACHADO e MALINOVSKI, 1986), tendo este número aumentado com as novas ampliações das empresas florestais nas últimas duas décadas.

A partir do quadro geral anteriormente apresentado, vislumbra-se que, atualmente, o Brasil se encontra frente a um volume significativo de estradas que demandam soluções técnico-econômicas adequadas para o seu bom funcionamento como elementos de ligação e instrumentos para o transporte de bens de consumo e passageiros.

Uma área importante na construção de novas vias e na restauração da malha rodoviária brasileira atual é a estabilização química dos solos, realizada com produtos tradicionais, tais como o cimento e a cal, ou com o emprego de novos produtos que se mostrem técnica, econômica e ambientalmente competitivos, em especial quando se considera que, no Brasil, as rodovias são componentes estratégicos importantes, sendo responsáveis por 60% a 70% das cargas transportadas. Sob esse prisma, surge a necessidade de uma inserção maior da estabilização química dos solos na malha rodoviária brasileira, com um direcionamento às rodovias pavimentadas, vicinais e florestais, pautando-se este emprego em critérios técnicos, econômicos e ambientais. No que diz respeito a esse último critério, no passado era aceitável projetar e executar obras de engenharia, incluindo a exploração de recursos naturais como materiais de empréstimo para construção de estradas, com base apenas em critérios técnicos e econômicos, sem antever as possíveis conseqüências ambientais daí resultantes. Entretanto, segundo Gama (2000), hoje em dia vigora em muitos países uma forte “ética ambiental”, caracterizada pela preocupação das pessoas em relação aos outros seres vivos e à natureza.

A partir dessas constatações, pode-se afirmar que, são muitas as perspectivas do emprego de um agente de estabilização que possa permitir a execução do pavimento rodoviário em uma visão tradicional, bem como na forma de revestimento primário, utilizando-se solos locais. É nessa situação que se enquadra o estabilizante químico denominado RBI Grade 81, objeto de estudo no presente trabalho. Esse produto ainda é pouco estudado no Brasil, podendo-se referir apenas ao trabalho de França (2003). Além disso, ele apresenta características técnico-ambientais interessantes, como, por exemplo, constituintes químicos semelhantes os encontrados na cal hidratada e no cimento Portland, micro-fibras distribuídas aleatoriamente em sua massa e selo verde de qualidade fornecido pelo órgão de regulamentação ambiental de Israel, onde o produto é atualmente produzido.

No âmbito da geotecnia ambiental, um grande problema é a contaminação do solo, dos rios e do lençol freático com metais pesados, por exemplo, pela operação de aterros sanitários, lagoas de estabilização, exploração de jazidas, trabalhos de mineração, dentre outras atividades.

No caso de aterros sanitários, encontra-se registrado nas normas de projeto e execução que há a necessidade de se construir um sistema de impermeabilização de base (*liner*), para minimizar a migração de contaminantes presentes no chorume gerado na operação dos mesmos, de forma que estes não atinjam o solo de fundação e, conseqüentemente, possíveis aquíferos existentes. Para a construção de *liners* podem ser utilizados diversos materiais e de formas diferentes. Dentre os tipos de *liners* mais comuns, destacam-se os depósitos naturais de solos de baixa permeabilidade, as argilas compactadas e os geossintéticos. Lima et al. (2003) relatam que, de acordo com a Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (*U.S. Environmental Protection Agency - EPA*), um projeto padrão de um aterro sanitário requer um *liner* sintético (em geral, uma camada de argila compactada, associada a uma geomembrana) e uma camada inferior de solo compactado com condutividade hidráulica da ordem de  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, juntamente com um sistema de drenagem para coleta do chorume gerado.

O impacto de um aterro na qualidade da água subterrânea depende de inúmeros fatores, dentre os quais, talvez, o mais importante seja a natureza da barreira a ser utilizada para limitar e controlar o movimento de contaminantes no solo. As barreiras de solos argilosos que possuem baixa condutividade hidráulica são bastante utilizadas como os sistemas de impermeabilização da base de aterros. No entanto, seu bom desempenho não pode ser assumido a priori, visto que, sua eficiência depende de diversos fatores, tais como as condições de compactação e a composição e mineralógica do material argiloso, da resistência e durabilidade da camada acabada, além da interação química entre as partículas coloidais do material utilizado e os eventuais contaminantes (OLIVEIRA, 2002).

Segundo Meurer et al. (2004), comumente, em solos das regiões tropicais e subtropicais quando o pH é inferior a 5,0 pode haver predominância de cargas elétricas positivas nas superfícies das suas partículas coloidais (maior atração de ânions). Sabe-se que a mobilidade de metais pesados é menor em solos que possuem elevada densidade de carga negativa na superfície das partículas, tendo em vista a maior interação dos colóides desses solos com os cátions metálicos. No campo das Ciências Agrárias, uma

técnica muito utilizada com o intuito de reduzir a acidez e eliminar o  $Al^{3+}$  trocável é a aplicação de materiais calcários aos solos, denominada “calagem”. Sob o ponto de vista ambiental, como efeitos colaterais positivos resultantes da calagem, pode-se citar o aumento do pH e da capacidade de troca catiônica (CTC), a geração de cargas elétricas negativas na superfície dos colóides e, conseqüentemente, uma maior sorção e precipitação dos metais pesados no solo tratado.

Recentemente, tem-se relatado um número cada vez maior de pesquisas com o objetivo de se avaliar o efeito da aplicação de materiais calcários na mobilidade de metais pesados no solo (EDIL et al., 1992; MATOS et al., 1996; FONTES et al., 2000; MATOS et al., 2001; ALCÂNTARA e CAMARGO, 2001; ACCIOLY et al., 2004).

Segundo Reid e Brooks (1999), no âmbito geotécnico, uma prática que tem sido bastante utilizada nos Estados Unidos e na Europa é a estabilização de materiais contaminados, ou sujeitos à contaminação, através do uso de agentes inorgânicos cimentantes, em especial a cal hidratada e o cimento Portland. Esses estabilizantes químicos, além de conferir ao solo uma maior capacidade de retenção de metais pesados através de fenômenos de sorção e precipitação, promovem o micro-encapsulamento dos cátions metálicos juntamente com as partículas do solo (REID e BROOKS, 1999; MCKINLEY et al., 2001; MULLIGAN et al., 2001; BRAGA et al., 2002).

Com relação ao RBI Grade 81, cuja faixa de variação dos seus componentes químicos se assemelha à da cal hidratada e do cimento Portland, até a presente data não se dispõe de informações sobre o seu emprego para essa finalidade, tanto ao nível nacional quanto internacional. Um aspecto de interesse particular desse produto, é que o mesmo, quando adicionado aos solos, lhes confere alta capacidade de tamponamento e elevação do pH, características estas de interesse significativo em estudos sobre a mobilidade de metais pesados em solos (FONTES e GOMES, 2003).

Dessa forma, acredita-se que o presente estudo trará, também, uma contribuição significativa para a formação de um banco de dados sobre o comportamento ambiental de misturas de solos tropicais com agentes inorgânicos cimentantes que, além de proporcionar maior resistência mecânica e durabilidade aos solos locais, podem ser capazes de atuar como elementos de retardo da mobilidade de metais pesados no perfil do solo.

## 1.2. Objetivos

Nesta pesquisa se introduz e se avalia o potencial técnico de um estabilizante químico, o RBI Grade 81, para aplicações em estradas e em geotecnia ambiental. Quanto aos estudos ambientais, destaca-se que é, também, de interesse apresentar uma abordagem comparativa da influência da adição de outros produtos (carbonato de cálcio, cal hidratada e cimento Portland) e da variação do pH nos fenômenos de sorção e precipitação de metais pesados em pelo menos um dos solos analisados.

As técnicas de análise do comportamento mecânico de solos estabilizados quimicamente para a construção de rodovias são bem conhecidas, envolvendo a caracterização geotécnica através dos seguintes ensaios: compactação, CBR, compressão não-confinada, compressão diametral e, às vezes, compressão triaxial, e durabilidade por secagem e molhagem, esta última, em geral, segundo as metodologias adotadas para misturas solo-cimento. Porém, no que tange à análise da influência de parâmetros químicos, mineralógicos e microestruturais dos solos nos seus processos de estabilização, bem como quanto às aplicações ambientais, não se dispõe de uma mecânica já estabelecida, devendo-se trilhar o caminho da busca de soluções inovadoras.

Considerando-se as aplicações do RBI Grade 81 em estradas e partindo-se da premissa de que o seu emprego no Brasil ainda é praticamente inexistente, estudos básicos devem abordar, também: (i) aspectos relativos à influência do tempo entre a mistura e a compactação, condições de cura e energia de compactação na resistência mecânica e durabilidade das misturas; (ii) caracterização das propriedades físicas, químicas mineralógicas e microestruturais dos solos e de misturas com o aditivo, gerando informações indispensáveis para uma avaliação técnica conjunta com dados sobre resistência mecânica e durabilidade dos produtos finais.

No que concerne às aplicações em estradas e em obras de caráter ambiental, no presente trabalho buscou-se caracterizar tecnologicamente as misturas de um solo residual maduro (solo 1) e de dois solos residuais jovens (solos 2 e 3) de gnaisses, comuns na Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil, com o RBI Grade 81. Destaca-se que a escolha desses solos se pautou no fato de que os solos 1 e 2, oriundos, respectivamente, dos horizontes B e C, geograficamente ocupam parte considerável do sudeste brasileiro, em especial do estado de Minas Gerais, constituindo o subleito de

rodovias e fundações de obras civis, em especial, daquelas de apelo ambiental. O solo 3 se enquadra nas exigências de dosagem de misturas solo-cimento, segundo a Norma Simplificada de Dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1986) e a Norma de Dosagem da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1992), bem como apresenta uma distribuição granulométrica peculiar que o enquadra próximo da faixa recomendada pela equação de Fuller-Talbot para misturas densas de solos com partículas com diâmetro máximo de 2 mm (LIMA et al., 1993).

Considerando-se as particularidades de formação dos solos brasileiros utilizados no presente trabalho, no que diz respeito às suas características químicas, físicas e mineralógicas, o trabalho teve os seguintes objetivos:

- estudos dirigidos à pavimentação rodoviária:
  - determinação das características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais dos solos;
  - estudos básicos sobre o efeito do aditivo nos solos, englobando:
    - (i) avaliação da influência do período decorrido entre mistura e compactação na resistência mecânica das misturas; (ii) comparação entre a resistência à compressão não-confinada das misturas determinada via corpos-de-prova submetidos às curas selada e exposta ao ar;
  - caracterização tecnológica dos solos e misturas, envolvendo:
    - (i) determinação dos parâmetros de resistência mecânica (CBR, resistência à compressão não-confinada, resistência à tração por compressão diametral e resistência ao cisalhamento) e de durabilidade, considerando-se os melhores resultados obtidos no item anterior quanto ao tempo decorrido entre mistura e compactação; (ii) comparação entre os valores de CBR determinados via ensaios realizados com e sem a fase de imersão em água por um período de quatro dias; (iii) análise da influência da imersão em água por um período de quatro horas na resistência à compressão não-confinada e na resistência à

tração; e (iv) caracterização física, química, mineralógica e microestrutural das misturas.

- estudos ambientais:
  - realização de ensaios de equilíbrio em lote ou batelada (*batch equilibrium test*), com o objetivo de avaliar a influência da adição de teores crescentes de RBI Grade 81 na capacidade máxima de retenção (sorção/precipitação) dos metais pesados Cd, Cu e Zn nos solos em estudo, utilizando-se soluções mono-espécie de cada um dos referidos contaminates;
  - realização de estudo direcionado à análise da influência das variações do pH de equilíbrio e da adição de carbonato de cálcio, cal hidratada, cimento portland e RBI Grade 81 na capacidade máxima de retenção de metais pesados em um dos solos pesquisados (solo 1), utilizando-se soluções multi-espécie contendo Cd, Cu e Zn.

### **1.3. Organização do trabalho**

Os resultados do presente trabalho foram apresentados na forma de oito artigos científicos, sendo cinco deles direcionados, especificamente, à geotecnia rodoviária, dois com abordagens sobre geotecnia ambiental e um com vistas a aplicações em ambas estas áreas de interesse técnico. Assim, tem-se:

- estudos realizados com os solos 1, 2 e 3 e suas misturas, considerando-se aplicações em geotecnia rodoviária:
  - o primeiro artigo aborda a influência do tempo decorrido entre mistura e compactação na resistência mecânica das misturas dos solos com o estabilizante químico RBI Grade 81;
  - o segundo artigo analisa a influência das condições de cura (selada e exposta ao ar) e da imersão em água na resistência mecânica das misturas dos solos com RBI Grade 81;

- o terceiro artigo é dirigido à determinação da durabilidade das misturas dos solos com 6% de RBI Grade 81, a partir de resultados de ensaios de durabilidade por molhagem e secagem realizados com corpos-de-provas moldados nas energias de compactação dos ensaios Proctor Normal, Intermediário e Modificado;
  - o quarto artigo apresenta os efeitos da adição do estabilizante químico e do aumento da energia de compactação nas características mecânicas dos solos, bem como a influência da imersão em água na resistência mecânica dos solos e das misturas. No que diz respeito às propriedades mecânicas dos solos e das misturas, considerou-se os ensaios CBR, compressão não-confinada e tração por compressão diametral;
  - o quinto artigo apresenta os resultados da caracterização da resistência ao cisalhamento e das propriedades elásticas dos solos e de suas misturas com RBI Grade 81, via realização de ensaios triaxiais não consolidados não drenados.
- estudo realizado com os solos 1, 2 e 3 e suas misturas, vislumbrando-se aplicações em obras de caráter ambiental e em geotecnia rodoviária:
    - o sexto artigo contempla a caracterização física, química, mineralógica e microestrutural das misturas dos solos e de suas misturas com o estabilizante químico RBI Grade 81. Além da utilização de análises físico-químicas corriqueiras na Mecânica dos Solos clássica, para atender aos objetivos desse trabalho, utilizaram-se, também, técnicas raramente empregadas em engenharia geotécnica como, por exemplo, microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia de raios-X por dispersão de energia.
- estudos que contemplaram aplicações ambientais:
    - o sétimo artigo aborda aspectos relacionados às propriedades geotécnico-ambientais dos solos 1, 2 e 3 e de suas misturas com

o RBI Grade 81. Para atender os objetivos desse trabalho, foram realizados ensaios de permeabilidade, análises de caracterização química e eletroquímica e ensaios de equilíbrio em lote (*batch equilibrium test*) com soluções mono-espécie dos metais pesados Cd, Cu e Zn. A partir dos resultados dos ensaios de laboratório, foi possível avaliar a influência da adição do aditivo químico analisado na capacidade máxima de retenção (sorção/precipitação) de Cd, Cu e Zn nos solos estudados, bem como estabelecer correlações entre os parâmetros dos modelos de Freundlich e Langmuir e algumas propriedades químicas e eletroquímicas dos solos e das misturas;

- o oitavo artigo analisa a influência da adição de 2% em peso de carbonato de cálcio, cal hidratada, cimento Portland e RBI Grade 81 e das variações do pH de equilíbrio do meio (solo:solução) na capacidade máxima de sorção e/ou precipitação (capacidade máxima de retenção) dos metais pesados Cd, Cu e Zn em um solo residual maduro (solo 1). Nesse trabalho, preocupou-se em avaliar também a influência da competição iônica entre os contaminantes, a partir da preparação e adição ao solo e às misturas de soluções multi-espécie contendo simultaneamente Cd, Cu e Zn.

## Referências bibliográficas

- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O.; CURI, N.; MOREIRA, F. M. S. Amenização do calcário na toxidez de zinco e cádmio para mudas de *Eucalyptus camaldulensis* cultivadas em solo contaminado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.4, p. 775-783, 2004.
- ALCÂNTARA, M. A. K.; CAMARGO, O. A. Isotermas de adsorção de Freundlich para o crômio (III) em Latossolos. **Scientia Agricola**, v.58, n.3, p. 567-572, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Estudo Técnico 35:** Dosagem das misturas de solo-cimento: Normas de dosagem. 3. ed., São Paulo, SP, 1986. 51 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253:** Solo-cimento: dosagem para emprego como camada de pavimento: Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 1992. 4 p.

- BRAGA, F. S.; FONSECA, M. H. G. P.; AGOSTINI, R. M.; SILVA, V. V.; LOPES, V. L. Encapsulamento: uma alternativa para o tratamento e destinação final de resíduos oleosos - um enfoque ambiental (estudos preliminares). In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (SIBESA), 6., 2002, Vitória, ES. **Anais...**, São Paulo, SP: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), 2002. 9 p. Trabalho III-020. 1 CD-ROM.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa rodoviária CNT 2005: Relatório Gerencial**. Brasília, DF, 2005. 130 p. Disponível em <http://www.cnt.org.br/cnt/pesquisas/2005/index.htm>. Acesso em 23 set. 2005.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Programa de gerência do pavimento da malha rodoviária federal**. Relatório apresentado pelo Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP/DNER), Brasília, DF, 2001. 12 p.
- EDIL, T. B.; SANDSTROM, L. K.; BERTHOUEX, P. M. Interaction of inorganic leachate with compacted pozzolanic fly ash. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v.118, n.9, p. 1410-1430, 1992.
- FELIPE, T. Um real retrato das estradas brasileiras. **Jornal do Brasil**: publicação especial [Transportes: Brasil], 28 nov. 1999. p. 37-37.
- FONTES, M. P. F.; MATOS, A. T.; COSTA, L. M.; NEVES, J. C. Competitive adsorption of zinc, cadmium, copper, and lead in three highly - weathered Brazilian soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.31, n.17-18, p. 2939-2958, 2000.
- FONTES, M. P. F.; GOMES, P. C. Simultaneous competitive adsorption of heavy metals by mineral matrix of tropical soils. **Applied Geochemistry**, v.18, n.6, p. 795-804, 2003.
- FRANÇA, F. C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto "RBI Grade 81"**. 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.
- GAMA, C. D. Geotecnia ambiental: perspectivas e aplicações. **Geotecnia**, n.90, p. 9-48, 2000.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES. **Anuário estatístico 1996-2000**. Ministério dos Transportes, Brasília, DF, 2001. Disponível em <http://www.geipot.gov.br/NovaWeb/IndexAnuario.htm>. Acesso em 18 jul. 2005.
- LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização dos solos II: técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa**. Caderno Didático n.333, Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1993. 32 p.
- LIMA, D. C.; SILVA, C. H. C.; BARBOSA, P. S. A.; CARVALHO, C. A. B.; TRINDADE, T. P. Municipal solid waste landfill lining and cover regulations. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL (REGEO'2003), 5., 2003, Porto Alegre, RS. **Anais...**, Porto Alegre, RS: Associação Brasileira de Mécânica dos Solos (ABMS/RS) e In Situ Geotecnia (IGS), 2003. 7 p. Trabalho DFR055. 1 CD-ROM.
- MACHADO, C. C.; MALINOVSKI, J. R. **Rede viária florestal**. Curitiba, PR: FUPEF, 1986. 157 p.

- MATOS, A. T.; FONTES, M. P. F.; JORDÃO, C. P.; COSTA, L. M. Mobilidade e formas de retenção de metais pesados em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, n.3, p. 379-386, 1996.
- MATOS, A. T.; FONTES, M. P. F.; COSTA, L. M.; MARTINEZ, M. A. Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. **Environmental Pollution**, v.111, n.3, p. 429-435, 2001.
- MCKINLEY, H. R.; THOMAS, H. R.; WILLIAMS, K. P.; REID, J. M. Chemical analysis of contaminated soil strengthened by the addition of lime. **Engineering Geology**, v.60, n.1-4, p. 181-192, 2001.
- MEURER, E. J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C. A. Fenômenos de sorção em solos. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 2. ed. (Revisada e Ampliada), Porto Alegre, RS: Genesis, 2004. p. 131-179. (Capítulo 5).
- MULLIGAN, C. N.; YONG, R. N.; GIBBS, B. F. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. **Engineering Geology**, n.60, v.1-4, p. 193-207, 2001.
- OLIVEIRA, S. H. **Avaliação do uso de borra oleosa processada em sistemas de impermeabilização de aterros**. 2002. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- REID, J. M.; BROOKES, A. H. Investigation of lime stabilized contaminated material. **Engineering Geology**, v.53, n.2, p. 217-231, 1999.

# 2

## **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**

**Resumo.** Este artigo aborda o estudo da influência do tempo decorrido entre mistura e compactação na resistência mecânica de três solos da Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil, quando estabilizados com 4% de RBI Grade 81, em relação ao peso de solo seco. Um solo residual maduro (solo 1) e dois solos residuais jovens (solos 2 e 3) de gnaiss foram utilizados no presente estudo. O programa de ensaios de laboratório englobou: (i) tempos decorridos entre mistura e compactação: 0, 4, 8 e 24 horas; (ii) energia de compactação: Proctor Modificado; (iii) período de cura das misturas: sete dias em câmara úmida; (iv) determinação da resistência mecânica: média de três determinações da resistência à compressão não-confinada. Os resultados desta pesquisa indicaram que: (i) o tempo decorrido entre mistura e compactação dos corpos-de-prova influenciou significativamente o parâmetro resistência à compressão não-confinada das misturas; (ii) quatro horas foi o tempo ótimo entre mistura e compactação para as misturas dos solos 1 e 2 com o aditivo químico estudado; (iii) para o solo 3 foi observado um melhor resultado para a compactação imediatamente após a mistura.

