

REGINALDO SÉRGIO PEREIRA

**VIABILIDADE TÉCNICA DO EMPREGO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE  
CELULOSE PARA CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS FLORESTAIS**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2005

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

T

P436v  
2005

Pereira, Reginaldo Sérgio, 1973-  
Viabilidade técnica do emprego de resíduos da  
indústria de celulose para construção de estradas  
florestais / Reginaldo Sérgio Pereira. - Viçosa: UFV,  
2005.

xxv, 329f. : il. ; 29cm

Inclui anexo.

Orientador: Carlos Cardoso Machado  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa

Inclui bibliografia.

1. Estradas florestais - Projetos e construção.  
2. Resíduos industriais - Reaproveitamento. 3. Indústria de  
celulose. 4. Celulose. 5. Solos - Compactação. 6. Pavimen-  
tos flexíveis. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt CDD 22.ed. 634.93836

REGINALDO SÉRGIO PEREIRA

**VIABILIDADE TÉCNICA DO EMPREGO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE  
CELULOSE PARA CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS FLORESTAIS**

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

APROVADA: 30 de junho de 2005.

---

Prof. Dr. Dario Cardoso de Lima  
(Conselheiro)

---

Prof. Dr. Carlos Alexandre Braz de  
Carvalho  
(Conselheiro)

---

Pesquisadora Dr<sup>a</sup>. Dalila Campos de  
Medeiros Fernandes

---

Prof. Dr. Cláudio Henrique de  
Carvalho e Silva

---

Prof. Dr. Carlos Cardoso Machado  
(Orientador)

*A Deus...*

*À minha mãe Alice Garcia.*

*Ao meu filho Igor Henrique.*

*À minha esposa Cláudia Maria.*

*Á toda minha família.*

## **AGRADECIMENTO**

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de treinamento no Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado.

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

Às empresas Cenibra S.A. e Bahia Pulp S.A., pelo fornecimento de material e pela disponibilidade para execução e avaliação de trechos experimentais.

Ao Professor Carlos Cardoso Machado, pela oportunidade concedida, pela grandiosa orientação, pelos ensinamentos e acima de tudo, pela amizade.

Aos Professores Dario Cardoso de Lima e Carlos Alexandre Braz de Carvalho, pelos ensinamentos, críticas, convivência e amizade ao longo de todo o trabalho.

Aos bolsistas de iniciação científica e de apoio técnico, Karine, Danuse, Emanuel, José Maurício e Giovani, pelo indispensável auxílio nos ensaios de laboratório.

Aos colegas de curso, Giovani, Tiago e Fabrício, pelo incentivo e apoio.

Enfim, a todos que apesar de não mencionados aqui, colegas e familiares, que tiveram sua parcela de contribuição direta ou indireta, durante todas as etapas da pesquisa; a todos vocês meu muito obrigado.

## BIOGRAFIA

REGINALDO SÉRGIO PEREIRA, filho de Raimundo Emílio Gomes (*in memoriam*) e Alice Garcia da Silveira, nasceu em Viçosa, Minas Gerais, em 9 de setembro de 1973.

Em agosto de 1999, graduou-se em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG.

Em agosto de 2000, iniciou o Curso de Mestrado em Ciência Florestal na UFV, concentrando seus estudos na área de Estradas Florestais.

Em setembro de 2001, mudou-se direto para o nível de Doutorado,, submetendo-se à defesa de tese em junho de 2005.

## CONTEÚDO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>XVII</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XXI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XXIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
1.1. Considerações gerais .....	1
1.2. O problema .....	2
1.3. Justificativas .....	3
1.4. Objetivo geral .....	4
1.5. Hipótese .....	5
1.6. Escopo do trabalho .....	5
1.7. Referências bibliográficas.....	6
<b>2. PROPRIEDADES DOS SOLOS DE INTERESSE RODOVIÁRIO.....</b>	<b>7</b>
2.1. Introdução.....	7
2.2. Parâmetros de caracterização de solos.....	9
2.2.1. Distribuição do tamanho das partículas.....	9
2.2.2. Peso específico dos sólidos.....	11
2.2.3. Estados de consistência dos solos .....	12
2.2.4. Equivalente de areia (EA).....	15

2.2.5.	Compactação de solos .....	16
2.2.5.1.	Histórico .....	17
2.2.5.2.	A técnica .....	18
2.2.5.3.	Variáveis influentes no processo .....	20
2.2.5.4.	Compactação de solos in situ .....	25
2.3.	Resistência mecânica .....	32
2.3.1.	CBR .....	32
2.3.2.	Resistência a compressão não confinada (RCNC) .....	37
2.3.3.	Resistência a tração (Rt) .....	38
2.4.	Durabilidade .....	39
2.5.	Expansibilidade .....	40
2.6.	Permeabilidade .....	40
2.7.	Módulo de resiliência .....	43
2.8.	Referências bibliográficas .....	49
<b>3.</b>	<b>PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA COM USO DA TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS .....</b>	<b>54</b>
3.1.	Introdução .....	54
3.2.	Mecanismos da estabilização química de solos .....	58
3.3.	Gama de aditivos químicos .....	60
3.3.1.	Os comerciais tradicionais .....	60
3.3.1.1.	Estabilização solo-cimento .....	61
3.3.1.2.	Estabilização solo-cal .....	75
3.3.1.3.	Estabilização solo-cal-cimento .....	87
3.3.1.4.	Estabilização solo-betume .....	88
3.3.2.	Produtos comerciais não tradicionais patenteados .....	94
3.3.2.1.	Estabilização solo-con-aid .....	94
3.3.2.2.	Estabilização solo-ISS 2500 (Ionic Soil Stabilizer) .....	95
3.3.2.3.	Estabilização solo-perma-zyme .....	96
3.3.2.4.	Estabilização solo-consolid .....	96
3.3.2.5.	Estabilização solo-DS 328 .....	97
3.3.2.6.	Estabilização solo-dynacal .....	99
3.3.2.7.	Estabilização solo-enzymatic .....	100
3.3.2.8.	Estabilização solo-terra fix .....	102
3.3.2.9.	Estabilização solo-EMC <sup>2</sup> .....	102
3.3.2.10.	Estabilização Solo-RBI Grade 81 .....	103
3.3.3.	Produtos alternativos .....	106



3.3.3.1.	Estabilização solo-hidróxido de sódio (soda cáustica).....	106
3.3.3.2.	Estabilização solo-cloreto de cálcio e solo-cloreto de sódio .....	107
3.3.3.3.	Estabilização solo-resorcinol formaldeído .....	107
3.3.3.4.	Estabilização solo-acrilato de cálcio .....	108
3.3.3.5.	Estabilização solo-ácido fosfórico .....	109
3.4.	Potencialidades de utilização .....	109
3.5.	Experimentação em laboratório .....	110
3.6.	Etapas experimentais em campo .....	112
3.7.	Considerações finais .....	114
3.8.	Referências bibliográficas.....	114
<b>4.</b>	<b>USO DE RESÍDUOS NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA .....</b>	<b>123</b>
4.1.	Introdução.....	123
4.2.	Aspectos ambientais dos resíduos .....	124
4.2.1.	Definição e classificação.....	124
4.2.2.	Legislação pertinente .....	125
4.2.3.	Licenciamento ambiental .....	128
4.2.4.	Utilização na pavimentação rodoviária .....	129
4.2.4.1.	Impactos ambientais passíveis de ocorrência.....	129
4.2.4.2.	Medidas mitigadoras.....	136
4.2.4.3.	Indicadores ambientais.....	137
4.3.	Aspectos técnicos.....	138
4.3.1.	Contribuição da indústria siderúrgica.....	138
4.3.2.	Contribuição da indústria metalúrgica.....	140
4.3.3.	Contribuição da indústria automobilística .....	141
4.3.4.	Contribuição da indústria de álcool e açúcar .....	142
4.3.5.	Contribuição da indústria de telhas cerâmicas .....	144
4.3.6.	Contribuição das usinas termoelétricas .....	145
4.3.7.	Contribuição da indústria de base florestal.....	145
4.3.7.1.	Carvão vegetal.....	145
4.3.7.2.	Celulose e papel .....	147
4.3.8.	Outras contribuições .....	150
4.3.8.1.	Carcaça de pneu .....	150
4.3.8.2.	Fosfogesso (sulfato de cálcio).....	151
4.3.8.3.	Cal de carbureto .....	153
4.3.8.4.	Incineração de resíduos sólidos urbanos .....	153
4.3.8.5.	Resíduos incinerados da estação de tratamento de esgoto .....	153

4.3.8.6.	Rejeito da despoluição de lixos .....	154
4.3.8.7.	Lamas residuais.....	155
4.4.	Considerações finais .....	155
4.5.	Referências bibliográficas.....	156
<b>5.</b>	<b>MATERIAIS, MÉTODOS, APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E</b>	
	<b>DISCUSSÕES PERTINENTES .....</b>	<b>161</b>
5.1.	Informações sobre a organização do capítulo .....	161
5.2.	Uso de resíduos em pavimentos de estradas florestais: caracterização de solos e misturas solo-grits .....	164
5.2.1.	Introdução .....	165
5.2.2.	Materiais e métodos.....	166
5.2.2.1.	Solos .....	166
5.2.2.2.	Resíduo industrial .....	166
5.2.2.3.	Coleta, secagem e estocagem das amostras de solos e resíduo.....	167
5.2.2.4.	Teores de grits empregados.....	167
5.2.2.5.	Misturas solo-resíduo .....	167
5.2.2.6.	Ensaio e classificações de solos realizados.....	167
5.2.3.	Resultados e discussão .....	168
5.2.3.1.	Caracterização e classificação das amostras de solo.....	168
5.2.3.2.	Caracterização das misturas solo-grits .....	170
5.2.4.	Conclusões .....	176
5.2.5.	Agradecimentos .....	176
5.2.6.	Referências bibliográficas.....	176
5.3.	Aplicações de misturas solo-grits em estradas florestais: resistência mecânica via CBR.....	178
5.3.1.	Introdução .....	179
5.3.2.	Materiais e métodos.....	181
5.3.2.1.	Amostras de solo e de resíduo.....	181
5.3.2.2.	Teores de grits utilizados e período de cura das misturas.....	182
5.3.2.3.	Ensaio geotécnico e suas respectivas normatizações técnicas.....	183
5.3.3.	Resultados e discussão .....	183
5.3.3.1.	Parâmetros ótimos de compactação .....	183
5.3.3.2.	Avaliação do CBR e da expansão das misturas solo-grits.....	185
5.3.3.3.	Influência da umidade no CBR e expansão das misturas solo-grits.....	187
5.3.3.4.	Influência da energia de compactação na resistência e expansão das misturas solo-grits .....	187

5.3.4.	Conclusões .....	189
5.3.5.	Recomendação.....	191
5.3.6.	Agradecimentos .....	191
5.3.7.	Referências bibliográficas.....	191
5.4.	Compactação de misturas solo-grits para emprego em estradas florestais: influência do tempo decorrido entre mistura e compactação na resistência mecânica .....	193
5.4.1.	Introdução.....	194
5.4.2.	Materiais e métodos.....	196
5.4.2.1.	Materiais .....	196
5.4.2.2.	Quantitativos de grits .....	196
5.4.2.3.	Períodos de tempos decorridos entre mistura e compactação em laboratório (TMC).....	197
5.4.2.4.	Avaliação da resistência mecânica .....	197
5.4.3.	Resultados e discussão .....	198
5.4.3.1.	Influência do TMC na densidade das misturas solo-grits compactadas ....	198
5.4.3.2.	Influência do TMC na resistência mecânica das misturas: efeito dos TMC's extremos de mistura.....	199
5.4.3.3.	Influência do TMC na resistência mecânica das misturas: efeito dos TMC que refletem situações de compactação no campo .....	200
5.4.3.4.	Efeito do lote de resíduo na resistência mecânica das misturas .....	202
5.4.4.	Conclusões .....	203
5.4.5.	Agradecimentos .....	204
5.4.6.	Referências bibliográficas.....	204
5.5.	Capacidade de suporte de misturas solo-grits compactadas: efeito da granulometria do resíduo no processo de estabilização .....	205
5.5.1.	Introdução .....	206
5.5.2.	Materiais e métodos.....	207
5.5.2.1.	Solos e resíduo industrial .....	207
5.5.2.2.	Traços e processamentos do grits .....	207
5.5.2.3.	Ensaio realizados.....	209
5.5.3.	Resultados e discussão .....	209
5.5.3.1.	Granulometria do grits e das misturas solo-grits (fases 1 e 2).....	209
5.5.3.2.	Influência da fração grosseira do grits na capacidade de suporte e expansão das misturas solos-grits compactadas – fase 3 .....	211
5.5.3.3.	Reatividade da fração fina do grits na resistência e expansão das misturas solo-grits compactadas – fase 4 .....	215

5.5.4.	Conclusões .....	216
5.5.5.	Agradecimentos .....	217
5.5.6.	Referências bibliográficas.....	217
5.6.	Comportamento de misturas solo-grits compactadas: avaliação da resistência mecânica e da expansão em diferentes períodos de cura .....	218
5.6.1.	Introdução .....	219
5.6.2.	Materiais e métodos.....	220
5.6.2.1.	Identificação dos materiais .....	220
5.6.2.2.	Misturas empregadas .....	220
5.6.2.3.	Ensaio de resistência e cura das misturas .....	221
5.6.3.	Resultados e Discussão .....	222
5.6.3.1.	Capacidade de suporte e expansão.....	222
5.6.3.2.	Resistência a compressão não confinada e a tração.....	226
5.6.4.	Conclusões .....	230
5.6.5.	Agradecimentos .....	231
5.6.6.	Referências bibliográficas.....	231
5.7.	Influência da imersão em água na resistência mecânica de misturas solo-grits compactadas e curadas.....	233
5.7.1.	Introdução.....	234
5.7.2.	Materiais e métodos.....	235
5.7.2.1.	Caracterização dos materiais .....	235
5.7.2.2.	Ensaio de laboratório.....	236
5.7.3.	Resultados e discussão .....	238
5.7.3.1.	Parâmetros ótimos de compactação .....	238
5.7.3.2.	Influência da imersão na resistência mecânica das misturas .....	239
5.7.4.	Conclusões .....	247
5.7.5.	Agradecimentos .....	248
5.7.6.	Referências bibliográficas.....	248
5.8.	Influência do tratamento térmico do resíduo grits na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais.....	249
5.8.1.	Introdução .....	250
5.8.2.	Revisão de literatura .....	251
5.8.2.1.	Parâmetros geotécnicos de interesse rodoviário .....	251
5.8.2.2.	Estabilizantes químicos tradicionais.....	252
5.8.2.3.	Aplicação de resíduos industriais .....	253
5.8.3.	Materiais e métodos.....	254

5.8.3.1.	Materiais .....	254
5.8.3.2.	Métodos .....	254
5.8.4.	Resultados e discussão .....	255
5.8.4.1.	Caracterização e classificação do solo ETA .....	255
5.8.4.2.	Caracterização química do grits .....	256
5.8.4.3.	Avaliação do tratamento térmico nas características de compactação .....	257
5.8.4.4.	Avaliação do efeito do tratamento térmico na RCNC.....	258
5.8.4.5.	Comparação do efeito do tratamento térmico nas misturas solo-grits com aditivos químicos, tradicionais e subprodutos, na RCNC, para o solo ETA.....	259
5.8.5.	Conclusões .....	260
5.8.6.	Agradecimentos .....	261
5.8.7.	Referência bibliográficas.....	261
5.9.	Caracterização tecnológica de misturas solo-grits para pavimentos de estradas florestais: influência do tratamento térmico do grits na resistência mecânica das misturas.....	263
5.9.1.	Introdução .....	264
5.9.2.	Materiais e métodos.....	265
5.9.2.1.	Materiais .....	265
5.9.2.2.	Metodologia de laboratório .....	266
5.9.3.	Resultados e Discussão .....	268
5.9.3.1.	Parâmetros ótimos de compactação .....	268
5.9.3.2.	Avaliação da resistência mecânica .....	269
5.9.3.3.	Influência da energia de compactação.....	270
5.9.3.4.	Influência do período de cura .....	272
5.9.3.5.	Resistência sob condição de saturação .....	273
5.9.4.	Conclusões .....	276
5.9.5.	Agradecimentos .....	277
5.9.6.	Referências bibliográficas.....	277
5.10.	Projeto, construção e avaliação dos procedimentos construtivos do trecho experimental com mistura solo-grits na CENIBRA .....	279
5.10.1.	Introdução .....	280
5.10.2.	Materiais e métodos.....	282
5.10.2.1.	Amostras de solo e de resíduo.....	282
5.10.2.2.	Quantitativos de grits .....	282
5.10.2.3.	Execução das misturas solo-grits em laboratório.....	282
5.10.2.4.	Ensaio geotécnicos em laboratório.....	283
5.10.2.5.	Classificação geotécnica das amostras de solo.....	283

5.10.2.6. Execução do trecho experimental .....	283
5.10.3. Resultados e discussão .....	284
5.10.3.1. Características geotécnicas .....	284
5.10.3.2. Classificação do solos .....	285
5.10.3.3. Influência da adição de grits na plasticidade dos solos .....	286
5.10.3.4. Comportamento das misturas solo-grits compactadas .....	287
5.10.3.5. Desenvolvimento e controle tecnológico do trecho experimental .....	290
5.10.3.6. Avaliação do trecho em teste .....	296
5.10.4. Conclusões .....	297
5.10.5. Agradecimentos .....	298
5.10.6. Referências bibliográficas .....	298
5.11. Utilização do resíduo sólido industrial lama de cal em pavimentos de estradas florestais: análise técnica e avaliação de trechos rodoviários experimentais .....	300
5.11.1. Introdução .....	301
5.11.2. Materiais e métodos .....	302
5.11.2.1. Amostras de solos e resíduo .....	302
5.11.2.2. Dosagens das misturas solo-lama cal .....	303
5.11.2.3. Ensaio de laboratório .....	303
5.11.2.4. Avaliação de trechos experimentais .....	303
5.11.3. Resultados e discussão .....	305
5.11.3.1. Caracterização e classificação geotécnica .....	305
5.11.3.2. Fase de laboratório: Compactação, CBR e expansão .....	307
5.11.3.3. Fase de campo: avaliação dos trechos experimentais .....	308
5.11.4. Conclusões .....	314
5.11.5. Agradecimentos .....	314
5.11.6. Referências bibliográficas .....	314
<b>6. CONCLUSÕES FINAIS .....</b>	<b>316</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>319</b>
<b>ANEXO B .....</b>	<b>321</b>
<b>ANEXO C .....</b>	<b>329</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1** - Curva granulométrica de um solo areno-silto-argiloso, com os limites de suas diversas frações constituintes segundo a ABNT. .... 10
- Figura 2.2** - Estados de consistência dos solos. .... 13
- Figura 2.3** - Seqüência para determinação do limite de liquidez de solos utilizando-se do aparelho de Casagrande: (a) preenchimento da concha em pelo menos  $\frac{3}{4}$  com a massa de solo; (b) execução da ranhura com o cinzel; e (c) movimento da manivela. .... 14
- Figura 2.4** - Curva de compactação obtida via ensaio normal de Proctor, com amostras de um mesmo solo preparadas em cinco teores crescentes de umidade. .... 19
- Figura 2.5** - Influência da textura e do teor de matéria orgânica nos parâmetros ótimos de compactação de amostras de solos da região de Lavras-MG. .... 22
- Figura 2.6** - Curvas de compactação de um solo em diferentes energias. .... 23
- Figura 2.7** - Curvas de compactação de solo saprolítico da região de Viçosa, MG, compactado na energia do ensaio Proctor normal, sendo a amostra ensaiada com e sem reuso. .... 24
- Figura 2.8** - Aspectos da compactação de um solo da região amazônica. .... 25
- Figura 2.9** - Tipos de compactação de solos em campo. .... 26
- Figura 2.10** - Materiais empregados no controle pelo método do funil e areia. .... 30
- Figura 2.11** - Cilindro Califórnia e seus aparatos (a), e tanque de imersão (b). .... 33
- Figura 2.12** - Curva pressão *versus* penetração do ensaio CBR. .... 35
- Figura 2.13** - Curvas de compactação e  $CBR_{5\text{pontos}}$ , mostrando a obtenção da capacidade de suporte no teor de umidade ótimo. .... 36
- Figura 2.14** - Prensa para a realização do ensaio de compressão não confinada (a) e curvas tensão *versus* deformação de solos compactados(b). .... 38

<b>Figura 2.15</b> - Montagem do ensaio de permeabilidade: (a) aspecto do solo compactado, nos padrões do cilindro Proctor, envolvido por um anel de parafina dentro do permeâmetro e colocado na posição vertical do mesmo; (b) aspecto final do permeâmetro após colocadas as camadas de areia, os anéis de parafina derretida, e bentonita, que garante a passagem de água somente pelo corpo-de-prova; (c) sala de execução do ensaio, mostrando os tubos de carga; (d) detalhe do processo de saturação dos corpos-de-prova compactados. ....	42
<b>Figura 2.16</b> - Módulo resiliente <i>versus</i> número de aplicações da tensão desvio. ....	45
<b>Figura 2.17</b> - Relação $M_R/CBR$ . ....	49
<b>Figura 3.1</b> - Seção transversal de um pavimento rodoviário típico. ....	55
<b>Figura 3.2</b> - Modalidades de pavimentos típicos. ....	56
<b>Figura 3.3</b> - Dissolução da sílica e da alumina em função do pH. ....	79
<b>Figura 4.1</b> - RCNC, em kPa, de misturas solo-escória-cal. ....	140
<b>Figura 4.2</b> - Resultados de CBR para amostras de solo no estado natural e de suas misturas com alcatrão, cal+alcatrão e cimento+alcatrão. ....	147
<b>Figura 5.1</b> - Fluxograma dos procedimentos adotados na pesquisa. ....	163
<b>Figura 5.2</b> - Resultados dos ensaios de compactação dos solos. ....	170
<b>Figura 5.3</b> - Limites de consistência dos solos e das misturas solo-grits. ....	172
<b>Figura 5.4</b> - Influência da adição de grits nas curvas de compactação dos solos: (a) solo 1 e (b) solo 2. ....	174
<b>Figura 5.5</b> - Curvas de compactação, CBR e expansão <sub>CBR</sub> obtidas em ensaios CBR <sub>5pontos</sub> , com compactação na energia do Proctor intermediário. ....	184
<b>Figura 5.6</b> - Influência da adição de grits nos parâmetros ótimos de compactação dos solos 1 e 2. ....	185
<b>Figura 5.7</b> - Valores de CBR e expansão para as misturas solo-grits referentes à energia do ensaio Proctor intermediário. ....	186
<b>Figura 5.8</b> - CBR e expansão das misturas solo-grits, compactadas na energia intermediária, na $W_{ót.}$ e em variações da $W_{ót.} \pm 1\%$ e $W_{ót.} \pm 2\%$ . ....	188
<b>Figura 5.9</b> - Influência da energia de compactação na resistência e expansão das misturas solo-grits. ....	189
<b>Figura 5.10</b> - Influência do tempo entre mistura e compactação (TMC) na densidade das misturas solo-grits compactadas. ....	198
<b>Figura 5.11</b> - Influência do TMC no CBR e expansão das misturas solo-grits. ....	200
<b>Figura 5.12</b> - CBR e expansão para as misturas solo-grits, considerando-se TMC que refletem situações de campo. ....	201
<b>Figura 5.13</b> - CBR e expansão das misturas solo-2-grits para diferentes TMC's, considerando-se os lotes 1 e 2 de grits. ....	203
<b>Figura 5.14</b> - Análise granulométrica do grits. ....	210
<b>Figura 5.15</b> - Curvas granulométricas das misturas solo-grits e respectivas frações constitutivas. ....	211



<b>Figura 5.16</b> - Reflexos da separação das frações grosseiras do grits nos parâmetros ótimos de compactação das misturas solo-grits. ....	213
<b>Figura 5.17</b> - Influência da fração grosseira do grits nos valores de CBR e expansão das misturas solo-grits compactadas. ....	214
<b>Figura 5.18</b> - Contribuição da fração fina do grits na resistência e na expansão das misturas solo-grits compactadas na energia intermediária e curadas a 28 dias. ....	216
<b>Figura 5.19</b> - Efeito do período de cura nos índices CBR e expansão das misturas solo 1-grits compactadas. ....	223
<b>Figura 5.20</b> - Efeito do período de cura nos índices CBR e expansão das misturas solo 2-grits compactadas. ....	225
<b>Figura 5.21</b> - Efeito do período de cura nos índices RCNC média e Rt média das misturas solo 1-grits compactadas. ....	228
<b>Figura 5.22</b> - Efeito do período de cura nos índices RCNC média e Rt média das misturas solo 2-grits compactadas. ....	230
<b>Figura 5.23</b> - Influência da imersão em água nos valores de CBR das misturas solo-grits compactadas e curadas a 7 dias. ....	240
<b>Figura 5.24</b> - Perda de integridade das misturas solo 2-grits compactadas e curadas: (a) misturas compactadas na energia intermediária e curadas a 28 dias e (b) misturas compactadas na energia modificada. ....	244
<b>Figura 5.25</b> - Percentual de perda de RCNC dos solos 1 e 2 e das misturas solo 1-grits e solo 2-grits compactadas e curadas a 28 dias. ....	247
<b>Figura 5.26</b> - Curvas tensão x deformação para o solo ETA + 10 % grits, sem tratamento e tratado à 200, 300, 400, 500 e 600 °C, em mufla. C1, C2 e C3 representam os três corpos-de-prova usados no estudo. ....	260
<b>Figura 5.27</b> - RCNC média, em kPa, para as misturas solo + 24 % grits compactadas nas energias intermediária e modificada, e curadas a 28 dias, com o resíduo submetido à tratamentos térmicos, em mufla. ....	273
<b>Figura 5.28</b> - RCNC média, em kPa, para as misturas solo 1 + 24 % grits compactadas nas energias intermediária e modificada, curadas a 7 e 28 dias, e imersas por 4 horas em água, com o resíduo submetido à tratamentos térmicos, em mufla. ....	275
<b>Figura 5.29</b> - RCNC média, em kPa, para as misturas solo 2 + 24 % grits compactadas nas energias intermediária e modificada, curadas a 7 e 28 dias, e imersas por 4 horas em água, com o resíduo submetido à tratamentos térmicos, em mufla. ....	276
<b>Figura 5.30</b> - Curvas granulométricas dos solos de Ipatinga-MG. ....	284
<b>Figura 5.31</b> - Curva de compactação e parâmetros ótimos das misturas solo-grits compactadas na energia do ensaio Proctor modificado. ....	288
<b>Figura 5.32</b> - Influência do período de cura na resistência das misturas solo-grits compactadas na energia modificada. ....	291
<b>Figura 5.33</b> - Vista do trecho experimental após a regularização do subleito. ....	292
<b>Figura 5.34</b> - Grits e caminhão utilizados na execução do trecho experimental. ....	294
<b>Figura 5.35</b> - Vista parcial da distribuição do resíduo em campo. ....	294

<b>Figura 5.36</b> - Execução da mistura solo + 24 % grits. ....	295
<b>Figura 5.37</b> - Aspectos da compactação da camada de reforço do subleito.....	295
<b>Figura 5.38</b> - Presença de erosão laminar ao longo do trecho.....	296
<b>Figura 5.39</b> - Aspectos dos bueiros e adição de escórias de aciaria .....	297
<b>Figura 5.40</b> - Croqui dos trechos experimentais avaliados.....	304
<b>Figura 5.41</b> - Furos executados nos trechos experimentais: (a) aspecto geral e (b) colocação da sacola plástica e preenchimento com água. ....	305
<b>Figura 5.42</b> - Avaliação dos trechos experimentais com a lama de cal.....	309
<b>Figura 5.43</b> - Fotos dos tratamentos do trecho de Jandaíra.....	311
<b>Figura 5.44</b> - Fotos dos tratamentos do trecho de Água Boa - BIT. ....	312
<b>Figura 5.45</b> - Fotos dos tratamentos do trecho de Água Boa - AIT. ....	313

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 2.1</b> - Peneiras mais utilizadas nos laboratórios rodoviários.....	10
<b>Quadro 2.2</b> - Faixas granulométricas de materiais para base granular.....	11
<b>Quadro 2.3</b> - Peso específico dos sólidos para diferentes minerais.....	12
<b>Quadro 2.4</b> - Valores típicos de limites de Atterberg de solos brasileiros .....	15
<b>Quadro 2.5</b> - Características da compactação de solos em laboratório.....	20
<b>Quadro 2.6</b> - Características e aplicações dos rolos compactadores .....	29
<b>Quadro 2.7</b> - Métodos para determinação do teor de umidade.....	31
<b>Quadro 2.8</b> - Características da compactação de solos para o ensaio CBR .....	33
<b>Quadro 2.9</b> - Penetrações e pressões-padrão para a brita graduada.....	34
<b>Quadro 2.10</b> - Valores prováveis de CBR em função do grupo TRB .....	36
<b>Quadro 2.11</b> - Valores típicos do coeficiente k para solos .....	43
<b>Quadro 2.12</b> - Coeficientes k para um solo da barragem de Ilha Solteira, SP, compactado em diferentes teores de umidade. ....	43
<b>Quadro 2.13</b> - Correlações entre o $M_R$ e as propriedades índices dos solos.....	47
<b>Quadro 2.14</b> - Classificação resiliente de solos finos e estimativas do $M_R$ .....	48
<b>Quadro 3.1</b> - Comparação entre métodos de dosagem solo-cimento.....	63
<b>Quadro 3.2</b> - Composição química dos cimentos Portland .....	66
<b>Quadro 3.3</b> - Principais compostos do cimento Portland.....	67
<b>Quadro 3.4</b> - RCNC de misturas solo-cimento .....	71
<b>Quadro 3.5</b> - Melhores resultados dos estudos com solo-cimento realizados no Rio Grande do Sul.....	72
<b>Quadro 3.6</b> - CBR e expansão (%) das misturas solo-cimento .....	73
<b>Quadro 3.7</b> - RCNC (kPa) das misturas solo-cimento compactadas e curadas.....	74

<b>Quadro 3.8</b> - Resistência e expansão do solo e da mistura solo-cimento.....	75
<b>Quadro 3.9</b> - CBR e expansão, em %, das misturas solo-cal .....	80
<b>Quadro 3.10</b> - RCNC, em kPa, das misturas solo-cal compactadas e curadas .....	82
<b>Quadro 3.11</b> - Melhores resultados dos estudos de MENDONÇA (1998), envolvendo misturas solo-cal .....	83
<b>Quadro 3.12</b> - RCNC, em kPa, das misturas solo-cal, compactadas e curadas .....	85
<b>Quadro 3.13</b> - RCNC, em kPa, das misturas solo-cal .....	86
<b>Quadro 3.14</b> - Limites de Atterberg e CBR das misturas solo-cal .....	87
<b>Quadro 3.15</b> - RCNC, em kPa, para as misturas solo-cal-cimento compactadas e curadas a 7 dias .....	88
<b>Quadro 3.16</b> - Características dos solos para estabilização com betume.....	91
<b>Quadro 3.17</b> - RCNC, CBR e expansão das misturas solo-betume .....	93
<b>Quadro 3.18</b> - RCNC das misturas solo-betume .....	94
<b>Quadro 3.19</b> - Resistência mecânica das misturas solo – DS 328 compactadas .....	99
<b>Quadro 3.20</b> - RCNC, em kPa, para as misturas solo-RBI compactadas .....	104
<b>Quadro 3.21</b> - CBR, expansão e RCNC das misturas solo-RBI.....	105
<b>Quadro 4.1</b> - Impactos ambientais passíveis de ocorrência nas fases de aplicação e incorporação e, após a compactação em campo da mistura solo+resíduo industrial .....	132
<b>Quadro 4.2</b> - CBR, expansão e RCNC das misturas solo-vinhoto .....	143
<b>Quadro 4.3</b> - CBR e expansão do ART compactado em duas energias .....	144
<b>Quadro 4.4</b> - CBR, expansão e RCNC das misturas solo-licor .....	150
<b>Quadro 4.5</b> - RCNC das misturas fosfogesso-cimento.....	152
<b>Quadro 4.6</b> - CBR, expansão, RCNC e Rt das misturas solo-resíduo .....	154
<b>Quadro 5.1</b> - Caracterização geotécnica das amostras de solo.....	169
<b>Quadro 5.2</b> - Classificação dos solos segundo os sistemas TRB e USC e a Metodologia MCT .....	169
<b>Quadro 5.3</b> - Valores de $\gamma_s$ das misturas solo-grits.....	171
<b>Quadro 5.4</b> - Parâmetros ótimos de compactação das misturas solo 1-grits .....	175
<b>Quadro 5.5</b> - Parâmetros ótimos de compactação das misturas solo 2-grits .....	175
<b>Quadro 5.6</b> - Caracterização geotécnica e classificação das amostras de solo .....	197
<b>Quadro 5.7</b> - Caracterização química do grits dos lotes 1 e 2.....	202
<b>Quadro 5.8</b> - Composições granulométricas do grits .....	208
<b>Quadro 5.9</b> - Parâmetros ótimos de compactação das misturas solo-grits compactadas na energia do ensaio Proctor intermediário .....	238
<b>Quadro 5.10</b> - Parâmetros de compactação das misturas solo-grits compactadas na energia do ensaio Proctor modificado.....	239
<b>Quadro 5.11</b> - Influência da imersão, em água, na RCNC média das misturas solo 1-grits compactadas na energia intermediária e curadas.....	242

<b>Quadro 5.12</b> - Influência da imersão, em água, na RCNC média das misturas solo 1-grits compactadas na energia modificada e curadas.....	242
<b>Quadro 5.13</b> - Influência da imersão, em água, na RCNC média das misturas solo 2-grits compactadas na energia intermediária e curadas.....	243
<b>Quadro 5.14</b> - Influência da imersão, em água, na RCNC média das misturas solo 2-grits compactadas na energia modificada e curadas.....	243
<b>Quadro 5.15</b> - Influência da imersão, em água, na Rt média das misturas solo 1-grits compactadas na energia intermediária e curadas.....	245
<b>Quadro 5.16</b> - Influência da imersão, em água, na Rt média das misturas solo 1-grits compactadas na energia modificada e curadas.....	245
<b>Quadro 5.17</b> - Granulometria, limites de Atterberg, peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ ) e classificação do solo ETA pelos sistemas TRB e USC.....	256
<b>Quadro 5.18</b> - Caracterização química das amostras do solo ETA.....	256
<b>Quadro 5.19</b> - Caracterização química das amostras do resíduo industrial grits.....	257
<b>Quadro 5.20</b> - Parâmetros de compactação do solo natural e das misturas solo + 10 % grits, na energia do ensaio Proctor normal.....	257
<b>Quadro 5.21</b> - RCNC média, em kPa, para o solo ETA natural e em mistura com o teor de 10 % de grits, com e sem tratamento térmico, referente à energia do ensaio Proctor normal.....	258
<b>Quadro 5.22</b> - Comparação da RCNC, em kPa, entre estabilizantes tradicionais e subprodutos industriais, com o grits tratado à 600 °C, ambos aplicados ao solo ETA.....	259
<b>Quadro 5.23</b> - Ensaio físicos e classificação TRB dos solos de Viçosa-MG.....	266
<b>Quadro 5.24</b> - Perdas de massa, em %, do resíduo grits submetido à TT.....	267
<b>Quadro 5.25</b> - Parâmetros ótimos de compactação das misturas solo-grits.....	269
<b>Quadro 5.26</b> - RCNC média, em kPa, para as misturas solo + 24 % grits compactadas na energia intermediária e curadas a 7 dias, com o resíduo submetido à tratamentos térmicos, em mufla.....	270
<b>Quadro 5.27</b> - RCNC média, em kPa, para as misturas solo + 24 % grits compactadas na energia modificada e curadas a 7 dias, com o resíduo submetido à tratamentos térmicos, em mufla.....	271
<b>Quadro 5.28</b> - Compactação, CBR e expansão dos solos de Ipatinga-MG.....	285
<b>Quadro 5.29</b> - Classificações dos solos de Ipatinga-MG.....	286
<b>Quadro 5.30</b> - Plasticidade dos solos com e sem adição do resíduo grits.....	286
<b>Quadro 5.31</b> - CBR e expansão <sub>CBR</sub> das misturas solo-grits compactadas na energia modificada e curadas a 1 dia em câmara úmida.....	289
<b>Quadro 5.32</b> - Valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ e de CBR em função de variações de $\pm 2$ % na $W_{\acute{o}t}$ de compactação da mistura cenibra amarelo +24 % grits.....	292
<b>Quadro 5.33</b> - Parâmetros de caracterização dos solos de Alagoinhas-Ba.....	307
<b>Quadro 5.34</b> - Classificações dos solos de Alagoinhas-Ba.....	307

<b>Quadro 5.35</b> - Características de compactação, CBR e expansão <sub>CBR</sub> das misturas solo-lama de cal compactadas na energia do ensaio Proctor intermediário.....	308
<b>Quadro 5.36</b> - Valores dos pesos específicos aparentes secos determinados para os tratamentos do trecho de Jandaíra .....	310
<b>Quadro 5.37</b> - Valores dos pesos específicos aparentes secos determinados para os tratamentos do trecho de Água Boa - BIT .....	310
<b>Quadro 5.38</b> - Valores dos pesos específicos aparentes secos determinados para os tratamentos do trecho de Água Boa - AIT .....	310

## RESUMO

PEREIRA, Reginaldo Sérgio, D.S., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2005. **Viabilidade técnica do emprego de resíduos da indústria de celulose para construção de estradas florestais.** Orientador: Carlos Cardoso Machado. Conselheiros: Dario Cardoso de Lima e Carlos Alexandre Braz de Carvalho.

Analisaram-se no presente estudo os comportamentos de engenharia das misturas solo-grits e solo-lama de cal, com base em resultados de ensaios de laboratório envolvendo determinações de parâmetros ótimos de compactação, limites de liquidez e plasticidade, capacidade de suporte CBR, resistências a compressão não confinada e a tração e, também, em resultados de avaliações qualitativas do desempenho dessas misturas, em campo, através do desenvolvimento de trechos rodoviários experimentais em subleitos de estradas florestais. Para tanto, trabalhou-se com amostras de solos representativas das ocorrências de três localidades, a saber: (i) microrregião de Viçosa (MG) – solo 1 [A-7-5 (20)] e solo 2 [A-2-4 (0)]; (ii) microrregião de Ipatinga (MG) – cenibra amarelo [A-7-6 (6)], cenibra róseo [A-6 (3)] e cenibra vermelho [A-7-5 (20)]; e (iii) microrregião de Alagoinhas (Ba) – subleito areia [A-2-4 (0)] e cascalho de primeira [A-1-a (0)]. Os resíduos oriundos da indústria de celulose, grits e lama de cal, foram utilizados como agentes de estabilização química. Foram realizadas misturas solo-grits com solos de Viçosa-MG empregando-se, em massa, grits nos quantitativos de 4, 8, 12, 16, 20, 24 e

28 %. Os estudos com essas misturas contemplaram a etapa 1 do trabalho que abrangeu a análise das diversas variáveis influentes no processo de estabilização química de solos. Misturas solo-grits com solos de Ipatinga-MG, também, foram realizadas, sendo os quantitativos de grits, em massa, de 12, 16, 20 e 24 %. Nesta etapa 2 os estudos abrangeram a caracterização e classificação das amostras de solo e das misturas solo-grits, avaliação da resistência mecânica via ensaio CBR e execução e avaliação de trecho experimental em áreas da empresa CENIBRA S/A. Os solos de Alagoinhas-Ba foram empregados nas misturas com a lama de cal constituindo-se nos estudos referentes a etapa 3 do trabalho. Os teores, em massa, de lama de cal empregados nas misturas foram de 10, 15, 20 e 25 %. Após a caracterização das amostras de solo, avaliou-se a resistência mecânica das misturas solo-lama de cal via ensaio CBR, em laboratório, e de posse das melhores respostas procedeu-se a construção e avaliação de trechos experimentais em áreas da empresa BAHIA PULP S/A. Os resultados obtidos em laboratório e a análise do desempenho das misturas solo-grits, em campo, possibilitou chegar às seguintes conclusões: (i) o teor de 24 % de grits apresentou-se como o teor ótimo desse resíduo para fins de estabilização dos solos; (ii) o tipo de solo, a energia de compactação, o tempo entre a mistura e a compactação, o lote e a granulometria do resíduo, o período de cura e a imersão em água influenciaram a resistência mecânica e expansão das misturas solo-grits; (iii) solos de textura argilosa tiveram seus valores de resistência mecânica influenciados pela ação dispersiva do sódio presente no resíduo grits; (iv) o tratamento térmico do grits tornou-o mais reativo nas misturas solo-grits; (v) o desempenho, em campo, de trecho experimental contendo solo local mais 24 % de grits, avaliado um ano após sua execução, evidenciou falta de cimentação das partículas do solo pelo grits, observando-se ocorrência de erosão laminar com remoção de parte da camada estabilizada. Os resultados obtidos, em laboratório e campo, para as misturas solo-lama de cal possibilitaram chegar às seguintes conclusões: (i) a melhor resposta, em laboratório, de resistência mecânica e expansão foi para a mistura cascalho de primeira + 25 % lama de cal; e (ii) no campo, o melhor desempenho foi para a mistura com 30 % de lama de cal e 70 % de cascalho de primeira.



## ABSTRACT

PEREIRA, Reginaldo Sérgio, D.S., Universidade Federal de Viçosa, June, 2005. **Technical viability of using industrial cellulose wastes in forest roads construction.** Adviser: Carlos Cardoso Machado. Committee members: Dario Cardoso de Lima and Carlos Alexandre Braz de Carvalho.

This study addresses the engineering behavior of soil-grits and soil-whitewash mud mixtures based on data from laboratory testing program and qualitative field evaluation of forest roads testing sites. The laboratory testing program was directed to Atterberg limits (LL and PL), compaction, CBR, unconfined compression and indirect tensile strength tests performed in Brazilian soil samples, as follows: (i) soil 1 [A-7-5 (20)] and soil 2 [A-2-4 (0)], that are from the micro-region of Viçosa, Minas Gerais State; (ii) yellow Cenibra [A-7-6 (6)], pink Cenibra [A-6 (3)] and red Cenibra [A-7-5 (20)], that are from the micro-region of Ipatinga, Minas Gerais State; (iii) sandy sub-grade soil [A-2-4 (0)] and first class gravel [A-1-a (0)], that are from the micro-region of Alagoinhas, Bahia State. The wastes named *grits* and *whitewash mud*, both from the cellulose industry, were used as chemical soil stabilizers. The laboratory testing program was divided in three steps, as follows: (i) step 1, concerning the study of Viçosa soils-grits mixtures stabilization process at grits contents of 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28 %; (ii) step 2, encompassing Ipatinga soils-grits mixtures at grits contents of 12, 16, 20 e 24 %, which was directed to soil

characterization and engineering classification, determination of mechanical strength via CBR, as well as construction and evaluation of field performance of a forest road test site at Cenibra S/A; (iii) step 3, considering Alagoinhas soils-whitewash mud mixtures at waste contents of 10, 15, 20 and 25 %, which took into account geotechnical characterization and CBR laboratory tests in order to determine best waste content to be used in the construction of forest road test sites at the Bahia Pulp S/A company. Data from the laboratory and field testing program executed with soil-grits mixtures support the following conclusions: (i) best mechanical responses of soil-grits mixtures were associated to 24 % grits content; (ii) parameters such as soil type, compaction effort, elapsed period of time between mixture and compaction, grits production run, grits size distribution, curing period of time and water immersion before testing affected significantly the mechanical behavior of mixtures; (iii) sodium presents in grits samples influenced significantly the mechanical strength and swelling of mixtures; (iv) thermal treatment produced more reactive grits samples; (v) one year after construction, field evaluation of the forest road test site at CENIBRA S/A generally showed lack of cementation among soil particles, as well as mixture mass losses due to laminar erosion. Data from the laboratory and field testing program carried out with soil-whitewash mud support the following conclusions: (i) best laboratory testing mechanical response was associated to 25 % whitewash mud plus 75 % first class gravel gavel; (ii) best field performance of test sites was related to 30 % whitewash mud content plus 70 % first class gravel.

## **1. INTRODUÇÃO GERAL**

### **1.1. Considerações gerais**

No presente trabalho avaliou-se as potencialidades e limitações do uso dos resíduos grits e lama de cal, de indústria de celulose, como agentes estabilizantes de solos, com vistas ao emprego em construção de estradas, baseando-se em programas experimentais desenvolvidos anteriormente, envolvendo solos da microrregião de Viçosa-MG, tratados com produtos tradicionais (cal e cimento) e com materiais alternativos (resíduos industriais), com fins rodoviários, contribuindo dessa forma, para a ampliação das soluções disponíveis e incorporação de novos materiais de construção civil que sejam tecnicamente aceitáveis, ambientalmente adequados e minimizem, acima de tudo, os custos de construção de rodovias florestais. Portanto, os enfoques principais deste trabalho estão voltados para: (i) reaproveitamento de resíduos ou subprodutos industriais, minimizando-se custos e possíveis danos ambientais oriundos de sua disposição final inadequada em aterros ou pelo emprego de processos de incineração; e (ii) minimização dos custos de construção de rodovias, com o surgimento de novos materiais e novas técnicas construtivas.

A idéia de pavimentação de baixo custo, com o emprego da técnica de estabilização química de solos, tendo-se resíduos industriais como aditivos, está alicerçada, após a veracidade técnica do processo, nos fatos dos resíduos serem produzidos em quantitativos suficientes para emprego e, ao mesmo tempo, em distâncias de transporte adequadas à sua utilização, de forma que não onerem os custos de construção das vias. Os resíduos da indústria de celulose são gerados em quantidades significativas, visto que, a cada 100 t de celulose produzida, são produzidos cerca de 48 t de resíduos, de acordo com dados de Bellote et al., (1998). Outro aspecto de interesse é que os mesmos estão próximos às estradas florestais, que dão acesso aos plantios de eucalipto. Ressalta-se aqui, a extensão dessas vias de acesso, estimadas por Machado e Malinovski (1986) como sendo da ordem de 600.000 km de extensão.

A exigência de uma demanda diária de madeira, posto fábrica, por parte das empresas de papel e celulose, durante todo o ano, principalmente nas estações chuvosas, depende da qualidade das estradas florestais, que devem ser construídas, de acordo com determinados padrões técnicos, de forma que, as composições veiculares, possam trafegar sem interrupções, com segurança e conforto.

Com o intuito de melhorar as propriedades de solos com características inadequadas para fins de pavimentação de rodovias florestais, procurar-se-á descrever de forma clara e objetiva os passos realizados nesse estudo, envolvendo misturas de solos e resíduos industriais oriundos da extração de celulose.

## **1.2. O problema**

Numa rede de estradas florestais existe uma classificação funcional da seguinte forma: principal, arterial, ramal e aceiro. As principais, provavelmente, necessitam de uma estrutura mais arranjada para atender ao tráfego de forma mais permanente, entretanto, nem sempre se tem materiais naturalmente disponíveis. Por outro lado, existem resíduos gerados na fabricação de celulose que podem ou não apresentar potencialidades para tal fim.

### **1.3. Justificativas**

As seguintes constatações dão o alicerce para o desenvolvimento dessa pesquisa: (i) baixo padrão construtivo, freqüentemente, encontrado nas estradas florestais; (ii) busca de materiais alternativos de baixo custo para pavimentação rodoviária e (iii) reaproveitamento de resíduos da indústria de celulose.

Os dirigentes das indústrias conjuntamente e orientadas pela Associação Nacional dos Fabricantes de Papel e Celulose (ANFPC, 1996) formularam um plano de investimento denominado “A política de desenvolvimento do complexo de celulose e papel para 1995-2005”. Com o avanço da modernização do setor, tanto técnica como administrativa, nesse intervalo as projeções levaram à necessidade de quase dobrar a produção brasileira nos próximos dez anos (5,7 milhões de toneladas celulose, 1996), estimando-se investimentos globais da ordem de 13 bilhões de dólares neste período.

Bracco (1996) alertou-se para as dimensões do “déficit” de madeira para a próxima década onde a disponibilidade de fibras irá requerer uma área plantada maior, significando, um acréscimo de cerca de 600 mil hectares. Sousa (2000) mencionou que essa demanda adicional traria como conseqüências, só para as empresas situadas no Estado de São Paulo, uma sobrecarga no uso da malha viária com cerca de 800 mil viagens para transporte da matéria prima.

O transporte principal de madeira envolve longas distâncias a serem percorridas e tráfego em estradas de terra e com revestimento asfáltico, o que exige o emprego de caminhões com maior capacidade de carga, sendo o peso bruto total combinado (PBTC) entre 30 e 45 t (SEIXAS, 1992). O referido autor ressaltou, também, que a qualidade do pavimento e a capacidade de aclave de cada veículo, são condicionantes importantes na tomada de decisão da escolha da composição veicular a se utilizar.

O padrão de qualidade das estradas florestais afetam enormemente os custos do transporte rodoviário florestal visto que baixo padrão de qualidade, ou seja, pista de rolamento e sistema de drenagem inadequados, contribuem,, segundo Machado e Lopes et al., (2000), para o aumento do consumo de

combustível, desgaste excessivo de pneus, quebras mecânicas, além de prejudicar o fluxo constante de madeira para as fábricas.

Razões para a ocorrência de baixo padrão de qualidade nas estradas florestais está nos custos de construção envolvidos. Uma estimativa desses custos para todos os tipos de estradas possíveis de ocorrência no setor florestal foi feita por Lopes (2001) que atribuiu a ocorrência da variação nos mesmos, ao greide (terreno plano, ondulado ou montanhoso) à largura (pista simples ou dupla) e ao tipo de revestimento (primário ou asfáltico) da pista de rolamento. Um resumo dos dados obtidos por Lopes (2001) encontra-se descrito no Anexo A.

Em estradas florestais é comum se observar superfícies de pista de rolamento constituídas de material granular, destacando-se os tipos de pavimentos flexíveis e os revestimentos primários (MACHADO; CARVALHO; SANTOS, 1992). A escassez de materiais granulares apropriados que se enquadrem nas especificações técnicas para uso na pavimentação associada a barreiras ambientalistas para sua exploração conduzem, segundo Rezende (1999), à necessidade de se estudarem materiais alternativos que, mesmo não atendendo às especificações de norma, podem mostrar comportamento estrutural satisfatório.

A destinação final de resíduos industriais, sejam líquidos ou sólidos, é motivo de crescente preocupação dos administradores de empresas e dos órgãos ambientais que, através de rigorosa fiscalização, têm obrigado as empresas a cuidados minuciosos com seus resíduos durante todo o processo, desde sua classificação adequada, tratamento, coleta e transporte, até a sua destinação final, sendo o reaproveitamento uma técnica que, em geral, reduz custos e diminui a ocorrência de possíveis danos ambientais.

#### **1.4. Objetivo geral**

O objetivo geral desse trabalho foi averiguar, experimentalmente, em laboratório e campo, as potencialidades técnicas de utilização dos resíduos grits e lama de cal como estabilizantes químicos de solos para reforço do subleito ou camada de sub-base de estradas florestais, determinando dessa

forma, um teor apropriado de cada um desses resíduos, bem como, suas peculiaridades e exigências, para a estabilização química de solos que atenda aos requisitos de aplicações para a construção de estradas florestais.

### **1.5. Hipótese**

A estabilização química e mecânica com a utilização de resíduos industriais é uma das alternativas de solução para resolver a complexa problemática da pavimentação de estradas florestais.

### **1.6. Escopo do trabalho**

O presente documento é composto de mais cinco capítulos, contemplando todos os objetivos propostos. Tem-se:

- o Capítulo 2 apresenta parâmetros de interesse para a tomada de decisão de se aceitar ou não um solo como material de construção rodoviária, sendo intitulado “Propriedades dos Solos de Interesse Rodoviário”;
- o Capítulo 3 relata uma gama de aditivos de interesse para a estabilização química de solos para a pavimentação de rodovias, suas peculiaridades, mecanismos de atuação e as suas potencialidades, em termos de utilização, tendo sido intitulado “Pavimentação Rodoviária com Uso da Técnica de Estabilização Química de Solos”;
- o Capítulo 4 aborda experiências, a nível de Brasil, com a aplicação proveitosa de resíduos na pavimentação de rodovias, sendo denominado “Uso de Resíduos Industriais na Pavimentação Rodoviária”;
- no Capítulo 5 apresentam-se os materiais empregados, solos e resíduos industriais, a metodologia científica da pesquisa bem como os resultados obtidos com suas respectivas discussões. Leva o título “Materiais, Métodos, Apresentação dos Resultados e Discussões Pertinentes” e está organizado na forma de artigos científicos, totalizando-se onze;
- no Capítulo 6 fez-se o fechamento do trabalho, no tópico “Resumo e Conclusões Finais”, onde se descreveram as principais conclusões sobre a viabilidade de uso dos resíduos grits e lama de cal na estabilização química de solos, para a construção de estradas florestais.

## 1.7. Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE PAPEL E CELULOSE. **Relatório estatístico florestal GT 7: reflorestamento e correlatos**. São Paulo: ANFPC, 1996.

BELLOTE, A.F.J. et al. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de pesquisa florestal**, Colombo, PR, n. 37, p. 99-106, jul./dez. 1998.

BRACCO, A. Corrida contra o relógio. **Revista Celulose & Papel**, São Paulo, v. 13, n. 55, p. 18-25, ago./set. 1996.

MACHADO, C.C.; MALINOVSKI, J.R. **Rede viária florestal**. Curitiba: FUPEF, 1986. 157 p.

MACHADO, C.C.; CARVALHO, C.A.B.; SANTOS, S.L. Desenvolvimento de um irregularímetro utilizável na avaliação da qualidade da superfície de rolamento de estradas agroflorestais. **Revista Árvore**, UFV, Viçosa, MG, v. 16, n. 1, p. 104-111, 1992. ISSN 0100-6762.

MACHADO, C.C.; LOPES, E.S.; BIRRO, M.H. **Elementos básicos do transporte florestal rodoviário**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 167 p.

LOPES, E.S. **Aplicação do programa SNAP III (scheduling and network analysis program) no planejamento da colheita e do transporte florestal**. Viçosa, MG: UFV, 2001. 150 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

REZENDE, L.R. **Técnicas alternativas para construção de bases de pavimentos rodoviários**. 1999. 169 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 1999.

SEIXAS, F. **Uma metodologia de seleção e dimensionamento da frota de veículos rodoviários para o transporte principal da madeira**. 1992. 106 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes)-Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 1992.

SOUSA, R.A.T.M. **Análise do fluxo de transporte rodoviário de toras curtas de eucalipto para algumas indústrias de celulose e de chapas de composição no Estado de São Paulo**. 2000. 115 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Economia Aplicada)-Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura *Luiz de Queiroz*, Piracicaba, São Paulo, 2000.



## 2. PROPRIEDADES DOS SOLOS DE INTERESSE RODOVIÁRIO

### 2.1. Introdução

O comportamento dos solos como materiais de pavimentação rodoviária é conhecido em função de determinadas propriedades, podendo-se fazer menção, à granulometria, à densidade dos grãos, às características de plasticidade, aos parâmetros ótimos de compactação, aos parâmetros de resistência mecânica, à durabilidade, à condutividade hidráulica, à expansibilidade, à infiltrabilidade e ao comportamento elástico e resiliente. Determinando-se limites de aceitação para os parâmetros anteriormente mencionados, é possível enquadrar os solos como materiais excelentes, ruins ou péssimos para a construção de rodovias, prevendo-se os diferenciados comportamentos e desempenhos que esses materiais de construção poderão ter ao longo do tempo, balizados numa intensa experimentação de laboratório e de campo.

Na identificação e classificação geotécnica de solos com fins de engenharia rodoviária, do sistema americano do *Highway Research Board* (HRB-AASHTO, hoje chamado Transportation Research Board - TRB), adotado pela maioria dos órgãos públicos rodoviários nacionais, interessa a granulometria do solo, nas porcentagens que passam nas peneiras de 2,0, 0,42

e 0,074 mm, e os limites de consistência, representados pelo limite de liquidez (LL) e pelo índice de plasticidade (IP); dessa forma, se obtém a separação em dois grandes grupos, os materiais siltosos e argilosos, apresentando comportamento de fraco a bom, e os materiais granulares (areias, pedra britada e pedregulho) com comportamento de bom a excelente, como materiais de subleito de estradas.

No Sistema Unificado de classificação de solos (USCS - *Unified Soil Classification System*), muito utilizado em geotecnia e, também, na engenharia rodoviária, leva-se em consideração os mesmos índices classificatórios do sistema TRB, fundamentando-se na caracterização tátil visual, na textura, considerando as frações granulométricas e os coeficientes de desuniformidades ( $C_u$ ) e de curvatura ( $C_c$ ) da curva granulométrica, e nos limites de Atterberg através da carta de plasticidade proposta por Casagrande; nesse sistema, divide-se os solos em 14 grupos representados por duas letras, sendo a primeira relativa à granulometria e a segunda à plasticidade; busca-se, também, associar a classificação do solo ao seu comportamento para uso em obras de engenharia.

Vargas (1978) destacou, além das características de plasticidade do solo, a sua textura e estrutura como propriedades físicas de maior interesse do ponto de vista geotécnico, acrescentado que, através dessas propriedades, é possível fazer uma caracterização expedita dos solos.

A compactação define o teor de umidade ideal para se atingir a máxima densidade no solo; os parâmetros de resistência, como o CBR (*California Bearing Ratio*), definem as capacidades de carga dos solos, em termos de pavimentação rodoviária; a permeabilidade, a expansibilidade, a contração e a infiltrabilidade definem o comportamento do solo quando em presença de água; e os comportamentos elásticos dos solos, principalmente os de subleito, podem ser determinados pelos estudos de resiliência.

Existe uma seqüência lógica para obtenção dos parâmetros mencionados acima, passando-se inicialmente pelos ensaios de caracterização, seguidos pelos ensaios de resistência mecânica, sendo esses últimos definidores da utilização do solo como material de construção rodoviária. Ressalta-se que à

nível de Brasil, conforme relato de Nogami e Villibor (1995), o ensaio de resistência corriqueiramente utilizado é o de CBR, pelos custos envolvidos, banco de dados acumulados e simplicidade de execução. Em alguns casos, ensaios como o da determinação do módulo de resiliência e da permeabilidade, em função dos resultados da resistência mecânica, da quantidade de material disponível, da disponibilidade de equipamentos, que são relativamente complexos, e da análise dos custos envolvidos no projeto, podem ser realizados.

No presente capítulo descreveram-se os conceitos, determinações em laboratório e, quando possível, em campo, valores para diversos tipos de solos, e limites de aceitação para a pavimentação de rodovias dos diversos parâmetros de interesse rodoviário, permitindo, dessa forma, um melhor entendimento dos capítulos subsequentes deste documento.

## **2.2. Parâmetros de caracterização de solos**

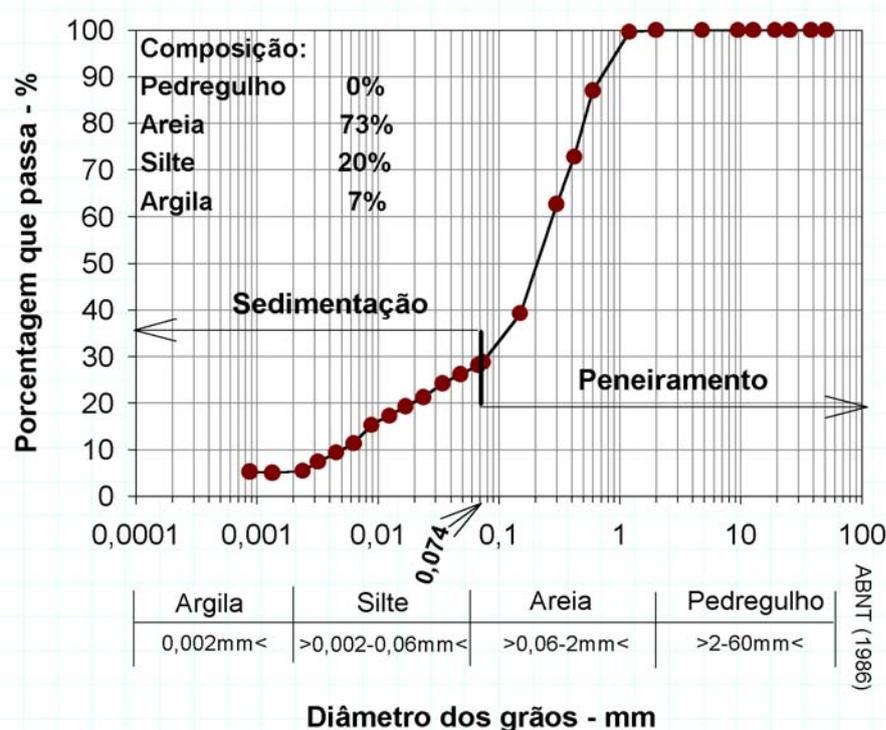
### **2.2.1. Distribuição do tamanho das partículas**

As diferentes frações constituintes da fase sólida dos solos podem ser separadas e quantificadas, em %, pela análise granulométrica, que consiste basicamente, em passar o solo sobre um jogo de peneiras padronizadas (Quadro 2.1), calculando-se as porcentagens que passam em cada peneira. Dessa forma, traça-se a curva granulométrica, característica de cada solo, determinando-se as diversas frações contidas no mesmo, conforme ilustração da Figura 2.1. Ressalta-se que para a determinação das partículas siltes e argila de diâmetros menores que 0,074 mm, baseia-se na lei de sedimentação de Stokes, a qual estabelece uma relação entre o diâmetro das partículas e a sua velocidade de sedimentação em meio líquido de viscosidade e peso específico conhecidos. Os dispersantes comumente utilizados são o hidróxido de sódio e o hexametáfosfato de sódio.

**Quadro 2.1 – Peneiras mais utilizadas nos laboratórios rodoviários**

Peneira	Abertura Nominal (mm)
2"	50,8
1 1/2"	38,1
1"	25,4
3/4"	19,1
1/2"	12,7
3/8"	9,5
Nº4	4,8
Nº10	2,0
Nº16	1,2
Nº30	0,6
Nº40	0,42
Nº50	0,30
Nº100	0,15
Nº200	0,074

Fonte: DNIT (1996, p. 57).



**Figura 2.1 – Curva granulométrica de um solo areno-silto-argiloso, com os limites de suas diversas frações constituintes segundo a ABNT.**

Dependendo do tipo de solo, podem-se obter granulometrias uniformes, bem graduadas e mal graduadas, sendo na prática estabelecidas faixas granulométricas, dentre as quais devem se situar a curva do solo a utilizar, em

função da finalidade da obra (DNIT, 1996, p. 58). Para o caso de materiais de base granular, por exemplo, as faixas estão apresentadas no Quadro 2.2.

**Quadro 2.2 – Faixas granulométricas de materiais para base granular**

Peneiras (Abertura Nominal em mm)	% que passa			
	Faixa A	Faixa B	Faixa C	Faixa D
50,80	100	100	-	-
25,40	-	75-90	100	100
9,50	30-65	40-75	50-85	60-100
4,80	25-55	30-60	35-65	50-85
2,00	15-40	20-45	25-50	40-70
0,42	8-20	15-30	15-30	25-45
0,074	2-8	5-15	5-15	10-25

Fonte: DNIT (1996, p. 205).

### 2.2.2. Peso específico dos sólidos

O peso específico dos sólidos, é designado pelo símbolo  $\gamma_s$ , e tem como unidade de representação principal o  $\text{kN/m}^3$ , sendo expresso também, em  $\text{g/cm}^3$ ; representa a média da densidade específica dos constituintes que compõem a fase sólida do solo, incluindo minerais, compostos orgânicos, sais precipitados e materiais não cristalizados. Sua determinação em laboratório é feita através da relação entre o peso das partículas sólidas do solo e o seu volume, utilizando-se para tanto, um picnômetro e água deairada.

Segundo Pinto (2000), varia pouco de solo para solo, com valores próximos de  $27 \text{ kN/m}^3$ , não permitindo por si só identificar um solo, mas se torna importante para o cálculo de outros índices como a granulometria por sedimentação e as famílias de curvas de saturação do ensaio de compactação. O DNIT (1996, p. 51) cita a areia quartzosa com  $\gamma_s$  de  $26,18 \text{ kN/m}^3$ , os cascalhos ferruginosos com valores mínimos de  $29,42 \text{ kN/m}^3$  e destaca a importância desse índice na determinação de relações volumétricas das fases

do solo e na indicação da natureza mineralógica dos mesmos ou de suas frações.

O Quadro 2.3, modificado de Nogueira (2001), apresenta valores típicos de  $\gamma_s$  para os minerais mais comuns presentes nos solos; ressalta-se que esse índice físico quase não se altera com o tempo, em virtude de sua dependência tanto dos minerais constituintes como de suas porcentagens de ocorrência no solo.

**Quadro 2.3 – Peso específico dos sólidos para diferentes minerais**

<b>Mineral</b>	<b><math>\gamma_s</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>
Feldspato	25,40 - 28,44
Mica	26,48 - 31,38
Caulinita	25,50 - 25,99
Montmorilonita	24,52 - 27,46
Ilmenita	44,13 - 49,03
Magnetita	50,99
Goethita	43,15
Quartzo	25,99

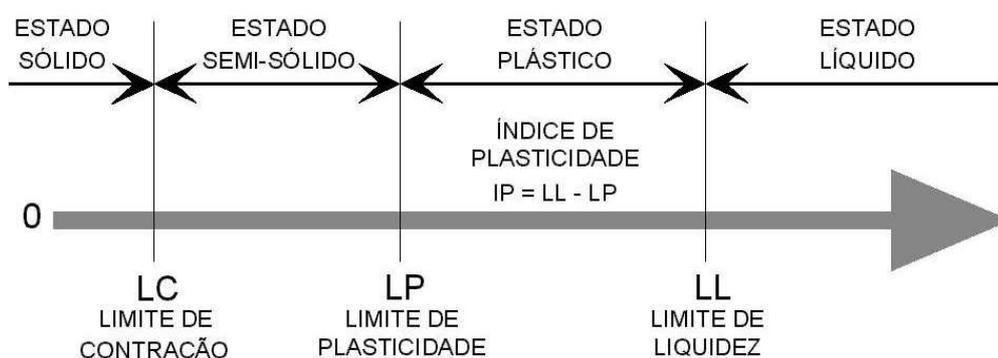
Fonte: Nogueira (2001).

### **2.2.3. Estados de consistência dos solos**

Propostos pelo engenheiro químico Atterberg, os índices de consistência dos solos foram adaptados e padronizados pelo professor de Mecânica dos Solos Arthur Casagrande, em 1948. Tratam-se de teores de umidade limites que o solo possui para se enquadrar no estado sólido, semi-sólido, plástico e líquido. A Figura 2.2 ilustra cada um desses estados que, foram assim descritos por Senço (1997):

Quando um solo se encontra no estado sólido, ou seja, onde não é possível trabalhá-lo, e o mesmo adquire um certo teor de umidade, passa para um estado denominado de semi-sólido, onde se desagrega ao ser trabalhado; o limite entre essas

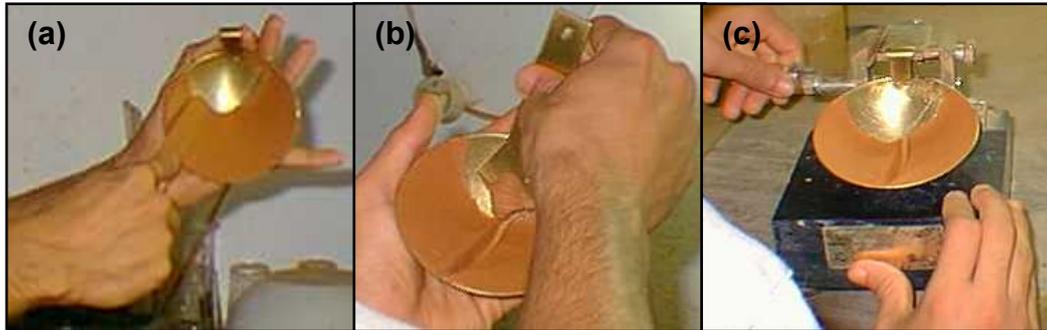
umidades é denominado de limite de contração; continuando a ganhar umidade esse solo atinge o estado plástico, onde é facilmente trabalhável, sendo o limite de umidade entre esse estado e o anterior denominado de limite de plasticidade; atingindo umidade extremamente elevada o solo se apresenta como um fluido denso e se diz no estado líquido, sendo o limite entre esse estado e o anterior denominado de limite de liquidez. A diferença entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), é expressa pelo índice de plasticidade IP; quanto maior esse índice maior será a plasticidade do solo.



**Figura 2.2 – Estados de consistência dos solos.**

Em estradas, é prática corrente utilizar apenas os índices LL e LP, cuja diferença fornece o parâmetro denominado índice de plasticidade (IP). A determinação do LL é realizada, em laboratório, pelo uso do aparelho de Casagrande, ilustrado na Figura 2.3, que consiste, de uma concha metálica que acionada por uma manivela golpeia a base do citado aparelho; nessa concha, coloca-se uma porção de solo que passou anteriormente na peneira de abertura nominal de 0,42 mm, homogeneizada com adição de água, e procede-se através de um cinzel uma ranhura no meio do solo devidamente colocado na concha; em seguida, golpeia-se a concha até que as duas porções de solo se unam em pelo menos 1 cm de comprimento. Faz-se esse procedimento para vários teores de umidade, plotando-se, em seguida, em um gráfico de coordenadas e no eixo das abscissas, os teores de umidade e no eixo das ordenadas, em escala logarítmica, o número de golpes; obtém-se dessa forma,

uma reta, sendo o LL definido como o teor de umidade correspondente à 25 golpes.



Fonte: Laboratório de Geotecnia da UFV.

**Figura 2.3** – Seqüência para determinação do limite de liquidez de solos utilizando-se do aparelho de Casagrande: (a) preenchimento da concha em pelo menos  $\frac{3}{4}$  com a massa de solo; (b) execução da ranhura com o cinzel; e (c) movimento da manivela.

O limite de plasticidade (LP) é determinado, em laboratório, com a mesma porção de solo que passou na peneira de abertura nominal de 0,42 mm, e foi homogeneizada com adição de água, para a determinação do LL. Com essa massa plástica, forma-se uma pequena bola, que é rolada, com o auxílio da pressão da palma da mão, sobre uma placa de vidro esmerilhada, com o intuito de formar um cilindro de dimensões aproximadas de um cilindro padrão de 3 mm de diâmetro. Quando o cilindro rolado sobre a placa se rompe e atinge 3 mm de diâmetro, determina-se o teor de umidade desse ponto, em estufa à 105-110 °C. O ensaio é repetido, pelo menos 5 vezes, com a amostra de solo e o LP determinado com a média das 5 determinações de umidade acima, com desvio de, no máximo, 5 %.

A bentonita, que é uma argila natural, possui, segundo Cardoso (1994), os seguintes valores de limites de consistência: LL – 221 %; LP – 66 %; e IP – 155 %. De forma análoga, o Quadro 2.4 apresenta valores típicos para alguns solos brasileiros, segundo Pinto (2000).

Nogami e Villibor (1995) mencionaram que o LL e o IP vêm sendo usados para avaliar a variação de volume de solos compactados, seja por contração ou por expansão, características essas indesejáveis para a construção rodoviária.



Dessa forma alguns métodos de dimensionamento de pavimentos limitam os valores para esses índices, como é o caso do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNIT (1996, p. 204), que, em se tratando de materiais para base de pavimentos, adota como valores máximos de aceitação para o LL e o IP, 25 % e 6 %, respectivamente.

**Quadro 2.4 – Valores típicos de limites de Atterberg de solos brasileiros**

<b>Solo</b>	<b>LL (%)</b>	<b>IP (%)</b>
Residual de arenito (arenoso fino)	29-44	11-20
Residual de gnaisse	45-55	20-25
Residual de basalto	45-70	20-30
Residual de granito	45-55	14-18
Argila orgânica de várzea quaternária	70	30
Argila orgânica de baixada litorânea	120	80
Argila porosa vermelha de São Paulo	65-85	25-40
Argila variegada de São Paulo	40-80	15-45
Areia Argilosa variegada de São Paulo	20-40	5-15
Argila dura, cinza, de São Paulo	64	42

Fonte: Modificado de Pinto (2000).

#### **2.2.4. Equivalente de areia (EA)**

Desenvolvido por Hveen, em 1953, é relatado pelo DNIT (1996, p. 62), como sendo a relação entre a altura de areia depositada após 20 min de sedimentação e a altura de areia depositada mais a de finos, silte e argila, em suspensão, empregando-se para tanto, uma solução aquosa de cloreto de cálcio.

Nogami e Villibor (1995) mencionaram que o equivalente de areia tem sido muito usado na avaliação das possibilidades de uso de solos granulares em pavimentação rodoviária. Para o dimensionamento de pavimentos flexíveis (DNIT, 1996, p. 204), estabeleceu-se que, caso o LL e o LP não atenderem às

especificações técnicas, as quais são máximos de 25 % e 6 %, respectivamente, pode-se empregar o material em camada de base, satisfeitas as demais condições, desde que o EA seja superior a 30 %.

### **2.2.5. Compactação de solos**

O termo compactação de solos refere-se aqui, à ação mecânica susceptível de provocar nesses uma diminuição no índice de vazios, conseguida às custas da redução de volume da fase gasosa, sendo praticamente mantido constante, o teor de água do solo, ao longo de todo o processo (GUEDES DE MELO, 1985). O processo visa obter um material estruturado, através do contato mais íntimo das partículas constitutivas, de tal forma que possa-se manter um comportamento mecânico adequado, para algum fim de engenharia durante toda a vida útil da obra, cabendo ao executor relacionar as propriedades requeridas ou desejáveis.

Com relação à compactação em rodovias, Rico e Del Castillo (1974) mencionam que as propriedades requeridas podem variar de caso a caso e que a resistência, a compressibilidade e uma adequada relação esforço-deformação figuram entre aqueles parâmetros nos quais sempre se busca um melhoramento, ficando a permeabilidade e a flexibilidade como as menos pretendidas porém, não menos importantes.

Em estradas, a compactação se insere como umas das técnicas disponíveis de estabilização mecânica de solos, correntemente utilizada na execução de camadas constitutivas de pavimentos rodoviários onde se utiliza o solo como material de construção, com o intuito, segundo o DNIT (1996, p. 68), de se obter uma máxima estabilidade e atenuar possíveis recalques devido à ação do tráfego. Para Lima e Bueno et al., (1993) a estabilização mecânica de solos, com fins rodoviários, refere-se ao processo de tratamento de uma solo com a finalidade de minimizar sua porosidade, pela aplicação repetida de cargas, pressupondo-se que, à redução no volume de vazios, relaciona-se um ganho de resistência mecânica.

Pinto (2000), referindo-se à construção de aterros, menciona que, um solo transportado e depositado fica num estado relativamente fofo e

heterogêneo, sendo pouco resistente, muito deformável e, apresentando um comportamento diferente de local para local; nesse caso, a compactação tem em vista dois aspectos: (i) aumentar a intimidade de contato entre os grãos; e, (ii) tornar o aterro mais homogêneo. O referido autor, menciona ainda que o aumento da densidade ou redução do índice de vazios é desejável não por si, mas porque diversas propriedades de engenharia do solo melhoram com isto.

Na pavimentação de rodovias, a compactação de solos em laboratório é importante por duas razões, segundo concepção do TRB (1976): (a) adequado nível de compactação é exigência de qualquer processo construtivo para execução de camadas compactadas; e, (b) a massa específica seca máxima é usada no controle em campo da qualidade do produto final. Acrescenta-se, também, que, em decorrência da redução da porcentagem de vazios de ar proporcionada pela compactação, reduz-se o intervalo de variação dos teores de umidade dos materiais constitutivos do pavimento rodoviário, significando maior permanência das condições adquiridas logo após o processo.

#### **2.2.5.1. Histórico**

Se têm relatos de que a compactação de solos figura entre as técnicas de construção mais remotas de que se tem conhecimento. Os métodos de pisoteamento de pessoas ou animais em épocas mais antigas, como por exemplo na construção de grandes obras hidráulicas em diversas partes da Ásia e, um antigo cilindro de compactação utilizado pelos Maias, para construção de importantes caminhos que uniam os principais centros cerimoniais, foram mencionados por Rico e Del Castillo (1974). Ressalta-se que o cilindro de compactação dos Maias era um cilindro de pedra que media 4 m de comprimento com um diâmetro de 0,65 m e um peso aproximado de 5.000 kg, necessitando, provavelmente, de 15 homens para sua utilização. Os autores citam, ainda, o cilindro pata de cabra de Fitzgerald que pesava 2.000 kg e as investigações básicas de laboratório de O.J. Porter em 1928 e 1929, que permitiram o início da aplicação das técnicas de compactação na construção de estradas.

No entanto, o início de emprego da técnica de compactação em obras civis é creditada ao engenheiro norte-americano Ralph Proctor que, em 1933, publicou suas observações sobre compactação de aterros em solos, estabelecendo os princípios básicos da técnica e controle de compactação, como se segue: “[...] a densidade que um solo atinge quando compactado sob uma dada energia de compactação depende da umidade do solo no momento da compactação.” Do trabalho de Proctor (1933) surgiu o ensaio de compactação, universalmente padronizado com pequenas variações, que é mais conhecido como ensaio normal de Proctor ou AASHTO Standard. Pinto (2000) destaca que, historicamente, Porter já em 1929 empregava um ensaio muito semelhante, que não teve, porém, a mesma divulgação no meio técnico que o trabalho de Proctor.

#### 2.2.5.2. A técnica

Em laboratório, a técnica de compactação de solos com vistas ao melhoramento de suas propriedades geotécnicas para algum fim de engenharia é executada, experimentalmente, através do ensaio dinâmico desenvolvido por Proctor (1933), para determinação da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo. Padronizado pelo DNIT (1994a) consiste em compactar o solo em três camadas sucessivas, dentro de um molde cilíndrico (diâmetro = 10 cm e altura = 12 cm), utilizando-se um soquete de 2,5 kg, caindo em queda livre de um altura de 30 cm, sendo aplicados 26 golpes/camada. O ensaio assim descrito refere-se à energia ou esforço de compactação denominado de normal, calculado de acordo com a equação 2.1 e correspondente à aproximadamente 6 kg/cm<sup>2</sup>.

$$E_c = \frac{M \times H \times N_g \times N_c}{V} \quad (\text{equação 2.1})$$

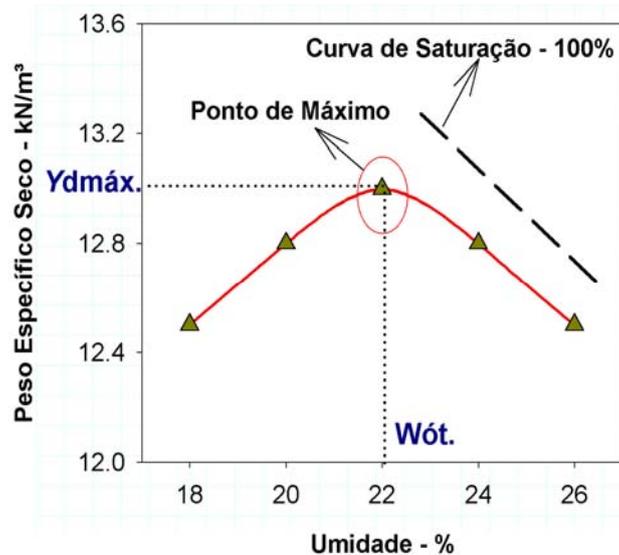
Em que,

**E<sub>c</sub>** – energia de compactação, kg/cm<sup>2</sup>; **M** – massa do soquete, kg;

**H** – altura de queda do soquete, cm; **N<sub>g</sub>** – número de golpes aplicados;

**N<sub>c</sub>** – número de camadas a compactar; e **V** – volume do molde, cm<sup>3</sup>.

O ensaio Proctor é repetido para amostras de solo, usualmente compactadas em cinco teores de umidade crescentes, espaçados de 2 em 2 %, determinando-se para cada uma delas o peso específico aparente seco, após a compactação. Com os valores obtidos, procede-se à representação gráfica da densidade seca em função da umidade de moldagem, obtendo-se, assim, a chamada curva de compactação dos solos, conforme ilustração da Figura 2.4.