**Palavras-chave:** Estabilização de solos; Estabilizante químico RBI Grade 81; Tempo decorrido entre mistura e compactação; Resistência à compressão não-confinada.

***Abstract.** This paper is directed to the study of the influence of time between mixture and compaction in the mechanical strength of three soils from the Zona da Mata of Minas Gerais State, Brazil, stabilized with 4% of RBI Grade 81. One mature (soil 1) and two young (soils 2 and 3) gneiss residual soils were used throughout the study. The laboratory testing program encompassed the following steps: (i) elapsed times between mixture and compaction: 0, 4, 8 and 24 hours; (ii) mixture specimens compaction effort: modified Proctor; (iii) mixture specimens curing time: seven days in acclimatized*

room; (iv) *determination of mechanical strength: average of three determinations of unconfined compression strength. The testing data supported that: (i) the elapsed time between mixture and specimen compaction affected significantly the mixtures mechanical strength; (ii) four hours was the optimum elapsed time for soils 1 and 2 mixtures; (iii) to soil 3 the better resulted was observed to compaction effort applied immediately after the mixture.*

**Keywords:** *Soil stabilization; RBI Grade 81 chemical stabilizer; Elapsed time between mixture and compaction; Unconfined compression strength.*

## **2.1. Introdução**

O domínio das técnicas de estabilização dos solos pode conduzir a sensíveis reduções nos tempos de execução de obras viárias, viabilizando a industrialização do processo construtivo e, conseqüentemente, propiciando uma economia substancial para o empreendimento (LIMA, 1981; PESSOA, 2004).

As soluções para a estabilização química de solos para fins rodoviários são bastante discutidas na literatura (SILVA, 1968; RICO e DEL CASTILHO, 1977; LIMA, 1981; SENÇO, 2001; LIMA et al., 2003). Mas nos últimos anos, tem havido uma crescente preocupação em buscar estabelecer princípios teóricos que possam explicar os respectivos mecanismos de atuação de cada um dos agentes estabilizantes disponíveis no mercado, particularmente no caso da estabilização química dos solos de clima tropical.

Um aspecto de grande interesse no emprego de aditivos químicos em estradas como agente de cimentação ou aglomerante é a análise da influência do tempo decorrido entre mistura e compactação no produto final (camada do pavimento acabada), haja vista o conjunto de limitações práticas de execução das misturas no campo (SANT'ANA et al., 2003).

Sob esse prisma e com relação ao estabilizante químico RBI Grade 81, o fabricante do produto, a empresa *Anyway Solid Environmental Solutions Ltd. Kerem Maharal*, recomenda, para fins de dosagem das misturas via ensaios de laboratório, que se adote um tempo entre mistura e compactação de 24 horas (ANYWAY, 2003), período este que difere significativamente daqueles comuns à execução das misturas no campo, em geral inferiores a oito horas. Assim, é de interesse analisar a influência do

tempo decorrido entre mistura e compactação na resistência mecânica de misturas solo-RBI Grade 81. Esse é o tópico abordado no presente artigo, considerando-se os tempos gastos entre mistura e compactação de 0, 4, 8 e 24 horas.

## **2.2. Materiais e métodos**

### **2.2.1. Materiais empregados**

Trabalhou-se com um solo residual maduro, pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, aqui denominado solo 1, e dois solos residuais jovens, aqui denominados solos 2 e 3. Esses solos representam solos característicos da Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil, em especial da Microrregião de Viçosa.

O solo 1 apresenta evolução pedológica avançada e é proveniente do intemperismo de gnaisse, de ocorrência nas encostas mais suavizadas. Nele predomina a composição mineralógica presente nos argilominerais 1:1 e óxidos de ferro e alumínio. Os solos 2 e 3 são de origem saprolítica, essencialmente quartzosos, com horizonte C profundo, respectivamente, com textura silto-arenosa a arenosa e coloração rósea a acinzentada. Nas Tabelas 2.1 e 2.2, encontram-se, respectivamente, informações sobre a distribuição granulométrica, os limites de Atterberg e peso específico dos grãos, as classificações dos três solos, segundo os Sistemas TRB (*Transportation Research Board*), USC (*Unified Soil Classification*) e a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado e Tropical) preconizada por Nogami e Villibor (1995).

O estabilizante químico empregado na presente pesquisa foi o RBI Grade 81. Atualmente, esse aditivo químico é produzido pela empresa *Anyway Solid Environmental Solutions Ltd. Kerem Maharal*, em Israel e no Canadá. Até o final de 2003, possuía representação no Brasil através da companhia Tecflora S.A., que gentilmente forneceu amostras do produto para a realização deste trabalho.

Tabela 2.1. Distribuição granulométrica conforme limites estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1995), limites de Atterberg, peso específico dos grãos e classificação dos solos segundo os sistemas TRB e USC

Propriedades analisadas	Designação das amostras			
	Solo 1	Solo 2	Solo 3	
Granulometria ABNT (%)	Argila ( $\phi \leq 0,002$ mm)	61	15	13
	Silte ( $0,002 < \phi \leq 0,06$ mm)	14	22	17
	Areia fina ( $0,06 < \phi \leq 0,2$ mm)	10	30	13
	Areia média ( $0,2 < \phi \leq 0,6$ mm)	12	26	37
	Areia grossa ( $0,6 < \phi \leq 2$ mm)	3	7	20
	Pedregulho ( $\phi > 2$ mm)	0	0	0
	LL (%)	74	38	29
	LP (%)	35	25	20
	IP (%)	39	13	9
	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	27,05	25,44	25,24
	Classificação TRB	A-7-5 (20)	A-6 (1)	A-2-4 (0)
	Classificação USC	CH	SM	SC

Tabela 2.2. Índices classificatórios e classificação MCT dos solos

Designação das amostras	Índice c'	Índice d'	Pi' (%)	Índice e'	Classificação MCT
Solo 1	1,95	103,15	0	0,58	LG'
Solo 2	1,27	8,42	136	1,55	NS'
Solo 3	1,22	31,28	125	1,25	NA'

## 2.2.2. Preparação de amostras e programa de ensaios

Foram analisadas amostras dos solos no estado natural e quando estabilizados com 4% de aditivo químico em relação ao peso de solo seco, englobando os ensaios geotécnicos de laboratório descritos nos tópicos subseqüentes.

### 2.2.2.1. Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados na energia do ensaio Proctor Modificado, segundo a metodologia descrita na Norma Técnica NBR 7182 (ABNT, 1986), para fins de determinação do peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e da umidade ótima ( $w_{ot}$ ) dos solos e suas misturas com aditivo químico em estudo.

#### **2.2.2.2. Moldagem dos corpos-de-prova**

Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de compressão não-confinada foram moldados nos parâmetros ótimos ( $w_{ot}$  e  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) 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 10,00 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura (aproximadamente, 1000 cm<sup>3</sup> de volume). Para aceitação dos corpos-de-prova foram fixados os limites sugeridos pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, atualmente Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, em sua preparação (DNER, 1994b): peso específico aparente seco máximo  $\pm 0,30$  kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima  $\pm 0,5\%$ .

#### **2.2.2.3. Ensaios de compressão não-confinada**

Os ensaios de compressão não-confinada, dos três solos analisados, foram realizados segundo a metodologia descrita no Método de Ensaio DNER-ME 201 (DNER, 1994a), para fins de determinação do tempo ótimo entre mistura e compactação. Para execução desses ensaios, consideraram-se a energia de compactação do ensaio Proctor Modificado, o período de cura em câmara úmida de sete dias e o teor de RBI Grade 81 de 4% em relação ao peso de solo seco. A determinação da resistência à compressão não-confinada foi realizada pela média aritmética 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 préestabelecido, 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.

### **2.3. Resultados e discussão**

Na Tabela 2.3, encontram-se os parâmetros ótimos de compactação determinados para os solos 1, 2 e 3, bem como para suas respectivas misturas.

Tabela 2.3. Resultados dos ensaios de compactação

Porcentagem de RBI Grade 81	Solo 1		Solo 2		Solo 3	
	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>ot</sub> (%)
0	15,17	27,32	17,49	14,31	19,68	9,95
4	14,94	28,44	17,09	15,09	18,30	12,06

A partir dos valores apresentados na Tabela 2.3, notou-se que a adição do estabilizante químico foi responsável por alterações nos parâmetros ótimos de compactação dos solos estudados. A adição de 4% de estabilizante, em relação ao peso seco de solo, promoveu reduções da ordem de 2%, 2% e 7% nos valores de peso específico aparente seco máximo, respectivamente, nos solos 1, 2 e 3. Verificaram-se, também, aumentos da ordem de 4%, 5% e 21% nos valores de umidade ótima, respectivamente, nos solos 1, 2 e 3. Acredita-se que o aumento da umidade ótima com o acréscimo do teor de aditivo químico nas misturas deva-se ao maior consumo da água necessário às reações de hidratação do estabilizante, tendo em vista que o aditivo químico analisado é considerado um cimento hidráulico. Já as reduções dos valores de peso específico aparente seco máximo podem ser atribuídas à formação de flóculos, estabelecendo ligações entre as partículas menores e favorecendo (pelo agrupamento desses agregados menores formados pela ação do aditivo químico) a formação de agregados maiores que, conseqüentemente, produzem um material com estrutura ligeiramente mais porosa.

As Figuras 2.1, 2.2 e 2.3 ilustram, respectivamente, os valores de resistência à compressão não-confinada dos solos 1, 2 e 3, bem como a variação deste parâmetro com o tempo decorrido entre mistura e compactação das misturas.

Analisando os dados apresentados nas Figuras 2.1 e 2.2, observa-se que a resistência máxima obtida ocorreu após quatro horas de repouso da mistura, cujo valor foi de 1.330 kPa no solo 1 e 1.341 kPa no solo 2. No período entre mistura e compactação de quatro horas, os ganhos de resistência das misturas em relação aos solos 1 e 2 foram, respectivamente, de 52% e 110%. No caso em que as misturas ficaram em repouso por um período de 24 horas, conforme recomendações do fabricante do aditivo químico estudado (ANYWAY, 2003), os ganhos de resistência das misturas em relação aos solos 1 e 2 foram, respectivamente, de 34% e 86%. Esse comportamento pode ser atribuído à ocorrência de reações de trocas catiônicas entre o

aditivo e o solo e, conseqüentemente, consumo inicial de estabilizante, anteriormente à formação de ligações de cimentação, que, provavelmente, têm início depois das primeiras quatro horas após a mistura dos solos 1 e 2 com o aditivo químico.

Em contrapartida aos resultados discutidos no parágrafo anterior, no solo 3 os dados ilustrados na Figura 2.3 indicam que a resistência à compressão não-confinada máxima ocorreu para os corpos-de-prova compactados imediatamente após a mistura do mesmo com o estabilizante químico, sendo observado um valor de 1.622 kPa, o que corresponde a um ganho de resistência de 455%. Quando a mistura do solo 3 ficou em repouso por um período de 24 horas, o ganho de resistência foi da ordem de 162%. Nesse caso, acredita-se que tenha ocorrido a formação de ligações de cimentação imediatamente após a mistura do solo como o aditivo, as quais podem ter sido parcialmente quebradas durante a compactação dos corpos-de-prova, causando, conseqüentemente, reduções na resistência mecânica das misturas. No entanto, devido ao fato de o processo de hidratação ser relativamente rápido nessas misturas estabilizadas, à semelhança de misturas solo-cimento, advoga-se, também, que possam ter ocorrido reações de cimentação mais efetivas no material que foi imediatamente compactado após a mistura.

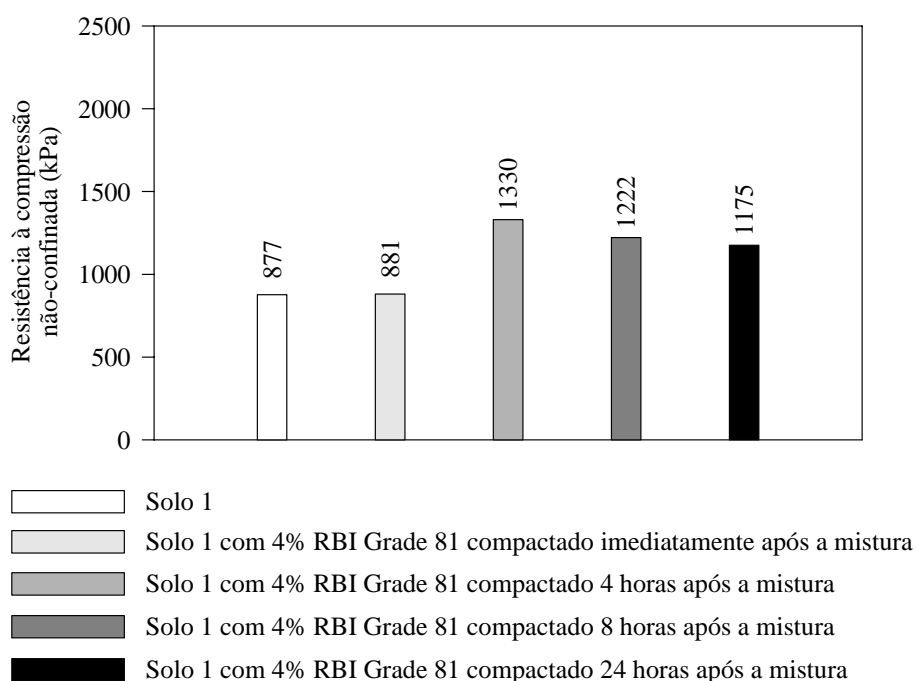


Figura 2.1. Resultados dos ensaios de compressão não-confinada: solo 1.

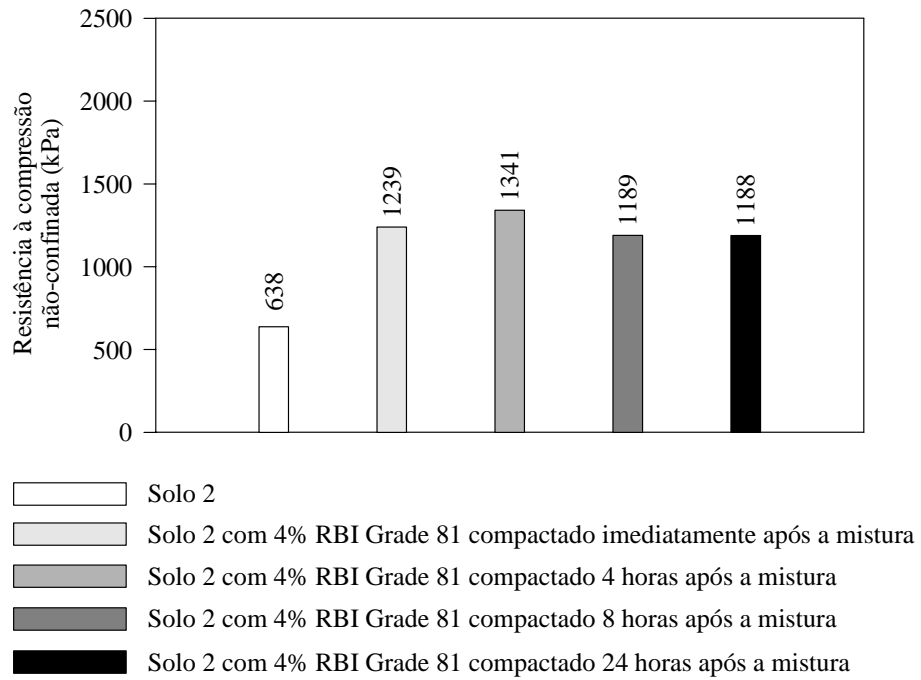


Figura 2.2. Resultados dos ensaios de compressão não-confiada: solo 2.

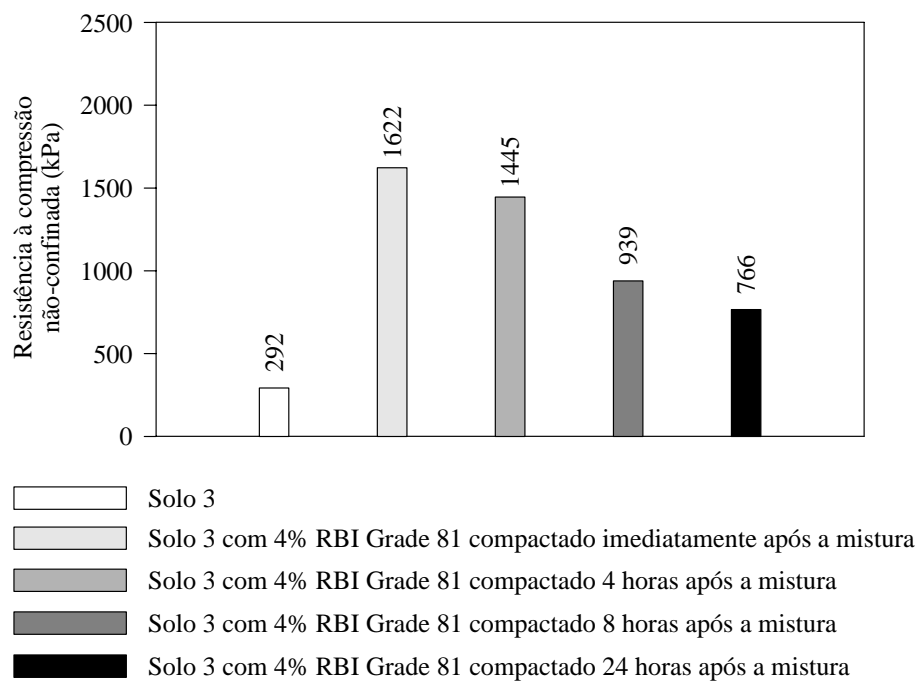


Figura 2.3. Resultados dos ensaios de compressão não-confiada: solo 3.

## 2.4. Conclusões

- O tempo decorrido entre a mistura e a compactação, aspecto este fundamental para a boa execução das camadas estabilizadas no campo, é de importância significativa na presente modalidade de estabilização.
- A mistura do solo 3 com o aditivo químico analisado no presente trabalho foi a que apresentou maior ganho de resistência. Entretanto, essa mesma mistura foi a que teve queda acentuada de resistência relacionada a maiores períodos decorridos entre mistura e compactação. Assim, recomenda-se que a execução no campo de camadas do pavimento contendo misturas do produto analisado com solos granulares (semelhantes ao solo 3) não exceda quatro horas.
- Os ensaios realizados em laboratório conforme as recomendações do fabricante, ou seja, amostras compactadas 24 horas após a mistura solo/aditivo, subestimaram os valores de resistência à compressão não-confinada e, conseqüentemente, mostraram-se a favor da segurança, uma vez que, a execução no campo de camadas do pavimento contendo essas misturas geralmente ocorre num período máximo de oito horas.
- De maneira geral, as misturas dos solos com o estabilizante químico estudado, quando comparadas com os solos no estado natural, apresentaram melhorias nas suas características mecânicas, sugerindo que o aditivo químico estudado pode ser utilizado, com sucesso, como revestimento primário de estradas de baixo volume de tráfego (florestais e vicinais, por exemplo) e como camadas de pavimentos tradicionais.

## Referências bibliográficas

- 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 Bezalel Street, Ramat-Gan, 52521 Israel, 2003. 8 p. Disponível em <http://www.anywaysolutions.com/>. Acesso em 22 mar. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo: ensaio de compactação: Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 1986. 10 p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, RJ, 1995. 18 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 201**: Solo-cimento: compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994a. 4 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 202**: Solo-cimento: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 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, SP, 1981.
- LIMA, D. C.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B.; SILVA, C. H. C.; PEREIRA, R. S.; TRINDADE, T. P.; BARBOSA, P. S. A. A experiência da UFV no emprego de estabilizantes químicos em estradas florestais. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON HARVESTING AND WOOD TRANSPORT, 6., 2003, Belo Horizonte, MG. **Proceedings...**, Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais (SIF), 2003. p. 69-117.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo, SP: Villibor, 1995. 213 p.
- PESSOA, F. H. C. **Análises dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário**. 2004. 151 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília (ENC/FT/UnB), Brasília, DF, 2004.
- RICO, A.; DEL CASTILLO, H. **La ingeniería de suelos en las vías terrestres**. México, D.F.: Editorial Limusa S.A., 1977. 643 p. 2 v.
- SANT'ANA, A. P.; SILVA, C. H. C.; COUTO, L. G.; LIMA, D. C.; CARVALHO, C. A. B.; VELTEN, R. Z. Influência do tempo decorrido entre mistura e compactação de misturas solo-escória de alto-forno moída ativada com cal. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO (RAPv), 34., 2003, Campinas, SP. **Anais...**, Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv), 2003. p. 90-96. 1 CD-ROM.
- SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo, SP: Pini Ltda., 2001. 671 p. 2 v.
- 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, Portugal, 1968.

# 3

## **Influência do tipo de cura (selada e exposta) e da imersão em água na resistência mecânica de misturas solo-RBI Grade 81 com vistas à aplicação em estradas florestais**

**Resumo.** No presente artigo, analisa-se a influência das condições de cura e da imersão em água na resistência mecânica das misturas de três solos típicos da Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil, 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 aditivo químico: 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: sete 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 quatro horas em água. Os resultados obtidos comprovaram que: (i) as condições de cura e a imersão em água dos corpos-de-prova influenciam 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; (iii) a realização de ensaios sem a fase de imersão em água superestimou a resistência mecânica das misturas no campo.

**Palavras-chave:** Condições de cura; Estabilização de solos; Estabilizante químico RBI Grade 81; Estradas florestais; Resistência à compressão não-confinada.

**Abstract.** *This paper focus 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 of Minas Gerais State, 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) chemical stabilizer content: 2%, 4% and 6% regarding soil dry weight; (ii) compaction effort: modified Proctor; (iii) mechanical strength: unconfined compression strength; (iv) mixture specimens curing time: seven days in acclimatized room; (v) mixture specimens curing conditions: specimen sealed in plastic bags, and specimen exposed to air in acclimatized room; (vi) unconfined compression strength tests: specimens tested dry and after four 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 chemical stabilizer; Forest roads; Unconfined compression strength.*

### **3.1. 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 estabilizante químico analisado, 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 na 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., 1993).

Comumente, em laboratório, se realiza 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 solos estabilizados quimicamente.

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 de Minas Gerais com o aditivo químico RBI Grade 81. Buscou-se, também, avaliar o efeito da adição do aditivo químico nos parâmetros de compactação (peso específico aparente seco máximo e umidade ótima) dos solos estudados.

## **3.2. Materiais e métodos**

### **3.2.1. Materiais utilizados**

#### **3.2.1.1. Solos**

Trabalhou-se com materiais comuns na microrregião de Viçosa, Minas Gerais, empregando-se 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 aditivo químico em relação ao peso de solo seco, considerando-se um período de cura em câmara climatizada (com umidade relativa do ar superior a 95%) das misturas de sete dias.

O solo 1 é representativo do manto superficial maduro, horizonte B, bastante intemperizado e é classificado como A-7-5 (20), de acordo com a classificação do TBR (*Transportation Research Board*) 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 39%. 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 uma 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 esta ocorrência foram coletadas em um talude de corte situado no lado esquerdo da rodovia que liga Viçosa a Paula Cândido, em frente à entrada do bairro Romão dos Reis, na cidade de Viçosa.

O solo 3 é oriundo de um perfil de intemperismo de solos desenvolvidos do gnaisse do Pré-Cambriano. Refere-se, também ao manto saprolítico, sendo classificado pelo TRB como A-2-4 (0) e NA' 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 (UFV), em Viçosa.

### **3.2.1.2. Aditivo químico**

O aditivo químico utilizado no presente estudo foi o RBI Grade 81. Atualmente o produto é fabricado 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, em conjunto com as micro-fibras naturais distribuídas aleatoriamente em sua massa, agem nos solos produzindo materiais resistentes à ação das intempéries, estáveis sob a ação de cargas e de baixa permeabilidade (ANYWAY, 2002).

### **3.2.2. 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 para os solos considerados no presente estudo. Foram realizados ensaios de compressão não-confinada, em 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 para 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) quatro 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); (iv) cura dos corpos-de-prova das misturas em câmara climatizada por um período de sete dias. Após a cura dos corpos-de-prova, procedeu-se à realização de ensaios de compressão não-confinada sem imersão e com imersão em água por um período de quatro horas.

### **3.2.2.1. Ensaio de compactação**

Os ensaios de compactação foram realizados na energia do ensaio Proctor Modificado, segundo metodologia da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) descrita na Norma Técnica 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.

### **3.2.2.2. Moldagem dos corpos-de-prova**

Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de compressão não-confinada foram moldados nos parâmetros ótimos ( $w_{ot}$  e  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) 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 10,00 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura (aproximadamente, 1000 cm<sup>3</sup> de volume). Para aceitação dos corpos-de-prova foram fixados os seguintes limites em sua preparação (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER, 1994b): peso específico aparente seco máximo  $\pm 0,30$  kN/m<sup>3</sup> e umidade ótima  $\pm 0,5\%$ .

### **3.2.2.3. Ensaios de compressão não-confinada**

Os ensaios de compressão não-confinada foram realizados conforme a metodologia descrita no Método de Ensaio DNER-ME 201 (DNER, 1994a). 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 aditivo químico 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 préestabelecido, 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.

## **3.3. Resultados e discussão**

Na Tabela 3.1, encontram-se os parâmetros ótimos de compactação determinados para os solos 1, 2 e 3, bem como para suas respectivas misturas.

Tabela 3.1. Resultados dos ensaios de compactação

Porcentagem de RBI Grade 81	Solo 1		Solo 2		Solo 3	
	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>ot</sub> (%)
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

Os resultados apresentados na Tabela 3.1 mostram que a adição do estabilizante químico, 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.

Na Figura 3.1, encontram-se apresentados os valores de resistência à compressão não-confinada dos solos 1, 2 e 3 e de suas misturas, determinados via ensaios realizados em corpos-de-prova submetidos a diferentes tipos de cura (selada e exposta). A Figura 3.1 ilustra, também, o efeito da imersão dos corpos-de-prova em água por um período de quatro horas na resistência à compressão não-confinada dos solos e das misturas.

Analisando os resultados apresentados na Figura 3.1, notou-se que o aumento do teor de aditivo químico foi responsável por acréscimos significativos nos valores de resistência à compressão não-confinada. Os ensaios realizados com corpos-de-prova moldados nos parâmetros ótimos ( $w_{ot}$  e  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) 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 3.1 evidenciam que as misturas dos solos com 6% de aditivo químico foram as que apresentaram os maiores valores de resistência à compressão não-confinada, sendo que os ganhos de resistência em relação aos solos 1, 2 e 3 foram, respectivamente, de 62%, 187% e 690%. 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 aditivo químico e os ganhos de resistência em relação aos solos 1, 2 e 3 foram, respectivamente, de 202%, 203% e 727%, como elucidado na Figura 3.1.

- Ensaio realizado sem a fase de imersão
- Ensaio realizado com a fase de 4 horas de imersão em água

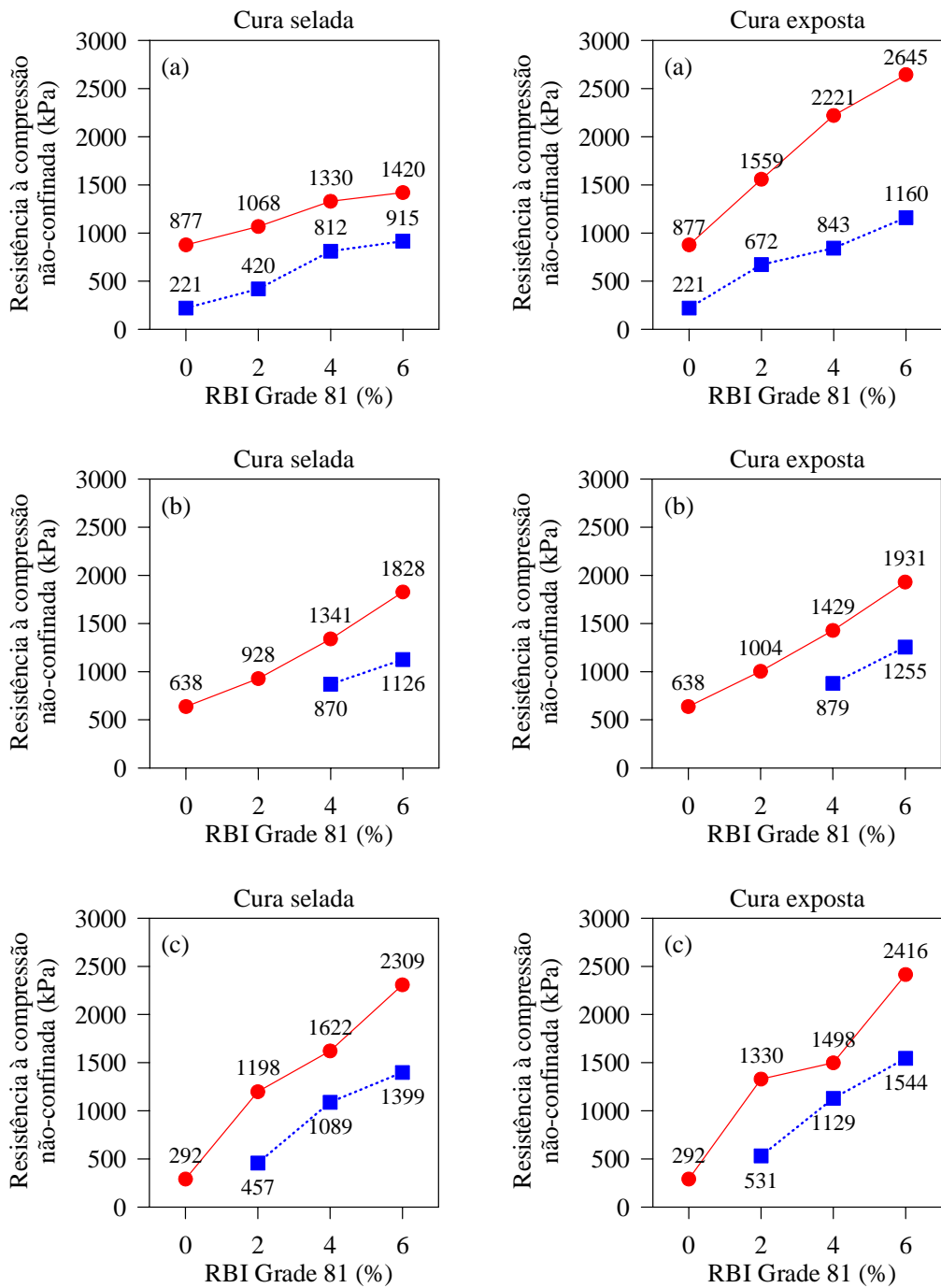


Figura 3.1. Resultados dos ensaios de compressão não-confinaada: (a) solo 1; (b) solo 2; e (c) Solo 3.

A partir dos resultados ilustrados na Figura 3.1 foi possível constatar que as únicas amostras que não resistiram à imersão em água por um período de quatro horas, no ensaio de compressão não-confinada, foram as que seguem: solo 2, sem tratamento e com 2% de estabilizante químico; solo 3, sem tratamento. Esses resultados apontam que o aditivo químico em estudo promoveu uma maior estabilidade aos solos quando submetidos à imersão em água. No entanto, em todas as condições avaliadas no 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 com 4% de aditivo químico quando submetido à cura exposta ao ar.

Os dados apresentados na Figura 3.1 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 aditivo químico, 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, 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%.

### **3.4. Considerações finais**

- A resistência à compressão não-confinada das misturas dos três solos estudados com o aditivo químico estudado é, significativamente, influenciada pelas variáveis: tipo de cura (selada e exposta), porcentagem de estabilizante químico 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 àsquelas vivenciadas em laboratório nos ensaios com imersão em água.

- Os valores de resistência à compressão não-confinada determinados de maneira tradicional (cura selada) subestimaram a resistência mecânica das misturas com relação às condições de cura exposta ao ar em câmara climatizada, situação esta mais próxima das condições de campo.
- Apesar dos resultados obtidos se mostrarem promissores e qualificarem o aditivo químico avaliado como um produto de potencial significativo para aplicação em estradas florestais, conclusões definitivas só serão possíveis pela realização de pesquisas que abranjam uma maior gama de solos, bem como através da construção e do acompanhamento do desempenho de trechos experimentais executados com as misturas.

## Referências bibliográficas

- ANYWAY SOLID ENVIRONMENTAL SOLUTIONS LTD. KEREM MAHARAL. **Frequently asked questions**. Israeli Office, 50 Bezalel 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 Bezalel Street, Ramat-Gan, 52521 Israel, 2003. 8 p. Disponível em <http://www.anywaysolutions.com/>. Acesso em 22 mar. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo: ensaio de compactação: Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 1986. 10 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 201**: Solo-cimento: compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994a. 4 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 202**: Solo-cimento: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 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, SP, 1981.
- LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Estabilização dos solos II: técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa**. Caderno Didático n.333, Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1993. 32 p.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo, SP: 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, Portugal, 1968.

TRINDADE, T. P.; LIMA, D. C.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, M. P. F.; CANESCHI, F. P. 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.

# 4

## **Estudo da durabilidade de misturas solo-RBI Grade 81 com vistas à aplicação em estradas florestais e pavimentos convencionais**

**Resumo.** O presente artigo é dirigido à caracterização, para fins rodoviários, do parâmetro durabilidade de três misturas solo-RBI Grade 81, a partir de resultados de ensaios de durabilidade por molhagem e secagem. Trabalhou-se com um solo residual maduro (solo 1) e dois solos residuais jovens (solos 2 e 3) de gnaiss da Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil. O programa de ensaios de laboratório envolveu: (i) teor de estabilizante químico: 6% em relação ao peso de solo seco; (ii) energias de compactação: Proctor Normal, Intermediário e Modificado; (iii) período de cura: sete dias em câmara úmida. Os resultados do programa de ensaios apontaram que: (i) apenas as misturas dos solos 1 e 3 compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário e dos solos 2 e 3 compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado resistiram a todos os ciclos do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem; (ii) as misturas do solo 3 compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado apresentaram as menores perdas de massa (inferiores a 13%); (iii) quanto ao aspecto durabilidade, as misturas solo-RBI Grade 81 exibem bom potencial para emprego como materiais de construção rodoviária.

**Palavras-chave:** Eestabilização de solos; Estabilizante químico RBI Grade 81; Estradas; Durabilidade via ensaios de molhagem e secagem.

**Abstract.** *This paper addresses the characterization of three soil-RBI Grade 81 mixtures for road engineering applications using laboratory testing data from wetting and drying durability tests. One mature (soil 1) and two young (soils 2 and 3) gneiss residual soils from the Zona da Mata of Minas Gerais State, Brazil, were used throughout the study. The laboratory testing program encompassed the following steps: (i) chemical stabilizer content: 6% regarding soil dry weight; (ii) compaction efforts: Standard, Intermediate and Modified Proctor; (iii) mixture specimens curing time: seven days in acclimatized room. The testing program data supported that: (i) only*

*tested mixtures of soils 1 and 3 compacted at the Intermediate compaction effort, and of soils 2 and 3 compacted at the Modified compaction effort endured all cycles in the durability test; (ii) mixture specimens of soil 3 compacted at the Modified Proctor compaction effort presented lower mass losses in the durability test (under 13%); (iii) from durability testing data standpoint, soil-RBI Grade 81 mixtures are regarded as potential road engineering materials.*

**Keywords:** *Soil stabilization; RBI Grade 81 chemical stabilizer; Roads; Wetting and drying durability tests.*

## **4.1. Introdução**

As estradas exercem importante papel no desenvolvimento econômico e social de um país. Sendo o transporte rodoviário uma das principais formas de integração do Brasil, fundamental no escoamento da produção industrial e agrícola brasileira.

Uma informação que ilustra a importância do sistema rodoviário para a economia brasileira é que este é responsável por, aproximadamente, 65% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros no país, respondendo, também, pelo transporte de 70% dos produtos de consumo doméstico no país (REIS, 2002).

Com relação ao setor florestal, em meados da década de 80 estimava-se a extensão da malha brasileira de estradas em 600.000 km (MACHADO e MALINOVSKI, 1986), tendo este número aumentado substancialmente com as novas ampliações das empresas florestais nas últimas duas décadas. Segundo Machado et al. (2003), os principais problemas enfrentados na construção das estradas florestais têm sido: (i) a baixa durabilidade da superfície de rolamento; e (ii) a escassez de solos locais aptos a serem usados como revestimento primário.

Com base nestas constatações, pode-se afirmar que são muitas as perspectivas do emprego de um agente de estabilização que permita a execução do pavimento rodoviário em uma visão tradicional, bem como na forma de revestimento primário com um direcionamento maior para as vias florestais e vicinais, em geral. Assim, é de interesse realizar estudos que sejam direcionados à busca de novos materiais de construção rodoviária, em especial considerando-se a técnica de estabilização química dos solos, com a finalidade de se minimizar os custos com o transporte de materiais de

jazidas de empréstimo, bem como de reduzir os impactos ambientais proporcionados pela sua exploração.

Com relação ao estabilizante químico que é o objeto do presente artigo, França (2003) relata que em alguns países, como África do Sul, Israel, Itália e Portugal, o RBI Grade 81 tem sido aplicado com êxito, principalmente na construção de estradas vicinais, aumentando a resistência e reduzindo o desgaste e a formação de pó das camadas de subleito e revestimento primário. Tais aspectos são de grande interesse para o uso adequado desse estabilizante nos países de clima tropical, o que reforça a importância de se desenvolverem estudos de durabilidade de misturas solo-RBI Grade 81, em especial no Brasil onde se observa uma diversidade nos processos pedogenéticos de formação de solos.

## **4.2. Materiais e métodos**

### **4.2.1. Materiais utilizados**

O presente trabalho foi conduzido com um solo residual jovem, pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (solo 1) e dois solos saprolíticos de gnaiss (solos 2 e 3), cujos argumentos para a sua escolha foram os que seguem: (i) os solos 1 e 2 formam duas ocorrências que abrangem uma vasta área do Sudeste brasileiro; e (ii) o solo 3 é o único que se enquadra nas exigências de dosagem de misturas solo-cimento, segundo a Norma Simplificada de Dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1986) e a Norma de Dosagem da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1992). Assim, essas misturas podem servir de referência para fins de comparação com as misturas solo-RBI Grade 81, no que se refere ao parâmetro durabilidade. Apresenta-se, a seguir, uma descrição dos solos e locais de coleta das amostras, bem como fotografias (Figura 4.1) que retratam suas condições de ocorrência no campo.

- solo 1: é um solo residual maduro, classificado pedologicamente como Latossolo Vermelho-Amarelo. Ele tem grande expressão territorial no sul e no sudeste do Brasil e apresenta um horizonte B latossólico de tonalidade amarelada, estrutura granular forte e em blocos bem individualizados, aspecto bastante poroso, com textura argilo-areno-siltosa (61% de argila,

14% de silte e 25% de areia). Trata-se de um solo classificado como A-7-5 (20), de acordo o TRB (*Transportation Research Board*), e LG', pela metodologia MCT (Miniatura, Compactado e Tropical) preconizada por Nogami e Villibor (1995). O local de coleta da amostra foi um talude de corte localizado no lado direito da rodovia que liga os municípios de Viçosa e Paula Cândido, próximo à usina de pré-misturado a frio da cidade de Viçosa, Minas Gerais;

- solo 2: é um solo residual jovem, que se constitui no manto saprolítico, horizonte C, resultante de um perfil de intemperismo de solos desenvolvidos do gnaiss do Pré-Cambriano, com camadas de espessuras às vezes superiores a 20 metros. Esse solo possui coloração rósea, sua textura é areno-silto-argilosa (15% de argila, 22% de silte e 63% de areia) e sua classificação é a que segue: A-6 (1), de acordo com o TRB, e NS', pela metodologia MCT. O local de coleta da amostra foi um talude de corte situado no lado esquerdo da rodovia que liga Viçosa a Paula Cândido, em frente à entrada do bairro Romão dos Reis, em Viçosa; e
- solo 3: é, também, um solo residual jovem oriundo de um perfil de intemperismo de solos desenvolvidos do gnaiss do Pré-Cambriano. Ele apresenta coloração acinzentada, com granulometria areno-silto-argilosa (13% de argila, 17% de silte e 70% de areia) e é classificado como A-2-4 (0), de acordo o TRB, e NA', pela metodologia MCT. O local de coleta da amostra é um talude de corte localizado na Vila Secundino, no Campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa.

Trabalhou-se com o aditivo químico RBI Grade 81. Embora esse produto tenha alcançado, nos últimos anos, reconhecimento internacional como estabilizante de camadas do pavimento rodoviário, nas funções de melhoria do subleito, reforço, sub-base, base e revestimento primário, o seu uso no Brasil é, praticamente, inexistente (FRANÇA, 2003). Segundo o fabricante, a empresa *Anyway Solid Environmental Solutions Ltd. Kerem Maharal*, o aditivo químico é composto por substâncias inorgânicas que agem nos solos e produzem materiais resistentes à ação das intempéries, estáveis sob a ação de cargas e de baixa permeabilidade (ANYWAY,

2002). O produto é comercializado em sacos de 25 kg ou em recipientes maiores com capacidade de uma tonelada, podendo ser armazenado por até doze meses. É um pó de cor cinza, sem odor, não inflamável, pH 12,5 (na forma de pasta saturada) e peso específico dos grãos da ordem de  $25 \text{ kN/m}^3$  (ANYWAY, 2002).