**Figura 2.4** – Curva de compactação obtida via ensaio normal de Proctor, com amostras de um mesmo solo preparadas em cinco teores crescentes de umidade.

Na Figura 2.4, é possível observar um ramo ascendente, chamado de ramo seco, e um descendente, denominado por ramo úmido, bem como o ponto de máximo da curva de compactação, que define o peso específico seco máximo ( $\gamma_{dmáx.}$ ), usualmente expresso em  $g/cm^3$  ou  $kN/m^3$ , e ao qual é correspondente o teor de umidade ótima ( $W_{ót.}$ ), expresso em %. No próprio gráfico do ensaio, pode-se traçar a curva de 100 % saturação, que é paralela ao ramo úmido e que corresponde ao lugar geométrico dos valores de umidade e densidade seca estando o solo saturado. A curva de saturação equivalente à 100 % representa, teoricamente, que o solo possui zero espaços vazios ocupados por ar o que, na prática, é inatingível.

Em função do uso de equipamentos de compactação com maiores pesos houve a necessidade de se alterar o esforço de compactação em laboratório, visando correlacioná-lo com o esforço de compactação em campo, surgindo, assim, o ensaio modificado de Proctor ou AASHTO modificado. Alguns órgãos rodoviários, dentre eles o DNIT (*Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes*), adotam uma energia de compactação intermediária à do Proctor normal e do Proctor modificado. Todas as características de compactação das três energias mencionadas anteriormente encontram-se listadas no Quadro 2.5.

**Quadro 2.5 – Características da compactação de solos em laboratório**

Energia	Características da Compactação			
	Soquete	Queda	Camadas	Golpes/Camada
Normal (6 kg/cm <sup>2</sup> )	2,5 kg	30 cm	3	26
Intermediária (13 kg/cm <sup>2</sup> )	4,5 kg	45 cm	3	21
Modificada (29 kg/cm <sup>2</sup> )	4,5 kg	45 cm	5	27

Fonte: DNIT (1994a).

A escolha do esforço de compactação a ser empregado dependerá da finalidade da obra. Medina (1997) menciona que nas camadas mais importantes dos pavimentos rodoviários, o ensaio de Proctor Modificado é tomado como referência, justificado pela melhoria das propriedades do solo, em função das solicitações do tráfego.

### 2.2.5.3. Variáveis influentes no processo

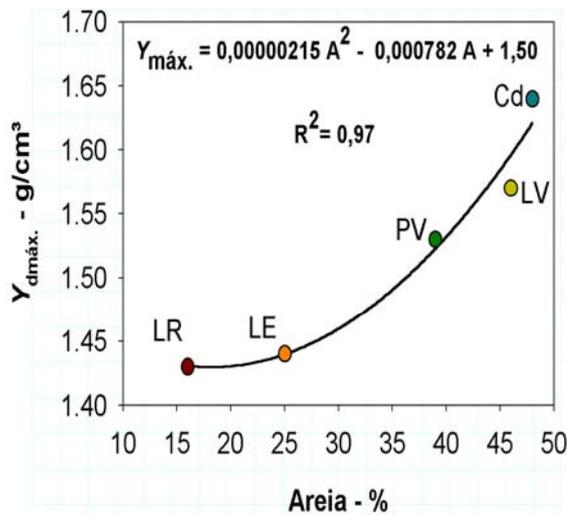
A eficiência da técnica de compactação dos solos depende de vários fatores; dentre esses, citam-se: (i), tipo de solo, energia de compactação, e tipo de compactação (RICO; DEL CASTILLO, 1974; SOUZA, 1980; DIAS JÚNIOR; MIRANDA, 2000; PESSOA, 2004); (ii) capacidade de adsorção de água do solo (MALTONI, 1994); (iii) conteúdo de água do solo e recompactação de amostras

(RICO; DEL CASTILLO, 1974; SILVA et al., 1986; BUENO; LIMA et al., 1992; DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996); e secagem prévia das amostras (PESSOA, 2004).

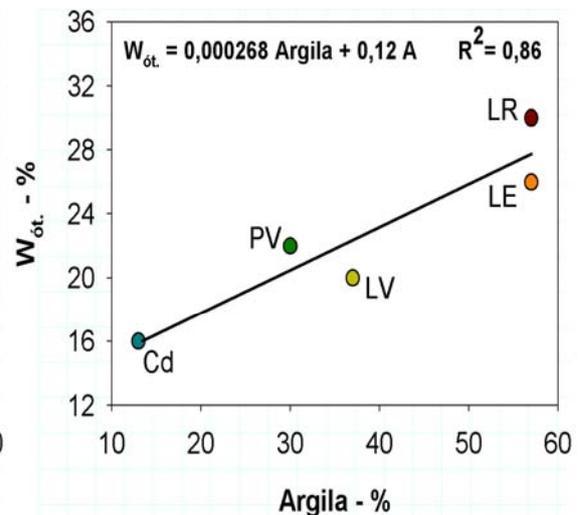
A classe de solo com que se trabalha influencia de maneira decisiva no processo de compactação. A granulometria dos solos dita a forma das curvas de compactação de tal forma que solos bem graduados apresentam curvas de compactação com um máximo acentuado, encontrando-se curvas achatadas em solos de graduação uniforme (DNIT, 1996, p. 68).

A influência da textura e do teor de matéria orgânica nas curvas de compactação dos solos, pode ser evidenciada na Figura 2.5, referente aos estudos executados por Dias Júnior e Miranda (2000), em cinco amostras de solos da Região de Lavras-MG. Os referidos autores descreveram que o aumento da densidade máxima do solo segue a mesma tendência da fração areia, devido, provavelmente, à maior capacidade de empacotamento das partículas em função da forma irregular dos grãos de areia; já os valores de umidade ótima seguiram a mesma tendência do teor de argila, o que está relacionado com a capacidade de adsorção de água. Através do teor de matéria orgânica dos solos pôde-se chegar, também, a um modelo para se estimar a densidade máxima do solo, notando-se que esses dois parâmetros são inversamente proporcionais.

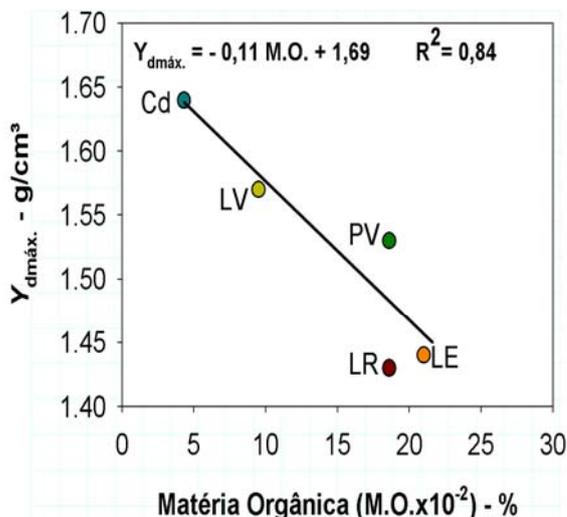
O aumento da energia de compactação produz os seguintes efeitos na curva de compactação de um solo, conforme ilustração da Figura 2.6: (a) ocorre deslocamento da curva para a esquerda e para cima proporcionando menores valores de umidade ótima e maiores valores de peso específico seco máximo; (b) para teores de umidade abaixo da ótima, a aplicação de maior energia leva ao aumento do peso específico seco; e, (c) para valores de umidade acima da ótima, a aplicação de maior esforço de compactação pouco contribui para o aumento da densidade seca, notando-se que os ramos úmidos, para diferentes energias, ficam bem próximos; isso ocorre porque não se consegue expelir mais o ar dos vazios.



a) Massa específica seca máxima do solo em função do teor de areia



b) Umidade ótima de compactação em função do teor de argila



c) Massa específica seca máxima do solo em função do teor de matéria orgânica

**LEGENDA:**

- LR – Latossolo Roxo;
- LE – Latossolo Vermelho-Escuro;
- LV – Latossolo Vermelho-Amarelo;
- PV – Podzólico Vermelho-Amarelo;
- Cd – Cambissolo Distrófico.

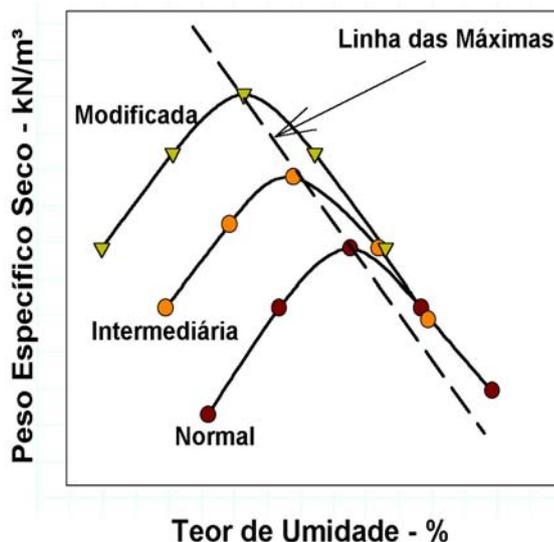
Fonte: Dias Júnior e Miranda (2000).

**Figura 2.5** – Influência da textura e do teor de matéria orgânica nos parâmetros ótimos de compactação de amostras de solos da região de Lavras-MG.

A pouca eficiência do aumento do esforço de compactação, em termos de ganhos de densidade específica, para teores de umidade situados no ramo úmido da curva de compactação, é um fenômeno que também pode ser observado em campo, conforme relato de Pinto (2000):



Quando o solo se encontra muito úmido, a insistência de passagem do rolo compactador provoca pouca eficiência na compactação levando ao fenômeno conhecido como *borrachudo*, em que o solo se comprime (bolhas de ar ocluso) com a passagem do equipamento, se dilatando logo em seguida.



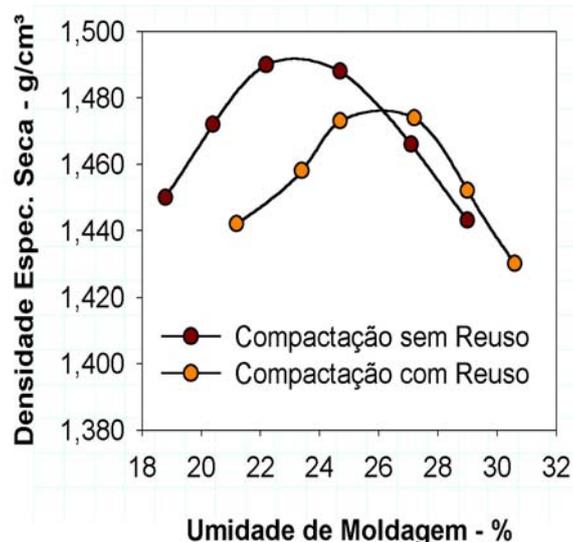
**Figura 2.6** – Curvas de compactação de um solo em diferentes energias.

Em laboratório, os tipos de compactação podem ser assim descritos: compactação dinâmica ou por impacto (por ação de queda do soquete), compactação por carregamento estático e compactação por pisoteamento ou amassamento (uso de um pistão com mola que é golpeado contra o solo, sendo esse método, empregado para simular, por exemplo, a ação do rolo pé-de-carneiro e avaliar a influência sobre a estrutura de solos argilosos). Rico e Del Castillo (1974) mencionaram que o tipo de compactação produz resultados diferentes, tanto na estrutura de um solo como nas propriedades do material que se compacta.

No ramo seco da curva de compactação, o conteúdo de água do solo que se compacta é uma variável fundamental do processo, principalmente no caso de solos finos argilosos, conforme destacado por Rico e Del Castillo (1974), onde, a baixos conteúdos de água, esta se encontra em forma capilar, produzindo compressões entre as partículas constituintes do solo, as quais,

tendem a formar grumos dificilmente desintegráveis que dificultam a compactação. Com o aumento do conteúdo de água diminui-se a tensão capilar e o aglutinamento dos grumos, ocorrendo o efeito de lubrificação entre partículas, o que aumenta a eficiência da energia de compactação. No ramo úmido, se o conteúdo de água é tal que há excesso de água livre capaz de encher os vazios do solo, isto impede uma boa compactação, visto que esta água não pode deslocar-se instantaneamente como resultado do efeito mecânico que está sendo aplicado, sendo que no ramo úmido da curva de saturação.

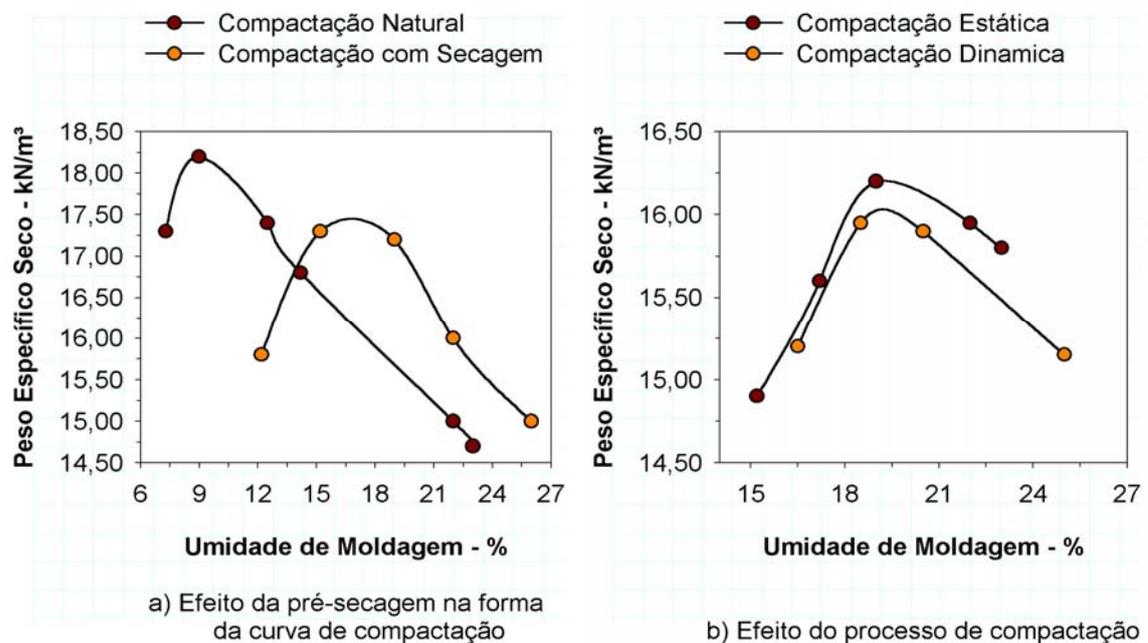
Quando não se dispõe de material em quantitativos suficientes para a realização do ensaio de compactação dos solos em laboratório, é prática corrente utilizar-se de uma mesma amostra para a determinação de todos os pontos da curva, ou seja, compactação com reuso ou recompactação. De acordo com dados de Bueno e Lima et al. (1992), ilustrados na Figura 2.7, referentes à compactação de um solo saprolítico da região de Viçosa-MG compactado na energia do Proctor normal, com e sem reuso da amostra, tem-se que, devido à quebra de partículas, a amostra reutilizada levou a menor valor de peso específico seco máximo e maior valor de umidade ótima.



Fonte: Modificado de Bueno e Lima et al., (1996).

**Figura 2.7** – Curvas de compactação de solo saprolítico da região de Viçosa, MG, compactado na energia do ensaio Proctor normal, sendo a amostra ensaiada com e sem reuso.

Pessoa (2004), em estudos geotécnicos com solos da região petrolífera de Urucu-AM, comparou amostras de mesmos solos compactadas com e sem secagem prévia e por dois métodos de compactação distintos, conforme ilustração da Figura 2.8, que evidencia apenas os dados referentes à jazida denominada 2. A secagem levou a menor valor de peso específico seco máximo e maior teor de umidade ótima quando comparado com a compactação sem secagem; quanto ao processo de compactação, esse pouco influenciou no teor de umidade ótimo, sendo notado um ligeiro aumento no  $\gamma_{dm\acute{a}x.}$  para a compactação por processo estático.



Fonte: Modificado de Pessoa (2004).

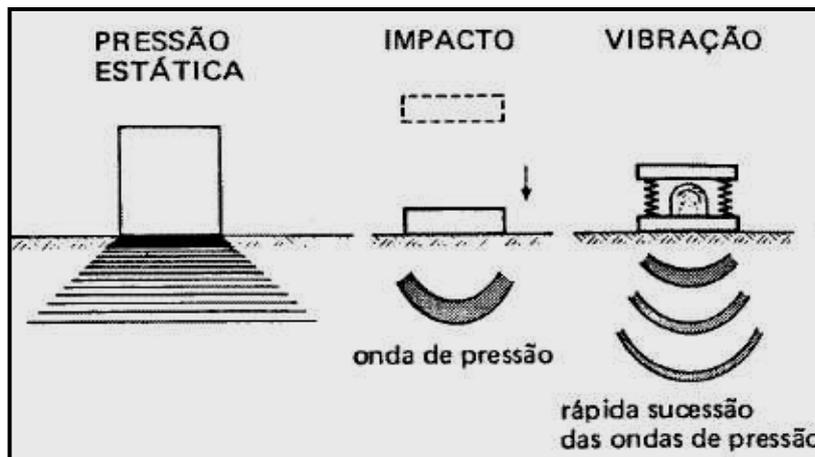
**Figura 2.8** – Aspectos da compactação de um solo da região amazônica.

#### 2.2.5.4. Compactação de solos in situ

Serão apresentados os seguintes tópicos sobre compactação em campo: (i) tipos de compactação e equipamentos; (ii) o controle tecnológico e (iii) especificações.

## Tipos de compactação e equipamentos

Definida a energia pretendida para a compactação de um solo em campo, para algum fim de engenharia específico, pode-se diferenciar três maneiras distintas de se transmitir essa energia, de acordo com Souza (1980) e ilustração apresentada na Figura 2.9, extraída de Trindade e Lima et al., (2003): (i) por pressão; (ii) por impacto; e (iii) por vibração; citadas na ordem decrescente de duração das tensões impostas.



Fonte: Trindade e Lima et al., (2003).

**Figura 2.9** – Tipos de compactação de solos em campo.

Na aplicação de pressão estática, efetuada através de rolos estáticos de cilindro liso de aço, de pneu e pé-de-carneiro, ocorrem inicialmente deformações plásticas, predominando logo em seguida, deformações elásticas à medida que o solo vai se densificando. A compactação, em campo, realizada por impacto, seja pelo uso de apiloadores ou cargas de impacto, gera uma onda de pressão que atua em grandes profundidades. No caso do emprego de vibração, através de rolos e compactadores vibratórios, produz-se o deslocamento de sucessivas e rápidas ondas de pressão que movimentam as partículas e reduzem o atrito entre elas, favorecendo o processo de compactação.

A seguir apresenta-se uma descrição sucinta dos equipamentos usuais de compactação de solos no campo, de acordo com as prescrições de Rico e

Del Castillo (1974), Souza (1980) e Trindade e Lima et al., (2003), sendo apresentado no Quadro 2.6 os tipos de rolos que se aplicam aos mais variados tipos de solos:

- rolos lisos de roda de aço – compreendem os rolos de 3 rodas (rolo macadame) e os rolos tandem de 2 ou 3 eixos. As características que regem o seu comportamento são a carga por unidade de largura das rodas, a largura, e o diâmetro das rodas. São empregados na compactação de pedregulhos e de areias bem graduadas, sendo muito utilizados como rolos de acabamento;
- rolos pé-de-carneiro – são equipamentos constituídos por cilindros metálicos ocos, nos quais são adaptadas hastes metálicas (“patas” ou “pés”) de comprimento variando de 15 a 25 cm. A performance desses equipamentos é afetada pela pressão de contato, área de contato de cada pé, número de passadas por cobertura, que são dependentes do peso total do rolo, número de pés em contato com o solo, e número de pés por tambor. São muito eficientes na compactação de solos coesivos;
- rolos pneumáticos – são classificados em rolos rebocados com 2 eixos e com 1 eixo, e rolos autopropulsores. Os rebocados com um eixo são sempre rolos pesados usados na operação de verificação da compactação, os autopropulsores tem peso total variando entre 8 e 36.000 kg, e os rebocados com 2 eixos são rolos leves (10.000 a 13.000 kg). Pode-se citar como vantagens desses tipos de equipamentos a universalidade de emprego, exceção feita às areias de granulometria uniforme, e a flexibilidade na área de contato, evitando choques e localização de pressões muito elevadas;
- rolos vibratórios – todos equipamentos acima podem ser dotados de vibração. Referindo-se aos rolos vibratórios lisos de rodas de aço, esses podem ser de um (rebocado) ou dois cilindros, podendo ser um ou os dois cilindros dotados de vibração. Possuem peso total variando de 1.000 a 10.000 kg; a nível de Brasil, empregada-se comumente, o rolo rebocado de um cilindro com 3.000 kg. Seu rendimento é

influenciado pela frequência de vibração, amplitude, carga dinâmica (F), carga estática (P), razão P/F, e forma e dimensões da área de contato com o solo. Sua maior eficácia está nos materiais não coesivos, dotados de elevado atrito interno, visto que, com a vibração, diminui-se momentaneamente o atrito entre os grãos, facilitando-se a sua aproximação; ocorre, também, um rearranjo progressivo das partículas;

- tratores de esteira – pelo fato de vibrarem e pela facilidade de circulação sobre o material que está sendo compactado, foram muito empregados na compactação de areias e outros tipos de solos granulares, antes do aparecimento dos rolos vibratórios;
- soquetes mecânicos – os chamados “sapos”, possuem o mesmo princípio de compactação dinâmica em laboratório. Têm um peso aproximado de 100 kg, e são empregados nas situações onde é difícil o acesso de equipamentos maiores.

### O controle em campo

A combinação ideal de parâmetros de compactação a se atingir em campo, em se tratando de obras rodoviárias, está relacionada às exigências de projeto e é dependente do processo construtivo empregado; na pavimentação de rodovias, busca-se, com essa técnica, a máxima estabilidade e atenuação das deformações decorrentes do tráfego (SILVA, 1968; RICO; DEL CASTILLO, 1974; SOUZA, 1980; LIMA; BUENO et al.; 1993; SENÇO, 1997).

Com suporte nos ensaios de compactação executados em laboratório, onde definem-se o par de valores  $W_{ót.}$  e  $\gamma_{dmáx.}$ , busca-se reproduzir esses parâmetros em campo, com o equipamento de compactação, dentro de certas especificações. Souza (1980) descreveu dois tipos de controles que podem ser executados: (i) controle da execução de serviço – onde controla-se o equipamento, nº de passadas, espessura da camada, teor de umidade, dentre outros e (ii) controle do produto finalizado – onde controla-se o grau de compactação, o índice de compacidade, a porosidade e a porcentagem de vazios preenchidos com ar.

**Quadro 2.6** - Características e aplicações dos rolos compactadores

Rolo	Camada		Solo
	Espessura**	Uniformidade	
Pé-de-Carneiro estático (20.000 kg*)	40 cm	Boa	Argila e siltes
Pé-de-Carneiro vibratório (30.000 kg*)	40 cm	Boa	Misturas de areia com silte e argila
Pneumático leve (15.000 kg*)	15 cm	Boa	Misturas de areia com silte e argila
Pneumático pesado (35.000 kg*)	35 cm	Muito boa	Praticamente todos
Vibratório com rodas metálicas lisas (30.000 kg*)	50 cm	Muito boa	Areias, cascalhos e materiais granulares
Liso metálico estático 3 rodas (20.000 kg*)	10 cm	Regular	Materiais granulares e brita
Grade – malhas (20.000 kg*)	20 cm	Boa	Materiais granulares, ou em blocos
Combinados (20.000 kg*)	20 cm	Boa	Praticamente todos

Fonte: Modificado de Trindade e Lima et al., 2003.

\*Peso em termos máximos; \*\*Máxima após a compactação

O grau de compactação (GC) e o índice de compacidade (IC) são expressos, respectivamente, pelas equações 2.2 e 2.3, que se seguem:

$$GC = \left( \frac{\gamma_{d \text{ campo}}}{\gamma_{d \text{ máx}}} \right) \times 100$$

(equação 2.2)

$$IC = \frac{(\gamma_{d \text{ campo}} - \gamma_{d \text{ solto}})}{(\gamma_{d \text{ máx}} - \gamma_{d \text{ solto}})} \times 100$$

(equação 2.3)

Em que,

GC – grau de compactação, %;

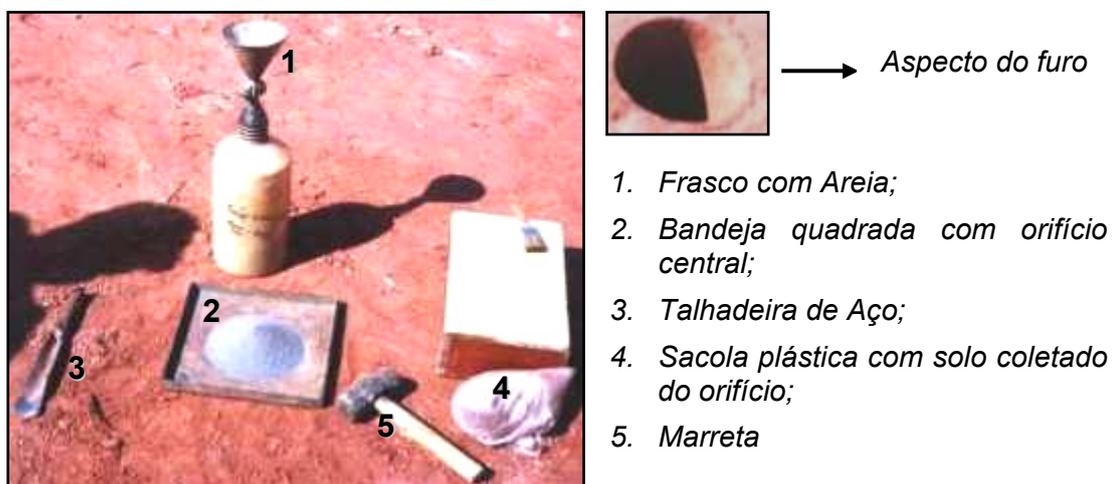
$\gamma_{d \text{ campo}}$  – peso específico aparente seco obtido após compactação no campo,  $\text{kN/m}^3$ ;

$\gamma_{d \text{ máx.}}$  – peso específico aparente seco máximo obtido em ensaio de compactação em laboratório,  $\text{kN/m}^3$ ;

IC – Índice de compacidade, %;

$\gamma_{d \text{ solto}}$  – peso específico aparente seco do solo no estado solto,  $\text{kN/m}^3$ .

O  $\gamma_{d \text{ campo}}$ , é obtido, comumente, em se tratando de obras rodoviárias, através do método do *funil e areia* que é normatizado pelo DNIT (1994b). Esse método consiste em determinar o peso específico aparente seco do solo “in situ” através da realização de um furo, no local de controle, com diâmetro aproximado de 10 cm e altura de 15 cm, usando-se em seguida a areia contida no frasco, para preenchê-lo, determinando-se assim o seu volume. A areia é constituída da fração com diâmetro dos grãos compreendido entre 1,2 e 0,59 mm. As ferramentas utilizadas nesse método encontram-se ilustradas na Figura 2.10.



**Figura 2.10** – Materiais empregados no controle pelo método do funil e areia.

Para se obter o  $\gamma_{d \text{ campo}}$ , divide-se o peso do solo extraído do furo pelo volume determinado pelo emprego da areia, cuja densidade é conhecida; em



seguida, determina-se o teor de umidade do solo proveniente do furo, podendo-se fazer-se uso dos seguintes métodos descritos no Quadro 2.7. O método da estufa, quando possível, deve ser preferencialmente empregado, por razões de precisão, entretanto, o controle de compactação em campo exige rapidez, ou seja, se executam mais de uma camada, seja para construção de um aterro ou de um pavimento rodoviário, por dia, podendo-se dessa forma, fazer uso também de métodos menos precisos como o do speedy, quando se tratar de solos granulares, e até mesmo dos métodos de queima com álcool e secagem em frigideira, que apresentam limitações devido a presença de matéria orgânica. Destaca-se, também, a possibilidade de uso do forno microondas.

**Quadro 2.7 – Métodos para determinação do teor de umidade**

<b>Método</b>	<b>Princípio</b>	<b>Vantagem</b>	<b>Desvantagem</b>
Estufa	estufa à 110 °C ± 5 °C por no mínimo 12 h	método de referência, menos de 5 % erro	lentidão
Álcool	queima com álcool por 30 min	rapidez e simplicidade	precisão maior que 5 % e perigo de queima de parte dos componentes do solo
Frigideira	secagem em frigideira por 45 min	rapidez e simplicidade	precisão maior que 5 % e perigo de queima de parte dos componentes do solo
Speedy	uso de carbureto de cálcio por 10 min	rapidez e simplicidade	precisão maior que 5 % e problemas com solos muito plásticos

#### Especificações de compactação em campo

A importância e a necessidade de conhecimento do teor de umidade ótimo e do peso específico seco máximo dos solos, determinados no ensaio de compactação em laboratório, está no fato de que, durante toda a execução das camadas do pavimento rodoviário, esses parâmetros são fundamentais, ou seja, definidores na tomada de decisão de todo o processo. As especificações

do grau de compactação em campo, no caso de pavimentos rodoviários, depende do tipo de camada que se deseja construir. Assim sendo, para reforço do subleito, Souza (1980), fazendo menção ao DNIT, descreve o GC de no mínimo 100 % referente à energia do ensaio Proctor Intermediário, e a variação da umidade de  $\pm 2$  % em relação a  $W_{ót.}$ ; já para base de pavimentos, tem-se comumente usado uma compactação com GC de 95-100 % dos ensaios Proctor Intermediário ou Modificado (TRINDADE; LIMA et al., 2003).

### **2.3. Resistência mecânica**

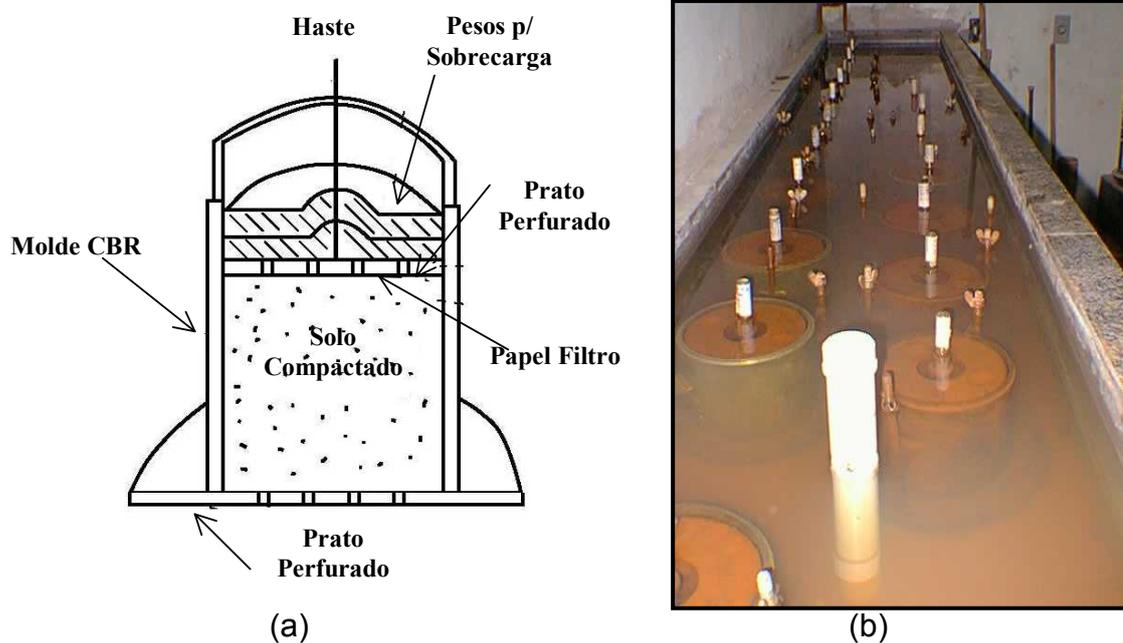
Para a avaliação da resistência mecânica de solos compactados, é prática comum, usar em laboratório, com fins rodoviários, as seguintes determinações: (i) "California Bearing Ratio" (CBR) ou Índice de Suporte Califórnia (ISC); (ii) Resistência à Compressão Não-Confinada (RCNC); e (iii) Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT). Nas linhas que se seguem será feito um breve relato sobre cada um desses parâmetros.

#### **2.3.1. CBR**

O ensaio CBR foi preconizado por O. J. Porter em 1929; foi desenvolvido pela Divisão de Rodovias do Estado da Califórnia, EUA, e adotado pelo "U.S. Corps of Engineers," em 1943, que após introduzirem várias modificações divulgaram-no amplamente durante a Segunda Guerra Mundial (NOGAMI; VILLIBOR, 1995). É normatizado, ao nível de Brasil, pelo DNIT (1994c).

Trata-se de um índice de resistência de solos compactados, cuja seqüência simplificada de realização do ensaio, em laboratório, é a seguinte: (i) compactação do solo em camadas utilizando-se o cilindro Califórnia ( $d = 15,1$  cm e  $h = 17,9$  cm), cujas características são apresentadas na Figura 2.11a e no Quadro 2.8; (ii) adição de anéis de sobrecarga (5 lb ou 2,27 kg), para simular o peso do pavimento sobre o subleito; (iii) imersão em água, em tanque (Figura 2.11b), por período de 96 horas, para simular condição extrema de chuva; e (iv) rompimento em prensa própria, para a determinação do índice

CBR ou ISC, através da penetração de um pistão padronizado (área = 19,35 cm<sup>2</sup>) no solo compactado à velocidade de 1,27 mm/min.



**Figura 2.11** – Cilindro Califórnia e seus aparatos (a), e tanque de imersão (b).

**Quadro 2.8** – Características da compactação de solos para o ensaio CBR

Energia	Características da Compactação			
	Soquete	Queda	Camadas	Golpes/Camada
<b>Normal (6 kg/cm<sup>2</sup>)</b>	4,5 kg	45 cm	5	12
<b>Intermediária (13 kg/cm<sup>2</sup>)</b>	4,5 kg	45 cm	5	26
<b>Modificada (27 kg/cm<sup>2</sup>)</b>	4,5 kg	45 cm	5	55

Fonte: DNIT(1994c).

O CBR é computado como sendo a relação entre a pressão equivalente a uma determinada penetração do pistão no solo compactado e a mesma pressão à penetração obtida numa brita graduada de elevada resistência, adotada como padrão de referência, sendo seu valor expresso em %. No Quadro 2.9, encontram-se os valores de CBR para a referida brita, ressaltando-

se que, à nível de Brasil, além das penetrações constantes nesse quadro, são usuais, também, as de 0,03 e 0,05 polegadas.

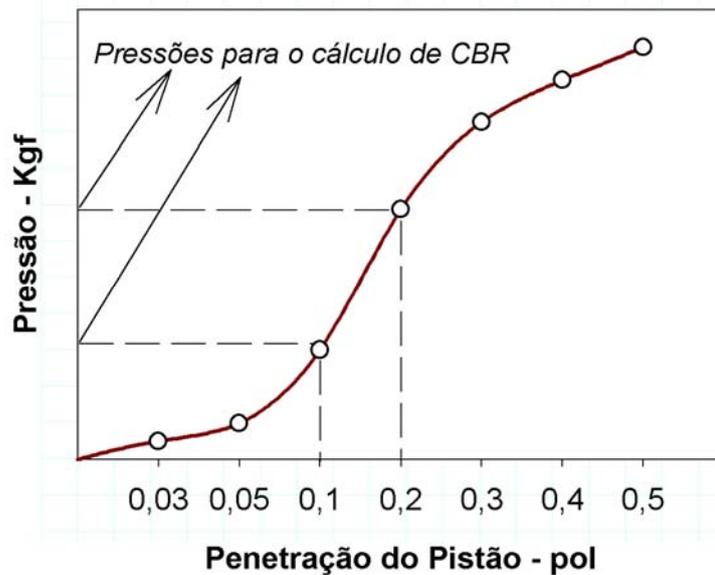
**Quadro 2.9 – Penetrações e pressões-padrão para a brita graduada**

<b>Penetração (polegadas)</b>	<b>Pressão-padrão (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>0,1</b>	70
<b>0,2</b>	105
<b>0,3</b>	133
<b>0,4</b>	161
<b>0,5</b>	182

Fonte: Souza (1980).

Traçada a curva pressão-penetração para o solo compactado, conforme ilustração na Figura 2.12, calcula-se o índice de CBR como sendo o maior valor de pressão obtido nas penetrações de 0,1 e 0,2 pol, expresso em %, tomando-se como referência as mesmas pressões obtidas nas respectivas penetrações da brita.

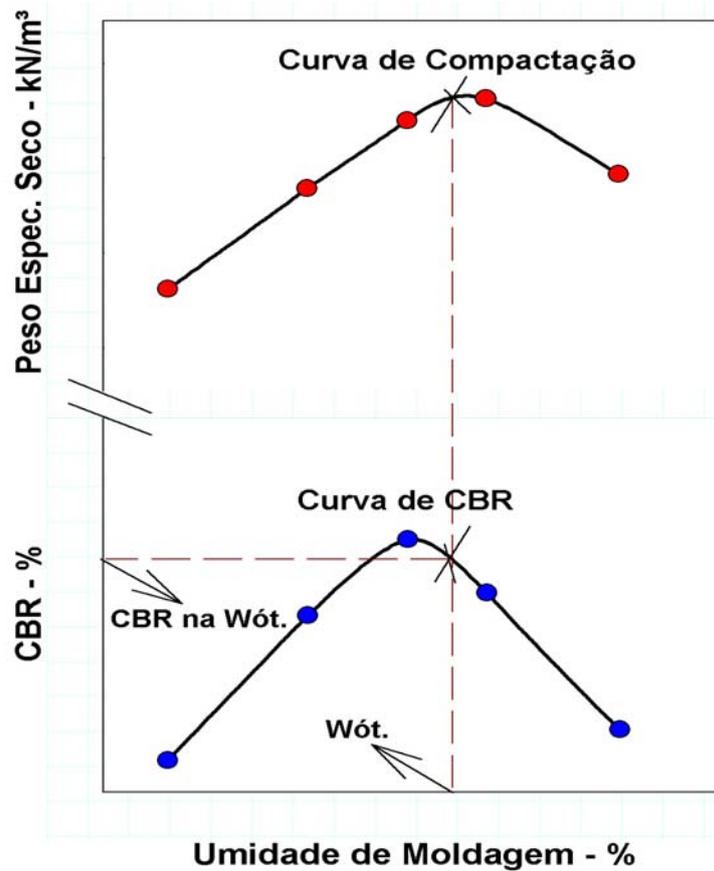
O ensaio de CBR pode ser realizado com a determinação de apenas 1 ponto (CBR<sub>1ponto</sub>), onde a compactação do solo é feita na  $W_{ót.}$ , previamente definida em ensaio de compactação; esse procedimento destina-se à caracterização do subleito. Existe, também, o CBR de cinco pontos (CBR<sub>5pontos</sub>), conforme ilustração da Figura 2.13, que visa minimizar variações no teor de umidade ótima; é destinado ao estudo de jazidas de empréstimo, podendo ser aplicado também, ao estudo de subleito.



**Figura 2.12** – Curva pressão *versus* penetração do ensaio CBR.

O DNIT (1996, p. 99) apresenta, em função dos grupos do sistema de classificação de solos TRB, valores prováveis de CBR, conforme ilustração do Quadro 2.10. Nesse, é possível observar que os solos granulares apresentam valores elevados de CBR e os solos finos baixos valores, que, em função do teor de matéria orgânica, podem chegar aos mínimos. Porém, destaca-se que essas correlações podem não ser adequadas para os solos de comportamento laterítico, segundo a concepção de Nogami e Villibor (1995).

O CBR permite determinar, por meio de equações empíricas, as espessuras das diversas camadas constitutivas do pavimento rodoviário, do tipo flexível, necessárias em função do tráfego. Contudo, no método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNIT (1996, p. 204), tem-se as seguintes condições para materiais granulares a serem empregados em obras rodoviárias, com referência ao parâmetro CBR: (i) quando se tratar de reforço do subleito, exigem-se materiais com CBR maiores que o CBR do subleito; (ii) para camada de sub-base, o CBR deve ser maior ou igual a 20 %; e (iii) os materiais empregados em camada de base, devem ter CBR de no mínimo 80 %, podendo-se aceitar, CBR de pelo menos 60 %, para o caso de carência de materiais e de número de solicitações do eixo padrão serem menores ou inferiores a  $5 \times 10^6$ .



**Figura 2.13**– Curvas de compactação e CBR<sub>5pontos</sub>, mostrando a obtenção da capacidade de suporte no teor de umidade ótimo.

**Quadro 2.10** – Valores prováveis de CBR em função do grupo TRB

Grupo TRB	CBR provável - %
A-1-a	40 a mais de 80
A-1-b	20 a mais de 80
A-2-4 e A-2-5	25 a mais de 80
A-2-6 e A-2-7	12 a 30
A-3	15 a 40
A-4	4 a 25
A-5	menos de 2 a 10
A-6 e A-7	menos de 2 a 5

Fonte: DNIT (1996, p. 99).

Pinto e Preussler (2001) mencionam que para um pavimento flexível dimensionado corretamente em função do índice CBR, as tensões capazes de provocar ruptura por cisalhamento e as deformações permanentes

(afundamento de trilha de roda) têm suas limitações admissíveis garantidas durante a vida útil do pavimento.

### **2.3.2. Resistência a compressão não confinada (RCNC)**

A resistência à compressão não confinada (RCNC) ou resistência à compressão simples é um caso particular do ensaio triaxial não drenado UU para tensão confinante zero; esse parâmetro fornece a resistência ao cisalhamento do solo para baixas tensões totais. Sua determinação, em laboratório, com finalidades rodoviárias, inicia-se pela compactação do solo, seja por carregamento estático ou dinâmico, em uma, três, ou cinco camadas, em moldes cilindros de várias dimensões. Posteriormente, rompem-se os corpos-de-prova assim confeccionados, em prensa de compressão simples. Geralmente, são moldados três corpos-de-prova para cada determinação e trabalha-se com a média dos resultados obtidos.

Da ruptura de corpos-de-prova em prensa específica (Figura 2.14a), onde se aplica uma força por unidade de área, produz-se a curva tensão *versus* deformação (Figura 2.14b), onde é possível visualizar os picos de ruptura, ou seja, condição em que os corpos-de-prova não suportam mais acréscimos de tensão, obtendo-se assim suas resistências máximas à deformação, em termos de tensão axial.

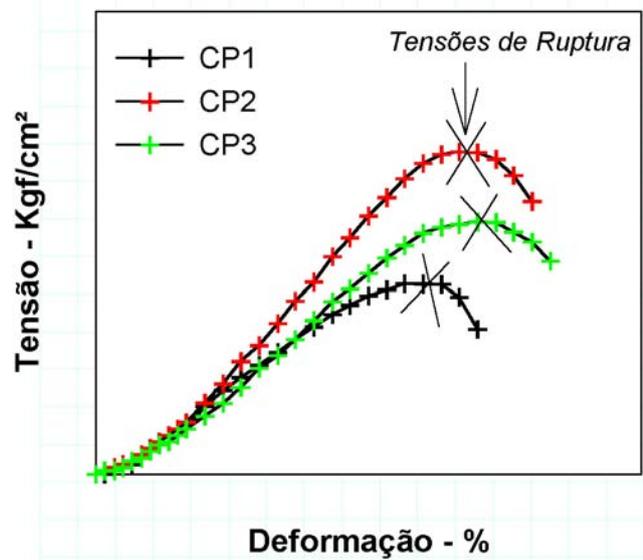
Quando não se atinge a carga máxima de ruptura, pelo fato do solo ser altamente deformável, o DNIT (1994d) determina a resistência à compressão não confinada como sendo o valor da tensão correspondente à carga em que ocorre uma deformação específica do corpo-de-prova de 20 %. Para fins rodoviários, se buscam maiores valores de RCNC e menores valores de deformabilidade.

O ensaio de RCNC é, corriqueiramente, usado na avaliação de ganhos de resistência em solos estabilizados com algum aditivo químico, como cal e cimento, por exemplo, pela sua facilidade, rapidez e pouca demanda de material. Em razão disso, nas normas do DNIT (1996, p. 22) definem-se os limites para utilização com base nesse parâmetro apenas para misturas solo e aditivo químico. Entretanto, esse ensaio fornece valores de resistência quando

da falta de confinamento, fato esse importantíssimo quando se trabalha com solos granulares.



(a)



(b)

Fonte: Laboratório de Geotecnia da UFV.

**Figura 2.14** – Prensa para a realização do ensaio de compressão não confinada (a) e curvas tensão *versus* deformação de solos compactados(b).

### 2.3.3. Resistência a tração (Rt)

Para a determinação da resistência à tração ( $R_t$ ) de solos, valem as mesmas elucidações apresentadas no tópico anterior, no que tange, à compactação do solo e às aplicações para fins rodoviários ressaltando, que esse é um parâmetro importantíssimo quando se trabalha na construção de rodovias constituídas por camada ou camadas cimentadas.

Quanto à ruptura, esta pode ser feita por compressão diametral, através da aplicação de carga progressiva, até a separação em duas metades no plano vertical do corpo-de-prova; para o cálculo da resistência faz-se uso da equação 2.7.



$$R_t = \frac{2 \times Cr}{10 \times \pi \times D \times H}$$

(equação 2.7)

Em que,

R<sub>t</sub> – resistência à tração, MPa;

Cr – carga de ruptura, kgf;

D – diâmetro médio do corpo-de-prova, cm;

H – altura média do corpo-de-prova, cm.

#### 2.4. Durabilidade

Lima e Röhm et al., (1993) definiram durabilidade como sendo a capacidade de um material manter a sua integridade quando submetido à ação de agentes externos. As condições e os mecanismos pelos quais se processam as alterações são: (a) dissolução; (b) erosão interna; (c) fissuração; e (d) perda de ligações pétreas, o que conduz à perda de material e à desagregação.

A durabilidade pode ser avaliada pela perda de peso ou pela variação de absorção ou expansão ao final de um certo tempo ou de um determinado número de ciclos de uma ação periódica, como por exemplo, a secagem e molhagem (INGLES; METCALF, 1972). Ressalva seja feita, à fraca durabilidade dos solos naturais com insuficiente teor de argila, associada à circulação rodoviária. O reconhecimento da fraca durabilidade de um solo é possível apenas em termos qualitativos, sendo necessário aplicar métodos de ensaio muito específicos, o que faz com que esse parâmetro seja difícil de ser avaliado.

A resistência dos solos à erosão e ao desgaste é uma característica extremamente desejável quando se pensa em construção de pavimentos rodoviários. Em solos naturais encontram-se diferentes valores de durabilidade; tornando-se necessário melhorar aqueles que apresentam reduzido valor para esse parâmetro, visto que, conforme concepção de Ingles e Metcalf (1972),

reduzidos valores de durabilidade traduzem-se normalmente em elevados custos de manutenção.

## **2.5. Expansibilidade**

O termo expansão pode ser entendido como sendo o aumento de volume do solo quando esse absorve água, o que leva a danos irreparáveis, tais como, levantamento do fundo de escavações e dos solos de apoio de fundações, acréscimos das tensões horizontais em estruturas de contenção, e movimentos diferenciais das camadas de base e sub-base de rodovias. De um modo geral, esse fenômeno, está associado a solos de granulometria fina.

A determinação da expansão dos solos pode ser realizada por diversos procedimentos, sendo usual, para fins rodoviários, o uso do ensaio CBR, já descrito anteriormente. Nesse, durante o período de embebição do corpo-de-prova (96 horas), mede-se a expansão do mesmo colocando-se um extensômetro que, apoiado sobre um tripé, nos bordos do cilindro por uma haste, se move quando o corpo-de-prova se expande, aumentando sua altura; a expansão nada mais é que uma relação, em %, entre o aumento de altura do corpo-de-prova e a sua altura inicial.

O DNIT (1996, p. 204) faz as seguintes especificações para valores máximos admissíveis, para o índice expansão, medido via ensaio CBR, em camadas de pavimentos rodoviários dimensionadas pelo seu método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: (i) materiais do subleito, com expansão  $\leq 2$  %; (ii) materiais para reforço do subleito, com expansão  $\leq 1$  %; (iii) materiais para sub-base, com expansão  $\leq 1$  %; (iv) materiais para base, com expansão  $\leq 0,5$  %.

## **2.6. Permeabilidade**

Para a caracterização das propriedades hidráulicas dos solos usa-se o ensaio de permeabilidade. Segundo Stancati e Nogueira et al., (1984) a permeabilidade é expressa na forma de um coeficiente, denominado coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica, expresso pela letra

K, tendo como unidade usual o  $m.s^{-1}$ . Em laboratório, faz-se uso de permeômetros de carga constante ou variável, para a determinação do índice K, sendo para solos compactados, é comum empregar-se o de carga variável, em virtude da baixa permeabilidade obtida. Na Figura 2.15 encontra-se a ilustração da seqüência de execução desse ensaio em laboratório.

O coeficiente de permeabilidade determinado com o uso do permeômetro de carga variável é calculado pela equação 2.8:

$$K = 2,3 \times \left( \frac{A_c \times H}{A \times t} \right) \times \left( \log \frac{L_0}{L_1} \right) \quad (\text{equação 2.8})$$

Em que,

$A_c$  – área interna do tubo de carga, em  $cm^2$ ;

H – altura do corpo-de-prova compactado, em cm;

A – área do corpo-de-prova, em  $cm^2$ ;

t – tempo decorrido para percolação da água no corpo-de-prova, em s; e

$L_0$  e  $L_1$  – altura da carga nos instantes inicial e final no tubo de carga, em cm.

O valor de K é calculado pela equação 2.9, à temperatura de 20°C:

$$K_{20} = K_t \times \left( \frac{\mu_t}{\mu_{20}} \right) \quad (\text{equação 2.9})$$

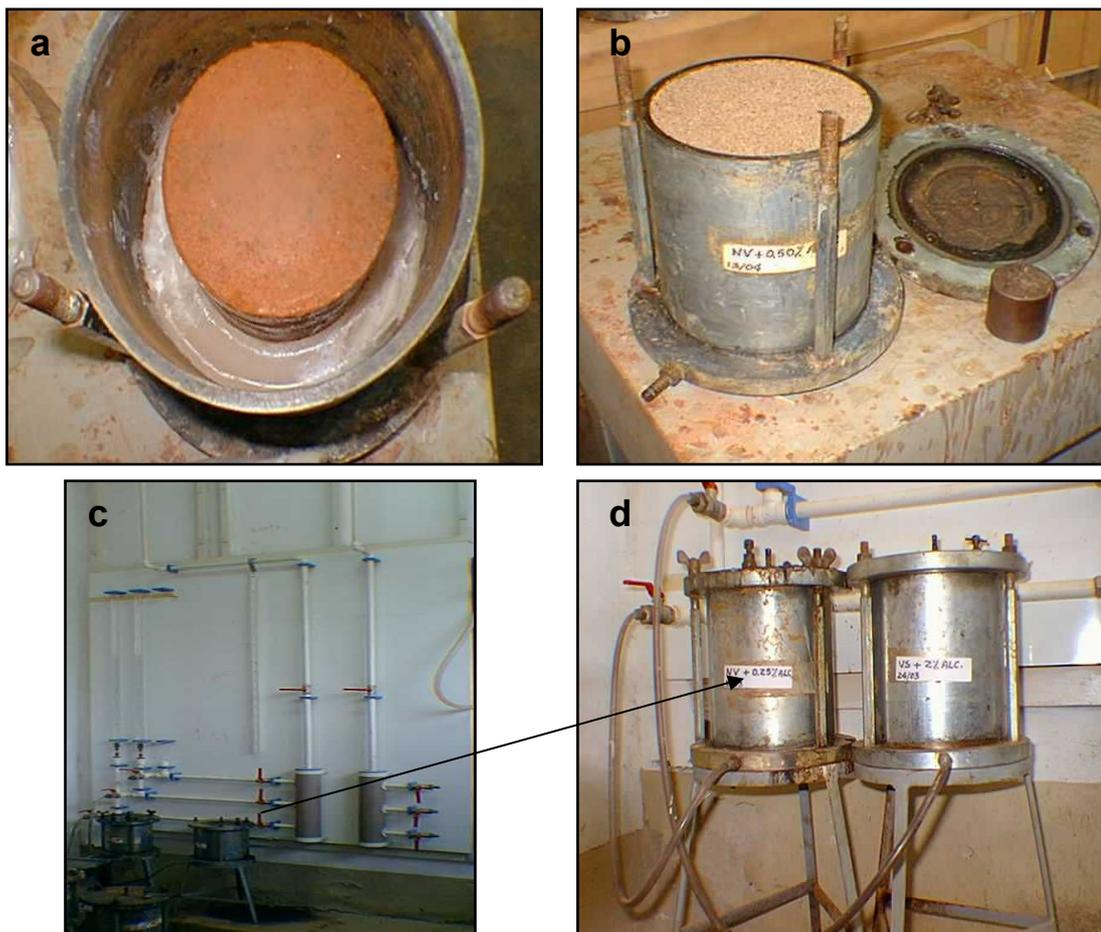
Em que,

$K_{20}$  – coeficiente de permeabilidade a 20 °C;

$K_t$  - coeficiente de permeabilidade a T °C;

$\mu_t$  – viscosidade da água a T °C; e

$\mu_{20}$  – viscosidade da água a 20 °C.



Fonte: Laboratório de geotecnia da UFV.

**Figura 2.15** – Montagem do ensaio de permeabilidade: (a) aspecto do solo compactado, nos padrões do cilindro Proctor, envolvido por um anel de parafina dentro do permeâmetro e colocado na posição vertical do mesmo; (b) aspecto final do permeâmetro após colocadas as camadas de areia, os anéis de parafina derretida, e bentonita, que garante a passagem de água somente pelo corpo-de-prova; (c) sala de execução do ensaio, mostrando os tubos de carga; (d) detalhe do processo de saturação dos corpos-de-prova compactados.

A gama de permeabilidades existentes nos solos naturais e em obras de terra é bastante extensa. Pinto (2000) apresentou alguns valores típicos de  $K$ , conforme ilustração do Quadro 2.11, e evidenciou (Quadro 2.12) a influência, no valor desse coeficiente, devido a compactação de um mesmo solo em diferentes teores de umidade.

**Quadro 2.11** – Valores típicos do coeficiente k para solos

<b>Solos</b>	<b>Valor – m.s<sup>-1</sup></b>
Argilas	$< 10^{-9}$
Siltes	$10^{-6}$ a $10^{-9}$
Areias Argilosas	$10^{-7}$
Areias Finas	$10^{-5}$
Areias Médias	$10^{-4}$
Areias Grossas	$10^{-3}$

Fonte: Pinto (2000).

**Quadro 2.12** – Coeficientes k para um solo da barragem de Ilha Solteira, SP, compactado em diferentes teores de umidade.

<b>Umidade de compactação - %</b>	<b>Índice de Vazios</b>	<b>Coeficiente k – m.s<sup>-1</sup></b>
17	0,71	$2 \times 10^{-8}$
19	0,71	$9 \times 10^{-9}$
21	0,71	$5 \times 10^{-9}$

Fonte: Pinto (2000).

A importância de se conhecer a permeabilidade dos solos pode ser relacionada à dissipação de poro pressões e à percolação da água no solo. Segundo Ingles e Metcalf (1972), inadequada dissipação de pressões neutras conduz a deslizamentos em obras de terra e elevados fluxos de água provocam fenômenos como o “piping” ou o “levantamento hidráulico”. Além disso, em regiões com precipitação intermitente, a permeabilidade do solo constitui um problema durante a construção, visto que nas áreas onde houver estratos impermeáveis de argila podem surgir complicações com a drenagem e com a capacidade de carga.

## **2.7. Módulo de resiliência**

Os materiais que compõem um pavimento rodoviário estão submetidos à ação de cargas dinâmicas e transientes, tornando-se necessário estudos, em

laboratório, sob condições de carregamentos cíclicos, visando reproduzir, as condições de campo. Esses estudos são direcionados à determinação do parâmetro conhecido como módulo de resiliência ( $M_R$ ), definido de acordo com a equação 2.10, extraída dos trabalhos de Medina (1997) e Carvalho (1997); é possível notar por essa que, quanto mais deformável é o solo menor será o módulo resiliente.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_a} \quad (\text{equação 2.10})$$

Em que,

$M_R$  – Módulo resiliente, em kPa;

$\sigma_d$  – tensão desvio axial aplicada repetidamente, em kPa;

$\epsilon_a$  – deformação axial correspondente a um número de repetições de  $\sigma_d$ , em mm/mm.

Para a determinação da deformação axial  $\epsilon_a$  emprega-se a equação 2.11.

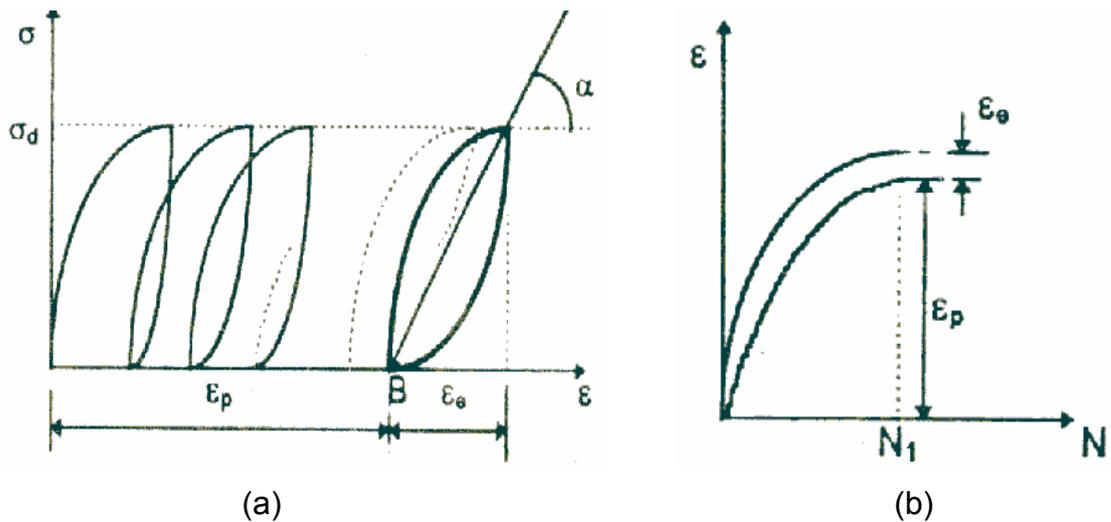
$$\epsilon_a = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (\text{equação 2.11})$$

Em que,

$\Delta h$  – deslocamento vertical máximo, mm;

$h_0$  – comprimento inicial de referência do corpo-de-prova.

Na Figura 2.16 são ilustrados todos os parâmetros que definem o  $M_R$ : em (a) têm-se ciclos de carregamento e ocorrência de deformações elásticas e plásticas, evidenciando o ponto B, a partir do qual o material passa a se comportar de forma reversível, tendendo a uma acomodação; em (b) têm-se o valor do número de aplicações da tensão desvio, onde este comportamento foi notado e representado pelo ponto N1.



Fonte: Carvalho (1997).

**Figura 2.16** – Módulo resiliente *versus* número de aplicações da tensão desvio.

No Brasil, o módulo de resiliência é normatizado pelo DNIT (1994e) e determinado, em laboratório, através dos ensaios triaxiais dinâmicos, em equipamentos que aplicam carregamentos cíclicos de curta duração, demandando sistemas automáticos de controle e monitoramento e aquisição de dados dos ensaios. Dessa forma, consegue-se simular as condições de carregamento dos materiais quando submetidos à ação do tráfego (LELIS, 2004). Essa autora descreveu da seguinte forma a execução do ensaio em amostras de solos indeformadas ou compactadas em laboratório:

[...] uma força de compressão atua, de forma cíclica, de zero até um máximo, sendo retirada para nova aplicação, após um período de repouso; são simulados assim, a velocidade e o fluxo do tráfego através do tempo de pulso e da frequência de carga aplicada.

Medina (1997) mencionou que a amplitude e o tempo de pulso dependem da velocidade do veículo e da profundidade em que se calculam as tensões e deformações produzidas, e a frequência espelha o fluxo de veículos.

Nogami e Villibor (1998) apresentam valores de módulos de resiliência de solos lateríticos de subleito como sendo da faixa de 63 a 10.000 MPa, para

corpos-de-prova indeformados, e de 16 a 630 MPa, para corpos-de-prova compactados em laboratório. De forma análoga, França et al. (2000), apresentaram valores de 60 a 180 MPa, para um Latossolo Vermelho-Amarelo da Zona da Mata Norte de Minas Gerais.

Barros (1997) menciona que, a nível de Brasil, existe pouca experiência acumulada quanto à determinação das propriedades geotécnicas dinâmicas dos solos, devido em grande parte, à escassez de equipamentos triaxiais dinâmicos nos centros de ensino e pesquisa. Enfatiza, o autor, que esta escassez é também evidente no exterior. Motta e Macedo, (1998) abordam aspectos sobre a execução dos ensaios triaxiais cíclicos e discutem as dificuldades de se reproduzir em laboratório as deformações que ocorrem no campo.

Procurando solucionar essa problemática, autores diversos, podendo-se fazer menção a Medina e Preussler (1980), Bernucci (1995), Lee e Bohra et al., (1997), Carmo (1998), Parreira e Couto et al., (1998), Araújo (2001), Trindade e Carvalho et al., (2001), Rezende (2004) e Lelis (2004), propuseram correlações empíricas entre o módulo de resiliência e outros parâmetros geotécnicos de fácil obtenção. A título de exemplo, são apresentadas no Quadro 2.13 algumas dessas correlações, desenvolvidas com solos brasileiros.

Ainda, pelo Quadro 2.13, chama-se a atenção para os seguintes fatos: (a) as correlações apresentadas do trabalho de Lelis (2004), para as três amostras de solo, classificadas pela metodologia MCT como NG' e NS', referem-se apenas aos modelos médios das três energias de compactação em que a autora trabalhou (Normal, Intermediária, e Modificada); (b) os modelos apresentados no trabalho de Rezende (2004) referem-se àqueles mais representativos encontrados para os dois solos estudados pelo autor, referentes a dois extremos do sistema MCT, considerando-se somente a energia de compactação do ensaio do Proctor normal e a metodologia de ensaio do DNIT (1994e).



**Quadro 2.13 – Correlações entre o  $M_R$  e as propriedades índices dos solos**

Autor		Correlação Empírica
Medina e Preussler (1980)		$MR \text{ (kgf/cm}^2\text{)} = 326 + 67 \text{ CBR (\%)}$
Bernucci (1995)		$MR \text{ (MPa)} = 74 \text{ (CBR)}^{0,50}$
Carmo (1998)	Solos Argilosos	$MR \text{ (kPa)} = 4523,088(E_o)^{0,315821}(\sigma_d)^{-0,343628}(\theta)^{0,419295}$
	Solos Arenosos	$MR \text{ (kPa)} = 458,8053(E_o)^{0,491871}(\sigma_d)^{0,542580}(\theta)^{-2,33031}$
Parreira e Couto et al., (1998)		$MR \text{ (kPa)} = 4,5231(E_o)^{0,3158}(\sigma_d)^{-0,3436}(\theta)^{-0,4393}$
	Solo LG'	$MR \text{ (kPa)} = 327686 - 1227\text{CBR} + 11,11\sigma_d - 7351W$
Lelis (2004)	Solo NG'	$MR \text{ (kPa)} = 471345 - 36737\text{CBR} - 147\sigma_d - 12025W$
	Solo NS'	$MR \text{ (kPa)} = 88744 + 1630\text{CBR} - 71,46\sigma_d - 2754W$
Rezende (2004)	Solo NS'	$MR \text{ (kPa)} = 0,4340(\theta)^{1,640}(\varepsilon_R)^{-0,6776}(E_o)^{-0,1285}$
	Solo NG'	$MR \text{ (kPa)} = 27,44(\sigma_3)^{-1,021}(\sigma_d)^{0,9773}(\varepsilon_R)^{-0,9675}(E_o)^{-0,0011}$

Legenda:  $E_o$  – Módulo tangente inicial;  $\sigma_d$  – tensão desvio;  $\theta$  - 1ª invariante de tensão;  $W$  – teor de umidade;  $\varepsilon_R$  – deformação resiliente; e  $\sigma_3$  – tensão confinante.

No manual DNIT (1996, p. 96) encontra-se uma proposição de classificação dos solos de acordo com os parâmetros de resiliência determinados em ensaios triaxiais dinâmicos, as quais são ilustradas no Quadro 2.14. Os solos do tipo I, que apresentam baixo grau de resiliência, apresentam bom comportamento como subleito e reforço do subleito, com possibilidade de utilização em camada de sub-base; os do tipo II, com grau de resiliência intermediário, apresentam comportamento regular como subleito; e os solos do tipo III, com grau de resiliência elevado, não aconselháveis para emprego em camadas de pavimento rodoviário.

**Quadro 2.14 – Classificação resiliente de solos finos e estimativas do  $M_R$**

CBR - %	% Silte na fração que passa na peneira n <sup>o</sup> 200		
	≤ 35	35 - 65	≥ 65
≤ 5	III	III	III
6 - 9	II	II	III
≥ 10	I	II	III

Fonte: DNIT (1996, p. 96).

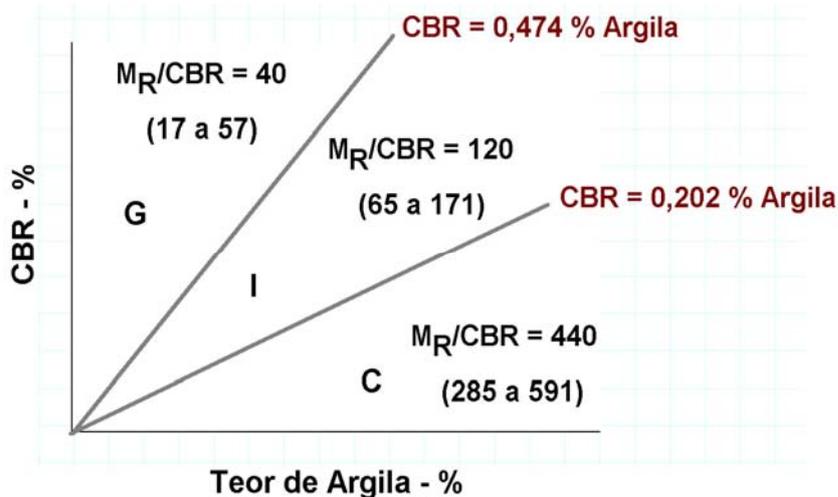
Modelos:  $M_R = 4874 \sigma_d^{-1,129}$  para solos tipo I;

$M_R = 1286 \sigma_d^{-0,5478}$  para solos tipo II;

$M_R = 530 \text{ kgf/cm}^2$  para solos tipo III;

O DNIT (1996, p.102) traz ainda, a relação  $M_R$ /CBR como um parâmetro indicativo da natureza dos solos, diferenciando grupos ou tipos de solos existentes, conforme ilustração da Figura 2.17. Nesta é possível identificar três regiões distintas, em função do índice CBR e do teor de argila; essas regiões foram designadas por letras, em função do comportamento do solo, as quais são: (a) G – solos de comportamento granular; (b) I - solos de comportamento intermediário; e (c) C – solos de comportamento coesivo.

No manual do DNIT (1996, p. 212-218) apresenta-se, também, o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis baseado em modelos de resiliência dos solos. Esse método leva em consideração a deflexão máxima prevista de uma estrutura proposta para uma determinada expectativa de vida de fadiga (surgimento de trincamento em revestimentos asfálticos e bases cimentadas). É levado em consideração o valor estrutural da camada betuminosa em função do tipo do subleito e do tráfego futuro, e o comportamento elástico não-linear dos solos e materiais granulares.



Fonte: DNIT (1996, p. 102).

**Figura 2.17 – Relação  $M_R/CBR$ .**

## 2.8. Referências bibliográficas

ARAÚJO, J.R.S.S. **Estudo do comportamento resiliente de dois solos da região de Viçosa-MG**. Viçosa, MG: UFV, 2001. 71 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

BARROS, J.M.C. Módulo de cisalhamento máximo de solos tropicais brasileiros. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 6., 1997, Lisboa, Portugal. **Anais...** Lisboa, Portugal: [s.n.], 1997. p. 117-126.

BERNUCCI, L.L.B. **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego**. 1995. 237 f. Tese (Doutorado em Geotecnia)-Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1995.

BUENO, B.S.; LIMA, D.C.; MINETTE, E. Geotechnical aspects of Viçosa soils. In: US/BRAZIL GEOTECHNICAL WORKSHOP ON APPLICABILITY OF CLASSICAL SOIL MECHANICS PRINCIPLES TO STRUCTURED SOILS, 1992, Belo Horizonte, MG. **Proceedings...** Belo Horizonte, MG: [s.n.], nov. 1992. p. 349-354.

CARDOSO, D.L. **Contribuição à identificação e tratamento dos solos expansivos da região de Viçosa-MG**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 194 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

CARMO, C.A.T. **A avaliação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos de dois solos compactados e a sua estimativa a partir de ensaios rotineiros.** 1998. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)-Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 1998.

CARVALHO, C.A.B. **Estudo da contribuição das deformações permanentes das camadas de solo na formação das trilhas-de-roda num pavimento flexível.** 1997. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes)-Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 1997.

DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v.20, p. 175-182, 1996. ISSN 0100-0683.

DIAS JÚNIOR, M.S.; MIRANDA, E.E.V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras-MG. **Revista ciência agrotécnica**, Lavras, MG, v.24, n.2, p. 337-346, abr./jun. 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 129:** solos: compactação utilizando amostras não-trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994a. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 092:** solos: determinação da massa específica aparente "in situ", do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1994b. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 049:** solos: determinação do índice de suporte califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994c. 12 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **IE 004:** solos coesivos: determinação da compressão simples de amostras indeformadas. Rio de Janeiro, 1994d. 12 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 131:** solos: determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994e. 8 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação.** Rio de Janeiro, RJ, 2. ed., 1996. 320 p. (Antigo DNER).

FRANÇA, F.C.; LIMA, D.C. **Determinação do módulo resiliente dos solos para fins rodoviários.** Viçosa, MG: UFV, 2000. 42 f. Relatório de pesquisa (Iniciação Científica PIBIC/CNPq)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Ago. 2000.

GUEDES DE MELO, F. **Compactação de aterros de barragens de terra.** Lisboa, Portugal: LNEC, 1985. p. 7-48.

INGLES, O.G.; METCALF, J.B. **Soil stabilization: principles and practice.** Melbourne, Butterworth of New Zealand, 1972. Não paginado.

LEE, W.; BOHRA, N.C.; ALTSCHAEFFL, A.G.; WHITE, T.D. Resilient modulus of cohesive soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [S.l.], v. 123, n. 2, p. 131-136, 1997.

LELIS, T.A. **Influência da energia de compactação nas relações entre o módulo resiliente, CBR e resistência à compressão não-confinada de solos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais.** Viçosa, MG: UFV, 2004. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

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

LIMA, D.C.; RÓHM, S.A.; B.S.; BARBOSA, P.S.A. **Estabilização dos solos III: mistura solo-cal para fins rodoviários.** Viçosa, MG: UFV, 1993. 46 p. (publicação, 334).

MALTONI, K.L. **Estudos de compactação e/ou adensamento de latossolos sob diferentes usos.** Viçosa, MG: UFV, 1994. 139 f. Tese (Doutorado em Ciências dos Solos)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

MEDINA, J.; PREUSSLER, E.S. Características resilientes de solos em estudos de pavimentos. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, p. 3-26, 1980.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos.** Rio de Janeiro: UFRJ, 1997. 380 p.

MOTTA, L.M.G.; MACÊDO, J.A.G. Ensaio triaxial dinâmico de solos para pavimentos: novas tendências. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., v.1, 1998, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF:[s.n.], nov. 1998. p. 623-628.

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

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Considerações geotécnicas sobre o bom desempenho de pavimentos envolvendo solos lateríticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., v.1, 1998, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF:[s.n.], nov. 1998. p. 615-622.

NOGUEIRA, J.B. **Ensaio de laboratório**. São Paulo: USP, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2001. 248 p.

PARREIRA, A.B.; COUTO, F.J.C.; CARMO, C.T.; RODRIGUES, J.K.G. O módulo resiliente de alguns materiais de pavimentação e sua estimativa à partir de ensaios de compressão simples. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., v.1, 1998, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF:[s.n.], nov. 1998. p. 149-155.

PESSOA, F.H.C. **Análise de solos de Urucu para fins de uso rodoviário**. Brasília, DF: UnB, 2004. 151f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)- Universidade de Brasília, DF, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2004.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 247 p.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Rio de Janeiro, 2001. 259 p.

PROCTOR, R.R. **Fundamental principles of soil compaction**. [S.l.]: Engineering News Record, 21 and 28, aug./sept. 1933.

REZENDE, D.S.V. **Módulos resilientes de dois solos da Zona da Mata Mineira: correlações com resultados de ensaios de compressão não-confinada**. Viçosa: UFV, 2004. 84 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

RICO, A.; DEL CASTILLO, H. **La ingeniería de suelos en las vías terrestres**. México: I Limusa, v. 1, 1974. 455 p.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, v. 1, 1997. 174 p.

SILVA, D.P. **Estudo do comportamento reológico de solos estabilizados com cimento: processos gerais de estabilização**. Lisboa, Portugal: LNEC, 1968. 343 p. Relatório final (Processo 52/8/3048)-Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 1968.

SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v.10, p. 91-95, 1986.

SOUZA, M.L. **Pavimentação rodoviária**. Rio de Janeiro: DNER: Instituto de Pesquisa Rodoviária, 2. ed., 1980. 364 p. (livros técnicos e científicos).

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J.B.; VILAR, O.M. **Ensaio de laboratório em mecânica dos solos**. São Carlos, SP: EESC, 1984. 208 p. (publicação, 018).

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB. **State-of-the-art: lime stabilization: reactions, properties, design, construction**. Washington, USA: D.C., 1976. 31 p. (circular, 180).

TRINDADE, T.P.; CARVALHO, C.A.B.; LIMA, D.C. Comportamento resiliente de um solo arenoso da região de Viçosa-MG no estado natural e estabilizado com cimento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis, SC: [s.n.], 2001. p. 369-382.

TRINDADE, T.P.; LIMA, D.C.; CARVALHO, C.A.B.; MACHADO, C.C.; PEREIRA, R.S. Compactação dos solos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 6., 2003, Belo Horizonte, MG. **Anais...** Belo Horizonte, MG: SIF/UFV, jul. 2003. p. 297-325.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: Mcgraw Hill do Brasil, 1978. 509 p.

### **3. PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA COM USO DA TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS**

#### **3.1. Introdução**

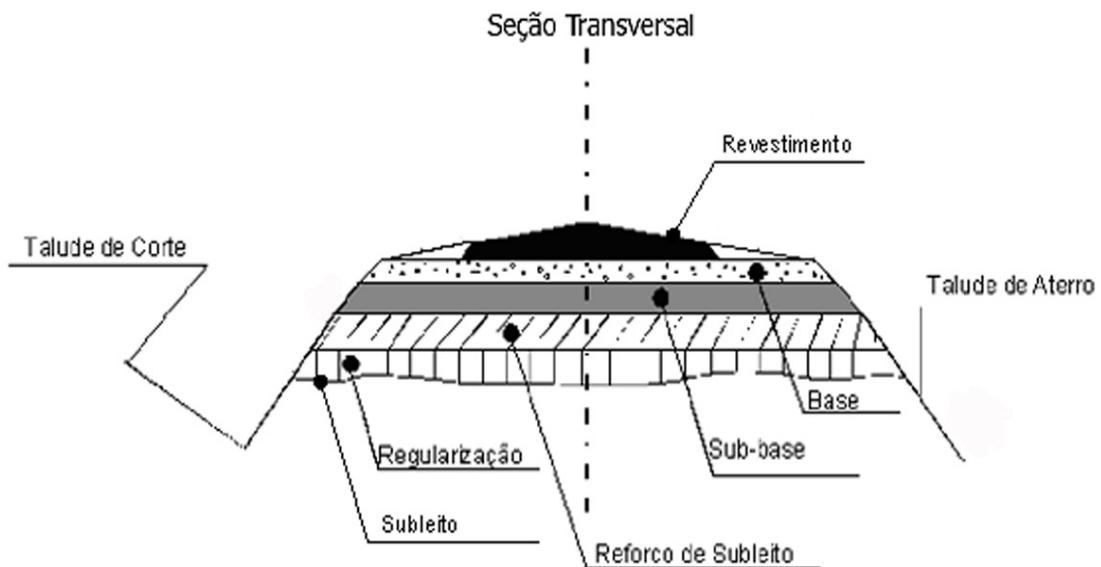
Em uma definição pormenorizada da estrutura conhecida como pavimento rodoviário, Santana (1993 apud MARQUES; LARIOS, 2005) define-a assim:

Trata-se de uma estrutura construída sobre a superfície, obtida pelos serviços de terraplanagem, com a função principal de fornecer ao usuário, segurança e conforto, que devem ser conseguidos sob o ponto de vista da engenharia, isto é, com a máxima qualidade e o mínimo custo.

Com relação a essa estrutura e sob o prisma dos pavimentos flexíveis, Souza (1980) destaca que trata-se de um sistema de camadas de vários materiais de diferentes características de resistência e de deformabilidade que são postos em contato, destinado, além de fornecer segurança e conforto através de melhores condições da pista de rolamento, a resistir e distribuir, ao subleito, as solicitações provenientes do tráfego de veículos. Chaves e Motta (2001) mencionam que essa estrutura de múltiplas camadas se diferencia de outras obras geotécnicas, pelo fato de o clima atual e local ter uma importância fundamental no seu comportamento em serviço.



A Figura 3.1, extraída do manual de pavimentação do DNIT (1996, p. 167), traz uma ilustração da estrutura típica de um pavimento flexível, identificando as camadas dos quais o mesmo é constituído. Pode-se observar o subleito, que é o terreno de fundação e sobre o qual se sobrepõem as demais camadas; a regularização, destinada a conformar o leito estradal; o reforço do subleito, camada que possui características geotécnicas melhores do que o material do subleito; a sub-base, camada complementar à base; a base, camada destinada a resistir os esforços oriundos do tráfego; e o revestimento, camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, destinada a fornecer comodidade, segurança e resistir ao desgaste produzido pela ação do tráfego.

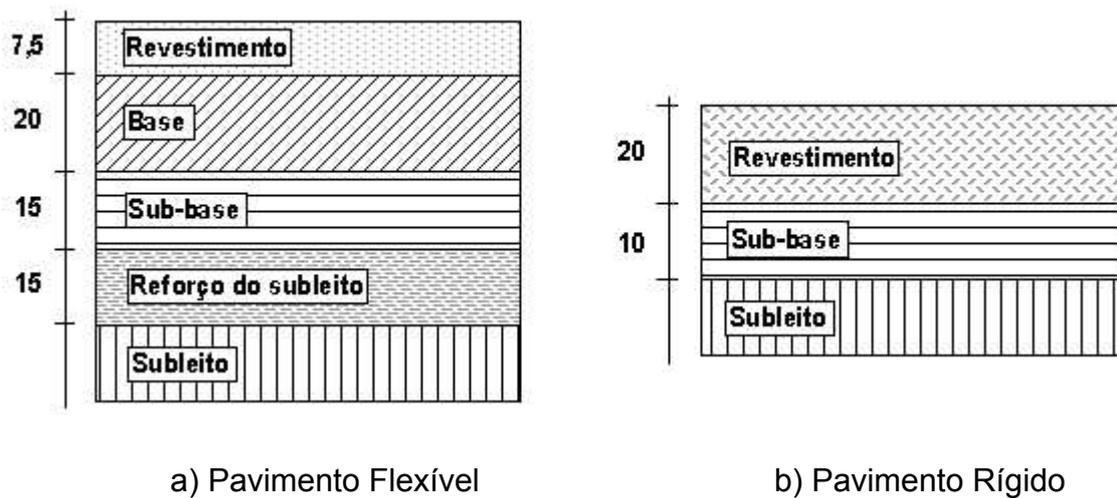


Fonte: DNIT (1996, p.167).