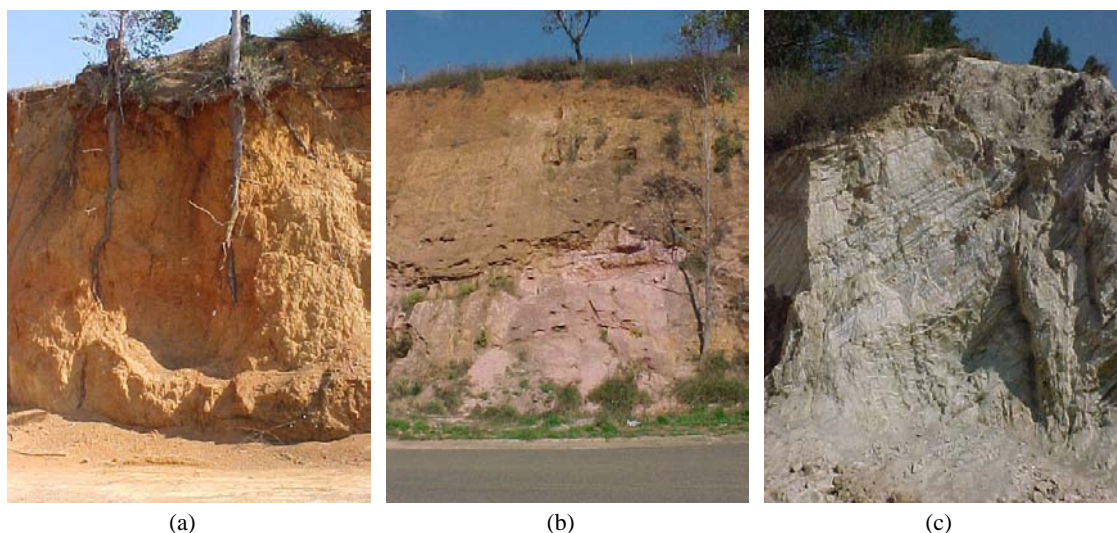


Figura 4.1. Locais de coleta das amostras dos solos: (a) solo 1; (b) solo 2; e (c) solo 3.

#### 4.2.2. 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, em 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 para 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) quatro horas nos solos 1 e 2; e (ii) compactação imediatamente após a mistura no solo 3. Nas misturas, adicionou-se o aditivo químico no teor de 6% em relação ao peso de solo seco, fez-se a homogeneização da massa estabilizada e 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  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) das energias de compactação dos ensaios Proctor Normal, Intermediário e Modificado; (iii) 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, deu-se início aos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem.

#### 4.2.2.1. Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados nas energias dos ensaios Proctor Normal, Intermediário e Modificado, segundo a metodologia descrita na Norma Técnica NBR 7182 (ABNT, 1986), com o objetivo de se determinar o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e a umidade ótima ( $w_{ot}$ ) das misturas dos solos 1, 2 e 3 com 6% de aditivo químico.

#### 4.2.2.2. Moldagem dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram moldados nas energias anteriormente citadas para a realização dos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem. Os corpos-de-prova foram compactados por processo dinâmico, utilizando-se o molde do ensaio de compactação Proctor, ou seja, um molde cilíndrico de 10,00 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura (aproximadamente, 1000 cm<sup>3</sup> de volume) e obedecendo-se às especificações apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Parâmetros e equipamentos utilizados nos ensaios de compactação (ABNT, 1986)

Características inerentes a cada energia de compactação	Energia de compactação utilizada		
	Normal	Intermediária	Modificada
Soquete	Pequeno (massa 2,50 kg)	Grande (massa 4,54 kg)	Grande (massa 4,54 kg)
Número de camadas	3	3	5
Número de golpes por camada	26	21	27
Energia de compactação (kN.m/m <sup>3</sup> )	590	1290	2690

Para aceitação dos corpos-de-prova foram fixados os limites recomendados pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, hoje Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, em sua preparação (DNER, 1994a): peso específico aparente seco máximo  $\pm 0,30 \text{ kN/m}^3$ ; e umidade ótima  $\pm 0,5\%$ .

#### 4.2.2.3. Ensaios de durabilidade por molhagem e secagem

Os ensaios de durabilidade por molhagem e secagem foram executados segundo a metodologia descrita no Método de Ensaio DNER-ME 203 (DNER, 1994b). Originalmente, o ensaio foi desenvolvido para avaliar a durabilidade, através da perda de massa, de corpos-de-prova de misturas solo-cimento compactados na energia do ensaio Proctor Normal e submetidos a um período de cura de sete dias em câmara úmida, antes de serem submetidos a doze ciclos consecutivos de molhagem, secagem e escovação com escova de fios de aço achatados (ABCP, 1986). No entanto, no presente trabalho, tendo em vista a recomendação do fabricante de que as misturas solo-RBI Grade 81 devem ser compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado (ANYWAY, 2003), trabalhou-se, também, com as energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado.

### 4.3. Resultados e discussão

Na Tabela 4.2, encontram-se os parâmetros ótimos de compactação determinados para as misturas dos solos 1, 2 e 3, compactados nas energias dos ensaios Proctor Normal, Intermediário e Modificado.

Tabela 4.2. Resultados dos ensaios de compactação

Material analisado	Energia Normal		Energia Intermediária		Energia Modificada	
	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>ot</sub> (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w <sub>ot</sub> (%)
Solo 1 com 6% de RBI Grade 81	13,64	32,70	13,81	31,87	14,35	30,35
Solo 2 com 6% de RBI Grade 81	14,81	20,35	16,23	18,13	16,92	16,11
Solo 3 com 6% de RBI Grade 81	15,68	14,01	17,02	12,74	18,12	12,10

Os resultados apresentados na Tabela 4.2 mostram que o aumento da energia de compactação foi responsável por incrementos nos valores de peso específico aparente seco máximo e reduções nos valores de umidade ótima das misturas. Observou-se, também, que os maiores valores de peso específico aparente seco máximo relacionam-se ao solo 3, de características granulares (70% de areia). Em contrapartida, o solo 1, que possui 61% de argila, apresentou os maiores valores de umidade ótima. No que diz respeito aos parâmetros ótimos de compactação, os materiais estudados neste trabalho apresentaram comportamento comumente relatado em trabalhos clássicos da Mecânica dos Solos (VARGAS, 1977; SOUSA, 1980; PINTO, 2000).

De posse dos parâmetros ótimos de compactação de cada uma das misturas, partiu-se, então, para a moldagem dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem.

Nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 são apresentados, respectivamente, os resultados dos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem realizados em corpos-de-prova dos solos 1, 2 e 3 com 6% de aditivo químico e compactados nas energias dos ensaios Proctor Normal, Intermediário e Modificado.

Os resultados ilustrados nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 revelam que as únicas misturas que resistiram aos doze ciclos do ensaio de durabilidade foram as que seguem: solo 1 com 6% de estabilizante químico compactado na energia Intermediária (perda de massa acumulada na ordem de 16%); solo 2 com 6% de estabilizante químico compactado na energia Modificada (perda de massa acumulada da ordem de 22%); e solo 3 com 6% de estabilizante químico compactado nas energias Intermediária e Modificada (perdas de massa acumuladas da ordem de 20% e 13%, respectivamente).

Observou-se, também, que com o aumento da energia de compactação ocorreram reduções na perda de massa das misturas, exceto para as misturas do solo 1 com o aditivo químico, onde houve uma inversão de resultados entre as energias do ensaio Proctor Intermediário e Modificado.

Tabela 4.3. Resultados dos ensaios de durabilidade por secagem e molhagem realizados em corpos-de-prova do solo 1 com 6% de aditivo químico




Energia de compactação	Ciclo nº	Perda de massa acumulada (%)	Estado do corpo-de-prova
Normal	0	0,00	
	1	2,97	
	2	6,19	
	3	8,65	
	4	11,11	
	5	13,38	
	6	15,62	
	7	18,15	
	8	20,66	
	9	24,73	
	10	-	
	11	-	
	12	-	
Intermediária	0	0,00	
	1	1,85	
	2	2,93	
	3	4,25	
	4	5,70	
	5	6,79	
	6	7,84	
	7	8,74	
	8	10,14	
	9	11,61	
	10	12,83	
	11	14,37	
	12	16,02	
Modificada	0	0,00	
	1	1,92	
	2	4,42	
	3	7,25	
	4	9,52	
	5	11,54	
	6	13,89	
	7	15,26	
	8	16,57	
	9	18,93	
	10	20,89	
	11	-	
	12	-	

Tabela 4.4. Resultados dos ensaios de durabilidade por secagem e molhagem realizados em corpos-de-prova do solo 2 com 6% de aditivo químico







Energia de compactação	Ciclo nº	Perda de massa acumulada (%)	Estado do corpo-de-prova
Normal	0	0,00	
	1	3,07	
	2	7,35	
	3	11,39	
	4	-	
	5	-	
	6	-	
	7	-	
	8	-	
	9	-	
	10	-	
	11	-	
	12	-	
Intermediária	0	0,00	
	1	2,29	
	2	5,31	
	3	7,88	
	4	10,35	
	5	12,56	
	6	14,26	
	7	16,43	
	8	18,33	
	9	21,65	
	10	-	
	11	-	
	12	-	
Modificada	0	0,00	
	1	1,36	
	2	3,26	
	3	5,46	
	4	7,27	
	5	8,94	
	6	10,43	
	7	11,57	
	8	13,19	
	9	14,69	
	10	16,78	
	11	19,02	
	12	21,45	

Tabela 4.5. Resultados dos ensaios de durabilidade por secagem e molhagem realizados em corpos-de-prova do solo 3 com 6% de aditivo químico

Energia de compactação	Ciclo nº	Perda de massa acumulada (%)	Estado do corpo-de-prova
Normal	0	0,00	
	1	1,72	
	2	3,80	
	3	6,05	
	4	8,16	
	5	10,17	
	6	11,77	
	7	13,95	
	8	15,90	
	9	18,71	
	10	21,38	
	11	-	
12	-		
Intermediária	0	0,00	
	1	1,25	
	2	2,68	
	3	4,47	
	4	6,12	
	5	7,52	
	6	8,48	
	7	9,85	
	8	11,24	
	9	12,63	
	10	14,57	
	11	16,93	
12	19,54		
Modificada	0	0,00	
	1	1,19	
	2	2,43	
	3	3,87	
	4	5,03	
	5	6,43	
	6	7,18	
	7	8,09	
	8	8,87	
	9	10,01	
	10	10,84	
	11	11,78	
12	12,82		

A maior durabilidade associada a uma menor energia de compactação observada no solo 1 pode ser explicada por meio do modelo de representação da estrutura de solos argilosos compactados, proposto por Lambe (1958). Esse autor afirma que, a partir de determinado nível de energia de compactação aplicada ao corpo-de-prova, há uma tendência de suas partículas se orientarem de forma paralela, com diminuição das distâncias entre elas, resultando num material mais denso. Por outro lado, como afirmou Melo (1985), à medida que as partículas tendem a se orientar de forma paralela, pode ocorrer formação de lamelas que podem levar a um descolamento precoce de camadas do corpo-de-prova, reduzindo assim a sua resistência ao desgaste, o que pode ter ocorrido no presente caso. Esse fenômeno é comum em solos lateríticos argilosos, podendo-se citar como exemplo um estudo conduzido com um Latossolo Roxo desenvolvido sobre o basalto na bacia do Paraná, onde Carvalho et al. (1981) constataram, por meio da observação de amostras em microscópio eletrônico, utilizando a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que, após uma compactação empregando a energia do ensaio Proctor Normal, o solo apresentou fraturas segundo as superfícies de menor resistência e os vazios intersticiais foram substituídos por vazios fissurais orientados perpendicularmente ao eixo da compactação.

#### **4.4. Conclusões**

- Apenas os corpos-de-prova dos solos 1, 2 e 3 estabilizados com 6% de aditivo químico e compactados nas energias dos ensaios Proctor Intermediário (solos 1 e 3) e Proctor Modificado (solos 2 e 3) resistiram a todos os ciclos dos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem.
- Verificou-se, também, que o solo 3 com 6% de estabilizante químico compactado na energia do Proctor Modificado apresentou a maior durabilidade, dentre as misturas aqui analisadas, com uma perda de massa acumulada da ordem de 13%.
- A análise dos resultados dos ensaios de durabilidade realizados indica que a estabilização de solos com aditivo químico estudado pode ser uma técnica de interesse para fins rodoviários. No entanto, o emprego desse produto, em

especial considerando-se os solos argilosos, requer estudos prévios de dosagem em laboratório para cada tipo de solo considerado.

## Referências bibliográficas

- ANYWAY SOLID ENVIRONMENTAL SOLUTIONS LTD. KEREM MAHARAL. **Frequently asked questions**. Israeli Office, 50 Bezalel 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 Bezalel Street, Ramat-Gan, 52521 Israel, 2003. 8 p. Disponível em <http://www.anywaysolutions.com/>. Acesso em 22 mar. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Estudo Técnico 35: Dosagem das misturas de solo-cimento: Normas de dosagem**. 3. ed., São Paulo, SP, 1986. 51 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo: ensaio de compactação: Procedimento**. Rio de Janeiro, RJ, 1986. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253: Solo-cimento: dosagem para emprego como camada de pavimento: Procedimento**. Rio de Janeiro, RJ, 1992. 4 p.
- CARVALHO, A.; CHAUVEL, A., GUIMARÃES, J. E. P.; MELFI, A. J.; NÓBREGA, M. T. Caracterização mineralógica, morfológica e geotécnica de alguns solos lateríticos desenvolvidos sobre basaltos na Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1981, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...**, Rio de Janeiro, RJ: COOPE/UFRJ-CNPq-ABMS, 1981. p. 340-381.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 202: Solo-cimento: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos: Método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ, 1994a. 7 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 203: Solo-cimento: determinação da durabilidade através da perda de massa por molhagem e secagem: Método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ, 1994b. 4 p.
- FRANÇA, F. C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto "RBI Grade 81"**. 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.
- LAMBE, T. W. The structured of compacted clays. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, v.84, No SM2, p. 1654-1 to 1654-34, 1958.
- MACHADO, C. C.; MALINOVSKI, J. R. **Rede viária florestal**. Curitiba, PR: FUPEF, 1986. 157 p.
- MACHADO, C. C.; SANT'ANNA, G. L.; PEREIRA, R. S. Pavimentação de estradas florestais: emprego do alcatrão de madeira de eucalipto. **Revista da Madeira**, n.73, Curitiba, PR, p. 56-62, 2003.

- MELO, F. G. **Compactação de aterros de barragens de terra**. Lisboa, Portugal: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1985. 106 p.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo, SP: Villibor, 1995. 213 p.
- PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2000. 247 p.
- REIS, R. M. M. **Misturas asfálticas tipo SMA para pavimentos de alto desempenho submetidos a tráfego pesado**. 2002. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2002.
- SOUSA, M. L. **Pavimentação rodoviária**. 2. ed., Rio de Janeiro, RJ: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 1980. 361 p. 1 v.
- TRINDADE, T. P.; LIMA, D. C.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, M. P. F.; CANESCHI, F. P. 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.
- VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo, SP: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509 p.

# 5

## **Chemical stabilization of tropical soils: mechanical characterization using CBR, unconfined compression and Brazilian tensile strength laboratory tests**

**Abstract.** This paper presents the results of a laboratory study directed to the technological characterization of tropical soils of the *Zona da Mata* of Minas Gerais State, Brazil, and their mixtures with the chemical stabilizer RBI Grade 81 for geotechnical engineering applications. The study addresses the effects of stabilizer, compaction effort and water immersion on mechanical engineering parameters of two mature and one residual gneiss soils, as follows: (i) stabilizer contents of 2%, 4% and 6% regarding soil dry weight; (ii) mixtures specimens cured during seven days in a conditioning chamber; (iii) soils and mixtures specimens compacted at the standard, intermediate and modified Proctor compaction efforts; (iv) mechanical characterization of soils and mixtures specimens via CBR, unconfined compression and Brazilian tensile strength laboratory tests. Conclusions of the study are, as follows: (i) addition of the stabilizer to soils increased significantly their mechanical strength parameters; (ii) higher values CBR, unconfined compressive and tensile strengths are directly related to increases in compaction effort and in stabilizer content; (iii) addition of stabilizer caused significant decrease in soils swelling; (iv) water immersion caused decreases of 48% and 54% in unconfined compressive and tensile strengths, respectively; (v) the mean of the ratios between tensile strength and unconfined compressive strength of mixture specimens were around 0.15 and around 0.12 regarding parameters measured, respectively, before and after specimens immersion in water; and (vi) in the majority of the statistical analysis, the normality test (Shapiro-Wilk's test) and the significance test (Student t test) resulted significant at the 5% probability level.

**Keywords:** Tropical soils; Chemical stabilization, RBI Grade 81 chemical stabilizer; Mechanical characterization; Geotechnical applications.

## 5.1. Introduction

In Brazil, where highway transport is clearly predominant, corresponding to 95% of the passenger transport matrix and 61.1% of the cargo transport matrix, the highway network is a fundamental element in the productive chains (Brazilian National Transportation Federation - CNT, 2005). It links producing markets and consumers, reduces regional inequalities and increases accessibility and social inclusion of the poorer members of society. Thus it is understood that the efficiency of Brazilian economy depends in large part on the correct functioning of the highway transport system.

Although Brazil has an extensive highway network, of around 1.72 million km (Brazilian Planning Transportation Agency - GEIPOT, 2001), a considerable part of it is unsuitable for use and requires recuperation and even amplification because of the increase in traffic and cargo transported.

In the face of such a large problem, investment must be made in studies on the highway area, with special emphasis on the use of soil mechanical stabilization techniques that enable the use of fine local soils in the highway pavement levels (LIMA et al., 2003). It is pointed that the application of these techniques contributes to the conservation of the environment, because the borrow areas and quarries that can supply granular soils suitable for highway applications are increasingly scarce, and reduction in transport costs of these materials to the highway bed.

Commonly used forms of chemical stabilization in highway construction include the incorporation of products with cementing power into soils, such as Portland cement and lime. According to Alcântara (1995) the use of these materials in Brazil has been widely disseminated in highway construction in the last 50 years, especially because of the support of their manufacturer organizations.

In addition to the traditional chemical additives, there is a series of non-traditional products, commercial or not, that have been used in Brazil at the practical level of highway construction or in research for technical assessment of their potentials as soil stabilizers, that includes DS-328, Dynacal, Perma-Zyme, phosphoric acid, lignin, Kraft black liquor, eucalyptus wood tar, granulated blast furnace slag, steel mill slag, lime mud, grits, civil construction residues, charcoal thermal electricity plant byproducts (fly ashes) and more recently, RBI Grade 81.

It is in this field that the present study is inserted, to amplify the Brazilian databank on the mechanical characteristics of chemically stabilized soils for geotechnical purposes, especially highway engineering applications. Three residual gneiss soils typical of the *Zona da Mata* of Minas Gerais State, Brazil, mixed with RBI Grade 81 stabilizer were characterized technologically and the influence of the compaction effort, stabilizer content and water immersion were assessed on the mechanical strength of the mixtures, represented by the results of the CBR, unconfined compression and Brazilian tensile strength tests.

## **5.2. The soil stabilizer RBI Grade 81**

This product is a chemical stabilizer that was developed in South Africa at the beginning of the 1990s for application in highway construction (Advanced Forest Technology S.A. Company - TECFLORA, 2001). Recently it has reached a certain international recognition as a stabilizer of highway pavement layers, in the functions of improving the subgrade, subbase, base and first cover. It has been applied in several countries on the African continent and in some countries in Europe, such as Portugal, Spain and Italy. However, it has been very little used in Brazil, and only one example can be reported of the construction of the base layer of the service patio of the Vallourec & Mannesmann do Brasil S.A. Corporation, in Belo Horizonte, Minas Gerais State, where it showed promising results (LIMA et al., 2003).

The additive percentage to be used depends on various factors, especially on the type of soil to be stabilized, the function of the stabilized layer in the highway pavement and the type of traffic requirement. Its field of application ranges from sandy to plastic clay soils (Anyway Solid Environmental Solutions Ltd Kerem Maharal Corporation - ANYWAY, 2001). Regarding the evolution of the mechanical strength of the compacted mixture in time, there is a substantial quantitative at the end of the first 24 hours of the chemical reactions between the soil and the additive, that reaches 90% at the end of seven days and may extend for a year depending on the type of soil to be stabilized (ANYWAY, 2002). The project of mixtures for use as highway pavement layers is based on results of the CBR and unconfined compression strength tests for a cure time of seven days for the compacted mixtures and the mixture performance in the

field is assessed by collecting samples of the compacted material for laboratory tests after the 28-day cure time (ANYWAY, 2003).

The product is currently manufactured in Israel and Canada by the Anyway Solid Environmental Solutions Ltd Kerem Maharal Corporation. It is commercialized in granular form in 25 kg packets and one ton containers and can be stored for up to 12 months in a suitable environment. Technical information on the product is as follows (ANYWAY, 2004): (i) it is a gray, inodorous, non-inflammable material, 25 kN/m<sup>3</sup> grain unit weight and 12.5 pH (in the form of saturated paste) with small fibers uniformly distributed throughout its mass; (ii) its main constituents are calcium hydroxide (Ca(OH)<sub>2</sub>) and calcium sulfate (CaSO<sub>4</sub>), but compounds such as SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MnO, MgO and K<sub>2</sub>O are also found in smaller quantities.

It is believed that França (2003) was the pioneer in laboratory studies on the performance of mixtures of this stabilizer with Brazilian soils for highway applications. This author worked with compacted mixtures at the compaction efforts of the intermediate (26 blows) and modified (55 blows) Proctor tests and cured for periods of 1, 7, 14 and 28 days and concluded that the additive promoted substantial improvements in the physical and mechanical properties (unconfined compressive strength, CBR and swelling) of four soils typical of the *Zona da Mata* of Minas Gerais State that are also commonly found in the subgrade of highways in the Brazilian Southeast.

Recently, Caneschi et al. (2004) reported that the addition of quantities of 2%, 4% and 6% of the chemical additive to a young residual sand-silt-clay soil in the *Zona da Mata* of Minas Gerais State accounted for considerable increases in the CBR, unconfined compressive and tensile strengths parameters and for significant reduction in its swelling measured in the CBR test. In this case, the mean of the ratios between the tensile strength and unconfined compressive strength of the mixtures was 0.16, higher than the values commonly found for the soil-lime and soil-cement mixtures, that is around of 0.10 (LIMA et al., 1993b). The authors reported that the high tensile strength values can be also attributed to the anchorage effects of the small fibers present in the chemical additive. It points out that these fibers can increase flexibility and tension strength in the stabilized layers, thus decreasing the occurrence of cracks in the layers of the highway pavements when in use.

## 5.3. Experimental program

### 5.3.1. Materials

The three soil samples used in the present study, derived from weathered Pre-Cambrian gneiss, were sampled in the city of Viçosa located in the *Zona da Mata* of Minas Gerais State, Brazil. One of the samples represented a mature residual soil, classified pedologically as Red-Yellow Latosol and called here “soil 1”. This material presents a yellow-colored B horizon, strong granular structure in well individualized blocks, a porous appearance and a clay-sand-silt texture. The other two samples represented young residual soils from the C horizon, called here “soil 2” and “soil 3”, with sand-silt-clay textures. The soils were chosen for the chemical stabilizer studies because of their great extension in Southeast Brazil and because they represent different materials in the TRB (Transportation Research Board) and USC (Unified Soil Classification) soils classification systems, and in the MCT (Miniature, Compacted and Tropical) methodology by Nogami and Villibor (1995). Tables 5.1 and 5.2 show, respectively, data on the geotechnical characterization and soils classifications according to the TRB and USC classifications and the MCT methodology.

Table 5.1. Geotechnical soils characterization: grain size distribution according Brazilian Technical Standards Association (ABNT, 1995), grain unit weight ( $\gamma_s$ ), liquid limit (LL), plastic limit (PL) and plasticity index (PI)

Soils properties		Soils samples			
		Soil 1	Soil 2	Soil 3	
Grain size distribution	Clay ( $\phi \leq 0.002$ mm)	%	61	15	13
	Silt ( $0.002 < \phi \leq 0.06$ mm)	%	14	22	17
	Fine sand ( $0.06 < \phi \leq 0.2$ mm)	%	10	30	13
	Medium sand ( $0.2 < \phi \leq 0.6$ mm)	%	12	26	37
	Coarse sand ( $0.6 < \phi \leq 2$ mm)	%	3	7	20
	Gravel ( $\phi > 2$ mm)	%	0	0	0
	$\gamma_s$	kN/m <sup>3</sup>	27.1	25.4	25.2
	LL	%	74	38	29
	PL	%	35	25	20
	PI	%	39	13	9

Table 5.2. Soils classification according to TRB and USC Systems, and MCT Methodology

Soil samples	Soil classification		
	TRB System	USC System	MCT Methodology
Soil 1	A-7-5 (20)	CH	LG'
Soil 2	A-6 (1)	SM	NS'
Soil 3	A-2-4 (0)	SC	NA'

Regarding the MCT geotechnical classification, it is expected that soils 1, 2 and 3 will present the following characteristics (NOGAMI and VILLIBOR, 1995): (i) soil 1, the integrants of the LG' group, when they have a relatively high percentage of sand grains and are compacted, can present high support capacity, high resilient modulus, low permeability, little contraction by moisture loss, reasonable cohesion and small expansion by water immersion; (ii) soil 2, the soils of the NS' group (non-lateritic silt soils) are characterized mainly by having, when compacted at optimum moisture content and maximum dry unit weight of the standard Proctor effort, low support capacity when immersed in water, low resilient modulus, high erodibility, high expansion (but low expansion pressure) and average permeability; (iii) soil 3 is characterized as the NA' group that includes sands, silts and mixtures of both almost without the presence of clay particles. Quartz and/or mica are the predominant minerals. Contrary to sands and quartz silts which are non-swelling soils, micaceous soils can be highly expansive. When compacted under optimum moisture content and maximum dry unit weight of the standard Proctor effort, many of these soils present low to medium bearing capacity, high hydraulic erodibility and high resilient response.

The soil stabilizing agent used was RBI Grade 81, at contents of 2%, 4% and 6% compared to the dry soil weight.

### 5.3.2. Methods

#### 5.3.2.1. Soils sampling

The samples were collected with manual tools in slopes cutting, placed in 50 kg plastic bags and identified by labels containing the soil origin data. These bags were then taken to the Civil Engineering Laboratory (LEC) of the Department of Civil Engineering (DEC) at the Federal University of Viçosa (UFV), where they were air

dried, the clumps removed, sieved through a 4.8 mm nominal opening and placed in plastic bags for later use. The samples were prepared for the laboratory tests according to the recommendations of the ABNT (1986a).

### 5.3.2.2. Compaction tests

The compaction tests were carried out at the compaction efforts of the standard, intermediate and modified Proctor tests, according to the methodology recommended by ABNT (1986b), to determine the optimum moisture content ( $w_{opt}$ ) and the maximum dry unit weight ( $\gamma_{dmax}$ ) of the soils and the respective mixtures, with compaction of the mixtures between two and four hours after stabilizer addition, following the procedures common to soil-cement and soil- lime mixtures.

The specimens were compacted by dynamic process according to specifications presented in Table 5.3 using the Proctor compaction test mold, that is, a 10 cm diameter and 12.73 cm tall cylindrical mold (about 1000 cm<sup>3</sup>). It should be emphasized that the Brazilian standard and modified Proctor compaction tests are similar to the AASHTO standard and modified compaction tests.

Table 5.3. Compaction laboratory test parameters according to the Brazilian Technical Standards Association (ABNT, 1986b)

Laboratory compaction test parameters	Applied compaction effort		
	Standard	Intermediate	Modified
Hammer	Small size (mass of 2.50 kg)	Large size (mass of 4.54 kg)	Large size (mass of 4.54 kg)
Number of layers	3	3	5
Number of blows per layer	26	21	27
Compaction effort (kN.m/m <sup>3</sup> )	590	1290	2690

### 5.3.2.3. Mixtures specimens preparation for mechanical strength tests

The procedures used to prepare the soil-chemical additive mixtures followed the recommendations of the product manufacturer (ANYWAY, 2003), but a variation was adopted that consisted of considering the optimum times between mixing and compaction previously determined for the soils used in the present study in a research carried out by Trindade et al. (2005) based on best mixtures mechanical strength responses. In this study the authors carried out unconfined compression tests in

specimens of soils 1, 2 and 3 stabilized with 4% RBI Grade 81, molded on the optimum compaction parameters ( $w_{opt}$  and  $\gamma_{dmax}$ ) determined in the modified Proctor compaction test, adopting periods between mixing and compaction of 0, 4, 8 and 24 hours. According to Trindade et al. (2005), the optimum times between mixing and compaction for each one of the soils were those associated to the highest unconfined compressive strength values: (i) four hours, for soils 1 and 2; and (ii) compaction immediately after mixing for soil 3.

The optimum times determined between mixing the soils with the additive and compaction of the mixtures specimens determined by Trindade et al. (2005) were used in the laboratory test program, where, to optimize the mechanical performances of the mixtures, the additive was added at contents of 2%, 4% and 6% compared to the dry soil weight, homogenized, water added to the stabilized mass with later homogenization, and the samples were placed in plastic bags, considering: (i) mixture specimen modeling in the optimum parameters ( $w_{opt}$  and  $\gamma_{dmax}$ ) determined in the compaction efforts of the standard, intermediate and modified Proctor tests; (ii) mixture specimen cure in an acclimatized room under the conditions already described for a period of seven days; (iii) CBR tests (with and without 4 days water immersion), unconfined compression and Brazilian tensile strength tests (both with and without 4 hours water immersion).

#### **5.3.2.4. Mechanical strength tests**

The tests to determine the CBR parameters, unconfined compressive and tensile strengths parameters in the soils and their mixtures with the 2%, 4% and 6% contents of chemical additive, after 7 days cure in an acclimatized room, were performed on compacted specimens at the compactions efforts of the standard, intermediate and modified Proctor tests. The test speed used in the execution of these tests was 1.25 mm/min.

It is pointed out that the CBR parameter has been used in the dimensioning of chemically stabilized layers, but not always in the most suitable way, when the reactivity of the soils to the action of the chemical stabilizer is considered, as Lima (1981) points out, because the CBR test was conceived to characterize granular materials. According to this author, for so-called non reactive soils, according to the

concept by Thompson (1969), the literature unanimously confirms the use of the CBR value as representative of the mixture quality; however, for those considered “reactive” this fact does not occur, and the use of the mechanical resistance parameters obtained by unconfined compression, Brazilian tensile strength and flexural tensile strength tests is recommended, in agreement with the Transportation Research Board (TRB, 1976) of the United States of America and, recently, with the Brazilian National Transport Infrastructure Officials in Brazil, that replaced the extinct Brazilian National Highway Officials (DNER, 1996). The present study worked with additive contents in the 2% to 6% range, creating mixtures with tensile strength that varied over a significant range, from those that were included in what the DNER (1996) calls “cemented soils”, with rigidity to accentuated flexibility, to the “soils improved with cement or lime”, understood as constituents of flexible layers. Thus it was chosen to incorporate the CBR test in the present study, executing it in its traditional form (ABNT, 1987), with specimen immersed in water for four days, and eliminating this immersion stage to analyze the influence of this procedure on the mechanical strength.

The specimens used in the unconfined compression and Brazilian tensile strength tests were compacted by dynamic process, in three equal layers, using the Proctor compaction test mold, that is, a 10 cm diameter, 12.73 cm tall cylindrical mould. The unconfined compression and Brazilian tensile strength tests were carried out according to the procedures described, respectively, in the methods of the DNER-ME 201 (DNER, 1994b) and DNER-ME 181 (DNER, 1994a), fixed to accept specimens in the following limits (DNER, 1994c): maximum dry unit weight  $\pm 0.30 \text{ kN/m}^3$  and optimum moisture content  $\pm 0.50\%$ .

The mean of three determinations was used, adopting a maximum standard deviation of 10% from the mean, to obtain the CBR, unconfined compressive and tensile strengths mechanical parameters. In the cases where the standard deviation was greater than the pre-established value, a further three specimens were molded and tested, thus increasing the number of samples and consequently, the reliability of the results.

## 5.4. Results and analysis

### 5.4.1. Compaction

The compaction curve of a soil consists of the graphical representation of the dry unit weight variation in function of the compaction moisture content. The optimum compaction parameters, or rather, the optimum moisture content ( $w_{opt}$ ) and the maximum dry unit weight ( $\gamma_{dmax}$ ) are defined at its inflection point. In general terms, the shape of this curve depends on soil type, compaction method and the effort adopted in the stabilization process. The effects in it by the use of chemical additives are the most varied possible, and dislocation of the curves to the right or to the left and changes in shape can occur.

Regarding the mixtures analyzed in the present study, Figures 5.1 to 5.3 show that the addition of the chemical stabilizer to the soils caused dislocations in the compaction curves to the right and downwards, at all the compaction efforts used. Generally, as the chemical additive contents increased there was a progressive flattening of the soil compaction curves. Figure 5.4 shows the tendencies presented by the optimum compaction parameters compared to the addition of increasing chemical stabilizer contents. The optimum moisture contents in soils 1, 2 and 3 increased with increased chemical additive contents, for the compaction efforts used. The maximum dry unit weights of the soils decreased with increases in chemical additive contents. It was also observed that the increase in compaction effort accounted for increases in the maximum dry unit weight values and reductions in the optimum moisture content values of the soils and respective mixtures.

The influence of incorporating chemical stabilizer on optimum soil compaction parameters has been discussed in several studies published, including Guimarães (1971), TBR (1976), Lima(1981), Ferraz (1994), Osula (1996), Consoli et al. (2001), Trindade et al. (2003), Sant'Ana (2003), Pessoa (2004), Cristelo and Jalali (2004) and Koliass et al. (2005). It is noted that most of the stabilizing agents that produce soil particle flocculation and cementation, making the soil more granular, as, for example, hydrated lime and Portland cement, cause reductions in the maximum dry unit weight of the soils. It is believed that phenomena of this nature are also responsible for reductions

observed in the values of the maximum dry unit weights of the soils 1, 2 and 3 after adding the chemical stabilizer assessed, as shown in Figure 5.4.

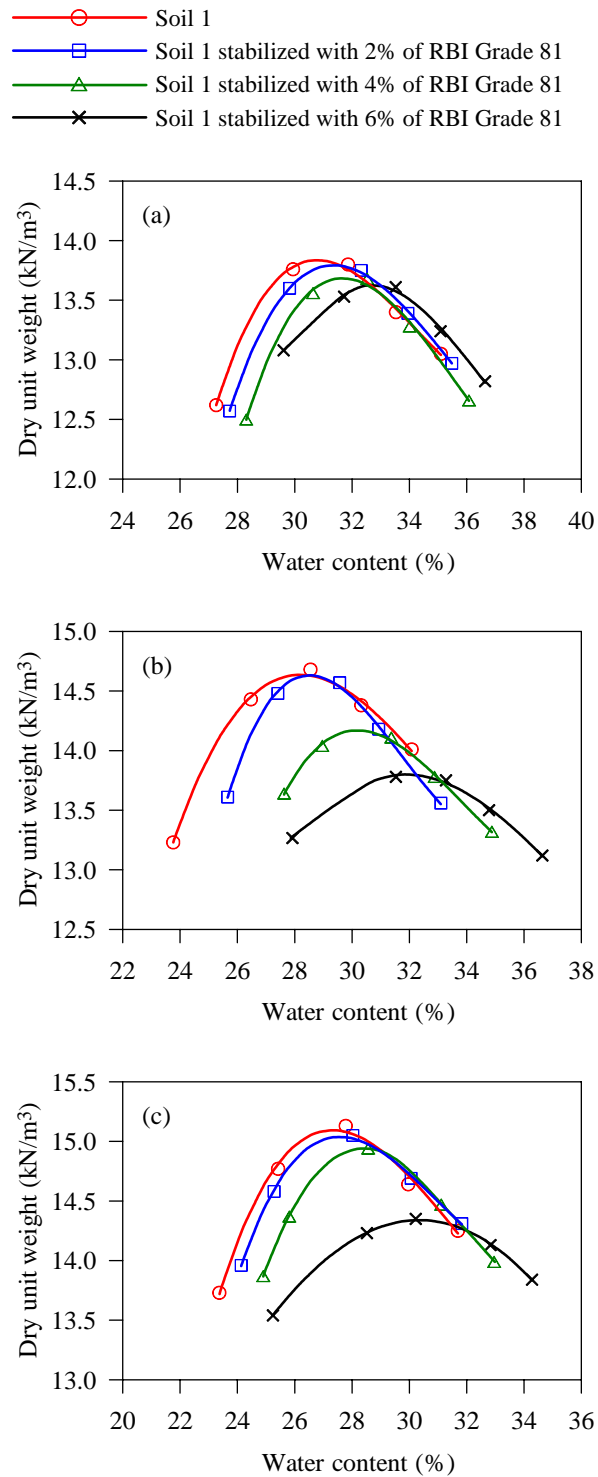


Figure 5.1. Compaction curves of soil 1 and its mixtures: (a) standard Proctor compaction effort; (b) intermediate Proctor compaction effort; and (c) modified Proctor compaction effort.

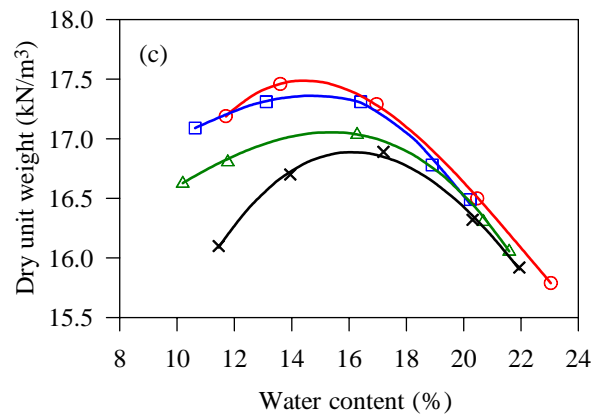
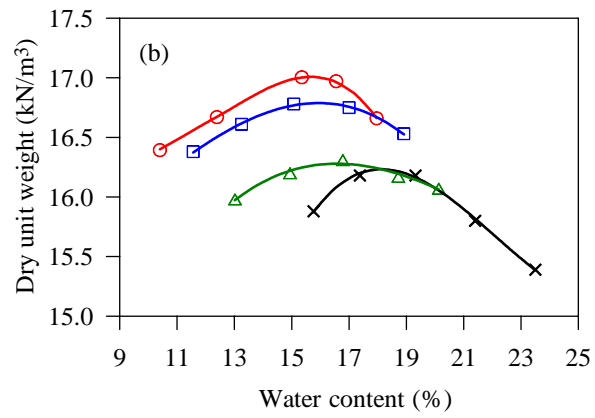
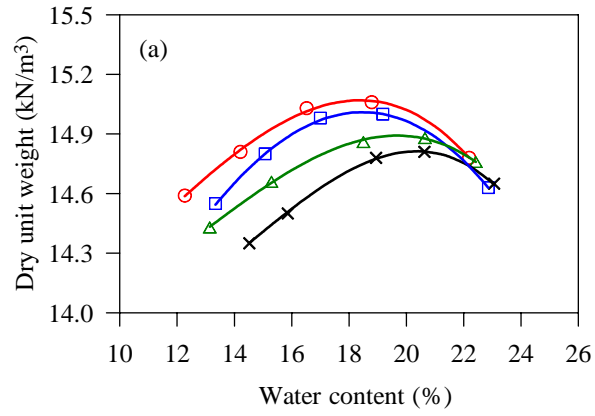
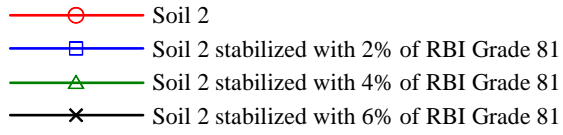


Figure 5.2. Compaction curves of soil 2 and its mixtures: (a) standard Proctor compaction effort; (b) intermediate Proctor compaction effort; and (c) modified Proctor compaction effort.

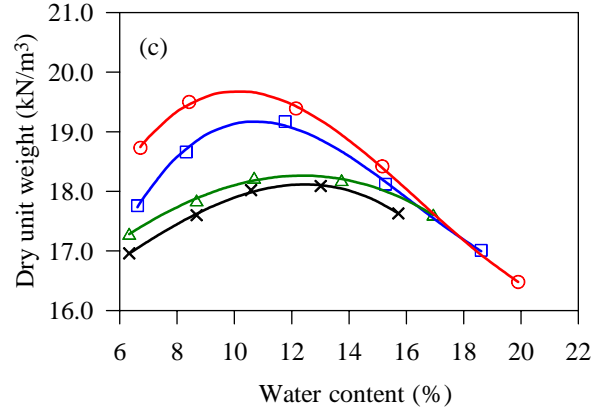
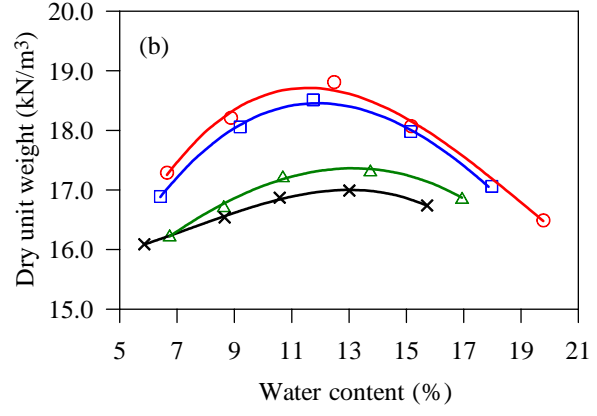
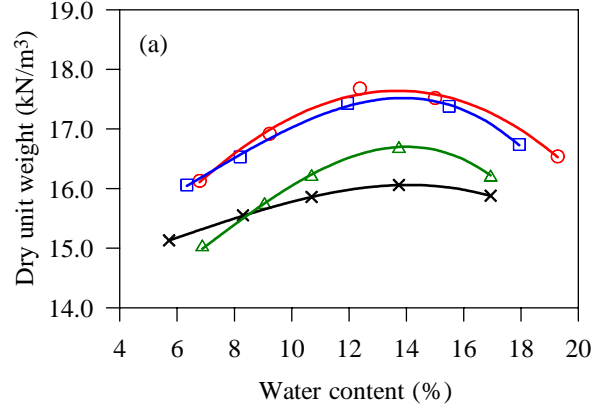
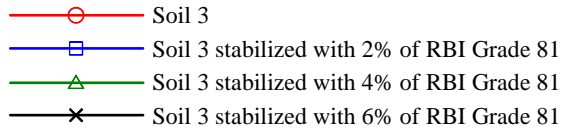


Figure 5.3. Compaction curves of soil 3 and its mixtures: (a) standard Proctor compaction effort; (b) intermediate Proctor compaction effort; and (c) modified Proctor compaction effort.