**Figura 3.1** – Seção transversal de um pavimento rodoviário típico.

No manual do DNIT (1996, p. 157-158) consta, também, os tipos de pavimentos, conforme ilustração da Figura 3.2. Menção é feita aos pavimentos dos tipos flexível e rígido. O primeiro tem o seu dimensionamento comandado pelas características de resistência do subleito e demais camadas, sendo para estas (reforço do subleito, sub-base, base e revestimento) fixadas exigências mínimas a serem satisfeitas. Num pavimento do tipo rígido, constituído por

apenas duas camadas acima do subleito (sub-base e revestimento) o exemplo mais comum são as placas de concreto de cimento Portland (CCP) que desempenham, ao mesmo tempo, o papel de revestimento e de base. A existência de uma camada de sub-base serve para dar apoio uniforme à placa de concreto, melhorar a capacidade de suporte do subleito e evitar o fenômeno de bombeamento dos solos subjacentes à placa de CCP.



**Figura 3.2 - Modalidades de pavimentos típicos.**

Definida a estrutura do pavimento rodoviário, cabe escolher os principais materiais de construção de suas camadas, em geral os mais abundantes na crosta terrestre, podendo-se referir aos solos que, conforme concepção de Hogentogler (1937), são os materiais de engenharia mais utilizados. Nogami e Villibor (1985) adotam a seguinte definição tecnológica para o termo solo: “material natural não consolidado, constituído de grãos separáveis por processos mecânicos e hidráulicos relativamente suaves, e que pode ser escavado com equipamentos comuns de terraplenagem.” Segundo Brady (1989), do ponto de vista do engenheiro rodoviário, o solo é o material onde será locado o leito da estrada e caso suas propriedades não forem satisfatórias, o mesmo deve ser substituído por rocha ou cascalho. Guimarães (1971), se referindo a esse mesmo ponto de vista, menciona que o conceito de solo inclui todo o tipo de material, orgânico ou inorgânico, não

consolidado ou parcialmente cimentado, encontrado na superfície da terra, resultante da desintegração e decomposição das rochas superficiais.

Ao nível de Brasil, onde há predominância de solos tropicais, tanto em volume como em área de abrangência, interessa os solos residuais, pelos fatos de serem bastante comuns e sobre os quais serem executadas inúmeras obras civis, dentre essas as obras da malha rodoviária. Esses solos são definidos pelo DNIT (1996, p. 41) como sendo aqueles em que os produtos da rocha que sofreu decomposição, por ação de agentes de intemperismo, permanecem no local em que se deu a transformação, sendo sua composição dependente do tipo e da composição mineralógica da rocha original que lhe deu origem.

Uma característica dominante nos solos residuais é a presença de uma estrutura fracamente cimentada (COSTA FILHO et al., 1989 apud GUIMARÃES, 1996). Essas cimentações podem, segundo Guimarães (1996), serem quebradas pelas solicitações, em razão de sua baixa capacidade de carga, sendo irrecuperáveis. Porém, quando se pensa em construção de rodovias, a fraca cimentação dos solos locais, aliada ao aumento do número de solicitações de veículos com capacidade de carga cada vez maiores, têm levado à adoção de especificações técnicas mais rigorosas, que permitem apenas o uso de jazidas de empréstimo de qualidade tecnológica superior, no que diz respeito à resistência, à deformabilidade e à permeabilidade.

Entretanto, segundo Ferraz (1994), isso nem sempre é possível, pois raramente esses materiais atendem aos requisitos necessários à sua utilização. Para Ingles e Metcalf (1973) e Pessoa (2004), este fato induz a necessidade de se desenvolverem estudos de processos de estabilização dos solos, que possibilitem melhorar determinadas propriedades geotécnicas, em particular ao nível regional, de modo a enquadrá-los dentro das especificações construtivas vigentes para a pavimentação de rodovias. Senço (1997) aponta os estudos sobre os processos de estabilização de solos como uma das mais importantes atividades dos profissionais de pesquisa rodoviária no Brasil, pelas inegáveis vantagens econômicas de uso de materiais locais. Nesse contexto, a estabilização química dos solos se insere como uma notória técnica de melhoria das propriedades de engenharia dos mesmos, mostrando-se como

uma solução promissora dentro da realidade nacional, induzindo à necessidade de estudos sobre as propriedades geotécnicas dos solos naturais e misturas estabilizadas, que poderão compor as diversas camadas constitutivas de um pavimento rodoviário.

Vogt (1967 apud BALBO, 1996) definiu assim esta técnica: "estabilizar quimicamente um solo, é modificar suas propriedades geotécnicas pela adição de outro material que deve ser intimamente incorporado ao mesmo, com subsequente compactação da mistura." Lima e Bueno et al., (1993, p. 7-8), em citação ao critério preconizado por Silva (1968), que considerou a natureza da energia empregada no processo de estabilização, definem a arte de estabilizar quimicamente um solo como sendo as alterações produzidas na sua massa pela introdução de uma quantidade pequena de um determinado aditivo, que lhe confere certas propriedades pré-determinadas.

A gama de aditivos químicos utilizados na estabilização de solos é vasta, indo desde os produtos tradicionais como cal, cimento e betume, passando por comerciais nacionais e internacionais e até materiais alternativos como os obtidos de materiais regionais ou de subprodutos de processamentos industriais (ALCÂNTARA, 1995); os princípios teóricos que procuram explicar os diversos mecanismos envolvidos na atuação desses estabilizantes são bastante difundidos pela literatura.

Serão apresentadas neste capítulo informações acerca da estabilização química de solos, com fins rodoviários, descrevendo-se os processos físico-químicos gerais envolvidos, a gama de produtos disponíveis, com suas peculiaridades, mecanismos de atuação e experiências à nível de Brasil, as potencialidades em termos de utilização, o programa de experimentação laboratorial e as etapas do processo construtivo.

### **3.2. Mecanismos da estabilização química de solos**

Os mecanismos gerais de atuação dos aditivos químicos incorporados à massa do solo foram descritos por Lambe e Michaels (1954) como sendo os seguintes: (a) impermeabilização; (b) dispersão; e (c) floculação. Os autores discorrem sobre cada um desses mecanismos, da seguinte forma:

- a impermeabilização ocorre pela ocupação de espaços vazios presentes na massa do solo, por meio da adição do aditivo químico ou pela criação de uma película hidrorrepelente que envolve as partículas do solo, impedindo que a água penetre nelas;
- a dispersão ocorre pelo aumento da força de repulsão interpartículas do solo proveniente da adição do estabilizante; isso ocorre pelo aumento das características eletronegativas ou da espessura da membrana de água ou dupla camada difusa que envolve as partículas do solo;
- a atuação do material estabilizante como agente flocculante, leva à criação de coesão interpartículas, formando flóculos e criando ligações reforçadas entre os agregados de partículas menores, favorecendo a formação de agregados maiores, o que se torna interessante em termos de ganho de resistência mecânica.

Com relação aos agentes dispersantes, estes podem incrementar a repulsão elétrica entre as finas partículas de solos argilosos, dispersando-as e desmontando os grumos argilosos que resistem ao esforço da compactação. Nesse caso, como as partículas se repelem entre si, elas podem facilmente ser separadas. Desta maneira, elas podem ser forçadas via compactação a formarem uma massa de solo de alta densidade, o que gera um aumento de resistência e um decréscimo da permeabilidade, tornando o solo mais estável.

Lambe (1962 apud VAILLANT, 1995) descreveu da seguinte forma os mecanismos de reação dos dispersantes com as partículas de solo:

- (i) separação - a parte polianiónica do dispersante remove e insolubiliza alguns íons monovalentes trocáveis;
- (ii) troca de íons - o dispersante fornece grupos polianiónicos para as reações de troca com o solo; e
- (iii) adsorção de ânions - o dispersante fornece grupos polianiónicos para serem adsorvidos pela partícula do solo; o mais importante dos mecanismos.

Os agentes flocculantes tornam estável o solo criando uma ligação química e/ou física entre suas partículas, auxiliando no aumento da atração

entre as partículas finas de solo fazendo com que se liguem, produzindo grãos maiores, modificando a sua estrutura e aumentando, portanto, a sua resistência mecânica quando submetido a esforços, seja na condição úmida ou seca (MAINFORT, 1955 apud BRAZETTI, 1996).

Os agentes impermeabilizantes, agregantes e dispersantes presentes nos estabilizantes são usados em baixas concentrações e funcionam alterando as características superficiais das partículas do solo; portanto, são mais eficientes em solos de alta superfície específica ou solos finos.

Ingles e Metcalf (1973), se referindo aos aditivos inorgânicos, dividem-os, quanto aos seus caracteres químicos, em ácidos, neutros, e básicos; consideram também, que a atuação dos aditivos ácidos e básicos estaria ligada a um efetivo ataque aos argilominerais, com conseqüentes precipitações e formação de compostos insolúveis, que agiriam como agentes cimentantes. Já os estabilizantes neutros atuariam modificando as propriedades do solo, tomando-se como exemplo a densidade e as condições de floculação e dispersão. A natureza iônica do estabilizante químico também foi relatada pelos autores, em que a dispersão do solo seria promovida pelos ânions e a floculação pelos cátions; evidenciaram, assim, a importância do pH do meio nos processos de estabilização química de solos.

### **3.3. Gama de aditivos químicos**

Nesse tópico dividiu-se os aditivos químicos em três grupos, os quais são: (i) comerciais tradicionais; (ii) comerciais não tradicionais patenteados; e (iii) produtos alternativos. Todos esses serão descritos nos itens subsequentes.

#### **3.3.1. Os comerciais tradicionais**

Os estabilizantes químicos ditos tradicionais são o cimento Portland, a cal e as misturas betuminosas, produtos estes objetos de inúmeras observações de laboratório e de campo para uma vasta gama de solos. À seguir serão apresentadas as peculiaridades, os mecanismos de atuação e algumas das experiências ao nível de Brasil com esses aditivos.

### **3.3.1.1. Estabilização solo-cimento**

Na literatura consta que a mistura solo-cimento foi utilizada pela primeira vez em 1800, no sul da Inglaterra, como tratamento de leito de estradas e pistas para veículos tracionados por cavalo, sendo o precursor dessa mistura o engenheiro inglês H.E. Brook-Bradley (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION-PCA, 1960). Em 1915, misturas solo-cimento foram empregadas nos Estados Unidos, em obras de pavimentação urbana. No Brasil, a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) iniciou os estudos com a mistura solo-cimento em 1941, estendendo-se estes não só para a área de pavimentação, como também para a construção civil.

A mistura solo-cimento é o fruto da conjugação do solo, do cimento e da água, em proporções determinadas em ensaios de laboratório, e de um processo construtivo que leva estes elementos misturados a uma massa específica também fixada em laboratório (LIMA; BUENO; SILVA, 1993, p. 17). Os mesmos autores mencionam, ainda, que a experiência brasileira no emprego de camadas de base em solo-cimento comumente alicerça-se nos métodos de dosagem da "PCA", trabalhando-se com uma Norma Geral de dosagem e com uma Norma Simplificada de dosagem. Os ensaios de compactação, de durabilidade e de compressão simples são usados com as misturas.

A Norma da ABCP (1941) sofreu modificações, ao longo dos anos, visando sua adequação às condições ambientais e dos tipos de solos do Brasil, bem como redução do tempo de execução dos ensaios de dosagem, chegando-se assim, à Norma ABCP (1986). Ferraz e Lima et al., (1993) descrevem, que a principal modificação foi a exclusão do ensaio de durabilidade por congelamento e degelo. A ABNT (1992), em sua última versão e via NBR 12253, também descreveu um método para dosagem solo-cimento para emprego como camada de pavimento; ressalta-se que trata-se de um método muito semelhante ao proposto pela ABCP (1986).

Ferraz e Lima et al., (1993), também, mencionam que a Norma Geral de dosagem solo-cimento se aplica a qualquer tipo de solo, exceção feita aos solos orgânicos, sendo o critério de dosagem baseado na perda de massa de

corpos-de-prova submetidos aos doze ciclos de molhagem e secagem do ensaio de durabilidade. Com a relação a Norma Simplificada, os autores direcionam a sua aplicabilidade a solos de textura predominantemente granular, os quais são solos com no máximo 50 % de material com diâmetro inferior à 0,05 mm (fração silte+argila) e no máximo 20 % de material com diâmetro inferior à 0,005 mm (fração argila); o critério de dosagem baseia-se no ensaio de resistência à compressão simples, em misturas compactadas na energia do Proctor normal, e curadas à sete dias.

Senço (2001) ressaltou que, embora o método simplificado, nem sempre conduza ao mínimo teor de cimento necessário, indica um teor bastante próximo dos indicados por outros métodos.

A ABNT (1986) apresentou uma norma, com poucas diferenciações, da Norma da ABCP (1986), para dosagem de misturas solo-cimento. Um método denominado de físico-químico de dosagem solo-cimento, proposto pela *Central Road Research Institute of India*, surgiu com o intuito de simplificar as metodologias empregadas e gerar economia no consumo de cimento; divulgado no Brasil por Casanova e Ceratti (1986), o mesmo é baseado na interação elétrica entre as partículas de cimento e argila.

Casanova e Rodrigues (1993) apresentaram resultados da dosagem físico-química do solo-cimento para 13 amostras de solos laterizados do Norte-Nordeste e compararam com resultados obtidos pelas metodologias da ABCP (1986) e da durabilidade proposta por Lucena (1986 apud CASANOVA; RODRIGUES, 1993). Os resultados obtidos pelos autores indicaram que o método físico-químico forneceu na maioria dos casos, teores de cimento próximos aos da ABCP (1986), com tendência para valores menos pronunciados; quanto ao ensaio de durabilidade, esses teores foram ainda mais baixos, com casos de 50 a 70 % menores.

Trabalho semelhante foi executado por Ferraz e Lima et al., (1993) que comparam o método físico-químico com as Normas de dosagem solo-cimento da ABCP (1986) e da ABNT (1986), fazendo-se uso de quatro amostras de solos representativos da microrregião de Viçosa-MG. Balizados nos resultados apresentados no Quadro 3.1, os autores concluíram que o método físico-



químico pode ser empregado satisfatoriamente em uma fase preliminar de dosagem de misturas solo-cimento para aplicação em pavimentação rodoviária.

**Quadro 3.1** – Comparação entre métodos de dosagem solo-cimento

Amostras	ABCP (1986)		ABNT	Físico - Químico
	Norma Geral	Norma Simplificada		
A-7-5 (20)	13 %	-	-	10 %
A-7-5 (9)	13 %	-	-	10 %
A-2-4 (0)	6 %	5 %	5 %	4 %
A-6 (4)	11 %	-	-	4 %

Fonte: Ferraz e Lima et al., (1993).

Pequenos teores de cimento, da ordem de 1 a 2 %, são suficientes para tornar o solo mais trabalhável, diminuir as suas mudanças de volume e aumentar a sua capacidade de suporte (INGLES, 1968). A mistura solo-cimento compactado pode, segundo Senço (2001), ser empregada tanto como base, quanto sub-base de pavimentos, sendo necessários teores de cimento, dependendo da classe escolhida do solo, superiores a 4 %. O autor descreveu o emprego de misturas solo-cimento, com teores de estabilizante entre 1 e 4 %, típicas para melhoria e reforço do subleito.

O DNIT (1996, p. 159) apresenta, também, a distinção dos termos *estabilização solo-cimento* e *solo melhorado com cimento*:

- estabilização solo-cimento - refere-se a uma mistura devidamente compactada de solo, cimento Portland e água sendo que, essa mistura deve satisfazer a certos requisitos de densidade, durabilidade e resistência, dando como resultado um material duro, cimentado, de acentuada rigidez à flexão. O teor de cimento adotado usualmente é da ordem de 6 a 10 %;
- solo melhorado com cimento - modalidade obtida mediante a adição de pequenos teores de cimento (2 a 4 %), visando primordialmente à modificação do solo no que se refere à sua plasticidade e sensibilidade à água, sem cimentação acentuada, sendo consideradas flexíveis.

Podem ser adotados tanto o cimento Portland como o pozolânico, o de alto forno e o de alta resistência inicial, de acordo com o consenso literário (ALCÂNTARA, 1995). O DNIT (1996, p. 151) destacou os cimentos do tipo Portland dentre as categorias atualmente fabricadas no Brasil e descreveu os seguintes tipos:

- cimentos Portland comuns – CP I e CP I-S;
- cimentos Portland compostos – CP II-E, CP II-Z e CP II-F;
- cimento Portland de alto-forno – CP III;
- cimento Portland Pozolânico – CP IV;
- cimento Portland de alta resistência inicial – CP V – ARI; e
- cimentos Portland resistentes à sulfatos – RS.

Vale referir que Pitta (1980) considera que na estabilização com cimento as variáveis de grande importância são: (i) o tipo de solo; (ii) o teor de cimento; (c) as condições de densificação, ou seja, teor de umidade da mistura na ocasião da compactação e o grau de compactação; o grau de homogeneidade da mistura; e as condições de cura.

Algumas considerações referentes à constituição química e mineralógica dos solos devem ser consideradas na estabilização solo-cimento. A presença de sulfatos foi apontada como prejudicial por Petrucci (1978) que descreveu a existência de possíveis reações destes com o hidróxido de cálcio e a alumina livre, formando o sulfo-aluminato de cálcio, de natureza expansiva. Petrucci (1978) e Bauer (1987), chamaram a atenção para a presença de matéria orgânica nos solos, apontada como um fator que desfavorece as reações de hidratação do cimento. Azambuja (1981) fez uma consideração a respeito dos solos arenosos possuidores de fração fina constituída de argila montmorilonítica que, mesmo em baixas percentagens, pode levar à ocorrência, de problemas de desagregação, em decorrência de expansão em face da penetração da água nas camadas do pavimento rodoviário. Certamente, esses problemas são menos preocupantes quando os argilominerais são a caulinita e a illita.

Lima e Bueno et al., (1993, p. 19) relatam da seguinte forma o efeito do cimento nos solos:

- (I) nos solos granulares, destina-se principalmente a criar ligações nos contatos intergranulares, aumentando a coesão da mistura; e
- (II) nos solos finos, os grãos de cimento comportam-se como núcleos, aos quais aderem as partículas que os rodeiam, formando regiões de material floculado que apresentam ligações oriundas dos fenômenos de cimentação.

Destacam, também, esses autores, que: (i) todo e qualquer solo pode ser estabilizado com cimento; no entanto, é regra básica que o teor de cimento empregado aumenta com o teor de argila, o que torna os solos arenosos mais favoráveis economicamente, a esta estabilização; e (ii) o cimento tem a função de desenvolver uma estrutura capaz de minimizar os efeitos das variações de umidade do solo, que desenvolvem grandes forças de tração e compressão no interior de massas porosas. Para Petrucci (1978), a hidratação do cimento, leva a formação do hidróxido de cálcio, fator contribuinte para a floculação das argilas.

No Quadro 3.2 encontra-se a análise química dos cimentos Portland nacionais. De acordo com Souza (1980) a função desempenhada por cada desses componentes é a seguinte:

- (i) o componente essencial é o óxido de cálcio; quanto maior o teor desse constituinte, melhores serão as propriedades mecânicas do cimento, desde que o CaO esteja totalmente combinado;
- (ii) sílica - provém da argila utilizada na fabricação do clínquer e quando combinada com a cal origina os compostos mais importantes do cimento;
- (iii) óxido de ferro - provém da argila utilizada na fabricação do clínquer e para fabricação dos cimentos brancos é indesejável;
- (iv) alumina - também provém da argila utilizada na fabricação do clínquer e sua combinação com a cal origina o composto que acelera a pega do cimento e reduz a resistência aos sulfatos;

- (v) magnésia – originária dos calcários dolomíticos ou da argila empregada na mistura crua, esta deve estar combinada no cimento Portland dando origem a um componente, sendo que excesso desse composto, em estado livre, contribui para aumentar a expansibilidade do cimento;
- (vi) álcalis – atuam como fundentes e aceleradores de pega;
- (vii) outros – os óxidos de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), de manganês ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ) e o anidrido fosfórico ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) podem ser encontrados em pequenas quantidades no cimento Portland.

**Quadro 3.2 – Composição química dos cimentos Portland**

<b>Componente Químico</b>	<b>Variação do Teor - %</b>
Óxido de Cálcio ou Cal ( $\text{CaO}$ )	61 a 67
Sílica ( $\text{SiO}_2$ )	20 a 23
Óxido de Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	2 a 3,5
Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	4,5 a 7
Óxido de Magnésio ( $\text{MgO}$ )	0,8 a 6
Sulfato ( $\text{SO}_3$ )	1 a 2,3
Álcalis ( $\text{K}_2\text{O-Na}_2\text{O}$ )	0,3 a 1,5

Fonte: Souza (1980).

Souza (1980) apresentou, também, (Quadro 3.3) os quatro compostos essenciais do cimento Portland, originados da associação dos componentes químicos apresentados no Quadro 3.2. O silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) é essencial, sendo o responsável pela resistência nos primeiros dias de idade; tem-se que os cimentos de alta resistência inicial são ricos desse composto. O silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ) endurece lentamente durante vários dias, sendo sua resistência a 28 dias pequena e equivalente à do  $\text{C}_3\text{S}$  no fim de um ano. O aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) é um composto nocivo no cimento Portland; entretanto, o componente que lhe dá origem facilita o processo de fabricação do cimento. O ferro aluminato tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) é o mais resistente às águas agressivas e de menor calor de hidratação. Todos esses compostos constituem cerca de

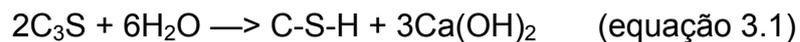
90 % do cimento Portland, sendo o restante, CaO e MgO livres, sulfato de cálcio e outros resíduos.

**Quadro 3.3 – Principais compostos do cimento Portland**

Composto	Fórmula		% Média	Tempo de Pega
	Geral	Simples		
Silicato Tricálcico	CaOSiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	52,0	Poucas Horas
Silicato Dicálcico	CaOSiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	21,0	Duração não Definida
Aluminato Tricálcico	CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	8,0	Instantânea
Ferro Aluminato Tetracálcico	CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	8,5	Rápida porém não Instantânea

Fonte: Souza (1980).

Na estabilização de solos com o cimento, os fenômenos de troca de cátions e floculação-aglomeração, requerem um estoque de cálcio, sendo as duas fases, C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S, as mais importantes. As reações de hidratação dessas fases são (BHATTACHARJA; BHATTY; TODRES, 2003):



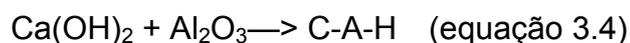
C-S-H = Silicato hidratado de cálcio (C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub>)

Esses autores afirmam, também, que a hidratação dos grãos de cimento pode continuar durante anos, conseqüentemente mais Ca(OH)<sub>2</sub> é produzido neste período. Como os íons Ca<sup>2+</sup> estão livres dentro do fluido, eles estão disponíveis para estabilizar argilas circunvizinhas. Inicialmente, ocorre a absorção dos íons Ca<sup>2+</sup> pela argila, o que é dependente de difusão. Quando tais condições prevalecem e dependem da taxa de disponibilidade de Ca<sup>2+</sup> nas partículas de

cimento hidratando, a concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  pode subir localmente a um nível alto bastante elevado para causar precipitação de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Casanova (1992) descreveu que quando a água entra em contato com a mistura solo-cimento ocorre o seguinte mecanismo: “inicia-se o processo de hidrólise dos minerais do clínquer que é acelerado pela ação físico-química da argila; os íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$  gerados são absorvidos pela sílica provocando atraso na saturação da solução em relação ao hidróxido de cálcio. A carga elétrica superficial dos grãos de clínquer reage eletrostaticamente com a argila, e já, com 24 horas, observa-se intensa estruturação. O volume sofre uma variação brusca indicando a ação de forças de atração. Ao fim de 48 horas, a variação volumétrica tende a aumentar, mas verifica-se que esse processo ocorre de forma mais lenta.”

A formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), na hidratação do cimento Portland, é atribuída ao desenvolvimento de sua resistência. Adicional C-S-H pode se formar nos sistemas cimento Portland-solo e cal-solo devido à reação entre o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , proveniente do cimento ou da cal, e a sílica proveniente do solo. Este processo é conhecido como reação pozolânica. Cálcio também pode reagir com alumina e produzir C-A-H, que é um cimento natural (BHATTACHARJA; BHATTY; TODRES, 2003). As reações são como segue:



A formação destes materiais cimentantes adicionais (C-S-H e C-A-H) pode requerer a solubilização da sílica e da alumina dos componentes do solo (HERZOG; MITCHELL, 1963). Os autores relatam, também, que ambientes de elevados valores de pH levam ao aumento da reatividade de sílica de superfície e alumina.

Kézdi (1979) relata que a reação de hidratação do cimento dentro dos vazios dos solos finos gera a formação de um esqueleto, onde as partículas de solo ficam envolvidas pela pasta de tal forma a criar uma matriz que fixa as partículas não aderidas; a formação desse esqueleto é de fundamental

importância na minimização da sensibilidade às mudanças de umidade, que podem gerar esforços de tração e compressão significativos no interior da massa de solo, e ainda, determinar o incremento de resistência da mistura.

Algumas experiências brasileiras:

a) Solos fornecidos pela ABCP

Ceratti e Medina (1983) testaram três amostras de solo fornecidas pela ABCP, para averiguação das potencialidades de estabilização com o cimento. A designação das amostras e seus respectivos grupos TRB eram: (i) solo A - A1-b (0); (ii) solo B - A-2-4 (0) e (iii) solo C - A-7-5 (19). O cimento empregado foi do tipo CP-320. Baseados no método de dosagem solo-cimento da ABCP, os autores chegaram às seguintes misturas: (i) solo A + 6 % cimento; (ii) solo B + 7 % cimento e solo C + 13 % cimento. Efetuaram, também, misturas com 2 % de cimento, com o intuito apenas de melhoria das propriedades geotécnicas dos solos. Os ensaios de resistência estática de tração e compressão não confinada, dentre outros, foram executados empregando-se para tanto um molde cilíndrico ( $d = 10$  cm e  $h = 20$  cm) e compactação das misturas na energia do ensaio Proctor normal. Antes da ruptura, os corpos-de-prova, assim confeccionados, foram submetidos a períodos de cura de 7, 28 e 90 dias, sendo deixados, em seguida, 24 horas imersos em água.

Ceratti e Medina (1983) concluíram que, para um dado solo cimentado, o efeito do período de cura pode ser expresso pelas seguintes equações, considerando-se períodos de cura entre 7 e 90 dias:

- resistência á compressão não confinada:

$$\text{solo A} - \sigma_{C_T} = 24,85 + (23,90 \times \log T/7), R = 0,97 \text{ (equação 3.5)}$$

$$\text{solo B} - \sigma_{C_T} = 33,84 + (18,42 \times \log T/7), R = 0,92 \text{ (equação 3.6)}$$

$$\text{solo C} - \sigma_{C_T} = 22,67 + (33,05 \times \log T/7), R = 0,98 \text{ (equação 3.7)}$$

- resistência á tração por compressão diametral:

$$\text{solo A} - \sigma_{t_T} = 3,26 + (4,06 \times \log T/7), R = 0,94 \quad (\text{equação 3.8})$$

$$\text{solo B} - \sigma_{t_T} = 7,76 + (3,93 \times \log T/7), R = 0,92 \quad (\text{equação 3.9})$$

$$\text{solo C} - \sigma_{t_T} = 4,85 + (1,38 \times \log T/7), R = 0,87 \quad (\text{equação 3.10})$$

Em que,

$\sigma_{C_T}$  – resistência à compressão simples após T dias de cura;

$\sigma_{t_T}$  – resistência à tração após T dias de cura;

$k_1$  e  $k_2$  – constantes dependentes do tipo de solo e % de cimento;

T – período de cura em dias.

#### *b) Solo do Município de Rio Grande (RS)*

Um solo do Município de Rio Grande – RS foi fruto de experimentações executadas por Núñez e Bastos et al., (1992). Essa amostra foi descrita pelos autores como sendo um solo arenoso Plintífico do Sul da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Esse exemplar, quanto à sua granulometria, possuía 59 % de fração equivalente à areia fina, 20 % à silte, e 21 % à argila. No sistema TRB, ele integra o grupo A-6 (3). A dosagem do cimento foi realizada pelas normatizações da ABCP (1986) e pelo método físico-químico. Para a avaliação da reatividade desse solo ao cimento, fez-se uso do ensaio de compressão não confinada, com corpos-de-prova compactados na energia do ensaio Proctor normal.

O teor de cimento ótimo obtido pelas normas de dosagem já mencionadas, foi o mesmo, o qual foi de 9,5 %. Assim sendo, os autores empregaram nas misturas solo-cimento, os teores de 6, 8, e 10 % de cimento, sendo compactado os corpos-de-prova para o ensaio de RCNC, deixados curar por 7 dias, e, após, colocados em imersão por 4 horas, antes do rompimento em prensa. O Quadro 3.4, apresenta os resultados obtidos, onde é possível observar que o aumento da RCNC é proporcional ao aumento do teor de cimento, atingindo-se para o teor de 10 %, valor superior ao recomendado pelo



DNIT (2100 kN/m<sup>2</sup>) para materiais a serem empregados em camadas de base de pavimentos rodoviários, condição essa, que o solo não possuía.

**Quadro 3.4 – RCNC de misturas solo-cimento**

<b>% Cimento</b>	<b>RCNC – kN/m<sup>2</sup></b>
6	1477
8	1981
10	2220

Fonte: Núñez e Bastos et al., (1992).

c) Solo do Município de São Leopoldo (RS)

Núñez e Ceratti (1992) avaliaram os efeitos da adição de cimento a um solo residual desenvolvido de arenito, proveniente do Município de São Leopoldo – RS. O solo areno-silto-argiloso foi caracterizado pelo sistema TRB como A-4 (3). O cimento empregado foi do tipo Portland CPE, classe 32, da marca Eldorado; sua constituição química possuía 60,9 % de CaO total e 18,6 % de SiO<sub>2</sub>. Para a dosagem de cimento os autores empregaram os métodos da ABCP (1986), fazendo-se uso da Norma Geral, e o método físico-químico.

O teor ótimo de cimento adotado foi o de 11 %, obtido pela Norma Geral da ABCP, com o intuito de se obter ganhos de resistência e durabilidade com finalidades de construção de bases de pavimentos; os autores adotaram, também, os teores de 3 e 5 % de cimento, com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas do solo, tornando-o apto ao emprego em camadas de sub-base. Os ensaios e os estudos de caso realizados pelos autores, bem como as melhores respostas obtidas encontram-se listados no Quadro 3.5. Com base nas características geotécnicas do solo, as quais são CBR de 19 % e expansão de 1,9 % na energia do ensaio Proctor intermediário, os autores apontaram a possibilidade de utilização do mesmo como base de pavimento rodoviário em mistura com 11 % de cimento.

**Quadro 3.5 –** Melhores resultados dos estudos com solo-cimento realizados no Rio Grande do Sul

<b>Ensaio</b>	<b>Estudos de Caso</b>	<b>Melhores Respostas das Misturas Solo-Cimento</b>
<b>Limites de Atterberg</b>	Teor de cimento – 3, 5 e 11 %; Cura úmida – 7, 14 e 28 dias;	LL praticamente não se altera com adição de cimento; à partir de 3 % de cimento, o solo já se torna não-plástico
<b>RCNC</b>	Teor de cimento – 3, 5 e 11 %; Cura Úmida – 7, 14 e 28 dias; e Compactação – Energias Normal e Intermediária	11 % cimento, compactação na energia intermediária, e cura de 28 dias (RCNC $\cong$ 3909 %)
<b>RT</b>	Teor de cimento – 11 %; Cura Úmida – 7, 14 e 28 dias; e Compactação – Energias Normal e Intermediária	Compactação na energia intermediária e cura de 28 dias (Rt $\cong$ 520 %)
<b>CBR</b>	Teor de cal – 3, 5 e 11 %; Compactação – Energias Normal e Intermediária	11 % cimento e compactação na energia intermediária (CBR $\cong$ 350 %)
<b>Expansão</b>	Teor de cal – 3, 5 e 11 %; Compactação – Energias Normal e Intermediária	Para todos os teores de cimento os valores foram inferiores a 0,5 %

Fonte: Núñez e Ceratti (1992).

*d) Solos da microrregião de Viçosa (MG)*

Ferraz (1994) estudou os efeitos proporcionados pela adição de cimento a dois solos da Microrregião de Viçosa, Minas Gerais, quando compactados na energia do ensaio Proctor normal. As amostras de solo foram classificadas pelo TRB como A-7-5 (20) e A-2-4 (0), sendo o cimento empregado do tipo Portland CII – E32, com constituição química possuindo 57,3 % de CaO e 21,9 % de SiO<sub>2</sub>, dentre outros. Os teores de cimento empregados foram de 2, 4, 6 e 8 %, sendo ilustrado no Quadro 3.6, os resultados dos ensaios de CBR, onde obteve-se além do índice, o valor da expansão.

**Quadro 3.6 – CBR e expansão (%) das misturas solo-cimento**

Cimento - %	Solo A-7-5 (20)		Solo A-2-4 (0)	
	CBR - %	Exp. - %	CBR - %	Exp. - %
0	11	0,1	15	0,4
2	31	0,7	88	0,1
4	95	0,4	160	0,1
6	141	0,2	-	-
8	160	0,1	-	-

Fonte: Ferraz (1994).

Observar-se no Quadro 3.6 que ocorreram ganhos significativos para ambos os solos, quanto ao índice CBR, que atingiram mais de 100 % para o teor de 2 % de cimento, chegando-se ao valor máximo de 160 %. Com relação à expansão, o autor obteve como respostas um aumento para o solo A-7-5 (20), com um máximo em 2 % de cimento que tendeu a diminuir à partir desse teor; já para o solo granular A-2-4 (0), o cimento teve uma ação benéfica com redução desse índice, em relação ao solo na condição natural. Contudo, vale destacar que o uso do ensaio CBR para a caracterização mecânica de misturas com alto grau de cimentação não é recomendável, devendo-se empregar nesses casos os ensaios de compressão não confinada e, ou, compressão diametral.

Bueno (1996), em trabalho com três solos representativos da microrregião de Viçosa, Minas Gerais, avaliou o comportamento dessas amostras, quando misturas com teores crescentes de cimento e, posteriormente, compactadas e curadas por 7 e 28 dias em câmara úmida. Dos solos estudados pelo autor, dois foram semelhantes aos utilizados no trabalho de Ferraz (1994), descritos anteriormente, acrescentando-se à matriz um solo A-6 (2). O cimento empregado foi também do tipo CII – E32. Trabalhou-se com teores de cimento que variaram de 2 a 12 %, espaçados de 2 em 2 %; as misturas solo-cimento foram compactadas na energia do ensaio Proctor normal. Os dados apresentados no Quadro 3.7 referem-se aos ensaios de

RCNC. Nesse quadro é possível observar que o valor da RCNC é dependente do teor de cimento e do período de cura das misturas, sendo crescente com o aumento dessas variáveis; pelo estudo de caso realizado por Bueno (1996), atingiu-se melhor desempenho para as misturas envolvendo o solo A-2-4 (0) mais cimento, sendo para o teor de 12 % de cimento e período de cura de 28 dias atingido, para todos os solos aditivados, os maiores ganhos de RCNC. Ressalta-se que os valores de RCNC dos solos na condição natural, compactados na energia do Proctor normal, são: 275, 80, e 60 kPa, respectivamente, para as amostras A-7-5 (20), A-2-4 (0), e A-6 (2).

**Quadro 3.7 – RCNC (kPa) das misturas solo-cimento compactadas e curadas**

Solo	Cura (dias)	Teor de Cimento (%)					
		2	4	6	8	10	12
A-7-5 (20)	7	596	1140	1670	2265	3700	4000
	28	742	1350	2119	3932	4800	5300
A-6 (2)	7	650	1150	1600	1720	2400	2600
	28	800	2000	3100	3200	4200	5000
A-2-4 (0)	7	818	2169	3250	4000	4200	5000
	28	976	3162	4950	6500	7100	7500

Fonte: Bueno (1996).

Trindade e Carvalho et al., (2001) efetuaram ensaios de compactação, CBR e de compressão não confinada no solo saprolítico A-2-4 (0) mencionado anteriormente e estabilizado com cimento Portland CII-E32, no teor de 5 %, que foi previamente determinado usando-se a Norma Simplificada da ABCP (1986). O objetivo dos autores foi o de gerar correlações empíricas com o módulo de resiliência, determinado tanto para o solo em estado natural como para a mistura solo + 5 % de cimento. No Quadro 3.8 encontram-se os resultados obtidos para os ensaios de CBR e compressão não confinada.

**Quadro 3.8 – Resistência e expansão do solo e da mistura solo-cimento**

Ensaio	Teor de Umidade do Corpo-de-Prova	Respostas	
		Solo	Solo + 5 % cimento
CBR (%)	$W_{ót.}$	33,20	172,50
Expansão <sub>CBR</sub> (%)	$W_{ót.}$	0,95	0,06
	$W_{ót.} - 2$	433	2576
RCNC (kPa)	$W_{ót.}$	394	2335
	$W_{ót.} + 2$	289	1603

$W_{ót.}$  - Teor de umidade ótimo

Fonte: Trindade e Carvalho et al., (2001).

A compactação dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios CBR e RCNC foi realizada por processo dinâmico na energia do ensaio Proctor intermediário. Os resultados apresentados pelos autores no Quadro 3.8, para o CBR na condição em que não foi executada cura dos corpos-de-prova antes da imersão em água, mostram um aumento significativo no valor desse índice, em decorrência da adição de cimento ao solo; neste caso, o CBR superou a casa dos 150 %. As características de expansão do solo, também, foram significativamente melhoradas pela adição de cimento. Para os resultados de RCNC da mistura solo + 5 % de cimento, curadas a 7 dias, os autores evidenciaram elevados incrementos nos valores encontrados para o solo, constatando-se, também, que o teor de umidade é um fator de grande importância na resposta mecânica das misturas solo-cimento.

### 3.3.1.2. Estabilização solo-cal

A utilização da cal data de mais de 5 mil anos, e acredita-se que o seu uso na estabilização de estradas teve origem há mais de 2 mil anos, pelos romanos (CASTRO; SERAFIM LUIS, 1974). Filho e Correia et al., (2001) descrevem que existem até hoje obras de grande porte que resistiram durante séculos, graças ao emprego da cal, fazendo menção a civilizações, como

Babilônia, Assíria, Egito, China, Roma, e as americanas Maia, Inca, e Azteca; descrevem também, como construção mais conhecida com emprego da cal a Via Ápia, em Roma. Entretanto, a utilização da cal em grande escala deu-se, de acordo com Lima (1984), somente no século XX, nos Estados Unidos (1924) e na antiga URSS (1926).

A nível mundial, a estabilização solo-cal para fins rodoviários é bastante difundida conforme destacado por Herrin e Mitchell (1961), TRB (1976) e Lima (1981). Entretanto, no Brasil, devido às particularidades regionais de formação de solos, essa técnica encontra-se em estágio primário de utilização (LIMA, 1981; LIMA; RÖHM; BARBOSA, 1993; FERRAZ, 1994; ALCÂNTARA, 1995); pequena notoriedade, no meio técnico brasileiro, foi alcançada nos últimos 35 anos (LIMA; RÖHM; BARBOSA, 1993).

A cal é produzida pela calcinação de calcário britado, na qual o carbonato de cálcio presente na rocha é reduzido a óxido de cálcio ou pela calcinação do calcário dolomítico, que é uma rocha em cuja composição estão presentes os carbonatos de cálcio e magnésio. O óxido de cálcio produzido recebe o nome de cal cálcica, e o produto contendo os óxidos de cálcio e magnésio é denominado de cal dolomítica, sendo ambos os tipos conhecidos como cal viva. A adição controlada de água à cal viva  $\text{CaO}$  produz a cal hidratada  $\text{Ca(OH)}_2$ , que é o produto de maior uso em trabalhos de estabilização de solos (LIMA, 1981; MENDONÇA, 1998).

Pela simplicidade e economia, o ensaio de maior emprego, em nível internacional, para mensurar a resistência das misturas solo-cal curadas é, segundo Lima e Röhm et al., (1993), o de compressão não confinada e, via correlações experimentais desenvolvidas entre os resultados destes e outros ensaios de resistência, obtêm-se outros parâmetros de interesse para fins de projeto. Para se conhecer a evolução da resistência mecânica com o tempo de cura das misturas solo-cal, determina-se a RCNC de corpos-de-prova moldados com diferentes teores de cal, após certo período de cura, em geral 7 e 28 dias (METCALF, 1963; TOWNSEND; DONAGHE, 1976).

Pode-se usar, também, temperaturas de cura elevadas, reduzindo-se assim o período de cura; Herrin e Mitchell (1961) relataram que, em alguns

casos, foi obtida, em 10 dias a 60 °C, a resistência mecânica correspondente a quatro meses de cura a 21 °C. Esse fato pode ser explicado pela aceleração das reações pozolânicas ocasionando um possível ataque de sílica (quartzo) granular presente no solo. Estudos de cura acelerada desenvolvidos com solos da Zona da Mata de Minas Gerais foram realizados por Mendonça (1998).

A cal pode ser utilizada: (i) na estabilização de subleito, que envolve a melhoria “*in situ*” das propriedades de engenharia dos solos; (ii) em camadas de base, sub-base e reforço, envolvendo solos de empréstimos que se mostrem reativos à ação da cal, possibilitando obter misturas de elevada resistência e durabilidade e; (iii) na modificação dos solos pela sua ação onde a mesma funciona como um expediente construtivo em regiões onde os solos apresentam-se, naturalmente, com umidade excessiva (LIMA; RÖHM; BARBOSA, 1993; LIMA; SANTOS; BUENO, 1995).

As características de compactação, plasticidade, variação de volume, resistência mecânica e tensão-deformação são influenciadas da seguinte forma pela adição de cal aos solos:

- o teor de umidade ótimo da mistura aumenta em relação ao solo não tratado com cal e a massa específica seca máxima diminui em até 5 %, a depender do teor de cal empregado (LIMA; RÖHM; BARBOSA, 1993);
- reduções decorrentes da adição de cal nos solos no limite de liquidez e acréscimos no limite de plasticidade são relatados por Castro e Sarafim Luis (1974);
- os fenômenos expansão e contração normalmente são bastante reduzidos pelos tratamentos dos solos com cal (TRB, 1976);
- a resistência mecânica dos solos reativos à cal, após devida compactação e adequado período de cura, atinge valores extremamente superiores àqueles dos solos naturais compactados (HERRIN; MITCHELL, 1961; PINTO, 1965; THOMPSON, 1967; HARTY, 1971; TRB, 1976; LIMA, 1981; FERRAZ, 1994; ALCÂNTARA, 1995; MENDONÇA, 1998);

- a durabilidade da mistura solo-cal cresce com o tempo de cura, sem as perturbações do tráfego e rolamento (GUIMARÃES, 1971);
- as tensões de flexão podem ser o elemento controlador do projeto de pavimentos com misturas solo-cal reativas, daí a importância de se obter o módulo de elasticidade determinado na flexão para fins de caracterização do comportamento tensão-deformação das misturas solo-cal curadas (MENDONÇA, 1998).

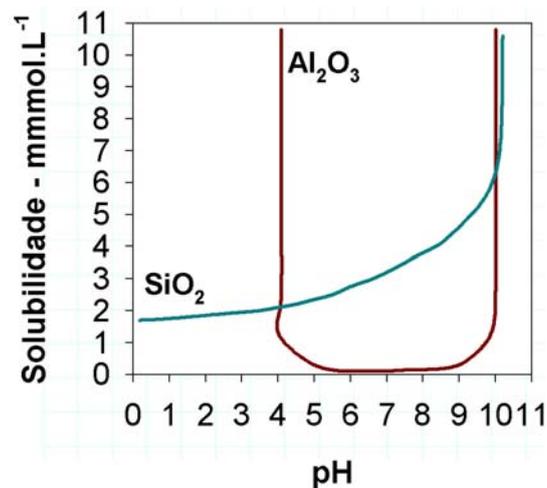
O DNIT (1996, p. 159-160) usa as terminologias, a exemplo da estabilização solo-cimento, *solo estabilizado com cal* e *solo melhorado com cal*. O processo de estabilização pelo uso da cal ocorre ou por modificação do solo, no que se refere à sua plasticidade e sensibilidade à água, ou por carbonatação, que é uma cimentação fraca, ou por pozolanização, que é uma cimentação forte; quando, pelo teor de cal usado, pela natureza do solo ou pelo uso da cinza volante, predominam os dois últimos efeitos mencionados, têm-se as misturas solo-cal, consideradas semi-rígidas. Por outro lado, quando há predominância do primeiro dos efeitos citados, tem-se misturas solo-cal consideradas flexíveis, usando-se, assim, o termo *solo melhorado com cal*.

Thompson (1966) chama a atenção para solos possuidores de mais de 1 % de matéria orgânica, pois os mesmos não respondem bem ao tratamento com a cal.

Segundo Lima e Röhm et al., (1993), de um modo geral, todos os solos de granulometria fina reagem com a cal, ocorrendo trocas catiônicas responsáveis por efeitos de floculações, aglomerações que afetam, benéficamente, a sua trabalhabilidade, plasticidade e propriedades de caráter expansivo. Os referidos autores mencionam, também, que as reações ditas “pozolânicas” entre os solos e a cal nem sempre ocorrem, sendo influenciadas pelas propriedades naturais dos solos, tipo e teor de cal empregado na mistura, condições de cura e teor de umidade. Com relação às condições de cura, as propriedades de engenharia das misturas solo-cal são dependentes da mesma visto que evoluem, dinamicamente, com o período de cura em razão do desenvolvimento de reações pozolânicas.



Nóbrega (1988) define um material com características pozolânicas como sendo aquele que em associação com a cal e em presença de água, à temperatura ambiente, produz como resultado compostos estáveis de propriedades ligantes (Figura 3.3). A adição da cal aos solos em percentual significativo, provoca elevação do pH das misturas, o que, leva ao aumento da solubilidade da sílica e alumina presentes (TRB, 1976; NÓBREGA, 1985). Mendonça (1998) mencionou que é comum associar-se à presença desses compostos cimentantes a ocorrência de reações pozolânicas, significativas ou não, que são basicamente reações entre a sílica e a alumina do solo com a cal e a água. Assim, quando a cal é adicionada a um solo reativo, ocorrem sensível redução na sua plasticidade e gradual aumento na sua resistência mecânica com o tempo, após a compactação, em razão das reações químicas que ocorrem na mistura.



Fonte: Nóbrega (1985).

**Figura 3.3** – Dissolução da sílica e da alumina em função do pH.

Lima e Röhm et al., (1993) mencionam que a reação pozolânica entre o solo e a cal é lenta e só se completa alguns anos depois, requerendo ainda, temperaturas acima de 21 °C; Vieira e Medina et al., (1986) detectaram em amostras da base de um pavimento de solo-cal construído na RJ-116 em 1973, perfazendo portanto 13 anos na época da coleta, a presença de óxido de magnésio (MgO), evidenciando que a atividade pozolânica ou o processo de

geopolimerização ainda não havia sido encerrado, melhorando assim, ao longo do tempo, características como a resistência mecânica. McDowell (1966) constatou o fato anterior, quando amostras extraídas da base de um pavimento de solo-cal, nos Estados Unidos, construído a 10 anos apresentaram valores de resistência três vezes maiores do que amostras ensaias com os mesmos agentes em laboratório.

Algumas experiências brasileiras:

a) Solos da microrregião de Viçosa (MG)

Ferraz (1994) estudou os efeitos proporcionados pela adição de cal a solos A-7-5 (20) e A-2-4 (0), da Microrregião de Viçosa, Minas Gerais. A cal hidratada da categoria CH-I (Supercal) foi empregada no estudo contendo 74 % de CaO, sendo utilizada nas misturas nos traços de 2, 4, 6 e 8 %, em relação à massa de solo seco. No Quadro 3.9, encontram-se ilustrados os resultados dos ensaios de CBR e expansão realizados por esse autor, mas considerando o período de imersão imediatamente subsequente à moldagem dos corpos-de-prova.

**Quadro 3.9 – CBR e expansão, em %, das misturas solo-cal**

Cal - %	Solo A-7-5 (20)		Solo A-2-4 (0)	
	CBR - %	Exp. - %	CBR - %	Exp. - %
0	11	0,1	15	0,4
2	24	0,0	51	0,3
4	38	0,0	46	0,3
6	32	0,0	44	0,3
8	32	0,0	43	0,4

Fonte: Ferraz (1994).

As misturas solo-cal compactadas na energia do ensaio Proctor normal, tiveram pouca alteração no valor da expansão, quando comparadas aos solos

na condição natural. No solo A-7-5 (20), o CBR aumentou significativamente até o teor de cal igual a 4 %, a partir do qual reduziu gradativamente; já para o solo A-2-4 (0), o CBR passou de aproximadamente, 15 % para 50 %, à partir desse limite, o CBR, sofreu uma ligeira queda, e praticamente não variou com o aumento do teor de cal. O autor atribuiu esse comportamento das misturas ao fato de que os corpos-de-prova foram moldados após 1 hora de cura da mistura e deixados em imersão durante quatro dias, não havendo, tempo suficiente para um desenvolvimento das reações pozolânicas entre a cal e os argilominerais dos solos. Ferraz (1994) concluiu, ainda, que os efeitos observados, provavelmente, ocorreram devido às reações de troca catiônicas e da floculação das partículas dos solos ocasionados pela adição de cal.

Bueno (1996) também estudou os efeitos da adição da cal aos solos de Viçosa, além das amostras A-7-5 (20) e A-2-4 (0) mencionadas anteriormente, acresceu-se à matriz o solo A-6 (0). As características da cal foram idênticas ao trabalho de Ferraz (1994), sendo empregada nas misturas os teores de 2, 4, 6, 8, 10 e 12 %. Serão apresentados no Quadro 3.10 os dados relativos aos ensaios de RCNC das misturas compactadas na energia do Proctor normal e curadas durante 7 e 28 dias.

No Quadro 3.10, nota-se a ocorrência de ganhos significativos na RCNC das misturas solo-cal quando comparadas aos solos. Ficou evidente pelos dados de Bueno (1996), que o solo argiloso A-7-5 (20) foi mais reativo à cal do que os outros dois solos analisados. O autor concluiu, também, que a ação da cal nos solos é dependente do seu teor empregado bem como, do período de cura das misturas.

Mendonça (1998) trabalhou com duas ocorrências de solos típicos da Microrregião de Viçosa, Zona da Mata Norte de Minas Gerais, em estudos de estabilização com cal. Uma das amostras tratou-se de um Latossolo Vermelho-Amarelo pertencente ao grupo A-7-5 (20) do sistema TRB, com textura argilo-silto-arenosa; a outra ocorrência pertencia ao manto saprolítico, horizonte C, rico em argilominerais do grupo das micas, sendo classificado pelo TRB como A-7-5 (9); sua textura é silto-areno-argilosa (Quadro 3.11).

**Quadro 3.10 – RCNC, em kPa, das misturas solo-cal compactadas e curadas**

Solo	Cura - dias	Teor de Cal - %					
		2	4	6	8	10	12
A-7-5 (20)	7	480	938	1210	1280	1382	1370
	28	508	1049	1541	1686	2394	2441
A-6 (2)	7	700	600	550	560	562	568
	28	960	1100	1080	970	945	948
A-2-4 (0)	7	759	811	956	911	991	944
	28	983	1760	1727	1822	1729	1655

Fonte: Bueno (1996).

Os corpos-de-prova, confeccionados por Mendonça (1998), foram compactados na energia do ensaio Proctor normal, sendo para os ensaios de compressão não confinada e compressão diametral utilizado carregamento dinâmico em um molde de dimensões de 35,70 mm de diâmetro e 80,00 mm de altura, compactando-se as misturas em 3 camadas. Vale aqui ressaltar que, nesses ensaios, a adição de cal aos solos promoveu o aumento das suas resistências mecânicas, independentemente do tipo de solo e do teor de cal adicionada.

Para se ter uma idéia de quanto aumentou os valores de resistência dos solos em questão, é apresentado a seguir as suas resistências quando compactados na energia do ensaio Proctor normal sem a adição de cal: (i) solo saprolítico – 195 kPa de RCNC, 6 kPa de Rt e 6 % de CBR e (ii) latossolo – 205 kPa de RCNC, 13 kPa de Rt e 11 % de CBR. Outra variável que, também, adquiriu características desejáveis para fins rodoviários foi a expansibilidade dos solos, principalmente a do solo saprolítico, que tinha como valor 1,68 %. O autor recomendou o teor de 10 % de cal como sendo o ótimo para o solo saprolítico e, de forma análoga, 6 % de cal para o latossolo.

**Quadro 3.11** – Melhores resultados dos estudos de MENDONÇA (1998), envolvendo misturas solo-cal

Ensaio	Estudos de Caso	Melhores Respostas	
		Saprolítico + Cal	Latossolo + Cal
Resistência à Compressão Simples	Teor de cal – 2, 6 e 10 % Cura úmida – 1, 7, 28, 90, 180 e 360 dias	10 % de cal e 180 dias cura (≅ 2700 kPa)	10 % de cal e 90 dias cura (≅ 3500 kPa)
	Teor de cal – 2, 6 e 10 %; Cura úmida – 1, 7, 28, 90, 180 e 360 dias; Imersão em água – 4 horas.	10 % de cal e 90 dias cura (≅ 2200 kPa)	10 % de cal e 180 dias cura (≅ 2800 kPa)
	Teor de cal – 2, 6 e 10 %; Cura acelerada – 12, 24, 48, 96, 192 horas e 22,8, 30, 50, e 70 °C	10 % de cal, 192 horas, e 50 °C cura (≅ 4400 kPa)	6 % de cal, 192 horas, e 50 °C cura (≅ 6100 kPa)
Resistência à Compr. Diametral	Teor de cal – 2, 6 e 10 %; Cura úmida – 1, 7, 28, 90, 180 e 360 dias.	10 % de cal e 180 dias cura (≅ 180 kPa)	10 % de cal e 90 dias cura (≅ 180 kPa)
	Teor de cal – 2, 6 e 10 %; Cura úmida – 1, 7, 28, 90, 180 e 360 dias; Imersão em água – 4 horas.	10 % de cal e 180 dias cura (≅ 130 kPa)	10 % de cal e 90 dias cura (≅ 130 kPa)
CBR	Teor de cal – 2, 6 e 10 %; Cura úmida – 1, 7, 28, 90, 180 e 360 dias	10 % de cal e 180 dias cura (≅ 280%)	10 % de cal e 90 dias cura (≅ 220 %)
Expansão	Teor de cal – 2, 6 e 10 %; Cura úmida – 1, 7, 28, 90, 180 e 360 dias	10 % de cal e 7 dias cura (≅ 0,03 %)	6 % de cal e 90 dias cura (≅ 0,02 %)

Fonte: Mendonça (1998).

Mendonça (1998) analisou, ainda, a influência do tipo de cal na resistência das misturas solo-cal compactadas, obtendo como resultado um melhor desempenho da cal com maior percentual de óxido de magnésio (MgO) em sua composição química, sendo essa constatação dependente do teor de cal e do período de cura das misturas.

b) *Solos do município de Ilha Solteira (SP)*

A avaliação das potencialidades de estabilização de três exemplares de solos de Ilha Solteira, Região Oeste do Estado de São Paulo, com cal foi realizada por Alcântara (1995). Os solos eram um Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), classificado como A-2-4 (0) pelo TRB, um Podzólico Vermelho Amarelo (PVA), A-4 (4), e um Latossolo Vermelho Escuro (LVE), A-7-6 (15); a cal empregada foi uma cal cálcica hidratada comercial produzida pela ICAL. O Quadro 3.12 apresenta os resultados dos estudos de caso executados pelo autor, bem como as melhores respostas obtidas. Ressalta-se que a variação dos parâmetros ótimos de compactação obedeceu ao referenciado pela literatura.

c) *Solos do município de Limoeiro do Norte (CE)*

Dois solos do Município de Limoeiro do Norte, Ceará, foram frutos de investigações realizadas em laboratório por Filho e Correia et al., (2001) visando a comprovação da melhoria das características mecânicas dos mesmos quando em mistura com a cal. Foram construídos dois trechos experimentais empregando-se os solos anteriormente referidos estabilizados com cal em camadas de base, em rodovia estadual de baixo volume de tráfego no mesmo município, no ano de 2000, pelo Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes do Estado do Ceará (DERT-CE).

**Quadro 3.12 – RCNC, em kPa, das misturas solo-cal, compactadas e curadas**

Estudos de Caso	Melhores Respostas		
	LVA + Cal	PVA + Cal	LVE + Cal
Teor de cal – 2, 4, 6, 8 e 10 %; Compactação dinâmica; e Cura úmida - 3, 7, 28, 90, 120 e 180 dias	10 % de cal 180 dias cura (4576 kPa)	10 % de cal 180 dias cura (8633 kPa)	10 % de cal 180 dias cura (3716 kPa)
Teor de cal – 6 % Compactação dinâmica; e Cura exposta - 28, 90 e 120 dias	90 dias cura (1988 kPa) Ganho de % em relação à cura úmida	120 dias cura (6210 kPa) Ganho de % em relação à cura úmida	28 dias cura (2667 kPa) Ganho de % em relação à cura úmida
Teor de cal – 6 % Compactação estática; e Cura úmida - 28 e 120 dias	-	28 dias (3494 kPa)  120 dias (6773 kPa)	-

Fonte: Alcântara (1995).

Os solos foram identificados em função de sua coloração, as quais são vermelha e cinza. O solo vermelho trata-se de um material com 36 % de diâmetro menor que 0,074 mm, classificado pelo TRB como A-4, e o solo cinza se refere a um material com 97 % de diâmetro menor que 0,074 mm, classificado pelo mesmo sistema anterior como A-7-6. As características químicas dos solos são: (i) solo vermelho – 80,6 % de SiO<sub>2</sub>, 7,9 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,9 % de Na<sub>2</sub>O e (ii) solo cinza – 54,2 % de SiO<sub>2</sub>, 19,4 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1,2 % de Na<sub>2</sub>O. Empregou-se uma cal cálcica virgem, com 63,9 % de CaO e 5,3 % de MgO.

Os autores evidenciaram a queda nas características de plasticidade nos dois solos quando tratados com a cal e as melhores respostas dos ensaios de resistência à compressão não confinada obtidos em diferentes teores de cal, períodos de cura, e energias de compactação, que encontram-se ilustrados no

Quadro 3.13. Concluíram, os autores, que ambos os solos se mostraram reativos à estabilização com a cal, mostrando melhorias de suas características de resistência para todos os tratamentos, sendo que o aumento da energia de compactação teve maior influência nos ganhos de resistência do que o aumento do teor de cal. O solo cinza apresentou um melhor desempenho com relação a resistência à compressão, fato este facilmente explicável pela sua maior presença de finos capazes de reagir com a cal formando uma quantidade superior de compostos cimentantes responsáveis pela resistência.

**Quadro 3.13 – RCNC, em kPa, das misturas solo-cal**

Estudo de Caso	Energia de Compactação	Melhores Respostas de RCNC	
		solo vermelho + cal	solo cinza + cal
Teor de Cal – 3, 5 e 7 % Cura Úmida – 7, 28 e 63 dias	Proctor Normal	7 % de cal e 63 dias de cura ( $\cong$ 1900 kPa)	3 % de cal e 7 dias de cura ( $\cong$ 2000 kPa)
	Proctor Intermediário	3 % de cal e 63 dias de cura ( $\cong$ 2400 kPa)	3 % de cal e 7 dias de cura ( $\cong$ 3700 kPa)
	Proctor Modificado	5 % de cal e 63 dias de cura ( $\cong$ 2550 kPa)	5 % de cal e 63 dias de cura ( $\cong$ 4900 kPa)

Fonte: Filho e Correia al., (2001).

d) Solos do Município de Coari (AM)

Os solos da província petrolífera de Urucu, Município de Coari-AM, foram frutos de estudos de estabilização química desenvolvidos por Pessoa (2004); dentre esses, destacam-se os relativos às misturas solo-cal. O autor analisou o efeito da adição da cal a solos de cinco jazidas, sendo a maior parte da experimentação realizada com as jazidas 2, 3 e 5 pertencentes ao grupo de solos finos da classificação TRB. A capacidade de suporte das estabilizações com cal para as três jazidas estudadas, cuja compactação foi realizada na



energia do ensaio Proctor intermediário com subsequente imersão dos corpos-de-prova, apresentou resultados diferentes; para as jazidas 2 e 5, verificou-se tendência do CBR aumentar com o teor de cal, sendo que na jazida 3 só se verificou ganho para o teor 6 % (Quadro 3.14).

**Quadro 3.14 – Limites de Atterberg e CBR das misturas solo-cal**

Ensaio	Estudos de Caso	Melhores Respostas		
		Jazida 2 + cal	Jazida 3 + cal	Jazida 5 + cal
Limites de Atterberg	Teor de cal 2, 3, 4 e 6 %	4 % de cal (reduções de 31 % no LL e de 53 % no IP)	Efeito negativo (aumento de 69 % no LL e de até 120 % no IP)	6 % de cal (reduções de 39 % no LL e de 65 % no IP)
CBR	Teor de cal 2, 3, 4 e 6 %	6 % de cal ( $\cong$ 50 %)	6 % de cal ( $\cong$ 43 %)	6 % de cal ( $\cong$ 20 %)

Fonte: Pessoa (2004).

### 3.3.1.3. Estabilização solo-cal-cimento

Thomasi e Lima et al., (1993) realizaram um estudo envolvendo um solo fino da Microrregião de Viçosa, MG, estabilizado simultaneamente com cal e cimento. A amostra de solo era pertencente à parte superior do horizonte C, classificada pelo TRB como A-6 (4) e cujas características de resistência mecânica eram extremamente baixas, além desse material ser notadamente expansivo. O cimento empregado foi o cimento Portland CP II-32, da marca Barroso, que possuía 57,3 % de CaO. A cal utilizada foi da marca ICAL com presença em sua constituição química de 74,0 % de CaO.

Foram empregados os teores de 1 e 2 % de cal, e de 4 e 8 % de cimento. Os resultados das misturas executadas encontram-se no Quadro 3.15; ressalta-se que, inicialmente, adicionou-se a cal ao solo, com a finalidade de redução da plasticidade e mudanças da granulometria do mesmo, tornando-o mais granular, para posterior adição do cimento. O ensaio empregado para

avaliação da resistência das misturas foi o de RCNC, cujos corpos-de-prova foram confeccionados em três camadas, por processo dinâmico, na energia do ensaio Proctor normal, em um cilindro de 80,00 mm (h) por 25,70 mm (d). Os corpos-de-prova assim confeccionados foram submetidos à cura úmida nos períodos de 1, 3, 7, 14 e 28 dias e rompidos com e sem imersão em água por 4 horas em prensa de compressão simples.

O trabalho de Thomasi e Lima et al., (1993) levou às seguintes conclusões: (i) ocorreu para todas as misturas aumento substancial da RCNC (vide Quadro 3.15) em comparação à amostra de solo sem a adição dos estabilizantes, que tinha como valor de resistência 17,65 kPa; (ii) os aumentos foram proporcionais ao aumento dos teores de cimento e dos períodos de cura e (iii) a imersão em água levou a decréscimos na RCNC com o aumento do período de cura, devido ao efeito cimentante dos aditivos tornar desprezível a perda de resistência por imersão.

**Quadro 3.15** – RCNC, em kPa, para as misturas solo-cal-cimento compactadas e curadas à 7 dias

<b>Misturas</b>	<b>4 % de cimento</b>	<b>8 % de cimento</b>
<b>1 % de cal</b>	99,73	167,69
<b>2 % de cal</b>	109,15	154,75

Fonte: Thomasi e Lima et al., (1993).

#### **3.3.1.4. Estabilização solo-betume**

Os materiais betuminosos são, por definição, uma associação de hidrocarbonetos pesados, solúveis em bissulfeto de carbono (CS<sub>2</sub>), possuindo a propriedade de aderência aos agregados, agindo como um aglutinante e impermeabilizante. Os mais comuns são os asfaltos e os alcatrões e no Brasil, os mais utilizados são os diluídos e os emulsionados (LIMA; BUENO,1981).

De acordo com Souza (1980) os asfaltos são betumes que podem ser encontrados no estado natural ou através da refinação do petróleo, sendo designados nesse último caso por asfaltos residuais de petróleo, sendo que

estes constituem a maior parcela dos materiais asfálticos usados na pavimentação rodoviária. Esse autor destaca, ainda, os seguintes tipos de asfalto correntemente empregados em pavimentação:

- cimentos asfálticos de petróleo – designados no Brasil como CAP, são os produtos básicos provenientes da destilação de certos tipos de petróleo; são empregados a quente, exigindo o aquecimento não só do ligante como também do agregado, sendo ideais para pavimentação em virtude de suas propriedades aglutinantes, impermeabilizantes, flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação dos ácidos, sais, e álcalis;
- asfaltos diluídos ou cut-backs – são diluições de cimentos asfálticos em solventes de petróleo de volatilidade apropriada, empregados quando há necessidade de eliminação ou moderação do aquecimento; são classificados em três categorias, em função do tempo de cura, determinadas pela natureza dos diluentes utilizados: (i) asfaltos diluídos de cura lenta (óleo diesel); (ii) asfaltos diluídos de cura média (querosene); e (iii) asfaltos diluídos de cura rápida (gasolina);
- emulsões asfálticas – obtidas da combinação de água mais o asfalto aquecido, em meio intensamente agitado e na presença de agentes emulsificantes, que têm a finalidade de dar estabilidade à mistura, favorecendo a dispersão e o revestimento dos glóbulos de betume de uma película protetora, mantendo-os em suspensão; esses emulsificantes são divididos em ânionicos (sabões) e cátionicos (sais de amina). Os emulsionantes são usados de 0,5 a 1,5 % em peso da emulsão, sendo a quantidade de material betuminoso da ordem de 60 e 70 %. De acordo com sua estabilidade, as emulsões são classificadas em: (i) emulsões de ruptura rápida; (ii) emulsões de ruptura média; e (iii) emulsões de ruptura lenta.

Segundo Silva (1968) os alcatrões são betumes de condensação produzidos numa destilação destrutiva de matérias orgânicas, tais como os carvões minerais e vegetais, o petróleo ou a madeira, possuindo as seguintes propriedades de interesse para a sua utilização em pavimentos rodoviários: (i)

resistência à água; (ii) melhor adesividade que os asfaltos, recobrando melhor os agregados molhados ou contaminados com pó; (iii) maior poder de umectação; e (iv) envelhecem mais por perda de voláteis, enquanto os asfaltos o fazem por oxidação.

Possuem, entretanto, maior suscetibilidade térmica que os asfaltos, o que faz com que sejam mais fluidos em altas temperaturas e mais quebradiços no inverno (SOUZA, 1980); continua, o autor que, a maior porcentagem dos alcatrões usados em pavimentação é obtida como subproduto nas coqueiras de usinas siderúrgicas.

Lima e Bueno et al., (1993, p. 21) descrevem da seguinte forma as modalidades de misturas com materiais betuminosos:

- areia-betume - é a modalidade mais difundida, não só pela facilidade com que se pode controlar a qualidade da mistura, mas por ser economicamente competitiva face a outros processos de estabilização química; os finos do solo devem se situar na faixa de 5 a 12 %, sendo em areias mono-granulares admitido o quantitativo da ordem de 25 %, desde que o IP seja preferencialmente menor que 6 %;
- solo-betume - engloba as misturas de materiais betuminosos e solos argilo-siltosos e argilo-arenosos compactados; busca-se com o ligante uma ação impermeabilizante que garanta a constância do teor de umidade da mistura após a compactação.
- pedregulho arenoso-betume - difere das demais, pois encontra-se em uma condição intermediária entre as areias e os outros solos granulares; nessa estabilização, o betume deve gerar efeitos de coesão entre as partículas grossas e, ao mesmo tempo, ser capaz de manter intacta a coesão existente na fração fina. Os finos do solo devem ser inferiores a 12 % e o IP inferior a 10 %.

Para Rico e Del Castillo (1977) a maioria dos solos é adequada à estabilização com betume, fazendo, no entanto, recomendações quanto à granulometria (10-50 % de finos em solos argilosos) e à plasticidade ( $LL \leq 40$  % e  $IP \leq 18$  % para solos argilosos). Segundo Winterkorn (1975) os solos

coesivos atingem capacidade de suporte satisfatória com baixos valores de betume. De acordo com Agra e Lucena et al., (1992) teores entre 2 e 4 % de betume quando incorporados a solos do Nordeste, de uma forma geral, apresentam melhores respostas para a RCNC e para o peso específico aparente seco máximo.

Lucena e Araújo et al., (1983) mencionaram que a adição de até 2 % de betume na mistura funciona como um agente aglutinante e lubrificante entre os grãos do solo. Bezerra et al., (1983 apud PESSOA, 2004) verificaram que para os teores subseqüentes, o betume passou a agir apenas como lubrificante, uma vez que a fase líquida da emulsão foi aumentada pela sua água e solvente, tornando a mistura demasiadamente plástica e pouco resistente; mencionaram, também, os autores que o aumento progressivo do teor de betume no solo influenciou no peso específico aparente seco, gerando um acréscimo da mesma até um ponto de máximo, à partir do qual, começa a decrescer na proporção em que se dá a incorporação do aditivo.

Yoder (1975 apud MOMM, 1983) descreveu que a estabilização dos solos com materiais betuminosos é satisfatória para solos granulares, solos granulares finos, areias e cascalhos, quando enquadrados nas faixas ilustradas no Quadro 3.16.

**Quadro 3.16 – Características dos solos para estabilização com betume**

Tipo	Solo	Betume	
	Valores Adequados	Tipo	% Média
Granular Fino	LL ≤ 40 % IP ≤ 18%	Emulsões de RM e RL	4 - 8
Solo Arenoso	% # 200 ≤ 25 % IP ≤ 12 %	CAP: 85-100 E 120-50, Emulsões e CR	4 - 10
Saibro e Cascalho	% # 200 ≤ 15 % IP ≤ 12 %	CR e CAP	2 - 6

Fonte: Yoder (1975 apud MOMM, 1983).

A adição de betume a solos granulares provoca aglutinação entre as partículas, aumentando a parcela de coesão ou cimentação e, em geral, reduz o ângulo de atrito interno (SILVA, 1968; SOUZA, 1980). Entretanto, Lima e Machado et al., (2003, p. 79) chamam a atenção que um excesso de teor de betume pode levar o solo a um comportamento predominantemente plástico, ou seja, uma espessura maior da película do ligante pode reduzir substancialmente o ângulo de atrito interno, com conseqüente redução da resistência mecânica.

Em solos argilosos, a presença do betume leva ao bloqueio dos vazios, impermeabilizando o solo e mantendo o seu teor de umidade de compactação (SILVA, 1968; LIMA; MACHADO; CARVALHO et al., 2003, p. 79-80). O primeiro dos autores destacou que caso o solo seja compactado no ramo seco, pressões que se estabelecerem no interior da massa permanecerão inalteradas pelo efeito da impermeabilização, sendo possível contar com a contribuição da coesão aparente ou sucção do solo para o aumento das tensões efetivas das misturas.

#### Algumas experiências com solos brasileiros:

##### a) Solos da microrregião de Viçosa (MG)

Bueno e Lima (1991) e Bueno (1996) estudaram os solos argiloso A-7-5 (20) e arenoso A-2-4 (0), da Microrregião de Viçosa em misturas com betume. O material betuminoso tratou-se de uma emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL-1C), sendo empregada nas misturas nos teores de 2, 3, 4, 5, 6 e 7 %. Realizaram-se ensaios de compressão não confinada e CBR, sendo a compactação das misturas solo-betume, efetuadas na energia do ensaio Proctor normal.

O Quadro 3.17 traz a ilustração dos resultados obtidos pelos autores; com relação à RCNC, nota-se que a adição de betume teve comportamentos distintos em relação a ambos os solos: (i) levou a reduções significativas na RCNC do solo A-7-5 (20); e (ii) produziu aumentos na resistência para o solo A-

2-4 (0), sendo o teor ótimo de ligante de 2 % (ganho de mais de 100 % na RCNC). Com relação ao CBR e a expansão medida neste ensaio, para ambos os solos, os autores obtiveram reduções nesses índices pela adição do betume.

**Quadro 3.17 – RCNC, CBR e expansão das misturas solo-betume**

Betume (%)	Solo A-7-5 (20)			Solo A-2-4 (0)		
	RCNC* (kPa)	CBR** (%)	Exp.** (%)	RCNC* (kPa)	CBR** (%)	Exp.** (%)
0	220	13,0	0,1	80	15,0	0,4
2	165	11,0	0,1	168	12,5	0,3
3	170	11,0	0,1	150	12,6	0,2
4	150	9,0	0,1	138	13,1	0,2
5	110	9,0	0,1	115	12,0	0,2
6	125	7,0	0,1	100	11,0	0,2
7	90	7,0	0,1	90	9,0	0,2

Fonte: \*Bueno (1996); \*\* Bueno e Lima (1991).

Variando o teor de betume e o período de exposição da mistura solo-betume antes da compactação, na energia do ensaio Proctor normal, Carvalho e Filho et al., (1992), fazendo uso de uma emulsão asfáltica RL-1C, constataram a não ocorrência de variações significativas no teor ótimo de umidade e no peso específico seco máximo da misturas solo-betume; entretanto, a RCNC variou com o teor de betume e com o período de exposição. O Quadro 3.18 evidencia os melhores resultados da RCNC para o solo arenoso A-2-4 (0), de Viçosa-MG, com 4 horas de exposição da mistura, antes da compactação.

**Quadro 3.18 – RCNC das misturas solo-betume**

<b>Misturas</b>	<b>RCNC (kPa)</b>
Solo + 5 % betume	125
Solo + 7 % betume	100
Solo + 9 % betume	135

Fonte: Carvalho e Filho et al., (1992).

### **3.3.2. Produtos comerciais não tradicionais patenteados**

Nesse tópico, procurar-se-à descrever alguns dos inúmeros aditivos patenteados para a estabilização de solos. Brazetti (1996), após discorrer sobre uma extensa revisão sobre esses produtos, mencionou que no Brasil, com a liberação das importações surgiram aditivos de origem sul-africana, argentina, suíça, uruguaia, norte-americana, etc., dividindo o promissor mercado com os nacionais, todos tentando conquistar no mercado estratégias específicas.

#### **3.3.2.1. Estabilização solo-con-aid**

Aditivo de origem sul-africana, trata-se de um óleo sulfonado derivado de um ácido sulfônico aromático, pertencente a um grupo de compostos orgânicos, os surfactantes, que associados a certos cátions metálicos promovem a estabilização de solos argilosos, sendo o seu mecanismo de atuação descrito pela Con Aid (2005), como sendo:

Os argilominerais contêm água e íons adsorvidos às suas superfícies e que justamente aí, via troca iônica, uma extremidade hidrofílica da molécula do óleo sulfonado adere sendo que, a outra extremidade da molécula é de natureza hidrofóbica; desta maneira, o envolvimento das partículas com o óleo impermeabiliza o solo.

Segundo o prospecto distribuído pelo representante Con-Aid Argentina S/A, o produto aumenta o CBR e reduz o nível de poeira. Quanto ao teor de



Con-Aid, informa que se situa entre 5 a 7 litros/m<sup>3</sup>, e a diluição em água, entre 1:150 a 1:500, ambos conforme o tipo de solo.

### **3.3.2.2. Estabilização solo-ISS 2500 (Ionic Soil Stabilizer)**

O manual técnico distribuído pelo representante *road material stabilizers* (Pty) Ltd, do Sul da África, forneceu as seguintes informações sobre o produto:

- ISS 2500 é uma solução em água da fração naftaleno do petróleo, adicionada com compostos sulfonados orgânicos. Esta solução, ao ser incorporada ao solo, produz trocas eletroquímicas na sua estrutura, condicionando-o para atingir altos índices de CBR e compactações superiores ao 100% do proctor, aumentando sua resistência aos esforços e sua capacidade de suporte. No setor tratado com ISS 2500 não cresce grama ou qualquer outro vegetal, não porque prejudique seu crescimento e sim porque impermeabiliza o solo, fazendo com que as raízes não encontrem a água necessária;
- ISS 2500 é um agente catalítico de intercâmbios iônicos, que atua particularmente sobre a fração coloidal ou ativa das argilas, reduzindo o potencial eletrostático das suas partículas, eliminando portanto sua capacidade de adsorver água e os sais dissolvidos nela, eliminando, portanto, a camada de água que as envolve. Como age cataliticamente, isto é, atua sem ser consumido ou modificado, sua presença permanente impede que se reiniciem as uniões eletroquímicas entre argila e água, e portanto, uma vez compactado, o solo permanece estabilizado indefinidamente, tendo perdido para sempre sua capacidade de plasticidade;
- a expansibilidade e a impermeabilidade obtidas impedem a formação de lama na superfície e, como não permitem a infiltração da água desde o subsolo, evitam as erosões e amolecimento, e conseqüentemente, a produção de buracos do subleito. Também reduz sensivelmente o tão inconveniente desprendimento de pó em subleitos sem cobertura;

- esse aditivo pode ser usado na construção de ruas urbanas, estradas vicinais, ruas de trânsito pesado, rodovias, caminhos rurais, caminhos florestais, estabilização de acostamentos, caminhos sem capa de rolamento, construção de aterros rodoviários e ferroviários, construção de pistas de pouso, consertos de buracos de rua asfaltada, etc.

#### **3.3.2.3. Estabilização solo-perma-zyme**

Produto fabricado pela empresa Americana International Enzymes Inc., Nevada, e distribuído por representantes em alguns estados brasileiros. É um produto a base de enzimas orgânicas, similar às proteínas, componentes orgânicos naturais, as quais atuam como um catalizador. O manual Permazyme (2005), descreveu que:

- suas longas estruturas moleculares contêm grupos ativos que auxiliam nas interações e ligações moleculares, impermeabilizando e cimentando camadas de solo;
- na área rodoviária indica seu uso para a construção de bases e sub-bases de pavimentos e acostamentos e na minimização da poeira em estradas de terra. Com relação ao solo, reduz sua permeabilidade e índice de plasticidade, aumenta o suporte CBR e auxilia na compactação, diminuindo o esforço necessário para atingir o mesmo grau de compactação, caso esse não fosse utilizado;
- é comercializado em galões de 20 litros, deve ser diluído em água a taxa de 1:1.000 para aplicação no controle de poeira e 1:350 para a construção de bases e sub-bases. Informa também que 1 litro pode tratar 3,0 m<sup>3</sup> de solo.

#### **3.3.2.4. Estabilização solo-consolid**

Produto de origem Suíça, com uma fábrica localizada na cidade de Campo Largo, região metropolitana de Curitiba. O manual fornecido pelo representante do produto descreve que:

- autodenominado Sistema Consolid de estabilização de solos, compõe-se da combinação a dois de três produtos ou substâncias químicas sendo que, o Consolid 444 é o principal e deve ser aplicado em conjunto ou com o Conservex, ou com o Solidry, conforme o tipo de solo a ser tratado. A combinação Consolid 444 e Conservex é indicada para solos siltosos e arenosos e para áreas sujeitas a inundações, enquanto que o Consolid 444 e Solidry são adequados para argilas/siltos e áreas sujeitas a inundações;
- consolid 444 utiliza-se da atividade superficial das argilas e siltos para exercer sua ação de aglomeração dessas partículas, além de reduzir a tensão superficial da água. Os finos do solo são envolvidos por um filme protetor impermeabilizante, devido à adsorção da substância à superfície inibindo a atração da água. O mecanismo da estabilização é basicamente a formação de cátions durante a evaporação;
- com relação a seus efeitos no solo, o Consolid 444 apresenta as seguintes propriedades: diminui a resistência do solo à compactação, aumentando sua densidade; reduz a ascensão capilar e a permeabilidade; reduz a plasticidade e o inchamento. Deve ser misturado à água na razão de 1:20 a 1:50, e aplicado a uma taxa de 0,4 a 0,8 litros/m<sup>3</sup> (0,25 a 1,0 % do peso do solo seco). É um produto moderadamente ácido (pH = 6), tem cheiro de amônia e inflama-se a altas temperaturas.

### **3.3.2.5. Estabilização solo-DS 328**

O DS 328 é definido pelo seu fabricante como um composto metalo-orgânico desenvolvido exclusivamente para estabilização de solos. É produzido no Brasil pela Dynasolo Ind. e Comércio S/A desde 1973 e consiste em 2 compostos: um estabilizante e um neutralizante.

O estabilizante é o produto principal, um líquido de cor verde solúvel em água, com massa específica variando entre 1,035 a 1,05 g/cm<sup>3</sup> a 25 °C, pH 14 para o produto puro e no mínimo 10,5 em solução a 1 %. Compõe-se de sais de potássio de ácidos graxos, saturados, numa formulação semelhante a dos

sabões. O potássio é o único mineral presente no produto onde apresenta-se em concentração de 1,74 % (VAILLANT, 1995).

Os neutralizantes podem ser diferentes compostos químicos que, atuando em conjunto com o DS 328, formam reações de neutralização ou salinização que tornam a estabilização mais efetiva. Os reagentes do DS 328 indicados pelo fabricante são: sulfato de alumínio, hidróxido de cálcio úmido, cal hidratada e cimento.

Pelas características físico-químicas do DS 328 e face às considerações de Silva (1968) sobre os mecanismos de interação do solo com agentes químicos de estabilização, é de se esperar um efeito estabilizante provocado a partir de uma mudança estrutural no solo e pelo aparecimento de películas isolantes ou hidrorrepelentes orgânicas que envolvem as partículas ou agregados do solo.

Segundo Vaillant (1995) o mecanismo de estabilização por película isolante dá-se a partir da reação do estabilizante (sais de potássio de ácidos graxos) com o neutralizante (sulfato de alumínio). Nesta reação, o alumínio toma o lugar do potássio na cadeia ligada ao grupo carboxilato, orgânico, formando sais de alumínio de ácidos graxos, instáveis, de aspecto gelatinoso.

A dosagem típica do DS 328, segundo o fabricante, é de 1:1.000, ou seja, 1 kg de DS 328 para 1.000 kg de solo seco, podendo variar até 1:2.000. Enquanto que para o neutralizante, o fabricante em seu texto técnico, recomenda que para o sulfato de alumínio e para fins práticos, uma dosagem sempre 5 vezes inferior a do DS 328, ou seja, 20 % da quantidade calculada do estabilizante. Quanto aos outros reagentes a dosagem recomendada é sempre de 1 a 3 % da massa de solo seco.

O aditivo químico DS 328 é indicado para tratamento de solos, especialmente para execução de camadas de reforço de subleito, de sub-bases e bases, nas pavimentações de estradas, ruas urbanas, aeroportos, pátios, barragens e na construção civil (DYNASOLO, 1993).

Vaillant (1995) estudou os efeitos da adição do DS-328 aos solos A-7-5 (20) e A-2-4 (0), de Viçosa-MG, nas dosagens de 1:500, 1:1000, 1:1500 e 1:2000; utilizando-se como neutralizante o sulfato de alumínio; a energia de

compactação foi a do ensaio Proctor intermediário. O ganho de resistência mecânica dependeu do tipo de solo, do neutralizante utilizado e do tempo de cura, sendo que alguns dos resultados obtidos para as misturas solo - DS-328 foram abaixo dos encontrados para o solo não tratado (Quadro 3.19).

**Quadro 3.19 – Resistência mecânica das misturas solo – DS 328 compactadas**

Ensaio	Estudo de Caso	Melhores Respostas	
		Solo A-7-5 + DS 328	Solo A-2-4 + DS 328
CBR	Quatro dosagens de DS-328, Neutral. Sulf. de Alumínio e cura úmida de 7 dias	Dosagem de 1:2000 ( $\cong$ 28 %)	Dosagem de 1:1500 ( $\cong$ 33%)
Expansão	Quatro dosagens de DS-328, Neutral. Sulf. de Alumínio e cura úmida de 7 dias	Dosagem de 1:2000 ( $\cong$ 0,1 %)	Dosagem de 1:2000 ( $\cong$ 0,25 %)
RCNC	Quatro dosagens de DS-328, Neutral. Sulf. de Alumínio e cura úmida de 7 e 28 dias	Dosagem de 1:2000 e cura de 28 dias ( $\cong$ 1100 kPa)	Dosagem de 1:2000 cura de 7 e 28 dias ( $\cong$ 350 kPa)

Fonte: Vaillant (1995).

Bueno (1996) obteve, para o solo A-7-5 (20) de Viçosa-MG, ganhos de RCNC da ordem de 102 e 87 % quando estabilizado com dosagens de 1:500 e 1:1000 de DS-328, empregando-se cal como neutralizante, com compactação na energia do ensaio Proctor intermediário das misturas, e posterior cura de 28 dias.

### 3.3.2.6. Estabilização solo-dynacal

Trata-se de um composto organo-metálico alcalino derivado de hidrocarbonetos saturados em cadeia média fabricado no Brasil. Apresenta-se na forma de um líquido de cor verde, solúvel em água, pouco viscoso e de caráter aniônico. Através de duas maneiras pode ser utilizado para estabilizar os solos; (a) na primeira, o produto deve ser adicionado ao solo e

posteriormente um sal metálico (sulfato de alumínio é proposto pelo fabricante). Nesse caso, os argilominerais do solo adsorvem parte do produto (retendo os íons de alumínio), proporcionando o efeito impermeabilizante devido à modificações de sua atividade superficial. Além disso o produto é capaz de formar um gel insolúvel que preenche os microporos do solo, evitando sua tendência de absorver água, ficando portanto estável; (b) na segunda, o produto deve ser adicionado ao solo após a este ter sido incorporado resíduo de carbureto (hidróxido de cálcio). Neste caso, o efeito estabilizante deve-se às ações de impermeabilização e de cimentação. Inicialmente, os argilominerais adsorvem íons de cálcio do hidróxido de cálcio, modificando também a sua atividade superficial; a seguir, outro efeito mais lento entre esses íons de cálcio e os componentes aluminosos e silicosos separados em meio alcalino nos solos, transformando-os em silicatos e aluminatos de cálcio hidratado que cimentam as partículas do solo.

Segundo o fabricante, o produto dynacal é indicado para bases, sub-bases, estradas de terra, controle de poeira. A dosagem do aditivo situa-se em torno de 1:1.000, ou seja, cerca de 1,6 litros/m<sup>3</sup>. O produto complementar é adicionado na taxa de 20 % em relação ao peso do aditivo.

### **3.3.2.7. Estabilização solo-enzymatic**

Segundo informações do fabricante, enzymatic é um produto que utiliza enzimas e age através de um processo de catálise dos argilominerais existentes, resultando numa superfície resistente e própria para receber tráfego. Pode ser aplicado em ruas e estradas não pavimentadas, base íntegra e econômica para asfaltamento, subleito de solo local na pavimentação, estradas vicinais e escoamento de safra, estradas florestais, aterros sanitários; pistas de pouso, pátios e açudes e diques de contenção. Produto dito ambientalmente correto, ecológico e que não possui qualquer componente agressivo ao meio, plantas, pessoas ou animais, segundo o fabricante. Aprovado para uso em parques florestais e áreas de proteção ambiental nos EUA e Brasil.

É fabricado na Austrália (país que possui uma formação geológica semelhante à do Brasil). Este biocatalisador natural é o resultado de anos de pesquisa de materiais; formulado especialmente para condicionar uma extensa gama de solos e agregados, visa obter a máxima densidade possível, lubrificando e coalescendo as partículas de solo, garantindo assim uma coesão ideal do material compactado e sua proteção contra a infiltração de umidade.

Sua forma de ação é a capacidade de "molhar" e penetrar no solo, até mesmo em solos com granulometria fina que são quase hidrófobos. Este processo aumenta a coesão do solo através da solução água/produto, retardando a evaporação, além de diminuir o volume de água necessário para compactação ideal. Desta forma, há um incremento substancial na densidade destes solos, pelo alinhamento das partículas e aglomerados durante o processo de mistura, compactação e cura; concomitante com micro processos físicos de adsorção, co-polimerização, troca iônica, ligações covalentes e micro encapsulação das partículas destes solos. A troca iônica permite uma melhor "arrumação" das partículas do solo, eliminando vazios e aumentando a densidade do material tratado. Com isto se obtém um aumento na impermeabilização e na resistência, permitindo a manutenção das condições de rodagem.

Após a compactação e liberação da pista, a ação do Enzymatic dá início a um processo de proliferação da população bacteriana presente no solo. Este fenômeno desencadeia uma série de reações no material, resultando na ligação permanente entre as diferentes partículas que compõem o solo tratado.

Portanto, o tratamento de um solo com o Enzymatic tem por objetivo melhorar suas condições de compactação de modo a se alcançar um grau de densificação, aglutinação e coesão que não são conseguidos em solos não tratados. Este aumento de densidade confere ao solo toda uma gama de novas propriedades tais como um aumento expressivo de sua capacidade de suporte a cargas, resistência à abrasão e erosão, diminuindo sua suscetibilidade quanto aos efeitos erosivos e amolecedores da água.

### **3.3.2.8. Estabilização solo-terra fix**

Segundo um prospecto cedido pelo representante estabelecido em Curitiba - PR, as seguintes informações foram selecionadas sobre o produto:

- aditivo de origem sul-africana, fabricado pela A.B.E. Industrial Products, Ltda. de Johannesburg. Trata-se de uma emulsão copolimérica das substâncias estireno alquilester e acrilato carboxilatado;
- pode ser usado para estabilizar solos de camadas de base e sub-base de pavimentos, e quando espargido adequadamente é indicado para conservar a superfície de estradas de terra evitando a desagregação de partículas (diminuir a poeira). No caso de ser usado na infra-estrutura, a camada do solo estabilizado pode ou não ser revestida. Tem as mesmas funções que os outros aditivos;
- deve ser diluído em água limpa, na taxa de 1:10 a 1:20, e com relação ao peso de solo, num teor de 0,1 a 0,3 %. O produto após misturado ao solo deve ser imediatamente compactado, ou seja não se deve deixar secar a mistura antes da compactação. A cura total é atingida após três semanas.

### **3.3.2.9. Estabilização solo-EMC<sup>2</sup>**

É um biocatalizador estabilizante de solos que agregado aos métodos de compactação tradicionais, introduz novos parâmetros geomecânicos aos solos utilizados, devido ao seu efeito aglutinante e estabilizante. Após sua aplicação, a estrada de terra estará equivalente a um revestimento primário, sem a necessidade do emprego da brita, cascalho ou saibro importados de jazidas. Segundo o manual do fabricante, um produto à base de melaço de cana-de-açúcar vem sendo utilizado como alternativa para melhorar a qualidade do solo das pistas de pouso.

Este biocatalisador natural se mostrou extremamente versátil. Na forma líquida, solúvel em água, tratava grandes extensões de terreno local, de forma rápida e segura, sem necessidade de traslado de solos de jazidas. As vantagens apresentadas são a facilidade de transporte deste aditivo, já que



apenas um litro do produto, diluído em água, trata 30 m<sup>3</sup> (200 m<sup>2</sup>) de solo, elevando sua capacidade de suporte (CBR), impermeabilizando e estabilizando este solo, que pode ser então utilizado como pavimento primário, de forma duradoura ou ainda oportunamente recoberto com uma fina capa asfáltica.

Sua fabricação está hoje a cargo da *Soil Stabilization Products Co.* da Califórnia, sendo chamado de *Earth Materials Catalyst Concentrate* ou ainda EMC<sup>2</sup>. Além dos vários usos civis ou em estradas vicinais, estradas e trilhas de parques e reservas florestais, perenização de ruas em bairros periféricos, foi empregado nas operações militares Good Hope na Somália e Desert Storm no Iraque. Sua interação com o solo, por absorção, troca iônica e microencapsulação das partículas garante uma enorme coesão do material compactado, reduzindo a lama e a poeira.

#### **3.3.2.10. Estabilização Solo-RBI Grade 81**

Desenvolvido na África do Sul, em 1990, o RBI (Road Building International) Grade 81 é um pó inorgânico, facilmente aplicável, durável, resistente e estável, não tóxico e impermeável (TECFLORA, 2001).

Vantagens associadas ao produto são: aumentos substanciais no CBR das camadas estabilizadas, produto, segundo o fabricante, ambientalmente correto e plasticidade e expansão das camadas estabilizadas são reduzidas. Possui exigências tais como compactação na energia modificada e as misturas solo-RBI compactadas devem ser curadas ao ar. O seu campo de aplicação engloba a faixa dos solos arenosos até às argilas plásticas (RBI, 2002).

No Brasil, estudos com este produto vêm sendo desenvolvidos no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa, sendo tema de uma tese de mestrado (FRANÇA, 2003) e outra de doutorado em andamento, do estudante em Engenharia Civil, Tiago Pinto da Trindade, com o intuito de se comprovar a eficiência do produto com estabilizante para fins rodoviários e geoambientais. Um das primeiras aplicações do produto no Brasil foi feita no pátio da empresa Valourec e Mannesmann, em Belo Horizonte, Minas Gerais, alcançando-se resultados promissores.

Trindade e Lima et al., (2005a) atribuíram a ação do produto à ligação que o mesmo efetua nas partículas do solo, o que cria uma matriz cimentante entre as mesmas através de reações de hidratação, responsáveis pela transformação da massa estabilizada em um produto de maior resistência e rigidez, e pozolânicas, no solos finos.

Em um trabalho sobre o comportamento geotécnico de amostras de xisto, oriundas da região de Sabará, Minas Gerais, estabilizadas com RBI 81 observou-se que as melhores respostas encontradas para as misturas Xisto-RBI 81, foram para os traços de 5 e 7 % de RBI, onde houve ganho de suporte superior a 100%, em relação ao solo natural. A expansão das misturas nos três traços estudados (3%, 5% e 7%) reduziu consideravelmente, enquadrando o solo nas especificações técnicas do DNIT (1996, p. 204), para materiais de camadas de base de pavimentos rodoviários flexíveis.

Em resultados preliminares apresentados por Trindade e Lima et al., (2005a), envolvendo misturas de solos da microrregião de Viçosa-MG, com o RBI Grade 81, obteve-se ganhos de RCNC com a adição do produto da ordem de 210, 170 e 360 %, respectivamente, para os solos A-7-5 (20), A-6 (2) e A-2-4 (0), conforme ilustração do Quadro 3.20, tomando-se por base o teor de 6 %. As compactações efetuadas pelo referido autor foram processadas na energia do ensaio Proctor modificado, com cura úmida dos corpos-de-prova assim compactados de 7 dias. Ressalta-se, também, que foram estudados tempos entre as misturas solo-RBI e a compactação das mesmas (TMC), chegando-se a melhores resultados de resistência mecânica com TMC de 4 horas para as misturas envolvendo as duas primeiras amostras e de 0 horas para a amostra predominantemente arenosa (TRINDADE; LIMA; MACHADO et al., 2005b).

**Quadro 3.20 – RCNC, em kPa, para as misturas solo-RBI compactadas**

Solos	Resistência à compressão não confinada			
	% RBI Grade 81			
	0	2	4	6

A-7-5 (20)	877	1500	2300	2700
A-6 (2)	600	750	1300	1600
A-2-4 (0)	292	720	740	1350

Fonte: Trindade e Lima et al., (2005a).

Em estudo de caso realizados por França (2003) envolvendo os solos de Viçosa-MG citados no trabalho de Trindade e Lima et al., (2005a) e o produto RBI, o autor chegou aos seguintes resultados listados no Quadro 3.21. As conclusões tiradas do trabalho foram que, apesar de algumas misturas apresentarem resultados diferentes do esperado, a maioria das misturas solo-RBI Grade 81 apresentaram ganhos significativos de resistência mecânica, com o aumento do teor de RBI, da energia de compactação e do período de cura. Destaca-se, ainda, que de todos valores de CBR dos solos sem adição do aditivo, o maior era do solo A-2-4 (0), com CBR de 33 %, quando compactado na energia do ensaio Proctor intermediário.

**Quadro 3.21 – CBR, expansão e RCNC das misturas solo-RBI**

Ensaio	Estudos de Caso	Melhores Respostas		
		Solo A-7-5 + RBI	Solo A-6 + RBI	Solo A-2-4 + RBI
CBR	% de RBI – 2, 4 e 6 % Energia Intermediária Cura – 1, 7 e 28 dias	6 % RBI e Cura de 7 e 28 dias ( $\cong$ 70 %)	6 % RBI e Cura de 28 dias ( $\cong$ 102 %)	6 % RBI e Cura de 28 dias ( $\cong$ 178 %)
	% de RBI – 2, 4 e 6 % Energia Modificada Cura – 1, 7 e 28 dias	6 % RBI e Cura de 28 dias ( $\cong$ 108 %)	6 % RBI e Cura de 7 e 28 dias ( $\cong$ 150 %)	6 % RBI e Cura de 28 dias ( $\cong$ 142 %)
Expansão	% de RBI – 2, 4 e 6 % Energia Intermediária Cura – 1, 7 e 28 dias	6 % RBI e Cura de 7 dias ( $\cong$ 0,04 %)	6 % RBI e Cura 28 dias ( $\cong$ 0,06 %)	4 % RBI e Cura de 7 dias ( $\cong$ 0,02 %)
	% de RBI – 2, 4 e 6 % Energia Modificada Cura – 1, 7 e 28 dias	2 % RBI e Cura de 1 dia ( $\cong$ 0,05 %)	4 % RBI e Cura 28 dias ( $\cong$ 0,05 %)	6 % RBI e Cura de 7 dias ( $\cong$ 0,02 %)

<b>RCNC</b>	% de RBI – 2, 4 e 6 % Energia Intermediária Cura – 1, 7 e 28 dias	6 % RBI e Cura de 28 dias ( $\cong$ 1800 kPa)	6 % RBI e Cura de 28 dias ( $\cong$ 1450 kPa)	6 % RBI e Cura de 28 dias ( $\cong$ 1500 kPa)
	% de RBI – 2, 4 e 6 % Energia Modificada Cura – 1, 7 e 28 dias	2 % RBI e Cura de 7 dias ( $\cong$ 2440 kPa)	6 % RBI e Cura de 28 dias ( $\cong$ 1750 kPa)	6 % RBI e Cura de 28 dias ( $\cong$ 2400 kPa)

Fonte: França (2003).

### 3.3.3. Produtos alternativos

Incluem-se, aqui, apenas alguns dos produtos comerciais já testados na estabilização de solos, mas que não são específicos para esse fim. Ressalta-se que os subprodutos ou resíduos oriundos de processamentos industriais, também com experiências na pavimentação rodoviária serão abordados no Capítulo 4.

#### 3.3.3.1. Estabilização solo-hidróxido de sódio (soda cáustica)

Segundo Ingles e Metcalf (1973 apud ALCÂNTARA, 1995) o aditivo apresenta reação favorável nos solos ricos em caulinita e alumínio e fraco desempenho nos solos ricos em montmorilonita. Um dos mecanismos de estabilização proposto consiste na degradação da estrutura do argilomineral pelo ataque alcalino, resultando como produtos de degradação o silicato de sódio e o aluminato de sódio. Os últimos se precipitam, com a formação de óxidos hidratados de alumínio, que preenchem poros e promovem cimentação, com aumento do peso específico aparente.

Os mesmos autores afirmam que pequenas quantidades de NaOH podem ser eficientes para a estabilização do solo, favorecendo desta forma o custo do processo. Além dessa vantagem sob o ponto de vista econômico, lembram os autores que o aditivo, misturado facilmente com água, auxilia grandemente na compactação dos solos, conduzindo a elevadas densidades. Destacam, também, que em termos de cuidados, deve ser levado em

consideração que o NaOH se carbonata facilmente quando exposto ao ar e, dada à sua natureza agressiva, pode apresentar um risco para os operadores, devendo ser manuseado com precauções.

### **3.3.3.2. Estabilização solo-cloreto de cálcio e solo-cloreto de sódio**

O cloreto de cálcio conduz à floculação, aumentando a permeabilidade dos solos (INGLES; METCALF, 1973). Contribui, também, com possíveis aumentos na densidade, em decorrência de um efeito de lubrificação, sendo que, esse fato pode não implicar em aumentos de resistência mecânica (PINTO, 1983). O autor descreveu, ainda, que a umidade relativa para a atuação adequada do produto deve se situar próxima de 29 %, à 25 °C, e que reaplicações de 0,5 kg/m<sup>2</sup> são suficientes para conservação da estrada estabilizada, repondo possíveis perdas por lixiviação.

A capacidade de atuação do cloreto de sódio, também, é dependente da umidade relativa, que deve se situar em torno de 76 %, a uma temperatura de 25 °C (PINTO, 1983); o mesmo autor relatou que a cristalização de sais com o produto pode contribuir para o preenchimento dos vazios do solo, aumentando a densidade e promovendo, assim, a melhoria na superfície no pavimento, dotando-a de resistência à abrasão. Com a obstrução da superfície e aumento da tensão superficial da água, a taxa de evaporação de água da camada do pavimento diminui, favorecendo sua retenção. Atentou-se para o fato de que, em contato com a água, o material cristalizado pode ser dissolvido e conduzido para o interior do solo, com posterior recristalização de agregados calcários ou dolomíticos, redundando na formação de materiais cimentantes (THORNBURN; MURA, 1969).

### **3.3.3.3. Estabilização solo-resorcinol formaldeído**

Amostras tratadas com esta resina e armazenadas em câmara úmida tornam-se completamente firmes dentro de poucas horas após a mistura. O Produto confere alguma resistência às areias, que facilmente é perdida quando imersa na água (BRAZETTI, 1996).

Para o mesmo autor, essas resinas são usualmente fornecidas no estado líquido e requerem a adição de cerca de 15 %, em relação ao seu peso, de um aldeído catalisador para acelerar e completar a pega. Pelo menos 5 % dessa mistura é necessário para estabilizar o solo, sendo que, quanto maior a porcentagem adicionada, maior a estabilidade.

#### **3.3.3.4. Estabilização solo-acrilato de cálcio**

O acrilato de cálcio é um sal orgânico que pode ser produzido com carbonato de cálcio e ácido acrílico. Apresenta-se na forma de um pó branco solúvel em água que polimeriza quando ativado por substâncias como o tiosulfato de sódio e o persulfato de amônia. O tempo de pega pode ser controlado pela variação das quantidades dos ativadores. Quando polimeriza, forma uma rede tridimensional de cadeias fortes e flexíveis envolvendo as partículas de solos. O teor ideal de incorporação ao solo situa-se entre 4 a 10 %. Uma quantidade menor não é o suficiente, enquanto que maior teor será antieconômico (KÉZDI, 1979).

Após a polimerização, a resistência do solo é bastante aumentada. Quanto menor a quantidade de água misturada, maior é o incremento da resistência. Similarmente, a resistência à flexão também aumenta tornando o solo elástico. O polímero envolve as partículas de solo, evitando a percolação ou infiltração de água. A permeabilidade pode ser radicalmente reduzida no caso de solos arenosos devido a sua completa impermeabilização (BRAZETTI, 1996).

Em alguns aspectos, principalmente sob o ponto de vista militar, a ação desse material torna-se ideal para certas utilizações como agente estabilizante. Ele pode ser adicionado a solos extremamente úmidos e, em minutos, transformar essa massa numa estrutura capaz de suportar aplicações de carga. Experimentos em campo pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA mostraram que com 4 a 6 % de acrilato de cálcio as argilas siltosas úmidas se estabilizam satisfatoriamente por 4 a 6 horas, o tempo suficiente para suportar um tráfego temporário (DAVIDSON; HANDY, 1960 apud BRAZETTI, 1996).

O acrilato de cálcio como estabilizante não tem sido muito utilizado devido ao seu elevado custo. O principal interesse por este material deve-se ao fato de que é o precursor da estabilização com polímeros. Enquanto seu custo não diminuir seu uso é desaconselhável para a construção de rodovias de importância secundária, sendo que ele pode ser considerado para medidas emergenciais (LAMBE, 1953 apud BRAZETTI, 1996).

#### **3.3.3.5. Estabilização solo-ácido fosfórico**

O ataque do ácido fosfórico nos constituintes dos solos leva à formação de novos compostos, podendo-se referir aos fosfatos de ferro e fosfatos de alumínio, que são duros e insolúveis (MEDINA, 1997). Esse produto possui um bom desempenho com relação ao mineral clorita (INGLES; METCALF, 1973; RICO; DEL CASTILLO, 1977).

Pinto (1983) comenta que os teores recomendados desse aditivo situam-se na faixa de 1 a 5 %, sendo o mais comum o traço de 2 %. Medina (1997) relatou um trabalho envolvendo a mistura de um solo argiloso + 5 % de ácido fosfórico compactada nas energias dos ensaios Proctor normal e intermediário, tendo como valores de RCNC 2500 e 3500 kPa, respectivamente.

#### **3.4. Potencialidades de utilização**

No Brasil, diversas tentativas têm sido feitas com o uso de variados tipos de estabilizantes químicos de solos, tanto em laboratório, como em campo, sejam eles patenteados ou não; entretanto, nenhum desses ainda foi capaz de suplantiar em eficiência e uso dos três estabilizantes tradicionais, quais sejam, cimento, cal, e betume. Destaque seja feito ao produto RBI Grade 81, cujos resultados desenvolvidos (FRANÇA, 2003) e em desenvolvimento pelo aluno de Doutorado Tiago Pinto da Trindade DEC/UFV, no laboratório de geotecnia da Universidade Federal de Viçosa têm demonstrado que esse aditivo poderá vir a ser uma alternativa promissora para estabilização de uma grande gama de solos tropicais, carecendo, entretanto, de avaliações de seu desempenho no campo.

A experiência brasileira no emprego do cimento é grande em camadas de base e sub-bases de pavimentos rodoviários e baseia-se nas constatações práticas do seu emprego em outros países. Os mecanismos de estabilização podem ser entendidos como a formação de hidróxido de cálcio, após a hidratação do cimento, o que contribui para a floculação das argilas. Suas limitações em termos de uso se baseiam em aumento de custo quando a granulometria do solo tende a ser muito fina.

A estabilização de solos com a cal para ser efetiva, exige que se tenha disponibilidade de fontes de sílica e/ou alumina necessárias à formação dos produtos cimentantes oriundos das reações pozolânicas. Assim, solos argilosos – solos finos – respondem melhor ao tratamento com a cal, por possuírem sílica tetraedral e alumina octaedral. O DNIT (1996, p.160) relata que o teor de cal mais freqüentemente empregado é de 5 a 6 %; entretanto, um estudo de traços ou teores apropriados, pelo fato do Brasil apresentar solos com características regionais de formação de solos bem distintas, torna-se de fundamental importância, quando se quer estabilizar um solo com esse produto.

O interesse da estabilização com betume pode ser a impermeabilização ou a cimentação, em se tratando de serem os solos de granulometria fina ou arenosa.

### **3.5. Experimentação em laboratório**

O esgotamento natural de materiais importados de jazidas (solo/cascalho) e brita, aliado ainda aos impactos econômicos e ambientais conseqüentes de sua utilização, muito tem contribuído para o desenvolvimento de pesquisas, objetivando o emprego de materiais locais adjacentes às rodovias, mas, adequadamente, estabilizados com aditivos químicos, em camadas de pavimento de rodovias.

Para fins rodoviários, um aditivo ao ser incorporado ao solo deve ser capaz não só de melhorar as suas propriedades de engenharia, mas, também, ser ambientalmente correto. Em estradas, as características de resistência, de impermeabilidade e de durabilidade tornam-se essenciais para a manutenção



do tráfego de veículos. A relação custo/benefício deve, também, ser considerada como limitante na escolha de um determinado estabilizante químico de solos.

O conhecimento dos solos locais, tanto do ponto de vista geotécnico (granulometria, plasticidade, características de compactação, etc.), quanto do ponto de vista químico (constituição mineralógica, química, capacidade de troca catiônica, ponto de carga zero, etc.) é de fundamental importância quando se pretende incorporar ao solo algum estabilizante químico visto que, esses exibem certas peculiaridades que podem conduzir aos mais variados fenômenos físico-químicos entre as partes envolvidas.

Antes da aplicação, em campo, do estabilizante químico, para o bom desempenho da obra deve-se ter a consciência da necessidade de realização de ensaios laboratoriais com o solo e com as misturas desses produtos. Assim sendo, os ensaios geotécnicos de caracterização, compactação, CBR e compressão não confinada merecem destaque. Após esta etapa e com base nos resultados obtidos no laboratório, procede-se à execução da obra no campo, de acordo com as recomendações técnicas contidas nas especificações de serviço.

Para Gidigas (1976) as variáveis que afetam a estabilização de solos subdividem-se em fatores primários e contribuintes do processo, como se segue:

- solos: propriedades físicas, químicas e físico-químicas, características da mistura e umidade após a mistura;
- material estabilizante: quantidade e propriedades;
- mistura: tipo, método e temperatura; e
- compactação e cura do produto estabilizado:  $W_{ótima}$ , método e grau de compactação e cura.

Segundo o TRB (1976) em se tratando de misturas solo-cal ensaiadas em laboratório, a heterogeneidade do solo natural, a não uniformidade das misturas, os desvios na preparação das amostras, as técnicas de teste, a

discrepância na peso específico, as variações de temperatura e o tempo de cura, são os fatores contribuintes para a variabilidade dos dados obtidos.

### **3.6. Etapas experimentais em campo**

As principais propriedades naturais de um solo para o qual se busca a correção durante a construção ou durante a vida útil da obra rodoviária são, segundo Ingles e Metcalf (1973), a manutenção do volume ou controle da expansibilidade, a resistência mecânica, a manutenção no tempo dessa resistência mecânica e a permeabilidade.

Os parâmetros de campo a serem determinados nos solos e nas misturas solo e aditivo químico são: o teor de umidade (método speedy ou frigideira) e o grau de compactação (método do frasco de Areia) balizados em dados de laboratório.

Devido às grandes variações de tipos de solos e fatores de utilização de trechos tratados, não existe uma forma simples e definitiva de se determinar qual aplicação de determinado produto irá produzir o resultado esperado. Somente os resultados de ensaios de laboratório podem dar uma indicação do comportamento dos diversos tipos de solos com o produto. Mesmo assim, essas análises são efetuadas em uma porção limitada de solo, podendo o trecho a ser tratado apresentar comportamento em serviço diferente do previsto nas amostras estudadas no laboratório. De qualquer forma, ensaios prévios em laboratório são recomendados e até mesmo indispensáveis, pois darão uma indicação dos problemas que serão encontrados durante o processo de aplicação das medidas corretivas que serão eventualmente requeridas e dos resultados prováveis.

Cada projeto deve ser analisado e estudado em função dos requisitos exigidos, executado de acordo com os parâmetros definidos em laboratório e utilizando as medidas corretivas que possam ser necessárias para se atingir os resultados desejados. A execução, com sucesso, de um projeto, deve seguir o seguinte roteiro:

- (i) destinação do trecho a ser tratado - pavimento primário, base, sub-base e subleito;

- (ii) caracterização geotécnica e mecânica do solo a ser tratado e da mistura;
- (iii) planejamento - suprimento de água;
- (iv) aplicação - preparação e correção do solo, desagregação e homogeneização, aplicação do produto, homogeneização do solo tratado, regularização, compactação, acabamento e drenagem.

Os estabilizantes químicos, muitas vezes, são misturados ao solo na própria pista onde será executada a compactação, minimizando com isso gastos com transporte. A seqüência de aplicação é: (i) gradeamento e pulverização do solo; (ii) adição de água com caminhão pipa; (iii) aplicação do produto; (iv) homogeneização da mistura solo + aditivo; (v) nivelamento e preparo do greide; (vi) compactação com rolo pé-de-carneiro ou pneumático; (vii) corte para acabamento; (viii) compactação com rolo de pneus; (ix) base finalizada; (x) realização de ensaios de controle de compactação.

A distribuição em campo de estabilizantes sólidos, tais como cal e cimento, é feita em sacos ao longo do leito da estrada, sendo o teor de aditivo a ser incorporado controlado pela distância entre os sacos, de tal forma que quanto menor for essa distância, obviamente, maior será o teor do estabilizante por unidade de solo. Após a distribuição dos sacos no leito da estrada, é iniciada a abertura destes e efetuado o espalhamento no sentido longitudinal, onde procura-se deixar uma espessura constante sobre o solo, para se obter uma boa incorporação do aditivo.

As variações na qualidade do produto final, que ocorrem durante a execução de trechos rodoviários, são decorrentes do meio ambiente, das mudanças nos constituintes das misturas, das técnicas construtivas, dentre outros. Vale destacar, também, que os benefícios da estabilização do solo com um determinado aditivo só serão alcançadas após devidamente respeitadas as peculiaridades de cada estabilizante, tais como exigência de período de cura.

Em um ensaio usando agentes estabilizantes em argilas expansivas, Smith (1962) relata que conseguiu-se alcançar apenas de 10-75 % da resistência obtida em laboratório, destacando a não homogeneidade da mistura

solo-estabilizante como a principal responsável. Quanto menor as partículas do solo e quanto maior o conteúdo de água, mais difícil se torna a homogeneidade da mistura (INGLES, 1968; SMITH, 1962).

### 3.7. Considerações finais

Com base no exposto nesse capítulo, fica evidenciado que existe uma gama de produtos com possibilidades de uso na estabilização química de solos. No entanto, há necessidade de que sejam realizados ensaios em laboratório e em condições reais de campo, para que se possa entender melhor as reações entre os aditivos e os constituintes dos solos, bem como o possível desempenho dessas misturas no campo, principalmente em se tratando de solos tropicais.

### 3.8. Referências bibliográficas

AGRA, F.; LUCENA, F.B.; FERREIRA, H.C. Aproveitamento de finos da pavimentação urbana utilizando aditivos betuminosos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 26., v. 2, 1992, Aracaju, Se. **Anais...** Aracaju, Se: [s.n.], 1998. p. 1183-1203.

ALCÂNTARA, M.A.M. **Estabilização química dos solos para fins rodoviários**: técnicas disponíveis e estudo de caso dirigido à estabilização solo-cal de três solos de Ilha Solteira - SP. Viçosa, MG: UFV, 1995. 91 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Estudo técnico 35**: dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem. São Paulo, 3. ed., 1986. 51 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12253**: solo-cimento: dosagem para emprego como camada de pavimento: procedimento. Rio de Janeiro, 1992. 4 p.

AZAMBUJA, M.A. **Geologia aplicada a solo-cimento**. São Paulo: ABCP, 1981. 66 p.

BALBO, J.T. Alguns conceitos diferenciadores dos materiais estabilizados com cimento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 7., 1996, São

José dos Campos, SP. **Anais...** São José dos Campos, SP: [s.n.], 1996. p. 275-294.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1987. 529 p.

BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J.I.; TODRES, H.A. **Stabilization of clay Soils by Portland cement or lime: a critical review of literature**. Illinois, USA: PCA R & D, serial n. 2066, 2003. 60 p.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. Tradução Antônio Neiva Figueiredo Filho. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Barros, 1989. 898 p.

BRAZETTI, R. Aditivos orgânicos para estabilização de solos: origens e pesquisas. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 7., 1996, São José dos Campos, SP. **Anais...** São José dos Campos, SP: [s.n.], jul. 1996. P. 186-209.

BUENO, B.S.; LIMA, D.C. Técnicas de estabilização de solos com fins rodoviários. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE FLORESTAL, 1., 1991, Belo Horizonte, MG. **Anais...** Viçosa, MG: Folha de Viçosa, 1991. p. 143-183.

BUENO, B.S. **Aspectos da estabilização de solos com uso de aditivos químicos e de inclusões plásticas aleatórias**. 1996. 99 f. Texto para Concurso Público (Livre Docência)-Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, SP, 1996.

CARVALHO, C.A.B.; FILHO, J.D.; SANTOS, N.R.E. Uma análise de desgaste e de resistência à compressão simples: mistura solo-betume. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 26., 1992, Aracaju, Se. **Anais...** Aracaju, Se: [s.n.], 1992. p. 150-164.

CASANOVA, F.J.; CERATTI, J.A. The assessment of requirement of oxissols by a physico-chemical method. In: INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP, 8., part 1, 1986, [S.I.], Brasil. **Anais...** [S.I.], Brasil: [s.n.], 1986. p. 243.

CASANOVA, F.J. Fundamentos (mecanismos) da dosagem físico-química do solo-cimento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 26., 1992, Aracaju, Se. **Anais...** Aracaju, Se: [s.n.], 1992. p. 87-110.

CASANOVA, F.J.; RODRIGUES, M.G.M. Um estudo comparativo entre três métodos de dosagem do solo-cimento utilizando solos laterizados do Norte-Nordeste. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 27., v. 1, 1993, Teresina, PI. **Anais...** Teresina, PI: [s.n.], 7-12 Nov. 1993. p. 55-64.

CASTRO, E.; SERAFIM LUIS, A. **O solo-cal na pavimentação de estradas e aeródromos**. Lisboa, Portugal: LNEC, 1974. p. 45-51. (Memória, 450).

CERATTI, J.A.P.; MEDINA, J. Estudo de solos estabilizados com cimento sob a ação de cargas repetidas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 18., 1983, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre, RS: [s.n.], set. 1983. p. 236-263.

CHAVES, F.J.; MOTTA, L.M.G. Aspectos da caracterização geotécnica de alguns solos de Fortaleza para aplicação em obras rodoviárias. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis, SC: [s.n.], 20-23 nov. 2001. p. 320-336

CON AID INTERNATIONAL. **Estabilizacion ionica de suelos**. África do Sul: CON AID, 2005. Disponível em: <<http://www.conaid.com.ar>>. Acesso em: 1 maio 2005.

CONSOLID. **Manual**. Suíça: CONSOLID, 1999. Não paginado.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ, 2. ed., 1996. 320 p. (Antigo DNER).

DYNACAL PRODUTOS QUÍMICOS. **Manual**. São José dos Campos, SP: DYNACAL, 2005. Disponível em: <<http://www.dynacal.com.br>>. Acesso em: 18 maio 2005.

DYNASOLO S/A. **Manual Técnico DS 328**. Indianópolis, PR: DYNASOLO, 1993. 87 p.

ENZYMATIC. **Manual**. Austrália: CIACI, 2005. Disponível em: <<http://www.ciaci.com/msds.html>>. Acesso em: 19 maio 2005.

FERRAZ, R.L.; LIMA, D.C.; BUENO, B.S. A dosagem físico-química aplicada aos solos da microrregião de Viçosa. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 27., v. 1, 1993, Teresina, PI. **Anais...** Teresina, PI: [s.n.], 7-12 nov. 1993. p. 122-140.

FERRAZ, R.L. **Contribuição ao estudo da estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 180 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

FILHO, J.E.B.; CORREIA, J.A.B.; NOBRE JÚNIOR, E.F. Análise da estabilização com cal de solos do Município de Limoeiro do Norte, Estado do Ceará. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis, SC: [s.n.], 20-23 nov. 2001. p. 70-79.

FRANÇA, F.C. **Estabilização química de solos para fins rodoviários**: estudo de caso com o produto RBI grade 81. Viçosa, MG: UFV, 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

GIDIGASU, M.D. **Laterite soil engineering**. Amsterdam: ESPC, 1976.

GUIMARÃES, J.E.P. **Estabilização de solos**: nova e importante aplicação da cal, seus conceitos e suas vantagens. São Paulo: ABPC, 1971. 67 p. (Boletim, 5)

GUIMARÃES, L.S.P. **Caracterização geotécnica e química de um perfil residual da Zona da Mata Norte-MG**. Viçosa, MG: UFV, 1996. 57 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1996.

HARTY, J.R. **Factors influencing the lime reactivity of tropically and subtropically weathered soils**. Illinois, USA: UIUC, 1971. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA, 1971.

HERRIN, M; MITCHELL, H. **Soil lime mixtures**. Washington, D.C.: HRB, 1961. p. 99-138. (Bulletin, 304).

HERZOG, A.; MITCHELL, J.K. **Reactions accompanying stabilization of clay with cement**. Washington, D.C.: HRR/NRC, 1963. p. 166-171. (Bulletin, 36).

HOGENTOGLER, C.A. **Engineering properties of soil**. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 1937. 434 p.

INGLES, O.G. Advances in soil stabilization. **Revista Pure Appl. Chem.**, [S.I.], v. 18, n. 11, p. 201-309, 1968.

INGLES, O.G.; METCALF, J.B. **Soil stabilization principles and practice**. New York, USA: Swikey e Sans, 1973. 374 p.

ISS 2500. **Ionic soil stabilizer**: the road in a drum. África do Sul: RMS, 2005. Disponível em: <<http://www.iss2500.com.za>>. Acesso em: 18 maio 2005.

KÉZDI, A. Physical and chemical aspects of soil stabilization. In: DEVELOPMENTS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING. **Stabilized earth roads**. 19. Budapest: Elsevier, 1979. cap. 2. p. 31-68.

LAMBE, T.W.; MICHAELS, A. Altering soil properties with chemicals. **Chem. Eng. N.**, [S.I.], v. 32, n. 6, p. 488-492, 1954.

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

LIMA, D.C.; BUENO, B.S. **Pavimentação betuminosa: os materiais betuminosos.** Viçosa, MG: UFV, 1981. 57 p. (Publicação, 87).

LIMA, D.C. Estabilização solo-cal. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 19., 1984, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n.], 1984. p. 65-82.

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

LIMA, D.C.; RÖHM, S.A.; BARBOSA, P.S.A. **Estabilização dos solos III: mistura solo-cal para fins rodoviários.** Viçosa, MG: UFV, 1993. 46 p. (Publicação, 334)

LIMA, D.C.; SANTOS, M.F.; BUENO, B.S. Estabilização dos solos com cal e betume. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 6., 1995, Santos, SP. **Anais...** Santos, SP: [s.n.], 1995. p. 75-90.

LIMA, D.C.; MACHADO, C.C; CARVALHO, C.A.B. et al. A experiência da UFV no emprego de estabilizantes químicos em estradas florestais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 6., 2003, Belo Horizonte, MG. **Anais...** Belo Horizonte, MG: SIF/UFV, 8-10 jul. 2003. p.69-117.

LUCENA, F.B.; ARAÚJO, R.N.A.; FERREIRA, H.C. Uso de emulsão catiônica na estabilização de solos lateríticos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 17., v. 2, 1983, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre, RS: [s.n.], 1983. p. 69-90.

MARQUES, G.L.O.; LARIOS, M.R.B. **Pavimentação.** Juiz de Fora, MG: UFJF, 2005. Não paginado. (Notas de Aula).

McDOWELL, C. Evaluation of soil-lime stabilization mixtures. In: HIGHWAY RESEARCH RECORD, 139., 1966, Washington, D.C. **Record...** Washington, D.C: HRB, 1966. p. 15-24.

MEDINA, J. Research on stabilization at Federal University of Rio de Janeiro. In: SOUTHEAST CONFERENCE ON SOIL ENGINEERING, 5., 1997, Bangkok. **Anais...** Bangkok: [s.n.], 1997. p. 1-11.



MENDONÇA, A.A. **Caracterização tecnológica de misturas solo-cal.** Viçosa, MG: UFV, 1998. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1998.

METCALF, J.B. The effect of high curing temperature on the unconfined compressive strength of a heavy clay stabilized with lime and cement. In: AUSTRALIA-NEW ZEALAND CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 4., 1963, Victoria, Austrália. **Anais...** Victoria, Austrália: [s.n.], 1963. p. 126-130.

MOMM, L. Uso de emulsão catiônica na estabilização de solos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 18., 1983, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre, RS: [s.n.], 1983. p. 556-564.

NÓBREGA, M.T. **As reações dos argilos-minerais com a cal.** São Paulo: ABPC, 1985. p. 57-78 (Boletim, 14).

NÓBREGA, M.T. **A estabilização de solos tropicais com adição de cal para fins rodoviários.** São Paulo: USP, 1988. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geociências)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

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

NÜNEZ, W.P.; BASTOS, C.A.B; DIAS, C.R.R. Caracterização e estudo da potencialidade de emprego em estradas vicinais de solos plintílicos ocorrentes no sul da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 26., 1992, Aracaju, SE. **Anais...** Aracaju, SE: [s.n.], 25-30 out. 1992. p. 1-23.

NÜNEZ, W.P.; CERATTI, J.A.P. Efeitos da adição de cimento a um solo residual de arenito. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 26., 1992, Aracaju, SE. **Anais...** Aracaju, SE: [s.n.], 25-30 out. 1992. p. 24-59.

PERMAZYME. **Manual.** Nevada, USA: Remtech Engineers, 2005. Disponível em: <<http://www.remtech-eng.com>>. Acesso em: 18 maio 2005.

PESSOA, F.H.C. **Análises dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário.** Brasília, DF: UNB, 2004. 151 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade de Brasília, DF, 2004.

PETRUCCI, E.G.R. **Material de construção.** Porto Alegre, RS: Globo, 1978. 435 p.

PINTO, C.S. **Estudo de solo-cal com solos brasileiros.** Rio de Janeiro: IPR, 1965. 17 p. (Publicação, 64).

PINTO, C.S. **Estabilização de solos**. São Paulo: USP, 1983. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 1983. 20 p. (Notas de Aula).

PITTA, M.R. **Pequeno histórico da estabilização de solos com cimento**. São Paulo: [s.n.], 1980. 4 p.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Subgrades, sub bases and shoulders for concrete pavement**. Skokie: [s.n.], 1960. 5 p.

ROAD BUILDING INTERNATIONAL - RBI. **Manual**. Netherlands, B.V.: RBI, 2002. Disponível em: <<http://www.rbi.global.com>>. Acesso em: 8 jan. 2002.

RICO, A.; DEL CASTILLO, H. **La ingeniería de suelos en las vías terrestres**. México: I Limusa, v. 2, 1977. 643 p.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Pini, v. I, 1997. 174 p.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. São Paulo: Pini, v. II, 2001. 671 p.

SILVA, D.P. **Estudo do comportamento reológico de solos estabilizados com cimento**: processos gerais de estabilização. Lisboa, Portugal: LNEC, 1968. 343 f. Relatório Final (Processo 52/08/3048)-Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 1968.

SMITH, G.R. **Freezing solidifies tunnel site, construction methods and equipments**. USA: [s.n.], 44, 10. 1962. p. 104-108.

SOIL STABILIZATION PRODUCTS COMPANY. **Manual**: Earth Material Catalyst - EMC<sup>2</sup>. Merced, Califórnia, USA: SSPCo., 2005. Disponível em: <<http://www.allrod.com.br/emc2.html>>. Acesso em: 18 maio 2005.

SOUZA, M.L. **Pavimentação rodoviária**. Rio de Janeiro: DNER: Instituto de Pesquisa Rodoviária, 2. ed., 1980. 364 p. (livros técnicos e científicos).

TECFLORA. **Catálogo**: RBI Grade 81: o melhor resultado para a estabilização do seu solo. Brasil: TECFLORA, 2001. 4 p.

TERRAFIX. **Prospecto**. Johannesburg, África do Sul: ABE Industrial Products, 1997. Não paginado. (Cedido por representante em Curitiba, PR).

THOMASI, L.; LIMA, D.C.; BUENO, B.S. Estabilização de um solo fino da microrregião de Viçosa com cal e cimento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 27., v. 1, 1993, Teresina, PI. **Anais...** Teresina, PI: [s.n.], 7-12 nov. 1993. p. 11-31.

THOMPSON, M.R. Lime reactivity of Illinois soils. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, Illinois, USA, v. 92, 1966. Não paginado.

THOMPSON, M.R. **Engineering properties of lime-soil mixtures**. Urbane, Illinois: University of Illinois, 1967. 32 p. (Project IHR, 76).

THORNBURN, T.H.; MURA, R. **Stabilization of soils with inorganic salts and basis**: a review of the literature. Washington, D.C.: HRB, 1969. 22 p. (Bulletin HRR, 294).

TOWNSEND, F.C.; DONAGHE, R.T. **Investigation of accelerated curing of soil-lime and lime-fly ash-aggregate mixtures**. USA: U. S. Army Engineering Experiment Station, 1976. 124 p. (Technical Report, S-76-9).

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB. **State-of-the-art: lime stabilization: reactions, properties, design, construction**. Washington, D.C., USA: [s.n.], 1976. 31 p. (circular, 180).

TRINDADE, T.P.; CARVALHO, C.A.B.; LIMA, D.C. Comportamento resiliente de um solo arenoso da região de Viçosa-MG no estado natural e estabilizado com cimento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis, SC: [s.n.], 2001. p. 369-382.

TRINDADE, T.P.; LIMA, D.C; MACHADO, C.C. et al. Influência do tipo de cura (selada e exposta) e da imersão em água na resistência mecânica de misturas solo-RBI grade 81 com vistas a aplicações em estradas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 601-606, ago. 2005a. ISSN 01006762.

\_\_\_\_\_. 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**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 413-418, jun. 2005b. ISSN 01006762.

VAILLANT, J.M.M. **Efeitos estabilizantes do DS 328 sobre três solos de Viçosa -MG, para fins rodoviários**. Viçosa, MG: UFV, 1995. 76 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

VIEIRA, R.I.; MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G.; CASTRO, F.J.C.O. Avaliação de um trecho de solo-cal na RJ - 116. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 21., 1986, Salvador, Bahia. **Anais...** Salvador, Bahia: [s.n.], 1986. Paginação irregular.

WINTERKORN, F. **Soil stabilization**. New York, USA: foundation engineering handbook, Winterkorn, F. and Fang, H. (eds), Van Nostrand Reinhold Company, 1975. p. 323-330.



## **4. USO DE RESÍDUOS NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

### **4.1. Introdução**

A reciclagem de vários tipos de resíduos industriais como geomateriais e a utilização dos mesmos na estabilização de solos é vista como uma alternativa de grande potencial para a construção rodoviária. Consoli (2003) alerta para as vultosas quantidades de resíduos que podem ser utilizadas em geotecnia, destacando que resíduos contaminados por substâncias tóxicas requerem tratamento prévio, no intuito de prevenir futuros impactos ambientais.

Em se tratando de estradas florestais, a utilização de resíduos como materiais de construção pode reduzir, em muito, o custo de construção, embora possa gerar uma outra preocupação relativa ao potencial de contaminação do meio ambiente. Assim, aliado ao uso de resíduos industriais, torna-se necessário a realização de estudos de impactos ambientais, destacando-se os possíveis riscos de contaminação, principalmente por metais pesados, nos diversos ecossistemas em torno dos quais serão aplicados os resíduos.

O presente capítulo está subdividido em duas partes referente à utilização de resíduos na pavimentação de rodovias:

- (i) parte I: onde são descritos os aspectos ambientais - legislação pertinente, possíveis impactos ambientais passíveis de ocorrência, medidas mitigadoras e indicadores ambientais;
- (ii) parte II: onde são relatadas experiências, ao nível de Brasil, sobre a viabilidade de aplicação proveitosa de resíduos industriais como novos materiais de construção de rodovias. É dada ênfase aos resíduos que atuam como agentes estabilizantes de solos, também, àqueles com possibilidades de serem incorporados como parte integrante de misturas asfálticas e ainda àqueles que podem ser encapsulados com cimento para a substituição de solos.

Procura-se, aqui, desmembrar as potencialidades técnicas que os resíduos já testados para fins rodoviários podem ter frente às exigências de solos e materiais empregados na pavimentação de rodovias, sem obviamente esquecer dos seus possíveis impactos no meio ambiente advindos ou de má atuação cimentante no solo ou de uma falta de confinamento adequada.

## **4.2. Aspectos ambientais dos resíduos**

### **4.2.1. Definição e classificação**

O termo resíduo refere-se a material resultante das atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, de serviço, de limpeza, agrícola ou simplesmente vegetativa, que deixa de ser útil, funcional ou estética para quem os gera, podendo encontrar-se no estado sólido, semi-sólido, gasoso, quando contidos, e líquidos, quando não passíveis de tratamento convencional (FEAM, 2003).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) editou, em 1987, o seguinte conjunto de normas que visam padronizar, no Brasil, a classificação de resíduos: (i) NBR 10.004 - Classificação de resíduos sólidos; (ii) NBR 10.005 – Lixiviação de resíduos (procedimentos); (iii) NBR 10.006 – Solubilização de resíduos (procedimentos) e (iv) NBR 10.007 – Amostragem de resíduos (procedimentos).

Os resíduos são classificados como perigosos (classe I), inertes (classe II) e não inertes (classe III) de acordo com a NBR-10.004 da ABNT. Os resíduos perigosos apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Os resíduos inertes são quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, (NBR 10.007 - amostragem de resíduos) e submetidos a contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização, (segundo NBR 10.006 - solubilização de resíduos) não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados à concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor. Os resíduos não inertes são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos I perigosos e III inertes nos termos da NBR 10.004. Os resíduos classe II - não inertes, podem ter propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

#### **4.2.2 Legislação pertinente**

A disposição final dos resíduos no meio ambiente pode levar à ocorrência de inúmeros impactos ambientais, ocasionando penalidades para quem os lança.

A Constituição Federal, em seu Artigo 225, determina que:

Todos têm o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

A Lei nº 9.605, de 12/02/98, dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente e, o Decreto nº 3.179, de 21/09/99, dispõe sobre a especificação das sanções aplicáveis às condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências:

Art.54 - causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortalidade de animais ou a destruição significativa da flora. Pena – reclusão de 1 a 4 anos e multa; § 2º – Se o crime: V – ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, ou detritos, óleos ou substâncias oleosas, em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos: Pena – reclusão de 1 a 5 anos; multa de R\$ 1.000,00 a R\$ 50.000.000,00.

O Art. 60 estabelece que:

Construir, reformar, ampliar, instalar ou fazer funcionar, em qualquer parte do território nacional, estabelecimentos, obras ou serviços potencialmente poluidores, sem licença ou autorização dos órgãos ambientais competentes, ou contrariando as normas legais e regulamentos pertinentes: Pena – detenção de 1 a 6 meses ou multa, ou ambas as penas cumulativamente; Multa – de R\$ 500,00 a R\$ 10.000.000,00.

O Decreto 38.356/98 regulamenta a Lei 9.921/ 93, que dispõe sobre a gestão dos resíduos sólidos no Estado do Rio Grande do Sul (FEPAM/RS, 2003), em seu Art. 4 estabelece que os sistemas de gerenciamento dos resíduos sólidos de qualquer natureza terão como instrumentos básicos planos e projetos específicos de coleta, transporte, tratamento, processamento e destinação final, a serem licenciados pela fundação estadual de proteção ambiental (FEPAM), tendo como metas a redução de resíduos gerados e o perfeito controle de possíveis efeitos ambientais.

O Art. 8 estabelece que:

A coleta, o transporte, o tratamento, o processamento e a destinação final dos resíduos sólidos de estabelecimentos industriais, comerciais e de prestação de serviços, inclusive de saúde, são de responsabilidade da fonte geradora.



A Resolução Nº 313, de 29 de outubro de 2002, dispõe sobre o inventário nacional de resíduos sólidos industriais. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), no uso de suas competências e tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, considerando: (i) a necessidade da elaboração de Programas Estaduais e do Plano Nacional para Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais; (ii) a ausência de informações precisas sobre a quantidade, os tipos e os destinos dos resíduos sólidos gerados no parque industrial do país; (iii) que esses resíduos podem apresentar características prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente; (iv) que para a elaboração de diretrizes nacionais visando o controle dos resíduos industriais é essencial a realização de um inventário dos resíduos industriais gerados e existentes no país e (v) que o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais é um dos instrumentos de política de gestão de resíduos, resolve: Art. 1º: “os resíduos existentes ou gerados pelas atividades industriais serão objeto de controle específico, como parte integrante do processo de licenciamento ambiental.” Art. 2º: para fins desta resolução entende-se que: - resíduo sólido industrial:

É todo o resíduo que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semi-sólido, gasoso - quando contido, e líquido - cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição. Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais: é o conjunto de informações sobre a geração, características, armazenamento, transporte, tratamento, reutilização, reciclagem, recuperação e disposição final dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias do país mensalmente e manter na unidade industrial os dados de geração e destinação dos resíduos gerados para efeito de obtenção dos dados para o *inventário nacional dos resíduos industriais*.

### **4.2.3 Licenciamento ambiental**

A FEPAM do Rio Grande do Sul definiu o termo licenciamento ambiental como sendo o procedimento administrativo realizado pelo órgão ambiental competente, que pode ser federal, estadual ou municipal, para licenciar a instalação, ampliação, modificação e operação de atividades e empreendimentos que utilizam recursos naturais, ou que sejam potencialmente poluidores ou que possam causar degradação ambiental. O licenciamento é um dos instrumentos de gestão ambiental estabelecidos pela lei Federal n.º 6938, de 31/08/81, também conhecida como Lei da Política Nacional do Meio Ambiente. A FEPAM/RS cita, ainda, a Resolução nº 237 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) que definiu, em 1997, as competências da União, Estados e Municípios e determinou que o licenciamento deve ser sempre feito em um único nível de competência.

No licenciamento ambiental são avaliados impactos causados pelo empreendimento, tais como: seu potencial ou sua capacidade de gerar líquidos poluentes (despejos e efluentes), resíduos sólidos, emissões atmosféricas, ruídos e o potencial de risco, como por exemplo, explosões e incêndios. Cabe ressaltar, que algumas atividades causam danos ao meio ambiente principalmente na sua instalação. É o caso da construção de estradas e hidrelétricas, por exemplo.

Os principais documentos que se prestam ao licenciamento ambiental no Brasil são, segundo Silva (1994), o EIA/RIMA (o denominado estudo de impacto ambiental - EIA e seu respectivo relatório de impacto ambiental – RIMA) e o RCA/PCA (relatório de controle ambiental – RCA e seu plano de controle ambiental – PCA). O primeiro é exigido para os empreendimentos impactantes que apresentam grande capacidade transformadora do meio ambiente, enquanto o RCA/PCA é exigido para os de menor capacidade. O formato básico que deverá ter um EIA/RIMA, que é um documento mais rigoroso, pode ser obtido na FEAM/MG (Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais).

#### **4.2.4. Utilização na pavimentação rodoviária**

O reaproveitamento ou reciclagem de resíduos pode ser feito das seguintes formas: (i) uso direto ou reutilização do resíduo dentro do processo industrial; (ii) reaproveitamento interno, através de um novo processo industrial; e (iii) reaproveitamento externo, que se refere à venda ou doação a terceiros para utilização como matéria prima em outro processo industrial.

Os fatores que interferem no reaproveitamento externo são: (i) responsabilidade do gerador – garantia total da reutilização do resíduo; (ii) distância da unidade de re-processamento – custos de transporte e (iii) volume de resíduos disponíveis para o re-processamento – viabilidade em função da geração.

##### **4.2.4.1. Impactos ambientais passíveis de ocorrência**

A construção de estradas por si só, constitui-se num meio de intervenção do homem nos recursos naturais terrestres, levando os setores técnicos e ambientalistas a demonstrarem preocupações com relação aos seus efeitos junto ao meio ambiente. A erosão e a sedimentação nas regiões florestais brasileiras têm sido os principais objetos de reflexões da implantação de estradas florestais. O comprometimento da trafegabilidade e o carreamento do material para os cursos d'água, causando assoreamento e seus peculiares danos ambientais, são os principais problemas observados. O DNIT (1996, p. 35-39) descreve em seu manual, outros impactos que podem advir de obras rodoviárias.

Quando se considera a disposição final de resíduos em camadas compactadas de pavimentos rodoviários, diversos impactos podem surgir no ambiente em função, principalmente, da constituição química, da formulação (pó ou líquido) e da forma como o aditivo é aplicado ao solo, trazendo, com isto, sérios prejuízos não só para o meio físico (solo, água e ar) e biótipo (fauna e flora), como também para o meio antrópico (o homem e suas interações sócio-econômicas). Para descrever um pouco esses fatores que podem gerar impactos ambientais, considera-se o efeito dos resíduos durante a etapa de

sua aplicação e incorporação ao solo e após a etapa de compactação da mistura solo-resíduo (Quadro 4.1):

*Fase 1 – Aplicação e incorporação do resíduo ao solo:*

*a) Impactos no meio físico*

O uso de resíduos industriais como agentes estabilizantes de solos locais, gerando materiais susceptíveis às condições exigidas pelos órgãos rodoviários competentes, pode-se evitar a utilização de materiais de empréstimo, ou seja, materiais provenientes de jazidas, de decapeamento e remoção de perfis de solo e até mesmo de britagem (desmonte e fracionamento de rochas) minimizando, com isto, impactos ambientais.

Com relação ao processo construtivo de camadas rodoviárias estabilizadas com resíduos, após a passagem da grade de disco, pode ocorrer sob a ação de chuvas carreamento de partículas da mistura não compactada, levando com isso, substâncias químicas presentes no resíduo que podem ser arrastadas para solos que contém espécies comerciais, alterando o seu pH e a sua microbiota, podendo ocorrerem sérios prejuízos ao desenvolvimento dessas espécies.

A principal característica afetada na água pela ação de resíduos, é a sua qualidade, uma vez que, por escoamento ou por lixiviação, alguns constituintes químicos dos resíduos, dentre eles os metais pesados, podem ser arrastados sendo encontrados nas águas de superfície e nos lençóis freáticos. Desse modo, esses produtos podem estar presentes nas águas superficiais e, também, nas águas subterrâneas, o que pode ser mais grave. As estradas de vale, por exemplo, por serem muito próximas dos cursos de água, devem receber cuidado especial. As águas de chuva influenciam diretamente na ocorrência desse impacto negativo.

O ar pode, também, ter a sua qualidade afetada em função da composição química e da formulação (pó ou líquido) de um determinado resíduo, afetando com isto, operários e, até mesmo, comunidades da área que

se utilizam da rodovia. Nessa situação pode, em alguns casos, ocorrer a possibilidade de surgimento de doenças do aparelho respiratório, dependendo do tempo de exposição. A ocorrência de ventos fortes e de temperaturas elevadas contribuem para a ocorrência desse impacto negativo. Ressalta-se que os ventos podem levar ao aumento da concentração de partículas no ar, para o caso de resíduo sólido, ou de odores ou gases indesejáveis, para o caso de resíduos líquidos.

*b) Impactos no meio biótico*

A alteração da composição química da água pelo deslocamento de substâncias presentes no resíduo, pode afetar tanto a fauna quanto a flora aquática. No caso da fauna aquática, a redução no tamanho da população e na saúde dos peixes, principalmente em rios e córregos, são as principais consequências negativas; Já a flora aquática, representada pelo fitoplâncton e macrófitas (aguapés, por exemplo) podem ter o seu desenvolvimento prejudicado, quando em presença de altos níveis de metais pesados ou pode ocorrer ganhos de nutrientes, provenientes dos resíduos.

A fauna terrestre, a exemplo da fauna aquática, pode ter sérios prejuízos em função da alteração da qualidade da água, podendo levar não só ao aparecimento de doenças como também, à própria morte de animais que consomem dessa água. O deslocamento de substâncias dos aditivos, de solos de estradas para solos de culturas, pode afetar o desenvolvimento da flora terrestre, principalmente em locais que contêm espécies comerciais, como o Eucalipto spp, devido em grande parte à alteração do pH do solo. Pode ocorrer também, aumento da concentração de nutrientes.

*c) Impactos no meio antrópico*

O aparecimento de doenças, causadas pela contaminação da água e do ar, pelos resíduos industriais, são os principais danos que estes podem causar às comunidades que moram nas redondezas das estradas florestais e se

**Quadro 4.1** – Impactos ambientais passíveis de ocorrência nas fases de aplicação e incorporação e, após a compactação em campo da mistura solo+resíduo industrial

Fator Ambiental	Fase de surgimento	Possível Impacto no Ambiente		Variável Influyente
		Positivo	Negativo	
Solo	1*	Uso de solo local	Carreamento de Particulados	Chuva
	2**	Redução da Infiltração e Aumento do Esc. Superf.	Perda de fertilidade e Perda de particulados	Erosão/ Vol. Tráfego
Água	1	Deposição de Nutrientes	Contaminação por metais pesados	Chuva
	2	Deposição de nutrientes	Contaminação Mudança de turbidez	Erosão/ Vol. Tráfego
Ar	1	-	Depreciação da qualidade	Vento e Temperatura
	2	Redução de Poeira	Depreciação da qualidade	Vento e Temperatura
Fauna	1	-	Geração de doenças Espécies prejudicadas	Chuva
	2	-	Geração de doenças Espécies prejudicadas	Erosão/ Vol. Tráfego
Flora	1	Ganhos de nutrientes	Desenvolvimento prejudicado	Chuva
	2	Ganhos de nutrientes	Desenvolvimento prejudicado	Erosão/ Vol. Tráfego
Condição Sócio-Econômica	1	-	-	-
	2	Tráfego contínuo de veículos	-	-
Saúde e Segurança	1	-	Surgimento de doenças	Chuva e Vento
	2	-	Surgimento de doenças	Erosão/ Vol. Tráfego

\*Fase 1 - incorporação e aplicação do resíduo ao solo; e \*\*Fase 2 - após compactação e conclusão da estrada.

utilizam dessas como meio de deslocamento no meio rural. Saliencia-se que a contaminação dos recursos hídricos por esses resíduos pode causar sérios problemas ao suprimento de água potável, podendo levar as comunidades que usufruem dessa água a terem a finalidade de vida comprometida, como por exemplo, problemas cancerígenos, em decorrência da presença de metais pesados.

*Fase 2 – Após o processo de compactação:*

a) Impactos no meio físico

Após processo de compactação, ocorre depreciação da qualidade do solo no que diz respeito à fertilidade; entretanto, para fins rodoviários, essa perda da fertilidade é desejável, visto que ocorre alteração de sua plasticidade com conseqüentes mudanças nas taxas de infiltração e de escoamento superficial, que diminuem e aumentam, respectivamente.

Os resíduos industriais podem conter diversas impurezas, entre elas os metais pesados. A ocorrência de erosão na estrada estabilizada ou melhorada com o uso de resíduos é um fenômeno que poderá acontecer, em função de diversos fatores. Van Put (1994 apud NÚÑEZ; AMARAL SOBRINHO, 2000) relatou que:

Os metais pesados presentes no material de solo perdido por erosão, quando atingirem o ambiente aquático dos rios, poderão ser liberados com mudanças de condições físico-químicas do meio, tais como: pH, potencial de oxirredução e força iônica, podendo, desta forma, contaminar os corpos d'água.

A erosão associada ao uso de resíduos industriais em pavimentação pode resultar em fortes impactos ao ambiente. A perda de solo por erosão, causada principalmente pelas chuvas, pode contribuir para a contaminação dos corpos d'água, os quais podem ser utilizados como fonte de água para as

culturas, animais e até mesmo pessoas. A depreciação da qualidade da água, pelo carreamento de particulados, pode também alterar a sua turbidez.

Núñez e Amaral Sobrinho (2000), analisando a influência do sistema de preparo do solo na perda de metal pesado por erosão na microbacia de Caetés (RJ), concluíram que o uso intensivo de agroquímicos associados às elevadas perdas de solo por erosão podiam determinar sérios riscos de contaminação da água do córrego da microbacia.

McBride (1989 apud ARAÚJO; AMARAL SOBRINHO, 2000), descreveu que, no solo, os metais pesados podem estar adsorvidos eletrostaticamente nos sítios de troca (adsorção não específica), incorporados na superfície da fase inorgânica através de ligações covalentes ou semicovalentes (adsorção específica), participando de reações de precipitação e dissolução, ligados a compostos orgânicos e na solução do solo. Assim sendo, variações pequenas de pH podem causar grandes modificações nesse sistema.

Araújo (1998 apud AMARAL SOBRINHO; VELLOSO; COSTA, 1999) relatou que a possível contaminação por metais pesados de aquíferos próximos à disposição final de resíduos dependerá, dentre outros fatores, da concentração e solubilidade dos metais pesados nos resíduos, da quantidade de resíduo colocada, da precipitação pluviométrica local, e da capacidade de interação dessas espécies iônicas com a fase sólida do solo (inorgânica e/ou orgânica), essa interação é bastante complexa, envolvendo reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxirredução.

Em estudo realizado por Amaral Sobrinho e Velloso et al., (1999), sobre a lixiviação de Pb, Zn, Cd e Ni em um solo podzólico tratado com resíduos siderúrgicos, concluiu-se que o pH elevado do resíduo siderúrgico alcalino resultou na diminuição da vazão das colunas de lixiviação, havendo menor mobilização de Zn, Ni e Cd, resultando em baixo risco de contaminação de aquíferos. Entretanto, os percentuais de retenção nas colunas e as relativamente elevadas concentrações desses metais no resíduo ácido predisseram elevadíssimos potenciais de contaminação de aquíferos.

A erosão pode levar ao aparecimento de outro fenômeno conhecido como ruptura hidráulica de solos, que se refere à perda de resistência e



estabilidade devido às pressões de percolação de água. Rocca e Iacovone et al., (1993) mencionam que este tipo de erosão (piping) se inicia num ponto de surgência de água e progride para trás, carreando os grãos de solo, resultando na formação de um tubo interno ao maciço, ao longo da linha de fluxo. As argilas plásticas bem compactadas são muito resistentes a esse fenômeno, já os solos não coesivos mal compactados são pouco resistentes e a ruptura pode ser brusca e repentina.

Além da ocorrência de erosão, outro fator relevante que poderá ocorrer na estrada finalizada é o desgaste ou em alguns casos até mesmo ruptura, de determinados trechos considerados críticos, ou seja, manchas de solos que não responderam bem à estabilização química com o resíduo industrial; esse desgaste, pode ser devido a tráfego de veículos de alta tonelagem, tais como ocorre em estradas florestais. Com isso, também, pode haver carreamento de partículas para os recursos hídricos.

Com relação ao ar, alguns resíduos industriais podem conter um forte odor, na maioria das vezes desagradável, que mesmo após a sua disposição final, ou seja compactado sobre um leito de uma estrada, podem gerar odores que, dependendo da exposição (tempo e distância), são prejudiciais à saúde. Exemplo disso é o alcatrão de madeira de eucalipto, produzido em fornos de carbonização de madeira e já testado para fins rodoviários (FERNANDES, 2000).

#### *b) Impactos no meio biótico*

O carreamento de partículas da mistura solo e resíduo industrial compactada para os rios ou lençol freático, devido à erosão ou desgaste do pavimento, pode afetar o pH e a turbidez das águas, levando ao estreitamento da base genética de espécies animais e vegetais aquáticas. Esse estreitamento será mais significativo, na medida em que os níveis de metais pesados, presentes no resíduo, estiverem fora dos níveis aceitáveis.

Já a fauna e a flora terrestre, principalmente as que vivem nas proximidades da estrada estabilizada com o resíduo, terão maior possibilidade

de ocorrência de doenças provenientes dos recursos hídricos, quando esses forem contaminados com resíduos, levando com isso à depreciação da qualidade de vida.

c) Impactos no meio antrópico

A estrada estabilizada com resíduo industrial gera o impacto positivo de permitir o fluxo contínuo de veículos, principalmente nas estações chuvosas, não causando prejuízos à economia da região. Entretanto, a possibilidade de contaminação, por altas concentrações de metais pesados, de aquíferos próximos a estrada estabilizada gera o incômodo de possíveis danos à saúde pública, com a conseqüente depreciação da qualidade de vida.

**4.2.4.2. Medidas mitigadoras**

Algumas medidas mitigadoras que podem ser usadas para reduzir a ocorrência de impactos associados ao uso de resíduos industriais em pavimentação rodoviária podem ser listadas como se segue:

- análogo ao relato de Araújo e Amaral Sobrinho (2000), sobre metais pesados em solos intemperizados, o melhor conhecimento do comportamento de metais pesados em solos compactados com relação à sua adsorção e a identificação dos fatores que mais influenciam na sua mobilidade e biodisponibilidade torna-se de fundamental importância na estabilização química de solos com resíduos industriais, visto que pode-se criar subsídios para a previsão de fitotoxicidade e de possível contaminação do lençol freático;
- estudo de atributos físicos e químicos, tanto do solo local como do resíduo a ser empregado como estabilizante químico. O teor de argila e de carbono orgânico, a capacidade de troca catiônica efetiva (CTC), o pH e o teor de alumínio total ( $Al_2O_3$ ) foram as variáveis que mais contribuíram com a adsorção de três metais pesados (Cu, Pb e Zn) em 12 classes de solos mais representativas do Brasil, segundo Araújo e Amaral Sobrinho (2000);

- compactação da mistura solo e resíduo industrial em maiores energias (intermediária ou modificada), minimizando com isso, a infiltrabilidade e a permeabilidade das águas de chuva nas camadas do pavimento e não permitindo, por exemplo, a lixiviação de possíveis metais pesados para o lençol freático ou leito de rios;
- realização, em laboratório, de ensaios geotécnicos (ensaios de resistência mecânica, durabilidade, permeabilidade) e ambientais (análise químicas, Inderbitzen, perda de massa por imersão), que comprovem realmente a eficácia do resíduo como estabilizante químico do tipo de solo estudado, obtendo-se com isso argumentos que comprovem não só a parte técnica exigida pelos órgãos rodoviários, mas, também, as exigências ambientais dos órgãos competentes;
- construção de trechos experimentais, em campo, com as especificações obtidas em laboratório, para a realização de ensaios geotécnicos e ambientais, com o intuito de comprovar os resultados de laboratório; e
- não utilização do resíduo estabilizante como camada de revestimento primário exposta sobre o subleito, mesmo que esse atenda às especificações do DNER, empregando-se, também, camadas de reforço e de revestimento asfáltico, confinando dessa forma o resíduo, minimizando com isso possíveis impactos ambientais.

#### **4.2.4.3. Indicadores ambientais**

Para se avaliar os possíveis impactos no ambiente associados ao uso de resíduos em estradas, alguns indicadores podem servir de ferramenta básica, conforme apresentado a seguir:

- no solo, a superfície da estrada e o volume de terra movimentado são indicadores da ocorrência de erosão; a estimativa da perda de sedimentos via escoamento superficial (t.ha/ano) e a qualidade química (CTC, pH, etc.) são também indicadores;
- na água, os indicadores podem ser o nível médio anual de turbidez dos reservatórios ou cursos d'água (TU – Turbidez Unit) e a qualidade química (pH, nível de metais pesados, etc.);

- a presença de poluentes que alterem a visibilidade, gerem odores desagradáveis e provoquem irritações oculares, com grande frequência, são indicadores no meio físico ar;
- na fauna, na flora, e no meio antrópico, a frequência anual de incidência de doenças é um indicador.

### **4.3. Aspectos técnicos**

#### **4.3.1. Contribuição da indústria siderúrgica**

A escória de aciaria tem sido utilizada em um número crescente de aplicações, dentre essas destaca-se o seu emprego como agregado para pavimentação, participando tanto da mistura asfáltica como para base e sub-base. Rohde (2002) estudou o efeito da escória de aciaria como agregado para pavimentação, obtendo como respostas, que a escória apresentou módulos de resiliência superiores aos de materiais granulares tradicionais, resultando em pavimentos mais esbeltos e econômicos. Entretanto, Machado (2000) chamou atenção para as características expansivas de tal material, a qual está associada à hidratação da cal livre (CaO) e do periclásio (MgO) e à corrosão e oxidação do ferro metálico residual. Baltazar (2001) caracterizou o fator expansão da escória de aciaria da Açominas através da metodologia adotada no ensaio para avaliação do potencial de expansão volumétrica denominado PTM 130, considerando quatro processos diferentes de cura e apassivação desse subproduto industrial.

Da fabricação de ferro gusa em alto-forno, gera-se um resíduo sólido, silicoso, denominado de escória de alto-forno que, ao ser tratada com resfriamento brusco por água, na saída do alto forno, forma a escória granulada. Esse tipo de escória possui um potencial nacional de geração pelas siderúrgicas, segundo o IBS (1997 apud SANT'ANA, 2003), de aproximadamente 5,4 milhões t/ano. Sant'ana (2003) efetuou experimentações envolvendo a análise de resistência mecânica e durabilidade de misturas de escória de alto-forno granulada, que foi moída e em associação com cal

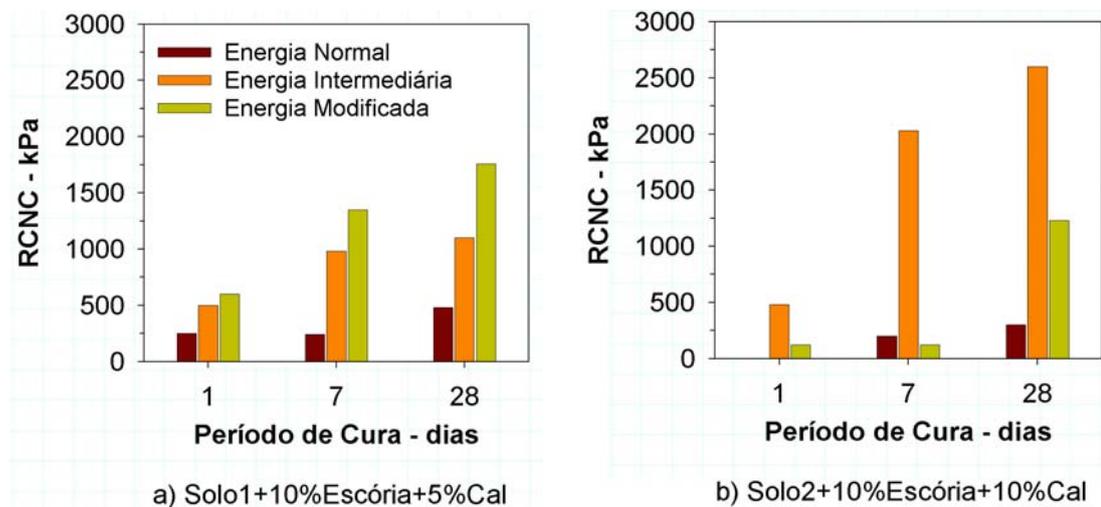
hidratada, empregada com fins de estabilização de dois solos típicos da microrregião de Viçosa, Minas Gerais, para pavimentação de rodovias. As considerações obtidas no trabalho são descritas como se seguem:

- definição dos traços ideais de escória e cal – para o solo 1 (textura argilosa) a combinação ideal<sup>1</sup> obtida via ensaio de resistência à compressão não confinada (RCNC) e durabilidade foi de 10 % de escória e 5 % de cal; de forma análoga chegou-se a 10 % de escória e 10 % de cal para o solo 2 (textura arenosa);
- influência de períodos de cura – ocorreram ganhos de resistência até o período de cura de 120 dias para o solo 1, atingindo-se 2132 kPa de RCNC; para o solo 2, o máximo valor de RCNC foi obtido para o período de cura de 28 dias, com 2610 kPa; ressalta-se que esses valores são decorrentes de compactação realizada na energia do Proctor intermediário, deixando-se os corpos-de-prova em imersão por 4 horas, antes do rompimento em prensa;
- influência do envelhecimento da escória – para o solo 1, não houve influência significativa de perda de resistência devido ao envelhecimento da escória; já para o solo 2, houve uma queda de RCNC de 87 %, quando a escória foi envelhecida por 11 meses;
- influência do teor de umidade e da energia de compactação – o aumento ou redução da umidade ótima não proporcionou ganhos de resistência para nenhuma das misturas; de acordo com a Figura 4.1, o aumento da energia de compactação proporcionou maiores valores de RCNC no que se refere a mistura envolvendo o solo 1 (Figura 4.1a), que foram mais acentuadas para maiores períodos de cura; já para a mistura com o solo 2 (Figura 4.1b), a energia modificada proporcionou menores valores do que a energia intermediária, segundo o autor esse fato pode ser devido à variação da geometria e/ou dimensão dos grãos do solo 2;

---

<sup>1</sup> A massa de escória foi calculada sobre a massa de solo seco e a de cal sobre a massa de escória.