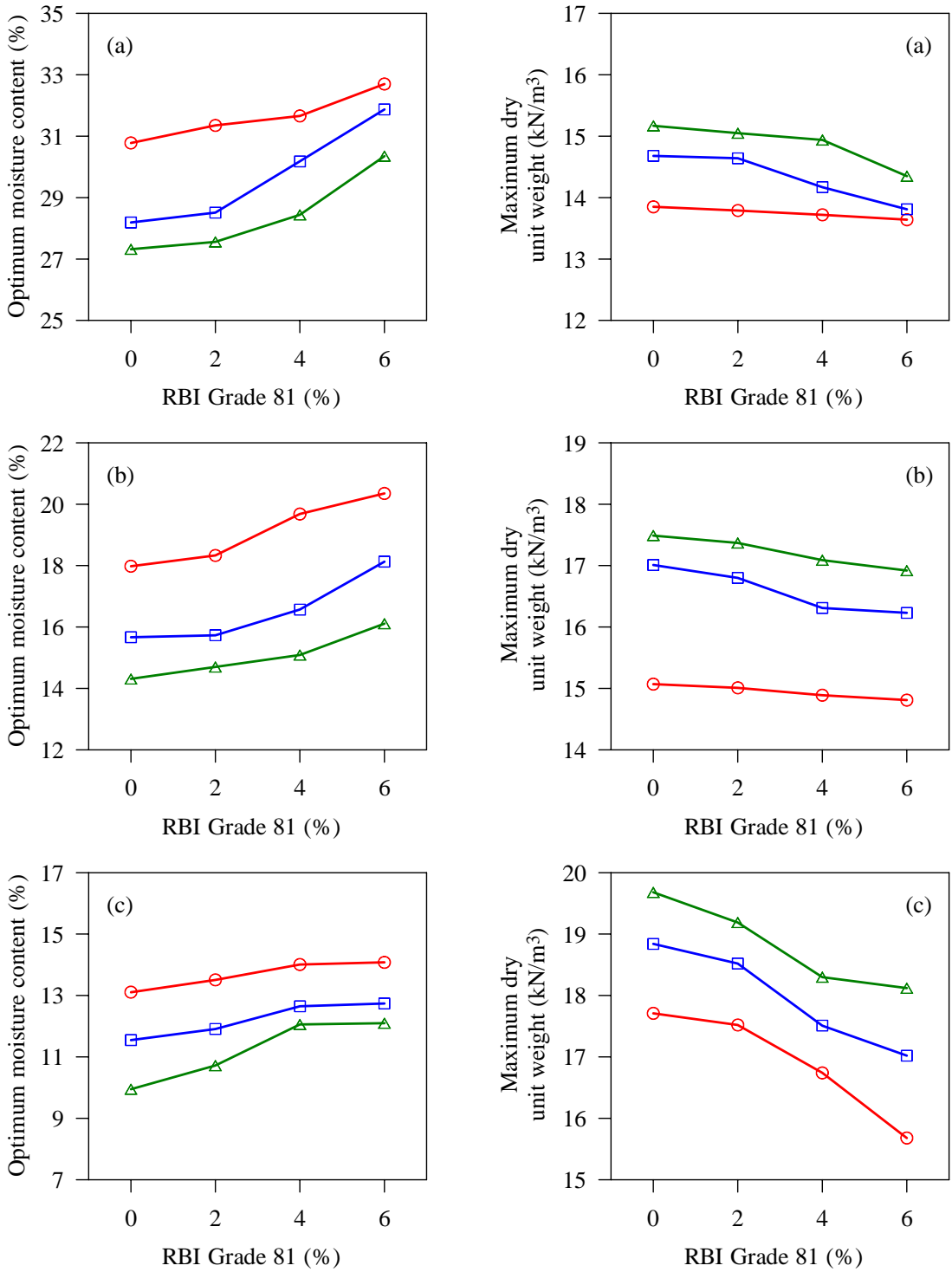
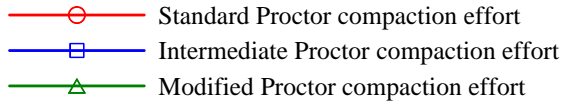


Figure 5.4. Compaction tests data of soils and their mixtures: (a) soil 1; (b) soil 2; and (c) soil 3.

In contrast, the alterations in the optimum moisture contents induced by the chemical stabilizer are not well defined in the literature. For example, cases can be quoted of optimum moisture content reduction in soils with the addition of hydrated lime (GUIMARÃES, 1971) and non-significant alterations in the optimum moisture content of soils with cement addition (FERRAZ, 1994). On the other hand, some authors have reported increases in optimum moisture content with the addition of chemical additives such as hydrated lime (CARVALHO et al., 1981; LIMA, 1981; FERRAZ, 1994; OSULA, 1996; AIBAN et al., 1998; CRISTELO and JALALI, 2004), Portland cement (OSULA, 1996; TRINDADE et al., 2003), fly ashes (CONSOLI et al., 2001; KOLIAS et al., 2005) and ground high furnace dross (SANT'ANA, 2003).

Concerning influence of RBI Grade 81 on the compaction parameters of tropical soils, there is scarce data available in the literature. One of the few references in this respect is a study by França (2003), who obtained similar results to those reported in the present study. Regarding the soils, this author mentioned lower maximum dry unit weight values and greater values of optimum moisture content of the mixtures with the increase in the additive content, and greater compaction efforts produced mixtures with higher maximum dry unit weights and lower optimum moisture contents, a performance that was confirmed by the results in the present research presented in Figure 5.4.

#### **5.4.2. CBR and swelling**

Figures 5.5 to 5.7 present the results of the conventional (with four days water immersion stage) and non-conventional (without four days immersion stage) CBR tests carried out on the soils and their respective mixtures, considering the compaction efforts of the standard, intermediate and modified Proctor tests.

The analysis of the results presented in Figures 5.5 to 5.7 shows that the non-conventional tests supplied higher CBR values than the conventional tests. However, the percentage gains observed in the CBR parameter in function of the additive content were greater in the samples tested conventionally, that is, after immersion in water for four days according to the respective technical standard. For example, it can be reported the results of the CBR tests carried out at the modified Proctor compaction effort, when specimens tested non-conventionally presented CBR percentage gains in soils 1, 2 and

3, respectively, of 349%, 249% and 293%, while in the conventional tests the observed gains were, respectively, 374%, 698% and 600%. This behavior can be related to the fact that the untreated soil samples presented generally more accentuated drops in their bearing capacity after immersion in water than the stabilized samples due to drops in their suction and, consequently, in their effective stresses.

Figures 5.5 to 5.7 show that the greatest CBR values were associated to soil 3, which had a more granular texture, and its respective mixtures, with CBR values of up to 228%, in the case those specimens compacted at the modified Proctor effort and tested in the non-conventional form. Compared to the soils, it was observed that all the mixtures presented significant increases in CBR, especially soil 2 with 6% of additive compacted at the modified Proctor compaction effort and tested conventionally, that obtained a gain of 698%. A striking fact in the results of the CBR tests presented in Figures 5.5 to 5.7 was the significant gains in load capacity associated to the variations in the compaction effort used in the soils and their respective mixtures. The only exception occurred in soil 3 tested conventionally that presented a slight reduction in CBR when the compaction effort was raised from the intermediate to the modified Proctor.

In terms of swelling, the highest values observed in the CBR tests ranged from 1.3% to 3.2% and from 0.5% to 3.0%, respectively, in soils 2 and 3 tested at the standard and modified Proctor compaction efforts, as shown in Figures 5.6 and 5.7. These swellings may be associated to the combinations of at least these two factors: the mineralogical constitutions of the soils, with the presence of mica (muscovite) and its silt and fine sand fractions, that gave more pronounced, resilient mechanical responses and the considerable variation in the compaction effort used in the specimen preparation, which emphasized further their resilient responses. In contrast, the results presented in Figure 5.5 show that the swelling values detected in soil 1 were relatively low, and the greatest swelling observed was 0.7%.

However, the addition of the chemical stabilizer accounted for significant reductions in swelling, in all soils and at all compaction efforts used. Analysis of the data presented in Figures 5.5 to 5.7 shows that the soil stabilization caused percentage reductions in swelling of up to 96%, in the case of soil 3 with 4% and 6% chemical additive and tested, respectively, at the intermediate and modified Proctor compaction efforts. However, in some circumstances there was increased swelling related to

increased chemical additive contents. It is believed that in these cases the poor precision in the determination of the low swelling value during the execution of the CBR tests accounted most for this performance observed in the mixtures.

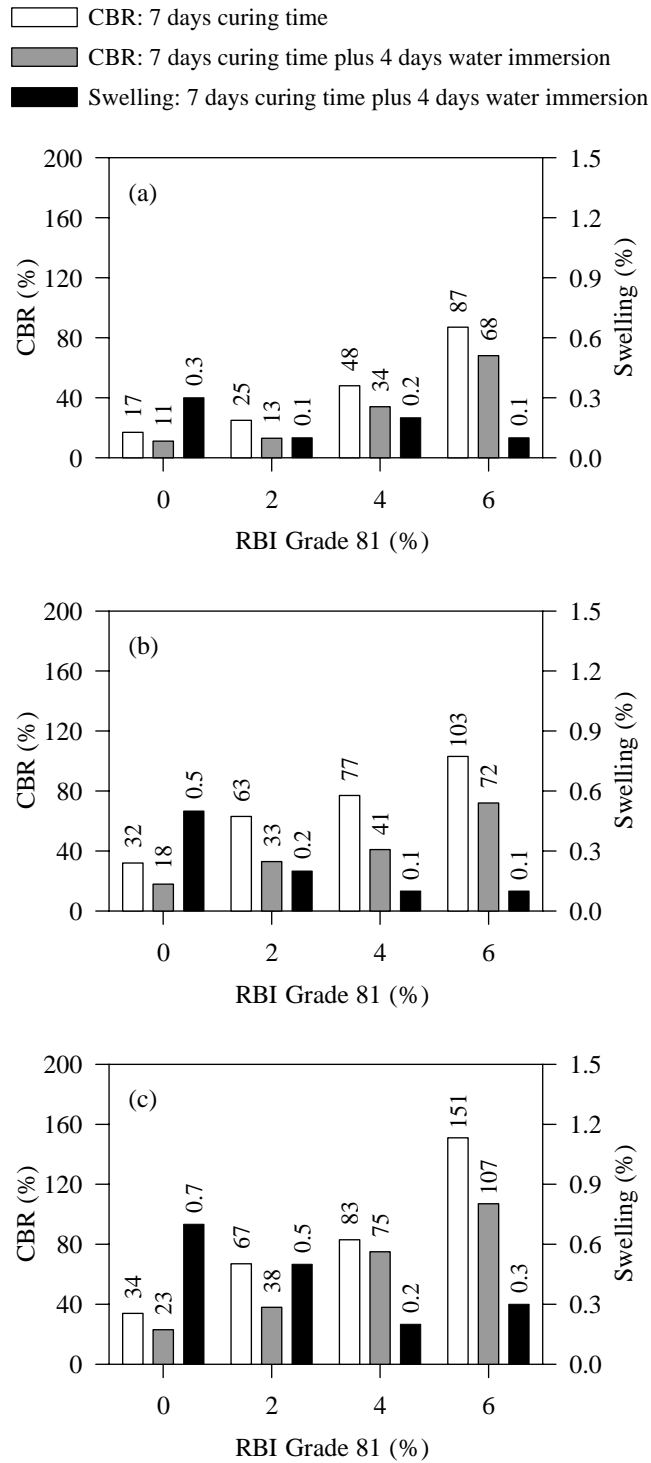


Figure 5.5. Mean values of CBR and swelling of soil 1 and its mixtures: (a) standard Proctor compaction effort; (b) intermediate Proctor compaction effort; and (c) modified Proctor compaction effort.

CBR: 7 days curing time  
 CBR: 7 days curing time plus 4 days water immersion  
 Swelling: 7 days curing time plus 4 days water immersion

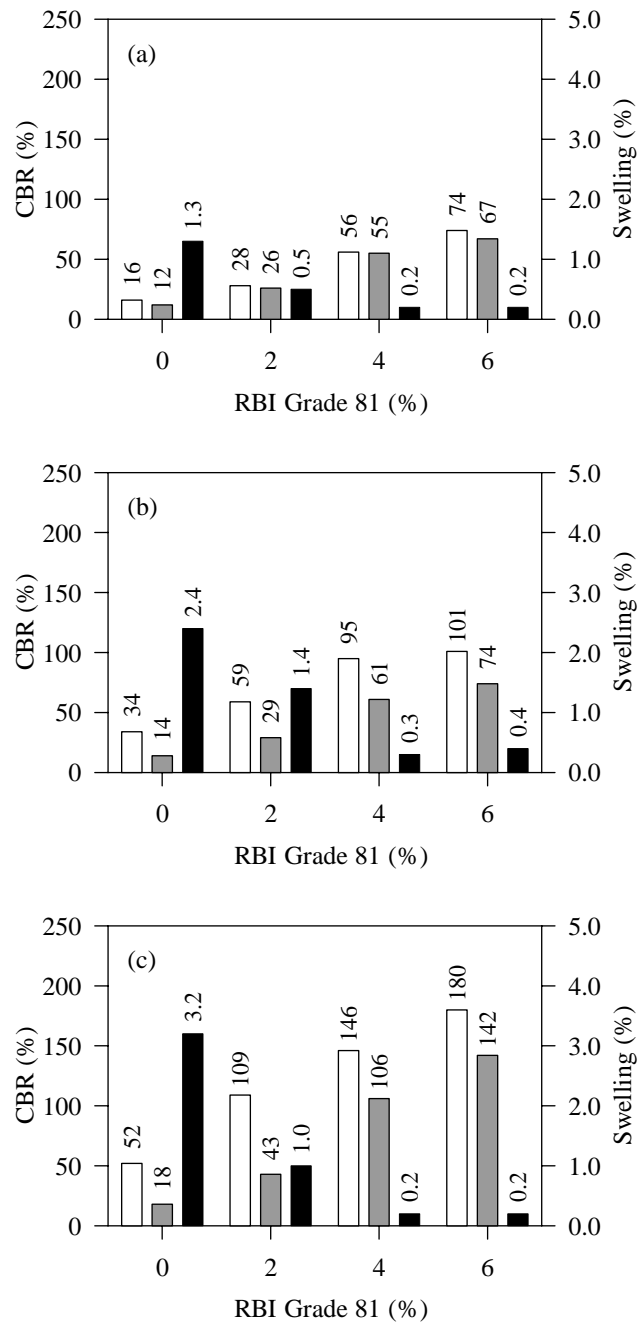


Figure 5.6. Mean values of CBR and swelling of soil 2 and its mixtures: (a) standard Proctor compaction effort; (b) intermediate Proctor compaction effort; and (c) modified Proctor compaction effort.

CBR: 7 days curing time  
 CBR: 7 days curing time plus 4 days water immersion  
 Swelling: 7 days curing time plus 4 days water immersion

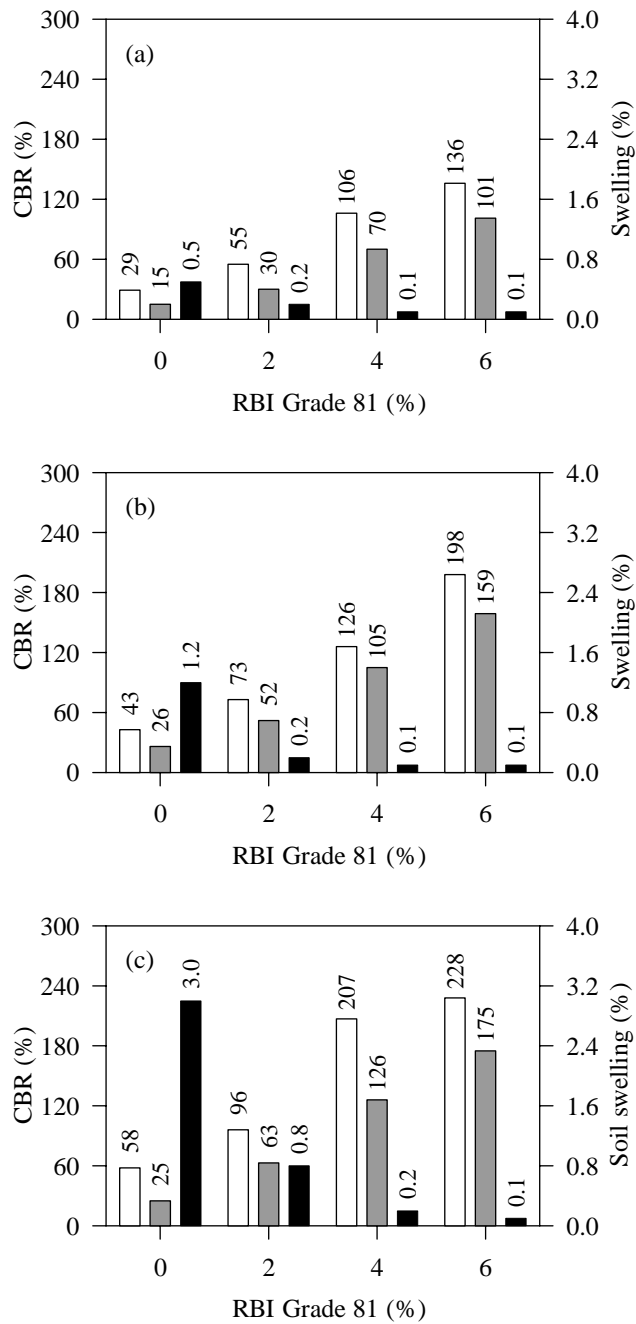


Figure 5.7. Mean values of CBR and swelling of soil 3 and its mixtures: (a) standard Proctor compaction effort; (b) intermediate Proctor compaction effort; and (c) modified Proctor compaction effort.

It is emphasized that the performance of the materials assessed in the present study was characteristic of cemented mixtures that commonly present low swelling and

high bearing capacity. As examples, there are reports in the literature of significant reductions in swelling and CBR gains after incorporating hydrated lime (FERAZ et al., 1991; AIBAN et al., 1998; REZENDE, 2003; PESSOA, 2004), Portland cement (AIBAN et al., 1998; TRINDADE et al., 2003; PESSOA, 2004) and RBI Grade 81 (MACHADO et al., 2001; FRANÇA et al., 2003) in the soils.

### **5.4.3. Unconfined compression and Brazilian tensile strength tests**

Unconfined compressive strength is one of the parameters most used in the dosing methods of soil-cement and soil-lime mixtures, as their quality reference (LIMA et al., 1993b). This characteristic has been used as a quantitative parameter to assess the efficacy of the cementing links produced in the intergranular contacts of the soil particles, in the case of soil-cement mixtures (LIMA et al., 1993a), and of the pozzolanic reactions that occur in the long-term that are responsible for the development of cement products in soil stabilized with lime (TRB, 1976). These considerations justify the use of the unconfined compression test to assess the mechanical properties of the mixtures researched in the present study.

Lima et al. (1993b) reported that the layers in a highway pavement constituted of cemented mixtures that present high mechanical strength and deformability modules values generally show a plate performance that can lead to substantial reduction in the level of the stress applied by traffic transmitted to the lower levels. However, the high relationship among the deformation modules in the stabilized layer and in the lower layers can result in the generation of considerable flexural stress in the stabilized material (THOMPSON, 1966). Thus in the present study great importance was given to determining the tensile strength in the RBI Grade 81 mixtures using the Brazilian tensile strength test.

Therefore, in the present study, the effects of stabilizer content and compaction effort on the mechanical strength of soil-RBI Grade 81 mixtures were also assessed using data from unconfined compression and Brazilian tensile strength tests that were carried out on mixture specimens submitted to curing in an acclimatized room for seven days, considering the compaction efforts of the standard, intermediate and modified Proctor tests. Furthermore, following the Brazilian Standards the adverse conditions that can occur in mixtures in use in the field were simulated by tests carried out on

specimens cured and submitted to immersion in water for four hours, before being taken to failure.

Figures 5.8 to 5.10 present the results of the unconfined compression and Brazilian tensile strength tests on specimens of the soils and the mixtures. Analysis of these results shows that increases in the chemical additive content and the compaction effort accounted for significant increases in the unconfined compressive strength and tensile strength values, and the greatest percentage gains observed were associated to the mixture with 6% chemical additive tested at the standard Proctor compaction effort. The greatest gains in unconfined compressive and tensile strengths in soils 1, 2 and 3 were 376%, 258% and 946%, and 502%, 329% and 1296%, respectively.