- definição do melhor tempo decorrido entre a mistura e a compactação – para a mistura com o solo 1, o melhor tempo que proporcionou máxima RCNC foi de 4 horas, e para a mistura com o solo 2, a compactação imediatamente após a mistura proporcionou maior valor de RCNC;
- valores de resistência à compressão diametral – houve ganhos de 53 e 358 % para as misturas com o solo1 e o solo 2, quando comparadas as idades de 7 e 28 dias.



Fonte: Sant'ana (2003).

**Figura 4.1 – RCNC, em kPa, de misturas solo-escória-cal.**

#### 4.3.2. Contribuição da indústria metalúrgica

A avaliação do comportamento estrutural e ambiental de misturas do tipo CBUQ quando incorporadas com resíduos industriais, foi fruto de estudos realizados, em laboratório e campo, por Stefenon (2003). Dois foram os resíduos estudados: (i) areia de fundição, gerado na etapa de desmoldagem de peças metálicas em processos de fundição metalúrgica e (ii) resinas de poliéster reforçadas com laminados de fibra de vidro, usadas abundantemente na indústria automobilística. Aborda-se nesse tópico apenas o resíduo sólido areia de fundição.

As misturas efetuadas por Stefenon (2003) foram: (i) agregados de rochas vulcânicas (pedra britada) para formar a matriz pétreia; (ii) ligante betuminoso - cimento asfáltico de petróleo (CAP 20) e (iii) materiais alternativos - resíduos de areias de fundição. Os resultados alcançados, decorrentes da adição das areias de fundição, podem ser assim descritos: (a) acréscimos nos valores de módulo resiliente (MR) e resistência à tração ( $R_t$ ) das misturas – cerca de 20% maiores quando comparados aos valores da mistura CBUQ padrão; (b) redução na estabilidade e aumento na fluência para os teores de asfalto calculados; (c) a relação de  $M_R/R_t$ , forneceu um indicativo de leve aumento na rigidez, e comportamento semelhante, quando comparadas com misturas convencionais, quanto à vida de fadiga; (d) não foram verificados aumentos na emissão de parâmetros poluentes no meio ambiente após a confecção, ruptura e coleta de material proveniente dos corpos-de-prova ensaiados.

O resíduo areia de fundição mostrou-se com potencial para a confecção de misturas asfálticas do tipo CBUQ, segundo as observações laboratoriais efetuadas por Stefenon (2003). Entretanto, o comportamento deste resíduo no campo pode ser uma incógnita, visto que o desgaste da mistura asfáltica devido à ação do tráfego e à intempéries ambientais exigem a execução de trechos experimentais e o constante monitoramento dos mesmos ao longo dos anos.

#### **4.3.3. Contribuição da indústria automobilística**

Os resíduos de laminados de resina poliéster reforçados com fibra de vidro são materiais poliméricos que, geralmente, não apresentam biodegradabilidade. O aterramento desses resíduos acarretam custos elevados, em função do grande volume que ocupam, devido à sua baixa densidade; só em Caxias do Sul-RS foram quantificadas 2000 toneladas por ano desses resíduos, que, em sua maioria, são pedaços e partes de aparas e recortes oriundos da indústria nos processos de fabricação de carrocerias para ônibus, microônibus e frigoríficas, cabines para caminhões, camionetes e automóveis, barcos, dentre outros (STEFENON, 2003).

O referido autor desenvolveu um estudo visando a incorporação desses laminados de fibras de vidro descartadas em misturas asfálticas. Os materiais tradicionais de uso corrente em concreto asfáltico, utilizados na pesquisa, foram agregados de rochas vulcânicas para formar a matriz pétreia, e como ligante betuminoso o cimento asfáltico de petróleo (CAP 20); os materiais alternativos empregados foram resíduos de termofixos reforçados com fibra de vidro, processados em moinho de martelo para redução do tamanho das partículas. As seguintes conclusões puderam ser extraídas por Stefenon (2003):

- módulo de resiliência: ocorreu pequeno aumento até a adição de 1,5 % de fibras, para os teores ótimos de asfalto;
- resistência à tração: ocorreu aumento dos valores, até a adição de 1 % de fibras, para os teores ótimos de asfalto;
- teor ótimo de betume: pelo método Marshall, obtiveram-se teores maiores de asfalto para as misturas com fibras de vidro estudadas;
- ensaios ambientais: não foram verificados acréscimos significativos na emissão de poluentes ao meio ambiente.

#### **4.3.4. Contribuição da indústria de álcool e açúcar**

A produção de açúcar e álcool resulta em um numeroso conjunto de resíduos líquidos e sólidos, gerados no processo produtivo, que se caracterizam por serem altamente poluidores. Desses resíduos, o vinhoto é o mais preocupante, sendo caracterizado por elevada acidez, alta temperatura, alto índice de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e elevada relação vinhoto gerado/álcool produzido; a DBO de um litro de vinhoto é 100 vezes superior à de igual volume de esgoto doméstico (FERRAZ, 1994). O vinhoto é, geralmente, constituído quimicamente por 93 a 96 % de água, 2 a 7 % de matéria orgânica, e 2 a 3 % de constituintes minerais.



As referências de trabalhos publicados sobre o vinhoto direcionam-se, em geral, aos efeitos da sua adição ao solo para fins agrícolas, não se dispondo de informações que estejam diretamente relacionadas com aplicações no campo da engenharia civil (FERRAZ, 1994). Assim sendo, Bueno (1996) cita referência bibliográfica sobre o uso do melaço, um dos compostos cujo processamento resulta a produção do vinhoto, em obras rodoviárias. O papel de estabilizante do melaço deve-se, segundo Silva (1968 apud BUENO, 1996), à sua propriedade de retenção de água, determinada pela higroscopicidade do açúcar. Esta higroscopicidade ocasiona uma quebra nas tensões de vapor nos poros dos solos, o que resulta em aumento da coesão aparente provocada pelo acréscimo na tensão superficial, favorecendo assim a estabilização.

No Quadro 4.2 encontram-se ilustrados os resultados obtidos por Ferraz (1994), em estudos sobre os efeitos estabilizantes do vinhoto quando em mistura com os solos A-7-5 (20) e A-2-4 (0) da microrregião de Viçosa-MG. Os teores de vinhoto foram calculados em relação ao quantitativo total de líquido a se adicionar ao solo. O autor concluiu que com adição de vinhoto aos solo não se observaram melhorias significativas nos valores de resistência mecânica das misturas.

**Quadro 4.2 – CBR, expansão e RCNC das misturas solo-vinhoto**

Ensaio	Estudo de Caso	Melhores Respostas	
		Solo A-7-5 + Vinhoto	Solo A-2-4 + Vinhoto
CBR	%Vinhoto: 20, 40, 60 e 80 Proctor Normal	Não apresentou repostas positivas	Ligeiro aumento para 20 % de vinhoto (10 % em relação ao CBR do solo natural)
Expansão	%Vinhoto: 20, 40, 60 e 80 Proctor normal	Pouco influenciou	80 % de vinhoto (expansão = 0,1 %)
RCNC	%Vinhoto: 20, 40, 60 e 80 Proctor normal Cura: 7 e 28 dias	60 % de vinhoto e cura de 28 dias (Ganho de 12,7 %)	60 % de vinhoto e cura de 28 dias (Ganho de 6,5 %)

Fonte: Ferraz (1994).

#### 4.3.5. Contribuição da indústria de telhas cerâmicas

A fabricação de telha cerâmica no Brasil gera, atualmente, um resíduo da queima constituído por peças defeituosas que não podem ser comercializadas e são descartadas sem destinação específica. Dias e Agopyan et al., (2001) perceberam o alto potencial de reaproveitamento desses resíduos como agregados em pavimentação e, através da coleta e britagem de cacos de telhas cerâmicas vermelhas oriundos das regiões de Monte Carmelo e Ituiutaba, no triângulo mineiro, onde se localizam cerca de 56 empresas, executaram um diagnóstico de avaliação da potencialidade de seu uso como material. Dias e Agopyan et al., (2001) constataram que são descartadas, na região supracitada, cerca de 43 milhões de toneladas de telhas cerâmicas vermelhas por ano.

Após a coleta e britagem, o material denominado por ART (Agregado Reciclado de Telha) foi submetido aos ensaios no laboratório de geotecnia da UFU. Os resultados dos ensaios CBR obtidos por Dias e Agopyan et al., (2001) encontram-se ilustrados no Quadro 4.3. Os autores concluíram que o material manteve graduação após a compactação e os resultados CBR e expansão mostraram um material não expansivo e de expressiva qualidade de suporte, viabilizando o seu emprego em sub-bases e, até mesmo, em bases de pavimentos rodoviários.

**Quadro 4.3 – CBR e expansão do ART compactado em duas energias**

<b>Ensaio</b>	<b>Estudo de caso</b>	<b>Melhores Respostas</b>
CBR	Compactação Energia Normal	21,9 % (W = 18,70 %)
	Compactação Energia Modificada	104,5 % (W = 17,80 %)
Expansão	Compactação Energia Normal	0,03 % (W = 18,70 %)
	Compactação Energia Modificada	0,06 % (W = 17,80 %)

Fonte: Dias e Agopyan et al., (2001).

#### **4.3.6. Contribuição das usinas termoeletricas**

No Brasil produz-se cerca de 2 milhões de ton/ano de cinzas provenientes da queima de carvão para geração de energia elétrica. Parte dessas cinzas são denominadas cinzas leves ou volantes, separadas das emissões gasosas, e outra parte denominadas cinzas pesadas ou de fundo, recolhidas no fundo das câmaras de combustão sendo, apenas 30 % desse montante comercializado, com o restante disposto como rejeito (TESSARI, 1998).

Constituída basicamente por óxidos de silício, alumínio e ferro, a cinza volante se equipara granulometricamente às dimensões de um silte. Experiências no emprego dessa, na estabilização de solos, foram relatadas por Zwonok e Chies (1989) e por Consoli e Prietto et al., (2001). Os primeiros autores, através da construção de trechos experimentais, no projeto CICASOL, comprovaram a excelência do comportamento de pavimentos com bases pozolânicas constituídas de solos estabilizados com cinza volante e cal. Já Consoli e Prietto et al., (2001) investigaram a influência da introdução de cinza volante e cal de carbureto na estabilização de um solo areno-siltoso, obtendo como resposta a maximização da ação da cal de carbureto pela cinza volante, visto que, essa última apresenta grandes quantidades de sílica amorfa para reação com a cal de carbureto, agilizando, assim, a ocorrência de reações pozolânicas.

#### **4.3.7. Contribuição da indústria de base florestal**

##### **4.3.7.1. Carvão vegetal**

O processo de carbonização da madeira em fornos, para produção de carvão vegetal, expele grande quantidade de fumaça que pode ser recuperada ou condensada, obtendo-se como resultado um líquido pirolenhoso, extremamente rico em compostos de interesse econômico, tais como, metanol, etanol, ácido fórmico, ácido acético, derivados fenólicos e alcatrão. Esse último foi fruto de investigações de laboratório efetuadas por Fernandes (2000) e

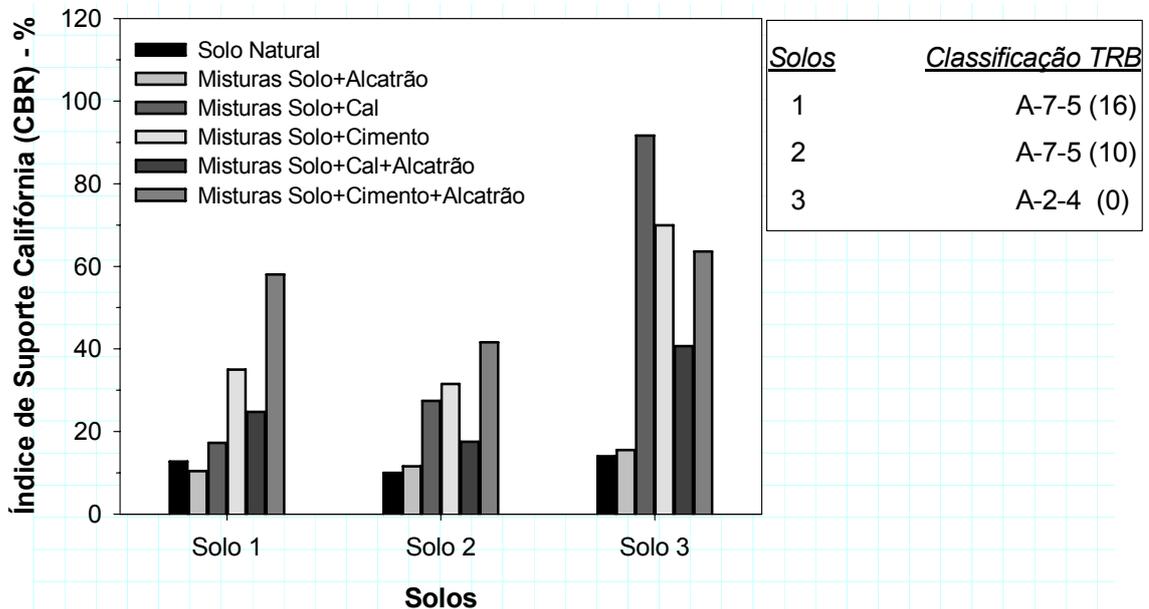
Sant'anna e Machado et al., (2003), trabalhando-se com um produto oriundo da carbonização da madeira de *Eucalyptus cloeziana*, visando sua aplicabilidade como estabilizante químico de solos típicos da microrregião de Viçosa, Minas Gerais, para fins rodoviários, compondo as misturas solo-alcatrão, solo-cal-alcatrão e solo-cimento-alcatrão.

Com um potencial nacional de geração, para as usinas integradas, de 140.000 a 800.000 t/ano, as respostas mais significativas, em termos de resistência mecânica considerando-se o alcatrão denominado Mannesmann, produzido em carbonização à temperatura de 450 a 500 °C, encontradas por Fernandes (2000) são apresentadas na Figura 4.2. De acordo com a referida autora, o alcatrão surtiu pouco efeito nos solos em termos de estabilização, sendo mais atuante quando em misturas com cal e cimento, potencializando para alguns tratamentos os ganhos de resistência via CBR<sup>2</sup>. Ressalta-se que os teores de cal e cimento empregados no referido estudo foram de 2 % e o de alcatrão variou de 0,25 até 6 %, não havendo uma definição única para um melhor traço em todos os tratamentos.

Outras considerações realizadas por Fernandes 2000, foram: (i) o alcatrão alterou as características de plasticidade e de resistência à compressão não confinada (RCNC); (ii) para alguns tratamentos houve decréscimos na permeabilidade das misturas de até 10 vezes; (iii) o tratamento térmico do alcatrão Mannesmann a 170 °C, melhorou os parâmetros LL e IP, CBR e RCNC e (iv) o tipo de solo, o tipo e teor de alcatrão são condições definidoras do processo de estabilização envolvendo esse resíduo.

Dando prosseguimento aos trabalhos com o alcatrão de madeira, Sant'anna e Machado et al., (2003a) e Sant'anna e Machado et al., (2003b), baseado nas melhores respostas obtidas por Fernandes (2000), estudou as características dinâmicas, via ensaios triaxiais de cargas repetidas, das misturas solo-alcatrão, solo-cal-alcatrão e solo-cimento-alcatrão. Esse autor determinou o módulo de resiliência das misturas supracitadas e propôs correlações empíricas entre esse e outros parâmetros geotécnicos de fácil

obtenção em laboratório; concluiu, também, que o teor de alcatrão e o período de cura mostraram-se como fatores de importância nas variações medidas.



Fonte: Fernandes (2000).

**Figura 4.2** – Resultados de CBR para amostras de solo no estado natural e de suas misturas com alcatrão, cal+alcatrão e cimento+alcatrão.

#### 4.3.7.2. Celulose e papel

##### a) Lignina

A lignina é um subproduto da indústria da celulose, constituindo-se em mais uma solução de baixo custo para a estabilização, principalmente onde este material possa ser disponível e abundante. Ingles e Metcalf (1973 apud ALCÂNTARA, 1995), apresentam a molécula de lignina como um componente ativo, a partir de sua estrutura complexa com grupos hidroxílicos e carbônicos, com afinidade com relação à superfície da sílica e, portanto, sujeita a formar

<sup>2</sup> A compactação dos corpos-de-prova foi executada na energia referente ao Proctor normal, sendo esses dados referentes a período de cura em câmara úmida de 28 dias.

fortes ligações com as partículas do solo; a forma mais conhecida e eficiente deste estabilizante é conhecida como "cromo-lignina", sendo esta uma mistura ajustada adequadamente de dicromato de potássio em material contendo lignina. É destacado que o íon cromato tem sido considerado bastante efetivo como elo, no sentido de fortalecer a ligação entre as superfícies das partículas de argila e as moléculas de lignina.

O mecanismo de atuação da lignina seria na aglomeração de finos, destacadamente pelo processo de polimerização de seus elementos básicos adicionados ao solo (PINTO, 1983). Entretanto, a lignina por si só é solúvel e, por esta propriedade, a ação ligante desaparece, sendo uma das soluções para a retenção do aditivo o tratamento com aditivos, bem como a construção de bases de maior compacidade (ALCÂNTARA, 1995). O último dos autores discorreu ainda que, em decorrência da solubilidade do material em água, as aplicações do aditivo não devem oferecer grandes dificuldades, ressalva seja feita ao fato de que o material pode estar sujeito ao ataque de microorganismos.

#### *b) Lodo do efluente*

Um produto residual oriundo de indústrias de celulose da madeira, denominado *Lodo do Efluente* da máquina Andritz, foi aplicado como estabilizante e aglutinante de um solo arenoso, pouco coeso, do tipo Regossol, oriundo da formação geológica Arenito Botucatu, classificado como A-2-4 pelo TRB (RANGEL, 1980). Foi construído um trecho experimental com o resíduo fornecido pela Indústria de Papel Simão S/A, Unidade de Jacareí-SP, distante aproximadamente 320 km do local do teste. A análise química do lodo apresenta, em sua composição, fibras (25-30 %), cinzas (25-30 %), CaO (10-15 %), R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10-15 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13-14 %) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1-2 %).

O traçado do trecho experimental foi escolhido em linha reta, numa estrada existente com volume de tráfego acentuado. A extensão executada foi de 300 metros em virtude da pouca disponibilidade de material a ser usado no pavimento, pois o mesmo foi transportado através de 320 km. A largura da

faixa do rolamento foi de 6 metros, considerada como operacional para estradas florestais. O aclave máximo foi de 3 % e o terreno apresentou uma topografia considerada suave.

Segundo Rangel (1980), durante o período de avaliação o trecho em teste suportou chuvas com registro de precipitação total de 281,10 mm e máxima, em 24 horas, de 85,00 mm; com relação ao tráfego em uso sobre o pavimento, no período de agosto a dezembro de 1980, registrou-se um total aproximado de 600 veículos comerciais considerados pesados (caminhões), e 1.100 veículos de passageiros considerados médios e leves (automóveis, caminhonetes, etc.).

O autor supracitado em uma avaliação visual do trecho, descreveu que o mesmo apresentou boa condição de estabilização e aglutinação junto ao solo arenoso, proporcionando certa coesão nas partículas deste; não foi observado grau de saturação elevado no pavimento, com regular escoamento lateral d'águas superficiais. Em período de seca, observou-se um baixo índice de desprendimento de partículas do solo (poeira), quando submetido a tráfego intenso, não chegando a perturbar a segurança da obra.

### c) Licor negro kraft

O licor negro kraft é um resíduo da indústria de papel e celulose. Sua constituição química é extremamente complexa e dependente do tipo de madeira utilizada, da concentração do alcali residual, do tipo de cozimento, dentre outros. Sua parte sólida compõe-se, geralmente, de 40 % de lignina alcalina, 30 % de carboidratos e 5 % de acetatos. O seu teor de substância sólida atinge apenas 16 % do seu peso, sendo o restante água de fontes diversas. A matéria orgânica pode alcançar 50 % do seu teor de sólidos (VIEIRA, 1994).

O interesse no uso do licor negro como estabilizante de solo deveu-se ao seu relativamente elevado teor de lignina ácida. As ligninas produzidas pelo processo de polpamento kraft ou sulfato de soda são insolúveis em ácidos mas podem ser dissolvidas em alcali e, como tal, são conhecidas por apresentar um

poder dispersante ou defloculante. O mecanismo da estabilização estaria ligado, segundo Bueno (1996), ao fato da ocorrência de um gel polimérico capaz de formar películas ligantes entre as partículas de solo. Este sistema seria, porém, muito sensível à lixiviação, tendo em vista que o gel é facilmente solúvel em água.

Vieira (1994), analisando o efeito proporcionado pelo licor negro kraft concentrado sobre as propriedades geotécnicas dos solos A-7-5 (20) e A-2-4 (0), característicos da região de Viçosa-MG, obteve os resultados ilustrados no Quadro 4.4. O autor concluiu que o uso do licor como agente estabilizante não proporcionou resultados animadores, embora com pequenas percentagens de licor, tenha-se obtido um modesto aumento na resistência dos dois solos ensaiados; sua adição conjunta com a cal e o cimento mostrou-se promissora, demandando, entretanto, um maior volume de experimentação.

**Quadro 4.4 – CBR, expansão e RCNC das misturas solo-licor**

Ensaio	Estudo de Caso	Melhores Respostas	
		Solo A-7-5 + Licor	Solo A-2-4 + Licor
CBR	%licor: 0,25; 0,50; 1; 2 e 4 Proctor normal	Não apresentou repostas positivas	Não apresentou repostas positivas
Expansão	%licor: 0,25; 0,50; 1; 2 e 4 Proctor normal	Pouco influenciou	Pouco influenciou
RCNC	%licor: 0,25; 0,50; 1; 2 e 4 Proctor normal Cura: 7 e 28 dias	0,50 % de Licor e cura de 28 dias (Ganho de 9 %)	0,25 % de Licor e cura de 28 dias (Ganho de 7,8 %)

Fonte: Vieira (1994).

#### 4.3.8. Outras contribuições

##### 4.3.8.1. Carcaça de pneu

Com uma geração anual de 35 a 40 milhões de toneladas/ano de carcaça de pneu no Brasil, já existem mais de cem milhões abandonados em todo o



país (CONSOLI, 2003). Dentre as possibilidades estudadas para a sua utilização encontra-se o seu uso na pavimentação. Specht (2002) apresentou resultados de pesquisa sobre o uso de farelo de pneu no concreto asfáltico em trechos experimentais construídos em Porto Alegre – RS. Krizek e Sobhan et al., (1995) estudaram a incorporação de pedaços alongados de borracha de pneu, no formato de fibras, como reforço de material granular para utilização como base de pavimentos flexíveis; a principal dificuldade encontrada pelos autores foi a de produzir em campo, mesmo em pequena escala, amostras onde as fibras de borracha ficassem homoganeamente distribuídas na matriz de material granular de forma a melhorar as características de ductilidade e tenacidade.

#### **4.3.8.2. Fosfogesso (sulfato de cálcio)**

É um resíduo sólido gerado na fabricação do ácido fosfórico, principal componente dos fertilizantes fosfatados. Por suas características químicas e radiológicas, constitui-se num elemento agressivo ao meio ambiente. Para cada tonelada de ácido fosfórico produzida, são gerados duas deste produto. Segundo dados de Taha e Seals (1992) são geradas cerca de 180 milhões de toneladas desse resíduo, por ano, no mundo inteiro. Este subproduto tornou-se um problema ambiental bastante sensível, visto que sua utilização é muito limitada e ele acumula-se nas proximidades das usinas, ocupando, por exemplo, áreas de alto valor imobiliário.

Gutti e Roy et al., (1996) descreveram que o fosfogesso apresenta baixa resistência à compressão simples e pouca durabilidade quando submetido somente à estabilização mecânica. Assim sendo, Takeda (1998) estudou o efeito da adição de cimento ao fosfogesso, com vistas à sua utilização na execução de bases e sub-bases de rodovias, concluindo que o material tem um ótimo potencial, sendo aceitável, principalmente, para teores de cimento acima de 10 % e esforço de compactação superior ao da energia normal.

Parreira e Kobayashi et al., (2001) estudaram os efeitos proporcionados pelo tipo de cimento nas misturas fosfogesso e cimento. O estudo de caso efetuado pelos autores envolveu o uso de três tipos de cimento, que se

diferenciavam quanto ao teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ); os teores de cimento empregados nas misturas com o fosfogesso foram de 5, 10 e 15 %, calculados sob a massa seca do resíduo. Na avaliação do comportamento mecânico das misturas empregou-se a RCNC, com corpos-de-prova, moldados dinamicamente nas energias dos ensaios Proctor normal e modificado, no cilindro padrão de Proctor. Os corpos-de-prova assim confeccionados foram submetidos à cura úmida de 1, 7, 28, 84 e 210 dias, em câmara úmida, antes do rompimento em prensa. Os melhores resultados da RCNC foram obtidos para os corpos-de-prova compactados na energia modificada e não submetidos ao processo de imersão por 4 horas; esses resultados encontram-se ilustrados no Quadro 4.5.

Os autores concluíram que o tipo de cimento tem significativa influência na resistência e na deformabilidade das misturas de fosfogesso e cimento, evidenciando os relatos da literatura especializada (ONG; METCALF; TAHA; SEALS, 1994), onde resultados experimentais mostraram que a utilização de cimentos com elevada quantidade  $C_3A$  podem provocar, a longo prazo, queda na resistência, devido à formação de cristais expansivos de etringita, que causam a desagregação e conseqüente perda de resistência. A reação ocorre entre o  $C_3A$  do cimento e os sulfatos de cálcio presentes no fosfogesso.

**Quadro 4.5 – RCNC das misturas fosfogesso-cimento**

Cimento			Melhores Repostas Cura Úmida - dias			
Tipo	% $C_3A$	Teor	7	28	84	210
CPIII 40	2,4	5, 10 e 15 %	15 % cim (2000 kPa)	15 % cim (2800 kPa)	15 % cim (4000 kPa)	15 % cim (4500 kPa)
CPV ARI	7,5		15 % cim (2000 kPa)	15 % cim (2400 kPa)	15 % cim (3150 kPa)	15 % cim (3200 kPa)
CPII E32	5,0		15 % cim (1900 kPa)	15 % cim (2600 kPa)	15 % cim (3850 kPa)	15 % cim (3450 kPa)

Fonte: Modificado de Parreira e Kobayashi et al., (2001).

#### **4.3.8.3. Cal de carbureto**

Subproduto resultante da reação química entre o carbureto de cálcio e água, para obtenção do gás acetileno, a cal de carbureto apresenta características químicas semelhantes às das cales comerciais, visto que, é composto basicamente, segundo Consoli (2003), por óxido de cálcio hidratado, tendo grande potencial para utilização como aglutinante para a estabilização de solos. O referido autor mencionou, também, que as maiores restrições técnicas ao uso desse resíduo estão no seu elevado teor de umidade, aliado à sua baixa finura.

Consoli e Prietto et al., (2001) avaliaram o comportamento tensão-deformação de um solo areno-siltoso tratado com 4 % de cal de carbureto, obtendo como resultados aumentos da resistência mecânica (ganhos de mais de 100 %) e da rigidez causados pelas reações cimentantes da cal de carbureto com o solo.

#### **4.3.8.4. Incineração de resíduos sólidos urbanos**

Um dos métodos mais eficientes para a redução do volume de resíduos sólidos municipais é a incineração; os resíduos oriundos desse processo são cinzas pesadas e volantes, numa relação de 3 para 1. Scarlatos (2000) sugeriu a utilização do resíduo incinerado como sub-base de pavimentos. Omine e Ochiai et al., (2002) sugeriram o uso das misturas de cinzas da incineração de resíduos sólidos urbanos com argila como geomateriais que possuem baixa condutividade hidráulica e boas características de resistência.

#### **4.3.8.5. Resíduos incinerados da estação de tratamento de esgoto**

Os principais problemas com esse resíduo são o grande volume e os componentes perigosos na sua composição, tais como, organismos patogênicos e os metais pesados, sendo a incineração um método de sucesso para resolver tal problema. Takayanagi e Tomano et al., (1996) apresentaram como uma das diversas utilizações para a cinza resultante da incineração desses resíduos o uso como material para base e subleito de pavimentos.

Contudo, ressalta-se que as cinzas resultantes concentram os materiais indesejáveis que não são eliminados pela incineração, dentre esses, os metais pesados.

#### 4.3.8.6. Rejeito da despoluição de lixos

Bucciano e Costa et al., (2001) realizaram um estudo sobre as potencialidades de estabilização de um solo saprolítico siltoso da região de Palhoça-SC com um resíduo industrial com propriedades cimentantes, oriundo do processo de despoluição de resíduos industriais, e que atualmente é produzido em grande quantidade e armazenado em galpões. A classificação TRB do solo é A-7-6, com 8 % de CBR na energia do ensaio Proctor normal e 178 kPa de RCNC. Quanto às características do resíduo, este é sólido, de coloração acinzentada, com granulometria fina. O Quadro 4.6 traz a ilustração dos resultados obtidos pelos autores. Os autores concluíram que para as condições estudadas que, a adição de 10 % do resíduo cimentante ao solo, apresentou os melhores resultados em termos de resistência mecânica.

**Quadro 4.6 – CBR, expansão, RCNC e Rt das misturas solo-resíduo**

<b>Ensaio</b>	<b>Estudo de Caso</b>	<b>Melhores Respostas Solo+Resíduo</b>
CBR	Teor de Resíduo: 5, 10 e 15 %; compactação energia normal e cura úmida de 28 dias.	10 % de resíduo (CBR $\cong$ 34 %)
Expansão	Teor de Resíduo: 5, 10 e 15 %; compactação energia normal e cura úmida de 28 dias.	15 % de resíduo (Expansão $\cong$ 0,04%)
RCNC	Teor de Resíduo: 5, 10 e 15 %; compactação energia normal; cura úmida: 7, 14 e 28 dias e sem imersão em água.	10 % de resíduo, e cura de 28 dias (RCNC $\cong$ 490 kPa)
	Resíduo: 5, 10 e 15 %; compactação energia normal; cura úmida: 7, 14 e 28 dias e imersão em água por 24 horas.	10 e 15 % de resíduo, e cura de 28 dias (RCNC $\cong$ 390 kPa)

Fonte: Modificado de Bucciano e Costa et al., (2001).

#### **4.3.8.7. Lamas residuais**

Consoli (2003) mencionou que a utilização de resíduos semi-sólidos (consistência de lama) tem se tornado cada vez mais freqüente pelo aumento das quantidades produzidas, os problemas cada vez maiores na busca de disposição dos mesmos em locais apropriados e os custos envolvidos no transporte e disposição segura dos mesmos. Dentre esses, o referido autor destacou o uso da lama de bauxita, gerada na obtenção da alumina, no processo Bayer, e os lodos de curtumes, que possuem sulfato básico de cromo, com possibilidades para uso em pavimentação; ressalta-se que os resíduos de curtume foram solidificados com cimento Portland.

#### **4.4. Considerações finais**

O emprego de estabilizantes químicos de solos, com o uso proveitoso de resíduos industriais, apresenta-se como uma das alternativas disponíveis, no futuro, para auxiliar no melhor equacionamento da problemática da pavimentação rodoviária no Brasil, ou seja, grandes áreas do território nacional cobertos por solos que não possuem os requisitos mínimos para serem usados em obras de estradas. Entretanto, na decisão de se optar ou não pelo uso de um determinado resíduo estabilizante, além da eficiência e da análise de custo, deve-se considerar, também, a questão ambiental, que vem sendo em muitos casos relegada a segundo plano.

Antes da aplicação do resíduo em estradas, a obtenção do licenciamento ambiental perante ao órgão estadual ambiental competente, no caso de Minas Gerais, a FEAM, é indispensável. Esse licenciamento é concedido, somente, após um estudo minucioso dos possíveis impactos que esse tipo de empreendimento poderá causar ao ambiente. A disposição irregular desses resíduos em estradas pode acarretar sérias penalidades para o infrator.

Assim sendo, o estudo da toxicidade dos resíduos industriais quando aplicados à estradas torna-se de suma importância, principalmente, quando se tratar de área florestal, visto que algumas substâncias presentes nestes podem ser prejudiciais aos meios físico, biótico e antrópico. A contaminação do meio

ambiente é função direta dos níveis de metais pesados existentes no resíduo. Esses, quando presentes em quantidades mínimas, podem até ser benéficos para microorganismos, plantas, animais e até mesmo para o homem; porém, em concentrações elevadas, tornam-se perigosos, pois são introduzidos na cadeia alimentar, podendo contaminar as plantas e os animais, por possuírem forte afinidade por muitos compostos orgânicos.

Dentre os fatores que mais contribuem para a ocorrência de impactos negativos em estradas estabilizadas com resíduos industriais, destaca-se a erosão, que carrega partículas para córregos ou rios, resultando em sérios danos para os meios físico, biótico e antrópico. As variáveis ambientais chuva, vento e temperatura contribuem, também, em muito para a ocorrência desses impactos.

#### **4.5. Referências bibliográficas**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004:** classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987. 63 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10005:** lixiviação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10006:** solubilização de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10007:** amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987. 25 p.

ALCÂNTARA, M.A.M. **Estabilização química dos solos para fins rodoviários:** técnicas disponíveis e estudo de caso dirigido à estabilização solo-cal de três solos de Ilha Solteira - SP. Viçosa, MG: UFV, 1995. 91 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

AMARAL SOBRINHO; N.M.B.; VELLOSO, A.C.X.; COSTA, L.M. Lixiviação de Pb, Zn, Cd e Ni em solo podzólico vermelho amarelo tratado com resíduos siderúrgicos. **Revista Floresta e Ambiente**, UFRRJ, Rio de Janeiro, RJ, v. 6, n. 1, p. 65-75, 1999.

ARAÚJO, W.S.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B. Influência das propriedades físicas e químicas de solos intemperizados na adsorção de chumbo, cobre e

zinco. **Revista Floresta e Ambiente**, UFRRJ, Rio de Janeiro, RJ, v. 7, n. 1, p. 167-180, 2000.

BALTAZAR, R.P. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação**. Viçosa, MG: UFV, 2001. 77 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

BRASIL. **Lei Federal nº 6938**: Lei da Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília, DF, 31 de agosto de 1981.

BRASIL – Constituição (1988). **Artigo nº 225**, Brasília, DF, 05 de outubro de 1988.

BRASIL. **Lei Federal nº 9605**: dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Brasília, DF, 12 de fevereiro de 1998.

BUCCIANO, C.A.; COSTA, G.D.; TRICHÊS, G. Estabilização química de solo saprolítico da região de Palhoça-SC, com rejeito industrial, para uso em pavimentação. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis, SC: [s.n.], 20-23 nov. 2001. p. 502-516.

BUENO, B.S. **Aspectos da estabilização de solos com uso de aditivos químicos e de inclusões plásticas aleatórias**. 1996. 99 f. Texto para Concurso Público (Livre Docência)-Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, SP, 1996.

CONAMA 237 (1997). **Define as competências da União, Estados e Municípios e determina que o licenciamento ambiental deve ser feito e em um único nível de competência**. Resolução CONAMA n. 237, 1997.

CONAMA 313 (2002). **Dispõe sobre o inventário nacional de resíduos sólidos industriais**. Resolução CONAMA n. 313, de 29 de outubro de 2002.

CONSOLI, N.C. Processamento e utilização geotécnica de resíduos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL – REGEO, 2003, [S.I.]. **Anais...** [S.I.]: [s.n.], 2003. p. 497-510.

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**, USA, ASCE, v. 127, n. 9, p. 774-782, 2001.

DIAS, J.F.; AGOPYAN, V.; BERNUCCI, L.B.; MOURA, E. Estudo em laboratório de resíduo da fabricação de telhas cerâmicas para uso em pavimentação. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis, SC: [s.n.], 20-23 nov. 2001. p. 517-541.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ, 2. ed., 1996. 320 p. (Antigo DNER).

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS – FEAM/MG. **Formato básico para EIA/RIMA**. Belo Horizonte, MG, 2003. Disponível em: <<http://www.feam.mg.gov.br>>. Acesso em: 11 jan. 2003.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DO RIO GRANDE DO SUL - FEPAM/RS. **Legislação**. Porto Alegre, RS, 2003. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/central/central.asp>>. Acesso em: 6 jan. 2003.

FERNANDES, D.C.M. **Viabilidade do uso de alcatrão de madeira de eucalipto na estabilização de solos residuais para fins rodoviários**. Viçosa, MG: UFV, 2000, 124 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

FERRAZ, R.L. **Contribuição ao estudo da estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 180 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

GUTTI, C.S.; ROY, A.; METCALF, J.B.; SEALS, R.K. The influence of admixtures on the strength and linear expansion of cement-stabilized phosphogypsum. **Cement and Concrete Research**, USA, v. 26, n. 7, p. 1083-1094, 1996.

KRIZEK, R.J.; SOBHAN, K.; BAKER, W.H. Waste fiber in cement-stabilized aggregate base course material. **Transportation Research Record**, USA, n. 1486, 1995. p. 97-106.

MACHADO, A.T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo, SP: USP, 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, 2000.

NÚÑEZ, J.E.V.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B. Perdas de metais pesados por erosão influenciada pelo sistema de preparo do solo. **Revista Floresta e Ambiente**, UFRRJ, Rio de Janeiro, RJ, v. 7, n. 1, p. 208-216, 2000.



OMINE, K.; OCHIAI, H.; YASUFUKU, N. Utilization of MSW incineration bottom ash na clay as a composite geomaterial. In: INTERNATIONAL CONGRESS ENVIRONMENTAL GEOTECHNIES, 4., v. 1, 2002, USA. **Anais...** USA: [s.n.], 2002. p. 557-562.

ONG, S.; METCALF, J.B.; SEALS, R.K.; TAHA, R. Unconfined compressive strength of various cement-stabilized phosphogypsum mixes. **Transportation Research Record**, USA, n. 1424, 1994. p. 20-24.

PARREIRA, A.B.; KOBAYASHI, A.R.K.; SILVESTRE JÚNIOR, O.B. Estudo da influência do tipo de cimento nas propriedades mecânicas de misturas de fosfogesso e cimento. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis, SC: [s.n.], 20-23 nov. 2001. p. 383-398.

PINTO, C.S. **Estabilização de solos**. São Paulo: USP, 1983. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 1983. 20 p. (Notas de Aula).

RANGEL, A.C.R. Pavimentação de estradas florestais. **Circular Técnica**, IPEF, ESALQ-USP, Piracicaba, SP, n. 122, p. dez. 1980. ISSN 0100-3453. Não paginado.

RHODE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos**: estudo laboratorial. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2002. 101 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.

ROCCA, A.C.C.; IACOVONE, A.M.M.B.; BARROTTI, A.J., et al. **Resíduos sólidos industriais**. São Paulo, SP: CETESB, 2. ed., 1993. 223 p.

SANT'ANA, A.P. **Caracterização tecnológica de misturas solo-escória de alto forno moída para fins rodoviários**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 88 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

SANT'ANNA, G.L.; MACHADO, C.C.; CARVALHO, C.A.B.; LIMA, D.C.; FERNANDES, D.C.M. Comportamento resiliente de um solo argiloso da região de Viçosa-MG no estado natural e estabilizado com cimento e alcatrão fracionado. **Revista árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 269-278, 2003a. ISSN 0100-6762.

SANT'ANNA, G.L.; MACHADO, C.C.; CARVALHO, C.A.B.; LIMA, D.C.; MINETTI, L.J. Módulo de resiliência de um solo arenoso e de suas misturas com alcatrão fracionado e cal. **Revista árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 4, p. 527-534, 2003b. ISSN 0100-6762.

SCARLATOS, P.D. Geotechnical properties of municipal waste incinerator ash. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY AND GLOBAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 5., 2000, USA. **Anais...** USA: [s.n.], 2000. Não paginado.

SILVA, E. **Avaliação qualitativa de impactos ambientais do reflorestamento no Brasil.** Viçosa, MG: UFV, 1999. 309 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

SPCHET, L.P. **Utilização da borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas.** Porto Alegre, RS: UFRGS, 2002. Seminário (Doutoramento PPGE/UFGRS)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.

STEFENON, F. **Incorporação de resíduos industriais em concreto betuminoso usinado à quente.** Porto Alegre, RS: UFRGS, 2003. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2003.

TAHA, R.; SEALS, R.K. Engineering properties of phosphogypsum-based slag aggregate. **Transportation Research Record**, USA, n. 1345, 1992. p. 106-112.

TAKAYANAGY, E.; TOMANO, T.; MATSUI, K.; ONO, S. Mechanical properties of ash generated in sewage sludge incineration na its effective use. In: INTERNATIONAL CONGRESS ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 2., v. 2, 1996, USA. **Anais...** USA: [s.n.], 1996. p. 921-926.

TAKEDA, M.C. **Avaliação das propriedades mecânicas de misturas de fosfogesso e cimento para uso na construção rodoviária.** São Carlos, SP: EESC-USP, 1998. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 1998.

TESSARI, M.A. **Ensaio de placa em camadas de cinza pesada de carvão tratadas com cimento.** Porto Alegre, RS: UFRGS, 1998. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1998.

VIEIRA, S.V. **Estabilização de solos com licor negro kraft concentrado para fins rodoviários.** Viçosa, MG: UFV, 1994. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

ZWONOK, O.; CHIES, F. **Projeto CICASOL: pavimentos de solos estabilizados com cinza volante e cal.** Porto Alegre, RS: CIENTEC, 1989. Publicação Interna da Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (CIENTEC), Porto Alegre, RS, 1989.

## **5. MATERIAIS, MÉTODOS, APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES PERTINENTES**

### **5.1. Informações sobre a organização do capítulo**

O presente capítulo encontra-se organizado na forma de artigos científicos onde são apresentados toda a experimentação científica, resultados obtidos e as discussões pertinentes sobre a viabilidade de uso dos resíduos da indústria de celulose com fins rodoviários. Apresenta-se dez artigos científicos.

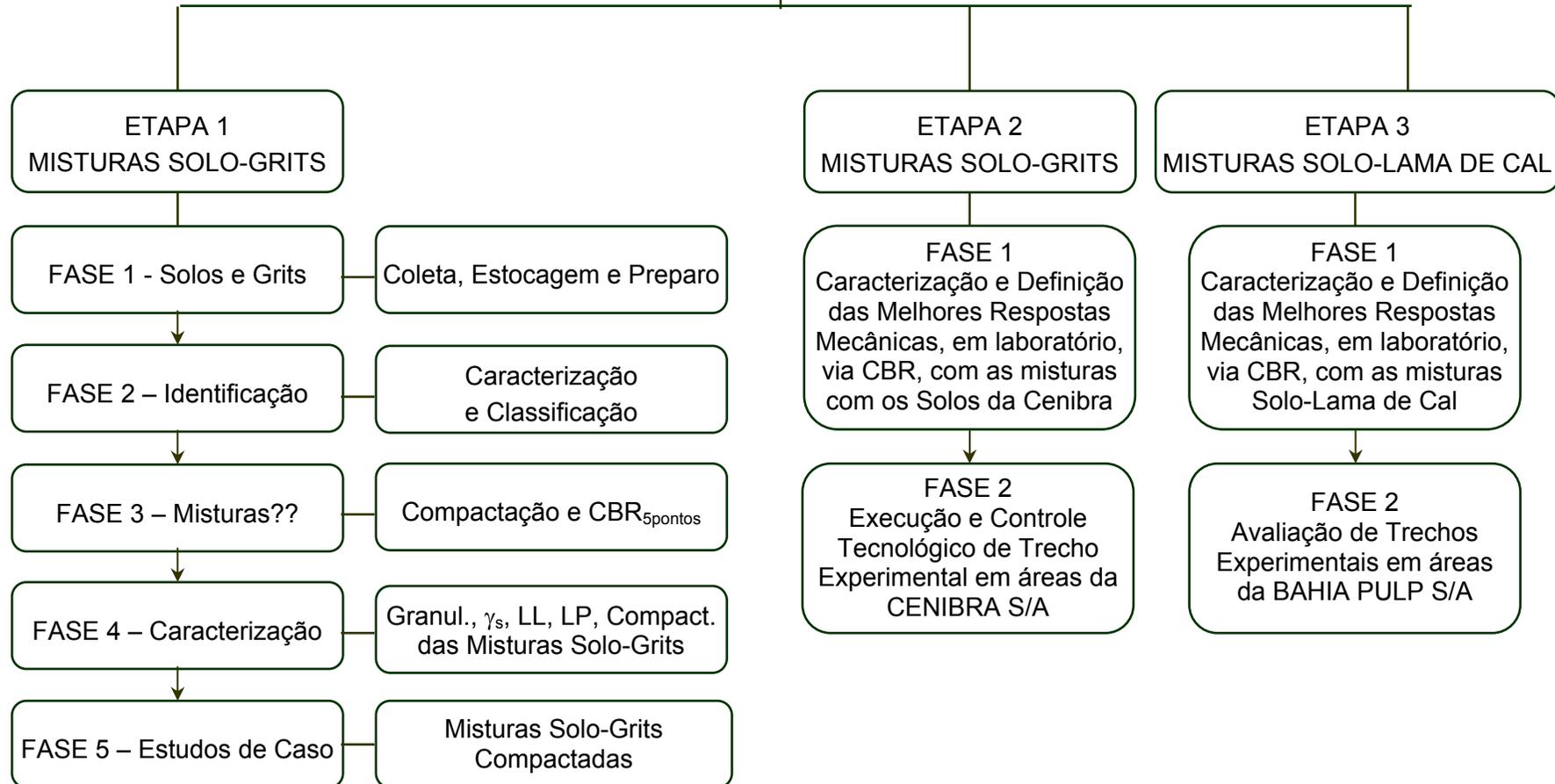
Para efeito de grandeza do trabalho encontram-se descritos nos artigos dados de ensaios realizados em sete amostras de solo, provenientes de Viçosa-MG, Ipatinga-MG e Alagoinhas-Ba, isoladamente, e em misturas com os resíduos industriais grits e lama de cal. No Anexo B é descrito todo o processo industrial pelo qual os resíduos são gerados e suas quantidades.

As etapas do desenvolvimento desse trabalho encontram-se ilustradas na Figura 5.1. Inicialmente, os estudos de estabilização foram realizados com as amostras de solo da microrregião de Viçosa-MG incorporadas com o resíduo grits (etapa 1). O intuito foi o de gerar uma base de dados laboratoriais sobre as potencialidades desse resíduo na estabilização de solos. Com base nos melhores resultados da etapa 1 procedeu-se aos estudos de solo-grits com solos provenientes da microrregião de Ipatinga-MG (etapa 2). A etapa 3 aborda

os estudos de estabilização com as misturas solo-lama de cal, sendo os materiais provenientes da empresa Bahia Pulp, microrregião de Alagoinhas-Ba.

Maiores detalhes sobre a experimentação científica e os resultados obtidos encontram-se descritos nos artigos, que contemplam, em ordem (item 5.2 à 5.11), os seguintes estudos: (i) caracterização geotécnica de solos (Viçosa-MG), resíduo (grits) e misturas solo-resíduo; (ii) resistência mecânica de misturas solo-grits; (iii) definição do melhor tempo médio entre a execução das misturas solo-grits e a compactação de corpos-de-prova; (iv) contribuição das diversas frações do resíduo (grits) no processo de estabilização; (v) comportamento das misturas solo-grits compactadas perante diferentes períodos de cura; (vi) influência na resistência mecânica da imersão, em água, das misturas solo-grits compactadas; (vii) tratamento térmico do grits e os possíveis efeitos na resistência mecânica das misturas solo-grits compactadas; (viii) comportamento geotécnico de solos (Ipatinga-MG) e de misturas solo-grits e (ix) viabilidade de uso das misturas solo-lama de cal.

**VIABILIDADE TÉCNICA DO EMPREGO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE CELULOSE  
PARA CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS FLORESTAIS**



**Figura 5.1** – Fluxograma dos procedimentos adotados na pesquisa.

## **5.2. Uso de resíduos em pavimentos de estradas florestais: caracterização de solos e misturas solo-grits**

RESUMO – O presente artigo aborda uma etapa preliminar de um estudo direcionado às propriedades de engenharia de misturas de solos e aditivos químicos, para fins de aplicação em estradas florestais. Trabalhou-se com amostras de dois solos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, Brasil, de texturas arenosa e argilosa, estabilizadas com o resíduo industrial denominado *grits* proveniente de indústria de celulose. Foram realizados ensaios geotécnicos nos solos e nas misturas solo aditivo químico, como se segue: análise granulométrica, peso específico dos sólidos, limites de Atterberg e compactação. Os resultados encontrados dos ensaios de laboratório revelaram que o resíduo apresentou bom desempenho como agente estabilizante, alterando significativamente a plasticidade e os parâmetros de compactação dos solos analisados.

Palavras-chaves – Estabilização de solos, resíduo industrial, caracterização geotécnica.

### **Application of wastes in forestry road pavements: characterization of soils and soil-grits mixtures**

ABSTRACT – This paper addresses data from a research program in development on engineering properties of soil-chemical stabilizer mixtures for forestry road application. Soil samples from sandy and clayey soils from the North Wood Forest Zone of Minas Gerais, Brazil, stabilized with *grits* (a waste from the cellulose industries) were used throughout the study. The laboratory testing program encompassed the following geotechnical tests: sieve analysis, density of solid particles, Atterberg limits and compaction. Data support the good behavior of the waste as stabilizer agent changing significantly soil plasticity and compaction parameters.

Key Works – Soil stabilization, industrial waste, geotechnical characterization.

### 5.2.1. Introdução

Na engenharia rodoviária se tem conhecimento de diversos materiais com comprovada eficiência para serem usados em camadas constitutivas de pavimentos. O emprego de produtos naturais, como cascalho e brita, e de misturas de solos e estabilizantes químicos tradicionais, como cal, cimento e betume (asfaltos e alcatrões), é freqüentemente associado à existência de jazidas de empréstimo em áreas próximas ao empreendimento e às questões de caráter técnico-econômico-ambiental.

Nogami e Correia et al., (1980), em menção ao emprego da estabilização solo-cal no Brasil, destacaram que a engenharia rodoviária brasileira deveria tender à busca de um refinamento técnico que contemplasse a utilização dos solos segundo técnicas as mais diversas e sofisticadas. Ampliar o leque de soluções tradicionais disponíveis tem sido o grande desafio para técnicos e pesquisadores que atuam na pavimentação de rodovias.

No Brasil, correntemente, o aproveitamento de resíduos ou subprodutos industriais aparece como uma alternativa técnica promissora de baixo custo. Entretanto, conforme relatado por Fernandes (2000), isso requer o desenvolvimento de programas extensivos de experimentação de laboratório e campo, de forma a alcançar os padrões de engenharia exigidos pelas normas técnicas. Em se tratando de programas de laboratório, a primeira etapa a ser seguida é a caracterização das amostras de solos e das misturas dessas com os aditivos químicos empregados, gerando parâmetros indispensáveis para os estudos subseqüentes de avaliação da resistência mecânica, como o teor ótimo de umidade e o peso específico seco máximo.

Nesse contexto, um novo material de construção surge com potencialidade de uso como estabilizante em pavimentos de estradas florestais, visto que o mesmo é gerado no processo de recuperação da soda cáustica, durante o cozimento da madeira de eucalipto, na indústria de celulose. Trata-se de um resíduo sólido conhecido pelo nome de *grits*.

Constitui objetivo do presente artigo caracterizar geotecnicamente

amostras de solos e misturas solo-grits, com vistas à obtenção de parâmetros preliminares indispensáveis à execução de ensaios de resistência mecânica, durabilidade e resiliência, com vistas à aplicação das misturas em estradas florestais. Como objetivos específicos tem-se: (i) analisar a influência da adição de diversos teores do resíduo na plasticidade dos solos e (ii) analisar a influência da adição de teores do resíduo nos parâmetros ótimos de compactação dos solos.

## **5.2.2. Materiais e métodos**

### **5.2.2.1. Solos**

Os solos do presente estudo são provenientes da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, sendo as amostras oriundas de taludes da área de influência da cidade de Viçosa. A primeira amostra, de textura argilosa, foi coletada nas proximidades da estação de tratamento de água de Viçosa, e aqui designada por solo 1; geotecnicamente, trata-se de um solo residual maduro de gnaise e, pedologicamente, de um Latossolo Vermelho-Amarelo. A segunda amostra, de textura arenosa, foi coletada na vila secundino, no Campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), e aqui designada por solo 2; geotecnicamente, trata-se de um solo residual jovem de gnaise com horizonte C profundo de coloração acinzentada.

### **5.2.2.2. Resíduo industrial**

O resíduo industrial grits foi cedido pela empresa Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA), situada na região de Ipatinga, Minas Gerais, Brasil. Trata-se de um resíduo sólido, de coloração acinzentada e granulometria diversificada. De acordo com a caracterização química efetuada por Machado e Pereira et al., (2003), o grits apresenta em sua composição química cerca de 20 % de cálcio, dos quais 42 % encontram-se na forma de óxido de cálcio (CaO), que é um componente significativo para a estabilização de solos.



#### **5.2.2.3. Coleta, secagem e estocagem das amostras de solos e resíduo**

A primeira etapa desse trabalho foi direcionada à coleta das amostras de solo, empregando-se picareta e pá. As amostras foram colocadas em sacos plásticos de 1000 l, perfazendo-se o total de 300 kg para cada solo. Após o transporte das amostras para o Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFV, procedeu-se à secagem das mesmas ao ar livre e à sombra. Em seguida, realizou-se o processamento das amostras na peneira de abertura nominal 4,8 mm e estocagem em tambores metálicos, para posterior utilização nos ensaios geotécnicos.

O resíduo grits foi coletado no aterro de resíduos da empresa CENIBRA em um quantitativo aproximado de 500 kg, transportado para o Laboratório de Eng. Civil da UFV, e estocado em tambores, sem prévia secagem à sombra, objetivando não comprometer suas propriedades hidráulicas. O teor de umidade em que o grits se encontrava era de, aproximadamente, 18 %.

#### **5.2.2.4. Teores de grits empregados**

Com base em estudo prévio de estabilização desenvolvido com solos da CENIBRA, definiram-se os seguintes traços de grits em relação às massas de solos secos: 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28 %.

#### **5.2.2.5. Misturas solo-resíduo**

As misturas solo-resíduo foram realizadas adicionando-se, primeiramente, o resíduo grits aos solos, seguido por homogeneização manual e peneiramento (# 4,8 mm) dessa mistura. Posteriormente, adicionou-se água em quantitativos definidos previamente, para se atingir teores de umidade desejáveis, procedendo-se a uma nova homogeneização, peneiramento e acondicionamento das misturas solo-grits-água em sacos plásticos hermeticamente fechados, para posterior uso.

#### **5.2.2.6. Ensaio e classificações de solos realizados**

Os ensaios realizados com as amostras de solo e misturas solo-grits

foram os seguintes: análise granulométrica (DNIT, 1994a – ME 051), peso específico dos grãos do solo (DNIT, 1994b – ME 093), limite de liquidez (DNIT, 1994c – ME 122), limite de plasticidade (DNIT, 1994d – ME 082) e compactação nas energias referentes aos ensaios Proctor intermediário e Proctor modificado (DNIT, 1994e – ME 129). Realizaram-se as classificações das amostras de solo pelos sistemas TRB (*Transportation Research Board*) e USC (*Unified Soil Classification*), bem como pela Metodologia MCT (Miniatura, Compactado e Tropical), preconizada por Nogami e Villibor (1995).

### **5.2.3. Resultados e discussão**

#### **5.2.3.1. Caracterização e classificação das amostras de solo**

O Quadro 5.1 apresenta os resultados de caracterização das amostras de solo 1 e solo 2. Nesse quadro, destaca-se uma fração elevada de argila no solo 1 (60 %), caracterizando-o como representativo de um solo argilo-areno-siltoso, e predominância da fração areia (74 %) no solo 2, qualificando-o como um material areno-silto-argiloso. Devido à textura, obteve-se para a amostra 1 um valor de índice de plasticidade relativamente elevado (IP = 33 %), com base nos valores do DNIT-CLA 259 (1996), antevendo-se a presença de um solo mais susceptível ao aumento de volume do que aquele representado pela amostra 2 (IP = 8 %).

As classificações dos solos 1 e 2 segundo os sistemas TRB e USC, bem como pela Metodologia MCT, encontram-se descritas no Quadro 5.2. Nogueira (1961) descreveu os solos do grupo A4 a A7 do sistema TRB, caso do solo 1, como os que apresentam comportamento como material de subleito, de regular a mau, e os solos grosseiros, caso do solo 2, A-2-4, de excelente a bom. Murrieta (1994) descreveu que solos do grupo MH, caso do solo 1 em questão, apresentam uma compactação regular a ruim, alta compressibilidade e não são adequados como material de base de pavimentos rodoviários; por sua vez, solos do grupo SC (Solo 2), apresentam compactação boa a regular, pequena à média compressibilidade e qualidade como material de base regular a ruim.

**Quadro 5.1** – Caracterização geotécnica das amostras de solo

Parâmetro	Solo 1	Solo 2
<i>Granulometria (%) - Segundo Escala ABNT (1986)</i>		
Fração Pedregulho ( $\phi > 2$ mm)	0	0
Fração Areia ( $0,06$ mm $< \phi \leq 2$ mm)	28	74
Fração Silte ( $0,002$ mm $< \phi \leq 0,06$ mm)	12	11
Fração Argila ( $\phi \leq 0,002$ mm)	60	15
Peso Específico dos Sólidos ( $\gamma_s$ ) – kN/m <sup>3</sup>	27,63	27,01
<i>Limites de Atterberg (%)</i>		
Limite de Liquidez (LL)	73	27
Limite de Plasticidade (LP)	40	19
Índice de Plasticidade (IP)	33	8

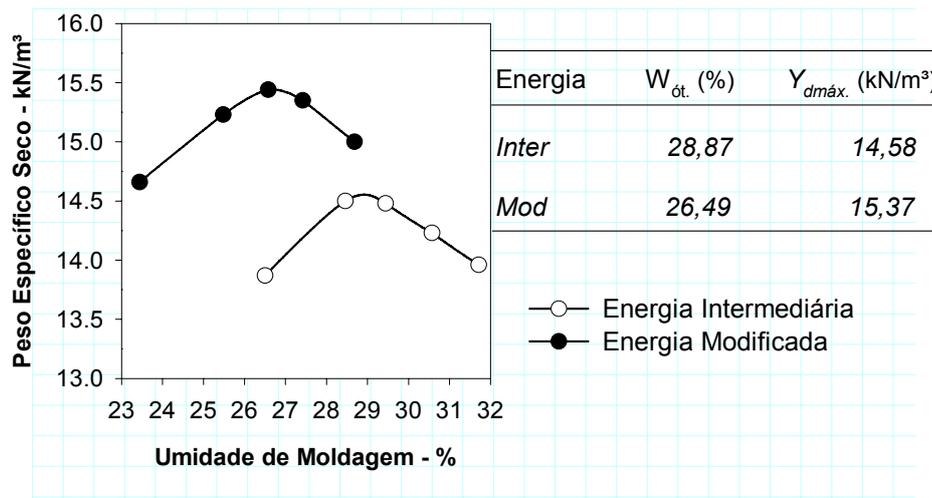
Com relação à classificação MCT dos solos, Nogami e Villibor (1995) descreveram que o solo 1 (LG') trata-se de material com comportamento laterítico argiloso e o solo 2 (NA') trata-se de material com comportamento não-laterítico arenoso.

**Quadro 5.2** – Classificação dos solos segundo os sistemas TRB e USC e a Metodologia MCT

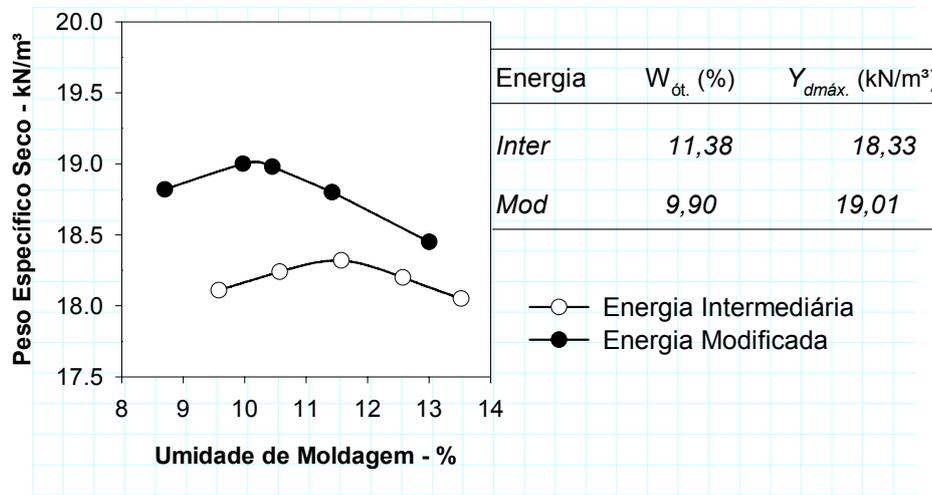
Amostra	Classificação		
	TRB	USC	MCT
Solo 1	A-7-5 (20)	MH	LG'
Solo 2	A-2-4 (0)	SC	NA'

Com relação às características de compactação do solo 1 e do solo 2, ilustradas na Figura 5.2, é possível observar que a amostra 1 possui curvas que se assemelham a uma parábola perfeita, com pontos de máximos bem definidos, observa-se, também, que os parâmetros ótimos de compactação, teor ótimo de umidade ( $W_{ót}$ ) e peso específico seco máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ), indicam um conteúdo maior de água no solo 1, em função da presença superior de finos

que governam a forma e a amplitude de sua curva de compactação. O solo 2, por possuir maior percentual de areia, é mais susceptível à compactação; explicação para isso está, segundo Raghavan e Alvo et al., (1990), no fato de que suas partículas se arranjam mais acirradamente do que nos solos com predominância da fração argila. Menores valores de  $W_{ót}$  e maiores valores de  $\gamma_{dmáx}$ , à medida que o teor de areia aumenta, foram relatados, também, por Pacheco e Dias Júnior (1990) e Figueiredo (1998).



a) Solo1



b) Solo2

**Figura 5.2** – Resultados dos ensaios de compactação dos solos.

### 5.2.3.2. Caracterização das misturas solo-grits

De acordo com estudos preliminares, executados pelos presentes

autores, a granulometria do resíduo grits se aproximou daquela da amostra de solo 2, sendo constituída por cerca de 76 % de partículas correspondentes à fração areia, dos quais 41 % enquadram-se como areia grossa e 35 % como areia fina. As frações silte e argila corresponderam a 18 % e a fração pedregulho a 6 %. O grits apresentou-se como um material não plástico (NP), com baixo peso específico aparente seco ( $\gamma_s = 16,38 \text{ kN/m}^3$ ).

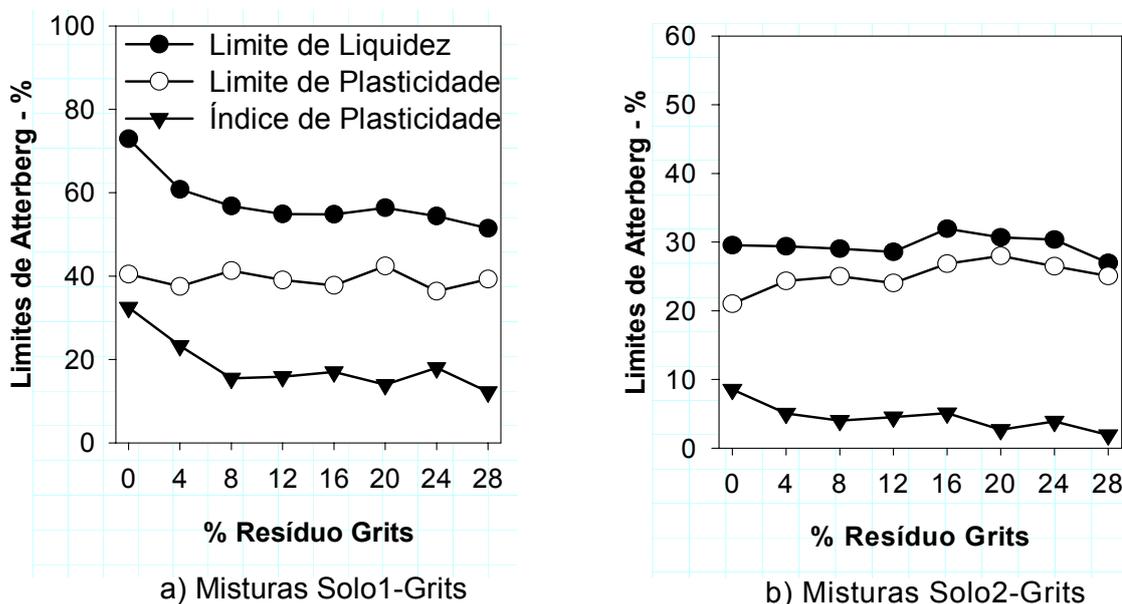
O Quadro 5.3 contém os resultados dos ensaios dirigidos à análise da influência dos teores de grits sobre o peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ ) das amostras de solo. Notou-se que, tanto para o solo 1 quanto para o solo 2, a adição de grits reduziu o  $\gamma_s$ , conforme esperado, haja vista que o resíduo apresenta um baixo valor para esse índice físico. Ressalta-se que, de acordo com relato de Pinto (2000), o  $\gamma_s$  varia pouco de solo para solo e, por si só, não possibilita identificar os mesmos, mas é necessário para o cálculo de outros índices, como, por exemplo, as famílias de curvas de saturação de solos e também de suas misturas com aditivos.

**Quadro 5.3 – Valores de  $\gamma_s$  das misturas solo-grits**

% Grits	Peso Específico dos Sólidos ( $\gamma_s$ ) – $\text{kN/m}^3$	
	Solo1-Grits	Solo2-Grits
0	27,63	27,01
4	26,99	25,72
8	26,93	25,55
12	27,37	25,50
16	27,69	26,88
20	27,69	26,80
24	26,99	26,70
28	26,87	25,79

Na Figura 5.3 encontram-se os valores dos limites de consistência dos solos 1 e 2 e de suas misturas com diferentes teores de grits. Observa-se nessa figura que, nas misturas solo 1-grits, a adição de resíduo nas dosagens estudadas reduziu o LL do solo de 73 % para a faixa de 51 a 61 %, esse último

limite referindo-se ao teor de 28 % de resíduo. Quanto aos valores de IP, observaram-se pequenas oscilações em relação ao solo natural, notando-se ligeira tendência à queda desse parâmetro; dessa forma, o IP para todos os teores de grits ficou abaixo do valor do solo natural, reduzindo-o de 33 % para a faixa de 12 a 23 %. Quanto ao solo 2 e misturas, o efeito do resíduo nos parâmetros de plasticidade foram menos significativos, haja vista que ocorreu uma ligeira tendência ao aumento do LL e do LP, gerando como consequência reduções dos valores de IP que foram mais acentuados para o teor de 28 % de grits (redução observada de 63 % no IP).



**Figura 5.3** – Limites de consistência dos solos e das misturas solo-grits.

A curva de compactação de solos consiste na representação gráfica do peso específico seco em função do teor de umidade, e é função do tipo de solo, do método de compactação e da energia empregada (RICO; DEL CASTILLO, 1974; SOUZA, 1980). O efeito proporcionado pelo emprego de aditivos químicos nos solos podem ser os mais variados possíveis, indo desde o deslocamento das curvas de compactação para a direita ou para esquerda, ou mesmo mudanças de forma.

Em se tratando das misturas solo-grits, nota-se na Figura 5.4, que a adição do resíduo ao solo 1 proporcionou deslocamentos das curvas para a esquerda e para acima, ou seja, alcançaram-se menores valores de

umidade de moldagem e maiores valores de peso específico seco, quanto maior o percentual de grits nas misturas, para ambas as energias de compactação empregadas. Pode-se associar esse comportamento à ocorrência de reações de troca catiônica entre o resíduo grits e a fração fina do solo, o que proporcionou agregação de partículas argilosas e redução das suas características de plasticidade. Portanto, ocorreu redução das exigências de umidade para se atingir um determinado arranjo de partículas, do que resultaram densidades secas mais elevadas. Outro fato, também, associado ao comportamento das curvas das misturas solo 1-grits foi a adição de fração mais grosseira, do resíduo, na granulometria do solo 1, que com a redução da fração argila levou a pesos específicos secos maiores.

Para as misturas solo 2-grits, ocorreu comportamento contrário ao observado com as misturas solo 1-grits, ou seja, deslocamento da curva do solo natural para a direita (maior umidade de moldagem) e para baixo (menor peso específico aparente seco). Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que ao se adicionar grits à amostra 2, de textura predominantemente arenosa, se está incluindo na mesma um aditivo de peso específico dos sólidos inferior e textura muito semelhante a sua.

Nos pontos de máximos das curvas de compactação definem-se os parâmetros ótimos de compactação, ou seja, o teor ótimo de umidade ( $W_{ót}$ ) e o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ). O Quadro 5.4 apresenta os valores encontrados desses parâmetros para as misturas solo 1-grits. Notou-se que, a adição de grits, em todos os tratamentos, proporcionou quedas nos teores ótimos de umidade e aumentos nos pesos específicos aparentes secos, tomando-se como base o solo sem adição de resíduo e se referindo a ambas as energias de compactação empregadas. De forma análoga, o Quadro 5.5 apresenta os resultados obtidos para as misturas solo 2-grits, onde ocorreu comportamento diferenciado, ou seja, aumento nos teores ótimos de umidade e quedas, na maioria dos casos, nos pesos específicos aparentes secos máximos.

- Solo Sem Grits
- Solo+8 % Grits
- ▼ Solo+16 % Grits
- ▽ Solo+24 % Grits

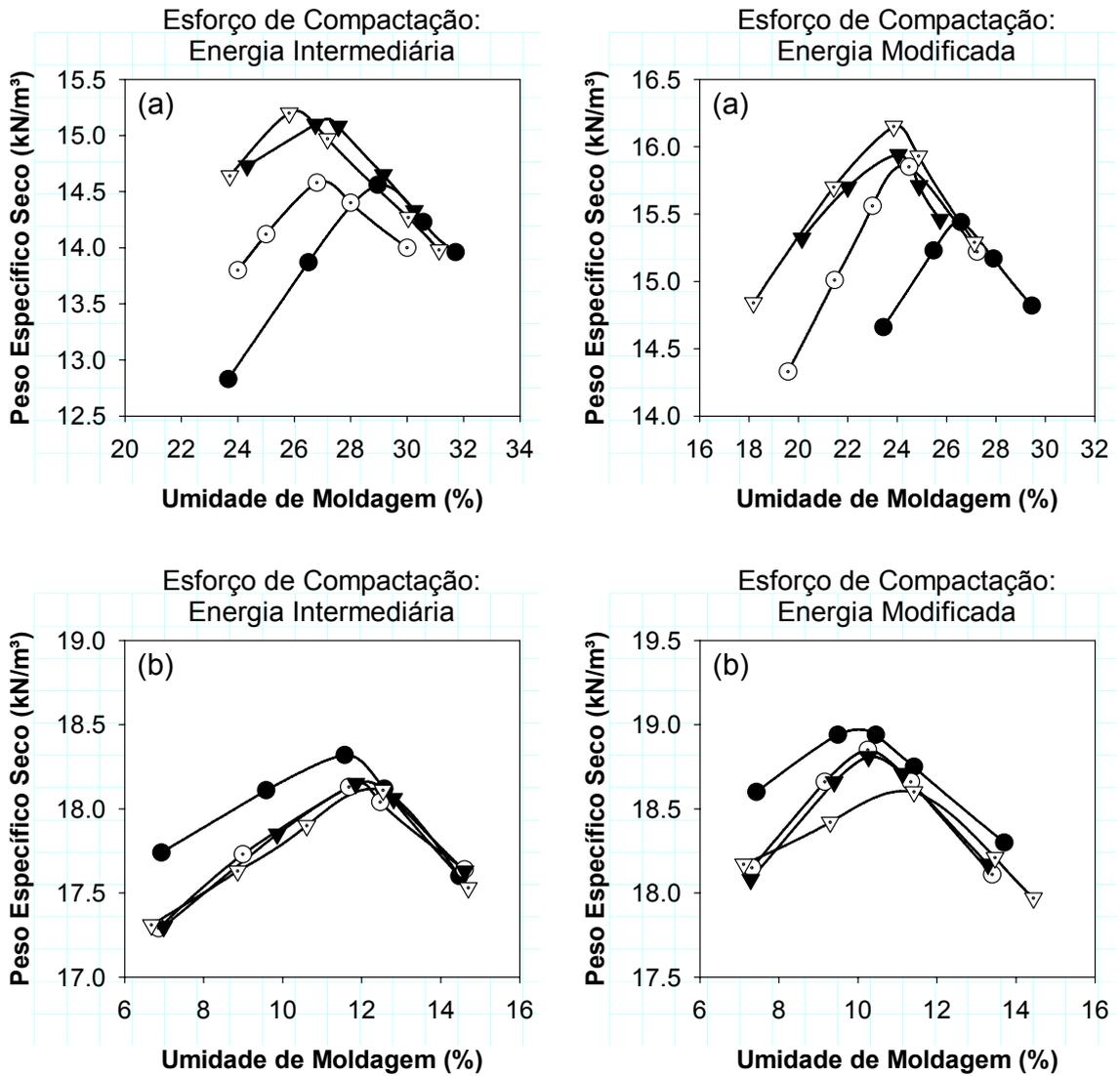


Figura 5.4 – Influência da adição de grits nas curvas de compactação dos solos: (a) solo 1 e (b) solo 2.



**Quadro 5.4 – Parâmetros ótimos de compactação das misturas solo 1-grits**

Misturas	Energia de Compactação			
	Intermediária		Modificada	
	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>ót.</sub> (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>ót.</sub> (%)
Solo 1 sem Grits	14,58	28,87	15,37	26,49
Solo 1 + 4 % Grits	15,04	27,85	15,57	25,72
Solo 1 + 8 % Grits	15,01	27,55	15,85	24,47
Solo 1 + 12 % Grits	14,89	27,37	15,97	24,28
Solo 1 + 16 % Grits	15,14	27,06	16,03	23,39
Solo 1 + 20 % Grits	15,08	26,29	16,14	23,09
Solo 1 + 24 % Grits	15,20	25,85	16,16	22,75
Solo 1 + 28 % Grits	15,45	24,45	16,19	22,57

**Quadro 5.5 – Parâmetros ótimos de compactação das misturas solo 2-grits**

Misturas	Energia de Compactação			
	Intermediária		Modificada	
	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>ót.</sub> (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>ót.</sub> (%)
Solo 2 sem Grits	18,33	11,38	19,01	9,90
Solo 2 + 4 % Grits	18,21	11,47	19,02	9,98
Solo 2 + 8 % Grits	18,14	11,57	18,86	10,24
Solo 2 + 12 % Grits	18,17	11,58	18,84	10,22
Solo 2 + 16 % Grits	18,15	11,92	18,81	10,33
Solo 2 + 20 % Grits	18,16	11,96	18,74	10,41
Solo 2 + 24 % Grits	18,13	12,37	18,59	11,29
Solo 2 + 28 % Grits	18,04	12,41	18,65	11,26

#### **5.2.4. Conclusões**

Os resultados obtidos no presente trabalho permitem concluir que a adição de grits aos solos pesquisados nas dosagens estudadas alterou significativamente as características de plasticidade e os parâmetros de compactação das amostras de solos analisadas, observando-se maiores efeitos nas misturas solo1-grits.

#### **5.2.5. Agradecimentos**

Os autores desejam expressar seus sinceros agradecimentos ao CNPq e a FAPEMIG, pelo apoio financeiro, bem como à CAPES e CENIBRA, respectivamente, pela concessão da bolsa de doutorado ao primeiro autor e fornecimento do resíduo grits.

#### **5.2.6. Referências bibliográficas**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **ME 051**: solos: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994a. 12 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **ME 093**: solos: determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994b. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **ME 122**: solos: determinação do limite de liquidez: método de referência e método expedito. Rio de Janeiro, 1994c. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **ME 082**: solos: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994d. 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **ME 129**: solos: compactação utilizando amostras não-trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994e. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ, 2. ed., 1996. 320 p. (Antigo DNER).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **CLA 259**: classificação de solos tropicais para finalidades viárias

utilizando corpos-de-prova compactados em equipamentos miniatura. São Paulo, 1996. 6 p.

FERNANDES, D.C.M. **Viabilidade do uso de alcatrão de madeira de eucalipto na estabilização de solos residuais para fins rodoviários.** Viçosa, MG: UFV, 2000. 124 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

FIGUEIREDO, L.H.A. **Propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Roxo submetido a diferentes sistemas de manejo.** Lavras, MG: UFLA, 1998. 68 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 1998.

MACHADO, C.C.; PEREIRA, R.S.; PIRES, J.M.M. Influência do tratamento térmico do resíduo sólido industrial grãos na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 4, p. 543-550, 2003. ISSN 0100-6762.

NOGAMI, J.S.; CORREIA, F.C.; VILLIBOR, D.F. Perspectivas da aplicação do solo-cal em rodovias: exemplos de pistas experimentais. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL, 4., 1980, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo: ABPC, 1980. p. 212-234. (Boletim, 12).

PACHECO, A.A.R.; DIAS JÚNIOR, M.S. Estudo comparativo de métodos de campo e laboratório aplicados à confecção de blocos em adobe. **Ciência e Prática**, Lavras, MG, v. 14, n. 2, p. 176-190, maio/ago. 1990.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 247 p.

RAGHAVAN, G.S.V.; ALVO, P.; MCHYES, E. Soil compaction in agriculture: a review toward managing the problem. **Advances in Soil Science**, London, v. 11, p. 1-36, 1990.

RICO, A.; DEL CASTILLO, H. **La ingeniería de suelos en las vías terrestres.** México: I Limusa, v. 1, 1974. 455 p.

SOUZA, M.L. **Pavimentação rodoviária.** Rio de Janeiro: DNER: Instituto de Pesquisa Rodoviária, 2. ed., 1980. 364 p. (livros técnicos e científicos).

### **5.3. Aplicações de misturas solo-grits em estradas florestais: resistência mecânica via CBR**

RESUMO – Analisou-se as potencialidades de emprego do resíduo sólido industrial grits, oriundo da indústria de celulose, como agente estabilizante de dois solos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, Brasil, para fins de emprego em estradas florestais. Os solos estudados englobaram um residual maduro, de textura argilo-areno-siltosa, e um residual jovem, de textura areno-silto-argilosa. Para tanto, efetuaram-se misturas envolvendo solos e o resíduo nos quantitativos de 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28 % em relação às massas de solo seco. Fez-se uso do ensaio CBR para avaliar as características de resistência e expansão das misturas. A avaliação dos resultados do estudo permite concluir que o resíduo grits apresentou potencial significativo como estabilizante dos solos, observando-se que: (i) a adição de grits aos solos foi responsável por ganhos nas suas resistências mecânicas, obtendo-se melhores resultados com o solo de textura areno-silto-argilosa; (ii) com relação à expansão medida no ensaio CBR, observaram-se pequenos acréscimos para o solo de textura argilo-areno-siltosa e decréscimos para o solo de textura areno-silto-argilosa com aumentos no teor de grits e (iii) as misturas solo-grits não responderam bem ao aumento da energia de compactação, em termos dos parâmetros CBR e expansão<sub>CBR</sub>.

Palavras-chaves – Solos, estabilização, resíduo industrial grits, estradas florestais.

### **Application of soil-grits mixtures in forestry road: mechanical resistance by CBR**

ABSTRACT – This paper is directed to forest road engineering applications, and address the potentialities of using an industrial solid waste from the cellulose industry, named grits, in the stabilization process of two soils from the North Wood Forest Zone of Minas Gerais, Brazil. Soil types tested

encompassed a mature residual silty-sandy-clay and a young residual clayey-silty-sand. Soil-Grits mixtures were prepared at 4, 8, 12, 16, 20, 24 and 28 % stabilizer contents referred to soils dry masses. Mechanical strength and swelling parameters were determined in CBR (California Bearing Ratio) tests. The laboratory testing program data supported that addition of Grits to soils led to: (i) significant mechanical strength gains that could be better associated with the clayey-silty-sandy soil; (ii) increases and decreases in swelling with increases in Grits contents, respectively, referred to the silty-sandy-clayey and the clayey-silty-sandy soils and (iii) increase in compaction effort did not lead to better mixtures mechanical responses regarding CBR and swelling <sub>CBR</sub>.

Key Works – Soils, stabilization, industrial waste grits, forest roads.

### **5.3.1. Introdução**

Em estudos de estabilização química de solos para fins rodoviários, é comum desenvolver-se na dosagem um programa de ensaios de laboratório direcionado ao conhecimento das características de engenharia das misturas, com base nas normas técnicas padronizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ou pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). A resistência mecânica dos solos e misturas pode ser avaliada pelo índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR) onde, além do valor da capacidade de suporte de amostras deformadas, obtém-se, também, o valor da expansão que, segundo Nogami e Villibor (1995), tem sido um parâmetro de grande importância em obras viárias.

O ensaio CBR, desenvolvido inicialmente pelo Departamento de Rodovias do Estado da Califórnia, EUA, foi adotado pelo Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos, que, após introduzir modificações, divulgou-o amplamente durante a Segunda Guerra Mundial (NOGAMI; VILLIBOR, 1995). No Brasil, os resultados desse ensaio são adotados quase que com exclusividade para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, determinando-se a capacidade de suporte do subleito e das camadas do pavimento rodoviário. Exemplos nesse

sentido são os métodos de dimensionamentos de pavimentos flexíveis do DNIT, antigo DNER, na versão mais atual do seu Manual de Pavimentação (DNIT, 1996).

Partindo-se do pressuposto de que se pode fazer uma escolha adequada das técnicas de estabilização química de solos para fins rodoviários, que numa definição de Lima e Bueno et al., (1993) referem-se “[...] à incorporação de uma pequena quantidade de aditivo na massa do solo, conferindo-lhe propriedades pré-determinadas...;” diversos estabilizantes podem ser encontrados no mercado, podendo-se referir a produtos tradicionais, como cal, cimento e betume, passando por outros produtos comerciais, como Dynacal e RBI Grade 81, e finalizando com materiais alternativos, como subprodutos ou resíduos industriais.

Sherwood (1961) relata experiências bem sucedidas com o uso de resíduos industriais na estabilização química de solos de estradas, referindo às cinzas volantes e ao cloreto de cálcio. Esse autor destacou a distância de transporte da fábrica ao local de aplicação e quantidade de resíduo produzida como possíveis condicionantes no processo.

Na UFV, os Departamentos de Engenharia Civil e Engenharia Florestal têm acumulado experiência significativa nessa área, podendo-se destacar: (i) pesquisas desenvolvidas com o vinhoto, gerado na indústria açucareira e estudado por Ferraz (1994); (ii) licor negro kraft, produzido na indústria de celulose e analisado por Vieira (1994); (iii) alcatrão de madeira de eucalipto, gerado no processo de carbonização da madeira e pesquisado por Fernandes (2000) e (iv) escórias de aciaria e de alto-forno, subprodutos da produção do aço e estudadas, respectivamente, por Baltazar (2001) e Sant’ana (2003). Uma visão geral das pesquisas desenvolvidas na UFV sobre o emprego de resíduos industriais em estradas foi apresentada por Lima e Machado et al., (2003), no 6º Simpósio Brasileiro sobre Colheita e Transporte Florestal.

Dando prosseguimento a essa linha de pesquisa, surge um novo material, gerado na produção de celulose, denominado grits, que possui em sua composição parcela significativa de óxido de cálcio que não reagiu durante

o processo de recuperação da soda cáustica e que apresenta, portanto, potencial para a estabilização química de solos. O seu emprego como estabilizante de estradas florestais se fundamenta, também, nos seguintes fatos: (i) o resíduo é gerado em quantidade suficiente para ser usado nas estradas florestais; (ii) os locais de produção e aplicação do produto estão a distâncias de transporte economicamente viáveis e (iii) o produto é classificado, segundo a Norma Técnica ABNT 10.004 (1987), como resíduo da classe II, ou seja, não inerte.

Assim sendo, o presente trabalho é direcionado à análise da potencialidade do resíduo industrial grits como estabilizante químico para solos de estradas florestais. Procedeu-se à avaliação da resistência mecânica de amostras de solo com e sem adição do resíduo grits, com o intuito de se gerar dados laboratoriais como parte integrante de uma das etapas de uma série de estudos sobre a viabilidade de resíduos industriais em estradas. Como objetivos específicos abordados neste artigo, citam-se: (i) avaliação, via resultados dos ensaios CBR, da resistência e expansão de amostras de solo e misturas solo-grits; (ii) análise da influência de variações no teor de umidade de misturas solo-grits nas suas resistências mecânicas e (iii) avaliação da influência da energia de compactação na resistência mecânica das misturas solo-grits.

### **5.3.2. Materiais e métodos**

#### **5.3.2.1. Amostras de solo e de resíduo**

No presente estudo, trabalhou-se com amostras de dois solos residuais da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, coletadas no município de Viçosa, sendo um de comportamento laterítico e outro de comportamento saprolítico, segundo o sistema de classificação adotado na metodologia MCT (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

A primeira amostra, de comportamento geotécnico laterítico e classificação A-7-5 (20), segundo o sistema adotado pelo *Transportation*

*Research Board* dos Estados Unidos da América e também pelo DNIT, apresenta textura argilo-areno-siltosa e foi coletada em um talude de corte da rodovia que une as cidades de Viçosa e Paula Cândido, nas proximidades da Estação de Tratamento de Água de Viçosa, sendo denominada solo 1. A segunda amostra, de comportamento geotécnico saprolítico e classificação TRB A-2-4 (0), foi coletada em um talude de corte na Vila Secundino, localizada no Campus da UFV, sendo denominada de solo 2.

A escolha desses solos se deveu aos volumes significativos de suas ocorrências na Zona da Mata Mineira e, especialmente, ao fato de representarem materiais muito diferenciados no sistema de classificação adotado pelo TRB, englobando aqueles de textura fina (solo 1) e granular (solo 2). As amostras coletadas no campo foram acondicionadas em embalagens plásticas e destinadas ao Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFV para destorroamento, secagem ao ar e armazenamento em tambores para posterior utilização.

O resíduo grits, que foi cedido pela Empresa de Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA), é um material sólido, de coloração acinzentada, que apresenta em sua constituição química o óxido de cálcio, ou seja, cal obtida na reação de caustificação do licor verde, processo este que recupera a soda cáustica para retorno ao cozimento da celulose. A amostra foi coletada em um aterro sanitário da empresa, transportado para o laboratório de Engenharia Civil da UFV e estocado em tambores para utilização futura.

### **5.3.2.2. Teores de grits utilizados e período de cura das misturas**

Os teores de grits empregados nas misturas foram: 0, 4, 8, 12, 16, 20 e 24 %, valores estes calculados sobre a massa de solo seco. Em função das respostas obtidas no programa de ensaios, posteriormente, acrescentou-se à matriz de ensaios, o traço de 28 % de grits. Ressalta-se que as misturas solo-grits foram realizadas manualmente, com a adição de resíduo ao solo e homogeneização da massa. Posteriormente, adicionou-se água às misturas em quantitativos pré-determinados, procedendo-se à nova homogeneização.



Presentemente, não se trabalhou com períodos de cura úmida das misturas solo-grits compactadas, executando-se o ensaio CBR imediatamente após completado o período de imersão, em água, por 96 horas dos corpos-de-prova.

### **5.3.2.3. Ensaio geotécnico e suas respectivas normatizações técnicas**

Numa primeira etapa, com exceção da mistura das amostras de solos com 28 % de grits, fez-se uso do ensaio  $CBR_{5\text{pontos}}$  para a determinação dos parâmetros ótimos de compactação (teor ótimo de umidade -  $W_{ót}$  e peso específico seco máximo -  $\gamma_{dmáx}$ ) e da resistência mecânica e expansão das misturas ( $CBR$  e  $expansão_{CBR}$ ), cuja compactação dos corpos-de-prova é normatizada pelo método de ensaio DNIT (1994) – ME 129. Nessa etapa, trabalhou-se com a energia de compactação do ensaio Proctor intermediário.

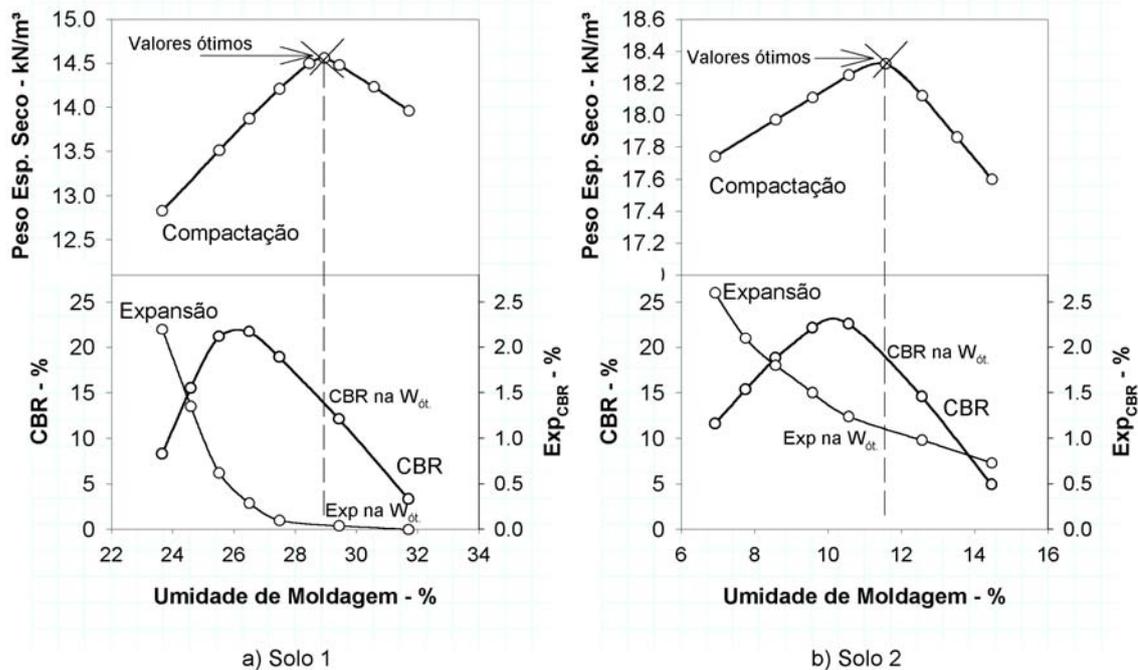
Para avaliar o efeito da energia de compactação na resistência mecânica das misturas, procedeu-se à compactação de corpos-de-prova das mesmas, segundo o método de ensaio DNIT (1994) – ME 216, obtendo-se os parâmetros ótimos de compactação na energia do ensaio Proctor modificado. Em seguida, procedeu-se à execução do ensaio  $CBR_{1\text{ponto}}$ , determinando-se os valores  $CBR$  e  $expansão_{CBR}$  apenas no teor ótimo de umidade. Toda essa seqüência foi, também, adotada nas misturas preparadas com 28 % de grits.

### **5.3.3. Resultados e discussão**

#### **5.3.3.1. Parâmetros ótimos de compactação**

Apresentam-se, na Figura 5.5, as curvas de compactação,  $CBR$  e  $expansão_{CBR}$ , obtidas nos ensaios  $CBR_{5\text{pontos}}$  realizados na energia do ensaio de compactação Proctor intermediário, mostrando-se à esquerda os resultados de ensaios para o solo 1 e à direita para o solo 2, ambos sem adição de grits. Na energia de compactação anteriormente citada, os parâmetros ótimos da curva de compactação encontrados foram os seguintes: solo 1,  $W_{ót}$  de 28,87 % e  $\gamma_{dmáx}$  de 14,58 kN/m<sup>3</sup>; solo 2,  $W_{ót}$  de 11,38 % e  $\gamma_{dmáx}$  18,33 kN/m<sup>3</sup>. Ainda na

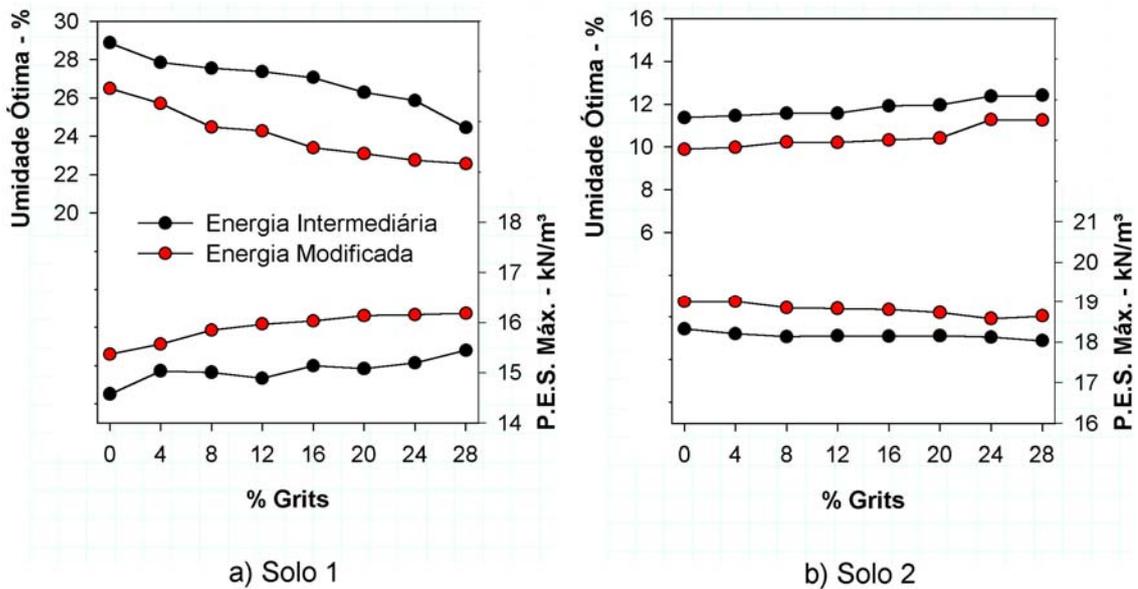
Figura 5.5, trabalhando-se com os valores de  $W_{ót}$  nas curvas dos parâmetros CBR e expansão<sub>CBR</sub> versus teor de umidade, obtém-se, respectivamente, os valores de 14 e 0,40 % para o solo 1 e 20 e 1,3 % para o solo 2. Nota-se, também, que é possível obter valores dos parâmetros CBR e expansão<sub>CBR</sub> para variações do teor de umidade em torno de  $W_{ót}$ , por exemplo  $\pm 2\%$ , que são de importância fundamental para o controle da compactação a ser executado no campo, quando da execução de camadas estabilizadas do pavimento.



**Figura 5.5** - Curvas de compactação, CBR e expansão<sub>CBR</sub> obtidas em ensaios CBR<sub>5pontos</sub>, com compactação na energia do Proctor intermediário.

A Figura 5.6 apresenta os valores dos parâmetros  $W_{ót}$  e  $\gamma_{dmáx}$ , das misturas solo-grits, considerando-se as energias de compactação dos ensaios Proctor intermediário e Proctor modificado. Através desses dados, constata-se que: (i) para o solo 1, houve uma tendência de queda  $W_{ót}$ , em função de acréscimos nos teores de resíduo e aumento nos valores de  $\gamma_{dmáx}$ , para ambas as energias de compactação e (ii) no que se refere ao solo 2, observa-se um comportamento diferenciado, ou seja, aumento no  $W_{ót}$  e queda no  $\gamma_{dmáx}$ , em função do acréscimo do teor de grits, para ambas as energias de compactação. Como já esperado, para ambos os solos, o aumento da energia de

compactação foi responsável por menores valores de  $W_{ót}$  e maiores valores de  $\gamma_{dmáx}$ .



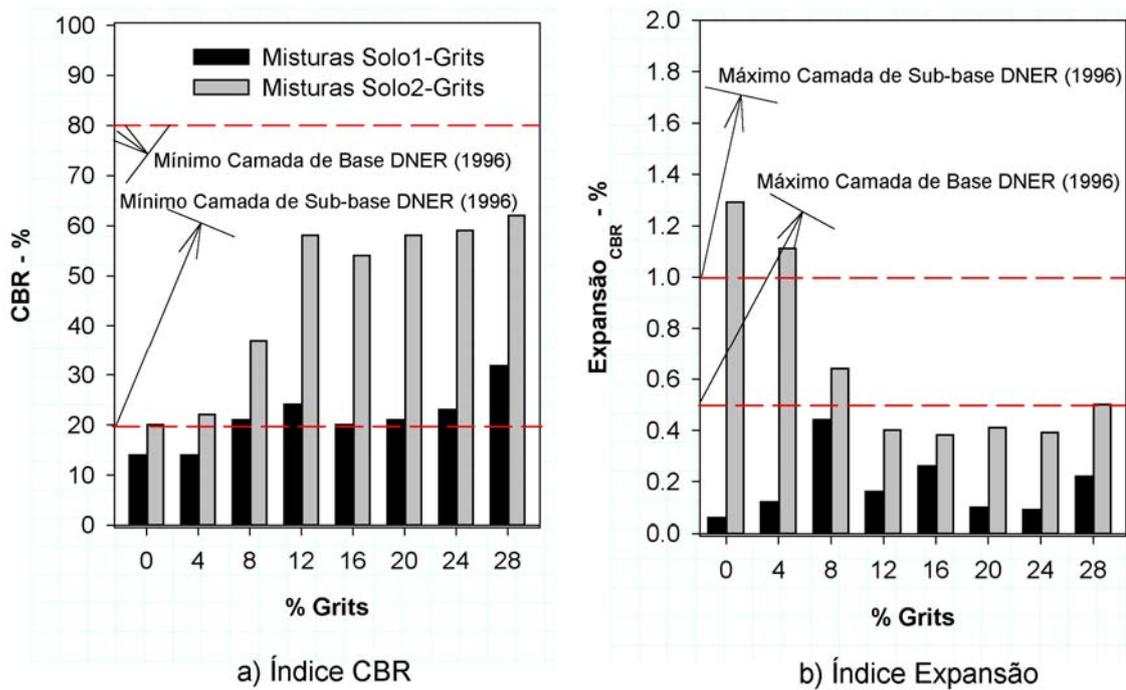
**Figura 5.6** - Influência da adição de grits nos parâmetros ótimos de compactação dos solos 1 e 2.

### 5.3.3.2. Avaliação do CBR e da expansão das misturas solo-grits

Definidos os parâmetros ótimos de compactação, determinaram-se os valores dos parâmetros CBR e expansão das misturas solo-grits. Na Figura 5.7 é possível observar a influência da adição de teores de grits aos solos 1 e 2, trabalhando-se na energia do ensaio Proctor intermediário. Em todas as misturas com o solo 1, observou-se que ocorreram ganhos no CBR, sendo que à partir do teor de grits de 8 % as misturas apresentaram valores para esse índice superiores a 20 %, qualificando o solo 1 para uso como camada de sub-base de pavimentos rodoviários flexíveis (DNIT, 1996), condição que não possuía quando compactado em sua forma natural. Destaca-se que a melhor resposta mecânica ocorreu para o teor de grits de 28 %, notando-se um ganho de resistência mecânica da ordem de 127 % em relação ao solo 1 sem grits.

Para o solo 2, também, ocorreram ganhos de resistência mecânica para todos os tratamentos com grits, observando-se pequena variação nos valores CBR para os teores de grits entre 12 e 28 %; destaca-se que todos os teores

de resíduo utilizados, à exceção de 4 %, produziram misturas que podem ser empregadas como camadas de sub-base de pavimentos rodoviários flexíveis (DNIT, 1996), sendo que o maior ganho ocorreu para o percentual de 28 % de resíduo, atingindo-se um ganho de aproximadamente 190 % em relação ao solo 2 em sua forma natural.



**Figura 5.7** – Valores de CBR e expansão para as misturas solo-grits referentes à energia do ensaio Proctor intermediário.

Com relação à expansão, para as misturas com o solo 1, ocorreram aumentos em todos os tratamentos com grits, sendo esses considerados de pequena monta em se tratando de pavimentação rodoviária. A pequena oscilação dos valores pode ser associada ao fato dos extensômetros de medição serem muito sensíveis e uma mínima mudança da posição do tripé de leitura pode levar à ocorrência de pequenas variações. Com relação às misturas solo 2-grits, o parâmetro expansão teve o seguinte comportamento: (i) queda em todas as misturas com relação ao solo sem adição de resíduo; (ii) diminuição mais acentuada nos traços com 12, 16, 20 e 24 % de grits, onde de 1,3 % de valor de expansão no solo 2, obteve-se o valor de 0,40 % e (iii)

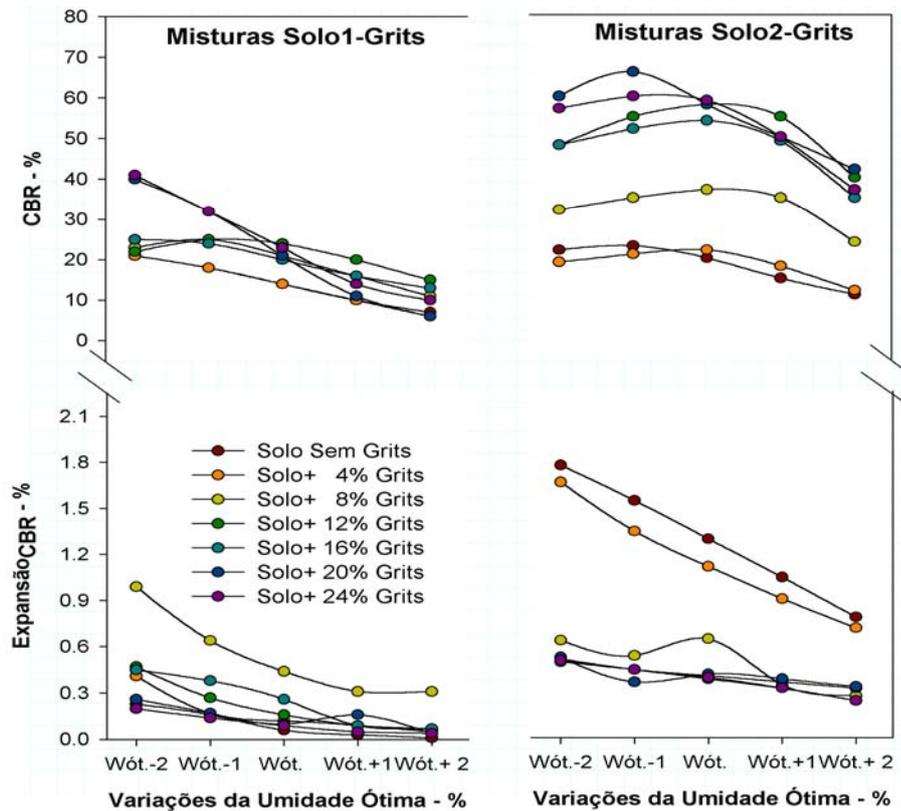
pequeno aumento da expansão, apesar de ficar abaixo do valor do solo natural, para o teor de 28 % de grãos.

#### **5.3.3.3. Influência da umidade no CBR e expansão das misturas solo-grãos**

A Figura 5.8 traz a ilustração das relações entre o teor de umidade, CBR e expansão, para variações de  $\pm 1\%$  e  $\pm 2\%$  em torno da  $W_{ót.}$  de moldagem dos corpos-de-prova, trabalhando-se na energia de compactação do ensaio Proctor intermediário. Para as misturas solo 1-grãos, observa-se a ocorrência de maiores valores dos parâmetros CBR e expansão nos ramos secos das curvas de compactação, os quais continuam a cair nos ramos úmidos, como é comum no caso de solos. No caso das misturas solo 2-grãos, notou-se para o parâmetro CBR, a ocorrência de comportamento diferente daquele observado com as misturas com o solo 1, verificando-se que, para os teores de grãos entre 4 a 16 %, os maiores valores de CBR estão associados aos teores ótimos de umidade de cada mistura; quanto ao parâmetro expansão dessas misturas, notou-se, em geral, a ocorrência de maiores valores nos ramos secos das curvas de compactação, com quedas associadas ao crescimento nos teores de umidade de moldagem dos corpos-de-prova, à semelhança do que ocorreu com as misturas solo 1-grãos.

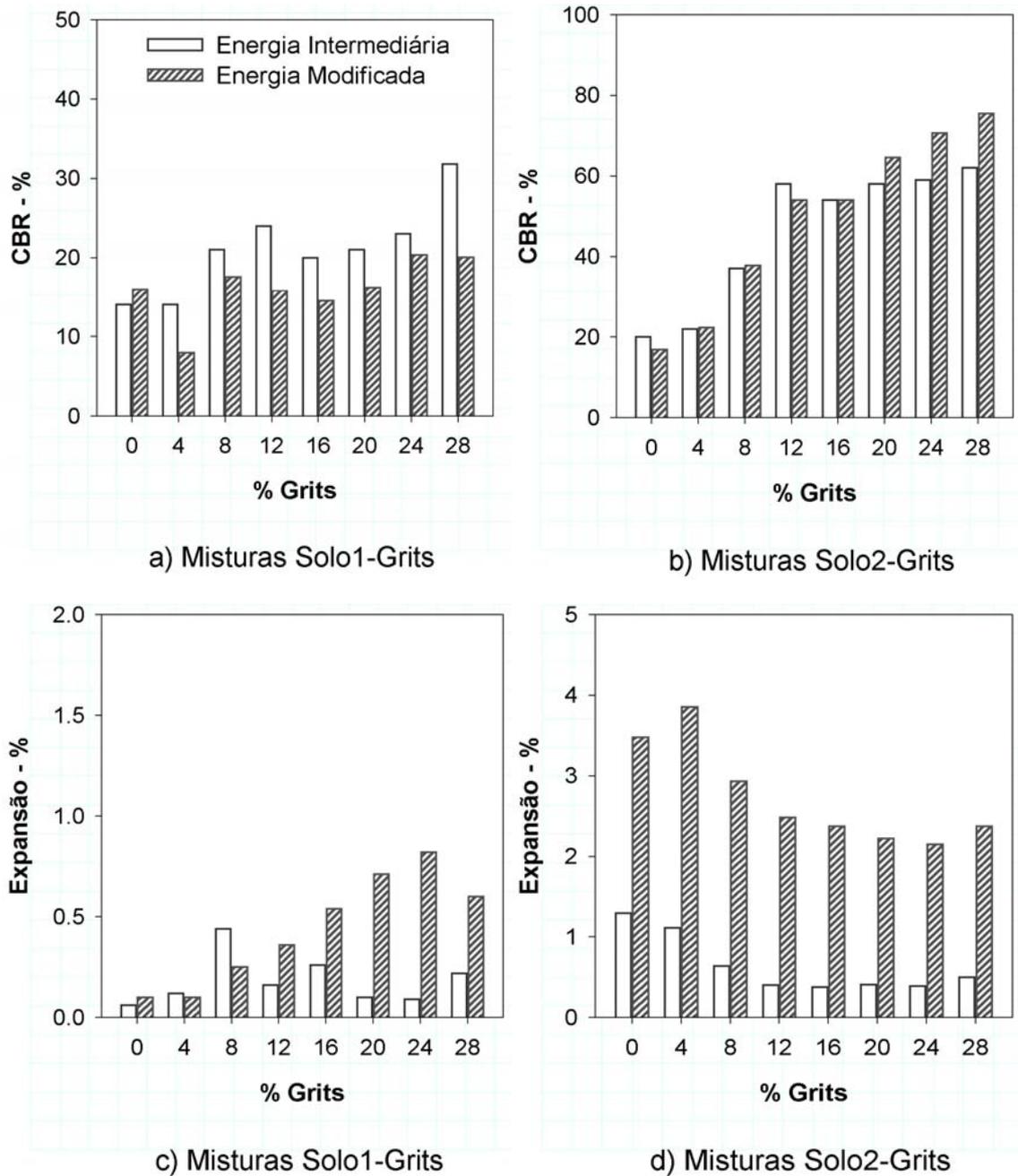
#### **5.3.3.4. Influência da energia de compactação na resistência e expansão das misturas solo-grãos**

O efeito do aumento da energia de compactação no comportamento do parâmetro CBR pode ser analisado de duas maneiras: (i) ganho de resistência em função de um melhor arranjo de partículas e maior redução dos vazios dos solos e (ii) perda de resistência em função da ocorrência de esmagamento de partículas, em função do tipo de solo considerado. No que tange a esse item, as misturas solo-grãos apresentaram o comportamento ilustrado na Figura 5.9, quando compactadas nas energias dos ensaios Proctor intermediário e modificado, podendo-se referir a: (i) queda nos valores do parâmetro CBR para todas as misturas solo 1-grãos, atingindo-se reduções médias de CBR de 24 %,



**Figura 5.8** - CBR e expansão das misturas solo-grits, compactadas na energia intermediária, na  $W_{ót.}$  e em variações da  $W_{ót.} \pm 1\%$  e  $W_{ót.} \pm 2\%$ .

e aumentos da expansão para teores de grits iguais ou superiores a 12 %, embora esses aumentos possam ser considerados de pequena monta para fins rodoviários e (ii) ganhos de resistência, devido ao aumento da energia de compactação, para as misturas solo 2-grits a partir do teor de 20 % de resíduo, que atingiram ganhos de aproximadamente 20 % para o caso das misturas com 24 e 28 % de grits, e aumentos bruscos no parâmetro expansão que chegaram a atingir a casa dos 500 % para o caso das misturas com 16 e 20 % de resíduo; destaca-se que esses aumentos podem estar associados a um comportamento resiliente do solo 2, de textura areno-silto-argilosa, em conjugação com a energia de compactação elevada que foi utilizada.



**Figura 5.9** - Influência da energia de compactação na resistência e expansão das misturas solo-grits.

### 5.3.4. Conclusões

- (i) considerando-se o parâmetro CBR como referência, os solos estudados se mostraram reativos ao grits, obtendo-se melhor resposta para o solo 2, de textura arenosa. Para ambos os solos, as misturas

com teores iguais ou superiores a 8 % de grits apresentaram valores dos parâmetros CBR e expansão que as qualificam como camadas de sub-base de pavimentos rodoviários flexíveis, segundo os métodos de dimensionamento adotados pelo DNIT;

- (ii) as misturas de ambos os solos se mostraram sensíveis às variações de teor de umidade em torno de  $W_{ót.}$ , notando-se para aquelas do solo 1, maiores valores de CBR nos ramos secos das curvas de compactação que diminuem com o aumento do teor de umidade e atingem os menores valores nos ramos úmidos das curvas de compactação; por outro lado, as misturas com o solo 2 exibiram maiores valores CBR, em geral, nos  $W_{ót.}$ ;
- (iii) ambas as misturas não apresentaram, em geral, respostas mecânicas positivas ao aumento da energia de compactação, sendo que para as misturas com o solo 1 ocorreram quedas sucessivas no CBR quando se trabalhou na energia do ensaio Proctor modificado. No que se refere às misturas com o solo 2 foram observados ganhos da ordem de 20 % no CBR para os teores de 24 e 28 % de grits, que podem ser considerados de pequena monta, em especial quando se avaliam os custos envolvidos na execução de camadas de pavimentos rodoviários ao se passar da energia do ensaio Proctor intermediário para o Proctor modificado. Assim, no presente caso, não se justifica empregar a energia de compactação do ensaio Proctor modificado na compactação das misturas no campo;
- (iv) na energia de compactação do ensaio Proctor intermediário, as misturas com o solo 1 apresentaram pequenos aumentos na expansão, observando-se comportamento inverso com as misturas com o solo 2. No entanto, ao se aumentar a energia de compactação, passando-se a trabalhar com a energia do ensaio Proctor modificado, observou-se um efeito deletério da energia no parâmetro expansão; e
- (v) o grits apresentou bom potencial para a estabilização das duas amostras de solo analisadas, visto que os resultados dessa etapa foram obtidos para corpos-de-prova não submetidos a períodos de



cura. Em estudos de estabilização química de solos é comum trabalhar com períodos de cura da ordem de dias ou semanas, podendo-se referir a 7 dias, para misturas solo-cimento, e a 28 dias, para misturas solo-cal.

### **5.3.5. Recomendação**

Com base nos dados apresentados para ambos os solos e considerando-se os aspectos econômicos e técnicos, onde ressalta-se o não emprego de cura úmida dos corpos-de-prova, não se recomenda empregar a energia de compactação modificada para a execução das misturas solo-grits analisadas, nas situações do presente trabalho.

### **5.3.6. Agradecimentos**

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq e a FAPEMIG pelo apoio financeiro ao presente projeto, bem como à CAPES e à UFV, respectivamente, pela concessão de bolsa de doutorado e instalações físicas para a execução deste trabalho. Agradecem, também, a empresa CENIBRA pelo fornecimento do resíduo grits.

### **5.3.7. Referências bibliográficas**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-10.004:** classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ, 1987. 6 p.

BALTAZAR, R. P. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação.** Viçosa, MG: UFV, 2001, 77 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Pavimentação.** Rio de Janeiro, RJ, 2. ed., 1996. 320 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME129:** solos: compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 216**: solo-cimento: determinação da relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 8 p.

FERNANDES, D.C.M. **Viabilidade do uso de alcatrão de madeira de eucalipto na estabilização de solos residuais para fins rodoviários**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 124 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

FERRAZ, R.L. **Contribuição ao estudo da estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 180 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

LIMA, D.C.; BUENO, B.S.; SILVA, C.H.C. **Estabilização dos solos II: técnicas e aplicações a solos da microrregião de Viçosa**. Viçosa, MG: UFV, 1993. (Publicação, 333).

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: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 6., Belo Horizonte, MG, 2003. **Anais...** Belo Horizonte, MG: SIF/UFV, 8-10 jul. 2003. p. 69-117.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, DF. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo, SP: VILLIBOR, 1995. 240 p.

SANT'ANA, A.P. **Caracterização tecnológica de misturas solo-escória de alto forno moída para fins rodoviários**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 74 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

SHERWOOD, P. T. Soil stabilization by the use of chemical admixtures. **Roads and road constructions**, s.1., p. 102-119, 1961.

VIEIRA, S. V. **Estabilização de solos com licor negro kraft concentrado para fins rodoviários**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 126 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

#### **5.4. Compactação de misturas solo-grits para emprego em estradas florestais: influência do tempo decorrido entre mistura e compactação na resistência mecânica**

RESUMO – Vários fatores influenciam a execução e a “performance” de camadas de pavimentos rodoviários constituídas de solos estabilizados quimicamente, com destaque para a homogeneização da mistura, o período de tempo decorrido entre a mistura e a compactação, bem como para a escolha do equipamento de compactação. Aborda-se, no presente artigo, a influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação (TMC) nos parâmetros de compactação e na resistência mecânica de misturas de dois solos típicos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais com o resíduo da indústria CENIBRA denominado grits, com vistas à sua aplicação em estradas florestais. Analisa-se, também, a influência de diferentes lotes desse resíduo na resistência mecânica das misturas. Trabalhou-se com os resultados de ensaios de índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR) realizados em corpos-de-prova de misturas moldados na energia de compactação do ensaio Proctor intermediário. Os resultados obtidos permitem concluir que o tempo decorrido entre mistura e compactação influencia significativamente a resistência mecânica das misturas analisadas, recomendando-se, para fins práticos, que estudos desta natureza devam ser feitos em bases regionais de ocorrência de solos. Observou-se, também, uma influência significativa do lote na resistência mecânica das misturas.

Palavras-chave – Estabilização de solos, grits, tempo entre mistura e compactação, estradas florestais.

#### **Compaction of soil-grits mixtures for use in forestry road: Influence of time between mixture and compaction in mechanical resistance**

ABSTRACT – Many factors affect the construction and performance of chemically stabilized highway pavement soil layers, especially mixture

homogenization, time between mixture and compaction, and selection of compaction equipment. Regarding forest road application, this paper addresses the influence of time between mixture and compaction (TMC) on compaction optimum parameters and on mechanical strength of mixtures of two typical soils from Minas Gerais State's Zona da Mata Norte and grits, a waste from the cellulose industry, as well as the influence of Grits sampling on the mechanical strength of soil 2-grits mixtures. California bearing ratio (CBR) data from laboratory specimens compacted at the Intermediate Proctor compaction effort were used throughout the study. The laboratory testing data support that time between mixture and compaction affects significantly the mechanical strength of the tested soil mixtures. Regarding soil occurrence and from a practical point of view, it is recommended that such studies should be always performed on regional basis. It was observed significant influence of grits sampling on the mechanical strength of soil 2-grits mixtures.

Key Words – Soil stabilization, grits, time between mixture and compaction, forest roads.

#### **5.4.1. Introdução**

No processo construtivo de estradas, a compactação de camadas de solos estabilizados quimicamente constitui-se em uma etapa de grande relevância para o bom desempenho da obra. Dentre os aspectos de interesse na performance das misturas, pode-se referir a: tipos de solo e estabilizante, teor de umidade da mistura, processo de mistura, tempo decorrido entre mistura e compactação, tipo de equipamento e energia empregada no processo de compactação, e período de cura da camada estabilizada.

Em se tratando de compactação de solos realizada em laboratório, a normatização técnica da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1986) prescreve que, após a adição de água às amostras a serem submetidas à compactação, deve-se observar um tempo mínimo de 24 horas antes da compactação. Em especial, para solos argilosos, essa exigência visa possibilitar uma melhor homogeneização da água na amostra de solo.

No entanto, ao se empregarem as técnicas de estabilização química de solos, este é um aspecto de importância significativa para a boa qualidade mecânica das misturas, pois se, na mistura, já ocorreram reações de cimentação de curto prazo antes da compactação, certamente parte do estabilizante adicionado ao solo foi utilizado na confecção das mesmas. Considerando-se que essas ligações podem ser quebradas no processo de compactação da camada estabilizada, reduz-se, assim, o quantitativo de estabilizante disponível para a cimentação das partículas de solo, com conseqüente queda na resistência mecânica da mistura. Nesse contexto, ganha importância o tempo decorrido entre mistura e compactação de camadas estabilizadas quimicamente.

Com relação ao tópico em questão, refere-se que na execução de camadas de misturas solo-cimento é comum exigir que o tempo decorrido entre mistura e final de compactação não exceda 3 horas (SENÇO, 2001), bem como que resultados de pesquisas mostram que dois solos geotecnicamente classificados como residuais maduro e jovem apresentaram tempos ótimos entre mistura e compactação, respectivamente, de 0 e 4 horas, quando estabilizados com o produto RBI Grade 81 (TRINDADE; LIMA; MACHADO et al., 2005) e com escória de alto-forno granulada moída (SANT'ANNA, 2003). Em misturas solo-cal, Dantas (1970 apud GUIMARÃES, 1971), evidenciou que igual compactação imediatamente e decorridos 24 horas após a execução da mistura, levou à redução da densidade e da resistência mecânica. Certamente, essas constatações indicam que estudos sobre esse tópico devem ser desenvolvidos considerando-se a gênese e os processos de formação dos solos, adquirindo, pois, um caráter regional.

Como parte integrante de uma série de estudos sobre a viabilidade de emprego do resíduo grits na construção de estradas florestais, o presente artigo tem por objetivo analisar a influência do tempo decorrido entre mistura e compactação de combinações solo-grits nas suas resistências mecânicas, através de um programa de ensaios geotécnicos de laboratório.

## **5.4.2. Materiais e métodos**

### **5.4.2.1. Materiais**

Fez-se uso do resíduo grits, gerado no processo de recuperação da soda cáustica, na etapa de cozimento de cavacos de madeira de eucalipto, para produção de celulose. O interesse se deveu aos constituintes químicos presentes em tal material, em especial o CaO (óxido de cálcio), que demonstraram potencial para a estabilização química de solos para construção de estradas, principalmente, as florestais, que se situam a distâncias de transporte relativamente pequenas do local de produção e coleta do resíduo.

Trabalhou-se com duas amostras de solos típicos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, coletadas na microrregião da cidade de Viçosa, caracterizadas geotecnica e utilizadas em estudos anteriores envolvendo misturas com outros estabilizantes químicos, que podem ser descritas como se segue: (i) solo 1 - geotecnica, trata-se de um solo residual maduro de gnaiss de comportamento laterítico, pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, laterítico, de textura argilo-areno-siltosa, cuja amostra foi coletada no horizonte B ( $\cong$  6 m de profundidade) de um talude de corte situado na rodovia que liga Viçosa a Paula Cândido, nas proximidades da Estação de Tratamento de Água de Viçosa e (ii) solo 2 - geotecnica, trata-se de um solo residual jovem de gnaiss, de comportamento não-laterítico, de textura areno-argilo-siltosa, cuja amostra foi coletada no horizonte C ( $\cong$  16 m de profundidade) de um talude de corte no Campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), na Vila Secundino. O Quadro 5.6 apresenta a caracterização geotécnica bem como, a classificação pelo Sistema TRB e pela Metodologia MCT, das amostras de solo empregadas.

### **5.4.2.2. Quantitativos de grits**

O resíduo grits foi utilizado nos seguintes quantitativos: 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28 %, percentuais estes calculados sobre a massa de solo seco.

**Quadro 5.6 – Caracterização geotécnica e classificação das amostras de solo**

Solos	Granulometria (ABNT)			Plasticidade		Peso Esp. Sól. $\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	Classificação	
	%Areia	%Silte	%Argila	LL (%)	IP (%)		TRB	MCT
1	28	12	60	75	29	27,63	A-7-5 (20)	LG'
2	74	11	15	27	10	27,01	A-2-4 (0)	NS'

#### **5.4.2.3. Períodos de tempos decorridos entre mistura e compactação em laboratório (TMC)**

As misturas solo-grits foram executadas da seguinte forma: (i) adição do resíduo ao solo; (ii) homogeneização manual das misturas seguida por peneiramento das mesmas na peneira de abertura nominal 4,8 mm; (iii) adição de água às misturas de solo-grits seguida por peneiramento das mesmas na peneira de abertura nominal de 4,8 mm e (iv) acondicionamento da mistura em sacos plásticos para preservação dos seus teores de umidade. Após essa etapa, respeitaram-se tempos de descanso entre mistura e compactação dos corpos-de-prova (TMC), conforme se segue: (i) etapa 1 - tempos extremos: 0 (compactação imediata), 24 e 72 horas e (ii) etapa 2 – tempos de situações práticas de campo de 2, 4, 6 horas.

#### **5.4.2.4. Avaliação da resistência mecânica**

Para avaliar a resistência das misturas solo-grits, fez-se uso do ensaio CBR normatizado pelo DNIT (1994) – ME 129. Trabalhou-se na energia de compactação do ensaio Proctor intermediário.

### 5.4.3. Resultados e discussão

#### 5.4.3.1. Influência do TMC na densidade das misturas solo-grits compactadas

A influência do TMC na densidade das misturas solo-grits compactadas é ilustrada na Figura 5.10, onde se observa que: (i) em se tratando das misturas solo 1-grits, não há uma tendência comum para os valores de peso específico seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ); para todos os teores de grits, o  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  decresceu bruscamente para teores de resíduo até 12 %, em função do aumento do TMC, sendo notado uma pequena queda para o traço de 16 % de resíduo, e aumentos deste parâmetro para os teores de 20 e 24 %, provavelmente, devido a uma maior incorporação no solo 1 de partículas mais grosseiras, oriundas do resíduo e (ii) para as misturas solo 2-grits, notou-se para todos os tratamentos, maiores valores de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  para as misturas compactadas imediatamente após a adição do resíduo aos solos, evidenciando tendência a maiores valores de resistência para esse TMC.

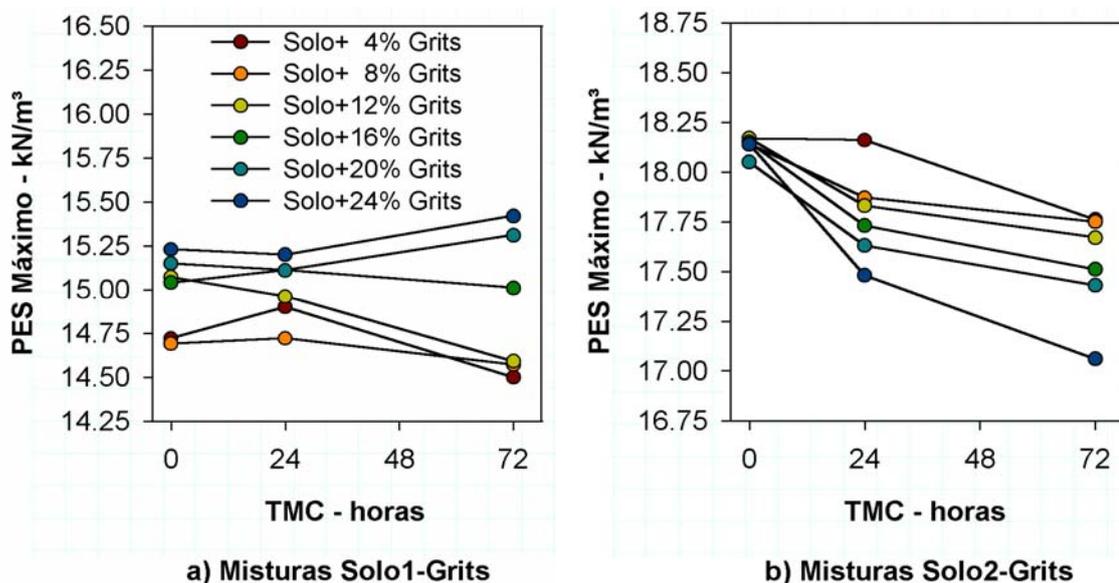


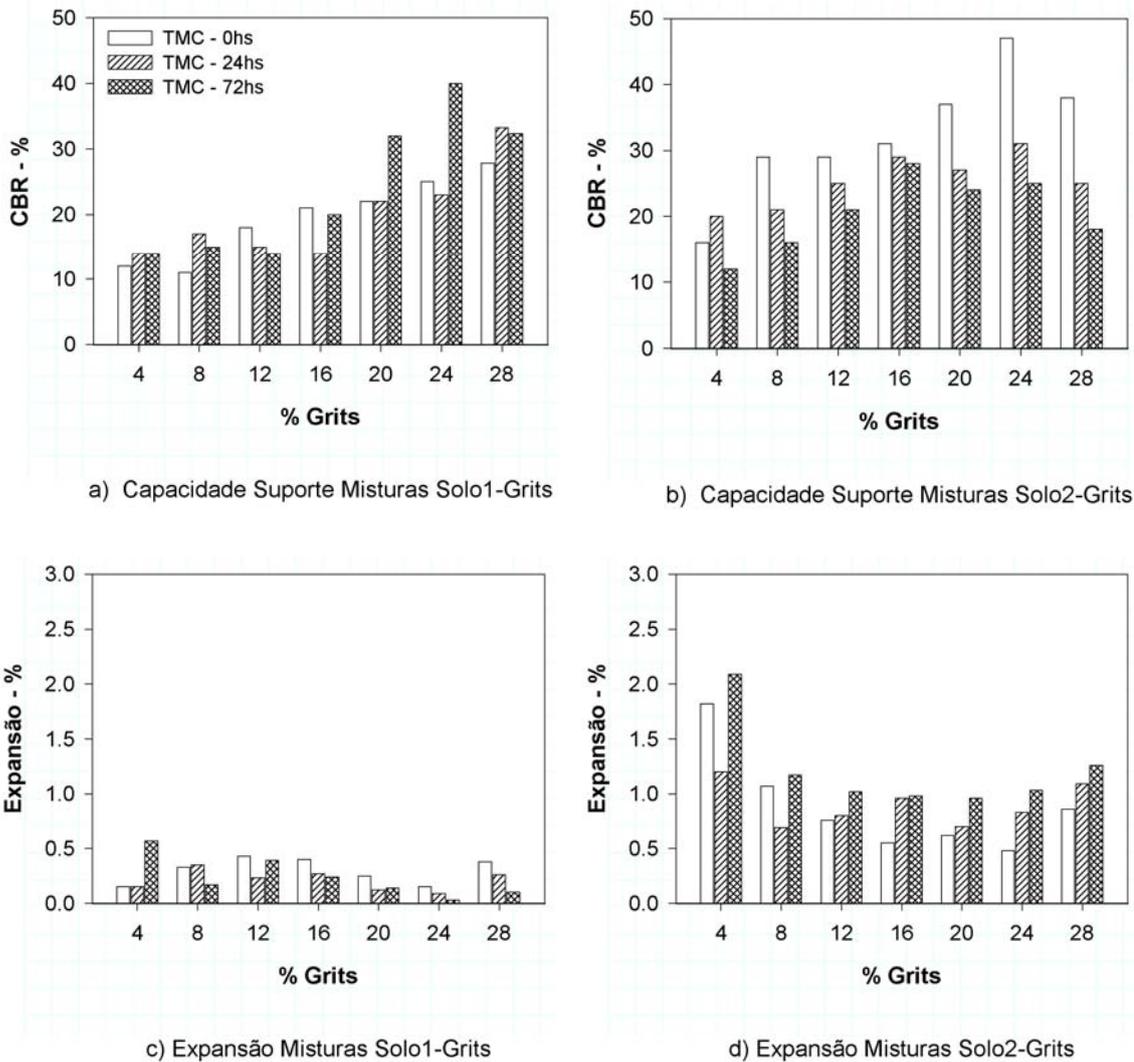
Figura 5.10 - Influência do tempo entre mistura e compactação (TMC) na densidade das misturas solo-grits compactadas.



#### **5.4.3.2. Influência do TMC na resistência mecânica das misturas: efeito dos TMC's extremos de mistura**

A Figura 5.11 apresenta o comportamento mecânico das misturas solo-grits compactadas, frente aos TMC's de 0, 24 e 72 horas, tomando por base os resultados de ensaios CBR. A análise dos dados apresentados nessa Figura pode ser apresentada, como se segue: (i) misturas solo 1-grits - observou-se pouca influência do TMC nos valores CBR para teores de resíduo na faixa de 0 a 16 %, ocorreram variações nos valores CBR para os teores de resíduo entre 16 e 28 %, observando-se decréscimos pequenos para o TMC de 24 horas e acréscimos significativos para o TMC de 72 horas, em especial para a mistura com 24 % de resíduo (ganho de 60 %); observou-se pouca influência do TMC no parâmetro expansão medida no ensaio CBR, havendo tendência para a ocorrência de maiores e menores valores, respectivamente, para TMC de 0 e 72 horas e (ii) misturas solo 2-grits - para valores de resíduo na faixa de 8 a 28 %, observou-se que, aumentando o TMC, há uma tendência nítida de decréscimo nos valores CBR, atingindo-se quedas da ordem de 47 % e de 56 %, respectivamente, para TMC's de 24 e 72 horas, para o teor de resíduo de 24 %; com relação à expansão, ocorreu tendência a acréscimos com aumentos no TMC, para teores de resíduo entre 12 e 28 %

Aspectos práticos da análise dos resultados apresentados na Figura 5.11 são, como se segue: (i) com relação ao solo 1, de textura argilosa, observa-se que valores maiores de TMC levaram a aumentos no parâmetro CBR das misturas, provavelmente devido ao fato de que, para estes TMC's, ocorreram, majoritariamente, reações de troca catiônica que foram responsáveis por mudanças estruturais e texturais na massa de solo, não ocorrendo, para fins práticos, a efetivação de ligações de cimentação entre partículas do solo e (ii) no que tange ao solo 2, de textura arenosa, com o aumento do TMC observa-se a efetivação de um número maior de ligações de cimentação entre partículas mas que, durante a compactação, são quebradas resultando, pois, em quedas nos valores CBR e, conseqüentemente, na resistência mecânica das misturas.

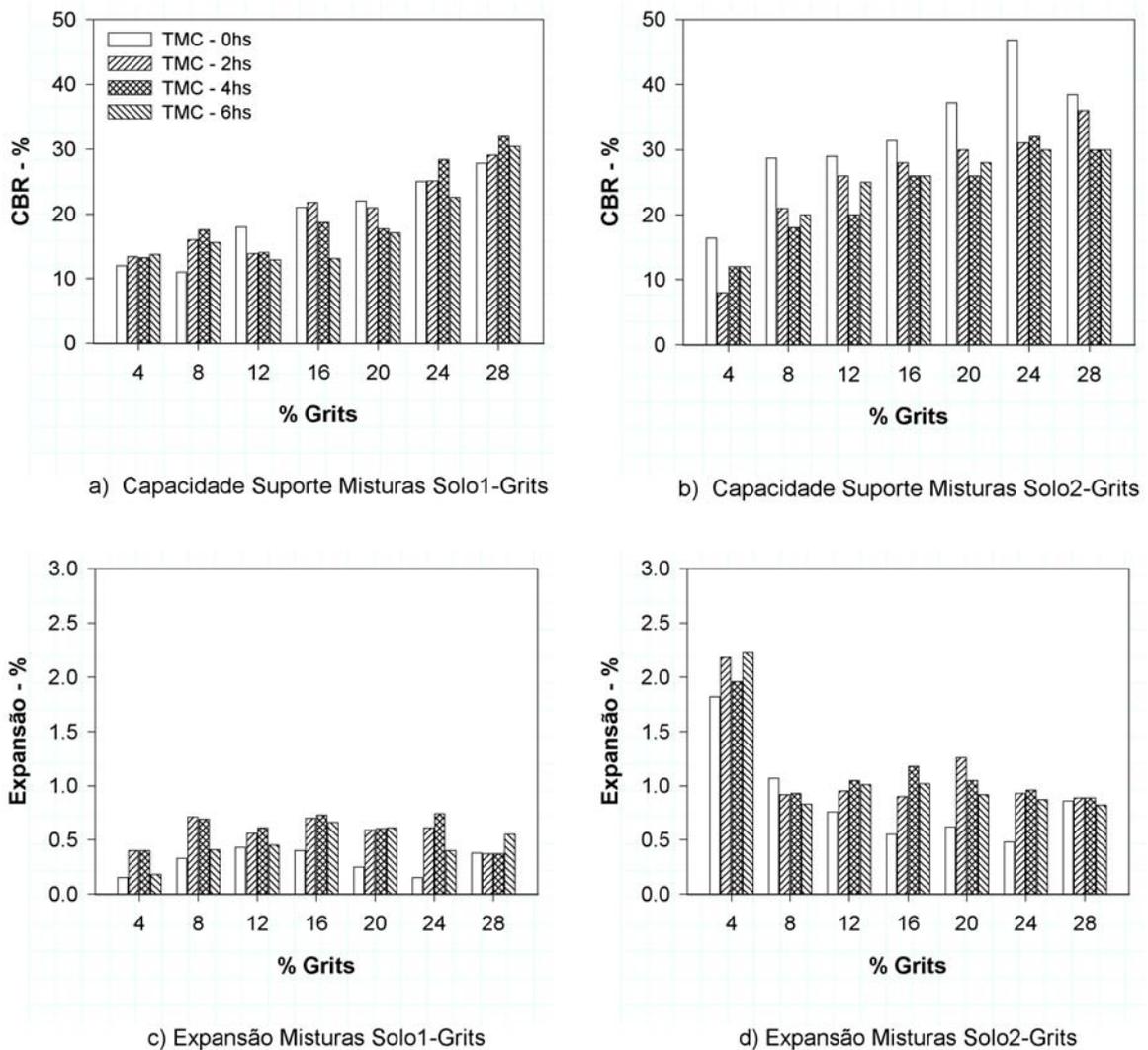


**Figura 5.11** - Influência do TMC no CBR e expansão das misturas solo-grits.

#### **5.4.3.3. Influência do TMC na resistência mecânica das misturas: efeito dos TMC que refletem situações de compactação no campo**

A Figura 5.12 ilustra o comportamento mecânico das misturas solo-grits, para TMC's representativos de situações práticas de campo. Para as misturas solo 1-grits, variações no TMC foram responsáveis por oscilações em seus valores de resistência mecânica, não se identificando, porém, uma tendência para se identificar um valor ótimo, podendo-se citar, por exemplo, os teores de 24 e 28 % de resíduo que apresentaram maiores valores CBR para o TMC de 4 horas. Com relação à expansão, considerado um parâmetro que pode

exercer um efeito deletério no comportamento mecânico das misturas, a compactação imediatamente após a mistura proporcionou o menor valor e, portanto, a melhor resposta em termos de comportamento mecânico. Para as misturas solo 2-grits a compactação imediata continuou proporcionando maiores valores de CBR, em todos os traços de resíduo considerados e, menores valores de expansão para alguns tratamentos.



**Figura 5.12** - CBR e expansão para as misturas solo-grits, considerando-se TMC que refletem situações de campo.

#### 5.4.3.4. Efeito do lote de resíduo na resistência mecânica das misturas

Ao se trabalhar com resíduos industriais, uma preocupação que se deve ter é com a utilização de produtos que apresentem composições químicas similares, de modo a se produzir misturas com mesmas respostas mecânicas, para fins de engenharia. Assim, buscou-se no presente trabalho analisar a influência do lote do resíduo na resistência mecânica das misturas do solo 2, trabalhando-se com dois lotes, aqui denominados 1 e 2. As características químicas desses lotes são apresentadas no Quadro 5.7, onde atenta-se para os teores de sódio e óxido de cálcio, e os resultados desse estudo são apresentados na Figura 5.13.

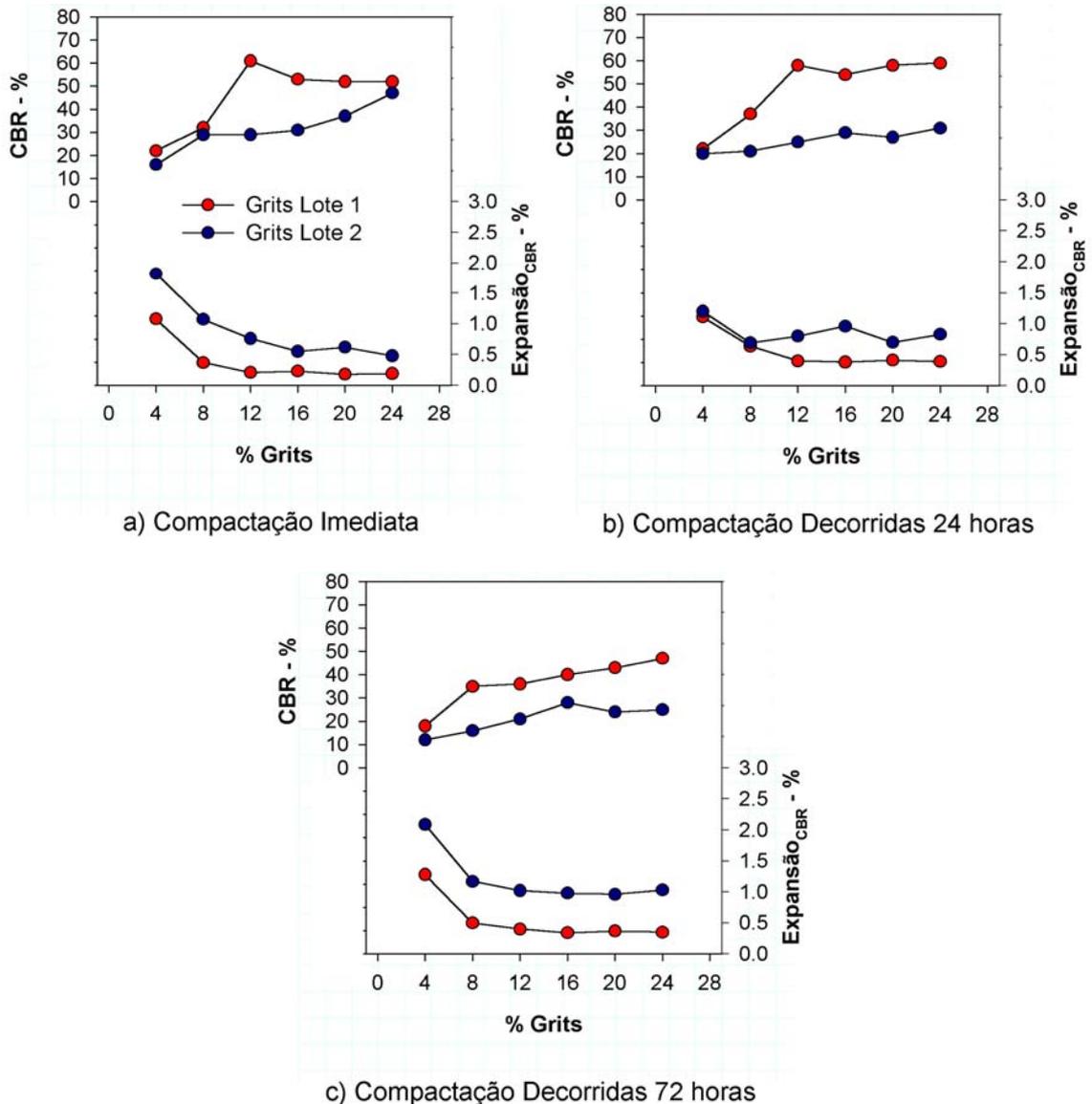
A análise dos dados apresentados na Figura 5.13 possibilita inferir que o resíduo proveniente do lote 1 apresentou maior potencialidade como estabilizante do que o resíduo do lote 2, visto que, para todas as misturas e TMC's considerados, foi possível atingir valores maiores de resistência mecânica e valores menores de expansão. Observou-se que não há uma tendência à maior discrepância no parâmetro CBR entre lotes de grits, em função dos TMC's, destacando-se apenas os valores encontrados para os teores de 12, 16, 20 e 24 % para o TMC de 24 horas, que apresentaram maior diferencial entre lotes.

**Quadro 5.7** - Caracterização química do grits dos lotes 1 e 2

Grits	Local da Coleta	Data	Constituição Química						
			P	K	Na	CaO	MgO	S	Al
-----%-----									
Lote 1	Pátio da Empresa	Out/00	0,26	0,12	0,70	53,50	0,60	0,18	0,09
Lote 2	Aterro Sanitário	Jun/03	0,37	0,04	0,22	35,38	0,43	0,13	0,13

A expansão apresentou maior discrepância entre lotes para o TMC de 72 horas, em todos os teores de resíduo. Essa diferença entre lotes é atribuída ao local de coleta do resíduo no aterro sanitário da empresa produtora, visto

que, dependendo da posição e da época de coleta, que determina o tempo de exposição às intempéries climáticas, o resíduo pode sofrer alterações nas suas propriedades químicas.



**Figura 5.13** – CBR e expansão das misturas solo 2-grits para diferentes TMC's, considerando-se os lotes 1 e 2 de grits.

#### 5.4.4. Conclusões

Os resultados dos estudos de laboratório permitiram concluir que o tempo entre mistura e compactação, para certos tipos de solos, pode influenciar

significativamente o valor da resistência mecânica (CBR) e da expansão das misturas solo-grits. Para as misturas solo 1-grits essa influência foi menos significativa, não sendo possível identificar uma tendência para um TMC ótimo. Já para as misturas solo 2-grits, chegou-se a maiores valores de CBR e menores valores de expansão para as combinações compactadas imediatamente após a mistura. Ressalta-se que para essas misturas, o lote do resíduo influenciou, também, os valores de resistência mecânica e expansão.

#### **5.4.5. Agradecimentos**

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq e a FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto, bem como, à CAPES pelo fornecimento da bolsa de Doutorado. Deve-se igual agradecimento à Empresa CENIBRA S/A pelo fornecimento do resíduo e à UFV pelas instalações.

#### **5.4.6. Referências bibliográficas**

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME129**: solos: compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 7 p.

GUIMARÃES, J.E.P. **Estabilização de solos**: nova e importante aplicação da cal, seus conceitos e suas vantagens. São Paulo, SP: ABPC, 1971. 67 p. (Boletim, 5).

SANT'ANA, A.P. **Caracterização tecnológica de misturas solo-escória de alto forno moída para fins rodoviários**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 74 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo, SP: PINI, v. 2, 2001. 671 p. ISBN 85-7266-125-5.

TRINDADE, T.P.; LIMA, D.C; MACHADO, C.C. CARVALHO, C.A.B. et al. Estabilização química do subleito de estradas: influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação na resistência mecânica de misturas solo-RBI grade 81. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 413-418, jun. 2005. ISSN 0100-6762.

### **5.5. Capacidade de suporte de misturas solo-grits compactadas: efeito da granulometria do resíduo no processo de estabilização**

RESUMO – No presente artigo, analisa-se a influência das diversas frações granulométricas do resíduo grits nos parâmetros ótimos de compactação, resistência mecânica e expansão, quando em misturas com dois solos típicos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, Brasil, com fins de aplicação em estradas florestais. Os teores de resíduo empregados nas misturas foram de 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28 %, em relação a massa seca de solos, trabalhando-se com as energias de compactação dos ensaios Proctor intermediário e modificado. As frações de resíduo estudadas foram as equivalentes à argila e silte ( $d \leq 0,074$  mm), areia ( $0,074 \text{ mm} \leq d \leq 2,0$  mm) e pedregulho ( $2,0 \text{ mm} \leq d \leq 76$  mm), considerando-se a escala granulométrica adotada pelo DNIT (1996). Fez-se uso do ensaio de CBR para a avaliação da capacidade de suporte e expansão dos solos e misturas. Os resultados demonstram que a fração fina do grits é a que mais contribui para ganhos de resistência mecânica, evidenciando a sua importância na reatividade das misturas, sendo a fração pedregulho a menos influente no ganho de capacidade de suporte dos solos.

Palavras-chave - Estabilização de solos, resíduo industrial grits, granulometria, reatividade solo-grits, estradas florestais.

#### **Bearing capacity of compacted soil-grits mixtures: effect of waste size distribution in the stabilization process**

ABSTRACT – This paper addresses the influence of size distribution of the industrial waste named grits on the optimum compaction parameters, mechanical strength and swelling of two typical soils from the North Forest Zone of Minas Gerais State, Brazil, for forest road applications. Specimens compacted at the intermediate and modified Proctor compaction effort and waste contents of 4, 8, 12, 16, 20, 24 and 28 % regarding soils dry unit weights were used throughout the study. Waste sizes analyzed in the laboratory testing

program were those equivalent to clay ( $d \leq 0.074$  mm), silt ( $0.074 < d \leq 2$  mm), sand ( $d > 2$  mm) and gravel ( $2 \text{ mm} < d \leq 76$  mm) sizes in accordance to DNIT technical standard (DNIT, 1996). Soils and mixtures bearing capacity and swelling were evaluated using the CBR test. Data from the laboratory testing program support that the waste's clay and gravel size portions were responsible, respectively, for higher and lower increases in soils bearing capacity.

Key words: Soil stabilization, industrial grits waste, grain size distribution, soil-grits reactivity, forest roads.

### **5.5.1. Introdução**

Na estabilização química de solos para fins rodoviários, determinado aditivo é incorporado a um solo, compactando-se posteriormente a mistura segundo determinados critérios técnicos, alcançando-se assim características desejáveis de resistência mecânica e durabilidade. Os mecanismos envolvidos nesse processo podem ser os mais diversos possíveis. Segundo Lambe e Michaels (1954) os estabilizantes químicos quando adicionados aos solos podem atuar como agentes impermeabilizantes, dispersantes ou que agregam, modificando as suas propriedades físicas e/ou químicas.

Com relação ao processo de estabilização, o conhecimento das frações granulométricas constitutivas das amostras de solo e do material estabilizante, bem como a caracterização química deste último são fatores essenciais, para o reconhecimento de um aditivo como um agente de estabilização eficaz. Considerando esse aspecto, o presente artigo tem por finalidade analisar a influência da granulometria do resíduo industrial grits na resistência mecânica de misturas solo-grits compactadas, com base nos seus valores CBR e expansão.



## **5.5.2. Materiais e métodos**

### **5.5.2.1. Solos e resíduo industrial**

Trabalhou-se com dois solos da microrregião de Viçosa, Zona da Mata Norte de Minas Gerais, aqui denominados *Solos 1* e *2*. O solo 1 é um material laterítico argiloso, classificado como LG' pela Metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1995); o solo 2 é um material não-laterítico arenoso, pertencente ao grupo NS' da mesma classificação.

O estabilizante químico dos solos ensaiado é o resíduo industrial denominado *grits*, que é gerado durante o processo de extração de celulose nas empresas que utilizam o processo Kraft. Ele é um material sólido, acinzentado, de granulometria ampla que engloba as frações pedregulho, areia, silte e argila, sendo classificado como classe II (ABNT, 1987), ou seja, material não inerte. O que despertou o interesse para o presente estudo, foi o fato do *grits* se tratar de um resíduo constituído de uma mistura de materiais, com destaque para a cal.

### **5.5.2.2. Traços e processamentos do grits**

Procedeu-se à seguinte seqüência:

- (i) fase 1 - utilizaram-se duas amostras distintas de *grits*, para fins de identificação de sua granulometria e possíveis faixas de variação;
- (ii) fase 2 - executaram-se misturas envolvendo os solos 1 e 2 e *grits*, empregando-se sete teores crescentes de resíduo calculados em relação às massas secas dos solos, os quais foram: 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28 %. Os teores de umidade empregados foram os equivalentes às umidades ótimas e corpos-de-prova dos solos compactados na energia do ensaio Proctor normal. Após mistura, as amostras solos-*grits* foram passadas na peneira de abertura nominal 2,0 mm (Nº 10) e deixadas curar em câmara úmida, em sacos plásticos hermeticamente fechados por um período de 7 dias. Após a cura, as

- amostras foram secas ao ar, obtendo-se as frações a serem empregadas nos ensaios de granulometria das misturas solo-grits;
- (iii) fase 3 – determinou-se a capacidade de suporte das misturas via o ensaio CBR, trabalhando-se com corpos-de-prova moldados com teores de resíduo de 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28 % em relação às massas de solos secos. Nessas misturas, empregou-se o resíduo sob duas formas, como se segue: (a) sem processamento, ou seja, da forma como foi fornecido pela empresa e (b) após sua passagem na peneira de abertura nominal 2,0 mm (Nº 10), separando-se assim, a fração equivalente ao pedregulho, que foi descartada, e usando-se as frações areia, silte e argila. Para os fins do presente trabalho, a este processo denominou-se processamento do grits;
- (iv) fase 4 – empregaram-se os traços de 8, 16 e 24 % de grits nas misturas; passou-se o resíduo nas peneiras de aberturas nominais 2,0 mm (Nº 10) e 0,074 mm (Nº 200). A fração do resíduo que passou na peneira de Nº 10 e ficou retido na peneira de Nº 200, que equivale à areia, foi empregada nos ensaios, bem como, a fração que passou na peneira de Nº 200, equivalente à silte e argila, foi usada nos ensaios CBR nas composições apresentadas no Quadro 5.8.

**Quadro 5.8 – Composições granulométricas do grits**

<b>Composição</b>	<b>% Resíduo Grits</b>	
	<i>Entre a # 2,0 mm e a # 0,074 mm</i>	<i>Processado na # 0,074 mm</i>
<i>I</i>	100	0
<i>II</i>	87,5	12,5
<i>III</i>	75	25
<i>IV</i>	50	50
<i>V</i>	0	100

### **5.5.2.3. Ensaios realizados**

Para se conhecer a contribuição das diferentes frações constitutivas do resíduo na estabilização das misturas solo-grits, procedeu-se à realização dos seguintes ensaios: (i) fase 1 – realização de ensaios de granulometria conjunta com amostras de grits: (DNIT, 1994) – ME 051; (ii) fase 2 – ensaios de granulometria conjunta com as misturas solo-grits: (DNIT, 1994) – ME 051; (iii) fase 3 – ensaios de  $CBR_{5\text{pontos}}$ : com as misturas solo-grits (DNIT, 1994) – ME 049, para avaliação do comportamento dos parâmetros ótimos de compactação, resistência mecânica e expansão das misturas solo-grits, fazendo-se uso das energias de compactação referentes aos ensaios Proctor intermediário e Proctor modificado, não se realizando períodos de cura nos corpos-de-prova e (iv) fase 4 – ensaios de  $CBR_{1\text{ponto}}$ : (DNIT, 1994) – ME 049, para avaliação da reatividade da fração fina do resíduo grits nas misturas solos-grits compactadas na energia do Proctor intermediário, e curadas por 28 dias em câmara úmida, objetivando permitir possíveis ocorrências de reações químicas, em especial reações pozolânicas.

### **5.5.3. Resultados e discussão**

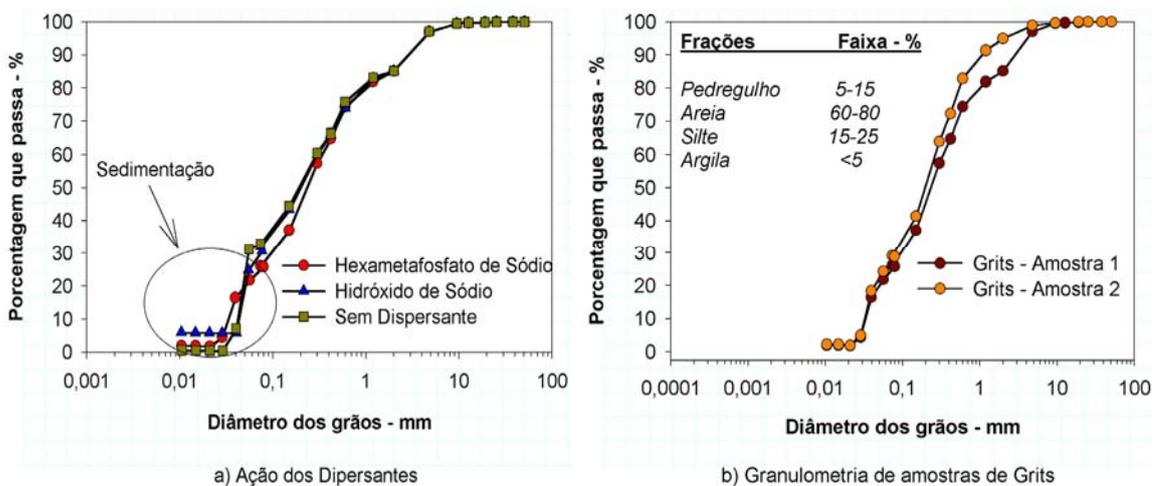
#### **5.5.3.1. Granulometria do grits e das misturas solo-grits (fases 1 e 2)**

A Figura 5.14 mostra a curva granulométrica do grits; em seu item (a), observa-se o pouco efeito dispersante proporcionado na sedimentação das partículas pelo hidróxido de sódio e pelo hexametáfosfato de sódio. Esse fato pode ser explicado, em primeiro lugar, pelos quantitativos de defloculantes empregados, visto que, são específicos para dispersão de partículas argilosas de solos; outro fato a relatar, é a presença relativamente elevada de sódio (0,70 %) já presente no resíduo, que o torna por si só altamente dispersivo.

Ainda pela Figura 5.14 (item b), nota-se que o resíduo grits possui uma granulometria diversificada, com predominância de tamanho de partículas referentes à fração areia, cerca de 70 % em termos médios. Esse material possui também: (i) frações mais grosseiras, representadas por cerca de 10 %

ou mais equivalentes a pedregulho, constituídas por materiais cristalizados de difícil quebra originados, provavelmente, em processos de resfriamento durante a sua geração na indústria e (ii) frações menores (silte: 15-25 % e argila: < 5 %).

O grits se assemelha, pela sua granulometria e características de plasticidade (NP), a um material classificado pelo sistema rodoviário americano TRB como A-2-4 (0), referente a uma areia siltosa; entretanto, seu uso em camadas constitutivas de pavimentos rodoviários em substituição a solos locais, não parece recomendável, seja ou por falta de ligação química entre as suas partículas ou pelos possíveis riscos ambientais passíveis de ocorrência devido a sua introdução em ecossistemas florestais. Contudo, o seu emprego como estabilizante químico respalda-se no fato de que na sua constituição há a presença de óxido de cálcio.

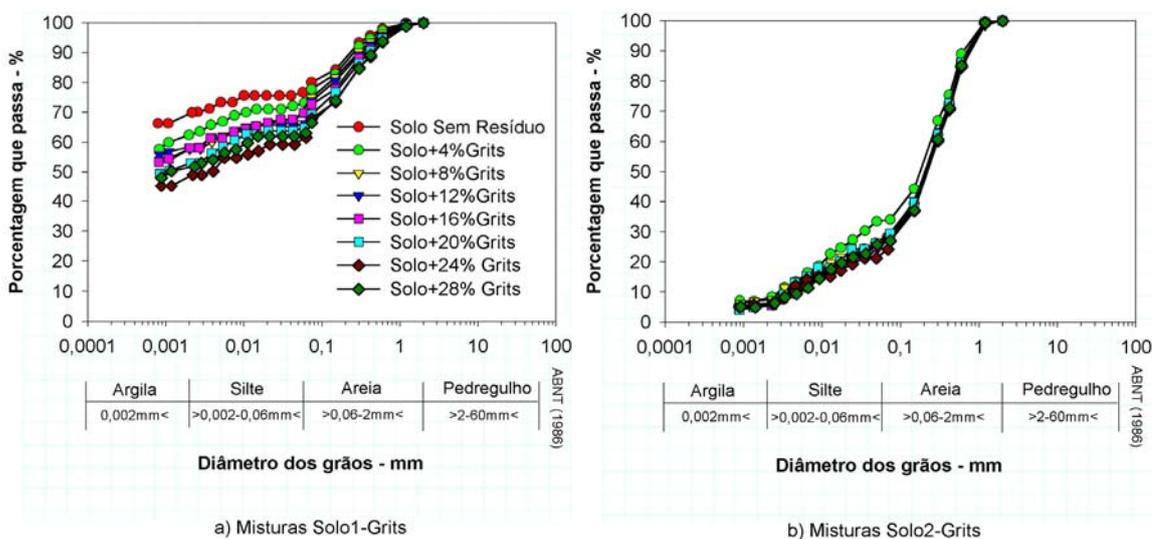


**Figura 5.14 – Análise granulométrica do grits.**

Para analisar as possíveis mudanças na granulometria dos solos 1 e 2 em decorrência da incorporação de grits nas suas massas na Figura 5.15, apresentam-se as suas curvas granulométricas. Na granulometria do solo 1 notou-se a presença de partículas maiores, principalmente as equivalentes à fração areia; o aumento do teor de grits proporcionou diminuição da fração argila de 70 % para cerca de 50 %. Entretanto, o comportamento textural do solo 1 ou seja, de material argilo-areno-siltoso, não foi alterado, ficando evidenciado que o período de cura de 7 dias a que foram submetidas as

misturas não fez com que ocorresse aglomeração ou floculação das partículas argila desse solo, formando grumos maiores, sendo que o mesmo atuou apenas, como um alterador físico da granulometria.

As misturas solo 2-grits tiveram o mesmo comportamento granulométrico do solo sem adição de resíduo, qual seja, de material texturalmente areno-argilo-siltoso evidenciando a não formação de particulados maiores; a granulometria do solo 2 e do resíduo se aproximam em muito e a fração argila, responsável pelos fenômenos físico-químicos que ocorrem na superfície dos argilominerais, não é tão expressiva neste solo.