Similarly to the data obtained in the CBR tests and presented in item 5.4.2, the results in Figures 5.8 to 5.10 show that the highest values for unconfined compressive and tensile strengths were associated to mixtures of soil 3 with 6% chemical additive, tested at the modified Proctor compaction effort, and refer, respectively, to the following values: (i) 2309 and 363 kN/m<sup>2</sup>, in the case of tests without the water immersion stage; and (ii) 1399 and 182 kN/m<sup>2</sup>, in the case of tests with the four hours water immersion stage.

Indeed, it is difficult to define a minimal mechanical strength so that a cemented mixture shows plate effect, for purposes of the structural project of a highway pavement with a cemented layer. However, Thompson (1968) reported that research developed with plate tests on modified soils or soils improved with Portland cement, that is, soils stabilized with lower cement contents than those determined by the dosage criteria of these mixtures, indicated that the plate effect may be related to the materials with 240 kN/m<sup>2</sup> flexural tensile strength. Thus when a ratio of approximately two was adopted between flexural tensile strength and the Brazilian tensile strength, as referred to in the literature (TRB, 1976), there are materials with tensile strength determined in Brazilian tests at more than 120 kN/m<sup>2</sup> that may present plate effect. Based on these data, most of the mixtures in the present study for the 4% and 6% stabilizer contents may present typical plate performance.

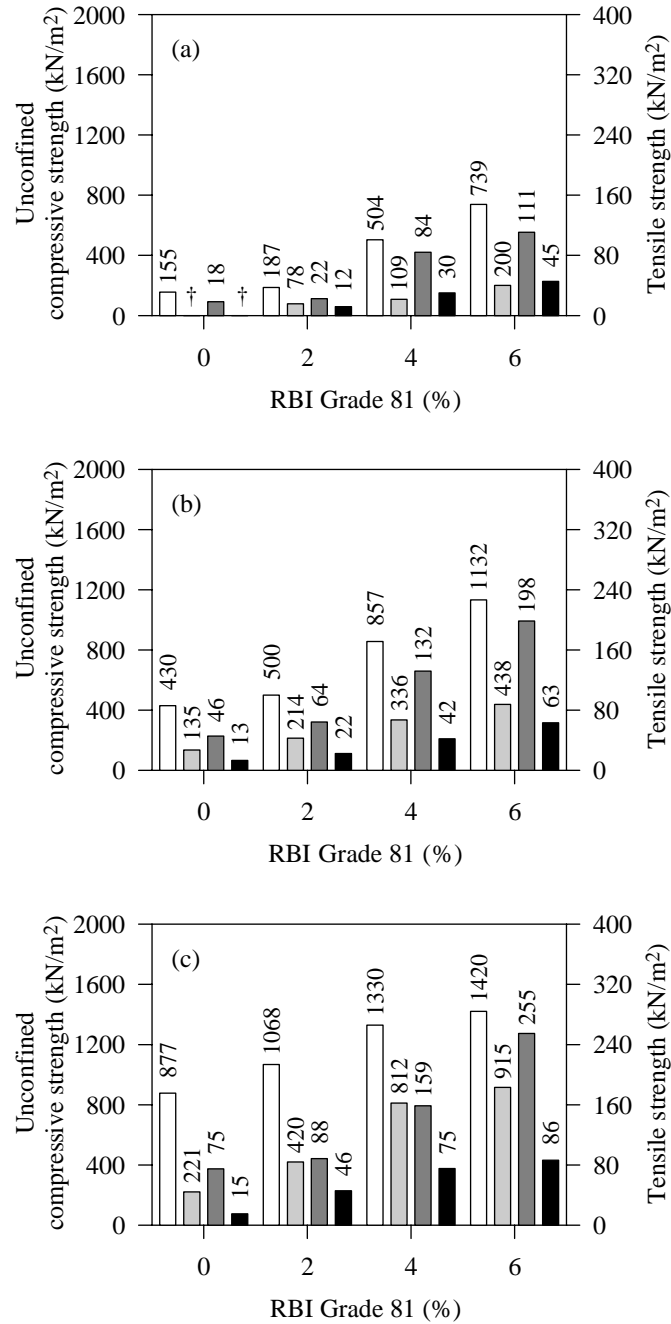
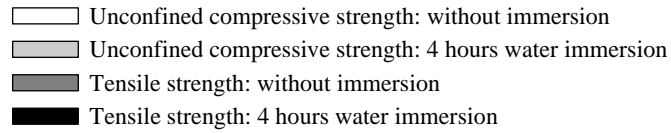


Figure 5.8. Mean values of unconfined compressive and Brazilian tensile strengths of soil 1 and its mixtures specimens: (a) standard Proctor compaction effort; (b) intermediate Proctor compaction effort; and (c) modified Proctor compaction effort. †Specimens suffered such severe mass losses after 4 hours immersion in water that prevented them to be tested.

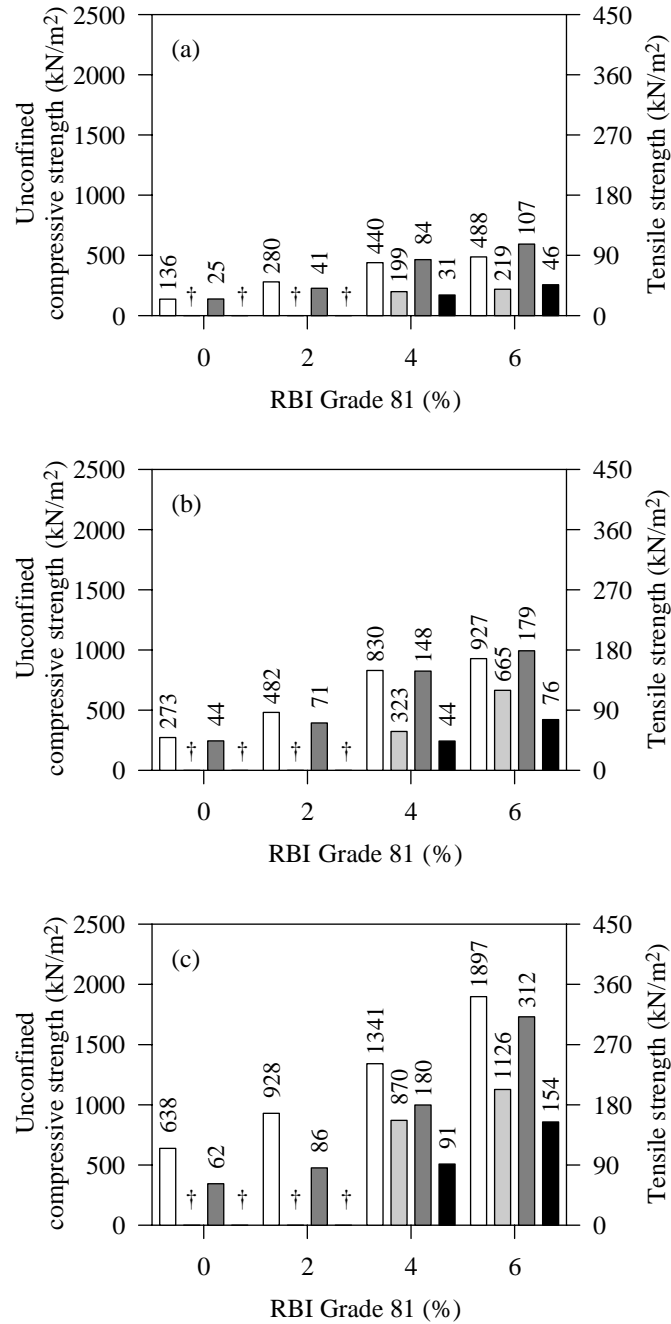
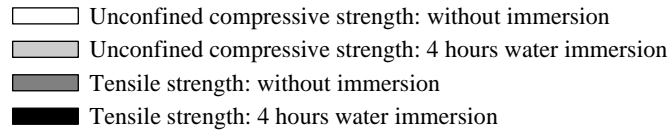


Figure 5.9. Mean values of unconfined compressive and Brazilian tensile strengths of soil 2 and its mixtures specimens: (a) standard Proctor compaction effort; (b) intermediate Proctor compaction effort; and (c) modified Proctor compaction effort. †Specimens suffered such severe mass losses after 4 hours immersion in water that prevented them to be tested.

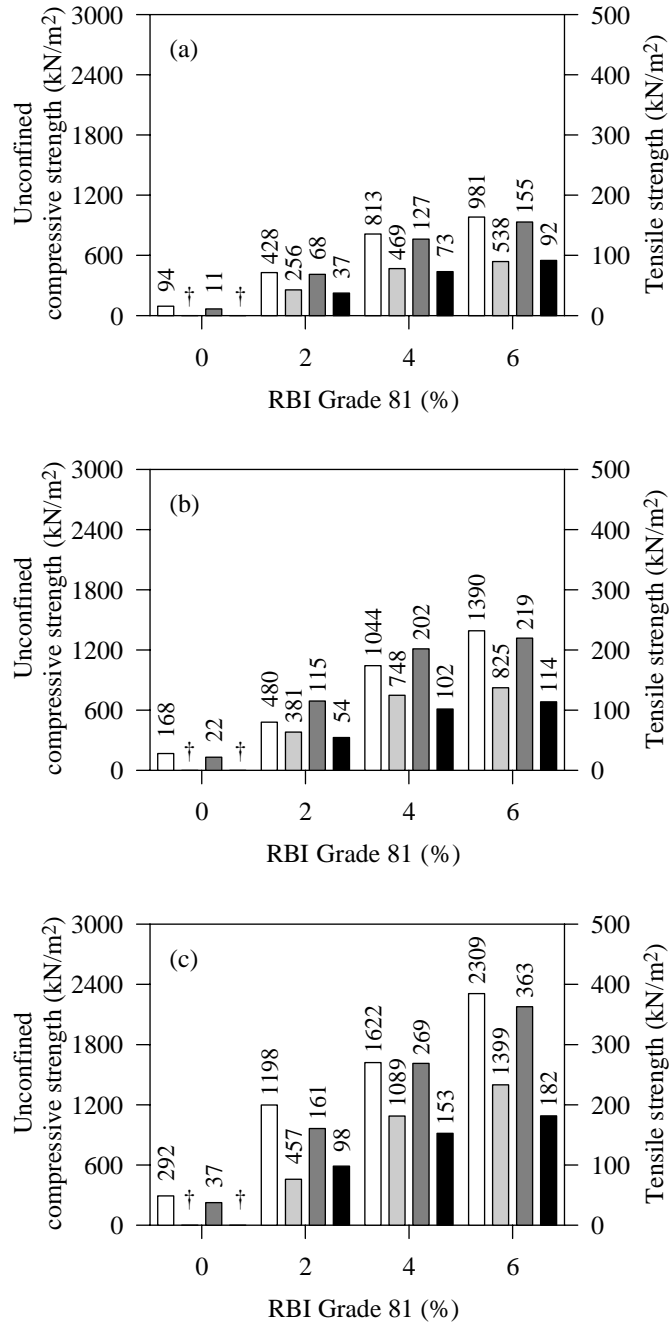
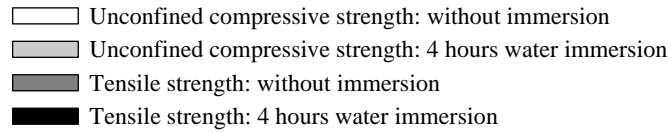


Figure 5.10. Mean values of unconfined compressive and Brazilian tensile strengths of soil 3 and its mixtures specimens: (a) standard Proctor compaction effort; (b) intermediate Proctor compaction effort; and (c) modified Proctor compaction effort. †Specimens suffered such severe mass losses after 4 hours immersion in water that prevented them to be tested.

The results of the laboratory experiments in Figures 5.8 to 5.10 also show the effect of the water immersion of specimens in the mechanical strength parameters analyzed. In these experiments, the immersion of the specimens in water for a four-hour period accounted for decreases in unconfined compressive and tensile strengths in the mixtures, but some specimens did not resist the immersion process and became undone or suffered severe mass losses that prevented them from being tested. In accordance with the data presented, generally only the specimens of untreated soil and the soil 2 mixture stabilized with 2% additive did not resist the water immersion process, which reinforces the efficiency of the additive in producing mixtures with greater mechanical stability. However, it should be emphasized that even mixtures which resisted to water immersion presented considerable drops in mechanical strength, and data presented in Figure 5.11 verify that mean losses of the mechanical strength were approximately: (i) 58%, 46% and 39%, respectively, for specimens of soils 1, 2 e 3 taken to failure in the unconfined compression tests; and (ii) 60%, 58% e 46%, respectively, for specimens of soils 1, 2 and 3 submitted to failure in the Brazilian tensile strength test. There were extreme cases where water immersion was responsible for mechanical strength losses of up to 78%, as, for example, in the unconfined compressive strength of soil 1 stabilized with 4% additive and tested at the standard Proctor compaction effort.

The literature reports studies such as those by Mendonça et al. (2001) and Cristelo and Jalali (2004) where adverse conditions that can occur with soil lime mixtures in use in the field were simulated by submitting specimens to water immersion before carried out on unconfined compression tests. Mendonça et al. (2001) reported that the stress-strain curves of the mixtures of two residual gneiss soils after cure times of 7 to 180 days, without and after four hours water immersion, presented some geometric similarities, but differed significantly in the magnitude of the mechanical strengths determined, and there were drops of 20% to 40% among the strengths determined without and after specimens water immersion, respectively. Working with two residual granite soils and with cure times of 1 to 10 weeks, Cristelo and Jalali (2004) reported that only the soil lime mixtures cured for more than 6 weeks resisted to water immersion for a 48 hour period, and 35% to 75% drops in unconfined compressive strength were observed after specimen water immersion.

The results presented in Figure 5.12 show that the highest mean value of the ratios among tensile strength and unconfined compressive strength was associated to the

soil 3 mixtures. It could be also associated to the soils 1, 2 and 3 mixtures, respectively, the following mean values: (i) 0.14, 0.16 and 0.17 for the tests without water immersion phase; and (ii) 0.15, 0.14 and 0.15 for the tests with four hours water immersion phase. It's inferred, also, from data presented in Figure 5.12, that water immersion was responsible for decrease of the ratios between tensile strength and unconfined compressive strength of the analyzed mixtures; exception was the soil 1 mixtures, where it was noticed a slight increase in mean values of the ratios between tensile strength and unconfined compressive strength.

Figure 5.13 presents the results of the regression analyses carried out to determine models that would relate the tensile strength and unconfined compressive strength in the mixtures studied. The best equation was chosen taking into consideration the following criteria: (i) significance of the variables of the model; (ii) greatest determination coefficient ( $R^2$ ) obtained in the analysis; (iii) coherence in the signs associated to the coefficients of the equations; and (iv) graphic analysis of the residues or errors classified in frequency intervals and calculated by Equation 5.1, as follow:

$$\text{Residuals} = y - \hat{y} \dots\dots\dots (5.1)$$

where: ( $y$ ) is the tensile strength determined in the laboratory tests and expressed in  $\text{kN/m}^2$ , and ( $\hat{y}$ ) is the tensile strength estimated from equations from Figure 5.13 and expressed in  $\text{kN/m}^2$ .

Analysis of the results showed that the linear model was the best fit to the data determined experimentally. From this model, that was used to estimate the tensile strength in function of unconfined compressive strength, the coefficients of determination of 0.8711 and 0.8736, respectively, were estimated for the tests with and without water immersion of the specimens for four hours. The equations presented in Figure 5.13 show similar normally distributed residues which are concentrated around the mean values. In both cases, it was also verified that the residual mean values were equal to zero, i.e., there were determined two equations non-tending to underestimate or overestimate the tensile strength determined experimentally.

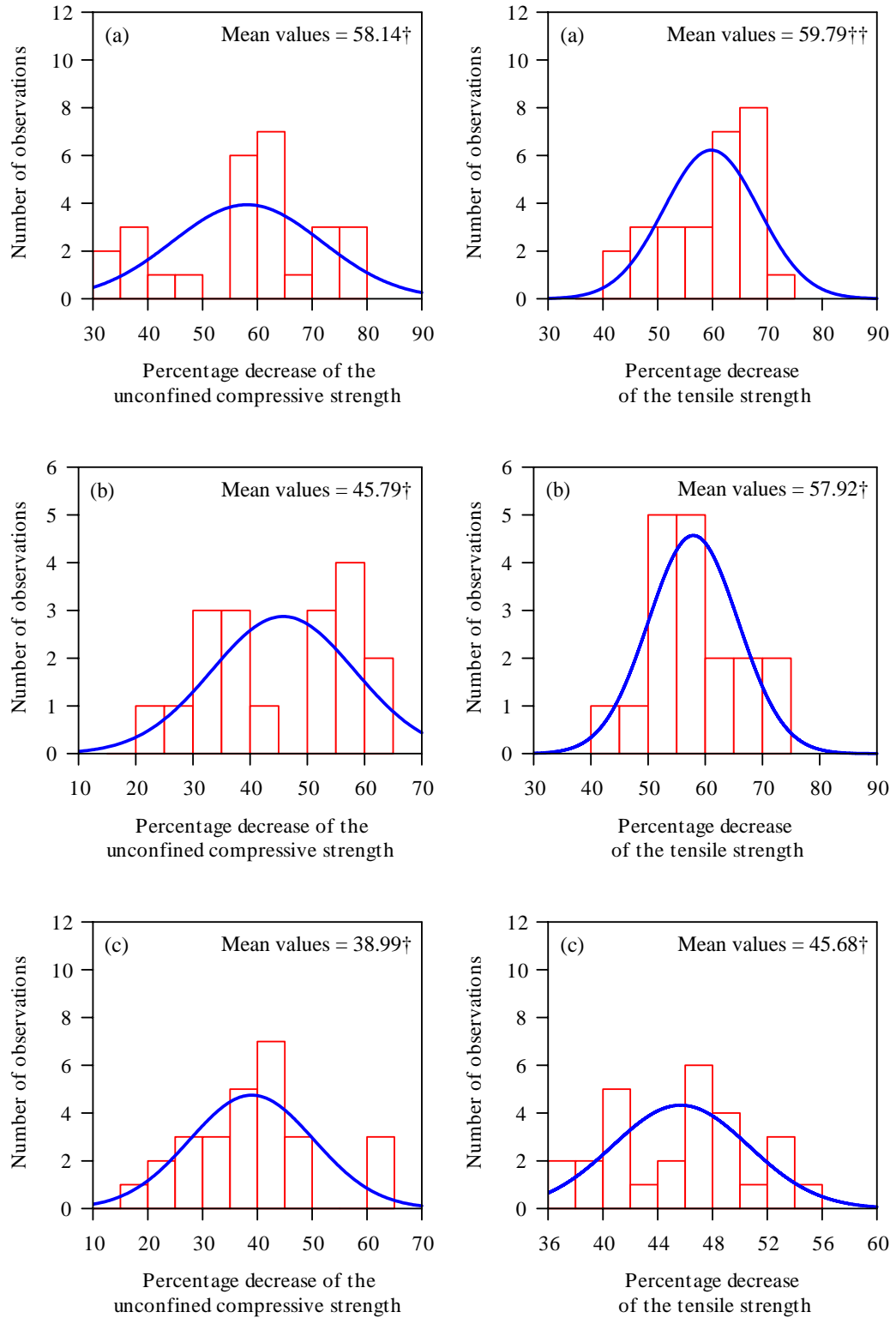


Figure 5.11. Mean values of percentage strength decreases of tested soils mixtures specimens: (a) soil 1; (b) soil 2; and (c) soil 3. †Normal distribution at 5% level using Shapiro-Wilk's normality test. ††Non-normal distribution at 5% level using Shapiro-Wilk's normality test.