**Figura 5.15** – Curvas granulométricas das misturas solo-grits e respectivas frações constitutivas

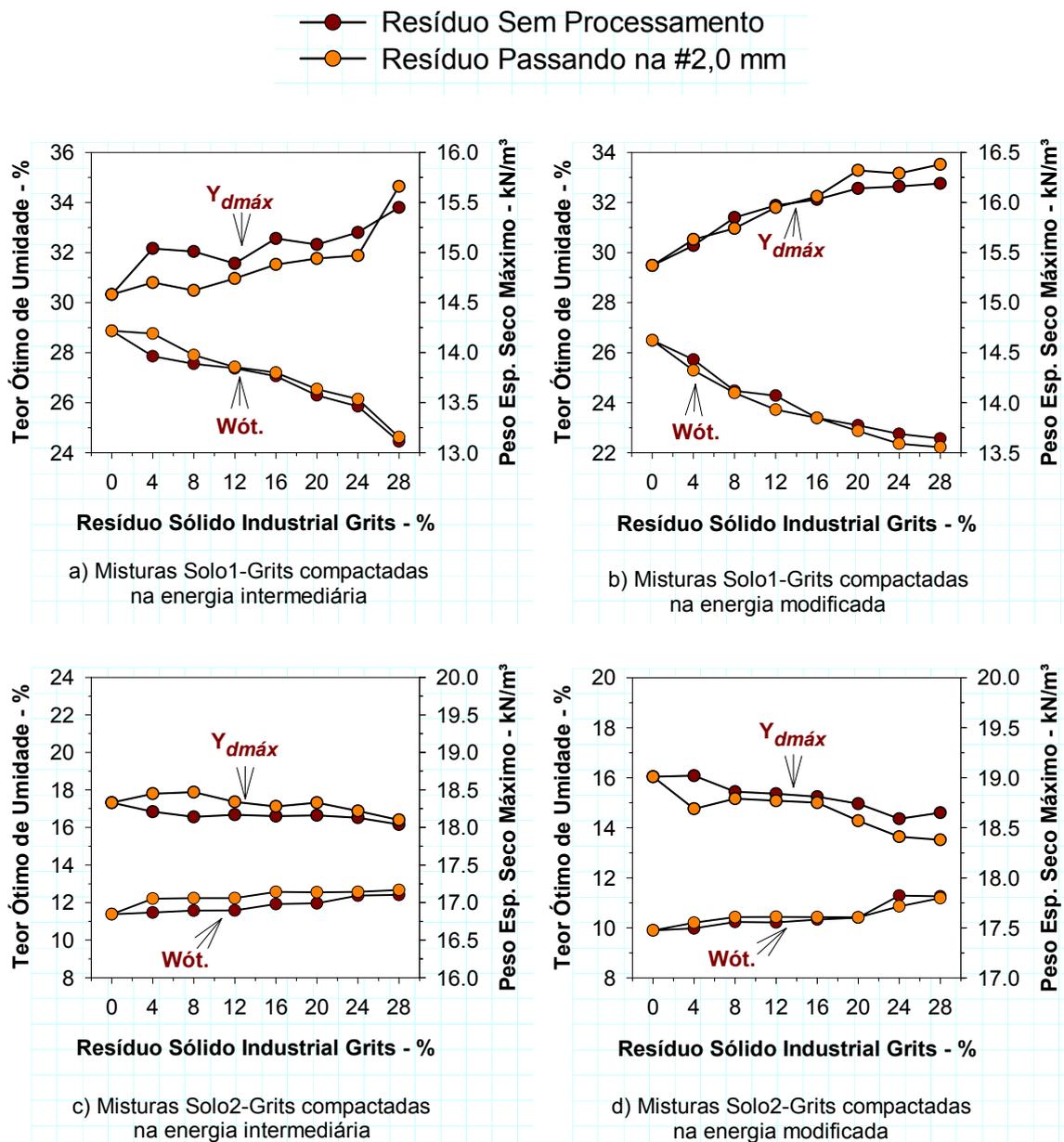
### 5.5.3.2. Influência da fração grosseira do grits na capacidade de suporte e expansão das misturas solos-grits compactadas – fase 3

Tomando-se os parâmetros ótimos de compactação,  $W_{ót.}$  e  $\gamma_{dmáx.}$ , Figura 5.16, nota-se que os teores ótimos de umidade das misturas solo 1-grits foram inferiores à do solo 1, em sua forma natural, e inversamente proporcionais ao aumento do teor de resíduo. Essas, praticamente não se alteraram em decorrência do processamento do resíduo na peneira de abertura nominal de 2,0 mm, mesmo quando compactadas na energia modificada; nesse mesmo enfoque, os valores de pesos específicos secos máximos foram

ligeiramente inferiores nas misturas com a fração do resíduo passado na peneira de 2,0 mm, considerando-se a compactação das misturas solo 1-grits na energia intermediária. Na energia modificada, os parâmetros ótimos de compactação não sofreram alterações significativas, para fins práticos, com pequenas discrepâncias para os teores de 20, 24 e 28 % de resíduo.

As misturas solo 2-grits tiveram o seguinte comportamento, quanto ao aspecto compactação: (i) pequeno aumento na umidade ótima nas misturas compactadas na energia intermediária, atingindo-se maiores valores para as misturas contendo o resíduo processado; (ii) na energia modificada os teores ótimos de umidade, praticamente, não se alteraram e (iii) os valores de  $\gamma_{dm\acute{a}x.}$ , foram ligeiramente superiores para o resíduo processado na peneira de 2,0 mm, para as misturas compactadas na energia intermediária, notando-se comportamento diferenciado quando de compactação realizada na energia modificada, ou seja, maiores valores de  $\gamma_{dm\acute{a}x.}$ , para as misturas contendo o resíduo na sua forma pura, sem processamento.

Os valores de resistência mecânica e expansão, medidos via ensaio CBR, encontram-se ilustrados na Figura 5.17. As misturas solo 1-grits, quando compactadas na energia intermediária, apresentaram pouca variação nos seus valores CBR, em função do processamento do resíduo, sendo notado uma maior discrepância para o teor de 28 % de grits, em que ocorreu uma queda de aproximadamente 40 % na resistência, quando empregou-se a fração de resíduo que passou na # 2,0 mm. Comportamento distinto foi notado para as misturas solo 1-grits compactadas na energia modificada, onde os resultados CBR, fazendo-se uso do resíduo processado, foram, para todos os tratamentos, superiores aos das misturas com o grits puro, sendo observado discrepâncias de mais de 100 % na capacidade de suporte para a maioria dos tratamentos. Uma razão para esse fato, pode ser a tendência a maiores valores de densidade, principalmente nos teores superiores a 20 % de resíduo, obtidos para essa energia e para as misturas solo 1-grits utilizando-se do resíduo processado. Com relação aos valores de expansão, notou-se para as misturas solo 1-grits que praticamente não se alteraram em função do processamento do resíduo, em ambas energias de compactação; ressalva seja feita as

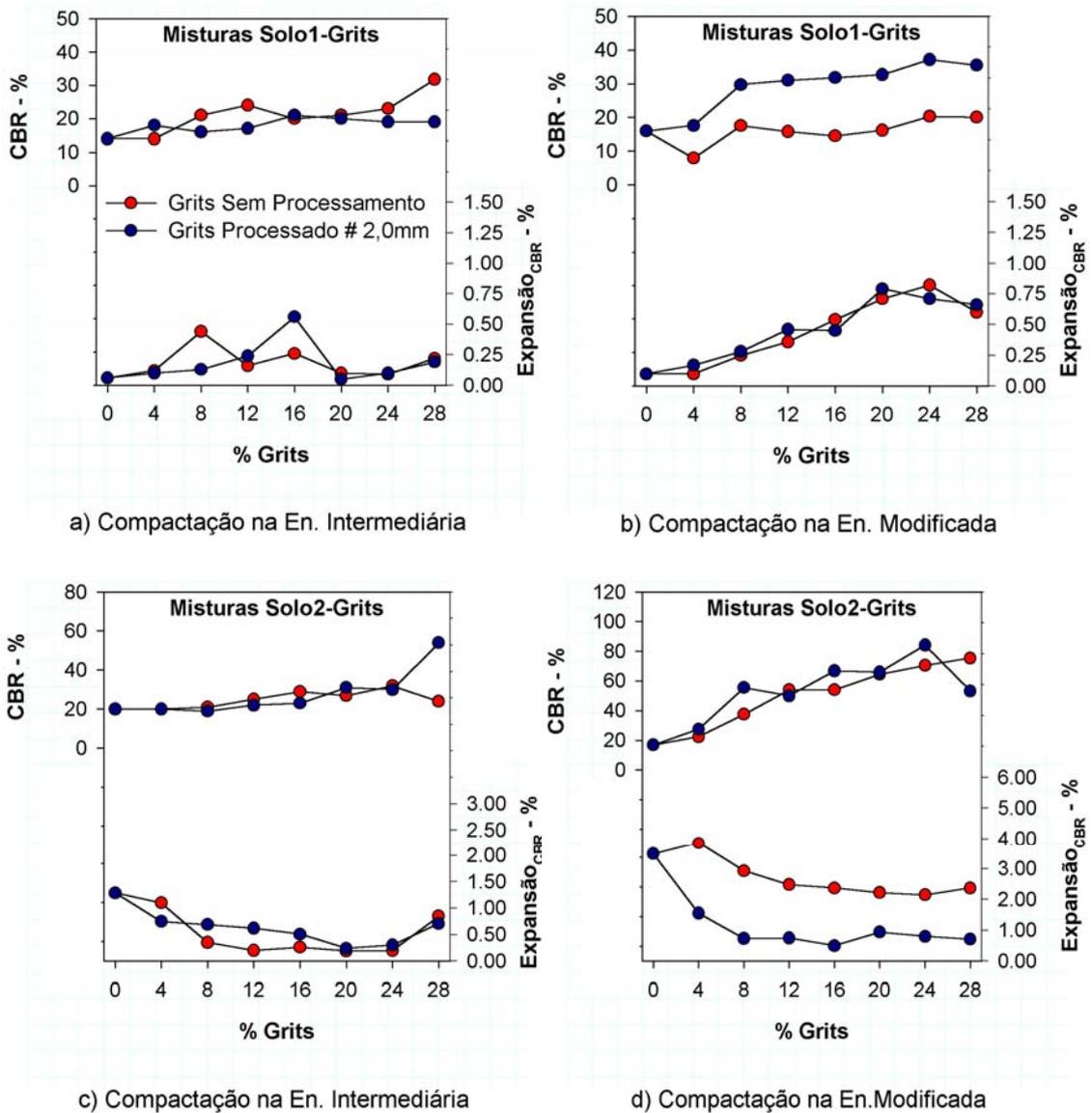


**Figura 5.16** – Reflexos da separação das frações grosseiras do grits nos parâmetros ótimos de compactação das misturas solo-grits.

feita, às misturas com 8 e 16 % de grits, compactadas na energia intermediária.

Para as misturas solo 2-grits, notou-se o seguinte comportamento com relação ao índice CBR, em função do processamento do resíduo: (i) quando compactadas na energia intermediária as misturas, praticamente, não sofreram alteração na sua resistência, devido ao processamento do grits na # 2,0 mm, sendo notado, maior discrepância para o teor de 28 % de resíduo, onde se obteve um valor de CBR aproximadamente 60 % superior para as misturas

com o grits processado; (ii) para compactação na energia modificada houve uma ligeira tendência a maiores valores de resistência para as misturas com o resíduo processado na peneira de Nº 10. Com relação ao índice expansão, notaram-se reduções significativas somente para as misturas solo 2-grits compactadas na energia modificada, onde ocorreram quedas em torno de 70 % na expansão quando empregou-se misturas com o resíduo processado.



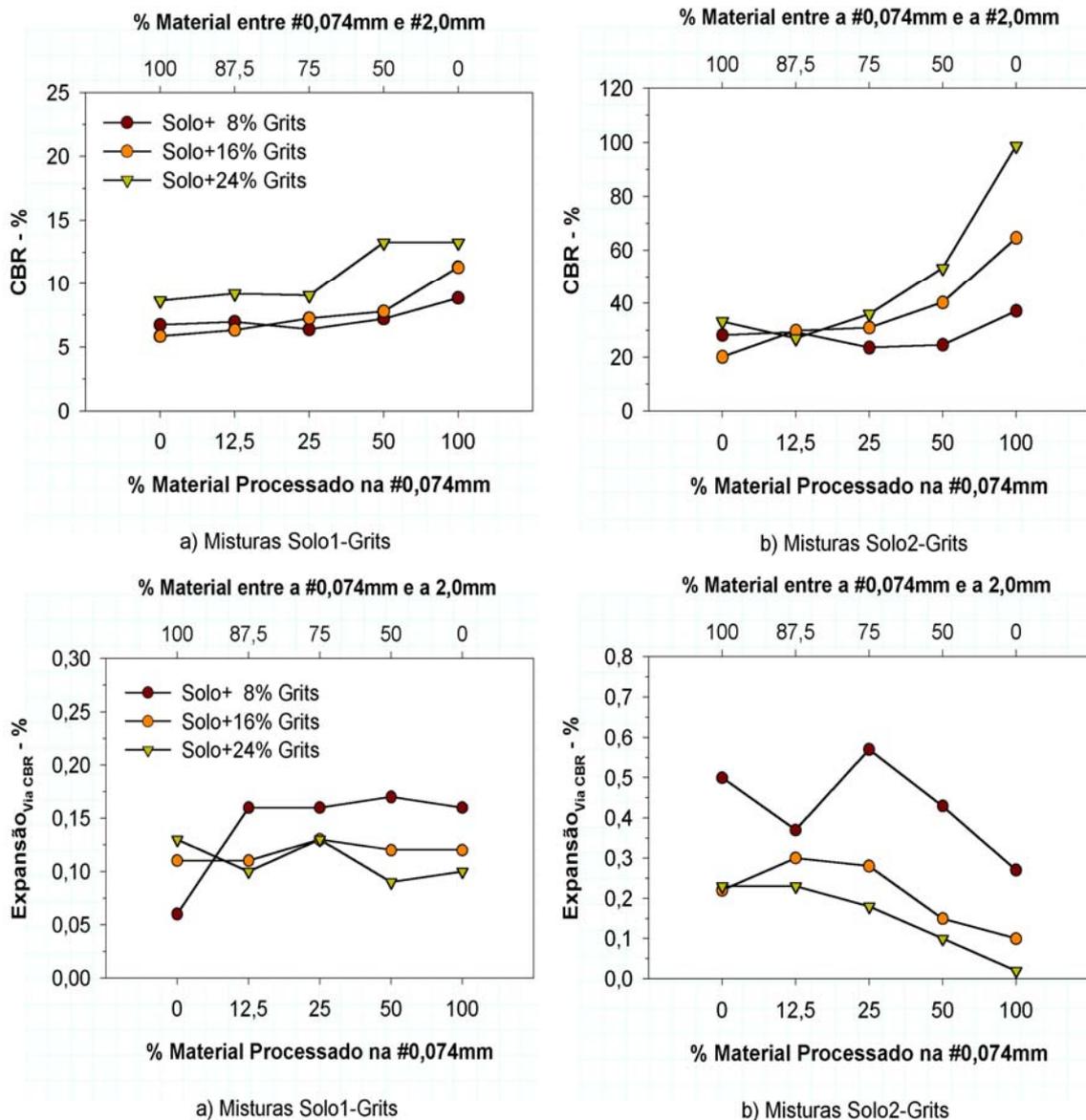
**Figura 5.17** – Influência da fração grosseira do grits nos valores de CBR e expansão das misturas solo-grits compactadas.



### **5.5.3.3. Reatividade da fração fina do grits na resistência e expansão das misturas solo-grits compactadas – fase 4**

Nessa fase, procurou-se avaliar a reatividade da fração com diâmetro menor que 0,074 mm nas misturas solo-grits compactadas e curadas. Na Figura 5.18, referente à valores CBR e expansão, é possível notar com relação à resistência que: (i) misturas solo 1-grits – para todos os teores à medida que se aumentou a parcela de resíduo com diâmetro inferior a 0,074 mm houve, proporcionalmente, aumentos na resistência, sendo notado maiores discrepâncias a partir de 50 % de resíduo processado na peneira de N<sup>o</sup> 200; atingiram-se pontos máximos de CBR com o processamento de 100 % do resíduo em tal peneira. Para o teor de 24 % de resíduo, por exemplo, onde os valores de CBR foram maiores, houveram ganhos de resistência mecânica de 31 % quando pelo menos 50 % do resíduo foi processado na peneira de abertura nominal de 0,074 mm e (ii) misturas solo 2-grits – tiveram o mesmo comportamento das misturas solo 1-grits, ou seja, a partir de 50 % de resíduo, com diâmetro inferior à 0,074 mm, empregado nas misturas, ocorreu aumento substancial no CBR, atingindo-se patamar superior para todos os tratamentos com misturas envolvendo 100 % de resíduo processado na peneira de N<sup>o</sup> 200. As melhores respostas foram aqui, também, para o traço de 24 % de grits, onde atingiu-se valor de CBR superior a 100 % quando se empregou o resíduo com toda totalidade de sua fração processada na peneira de N<sup>o</sup> 200.

Com relação à expansão, as misturas solo 1-grits sofreram pequenas oscilações em decorrência do processamento do resíduo, sendo notado uma tendência a maiores valores, para a maioria dos tratamentos, quanto mais fina foi a granulometria do grits. Para as misturas solo 2-grits, notou-se uma tendência inversa, ou seja, para todos os tratamentos quanto mais fina foi a granulometria do grits menores foram os valores de expansão, chegando-se a valores próximos de zero para os teores de 16 e 24 % de grits, considerando esse último com 100 % de suas partículas de diâmetro inferior à 0,074 mm.



**Figura 5.18** – Contribuição da fração fina do grits na resistência e na expansão das misturas solo-grits compactadas na energia intermediária e curadas a 28 dias.

#### 5.5.4. Conclusões

- (i) a adição de grits às amostras 1 e 2, nos teores estudados, não proporcionou alteração da textura dos solos, através da possível ocorrência de interações químicas;

- (ii) o par de valores ótimos de compactação das misturas solo-grits praticamente não se alteraram pelo processamento do resíduo na peneira de abertura nominal 2,0 mm;
- (iii) a fração pedregulho ( $d \geq 2,0$  mm) pouco contribuiu nos ganhos de resistência mecânica das misturas solo-grits compactadas, sendo notado para as misturas solo 1-grits, compactadas na energia modificada, melhores respostas para as partículas de grits com  $d \leq 2,0$  mm;
- (iv) a expansão das misturas solo 2-grits, compactadas na energia modificada, aumentou devido à fração pedregulho do grits, não sendo notado para os demais tratamentos alteração para esse parâmetro; e
- (v) as misturas solo-grits tiveram ganhos nos valores CBR proporcionais ao aumento da parcela fina ( $d \leq 0,074$  mm) do grits; os valores máximos obtidos foram para grits passando 100 % na peneira de N<sup>o</sup> 200. O aumento da parcela fina levou a incrementos na expansão das misturas solo 1-grits e reduções de expansão para as misturas solo 2-grits.

#### **5.5.5. Agradecimentos**

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos à UFV, ao CNPq e a FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto, bem como, à CAPES pelo fornecimento da bolsa de Doutorado. Deve-se igual agradecimento à Empresa de Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA) pelo fornecimento do resíduo.

#### **5.5.6. Referências bibliográficas**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10004**: classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987. 63 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 049**: solos: determinação do índice de suporte califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 12 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 051**: solos: análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 12 p.

LAMBE, T.W.; MICHAELS, A. Altering soil properties with chemicals. **Chem. Eng.** v. 32, n. 6, 1954. p. 488-492.

## **5.6. Comportamento de misturas solo-grits compactadas: avaliação da resistência mecânica e da expansão em diferentes períodos de cura**

RESUMO – Neste artigo, analisa-se a influência do teor de estabilizante, energia de compactação e período de cura na resistência mecânica de dois solos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais. Trabalhou-se com amostras de solos residuais de gnaiss coletadas na cidade de Viçosa, Brasil, respectivamente, de texturas argilo-areno-siltosa e areno-argilo-siltosa e aqui denominadas solos 1 e 2. Empregou-se como estabilizante o resíduo industrial denominado *grits* que foi oriundo da empresa de Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA), nos teores de 4 a 28 % em relação às massas de solos secos. Corpos-de-prova das misturas solos-grits foram compactados nos teores ótimos de umidade relativos às energias de compactação dos ensaios Proctor intermediário e modificado, adotando-se períodos de cura de 0, 7, 28 e 90 dias. Avaliou-se a resistência mecânica dos solos e misturas através dos parâmetros índice de suporte Califórnia, resistência à compressão não confinada e resistência à tração em compressão diametral. Os resultados obtidos permitiram concluir que todos os parâmetros considerados na análise influenciaram significativamente a resistência mecânica das misturas, sendo que o comportamento das misturas solo 1-grits influenciados, também, pelo teor de sódio presente na constituição química do resíduo grits.

Palavras-chave – Estradas florestais, estabilização de solos, resíduo grits.

### **Behavior of compacted soil-grits mixtures: Evaluation of mechanical strength and swelling at different curing times**

ABSTRACT – This paper addresses the influence of stabilizer content, compaction effort and curing time on the mechanical strength of two soils from Minas Gerais State North Forest Zone, Brazil. Two residual gneiss soils from Viçosa County, Brazil, respectively silt-sand-clay and silt-clay-sandy soils, herein named soils 1 and 2, were used throughout the study. The stabilizer

used was a industrial waste furnished by the *Celulose Nipo Brasileira Company (CENIBRA)* in contents ranging from 4 to 28 % regarding soils dry units. Mixtures specimens were compacted at Proctor intermediate and modified optimum moisture contents and cured during 0, 7, 28 and 90 days. Mechanical strength was evaluated as follows: California bearing ratio, unconfined compression strength and indirect tensile strength. Data from the laboratory testing program supported that all parameters affect significantly mixtures mechanical strength, as well as the mechanical behavior of soil 1-grits mixtures were also influenced by waste sodium content.

Key-Words – Forest roads, soil stabilization, grits waste.

### **5.6.1. Introdução**

Em projetos rodoviários que envolvem o emprego de solos estabilizados com aditivos químicos, um aspecto primordial a ser considerado é a evolução da resistência mecânica com o tempo de cura dessas misturas, quando compactadas. Para solos reativos ao emprego do cimento e da cal, por exemplo, considerando-se a definição ideal do traço a empregar e as misturas devidamente compactadas tem-se notado, em laboratório, taxas de ganhos de resistência significativas a depender do intervalo de incremento da cura; para o caso das misturas solo-cimento, entre 7 e 28 dias de cura foram obtidos incrementos significativos de resistência (BUENO, 1996) e para as misturas solo-cal, entre 28 e 90 dias de cura úmida (MENDONÇA, 1998).

Uma das razões para esse fato é a ocorrência, principalmente, das ditas reações pozolânicas ocorrentes entre os materiais inorgânicos e o hidróxido de cálcio formando compostos insolúveis mesmo sob condições de imersão, indispensáveis à formação de produtos cimentantes das partículas do solo (ALCÂNTARA, 1995). Thompson (1967), se referindo à resistência ao cisalhamento das misturas solo-cal descreveu que, essa pode ser potencializada pelo gradual desenvolvimento das reações pozolânicas com o tempo de cura por períodos superiores à até 10 anos.

O intuito do presente artigo é avaliar via ensaios de CBR, compressão simples e compressão diametral, o comportamento das misturas envolvendo solos da microrregião de Viçosa-MG aditivados com o resíduo grits, da indústria de celulose, devidamente compactadas e submetidas a crescentes períodos de cura, em câmara úmida, para aplicação em camada(s) constituinte(s) de pavimentos de estradas florestais.

## **5.6.2. Materiais e métodos**

### **5.6.2.1. Identificação dos materiais**

As amostras de solos analisadas neste artigo são provenientes de perfis comuns aos solos da microrregião de Viçosa-MG tipicamente residuais e originários de gnaiss. Uma das ocorrências, denominada no trabalho por solo 1, trata-se de um Latossolo Vermelho-Amarelo, representativo do manto superficial maduro, horizonte B, bastante intemperizado, possuidor em sua constituição textural de 70 % de argila, sendo classificada pelo sistema rodoviário americano TRB (*Transportation Research Board*), como A-7-5 (20). A Segunda amostra, denominada por solo 2, refere-se ao manto saprolítico, horizonte C profundo, de textura predominantemente arenosa (74 % de sua granulometria), classificada pelo TRB como A-2-4 (0). O resíduo empregado com a finalidade de estabilização química dos solos foi o grits. Trata-se de um material sólido com presença de óxido de cálcio (CaO) em sua composição constituinte químico esse, importante para os mecanismos que regem os princípios ativos de vários aditivos químicos usados para esse fim, dentre eles, a cal e o cimento.

### **5.6.2.2. Misturas empregadas**

As misturas envolveram solo+grits+água adicionados nessa ordem. O resíduo foi acrescido em quantitativos de 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28 %, para o caso dos ensaios de CBR, e de 16, 20 e 28 % para o caso dos ensaios de resistência a compressão não confinada (RCNC) e resistência a tração (Rt),

sendo todos esses traços calculados sob a massa de solo seco. A água foi adicionada no quantitativo para se atingir os teores de umidade ótima de cada mistura pré-determinados em ensaios de compactação, referentes às energias dos ensaios do Proctor intermediário e modificado.

Após à execução de cada mistura solo+grits+água feita, manualmente, essas foram colocadas em sacos plásticos hermeticamente fechados, e deixadas, em repouso, antes da realização dos ensaios efetuando-se, assim, o tempo médio entre a mistura e a compactação dos corpos-de-prova (TMC), determinados em estudos anteriores, os quais foram: (i) misturas solo 1-grits – 24 horas e (ii) misturas solo 2-grits – 0 horas (compactação imediata). Esses tempos visam potencializar os ganhos de resistência mecânica.

### **5.6.2.3. Ensaios de resistência e cura das misturas**

A avaliação da resistência de cada mistura solo-grits foi feita através dos ensaios de CBR (DNIT, 1994 – ME 129), compressão simples e compressão diametral; a moldagem dos corpos-de-prova dos dois últimos ensaios foi efetuada segundo a normatização DNIT (1994, ME 202) fazendo-se uso para tanto, do cilindro padrão de Proctor (10 cm de diâmetro e 12 cm de altura), com compactação em camadas por processo dinâmico, empregando-se soquete de 4,5 kg, sendo os corpos-de-prova assim confeccionados medidos com auxílio de um paquímetro para o controle do grau de compactação. As energias de compactação empregadas para todos os ensaios com as misturas foram as referentes aos ensaios Proctor intermediário e Proctor modificado.

Após a confecção, os corpos-de-prova foram submetidos aos seguintes processos de cura: (i) ensaio CBR – cura de 0, 7 e 28 dias, em câmara úmida, com o conjunto cilindro califórnia mais a mistura compactada embalados em sacos plásticos sendo, posteriormente, submetidos a mais 4 dias de imersão em água onde foi medido o índice expansão, após, os corpos-de-prova foram rompidos em prensa CBR para obtenção da resistência e (ii) ensaio RCNC e Rt – cura de 0, 7, 28 e 90 dias, embalados em sacos plásticos e colocados em câmara úmida. Respeitados os respectivos períodos de cura, os corpos-de-prova foram rompidos em prensa específica com velocidade de 1,25 mm/min,

para obtenção da RCNC e da Rt. Para o primeiro ensaio fez-se uso da recomendação da norma DNIT (1994, ME 201), referente a compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos e para o ensaio de Rt, os corpos-de-prova foram rompidos por compressão diametral segundo o DNIT (1994, ME 181).

### **5.6.3. Resultados e Discussão**

#### **5.6.3.1. Capacidade de suporte e expansão**

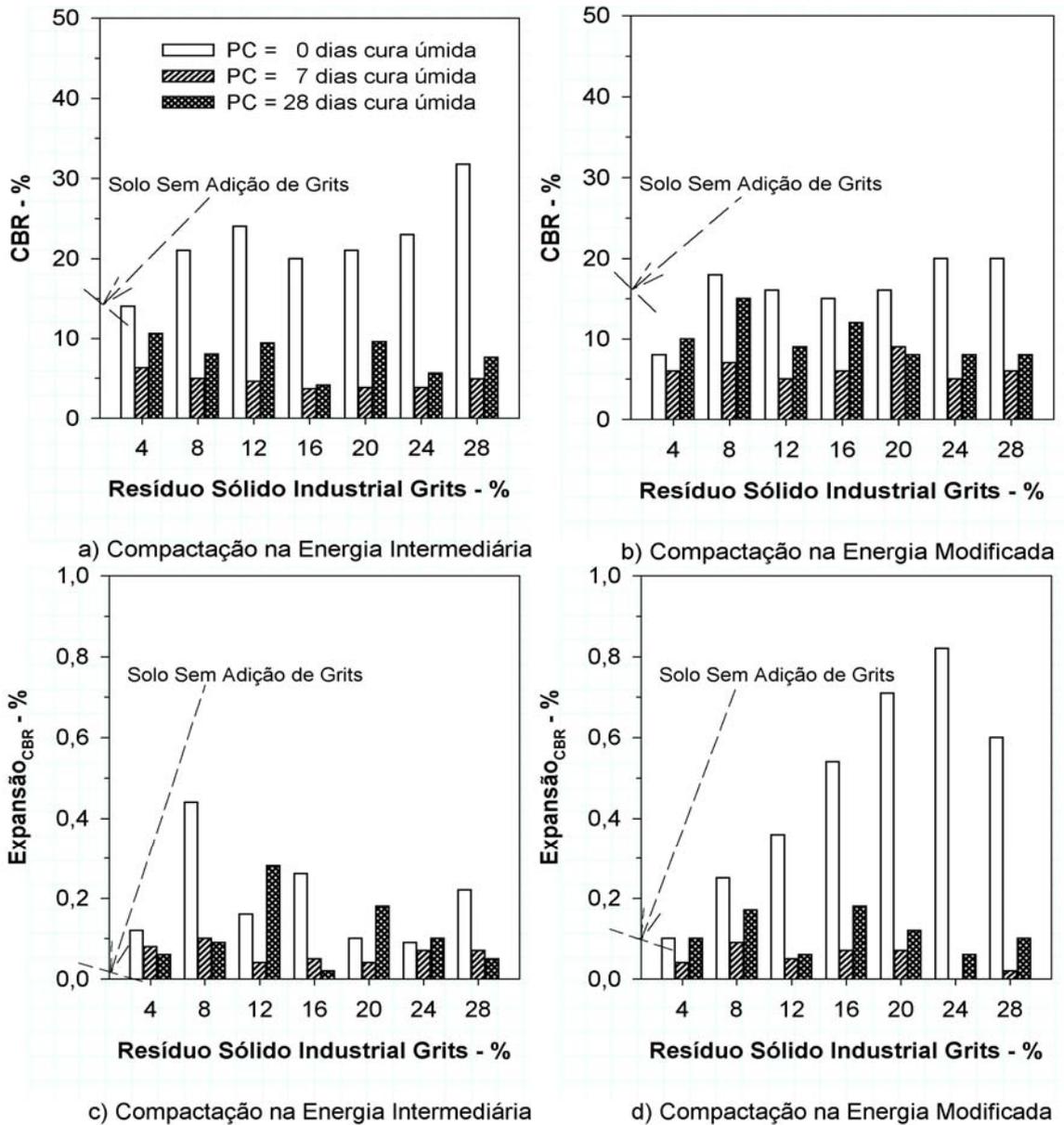
A capacidade de suporte CBR e a expansão de cada mistura solo-grits são ilustradas nas Figuras 5.19 e 5.20. Tomando-se por base a Figura 5.19, referente ao CBR e à expansão das misturas solo 1-grits, nota-se que as melhores respostas foram obtidas para as misturas não curadas em câmara úmida, para ambas as energias empregadas; houve um aumento para todas as misturas na taxa de ganhos de resistência entre os períodos de cura de 7 e 28 dias, porém, não eficiente, nem mesmo para compactação na energia modificada onde os valores de CBR encontrados foram baixíssimos (menores que 15 %) ficando inferiores ao CBR do solo sem adição de grits. Acredita-se que esse fato pode ser devido a porcentagem de sódio (0,70 %) presente no resíduo grits que dispersa com o tempo as partículas de argila do solo compactado, ficando fraca a cimentação entre as partículas do solo.

Ressalta-se ainda, que para período de cura de 0 dias em câmara úmida, onde os valores de CBR foram superiores ao encontrado para o solo sem adição de resíduo, ocorreu um maior pico para a mistura com 28 % de grits, quando de compactação em energia intermediária, onde a resistência praticamente duplicou, alcançando CBR de 30 %; para as misturas com 24 e 28 % de grits, compactadas na energia modificada, notou-se aumento substancial de cerca de 20 % no índice CBR.

A expansão das misturas solo 1-grits compactadas, também, evidenciada na Figura 5.19, teve uma tendência a menores valores para as misturas curadas à 7 e 28 dias, evidenciando mais uma vez, a ação do sódio no solo 1, ou seja, como esse íon promoveu a dispersão das partículas de argila nos



períodos cura de 7 e 28 dias, quando os corpos-de-prova foram imersos em água, essa não teve que quebrar barreira alguma para penetrar nos mesmos.



**Figura 5.19** – Efeito do período de cura nos índices CBR e expansão das misturas solo 1-grits compactadas

O aumento indesejável proporcionado no valor da expansão do solo 1 só foi significativo, em se tratando de pavimentação rodoviária e na luz das recomendações do DNIT (1996), para as misturas solo 1-grits compactadas na energia modificada e não curadas em câmara úmida, considerando-se apenas os teores de 16, 20, 24 e 28 % de resíduo, visto que, o solo 1 teve sua

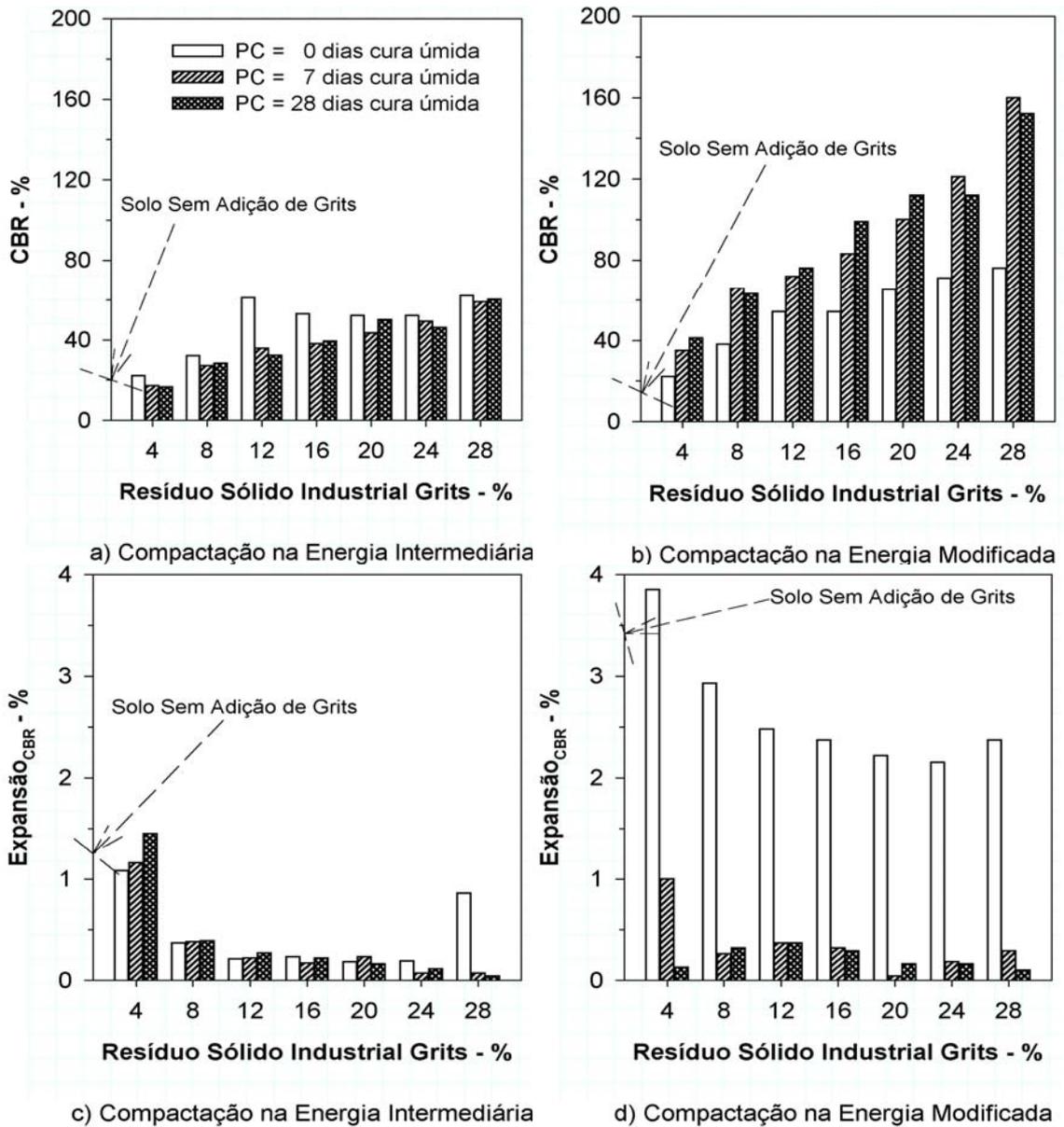
expansão aumentada para valores superiores à 0,50 %, limite esse, recomendado para camadas de base de pavimentos.

Os valores de CBR e expansão das misturas solo 2-grits compactadas e curadas encontram-se ilustrados na Figura 5.20. Considerando-se a compactação executada na energia intermediária, nota-se para todas as misturas que a cura úmida pouco efeito surtiu em termos de ganhos de resistência mecânica havendo ligeira tendência a maiores valores para as misturas não curadas. A taxa de ganhos em termos de CBR para o intervalo de cura de 7 e 28 dias foi praticamente insignificante. Nessa energia todas as misturas apresentaram valores superiores ao do solo 2 em sua forma natural, com ganhos mais significativos de CBR para os traços de 12 até 28 % de resíduo, onde o aumento percentual de resistência variou de 50 até 200 %, a depender do teor de resíduo e do período de cura.

O comportamento das misturas solo 2-grits quando compactadas na energia modificada seguiu uma tendência, tanto em termos de grandeza dos valores de CBR como nas taxas de ganhos de resistência em função da cura úmida, um tanto quanto diferenciada da compactação dessas mesmas misturas na energia intermediária, conforme pode ser constatado pela Figura 5.20b. Comparando-se os resultados das misturas solo 2-grits não curadas em câmara úmida, com as mesmas curadas a 7 dias, notou-se ganhos significativos nas taxas de aumento da resistência via CBR em função da execução da cura, os quais foram em termos percentuais, de: 75, 75, 36, 49, 50, 67 e 100 %, respectivamente, para os teores de 4, 8, 12, 16, 20 e 24 % de grits. Já para o intervalo de cura entre 7 e 28 dias, não se obteve em todas as misturas aumentos expressivos nas taxas de ganhos de resistência, ficando os valores de CBR muito próximos.

Ainda na Figura 5.20b é possível notar que para a energia modificada, as misturas do solo 2 com 16, 20, 24 e 28 % de grits, tanto com cura de 7 como de 28 dias, atingiram o valor mínimo de resistência, segundo as recomendações técnicas do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNIT (1996), para materiais constitutivos de camadas de base de pavimentos rodoviários atingindo-se até mesmo, valores de CBR superiores

aos encontrados para a brita, que é tomada como padrão de 100 %; ressalta-se, que essa condição o solo 2 não possuía quando compactado nessa energia (CBR = 18 %). Vale, também, destacar que para a mistura solo 2 + 28 % de resíduo, compactada na energia modificada e curada a 7 dias, obteve-se um valor de CBR de 160 %.



**Figura 5.20** – Efeito do período de cura nos índices CBR e expansão das misturas solo 2-grits compactadas.

Os valores de expansão das misturas solo 2-grits, compactadas na energia intermediária, sofreram poucas oscilações em decorrência do período

de cura úmida sendo os valores, com exceção do teor de 4 % de resíduo, inferiores à 0,50 %, para os todos os períodos de cura. Essas misturas compactadas na energia modificada, tiveram quanto a expansão, comportamento bem distinto, como pode ser observado na Figura 5.20d. Nota-se que as misturas não curadas atingiram maiores valores de expansão, bem superiores aos encontrados para as curas de 7 e 28 dias; alcançou-se um valor para esse índice próximo de 4 %, caso da mistura solo 2 + 4 % grits. Para os períodos de cura de 7 e 28 dias, as discrepâncias de valores de expansão foram insignificativas chegando-se a valores inferiores a 0,50 %, exceção feita para a mistura solo 2 + 4 % grits, quando curada a 7 dias (exp. = 1 %).

A possível razão para esse fato é que o solo 2 quando compactado na energia modificada e imerso confinado dentro do cilindro califórnia, como possui predominância da fração areia tende a se expandir muito, o que pode ser evidenciado pela seu elevado valor de expansão de 3,50 %; quando em mistura com o grits, possíveis reações de troca catiônica podem ocorrer levando à formação de compostos que retém a entrada da água, quando da imersão do corpo-de-prova. Essas reações são dependentes do período de cura, o que foi constatado à partir da cura de 7 dias, onde os valores de expansão ficaram abaixo de 0,50 %.

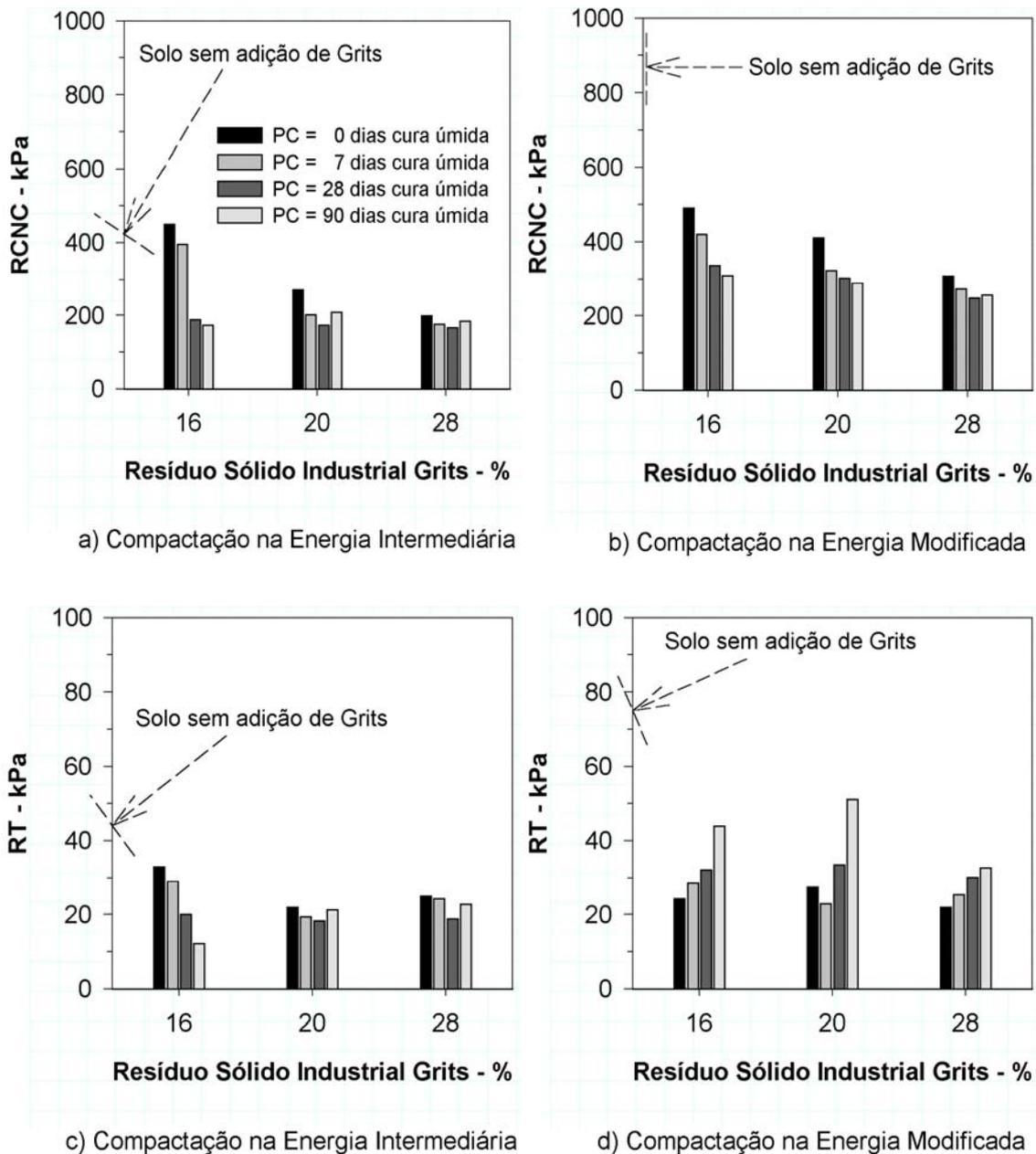
#### **5.6.3.2. Resistência a compressão não confinada e a tração**

Os resultados dos ensaios de resistência a compressão não-confinada (RCNC) e de resistência a tração ( $R_t$ ) por compressão diametral, encontram-se ilustrados nas Figuras 5.21 e 5.22. Com relação à RCNC das misturas solo 1-grits (Figura 5.21), compactadas tanto na energia intermediária quanto na modificada, notou-se que a cura não produziu resultados animadores, visto que, as melhores respostas foram obtidas para as misturas em que não foram efetuadas curas úmidas. Para os períodos de cura entre 7 e 28 dias e entre 28 e 90 dias, não se verificaram incrementos nas taxas de ganhos de resistência, e sim, decréscimos nos valores de RCNC à partir dos 7 dias de cura, para os três teores de grits estudados. Ressalva seja feita ao fato de que os corpos-de-prova compactadas nas referidas energias, quando curados, principalmente à

90 dias, expandiram e apresentaram inúmeras fissuras ao longo de seus corpos provavelmente devido à ação do sódio, conforme já mencionado. Outro fato relevante é que no momento da compactação, as misturas solo 1-grits ficaram excessivamente pegajosas dificultando, em muito, o efeito da compactação devido a dificuldade de manipulação por parte dos operadores do soquete compactador.

Ainda pela Figura 5.21, ficou evidente que adição do resíduo grits ao solo 1 proporcionou quedas drásticas no seu valor de RCNC que foram exponencialmente majoritárias com o aumento do teor de grits; para a compactação na energia intermediária notaram-se taxas de reduções que variaram, a depender do teor de resíduo e do período de cura empregados, de 0 até 58 %; de forma análoga, na energia modificada essas taxas foram ainda maiores, com variações de 43 até 73 %, essa última taxa, observada na mistura com 28 % de resíduo, curada a 28 dias.

Com relação a resistência à tração, as misturas solo 1-grits tiveram o seguinte comportamento: (i) para compactação na energia intermediária – para as misturas com 16 % de grits houveram reduções exponenciais à partir de 7 dias de cura, chegando-se com 90 dias a um valor cerca de 60 % menor do que o encontrado para a mesma mistura não curada; para as misturas com 20 e 28 % de resíduo, os valores de  $R_t$  praticamente não sofreram alterações em função do período de cura. Nessa energia todas misturas solo 1-grits tiveram valores de  $R_t$  inferiores ao do solo 1 sem adição de resíduo, chegando a taxas de reduções que variaram de 20 até 70 % e (ii) para compactação na energia modificada – as misturas tiveram um comportamento distinto, com relação a cura, onde ocorreram taxas de incremento evidentes na grande maioria dos tratamentos; para as misturas com 20 % de grits, notou-se o maior aumento de  $R_t$  entre os períodos de cura de 28 e 90 dias, que foi de aproximadamente 35 %. Entretanto, nessa energia, também, para todas as misturas e períodos de cura, os valores ficaram inferiores ao do solo 1 em sua forma natural, com variações de reduções entre 28 a 65 %.

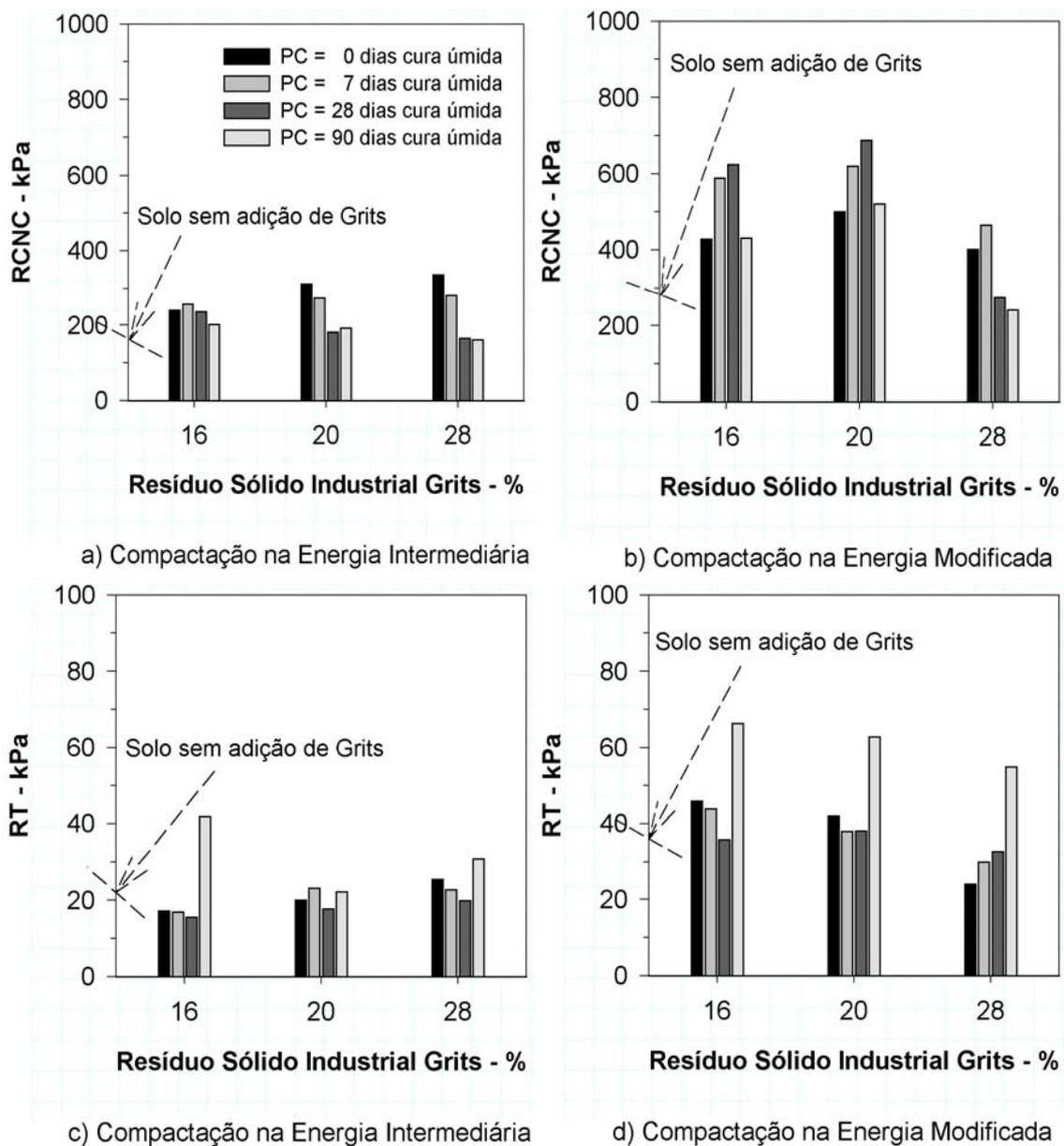


**Figura 5.21** – Efeito do período de cura nos índices RCNC média e Rt média das misturas solo 1-grits compactadas.

Para as misturas solo 2-grits (Figura 5.22), ocorreram reduções à partir do período de cura de 7 dias nos valores de RCNC, quando de compactação em energia intermediária; ocorreram, também, tendência a maiores valores desse parâmetro para as misturas não curadas. A adição de grits ao solo 2, para a maioria dos teores e períodos de cura (exceção feita para 28 % de grits e cura de 28 e 90 dias) proporcionou na supracitada energia de compactação, ganhos nos valores de RCNC, que atingiram mínimos de 2 % a máximos de 88 % (caso da mistura solo 2 + 28 % grits sem cura). Compactadas na energia

modificada as misturas solo 2-grits tiveram o seguinte comportamento: (i) para os teores de 16 e 20 % de resíduo ocorreram incrementos nos valores de RCNC entre as curas de 0 e 7 dias e entre 7 e 28 dias, com posterior queda para 90 dias de cura; com 16 % de grits notou-se 38 % (entre 0 e 7 dias) e 5 % (entre 7 e 28 dias) de taxa de ganho de RCNC, de forma análoga 24 % (entre 0 e 7 dias) e 10 % (entre 7 e 28 dias), quando o teor de grits foi de 20 %. Para o teor de 28 % de resíduo ocorreu um aumento de RCNC entre 0 e 7 dias de cura, que foi de 9 %, e para o intervalo de cura de 28 e 90 dias notou-se queda e (ii) com exceção teor de 28 % de grits e cura de 90 dias, para todas os demais tratamentos, notaram-se ganhos de RCNC em relação ao valor obtido para o solo 2 em seu estado natural, com variações de 0 (caso da mistura com 28 % grits curada a 28 dias) até 138 % (caso da mistura com 20 % grits curada a 28 dias).

Na Figura 5.22 é possível notar, também, o comportamento quanto a  $R_t$  das misturas solo 2-grits compactadas e curadas. Na energia intermediária, notou-se uma tendência a maiores incrementos de  $R_t$  entre os períodos de cura de 28 e 90 dias, que chegaram à valores máximos com 16 % de grits, onde se atingiu uma taxa de ganho de  $R_t$  de aproximadamente 170 %. Nessa mesma mistura e período de cura de 90 dias, o ganho de  $R_t$  em relação ao solo 2 em sua forma natural foi de 86 %, sendo esse, o valor máximo encontrado. Para compactação em energia modificada os resultados prescreveram o seguinte: (i) os maiores incrementos de  $R_t$  foram, também, entre as curas de 28 e 90 dias com ganhos de aproximadamente 88, 59 e 51 %, respectivamente, para os teores de 16, 20 e 28 % de grits e (ii) a maior taxa de ganho de  $R_t$  em relação ao solo 2 sem adição de resíduo foi para o teor de 16 % de grits e cura de 90 dias onde se atingiu um aumento de 79 %.



**Figura 5.22** – Efeito do período de cura nos índices RCNC média e Rt média das misturas solo 2-grits compactadas.

#### 5.6.4. Conclusões

- (i) as misturas solo-grits sofreram influência tanto do teor de resíduo empregado e da energia de compactação quanto do período de cura a que foram submetidas, o que foi evidenciado pelos ensaios de resistência e expansão;



- (ii) as misturas solo 1-grits tiveram seus valores de resistência e expansão influenciados pelo teor de sódio presente no resíduo, o que não proporcionou taxas de incremento na resistência dessas misturas em função do período de cura, sendo as melhores respostas obtidas para as misturas não curadas considerando-se ambas energias de compactação; exceção seja feita, as misturas compactadas na energia modificada, onde os valores de  $R_t$  evidenciaram ganhos para os período de 90 dias de cura; e
- (iii) para as misturas solo 2-grits, quando compactadas na energia intermediária, a cura úmida não surtiu efeito algum em termos de ganhos significativos de resistência, sendo as melhores respostas obtidas para as misturas não curadas, exceção feita aos dados de  $R_t$ , em que as melhores respostas foram para 90 dias de cura úmida. Quando compactadas na energia modificada essas mesmas misturas tiveram ganhos significativos de resistência mecânica entre o intervalo de cura de 0 e 7 dias; considerando-se os ensaios de CBR e de RCNC, e entre 28 e 90 dias, considerando-se o ensaio de  $R_t$ . Ressalta-se, também, que nessa energia observaram-se elevados valores de expansão quando as misturas não foram submetidas à cura úmida.

#### **5.6.5. Agradecimentos**

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq e a FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto, bem como, à CAPES pelo fornecimento da bolsa de Doutorado. Deve-se igual agradecimento à Empresa de Celulose Nipor Brasileira (CENIBRA) pelo fornecimento do resíduo.

#### **5.6.6. Referências bibliográficas**

ALCÂNTARA, M.A.M. **Estabilização química dos solos para fins rodoviários**: técnicas disponíveis e estudo de caso dirigido à estabilização solo-cal de três solos de Ilha Solteira-SP. Viçosa, MG: UFV, 1995. 91 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

BUENO, B.S. **Aspectos da estabilização de solos com uso de aditivos químicos e de inclusões plásticas aleatórias.** São Carlos, SP: EESC-USP, 1996. Concurso Público (Livre Docência)-Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 1996. Não paginado.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 129:** Solos: compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 181:** solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada: determinação da resistência a tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 201:** solo-cimento: compressão axial de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 12 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 202:** solo-cimento: moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 9 p.

MENDONÇA, A.A. **Caracterização tecnológica de misturas solo-cal.** Viçosa, MG: UFV, 1998. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1998.

THOMPSON, M.R. **Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures.** Washington , D.C.: Highway Research Record, 1967. p. 1-14. (Bulletin, 139).

### **5.7. Influência da imersão em água na resistência mecânica de misturas solo-grits compactadas e curadas**

RESUMO – Avaliou-se o efeito da imersão em água dos corpos-de-prova na resistência mecânica de misturas solo-grits. Trabalhou-se com dois solos da cidade de Viçosa, localizada na Zona da Mata Norte de Minas, Brazil, respectivamente de texturas predominantemente argilosa e arenosa, e com o resíduo industrial grits que é um subproduto do processo de extração da celulose. Determinaram-se os parâmetros de resistência mecânica CBR, resistência à compressão não-confinada e resistência à compressão diametral de corpos-de-prova compactados nas energias de compactação dos ensaios Proctor intermediário e Proctor modificado, para teores de resíduo na faixa de 4 a 28% e períodos de cura de 0, 7, 28 e 90 dias. Com relação ao parâmetro CBR, os ensaios foram realizados segundo a metodologia tradicional, isto é, após imersão dos corpos-de-prova em água por 96 horas antes da realização da penetração dos corpos-de-prova, e sem imersão. No que tange aos parâmetros compressão não-confinada e compressão diametral, os ensaios foram realizados em obediência à norma brasileira para misturas solo-cimento, isto é com imersão em água durante 4 horas antes da ruptura dos corpos-de-prova, e sem imersão. Os resultados indicaram que a imersão em água levou a quedas nos parâmetros de resistência mecânica de até 30 %.

Palavras-chave – estabilização de solos, estradas florestais, resíduo grits, resistência mecânica.

### **Influence of water immersion on the mechanical strength of compacted and cured soil-grits mixtures**

ABSTRACT – This paper address the influence of water immersion on mechanical strength parameters of soil-grits specimens. Two residual soils, predominantly clayey and sandy soils from the city of Viçosa, located in the Minas Gerais State North Forest Zone, Brazil, and a waste from the cellulose

industry were used throughout the study. The laboratory testing program encompassed CBR, as well as unconfined compression and indirect tensile strengths of specimens prepared with waste contents ranging from 4 to 28 %, compacted at the intermediate and modified compaction efforts, and cured during 0, 7, 28 and 90 days. Laboratory tests were performed as follow: (i) CBR: tests were performed following the standard procedure, i.e. after 4 days water immersion before specimen penetration, and without immersion; (ii) unconfined compression and indirect tensile strength: tests were performed following the Brazilian standard procedure, i.e. after 4 hours specimen immersion before testing, and without water immersion. The laboratory testing program data support that water immersion caused drops up to 30 % in the tested mechanical strength parameters.

Key Works – soil stabilization, forest roads, grits waste, mechanical resistance.

### **5.7.1. Introdução**

O aumento substancial a cada ano da quantidade de subprodutos ou resíduos gerados pelos diversos setores industriais da economia mundial e nacional, muito tem contribuído para a elevação da poluição de ecossistemas, inclusive os marinhos. Isso está relegado ao fato de que grande quantidade desses rejeitos não possuem um processo de descarte adequado, seja pela falta de tecnologia prática e menos onerosa ou pela falta de tecnologias de reaproveitamento dentro do próprio processo industrial ou em outros setores.

Rohde e Núñez et al., (2001) destacaram a reciclagem ou utilização de subprodutos industriais como os responsáveis pela redução das agressões ao meio ambiente, causadas pela disposição de resíduos em aterros ou pela emissão de gases poluentes. Os autores acrescentaram, também, que em se tratando de obras rodoviárias ocorre diminuição da exploração predatória de recursos naturais (jazidas de agregados).

Pesquisadores em todo o mundo têm tentado encontrar soluções para essa problemática indo desde a obtenção de tratamentos que eliminem por completo os rejeitos, até soluções que envolvam a aplicação dos mesmos em

outras áreas. Exemplo disso são os trabalhos desenvolvidos na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, por Ferraz (1994), Vieira (1994) e Fernandes (2000), envolvendo resíduos provenientes, respectivamente, das indústrias de cana-de-açúcar, celulose e papel e obtenção do carvão vegetal, para estabilização de solos regionais visando a construção de rodovias.

Nesses tipos de obras uma das variáveis condicionantes na execução, conforme destacado por Senço (1997), é a análise de custos entre as soluções disponíveis, situação em que o solo local exerce um papel determinante na tomada de decisão. Por muitas vezes os solos constitutivos do subleito estradal necessitam sofrer modificações em suas propriedades de engenharia, por não atenderem aos padrões técnicos mínimos exigidos por normas técnicas, abrindo-se, no campo técnico-econômico, uma área para o emprego dos processos de estabilização de solos com uso de resíduos industriais.

Dentro desse enfoque, um novo produto despertou o interesse para a estabilização de solos com fins rodoviários, trata-se de um resíduo industrial denominado por grits, proveniente da recuperação do licor verde durante o processo de extração de celulose. Assim sendo, constitui-se em objetivo do presente artigo estudar as variações passíveis de ocorrência na resistência mecânica de misturas solo-grits compactadas e curadas, pela imersão das mesmas em água, antes do rompimento em prensa de corpos-de-prova padronizados para os ensaios de capacidade suporte, compressão simples e compressão diametral.

## **5.7.2. Materiais e métodos**

### **5.7.2.1. Caracterização dos materiais**

Os materiais empregados nesse estudo constituíram-se de dois solos típicos da microrregião de Viçosa, Zona da Mata Norte de Minas Gerais, e do resíduo grits, gerado na indústria de celulose. Os solos denominados por solo 1 e solo 2 tratam, respectivamente, de um Latossolo Vermelho-Amarelo com textura argilo-areno-siltosa e de um saprolítico de textura areno-argilo-siltosa,

representam, assim esses exemplares, dois extremos do sistema de classificação americano TRB (*Transportation Research Board*) os quais são, respectivamente, A-7-5 (20) e A-2-4 (0). Pela proposição brasileira MCT (*Miniatura Compactado Tropical*), o solo 1 possui comportamento de material laterítico argiloso, grupo LG' do sistema; análogo, o solo 2 refere-se a um material não-laterítico arenoso pertencente ao grupo NA'. As amostras foram coletadas em taludes de estradas situadas nas proximidades da usina de asfalto da Prefeitura Municipal de Viçosa, em se tratantdo do solo 1, e na localidade denominada por Vila Secundino, no campus da UFV, caso do solo 2.

O resíduo grits utilizado em teores que variaram de 4 até 28 % foi obtido da empresa Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA), sendo armazenado em tambores hermeticamente fechados no laboratório de geotecnia da UFV, para posterior utilização nos ensaios laboratoriais. O interesse pelo seu uso na estabilização de solos se deveu em primeira instância, à presença de CaO (óxido de cálcio) em sua constituição química e, também, por ser um material não reutilizável dentro do processo industrial de extração de celulose, sendo sua disposição final feita atualmente em aterros, o que gera riscos ambientais passíveis de ocorrência; são gerados aproximadamente 10.500 t/ano desse resíduo. O grits é classificado como classe II (material não inerte) pela ABNT (1987) referente a NBR 10.004.

#### **5.7.2.2. Ensaios de laboratório**

Nas misturas de solo-resíduo o grits foi utilizado nos seguintes quantitativos: 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 28 %, em relação ao peso de solo seco. Em seguida, as misturas foram colocadas em sacolas plásticas, que foram hermeticamente fechadas; após, obedeceram-se tempos de descanso (TMC) antes da execução dos ensaios de compactação, os quais foram: (i) misturas solo 1-grits – 4 horas e (ii) misturas solo 2-grits - compactação realizada imediatamente após a mistura. Esses TMC's foram determinados em estudos anteriores realizados pelos presentes autores e foram os que proporcionaram os maiores ganhos de resistência mecânica para as misturas compactadas. Cumprido os TMC's realizaram-se ensaios de compactação, empregando-se,

para tanto, das energias de compactação referentes aos ensaios Proctor intermediário e Proctor modificado segundo a norma DNIT (1994, ME 216).

Realizaram-se ensaios de resistência  $CBR_{1\text{ponto}}$  (DNIT, 1994 - ME 129), para as misturas solo-grits nos teores de umidade ótima, previamente definidos nos ensaios de compactação. As misturas assim compactadas somente na energia do ensaio Proctor intermediário foram submetidas a dois tratamentos: (i) cura úmida de 7 dias seguida por imersão em tanque de água por 96 horas e rompimento em prensa CBR para obtenção do índice e (ii) cura úmida de 7 dias e rompimento em prensa CBR.

Os ensaios de resistência à compressão não confinada (RCNC) foram executados para as seguintes misturas: (i) solo + 16 % grits; (ii) solo + 20 % grits e (iii) solo + 28 % grits. A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada de acordo com o método DNIT (1994, ME 216), nas energias de compactação intermediária e modificada, com a compactação executada por processo dinâmico, obtendo-se corpos-de-prova de dimensões aproximadas de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura. Foram confeccionados três corpos-de-prova para cada tratamento e apresentados os resultados das médias das tensões máximas de ruptura. Os tratamentos envolveram: (i) execução da mistura, compactação no teor de umidade ótima, cura úmida de 0, 7, 28 e 90 dias, imersão em água por 4 horas e rompimento em prensa específica com velocidade de 1,25 mm/min e (ii) execução da mistura, compactação no teor de umidade ótima, cura úmida de 0, 7, 28 e 90 dias e rompimento em prensa específica com velocidade de 1,25 mm/min. O controle das características de compactação dos corpos-de-prova foi feito em função do grau de compactação, sendo fixado o limite de  $100 \pm 3 \%$ .

Realizaram-se, também, ensaios de resistência à tração ( $R_t$ ) com corpos-de-prova confeccionados nos padrões e tratamentos do ensaio de RCNC. Com relação à ruptura, essa foi feita por compressão diametral em prensa com velocidade de 1,25 mm/min.

### 5.7.3. Resultados e discussão

#### 5.7.3.1. Parâmetros ótimos de compactação

A inclusão do grits ao solo 1 causou variações no seu peso específico seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e no teor de umidade ótima ( $W_{\acute{o}t}$ ). Verificou-se uma tendência de aumento do  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  e queda na  $W_{\acute{o}t}$  das misturas solo 1-grits compactadas, o que pode ser constatado no Quadro 5.9. Ressalta-se que o aumento da energia de compactação proporcionou, conforme esperado, maiores valores de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  e menores exigências em termos de conteúdo de água para se atingir a  $W_{\acute{o}t}$ . (Quadro 5.10). As misturas solo 2-grits tiveram, também, variações em seus parâmetros ótimos de compactação em decorrência da adição do resíduo; entretanto, nota-se pelos Quadros 5.9 e 5.10, um comportamento distinto em comparação às misturas solo 1-grits, visto que, ocorreu tendência a queda do  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  e aumento da  $W_{\acute{o}t}$ .

**Quadro 5.9** – Parâmetros ótimos de compactação das misturas solo-grits compactadas na energia do ensaio Proctor intermediário

% Grits	Misturas			
	Solo 1-Grits		Solo 2-Grits	
	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ .(kN/m <sup>3</sup> )	$W_{\acute{o}t}$ (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ .(kN/m <sup>3</sup> )	$W_{\acute{o}t}$ (%)
0	14,58	28,87	18,33	11,38
4	15,04	27,85	18,21	11,47
8	15,01	27,55	18,14	11,57
12	14,89	27,37	18,17	11,58
16	15,14	27,06	18,15	11,92
20	15,08	26,29	18,16	11,96
24	15,20	25,85	18,13	12,37
28	15,45	24,45	18,04	12,41



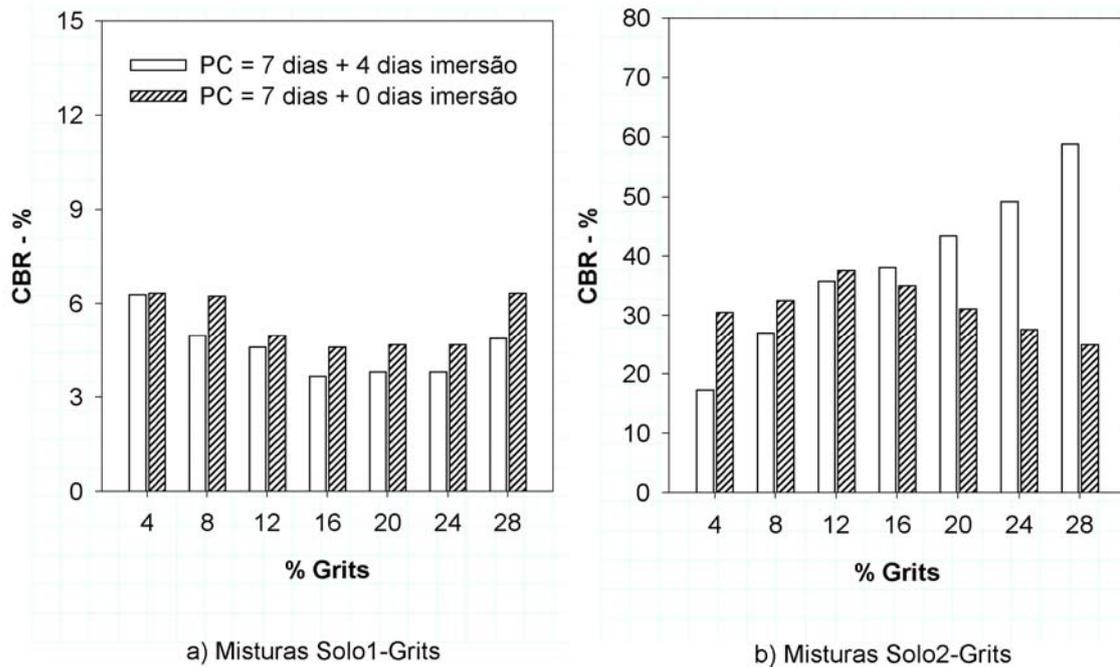
**Quadro 5.10** – Parâmetros de compactação das misturas solo-grits compactadas na energia do ensaio Proctor modificado

% Grits	Misturas			
	Solo 1-Grits		Solo 2-Grits	
	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{\acute{o}t}$ (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{\acute{o}t}$ (%)
0	15,37	26,49	19,01	9,90
16	16,03	23,39	18,81	10,33
20	16,14	23,09	18,74	10,41
28	16,19	22,57	18,65	11,26

### 5.7.3.2. Influência da imersão na resistência mecânica das misturas

A Figura 5.23 ilustra a influência da imersão em água de corpos-de-prova compactados na energia intermediária, utilizando-se do cilindro califórnia, e curados a 7 dias em câmara úmida; as misturas solo 1-grits compactadas tiveram pouca perda de resistência, via CBR, em função da imersão, notando-se baixíssimos valores de resistência mecânica para todos os teores de resíduo empregados, que praticamente não são influenciados pela ação da água, podendo-se falar em perda máxima de resistência da ordem de 20 %.

As misturas solo 2-grits compactadas foram assim influenciadas pela imersão em água: (i) para baixos teores, 4 e 8 % de resíduo, os corpos-de-prova sem imersão em água alcançaram maiores valores do índice CBR, que foram 67 e 22 %, respectivamente, superiores aos corpos-de-prova imersos e (ii) no teor de 12 % de resíduo as resistências com e sem imersão praticamente foram as mesmas, sendo notado à partir do teor de 16 % um aumento gradativo nos valores de CBR, favorecidos pela imersão em água, sendo esses mais acentuados nos teores de 24 e 28 % de grits, onde praticamente dobraram e triplicaram, respectivamente. É provável que esse fato seja devido à melhoria das propriedades hidráulicas do resíduo pela imersão em água, que é dependente do teor do mesmo e do tipo de solo que está sendo empregado, a exemplo do que acontece com as misturas solo-cimento.



**Figura 5.23** – Influência da imersão em água nos valores de CBR das misturas solo-grits compactadas e curadas a 7 dias.

Os resultados dos ensaios de compressão não confinada encontram-se descritos nos Quadros 5.11 a 5.14. Nesses Quadros, além dos valores de RCNC, têm-se as reduções obtidas na resistência mecânica em função da imersão pelo período de 4 horas em água, antes da ruptura dos corpos-de-prova. Os seguintes comportamentos foram notados para as misturas solo 1-grits: (i) quando compactadas na energia intermediária (Quadro 5.11), ocorreram reduções nos valores de RCNC, a depender do teor de resíduo e do período de cura empregado; para todos os teores, quando não se realizou cura úmida, notaram-se que as taxas de reduções decorrentes da imersão suplantaram a casa dos 70 %. Por outro lado, menores reduções nos valores de RCNC foram notados para as misturas solo 1-grits curadas a 28 dias, mostrando maior resistência à desfragmentação do corpo-de-prova pela ação da água. Ressalta-se, também, que os corpos-de-prova curados à 90 dias não suportaram a imersão em nenhum dos teores de grits empregados, provavelmente, devido as inúmeras fissuras observadas nos corpos-de-prova, que ao serem imersos em água desfragmentavam-se em forma de placas. Foi notado, também, nesses corpos-de-prova um cheiro excessivo de soda

cáustica; e (ii) quando compactadas na energia modificada (Quadro 5.12), tomando-se por base as misturas com 16 % de grits, notou-se que as reduções nos valores de RCNC, devido à imersão, foram maiores quando não se efetuou cura úmida onde, a taxa de redução superou os 85 %; com 28 dias de cura a taxa de redução devido a imersão ficou próxima de 60 %. Para os demais teores a maioria dos tratamentos não suportaram a imersão não sendo possível inferir sobre seus comportamentos. Os corpos-de-prova, também, apresentaram inúmeras fissuras, após efetivada a cura úmida, se desfragmentando na forma de placas.

As misturas solo 2-grits tiveram o seguinte comportamento devido a imersão pelo período de 4 horas em água: (i) quando compactadas na energia intermediária (Quadro 5.13), o solo 2 em seu estado natural não suportou a imersão em água, devido à falta de parcela coesiva entre suas partículas, havendo perda de integridade total dos corpos-de-prova assim compactados. Quando em misturas com o resíduo grits, o único período de cura que suportou imersão para todos os teores empregados foi o de 28 dias, em que, se notaram menores taxas de perdas nos valores de RCNC, devido à imersão; para a mistura com 16 % de grits, a perda foi de aproximadamente de 36 %, para a mistura com 20 % foi de aproximadamente de 52 % e para a mistura com 28 % de resíduo a perda foi de aproximadamente de 68 %; e (ii) na energia modificada (Quadro 5.14), as misturas tiveram perda parcial ou total de integridade, sendo que somente para o teor de 28 % de grits, curada a 7 e 28 dias se conseguiu avaliar a taxa de perda de RCNC, devido à imersão; com 7 dias de cura, praticamente não houveram perdas (perda de 0,54 %) e com 28 dias, a taxa de perda foi de aproximadamente 44 %.

Para as misturas solo 2-grits, quando se empregou o termo NSI, ressalta-se que nem sempre os corpos-de-prova apresentaram perda de integridade total; entretanto, a danificação de seu volume, impossibilitou a ruptura em prensa de compressão simples (Figura 5.24). O amolecimento ou perda de integridade foi dependente do teor de resíduo e da energia de compactação empregada. Para os corpos-de-prova classificados como NSI para as misturas com 16 % de grits, compactadas na energia intermediária, notaram-se em

**Quadro 5.11** - Influência da imersão, em água, na RCNC média das misturas solo 1-grits compactadas na energia intermediária e curadas

Grits (%)	Cura (dias)	RCNC (kPa)		% Redução
		Sem imersão	Com Imersão	
0	0	430,31	135,48	68,52
	0	450,60	112,86	74,95
	7	396,00	178,20	55,00
	28	188,19	166,60	11,48
	90	173,88	NSI*	-
16	0	269,17	70,00	73,99
	7	202,00	91,00	54,95
	28	173,74	145,90	16,02
	90	208,64	NSI*	-
20	0	198,70	53,00	73,33
	7	176,51	79,43	69,97
	28	166,04	214,74	**
	90	184,29	NSI*	-

\*Não suportou imersão; \*\*dado errôneo.

**Quadro 5.12** - Influência da imersão, em água, na RCNC média das misturas solo 1-grits compactadas na energia modificada e curadas.

Grits (%)	Cura (dias)	RCNC (kPa)		% Redução
		Sem imersão	Com Imersão	
0	0	877,25	221,22	74,78
	0	490,54	70,91	85,54
	7	420,32	131,63	68,68
	28	336,30	129,72	61,43
	90	308,73	NSI*	-
16	0	411,11	NSI*	-
	7	321,93	NSI*	-
	28	302,78	166,22	45,11
	90	288,80	NSI*	-
20	0	308,22	NSI*	-
	7	272,21	NSI*	-
	28	101,97	152,28	**
	90	256,33	NSI*	-

\*Não suportou imersão; \*\*dado errôneo.

média, uma perda de integridade, em função do período de cura, de aproximadamente 30 %; para o teor de 20 % de resíduo, considerando-se a mesma energia anterior, a taxa de perda aproximada foi de 45 % e para o teor de 28 % de resíduo, essa perda foi de 50 %. Essas misturas compactadas na

energia modificada tiveram perdas de integridade imediatas, com menos de 30 minutos após a imersão, verificando-se a formação de bolhas seguida por deterioração, e amolecimentos de 50 até 100 % dos corpos-de-prova.

**Quadro 5.13** - Influência da imersão, em água, na RCNC média das misturas solo 2-grits compactadas na energia intermediária e curadas

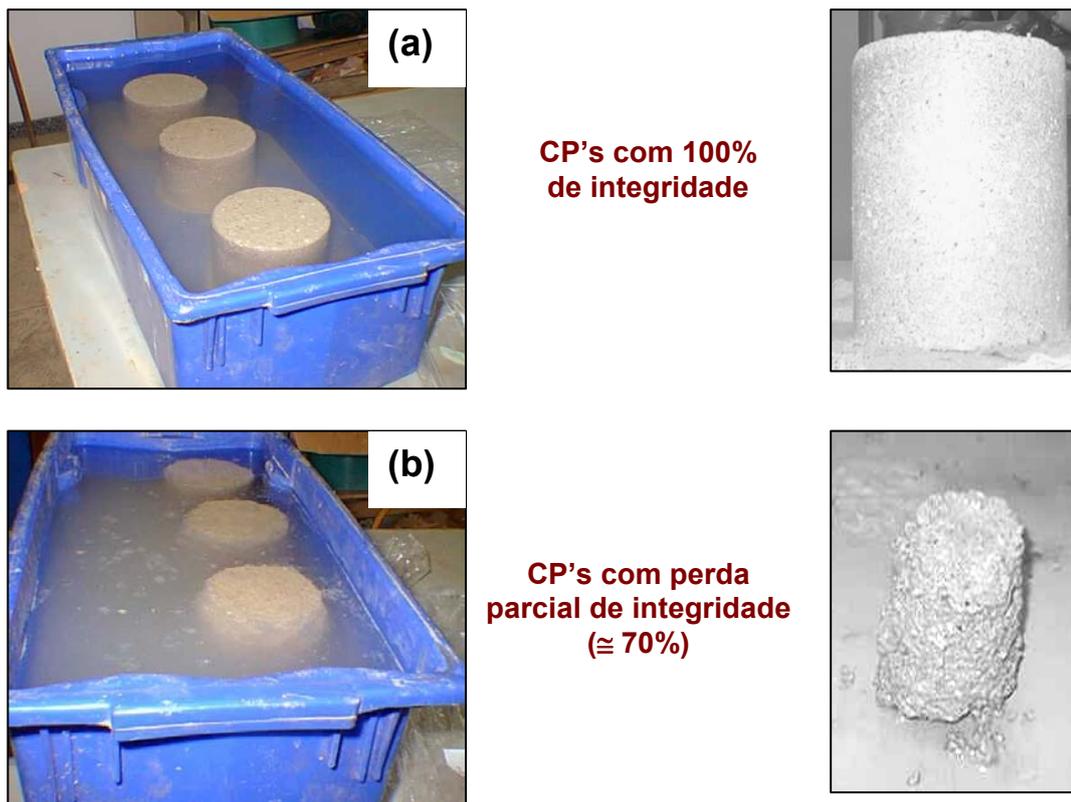
Grits (%)	Cura (dias)	RCNC (kPa)		% Redução
		Sem imersão	Com Imersão	
0	0	167,84	NSI*	-
	0	240,12	148,07	38,33
16	7	256,63	NSI*	-
	28	235,65	150,26	36,24
	90	202,47	224,52	**
20	0	312,13	NSI*	-
	7	272,81	NSI*	-
	28	380,74	181,44	52,35
	90	192,59	NSI*	-
28	0	336,25	NSI*	-
	7	279,27	290,25	**
	28	514,28	164,90	67,94
	90	160,93	NSI*	-

\*Não suportou imersão; \*\*dado errôneo.