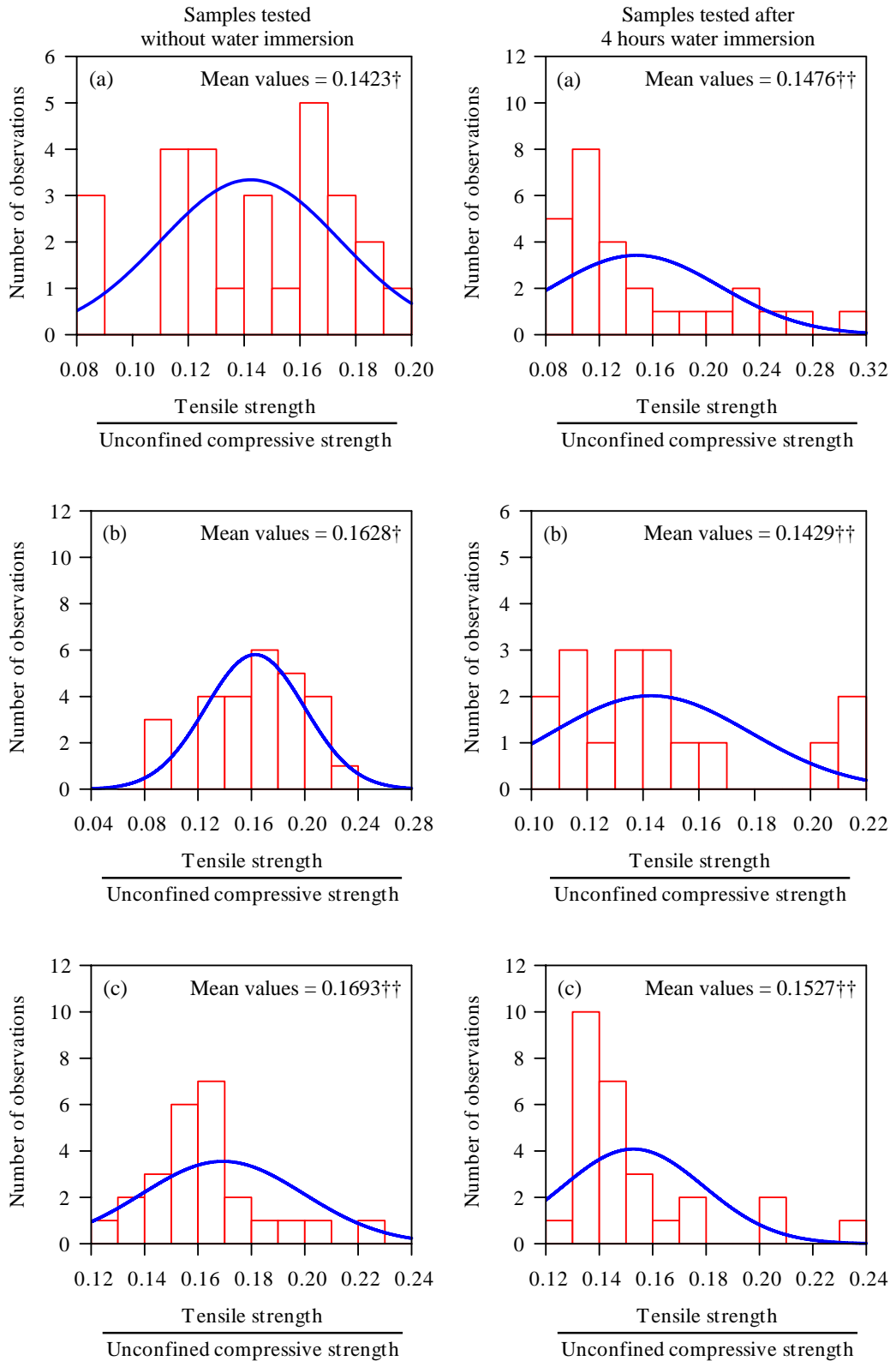


Figure 5.12. Mean values of ratio between Brazilian tensile strength and unconfined compressive strength of tested soils mixtures specimens: (a) soil 1; (b) soil 2; and (c) soil 3. †Normal distribution at 5% level using Shapiro-Wilk's normality test. ††Non-normal distribution at 5% level using Shapiro-Wilk's normality test.

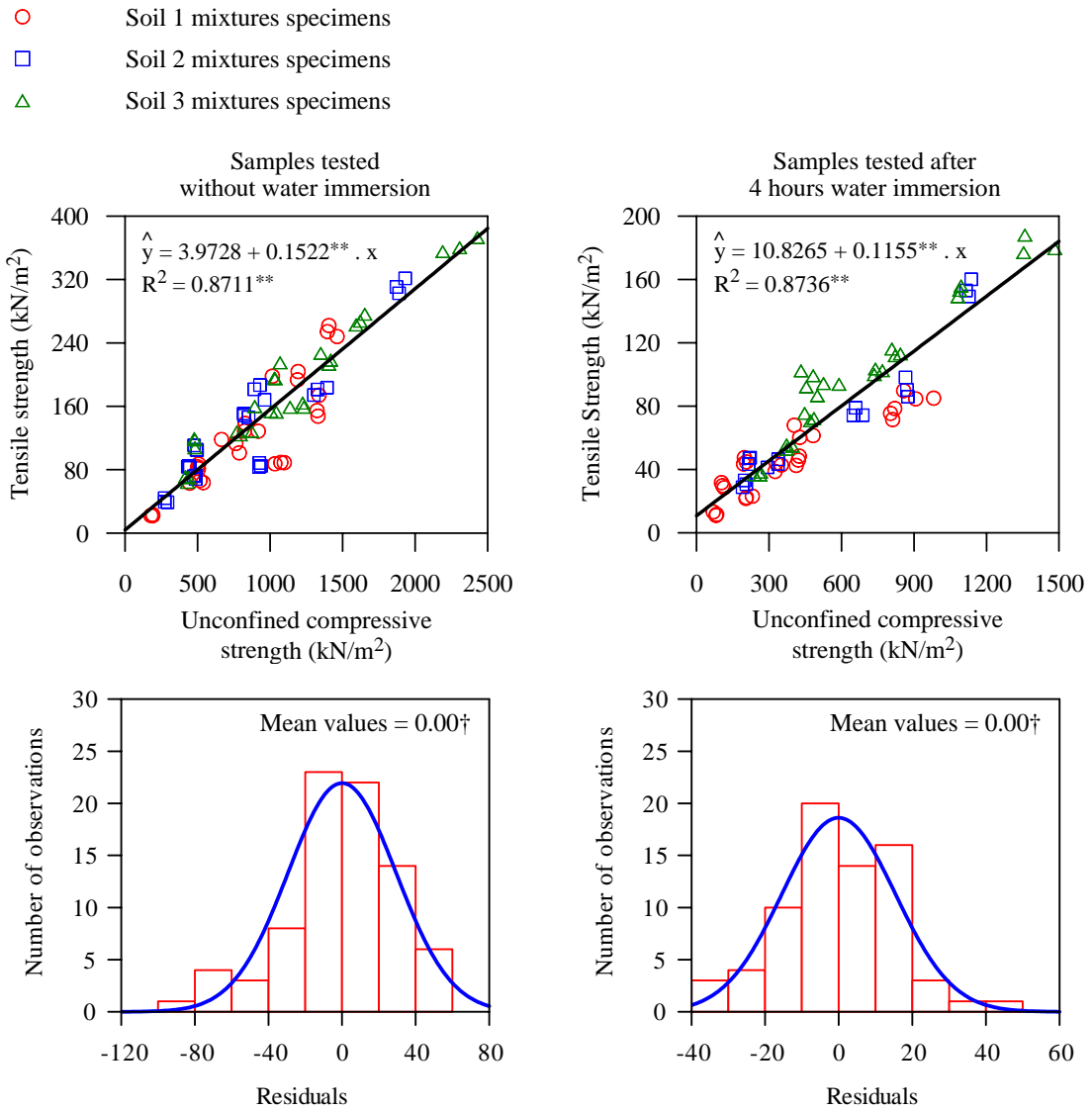


Figure 5.13. Brazilian tensile and unconfined compressive strengths adjusted equations, and residual analysis applied to tested soils mixtures specimens: (a) specimens tested without immersion in water; (b) specimens tested after immersion during 4 hours in water. †Normal distribution at 5% level using Shapiro-Wilk's normality test. \*\*Significant at 1% level using Student t test.

The mean values of the relationships between the tensile strength and unconfined compressive strength, given by the inclination of straight lines illustrated in Figure 5.13, were clearly altered by water immersion of the specimens, and the mean values of these ratios were around 0.15, for the mixtures not submitted to water immersion, and around 0.12, in the case of the mixtures submitted to four hours water immersion. However, it was detected that in both cases increases in unconfined compressive strength contributed significantly to the gains in tensile strength, because

the coefficients of the equations presented in Figure 5.13 were significant at the level of 1% probability by the Student t test.

It is pointed out that the mean values of the ratio between the tensile strength and unconfined compressive strength detected for the mixtures studied, after a seven-day cure period, were superior to those commonly used to estimate cemented mixture tensile strength that are usually around 0.10 (LIMA et al., 1993b). The results obtained in the present study suggested the occurrence of short and medium-term reactions, responsible for the generation of inter-particles cementation links that, associated to the action of the microfibers present in the stabilizer mass, accounted for the high tensile strength values in the tested mixtures.

## 5.5. Conclusions

- The chemical stabilizer under study presented good performance when added to the soils analyzed, producing gains in their mechanical strengths (CBR, unconfined compressive strength and tensile strength) and decreases in their mean swellings in the CBR test.
- The compaction parameters of the soils under study were significantly modified with the addition of the stabilizer, and reductions were observed in the maximum dry unit weights and increases in the optimum moisture contents.
- Increasing compaction effort led to significant alterations in the mechanical properties of the soils and mixtures, causing increases in the CBR, swelling, unconfined compressive strength and tensile strength values.
- Water immersion caused significant reductions in the mechanical strength of the mixtures, reaching average drops of 48% and 54%, respectively, in the Brazilian tensile strength and unconfined compression tests.
- The mean values of the relationships among the tensile strength and unconfined compressive strength were around 0.15 for the mixtures not submitted to water immersion and around 0.12 in the case of the mixtures that were submitted to four hours water immersion. These values are greater

than those commonly found in mixtures stabilized with lime and Portland cement, which are about 0.10.

- In the majority of the statistical analysis, the normality test (Shapiro-Wilk's test) and the significance test (Student t test) resulted significant at 5% probability level.

## References

- ADVANCED FOREST TECHNOLOGY S.A. **RBI Grade 81: the best stabilizer for your soil**. Commercial catalog, Viçosa, MG: Tecflora S.A., 2001. 4 p. (In Portuguese).
- AIBAN, S. A.; WAHHAB, H. I. A.; AL-AMOUDI, O. S. B.; AHMED, H. R. Performance of a stabilized marl base: a case study. **Construction and Building Materials**, v.12, n.6-7, p. 329-340, 1998.
- ALCÂNTARA, M. A. M. **Chemical stabilization of soils for road applications: available techniques and case study directed to lime-stabilization of three soils from Ilha Solteira-SP**. 1995. 91 f. M.Sc. Thesis (Civil Engineering Graduate Program), Federal University of Viçosa, Viçosa, Minas Gerais State, Brazil, 1995. (In Portuguese).
- ANYWAY SOLID ENVIRONMENTAL SOLUTIONS LTD. KEREM MAHARAL. **Contrast and comparison between stabilization of soils with cement (Ordinary Portland Cement) and RBI Grade 81**. Israeli Office, 50 Bezalel Street, Ramat-Gan, 52521 Israel, 2001. 9 p.
- ANYWAY SOLID ENVIRONMENTAL SOLUTIONS LTD. KEREM MAHARAL. **Frequently asked questions**. Israeli Office, 50 Bezalel 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 Bezalel Street, Ramat-Gan, 52521 Israel, 2003. 8 p. Available at home page <http://www.anywaysolutions.com/>. Access in March 22, 2005.
- ANYWAY SOLID ENVIRONMENTAL SOLUTIONS LTD. KEREM MAHARAL. **Materials safety data sheet**. Israeli Office, 50 Bezalel Street, Ramat-Gan, 52521 Israel, 2004. 2 p. Available at home page <http://www.anywaysolutions.com/>. Access in March 22, 2005.
- BRAZILIAN NATIONAL HIGHWAY OFFICIALS. **Technical standard DNER-ME 181: Soils stabilized with fly-ash and hydrated lime - determination of tensile strength via the Brazilian tensile strength test**. Rio de Janeiro, RJ: DNER, 1994a. 7 p. (In Portuguese).

- BRAZILIAN NATIONAL HIGHWAY OFFICIALS. **Technical standard DNER-ME 201**: Soil-cement - unconfined compression of cylindrical specimens. Rio de Janeiro, RJ: DNER, 1994b. 4 p. (In Portuguese).
- BRAZILIAN NATIONAL HIGHWAY OFFICIALS. **Technical standard DNER-ME 202**: Soil-cement - molding and cure of cylindrical specimens. Rio de Janeiro, RJ: DNER, 1994c. 7 p. (In Portuguese).
- BRAZILIAN NATIONAL HIGHWAY OFFICIALS. **Pavement design manual**. 2nd ed., Publication no. 697, Rio de Janeiro, RJ: Highway Research Institute (IPR), Technological Development Directory, DNER, 1996. 320 p. (In Portuguese).
- BRAZILIAN NATIONAL TRANSPORTATION FEDERATION. **Highway Research CNT 2005: Management Report**. Brasília, DF: CNT, 2005. 130 p. Available at home page <http://www.cnt.org.br/cnt/pesquisas/2005/index.htm>. Access in September 23, 2005. (In Portuguese).
- BRAZILIAN PLANNING TRANSPORTATION AGENCY. **Statistic year guide 1996-2000**. Brasília, DF: GEIPOT, 2001. Available at home page <http://www.geipot.gov.br/NovaWeb/IndexAnuario.htm>. Access in July 18, 2005. (In Portuguese).
- BRAZILIAN TECHNICAL STANDARDS SOCIETY. **Technical standard NBR 6457**: Soil - soil samples: preparation for compaction and characterization tests. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 1986a. 7 p. (In Portuguese).
- BRAZILIAN TECHNICAL STANDARDS SOCIETY. **Technical standard NBR 7182**: Soil - compaction test testing method. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 1986b. 10 p. (In Portuguese).
- BRAZILIAN TECHNICAL STANDARDS SOCIETY. **Technical standard NBR 9895**: Soil - California bearing ratio testing method. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 1987. 14 p. (In Portuguese).
- BRAZILIAN TECHNICAL STANDARDS SOCIETY. **Technical standard NBR 6502**: Soils and rocks. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 1995. 18 p. (In Portuguese).
- CANESCHI, F. P.; TRINDADE, T. P.; LIMA, D. C.; CARVALHO, C. A. B.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, A. G. S. Effects of chemical stabilization in the mechanical strength parameters of a characteristic young residual soil from subgrade of roads from the region of Viçosa, Minas Gerais State. In: PAVEMENT ANNUAL MEETING (RAPv), 35., 2004, Rio de Janeiro, RJ. **Proceedings...**, Rio de Janeiro, RJ: Brazilian Pavement Society (ABPv), 2004. 9 p. 1 CD-ROM. (In Portuguese).
- CARVALHO, A.; CHAUVEL, A.; GUIMARÃES, J. E. P.; MELFI, A. J.; NÓBREGA, M. T. Mineralogical, morphological and geotechnical characterizations of some lateritic soils developed on basalts at the Paraná River basin. In: TROPICAL SOILS IN ENGINEERING BRAZILIAN SIMPOSIUM, 1981, Rio de Janeiro, RJ. **Proceedings...**, Rio de Janeiro, RJ: COOPE/UFRJ-CNPq-ABMS, 1981. p. 340-381. (In Portuguese).
- CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; CARRARO, J. A. H.; HEINECK, K. S. Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime mixtures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, v.127, n.9, p. 774-782, 2001.

- CRISTELO, N.; JALALI, S. Chemical stabilization of granite residual soils. **Geotecnia**, n.101, p. 25-40, 2004. (In Portuguese).
- FERRAZ, R. L.; BUENO, B. S.; LIMA, D. C.; BARBOSA, P. S. A. Comparative study of chemical stabilization methods applied to Viçosa soils for road engineering applications. In: PAVEMENT ANNUAL MEETING (RAPv), 25., 1991, São Paulo, SP. **Proceedings...**, Rio de Janeiro, RJ: Brazilian Pavement Society (ABPv), 1991. p. 469-486. 1 v. (In Portuguese).
- FERRAZ, R. L. **Contribution to soil stabilization for road engineering and housing construction applications**. 1994. 174 f. M.Sc. Thesis (Civil Engineering Graduate Program), Federal University of Viçosa, Viçosa, MG, Brazil, 1994. (In Portuguese).
- FRANÇA, F. C. **Soil chemical stabilization for road applications: case study directed to the product RBI Grade 81**. 2003. 104 f. M.Sc. Thesis (Civil Engineering Graduate Program), Federal University of Viçosa, Viçosa, Minas Gerais State, Brazil, 2003. (In Portuguese).
- FRANÇA, F. C.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; SILVA, C. H. C.; VIEIRA, G. S.; COUTO, I. A. Soil-chemical additive for highway applications. In: ANNUAL PAVEMENT MEETING (RAPv), 34., 2003, Campinas, SP. **Proceedings...**, Rio de Janeiro, RJ: Pavement Brazilian Society (ABPv), 2003. p. 296-306. 1 CD-ROM. (In Portuguese).
- GUIMARÃES, J. E. P. **Soil stabilization: new and important application of lime, its concepts and advantages**. Bulletin no. 5, São Paulo, SP: Lime Manufactures Brazilian Society (ABPC), 1971. 68 p. (In Portuguese).
- KOLIAS, S.; KASSELOURI-RIGOPOULOU, V.; KARAHALIOS, A. Stabilization of clayey soils with high calcium fly ash and cement. **Cement & Concrete Composites**, v.27, n.2, p. 301-313, 2005.
- LIMA, D. C. **Considerations about soil stabilization, particularly about lime stabilization**. 1981. 171 f. M.Sc. Thesis (Geotechnical Engineering Graduate Program), São Carlos School of Engineering-USP, São Carlos, São Paulo State, Brazil, 1981. (In Portuguese).
- LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; SILVA, C. H. C. **Soil stabilization II: techniques and applications to soils from Viçosa region**. Didactic publication no. 333, Viçosa, MG: Federal University of Viçosa, 1993a. 32 p. (In Portuguese).
- LIMA, D. C.; RÖHM, S. A.; BARBOSA, P. S. A. **Soil stabilization III: soil-lime mixtures for road applications**. Didactic publication no. 334, Viçosa, MG: Federal University of Viçosa, 1993b. 46 p. (In Portuguese).
- LIMA, D. C.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B.; SILVA, C. H. C.; PEREIRA, R. S.; TRINDADE, T. P.; BARBOSA, P. S. A. The UFV's experience in the use of chemical stabilizers in forest road applications. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON HARVESTING AND WOOD TRANSPORTATION, 6., 2003, Belo Horizonte, MG. **Proceedings...**, Viçosa, MG: Brazilian Society of Forest Research (SIF), 2003. p. 69-117. (In Portuguese).
- MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B.; FERNANDES, D. C. M. Study of the geotechnical behavior of a typical schist sample from the Sabará-MG region in the

- natural state and after stabilization with RBI Grade 81. **Wood Magazine**, year 11, n.61, p. 115-115, 2001. (In Portuguese).
- MENDONÇA, A. A.; LIMA, D. C.; BUENO, B. S.; FONTES, M. P. F.; COUTO, L. G. Soil-lime mixtures: effects of lime type, curing time and specimen water immersion in the strength. **Geotecnia**, n.91, p. 57-67, 2001. (In Portuguese).
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Low cost pavement with lateritic soils**. São Paulo, Brazil: Villibor, 1995. 213 p. (In Portuguese).
- OSULA, D. O. A. A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. **Engineering Geology**, v.42, n.1, p. 71-81, 1996.
- PESSOA, F. H. C. **Analysis of Urucu soils for road engineering applications**. 2004. 151 f. M.Sc. Thesis (Geotechnical Engineering Graduate Program), University of Brasília (ENC/FT/UnB), Brasília, DF, Brazil, 2004. (In Portuguese).
- REZENDE, L. R. **Study of the behavior of alternative materials used in flexible pavement structures**. 2003. 372 p. Ph.D. Thesis (Geotechnical Engineering Graduate Program), University of Brasília (ENC/FT/UnB), Brasília, DF, Brazil, 2003. (In Portuguese).
- SANT'ANA, A. P. **Technological characterization of granulated blast furnace slag soil mixtures for road engineering applications**. 2003. 75 f. M.Sc. Thesis (Civil Engineering Graduate Program), Federal University of Viçosa, Viçosa, MG, Brazil, 2003. (In Portuguese).
- THOMPSON, M. R. Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures. **Highway Research Record**, n.139, Washington, DC: Highway Research Board, National Research Council, p. 1-14, 1966.
- THOMPSON, M. R. Lime-treated soils for pavement construction. **ASCE Journal of Highway Division**, HW 2, p. 191-217, 1968.
- THOMPSON, M. R. **Mixture design for lime-treated soils**. Urbana-Champaign, IL: University of Illinois, Civil Engineering Studies, Highways Engineering Series no. 26, 1969. 24 p.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **State of the art - lime stabilization: reactions, properties, design, construction**. Report no. 180, Washington, DC: TRB, 1976. 31 p.
- TRINDADE, T. P.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; SILVA, C. H. C.; BARBOSA, P. S. A. **Resilient modulus of soils and soil-cement mixtures**. In: DURHAM, G. N.; MARR, W. A.; DEGROFF, W. L., eds. Resilient Modulus Testing for Pavement Components, ASTM STP 1437. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2003. p. 99-113.
- TRINDADE, T. P.; LIMA, D. C.; MACHADO, C. C.; CARVALHO, C. A. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, M. P. F.; CANESCHI, F. P. Chemical stabilization of road subgrade: influence of elapsed time between mixture and compaction on mechanical strength of soil-RBI Grade 81 mixtures. **Brazilian Journal of Forest Science**, v.29, n.3, p. 413-418, 2005. (In Portuguese).