**Quadro 5.14** - Influência da imersão, em água, na RCNC média das misturas solo 2-grits compactadas na energia modificada e curadas

Grits (%)	Cura (dias)	RCNC (kPa)		% Redução
		Sem imersão	Com Imersão	
0	0	291,60	NSI*	-
	0	428,97	NSI*	-
16	7	588,94	NSI*	-
	28	623,87	NSI*	-
	90	431,70	NSI*	-
20	0	499,89	NSI*	-
	7	620,00	NSI*	-
	28	687,17	NSI*	-
	90	520,00	NSI*	-
28	0	401,92	NSI*	-
	7	464,68	462,18	0,54
	28	489,06	274,51	43,87
	90	246,00	NSI*	-

\*Não suportou imersão; \*\*dado errôneo.



**Figura 5.24** – Perda de integridade das misturas solo 2-grits compactadas e curadas: (a) misturas compactadas na energia intermediária e curadas a 28 dias e (b) misturas compactadas na energia modificada.

Os valores de  $R_t$  das misturas solo 1-grits encontram-se nos Quadros 5.15 e 5.16. Tomando-se por base as misturas compactadas na energia intermediária (Quadro 5.15), para o teor de 16 % de grits, onde todos os corpos-de-prova suportaram a imersão por 4 horas, em água, notou-se que a taxa de redução percentual diminuiu em função do aumento do período de cura; quando não se utilizou cura úmida a redução no valor de  $R_t$  chegou próxima dos 90 % e para cura de 28 dias foi inferior a 40 %. Fazendo-se uma comparação entre teores, os resultados só permitiram comparar as misturas curadas à 28 dias, onde o teor de 16 % de grits apresentou menor perda de resistência a tração ( $\cong 37$  %), sob condição de saturação, quando comparado com os teores de 20 e 28 % de resíduo (perda média de 53 %).

As misturas solo 1-grits compactadas na energia modificada (Quadro 5.16) tiveram o seguinte comportamento: (i) tendência à menores perdas de  $R_t$ , em função da saturação dos corpos-de-prova, para maiores períodos de cura,

fato evidenciado para as misturas com 16 % de grits; (ii) comparando-se os períodos de cura de 7 e 28 dias notaram-se para os teores de 16 e 20 % de grits as menores perdas de Rt ( $\cong$  52 %); para o teor de 28 % de resíduo ocorreu um aumento da taxa percentual de perda entre 7 e 28 dias ( $\cong$  36 %).

**Quadro 5.15** - Influência da imersão, em água, na Rt média das misturas solo 1-grits compactadas na energia intermediária e curadas

Grits (%)	Cura (dias)	RCNC (kPa)		% Redução
		Sem imersão	Com Imersão	
0	0	45,50	13,10	71,21
16	0	33,00	3,47	89,48
	7	29,60	14,52	50,95
	28	20,05	12,65	36,91
	90	12,18	12,65	**
20	0	22,00	NSI*	-
	7	19,43	NSI*	-
	28	18,28	8,85	51,59
	90	21,30	12,03	43,52
28	0	25,00	NSI*	-
	7	24,28	NSI*	-
	28	18,85	8,43	55,28
	90	22,76	NSI*	-

\*Não suportou imersão; \*\*dado errôneo.

**Quadro 5.16** - Influência da imersão, em água, na Rt média das misturas solo 1-grits compactadas na energia modificada e curadas

Grits (%)	Cura (dias)	RCNC (kPa)		% Redução
		Sem imersão	Com Imersão	
0	0	74,84	15,07	79,86
16	0	24,21	4,78	80,26
	7	28,43	13,64	52,02
	28	32,08	15,23	52,52
	90	44,00	24,37	44,61
20	0	27,32	3,29	87,96
	7	22,92	12,65	44,81
	28	33,48	13,51	59,65
	90	51,13	16,71	67,32
28	0	21,91	NSI*	-
	7	25,34	11,25	55,60
	28	30,09	7,39	75,44
	90	32,70	NSI*	-

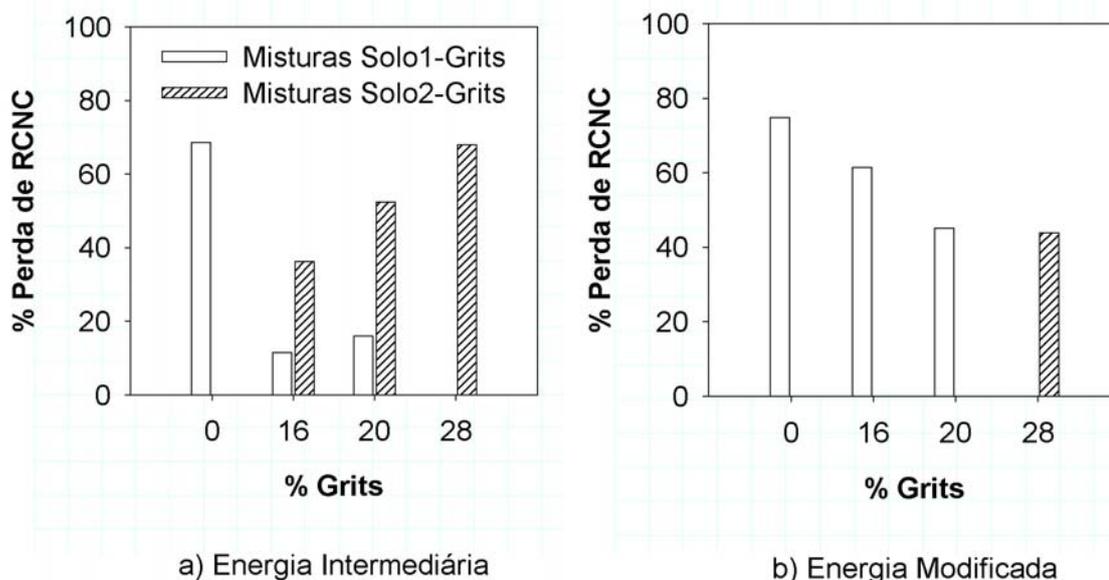
\*Não suportou imersão; \*\*dado errôneo.

Com relação as taxas de perdas dos valores de  $R_t$  das misturas solo 2-grits não foi possível detectá-las, seja pelo fato dos tratamentos não suportarem a imersão, ocorrendo perda de integridade ou amolecimento dos corpos-de-prova compactados e imersos por 4 horas, em água, ou pelo fato de alguns corpos-de-prova ao serem colocados na prensa de compressão simples apresentarem ruptura muito rápida estourando imediatamente ao início da execução da ruptura, não sendo possível registrar os valores de tensão.

Na Figura 5.25 são ilustradas as porcentagens de perdas nos valores de RCNC, devido à condição de saturação, para os solos em suas formas naturais e em misturas com o resíduo grits. O solo 1 compactado na energia intermediária teve uma redução drástica na taxa de perda de resistência pela imersão, que era de aproximadamente 70 % caindo para menos de 20 % quando aditivado com o resíduo grits e curado a 28 dias. Na energia modificada as reduções nas taxas de perdas de resistência pela imersão foram menores pela adição de grits, passando de 80 % para 50 %, caso evidenciado na mistura com 20 % de resíduo curada a 28 dias.

Ainda pela Figura 5.25 é possível notar que o solo 2 tem perda total de RCNC quando submetido à condição de saturação, compactado tanto na energia intermediária quanto na modificada. A adição de resíduo a esse solo, possibilitou a obtenção de valores de RCNC média quando da imersão em água, chegando-se à mínimos de perda quando de compactação na energia intermediária, de menos de 40 %, caso de misturas com 16 % de grits, à máximos de 70 %, caso das misturas com 28 % de resíduo. Essas mesmas misturas quando compactadas na energia modificada possibilitaram obter a taxa percentual de perda de resistência apenas para o teor de 28 % de grits, que ficou na casa dos 50 %.





**Figura 5.25** – Percentual de perda de RCNC dos solos 1 e 2 e das misturas solo 1-grits e solo 2-grits compactadas e curadas a 28 dias.

#### 5.7.4. Conclusões

As misturas solo-grits tiveram seus percentuais de redução dos valores de resistência mecânica, em função da imersão por 4 horas em água, dependentes do tipo de solo, teor de resíduo, energia de compactação e período de cura empregados. Para alguns tratamentos a adição do resíduo aos solos proporcionou maior manutenção dos valores de resistência, com taxas menores de perdas pela condição de saturação quando comparado com os solos em suas formas naturais.

As misturas solo 1-grits tiveram seus comportamentos influenciados pelos trincamentos observados nos corpos-de-prova devido a ação do sódio presente no resíduo facilitando, dessa forma, a penetração de água nos corpos-de-prova. As misturas solo 2-grits não formaram barreira impermeabilizante a penetração da água sendo que na maioria dos tratamentos, principalmente, quando de compactação em energia modificada, não suportaram a imersão ficando evidente que o resíduo grits não proporcionou coesão entre as partículas desse solo.

### 5.7.5. Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq e a FAPEMIG pelo apoio financeiro ao presente projeto, bem como à CAPES e à UFV, respectivamente, pela concessão de bolsa de doutorado e instalações físicas para a execução deste trabalho. Agradece-se, também, a empresa de Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA) pelo fornecimento do resíduo grits.

### 5.7.6. Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.004**: classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ, 1987. 63 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 129**: solos: compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 216**: solo-cimento: determinação da relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 8 p.

FERNANDES, D.C.M. **Viabilidade do uso de alcatrão de madeira de eucalipto na estabilização de solos residuais para fins rodoviários**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 180 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

FERRAZ, R.L. **Contribuição ao estudo da estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

ROHDE, L.; NUÑEZ, W.P.; CERATTI, J.A.P. Utilização da escória de aciaria elétrica como material de pavimentação: variação das características mecânicas em função da composição granulométrica. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., Florianópolis, SC, 2001. **Anais...** Florianópolis, SC:[s.i.], nov. 2001. p. 266-276.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo, SP: PINI, v. 1, 1997. 174 p.

VIEIRA, S.V. **Estabilização de solos com licor negro kraft concentrado para fins rodoviários**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

## **5.8. Influência do tratamento térmico do resíduo grits na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais**

RESUMO – Em estudos que envolvem o tratamento de solos com aditivos químicos com fins rodoviários, merecem especial importância aquelas pesquisas orientadas no sentido de descobrir novos meios de torná-los mais econômicos e, ao mesmo tempo, mais resistentes. No presente trabalho, o resíduo sólido industrial grits, oriundo do processo de extração de celulose, foi aplicado a um latossolo denominado ETA, característico da microrregião de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, com o intuito de melhorar suas características mecânicas para sua aplicação em pavimentos de estradas florestais. O grits, após receber tratamento térmico a 200, 300, 400, 500 e 600 °C, em mufla, foi misturado no teor de 10 %, em peso, ao solo anteriormente citado. Parâmetros geotécnicos, característicos dos ensaios de compactação e resistência à compressão simples, foram utilizados para avaliar o efeito do tratamento térmico nas misturas solo + 10 % grits. Os resultados indicaram que o grits tem potencial para estabilização de solos de pavimentos de estradas florestais, sendo o melhor resultado alcançado para o grits tratado a 600 °C, pois houve ganhos de resistência mecânica.

Palavras-chaves: Estabilização de solos, resíduo sólido industrial, estrada florestal e tratamento térmico.

### **Influence of the thermal treatment of residue grits on the mechanical resistance of a latosol for forest engineering**

ABSTRACT - Road engineering studies involving chemical stabilization of soils deserve special recognition mainly those directed to lowering the costs of forest engineering roads. This work focuses on soil stabilization of a characteristic Latosol from Viçosa, Minas Gerais, Brazil, herein named ETA, using a residue from cellulose industry production, herein called grits. grits content of 10 % related to soil dry weight was used throughout the study after residue thermal

treatment using a furnace at 200, 300, 400, 500 and 600 °C. Geotechnical standard parameters from compaction and unconfined compression tests were used to evaluate the effect of thermal treatment on the mechanical response of soil-grits mixtures. Unconfined compression testing data show that grits is a promising soil stabilizer, mainly after thermal treatment at 600 °C.

Key works: Stabilization of soils, industrial solid residue, forest road, and thermal treatment.

### **5.8.1. Introdução**

A falta de solos com características geotécnicas apropriadas, exigidas pelos órgãos rodoviários para a construção de estradas, torna-se um dos grandes entraves para o setor de transportes no Brasil, visto que maiores volumes e maiores cargas são transportados com maior frequência, a distâncias cada vez mais longas e problemáticas, exigindo que as estradas, pavimentadas ou vicinais, sejam transitáveis em qualquer época do ano. Salientam-se, também, os custos onerosos envolvidos na sua implantação e manutenção.

Com base em dados de 1995 da Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT), Bernucci (1997) relatou que existem no Brasil 1,5 milhões de quilômetros de estradas de terra (vicinais), sendo as estradas pavimentadas pelos poderes públicos federais, estaduais e municipais, com 148.750 km, equivalentes apenas 9 % do total da rede. Machado e Malinovski (1986) estimaram que na década de 80 a extensão da malha brasileira de rodovias florestais era da ordem de 600 mil quilômetros, podendo este número ter aumentado com o decorrer de novas ampliações das empresas florestais.

Todas essas constatações abrem um campo amplo para a busca de materiais alternativos para a construção rodoviária, em particular com um direcionamento aos subprodutos da indústria florestal, visando o emprego destes na estabilização dos solos localizados no subleito e nas margens das estradas florestais e, quando aplicáveis, das vicinais.

No entanto, o interesse pelo emprego de materiais não-tradicionais, entendendo-se como produtos tradicionais o cimento Portland, a cal e os asfaltos artificiais, requer o desenvolvimento de programas extensivos de experimentação de laboratório e campo, de modo a garantir que os novos materiais de construção apresentem os padrões de engenharia exigidos pelas normas técnicas, bem como o desenvolvimento de técnicas construtivas adequadas às características tecnológicas destes novos materiais, do ponto de vista técnico e econômico.

Uma alternativa tecnológica de material para a construção rodoviária e, principalmente, para fins de aplicação em estradas florestais é o grits, subproduto oriundo do processo de produção da celulose, constituindo assim, fruto das experimentações de laboratório. O objetivo do trabalho foi analisar, em laboratório, os parâmetros de compactação e resistência à compressão simples do grits, tratado termicamente e aplicado a um latossolo característico da microrregião de Viçosa-MG.

## **5.8.2. Revisão de literatura**

### **5.8.2.1. Parâmetros geotécnicos de interesse rodoviário**

Machado (1986) e Fernandes (2000) destacaram a granulometria, os limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade), o equivalente de areia, a compactação, o índice de suporte Califórnia (CBR) e a resistência a compressão não confinada (RCNC) como os parâmetros geotécnicos considerados de suma importância para caracterização geotécnica dos solos para emprego como subleito ou camadas de pavimento de rodovias. Fernandes (2000) destacou, ainda, a permeabilidade como uma propriedade de grande importância das misturas estabilizadas, quando usadas na construção de estradas.

### 5.8.2.2. Estabilizantes químicos tradicionais

Um material atua como estabilizante químico de um solo, modificando as suas propriedades físicas e químicas, quando, ao ser adicionado a este, reage como agente impermeabilizante, dispersante ou agregante dos materiais presentes neste solo (LAMBE; MICHAELS, 1954). Para McCarthy (1977) a estabilização química refere-se ao procedimento no qual um material cimentante, ou qualquer material químico, é adicionado ao solo natural, para melhorar uma ou mais de suas propriedades de engenharia. Gidigasu (1976) considera as seguintes variáveis que afetam a estabilização de solos: i) solos: propriedades físicas, químicas e físico-químicas, características da mistura e umidade após a mistura; ii) material estabilizante: quantidade e propriedades; iii) mistura: tipo, método e temperatura; e iv) compactação e cura do produto estabilizante: umidade ótima, método e grau de compactação e cura.

Este tipo de pesquisa teve seu marco durante a 2ª Guerra Mundial, quando a rápida construção de rotas militares era de grande importância. Com poucas exceções, os métodos de estabilização química de solos ainda não podem ser completamente avaliados nos aspectos de física do solo, tecnologia, eficiência e economia, pois existem somente poucos métodos que têm sido comumente aceitos. Perdura, ainda, a necessidade de pesquisas, experimentações e observações práticas antes da aceitação generalizada de um determinado método de estabilização (AFFLECK, 1955; KÉDZI, 1979). Nas últimas décadas, tem ocorrido um rápido aumento no uso de estabilizantes químicos; tais aditivos conferem um substancial melhoramento das propriedades de engenharia do solo, quando comparados à estabilização mecânica (MERLIM; RICHARD, 1982).

São consideradas de uso tradicional, e portanto já padronizadas pelo DNIT (*Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes*), apenas as misturas solo-cimento. A cal hidratada, consagrada internacionalmente, é um dos produtos que podem ser utilizados como material de construção de estradas para melhorar as qualidades de um solo, apesar de não ter seu uso difundido no Brasil, estando ainda na fase de estudo para este fim (FERNANDES, 2000). Lima (1981) e Ferraz (1994) relataram que solos

estabilizados com a cal apresentaram melhorias nas propriedades elásticas e aumento no CBR e na resistência ao cisalhamento.

### **5.8.2.3. Aplicação de resíduos industriais**

Em 1907, Austim Thomas Byrne discutiu o uso da água do mar e de sais deliqüescentes e, em 1909, o *Bureau of Public Roads* investigou a utilização do licor derivado do processamento de sulfito e do melaço residual de indústria açucareira. O cloreto de cálcio veio a ser usado na contenção de poeira no leito de ruas de macadame, por volta de 1912 (HONGENTOGLER, 1937).

Estudos de laboratório sobre métodos de alterações das propriedades do solo, com a aplicação proveitosa de diversos resíduos industriais, têm conduzido a muitas propostas para a estabilização de solos (INGLES; METCALF, 1977). Um grande número de produtos químicos e subprodutos industriais tem sido experimentado para estabilização dos solos (SINGH, 1967). Segundo Sherwood (1961), os resíduos industriais são agentes estabilizantes de baixo custo, pois estão prontamente disponíveis nas áreas onde são produzidos. Obviamente, a distância de transporte pode aumentar o custo desses produtos, tornando o seu uso antieconômico. O autor afirmou, também, que o cloreto de cálcio, o licor negro e as cinzas volantes (fly-ash), estas um resíduo das estações de energia elétrica movidas a carvão mineral, são produzidos em quantidade suficiente para serem aplicados na estabilização.

Segundo Lambe (1955) um obstáculo da expansão do tratamento químico de solos era a pouca comunicação entre as fábricas e os consumidores, e pode-se afirmar que esta situação ainda perdura nos dias de hoje. Na prática comercial, nenhum desses resíduos foi ainda capaz de suplantar em volume de utilização os três principais aditivos: cal, cimento e betume.

Para Ingles e Metcalf (1977) algumas alternativas de estabilizantes possuem um proveitoso campo de aplicação, em certas circunstâncias especiais, principalmente nos casos em que as soluções temporárias são aceitáveis ou as condições são tais que os altos custos podem ser justificados.

### **5.8.3. Materiais e métodos**

#### **5.8.3.1. Materiais**

O solo estudado é um Latossolo Vermelho-Amarelo, proveniente das imediações da Estação de Tratamento de Água (ETA) da UFV. Este solo é comum nos subleitos das rodovias da região de Viçosa, MG. Localiza-se nos topos de elevações com relevo plano. Apresenta um expressivo horizonte B profundo, poroso e bem drenado, com granulometria argilo-areno-siltosa, podendo ocorrer também como argilo-silto-arenosa. As amostras foram coletadas no terço inferior de um talude de, aproximadamente, 6 m de altura.

Os critérios utilizados na seleção desse solo foram: (i) ele deveria constituir formações representativas e de volumes significativos no universo de solos da região de Viçosa e (ii) em seu estado natural, ele não poderia ser empregado como camadas de sub-base de pavimentos rodoviários flexíveis, segundo as recomendações do DNIT.

O resíduo estudado é o grits, um resíduo sólido industrial gerado no processo de fabricação da celulose. Este resíduo foi tratado termicamente em mufla durante 1 hora, nas temperaturas de 200, 300, 400, 500 e 600 °C, visando aumentar a sua reatividade. Foi utilizada a porção do material que passou na peneira de malha 2 mm (Nº 10).

#### **5.8.3.2. Métodos**

Os procedimentos de campo adotados na coleta da amostra de solo consistiram na extração, no ensacamento e no transporte da amostra para o laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa. Após esta etapa, a amostra foi seca ao ar e passada na peneira de malha 4,8 mm. Em seguida determinou-se sua umidade hidrocópica e, então, ela foi armazenada em sacos plásticos, para posterior utilização.

A dosagem de grits utilizada, em relação a massa de solo seco, foi de 10 %, dosagem esta escolhida com base em ensaios preliminares.



Os ensaios realizados com a amostra de solo natural e mistura solo + 10 % grits, em diferentes tratamentos térmicos, abrangeram as seguintes determinações: (i) caracterização - ensaios de granulometria conjunta, limites de Atterberg e massa específica dos grãos de solo; (ii) análises químicas do solo ETA e do grits; (iii) parâmetros ótimos de compactação, na energia do ensaio de compactação Proctor normal, utilizando o equipamento de Mini-CBR e (iv) resistência à compressão não confinada com moldagem de corpos-de-prova compactados em energia equivalente à do Proctor normal, na umidade ótima, determinada previamente no ensaio de compactação correspondente à energia do Proctor normal. Os corpos-de-prova das misturas, moldados na energia do ensaio de compactação Proctor normal no teor de umidade  $W_{ót.}$ , não foram submetidos a um processo de cura, em câmara úmida, antes de serem submetidos aos ensaios de resistência à compressão não confinada (RCNC).

A seqüência de operações para execução dos ensaios de compactação e de compressão simples foram: (i) solo natural + água – repouso por 1 hora antes da compactação e (ii) solo + 10 % grits – repouso de 1 hora; em seguida, colocava-se a água – repouso de mais 1 hora antes do início da compactação. Foram moldados corpos-de-prova com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura para compactação, e 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para a RCNC. Os corpos-de-prova não curados e não submetidos à imersão em água foram moldados em triplicata, sendo feita a medição do diâmetro e da altura de cada um em três posições; posteriormente fez-se o rompimento em prensa de compressão simples, com velocidade de subida do prato de 1,27 mm/min.

#### **5.8.4. Resultados e discussão**

##### **5.8.4.1. Caracterização e classificação do solo ETA**

No Quadro 5.17, estão os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica, bem como a respectiva classificação do solo ETA pelos sistemas TRB (*Transportation Research Board*) e USC (*Unified Soil Classification*).

Nota-se que esse solo apresenta fração argila elevada (60 %), que é considerada por Ferraz (1997) como a principal origem dos fenômenos físico-químicos que se processam no solo. O valor elevado do LL (limite de liquidez), 75%, pode ser um indicativo de material suscetível ao aumento de volume.

Pelo sistema TRB, o solo ETA se enquadra no grupo A-7-5, com índice de grupo 20, característico de materiais empregados em subleitos de estradas, com um comportamento de fraco a pobre. No Quadro 5.18 estão os resultados da caracterização química das amostras do solo ETA.

**Quadro 5.17 - Granulometria, limites de Atterberg, peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ ) e classificação do solo ETA pelos sistemas TRB e USC**

Granulometria (%)			Limites de Atterberg (%)			$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Classificação	
Argila	Silte	Areia	LL	LP	IP		TRB	USC
60	12	28	73	40	33	27,63	A-7-5(20)	MH

**Quadro 5.18 – Caracterização química das amostras do solo ETA**

Elementos – Concentração em %											
Zn	Cu	Mn	Ca	Mg	Fe	Cd	Cr	Pb	SiO <sub>2</sub>	Na	K
0,004	0,007	0,072	39,50	0,091	0,81	ND	ND	ND	40,0	7,0	0,8

\*ND – abaixo do limite de detecção do equipamento de absorção atômica.

#### 5.8.4.2. Caracterização química do grits

No Quadro 5.19 tem-se o resultado da análise química das amostras de grits. Observa-se que o teor de cálcio suplanta, com exceção da sílica (SiO<sub>2</sub>), os teores dos demais elementos químicos, devendo ser ressaltado que 42 % do cálcio presente no grits encontra-se na forma de óxido de cálcio (CaO), um dos mais significativos componentes do resíduo para estabilização de solos.

**Quadro 5.19** – Caracterização química das amostras do resíduo industrial grits

Elementos – Concentração em %											
Zn	Cu	Mn	<b>Ca</b>	Mg	Fe	Cd	Cr	Pb	<b>SiO<sub>2</sub></b>	Ni	Al
0,005	ND	ND	<b>20,0</b>	ND	0,043	ND	ND	ND	<b>79,0</b>	0,001	ND

\*ND – abaixo do limite de detecção do equipamento de absorção atômica.

#### 5.8.4.3. Avaliação do tratamento térmico nas características de compactação

Para avaliar a reatividade do solo ETA em presença do grits a 10 %, sem e com tratamento térmico, foi analisado o efeito da adição de grits nas características de compactação do solo. Ao analisar o Quadro 5.20, observa-se que a ação do tratamento térmico do resíduo grits promoveu uma pequena melhoria nas características de compactação do solo ETA, o que pode ser comprovado pelo decréscimo do teor ótimo de umidade ( $W_{ót.}$ ) e pelo acréscimo da massa específica seca máxima ( $\gamma_{dmax}$ ), em relação ao solo natural. Não houveram variações significativas no par de valores de teor de umidade ótima e peso específico em relação ao encontrado para a mistura solo + 10 % grits sem tratamento térmico (28,50 % e 14,32 kN/m<sup>3</sup>).

**Quadro 5.20** - Parâmetros de compactação do solo natural e das misturas solo + 10 % grits, na energia do ensaio Proctor normal

Amostra	$W_{ót}$ (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )
Solo Natural	31,80	13,53
Solo + 10 % Grits <b>STT*</b>	28,50	14,32
Solo + 10 % Grits <b>200 °C</b>	28,20	14,45
Solo + 10 % Grits <b>300 °C</b>	28,40	14,41
Solo + 10 % Grits <b>400 °C</b>	29,29	14,30
Solo + 10 % Grits <b>500 °C</b>	29,50	14,22
Solo + 10 % Grits <b>600 °C</b>	29,10	14,34

\*STT = sem tratamento térmico

#### 5.8.4.4. Avaliação do efeito do tratamento térmico na RCNC

A comparação dos resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada (RCNC), realizados para as misturas solo + 10 % grits, encontra-se ilustrada no Quadro 5.21 e na Figura 5.26. Os resultados mostraram que houve modificações na resistência mecânica para todos os tratamentos analisados, evidenciando a influência do tratamento térmico no grits. O melhor resultado foi obtido para o grits tratado a 600 °C, pois houve ganhos significativos tanto em relação ao solo no seu estado natural como em relação à mistura solo + 10 % grits sem tratamento térmico. Ressalta-se que não foram aplicados períodos de cura nos corpos-de-prova, o que poderia resultar em maiores ganhos na resistência mecânica das misturas. Pela Figura 5.26 observa-se a variação das propriedades elásticas para as misturas solo-grits, mostrando a tensão de ruptura dos corpos-de-prova e a correspondente deformação obtida nesse ponto.

**Quadro 5.21** – RCNC média, em kPa, para o solo ETA natural e em mistura com o teor de 10 % de grits, com e sem tratamento térmico, referente à energia do ensaio Proctor normal

Mistura	RCNC (kPa)	Deformação (%)
Solo Natural	241	3,90
Solo + 10 % grits <b>STT*</b>	489	5,37
Solo + 10 % grits <b>200 °C</b>	445	4,65
Solo + 10 % grits <b>300 °C</b>	659	4,88
Solo + 10 % grits <b>400 °C</b>	575	4,46
Solo + 10 % grits <b>500 °C</b>	632	4,16
Solo + 10 % grits <b>600 °C</b>	<b>872</b>	<b>4,88</b>

\*STT = sem tratamento térmico

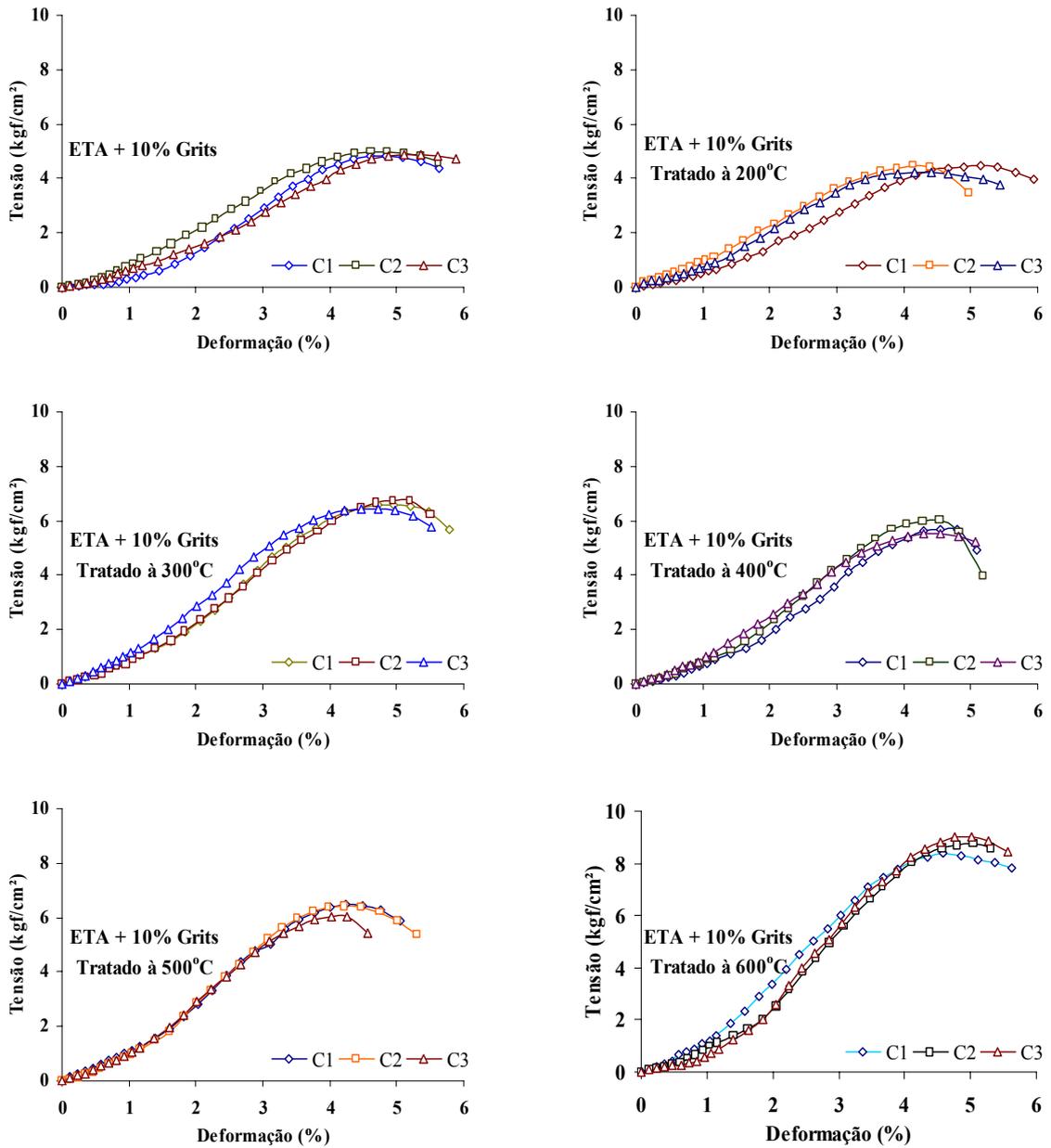
#### 5.8.4.5. Comparação do efeito do tratamento térmico nas misturas solo-grits com aditivos químicos, tradicionais e subprodutos, na RCNC, para o solo ETA

No Quadro 5.22 estão os resultados de uma comparação entre os aditivos tradicionais e subprodutos e o grits tratado termicamente a 600 °C, ambos aplicados ao solo ETA, na energia de compactação referente ao ensaio Proctor normal e período de cura igual a zero. Nota-se que o valor obtido para o grits a 600 °C suplantou até mesmo os valores obtidos pela cal e pelo cimento, estabilizantes tradicionais, na dosagem de 2 %. Os melhores resultados obtidos por Vieira (1994) e Fernandes (2000), com licor negro kraft e alcatrão de madeira de eucalipto, ambos subprodutos também da indústria florestal, tiveram valores bem inferiores aos obtidos pelo grits a 600 °C.

**Quadro 5.22** – Comparação da RCNC, em kPa, entre estabilizantes tradicionais e subprodutos industriais, com o grits tratado à 600 °C, ambos aplicados ao solo ETA

Mistura	RCNC (kPa)
<i>ETA Natural</i>	219
<i>Estabilizantes Tradicionais</i>	
ETA + 2 % cal*	356
ETA + 2 % cimento*	448
<i>Subprodutos Industriais</i>	
ETA + 2 % alcatrão (Man-170)*	282
ETA + 0,25 % licor negro kraft**	199
<b>ETA + 10 % grits à 600 °C</b>	<b>872</b>

\*FERNANDES (2000) e, \*\*VIEIRA (1994)



**Figura 5.26** – Curvas tensão x deformação para o solo ETA + 10 % grits, sem tratamento e tratado à 200, 300, 400, 500 e 600 °C, em mufla. C1, C2 e C3 representam os três corpos-de-prova usados no estudo.

### 5.8.5. Conclusões

O resíduo sólido industrial grits mostrou-se potencialmente utilizável como agente estabilizante do solo pesquisado para pavimentos de estradas

florestais. Em termos de ganhos de resistência mecânica, o tratamento térmico a 600 °C foi o mais eficiente.

### **5.8.6. Agradecimentos**

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq e a FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto, bem como, à CAPES pelo fornecimento da bolsa de Doutorado. Deve-se igual agradecimento à Empresa de Celulose Nipor Brasileira (CENIBRA) pelo fornecimento do resíduo.

### **5.8.7. Referência bibliográficas**

BERNUCCI, L. L. O Módulo resiliente de solos lateríticos e sua aplicação ao dimensionamento de pavimentos de vias de baixo volume de tráfego. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO, 1., Rio de Janeiro, 1997. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: [s.i.], 1997. p. 491-508.

BUENO, B. S.; LIMA, D. C. Técnicas de estabilização de solos com fins rodoviários. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE FLORESTAL, 1., 1991, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa, MG: SIF/UFV, 1991. p. 143-183.

FERNANDES, D. C. M. **Viabilidade do uso de alcatrão de madeira de eucalipto na estabilização de solos residuais para fins rodoviários.** Viçosa, MG: UFV, 2000. 124 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)—Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

GIDIGASU, M. D. **Laterite soil engineering.** Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.

HOGENTOGLER, C. A. **Engineering properties of soil.** New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 1937. 434 p.

INGLES, O. G.; METCALF, J.B. **Soil stabilization principles and practice.** S.I., Butterwarhs & Company, 1977. 374 p.

KÉDZI, A. **Stabilization earth roads.** Amsterdam: Elsevier Scientific, 1979. 327 p.

LAMBE, T. W.; MICHAELS, A. Altering soil properties with chemicals. **Chemical Engineering**, n. 6, v. 32, p. 488-492, 1954.

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

MACHADO, C. C.; MALINOVSKI, J. R. **Rede viária florestal.** Curitiba, PR: FUPEF, 1986. 157 p.

McCARTHY, D. F. P. E. **Essential of soil mechanics and foundations.** Virginia: Reston Publishing Company, 1977. 505 p.

MERLIM, G. S.; RICHARD, L. H. **Soil engineering.** São Paulo, SP: Harper & Row Publishers, 4. ed., 1982. 819 p.

SHERWOOD, P. T. Soil stabilization by the use of chemical admixtures. **Roads and Road Constructions**, s.i., p. 102-110, 1961.

SINGH, A. **Soil engineering in theory and practice.** London: Asia Publishing House, 1967. 653 p.

VIEIRA, S. V. **Estabilização de solos com licor negro kraft concentrado para fins rodoviários.** Viçosa, MG: UFV, 1994. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)–Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.



### **5.9. Caracterização tecnológica de misturas solo-grits para pavimentos de estradas florestais: influência do tratamento térmico do grits na resistência mecânica das misturas**

RESUMO – Neste artigo analisa-se a influência do tratamento térmico do resíduo grits na resistência mecânica de misturas solo-grits, para aplicações em pavimentos de estradas florestais. O programa de ensaios de laboratório englobou: (i) dois solos residuais de gnaisses da Zona da Mata Norte de Minas Gerais; (ii) um resíduo da indústria da celulose denominado *grits* que é composto de cal não-hidratada e areia, entre outros produtos; (iii) amostras de grits submetidas ao tratamento térmico em mufla sob temperaturas de 600, 700, 800 e 900° C antes da moldagem dos corpos-de-prova das misturas solo-grits; (iv) corpos-de-prova das misturas preparadas com o grits tratado termicamente, com 24% de grits em relação ao peso seco dos solos, compactados nas energias dos ensaios Proctor intermediário e Proctor modificado e curados por 7 e 28 dias em câmara úmida, sob condições de, aproximadamente, 22° de temperatura e 100 % de umidade relativa do ar; (v) imersão completa dos corpos-de-prova das misturas em água antes da determinação de suas resistências à compressão não-confinada em ensaios de compressão não-confinada. Os resultados obtidos no programa de ensaios de laboratório indicaram que o tratamento térmico produziu amostras de grits mais reativas, podendo-se associar melhor desempenho mecânico às temperaturas de 800 e 900° C, para o solo 1, e 800° C, para o solo 2.

Palavras-chave – estabilização de solos, resíduo grits, tratamento térmico, estradas florestais.

**Technological characterization of soil-grits mixtures for forest road pavements: influence of grits thermal treatment on the mechanical strength of mixtures**

**ABSTRACT** – This paper is directed to the analysis of the influence of grits thermal treatment in the mechanical strength of soil-grits mixtures. The laboratory testing program encompassed: (i) two residual gneiss soils from the North Forest Zone of Minas Gerais State; (ii) a waste from the cellulose industry named *grits* which is composed by non-hydrated lime and sand, among others by-products; (iii) grits samples submitted to thermal treatment in muffle at the temperatures of 600, 700, 800 and 900° C before soils-grits specimens preparation; (iv) soils-grits specimens containing 24 % of treated grits regarding soils dry unit, compacted at the intermediate and modified Proctor compaction effort, and cured during 7 and 28 days in a moist room capable of maintaining the temperature of 22° C (70±3 F) and relative humidity close to 100 %; (iv) complete immersion in water of cured specimens before testing them for compressive strength by the unconfined compression test. Data from the laboratory testing program support that: (i) thermal treatment produced more reactive grits samples; (ii) best soils-grits mechanical responses were associated to grits treatment temperatures of 800 and 900 °C for soil 1, and to 800 °C for soil 2.

**Key Works** – soils stabilization, grits waste, treatment thermal, forest roads.

### **5.9.1. Introdução**

Toneladas de resíduos são descartados pela indústria de celulose e papel sendo cada um desses subprodutos possuidores de composição química das mais variadas possíveis (CPRH, 1998). A finalidade final desses resíduos, quando não são reaproveitados no processo industrial são os aterros industriais. Consoli (2003) chamou a atenção para a disposição de resíduos em aterros, descrevendo que além do limitado espaço para a disposição incorre, também, os riscos ambientais passíveis de ocorrência, como contaminação do lençol freático e do solo.

Matos e Costa (1996) mencionaram que devido às necessidades de se encontrar alternativas para a disposição dos resíduos gerados no processo industrial de celulose, estudos de técnicas de manejo, bem como, aplicação

devem ser executados de forma a permitir a incorporação segura ao solo, com mínimo impacto sobre o meio ambiente. Albuquerque (2002) mencionou que certos resíduos estão sendo utilizados por produtores rurais com o objetivo de correção da acidez do solo, pelo fato de apresentarem hidróxido em sua composição; os autores ressaltaram, também, que nenhum critério é adotado para quantificar a dose a ser aplicada, o que pode comprometer as propriedades físicas e químicas do solo. Estudos nesse sentido, também, foram desenvolvidos por Bellote e Silva et al., (1998) que apontaram para uma geração de 48 t de resíduos para cada 100 t de celulose produzida, destacando a inviabilidade da opção de disposição em aterro devido aos altos custos para implantação e manutenção, e aos cuidados especiais no manuseio.

Apresenta-se uma das etapas de um estudo sobre a aplicabilidade do uso de um resíduo da indústria de celulose, gerado no processo de caustificação da soda cáustica, na estabilização de solos, com vistas à melhoria de subleitos de estradas florestais. O resíduo denominado grits, foi submetido à tratamentos térmicos com vistas à melhoria de sua reatividade, sendo o objetivo do aqui, avaliar justamente os reflexos desse tratamento na resistência mecânica de misturas solo-grits compactadas e curadas.

## **5.9.2. Materiais e métodos**

### **5.9.2.1. Materiais**

As duas amostras de solo utilizadas nesse estudo representam solos residuais característicos da microrregião de Viçosa-MG, sendo designados, por solo 1 e solo 2. A amostra 1, de avançada evolução pedológica, é classificada como Latossolo variação *Una*, profundo, bem drenado, proveniente do intemperismo de gnaisse, de ocorrência nas encostas mais suavizadas e com predominância da composição mineralógica presente nos argilominerais 1:1 e sesquióxidos de ferro e alumínio. O solo 2 é arenoso, de origem saprolítica, quartzoso, com horizonte C profundo e coloração acinzentada. O Quadro 5.23 traz as características físicas dessas amostras, bem como as respectivas

classificações rodoviárias pelo sistema americano TRB (*Transportation Research Board*).

**Quadro 5.23** – Ensaio físicos e classificação TRB dos solos de Viçosa-MG

Solo	Granulometria (%)			$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Limites de Atterberg (%)		Classificação TRB
	Areia	Silte	Argila		LL	IP	
1	23	7	70	27,63	73	33	A-7-5 (20)
2	72	22	6	27,01	27	10	A-2-4 (0)

Empregou-se, também, neste estudo, uma amostra do resíduo sólido industrial grits. Essa amostra foi obtida durante o processo de recuperação da soda cáustica na extração de celulose de madeiras de eucalipto e fornecida pela empresa de Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA), situada no Estado de Minas Gerais. O local de coleta do resíduo foi no pátio da empresa logo após a sua geração; optou-se por este local, visto que, no aterro onde o mesmo é disposto, atualmente, sua constituição química pode ser alterada, devido às intempéries climáticas.

#### 5.9.2.2. Metodologia de laboratório

A dosagem de resíduo grits utilizada foi de 24 %, calculada em relação à massa de solo seco. A escolha desta se deveu aos resultados de resistência mecânica realizados anteriormente com solos e misturas solo-grits.

Balizado em resultados de estudos de resistência com as misturas solo-grits obtidos por Machado e Pereira et al., (2003) os seguintes tratamentos térmicos foram aplicados ao grits: 600, 700, 800 e 900 °C. Para tanto, o resíduo foi colocado e espalhado em uma bandeja de aço inoxidável no quantitativo de 10 kg, e levado para a mufla, com controle interno de tempo e temperatura, onde permaneceu após atingida automaticamente a temperatura requerida, pelo tempo de 1 hora. No Quadro 5.24 são apresentadas as perdas de massa, devido a cada tratamento térmico (TT), em que foi submetido o resíduo grits.

**Quadro 5.24** – Perdas de massa, em %, do resíduo grits submetido à TT

Perda de Massa (%)	Tratamento Térmico (°C)			
	600	700	800	900
Água	9,09	9,09	9,09	9,09
Outras	1,15	2,69	4,33	10,03
Total	10,24	11,78	13,42	19,12

Ressalta-se que o teor de umidade em que o grits se encontrava era de aproximadamente 10 % e, onde está explícito no Quadro 5.24, o termo *outras*, subentende-se dentre as perdas, a por calcinação, onde se elimina o CO<sub>2</sub>, dos carbonatos de cálcio presentes no resíduo.

Com as duas amostras de solo estudadas foram produzidas as misturas de solo mais 24 % de grits, procedendo-se à adição do resíduo aos solos, e posterior incorporação de água, em quantitativos pré-definidos para se atingir teores de umidade da mistura desejáveis. As misturas assim produzidas foram acondicionadas em sacolas plásticas devidamente fechadas e deixadas em repouso por 24 e 0 horas, respectivamente, em se tratando das misturas solo 1-grits e solo 2-grits; decorrido este tempo, foram confeccionados os corpos-de-prova. A adoção dos períodos de repouso, anterior à compactação e confecção de corpos-de-prova das misturas, baseou-se em estudos de resistência anteriores desenvolvidos com as misturas solo-grits.

Após a confecção os corpos-de-prova foram devidamente selados para manutenção do teor de umidade, identificados e colocados em câmara úmida, com umidade de  $100 \pm 2$  % e temperatura ambiente de aproximadamente 22,5 °C, pelos períodos de 7 e 28 dias, o que permitiu analisar o aspecto reatividade do grits com os solos.

Respeitados os períodos de cura úmida os corpos-de-prova foram submetidos a dois tratamentos: (i) imediatamente rompidos em prensa de compressão simples e (ii) imersos em água pelo período de 4 horas, conforme recomendação da Norma DNIT (1994, ME 201) para as misturas solo-cimento.

Realizaram-se os seguintes ensaios geotécnicos: (i) ensaio de compactação (DNIT, 1994 – ME 129), com os solos em suas formas naturais e

em misturas com 24 % de grits, para determinação do par de valores ótimos de compactação ( $W_{ót}$  e  $\gamma_{dmax}$ ), empregando-se para tanto, das energias referentes aos ensaios Proctor intermediário e modificado e (ii) ensaio de resistência a compressão não confinada (RCNC) com compactação dos corpos-de-prova nos teores de umidade pré-definidos no ensaio de compactação fazendo-se uso do cilindro padrão de Proctor ( $d = 5 \text{ cm}$  e  $h = 12 \text{ cm}$ ), segundo a norma DNIT (1994, ME 129).

Com relação ao ensaio de RCNC, os corpos-de-prova foram compactados dinamicamente, por placas e em camadas, com soquete de 4,5 kg. O controle tecnológico da compactação foi feito com base no grau de compactação (GC), aceitando-se um desvio de  $100 \pm 3 \%$ . Foram confeccionados três corpos-de-prova para cada tratamento, que após curados e submetidos as condições de saturação, foram rompidos em prensa de compressão simples, tomando-se como valor de resistência, a média do ponto de ruptura dos três corpos-de-prova.

### **5.9.3. Resultados e Discussão**

#### **5.9.3.1. Parâmetros ótimos de compactação**

Os parâmetros umidade ótima ( $W_{ót}$ ) e peso específico seco máximo ( $\gamma_{dmax}$ ) dos solos e das misturas solo-grits, determinados nos ensaios de compactação, no ponto de máximo das curvas assim definidas, encontram-se descritos no Quadro 5.25. Notaram-se que a adição de grits aos solos 1 e 2 levou a comportamentos distintos quanto às características de compactação, ou seja, no solo 1 proporcionou redução significativa da  $W_{ót}$  e aumento do  $\gamma_{dmax}$  considerando-se ambas energias de compactação, e no solo 2 ocorreu o inverso, com aumento de pouco mais de 1 % na  $W_{ót}$  e diminuição no  $\gamma_{dmax}$ , fato esse, também, observado para as energias intermediária e modificada. Razões para isso, pode ser o efeito da adição de grits na granulometria dos solos.

**Quadro 5.25** – Parâmetros ótimos de compactação das misturas solo-grits

Misturas	Energia de Compactação			
	Intermediária		Modificada	
	$W_{ót}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{ót}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m <sup>3</sup> )
Solo 1 Natural	28,87	14,58	26,49	15,37
Solo 1 + 24 % grits	25,85	15,20	22,75	16,16
Solo 2 Natural	11,38	18,33	9,90	19,01
Solo 2 + 24 % grits	12,37	18,13	11,24	18,59

### 5.9.3.2. Avaliação da resistência mecânica

Analisaram-se, em primeira instância, os ganhos proporcionados nos valores de RCNC devido ao tratamento térmico do resíduo grits, nas misturas solo-grits compactadas. Para tanto, apresenta-se no Quadro 5.26, os resultados de RCNC, considerando-se apenas as misturas compactadas na energia intermediária e curadas a 7 dias, sem imersão em água por 4 horas, antes do rompimento em prensa.

Notaram-se para as misturas solo 1-grits, que para todos os tratamentos térmicos do resíduo, as respostas de resistência obtidas foram superiores aos resultados encontrados para a mistura empregando-se o grits na sua forma pura, ou seja, sem tratamento térmico, evidenciando o efeito positivo da temperatura. Tomando-se por base os ganhos de RCNC em relação ao solo 1, em sua forma natural, notaram-se que esses só ocorreram à partir do tratamento térmico a 700 °C, atingindo-se um máximo à 800 °C, com um aumento no valor de RCNC de aproximadamente 39 %.

Para as misturas solo 2-grits, com exceção do tratamento térmico a 900 °C, para todos os demais ocorreram aumentos nos valores de RCNC em relação ao resíduo utilizado sem tratamento térmico nas misturas. Para todos os tratamentos, seja com o resíduo na sua forma pura, ou submetido ao efeito de temperaturas elevadas, houveram ganhos nos valores de RCNC, devido a adição de grits ao solo 2; para as misturas solo 2 + 24 % grits sem tratamento térmico, os ganhos foram de aproximadamente 64 %, entretanto, quando empregou-se nessas misturas grits tratado termicamente, notaram-se ganhos

muito mais elevados, atingindo-se um máximo aos 800 °C, onde o valor de RCNC foi de aproximadamente 394 % maior do que o valor de resistência encontrado para o solo 2 sem adição de grits.

**Quadro 5.26** – RCNC média, em kPa, para as misturas solo + 24 % grits compactadas na energia intermediária e curadas a 7 dias, com o resíduo submetido à tratamentos térmicos, em mufla

Grits Tratamentos Térmicos	Mistura Solo 1 - Grits		Mistura Solo 2 - Grits	
	RCNC		RCNC	
	Valor em kPa	% Ganho**	Valor em kPa	% Ganho**
STT*	189,26	-	276,04	64,47
600 °C	369,57	-	389,60	132,12
700 °C	492,99	14,57	619,38	269,03
800 °C	596,92	38,72	828,14	393,41
900 °C	565,13	31,33	216,44	28,96

\*Sem Tratamento Térmico; \*\*em relação ao solo em sua forma natural, compactado na energia referente ao ensaio Proctor intermediário.

### 5.9.3.3. Influência da energia de compactação

O efeito proporcionado nos valores de RCNC das misturas solo + 24 % grits tratado termicamente e curadas a 7 dias, devido ao aumento do esforço de compactação, pode ser observado no Quadro 5.27. Para as misturas solo 1 + 24 grits tratado termicamente, notaram-se que o tratamento térmico efetuado no resíduo grits, também, teve um efeito positivo quando de compactação em energia modificada, visto que, para todos os tratamentos térmicos houveram ganhos de RCNC quando comparado com a mistura envolvendo o resíduo na sua forma natural, ou seja, sem tratamento térmico, chegando-se a um máximo com o grits submetido a temperatura de 800 °C (RCNC  $\cong$  1630 kPa), onde o valor de RCNC foi aproximadamente 5<sup>1/2</sup> vezes maior. Com relação aos ganhos de resistência em relação ao solo 1 em sua forma natural, compactado na energia modificada, em todas as misturas solo 1 + 24 % grits tratado termicamente houveram aumentos no valor de RCNC, condição que a mistura envolvendo solo 1 e grits não tratado não



possuía; no aumento máximo do valor de RCNC (grits a 800 °C), se atingiu 86,19 % de ganho. O aumento da energia de compactação teve um efeito positivo, em termos de resistência mecânica das misturas solo 1-grits, o que proporcionou para todos os tratamentos ganhos nos valores de RCNC superiores a 100%, sendo que para a mistura solo 1 mais grits a 600 °C, atingiu-se uma taxa de incremento de aproximadamente 220 %. Ressalta-se que essa condição, também, não foi atingida para a mistura do solo 1 com grits sem tratamento térmico.

As misturas solo 2 + 24 % grits tratadas termicamente tiveram os seguintes comportamentos com relação ao parâmetro RCNC, quando de compactação em energia modificada: (i) notaram-se aumentos nos valores, em relação a mistura com grits não tratado, até a temperatura de 800 °C, onde se atingiu valor máximo (RCNC  $\cong$  900 kPa) e à partir do qual, ocorreu queda brusca (TT de 900 °C); (ii) a taxa percentual de ganho em relação ao solo 2 em sua forma natural, considerando-se o TT de 800 °C, foi de aproximadamente 200 %, ressaltando-se que a 900 °C, os valores de resistência foram inferiores ao do solo 2 sem adição de resíduo e com 24 % grits sem tratamento, não se observando portanto, ganhos nos valores de RCNC e (iii) com relação a

**Quadro 5.27** – RCNC média, em kPa, para as misturas solo + 24 % grits compactadas na energia modificada e curadas a 7 dias, com o resíduo submetido à tratamentos térmicos, em mufla

Grits Tratamentos Térmicos	Mistura Solo 1 - Grits			Mistura Solo 2 - Grits		
	RCNC			RCNC		
	Valor em kPa	% Ganho		Valor em kPa	% Ganho	
		SN**	EI***		SN**	EI***
STT*	297,07	-	56,96	542,34	85,99	96,47
600 °C	1175,70	34,02	218,13	742,26	154,55	90,52
700 °C	1042,28	18,81	111,42	783,36	168,64	26,47
800 °C	1633,35	86,19	173,62	902,55	209,52	8,99
900 °C	1413,76	61,16	150,17	106,59	-	-

\*Sem Tratamento Térmico; \*\*em relação ao solo em sua forma natural, compactado na energia referente ao Proctor Modificado; \*\*\*em relação à energia Proctor Intermediária

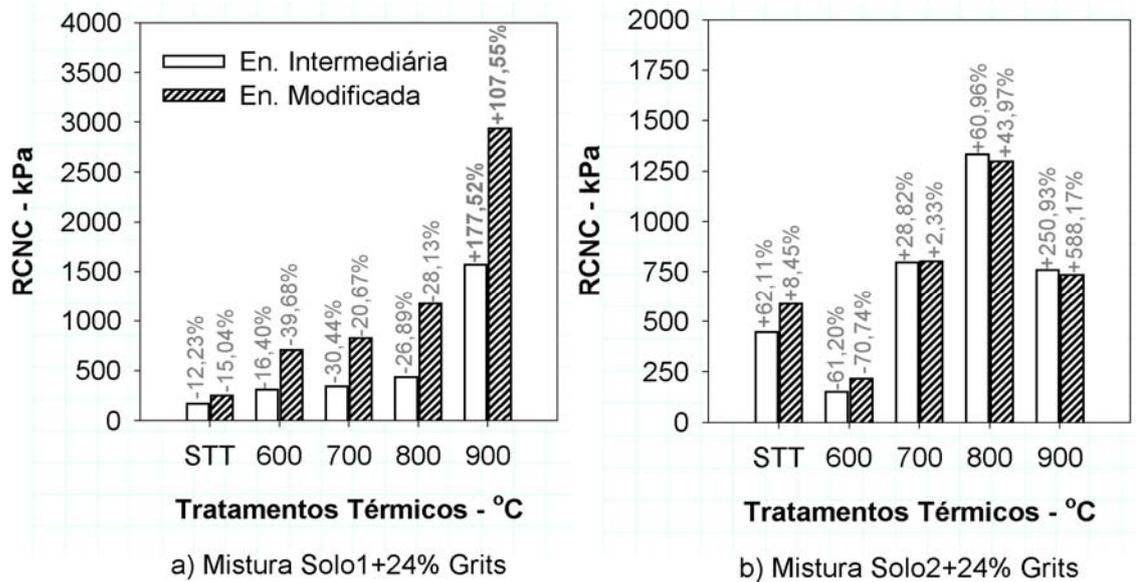
compactação em energia intermediária, notaram-se que com exceção da mistura envolvendo grits TT a 900 °C, para todas as demais, ganhos nos valores de RCNC, devido a um maior esforço de compactação; esses foram inferiores ao ganho obtido para a mistura com grits STT e decrescentes com o aumento da temperatura de exposição do resíduo, sendo a maior taxa de incremento obtida para o TT de 600 °C

#### **5.9.3.4. Influência do período de cura**

Procurando-se avaliar a resistência das misturas solo + 24 % grits TT, compactadas e curadas, em câmara úmida, por 28 dias, apresenta-se a Figura 5.27. Nesta são ilustrados, também, acima de cada barra vertical, as taxas percentuais de ganhos (sinal de +) e de perdas (sinal de -), em relação ao período de cura de 7 dias. No item (a) da figura, referente às misturas solo 1 + 24 % grits TT, notaram-se que tanto para compactação em energia intermediária como modificada, ocorreram quedas nos valores de RCNC, devido ao aumento de cura úmida de 7 para 28 dias, considerando-se as misturas com grits TT a 600, 700 e 800 °C, que atingiu um máximo de aproximadamente 40 % de perda. Esse comportamento, também, foi notado para a mistura com grits STT. Para a mistura com grits TT a 900 °C, ocorreram aumentos na resistência para a cura úmida de 28 dias; na energia intermediária a taxa de incremento foi de aproximadamente 180 % e na modificada de 110 %, onde se atingiu um valor de RCNC próximo de 3000 kPa.

As misturas solo 2 + 24 % grits TT (Figura 5.27b) tiveram incrementos de resistência, devido ao aumento do período de cura, com o grits TT a partir da temperatura de 700 °C, para ambas energias de compactação empregadas. Notaram-se as maiores taxas de incremento para a mistura com grits TT a 900 °C, onde se atingiu na energia intermediária, um aumento de resistência decorrente de cura úmida a 28 dias de aproximadamente 250 %; de forma análoga, de 588 % quando de compactação em energia modificada, elevando-se, dessa forma, os valores de RCNC para a casa dos 750 kPa, condição que essas misturas não possuíam quando curadas a 7 dias. Ressalta-se, também, que nas misturas solo 2 + 24 % grits TT, observou-se o mesmo comportamento

quanto ao valor máximo atingindo para RCNC, quando em comparação com as mesmas misturas curadas a 7 dias, ou seja, o grits TT a 800 °C, proporcionou máximos valores de RCNC em ambas energias de compactação.



**Figura 5.27** - RCNC média, em kPa, para as misturas solo + 24 % grits compactadas nas energias intermediária e modificada, e curadas a 28 dias, com o resíduo submetido à tratamentos térmicos, em mufla.

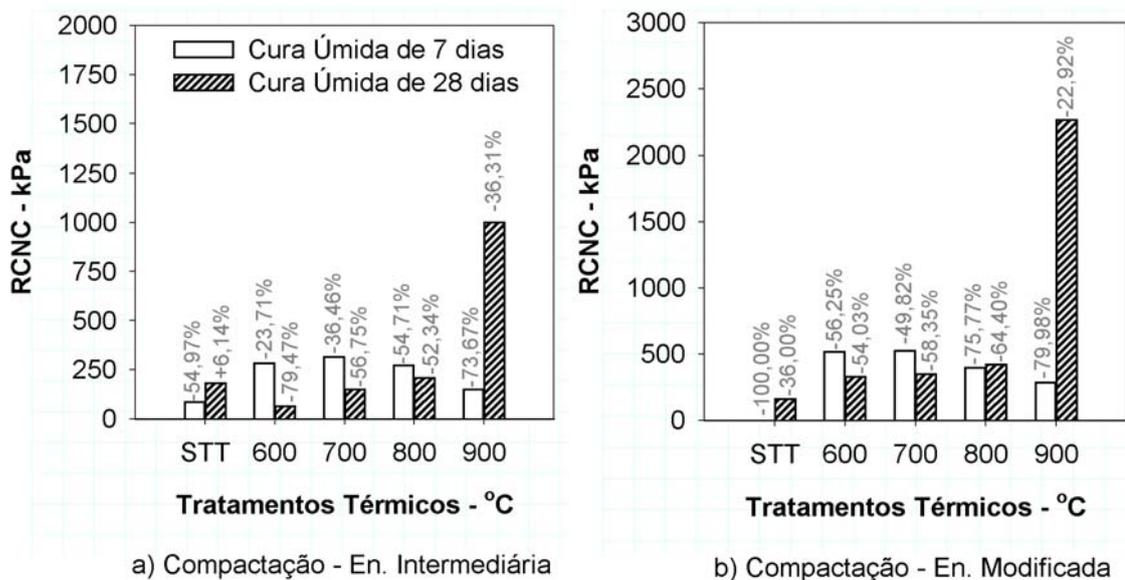
### 5.9.3.5. Resistência sob condição de saturação

Na Figura 5.28, encontram-se os resultados de resistência para as misturas solo 1 + 24 % grits TT, submetidas à imersão prévia ao rompimento em prensa pelo tempo de 4 horas. Acima das barras verticais encontram-se ilustradas as perdas, em termos percentuais, nos valores de RCNC devido a essa condição de saturação. Quando compactadas na energia intermediária (Figura 5.27a) essas misturas apresentaram dois comportamentos distintos a depender do período de cura úmida, os quais são: (i) para cura de 7 dias – ocorreu menor perda para a mistura com grits TT a 600 °C ( $\cong 24\%$ ), que foi crescente com o aumento da temperatura de tratamento do grits, atingindo-se a máxima perda de resistência com as misturas envolvendo grits TT a 900 °C ( $\cong 74\%$ ); a melhor resposta de RCNC foi para a mistura com grits TT a 700 °C

( $\cong 280$  kPa), que suplantou o valor da mistura com grits STT e (ii) para cura de 28 dias – ocorreu comportamento inverso, ou seja, para a mistura com grits TT a  $600$  °C, notou-se maior taxa de perda pela imersão em água ( $\cong 80$  %), que foi decrescendo a medida que se aumentou a temperatura de exposição do grits, atingindo-se uma perda mínima de resistência com as misturas envolvendo grits TT a  $900$  °C ( $\cong 36$  %), onde se observou, também, a melhor resposta de RCNC ( $\cong 1000$  kPa), que suplantou o valor da mistura com grits STT.

Para compactação na energia modificada (Figura 5.28b) observaram-se, a depender do período de cura úmida, os seguintes comportamentos, para as referidas misturas acima: (i) para cura de 7 dias – ocorreu uma tendência a menor taxa de perda para a mistura com grits TT a  $700$  °C ( $\cong 50$  %) e maior para grits TT a  $900$  °C ( $\cong 80$  %); ressalta-se que para as misturas solo 1 + 24 % grits STT ocorreram perdas totais de integridade dos corpos-de-prova, fato esse, não observado em nenhuma das misturas solo 1 + 24 % grits TT; os maiores valores de RCNC foram notados para as misturas envolvendo grits TT a  $600$  e  $700$  °C (RCNC  $\cong 550$  kPa) e (ii) para cura de 28 dias – as misturas com grits TT a  $600$ ,  $700$  e  $800$  °C, tiveram suas perdas de resistência situadas na faixa compreendida entre 54 e 65 %, sendo para a mistura com grits TT  $900$  °C, notado a menor perda pela imersão em água ( $\cong 23$  %) onde, também, se verificou o maior valor de RCNC, que foi de aproximadamente 2300 kPa.

Os resultados de RCNC das misturas solo 2 + 24 % grits TT compactadas, curadas e imersas por 4 horas em água, antes do rompimento, encontram-se ilustrados na Figura 5.29. Compactadas na energia intermediária (Figura 5.29a) notou-se nessas misturas, que quando deixadas curar a 7 dias, os tratamentos térmicos realizados no grits a  $600$ ,  $700$  e  $800$  °C, proporcionaram perdas de resistência, pela imersão em água, inferiores a 20 %, sendo notado para a mistura com grits TT a  $900$  °C, uma taxa de perda um tanto quanto superior, chegando a casa dos 40 %; ressalta-se que quando se empregou-se nas misturas grits STT, os corpos-de-prova tiveram perda máxima de integridade quando submetidos a saturação total. O maior valor de

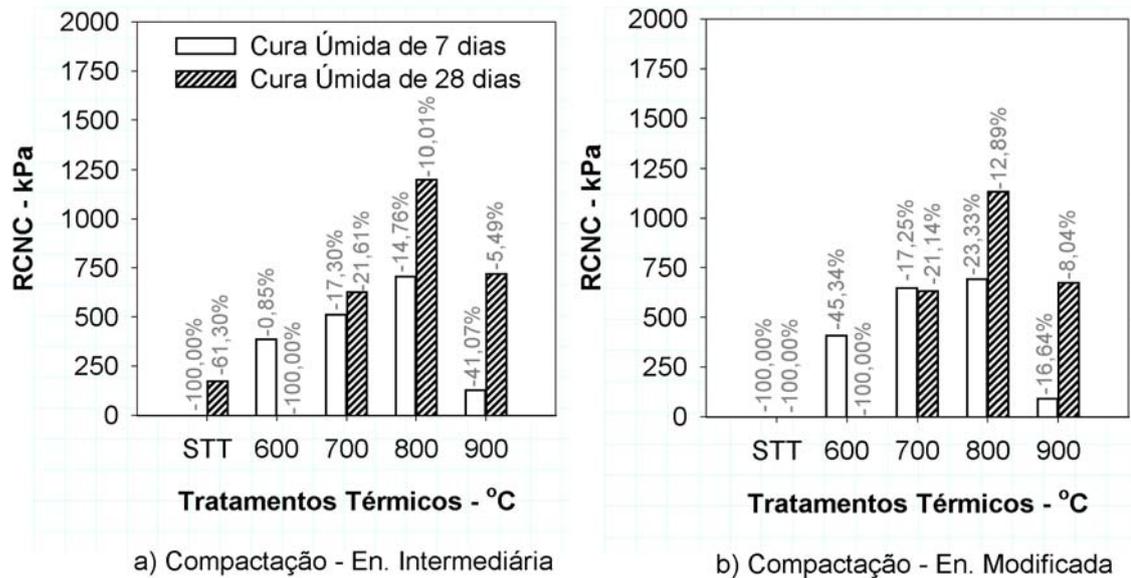


**Figura 5.28** - RCNC média, em kPa, para as misturas solo 1 + 24 % grits compactadas nas energias intermediária e modificada, curadas a 7 e 28 dias, e imersas por 4 horas em água, com o resíduo submetido à tratamentos térmicos, em mufla.

RCNC foi encontrado para a mistura com grits TT a 800 °C, que atingiu aproximadamente 750 kPa. Considerando-se ainda a energia de compactação intermediária, quando as misturas foram curadas a 28 dias, notaram-se que com exceção da mistura com grits TT a 600 °C, que não suportou a imersão, as taxas de perdas foram inferiores a 22 %, sendo na mistura com grits TT a 900 °C, encontrado o mínimo de perda de resistência com 5,5 %. Nessa energia o valor máximo de RCNC encontrado foi, também, para a mistura com grits TT a 800 °C (RCNC  $\cong$  1200 kPa).

Na energia modificada, as misturas solo 2 + 24 % grits STT não suportaram a imersão para nenhum período de cura, notando-se perda total de integridade, o que pode ser observado pela Figura 5.29b. Esse fato ocorreu, também, para a mistura com grits TT a 600 °C, porém somente quando curada a 28 dias; aos 7 dias essa mesma mistura atingiu cerca de 45 % de perda devido a imersão. Para as demais misturas com grits TT notaram-se perdas inferiores a 25 %, chegando-se na mistura com grits TT a 900 °C, curada a 28 dias, ao valor mínimo de perda percentual de 8 %. O valor máximo de RCNC encontrado, considerando-se a cura de 7 dias foi para a mistura com

grits TT a 800 °C, onde se alcançou aproximadamente 750 kPa; essa mistura também, foi a que proporcionou maior valor de RCNC aos 28 dias de cura e 4 horas de imersão em água, porém com um valor próximo de 1150 kPa.



**Figura 5.29** - RCNC média, em kPa, para as misturas solo 2 + 24 % grits compactadas nas energias intermediária e modificada, curadas a 7 e 28 dias, e imersas por 4 horas em água, com o resíduo submetido à tratamentos térmicos, em mufla.

#### 5.9.4. Conclusões

Diante do exposto no presente trabalho as seguintes conclusões podem ser extraídas: (i) as misturas solo + 24 % grits mostraram-se reativas, em termos de valores de resistência avaliado pelo ensaio de compressão simples, quando se empregaram nas mesmas o resíduo tratado em diferentes temperaturas; (ii) para as misturas solo 1 + 24 % grits as melhores respostas de resistência mecânica forma obtidas quando empregado grits TT a 800 °C, considerando-se compactação na energia intermediária e modificada, e cura de 7 dias; nas mesmas condições porém com cura de 28 dias, notou-se para as misturas com grits TT a 900 °C, maiores valores de RCNC. Considerando-se os mesmos tratamentos, entretanto, com imersão prévia em água dos corpos-de-prova, as compactações tanto na energia intermediária como modificada seguidas de cura úmida a 28 dias da mistura envolvendo grits TT a 900 °C,

proporcionaram as menores perdas de resistência e maiores valores de RCNC, alcançando no maior esforço de compactação valor próximo de 2500 kPa e (iii) para as misturas solo 2 + 24 % gritsTT a 800 °C obtiveram-se as melhores respostas de resistência mecânica, considerando-se todos os estudos de caso, ou seja, energia de compactação, período de cura e condição de saturação; o máximo valor de RCNC encontrado para essas misturas, quando compactadas tanto na energia intermediária como modificada, foi quando as mesmas foram curadas a 28 dias e não imersas pelo período de 4 horas em água, onde se atingiram cerca de 1400 kPa.

### **5.9.5. Agradecimentos**

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq e a FAPEMIG pelo apoio financeiro ao presente projeto, bem como à CAPES e à UFV, respectivamente, pela concessão de bolsa de doutorado e instalações físicas para a execução deste trabalho. Agradece-se, também, a empresa de Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA) pelo fornecimento do resíduo grits.

### **5.9.6. Referências bibliográficas**

ALBUQUERQUE, J.A.; ARGENTON, J.; FONTANA, E.C.; COSTA, F.S.; RECH, T.D. Propriedades físicas e químicas de solos incubados com resíduo alcalino da indústria de celulose. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 26, p. 1065-1073, 2002.

BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D; FERREIRA, C.A.; ANDRADE, G.C. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 37, jul./dez. 1998. p. 99-106.

COMPANIA PERNAMBUCANA DE MEIO AMBIENTE – CPRH. **Roteiro complementar de licenciamento e fiscalização**: indústria de papel e celulose. Publicações Projeto CPRH/GPZ: Recife, Pernambuco, 1998. 95 p.

CONSOLI, N.C. Processamento e utilização geotécnica de resíduos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL – REGEO, Porto Alegre, RS, 2003. **Anais...** Porto Alegre, RS: [s.n.], 2003. p. 497-510.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 129**: solos: compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 201**: solo-cimento: compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 7 p.

MACHADO, C.C.; PEREIRA, R.S.; PIRES, J.M.M. Influência do tratamento térmico do resíduo sólido industrial grits na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 4, p. 543-550, 2003. ISSN 0100-6762.

MATOS, A.T.; COSTA, L.M. Lixiviação do resíduo do branqueamento da celulose em colunas de solo. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 20, n. 2, p. 171-177, 1996. ISSN 0100-6762.



### **5.10. Projeto, construção e avaliação dos procedimentos construtivos do trecho experimental com mistura solo-grits na CENIBRA**

RESUMO – Neste artigo apresentam-se dados sobre um programa de estabilização de solos para estradas iniciado pela Universidade Federal de Viçosa (Departamento de Engenharia Florestal) e pela Companhia Nipo Brasileira (CENIBRA) localizada na cidade de Ipatinga, Estado de Minas Gerais, Brasil. Escolheu-se um trecho experimental com 700 m de comprimento localizado na CENIBRA que é representativo dos solos da região de Ipatinga. Construiu-se uma camada estabilizada sem revestimento, empregando-se os solos locais nas misturas com o resíduo industrial da CENIBRA denominado grits. Três solos locais, com texturas variando de areia a argila, foram empregados na produção das misturas. Os objetivos primários da pesquisa foram: (i) análise em laboratório dos solos, envolvendo caracterização geotécnica, ensaios de compactação e CBR; (ii) determinação do teor ótimo de grits e estudo da influência do período de cura na resistência mecânica das misturas via resultados de ensaios CBR realizados em corpos-de-prova das misturas de solos e teores de grits de 0, 12, 16, 20 e 24 % que foram compactados na energia do ensaio Proctor modificado e curados em câmara úmida por 7 e 28 dias; e (iii) construção de um trecho experimental empregando-se o teor ótimo de grits determinado na fase anterior e avaliação dos procedimentos construtivos convencionais empregados e recomendações construtivas para esta modalidade de camada estabilizada.

Palavras-chave – estabilização de solos, resíduo grits, estradas florestais.

### **Design, construction and evaluation of the construction procedures of the soil-grits mixtures experimental road rest at CENIBRA**

ABSTRACT – This paper presents data from the experimental stabilized soil road program initialized by the Federal University of Viçosa (Department of Forest Engineering) and the Brazilian Cellulose Nipo Brasileira Company

(CENIBRA) located in the city of Ipatinga, Minas Gerais State, Brazil. The 700 m long site chosen at CENIBRA is typical of Ipatinga soils. A road base stabilized layer without bituminous cover coat was constructed by using in place soils stabilized with the CENIBRA's industrial waste named grits. Three kinds of soils ranging from sandy to clayey soils were used in the soil-grits mixtures at the pilot road test. Research primary objectives were as follows: (i) laboratory study of soils, involving geotechnical characterization, compaction and CBR tests; (ii) determination of the best waste content and study of the influence of curing period on the mechanical strength of the mixtures using CBR test data from mixtures specimens prepared with grits contents of 0, 12, 16, 20 and 24 %, and compacted at the modified Proctor compaction effort; (iii) construction of the experimental road test site using mixtures prepared with the best grits content determined in the last phase of this study, and evaluation of conventional construction procedures, as well as needed construction recommendations for these stabilized pavement layers.

Key Words – soils stabilization, waste grits, forest road.

### **5.10.1. Introdução**

As estradas florestais são as principais vias de acesso aos plantios florestais e de escoamento de matéria prima para as unidades fabris (MACHADO; LOPES; BIRRO, 2000), tendo como exigências, a manutenção do tráfego de caminhões pesados e extrapesados durante todo o ano, com segurança e conforto, mesmo nas estações chuvosas. Nestas estações tem-se notado casos comuns de interrupções no fornecimento de madeira para as fábricas consumidoras devido ao atoleiro de caminhões em estradas constituídas por materiais de baixa capacidade impermeabilizante a penetração da água, fenômeno esse, freqüente quando da presença de solos com fração argila predominante. Com isso, geram-se dispêndio de tempo e aumento de custos do transporte rodoviário florestal.

Uma rede de estradas florestais, quando necessária e economicamente viável, pode ser pavimentada com revestimentos do tipo asfáltico aumentando,

dessa forma, o padrão operacional do sistema; entretanto, nesse tipo de via, tem-se observado em nível majoritário, a presença de rodovias com apenas uma estrutura básica de revestimento primário, seja de cascalho ou de mistura de materiais, que funciona como um reforço do subleito da estrada. Nem sempre, principalmente nas estações chuvosas, essa camada de reforço dá condições de suporte aos caminhões que chegam a transportar cargas úteis médias de 47 t, totalizando um peso bruto total combinado médio de 74 t, caso do veículo conhecido como rodotrem (MACHADO; PEREIRA, 2003).

Procurando-se ampliar o leque de soluções disponíveis para melhoria do padrão das rodovias florestais estudos geotécnicos vêm sendo desenvolvidos, em nível de laboratório e campo, com solos de subleito de estradas florestais e misturas desses com o resíduo industrial grits, proveniente de indústrias de celulose. O direcionamento de tais estudos é para solos regionalizados provenientes da microrregião de Ipatinga-MG, em áreas da empresa de Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA), fornecedora do resíduo. O interesse se deve as características químicas e físicas do resíduo, as quais são, presença de óxido de cálcio (CaO) e granulometria possuidora de quantidade expressiva de fração equivalente a areia.

Constitui-se em objetivo do presente documento caracterizar geotecnicamente amostras de solos da microrregião de Ipatinga-MG e realizar ensaios de compactação e CBR com essas amostras e com as misturas solo-grits, com o intuito de conhecer o potencial do resíduo na estabilização de solos de estradas florestais. Como objetivos específicos citam-se: (i) obter o melhor teor de grits com base nos ensaios de CBR; (ii) analisar o efeito dos períodos de cura nas características mecânicas das misturas solo-grits e (iii) descrever todas as etapas da execução de trecho experimental envolvendo a melhor mistura solo-grits.

## **5.10.2. Materiais e métodos**

### **5.10.2.1. Amostras de solo e de resíduo**

Os solos do presente estudo foram provenientes da microrregião de Ipatinga, Minas Gerais, em áreas pertencentes a empresa florestal CENIBRA S/A. Os três exemplares designados por cenibra amarelo, cenibra róseo e cenibra vermelho, representativos da região, foram coletados em taludes próximos as estradas, no horizonte B e submetidos ao laboratório de geotecnia da UFV (*Universidade Federal de Viçosa*) em quantitativos aproximados de 500 kg/amostra.

O resíduo sólido industrial grits fornecido, também, pela empresa CENIBRA S/A, foi coletado em aterro de descarte de resíduos onde o mesmo é atualmente disposto, e posteriormente, foi submetido ao laboratório de geotecnia da UFV no quantitativo aproximado de 1000 kg; ressalta-se que o teor de umidade em que o resíduo se encontrava era de 18 %. São gerados cerca de 10.000 t/ano desse resíduo.

### **5.10.2.2. Quantitativos de grits**

Baseado nas experiências de estabilização química de solos da microrregião de Viçosa-MG definiram-se os seguintes traços de resíduo a serem empregados nas misturas com os solos: 0, 12, 16, 20 e 24 %, calculados sob a massa de solo seco.

### **5.10.2.3. Execução das misturas solo-grits em laboratório**

As misturas solo-grits foram executadas, em laboratório, da seguinte forma: (i) adição de resíduo nos quantitativos pré-determinados aos solos; (ii) processamento da mistura em peneira de abertura nominal 4,8 mm para homogeneização; (iii) adição de água a mistura anterior seguida por nova homogeneização e empacotamento em sacolas plásticas e (iv) descanso da

mistura por período de 6 horas antes da execução dos ensaios, tempo esse, representativo de molhagem de misturas em campo e compactação.

#### **5.10.2.4. Ensaios geotécnicos em laboratório**

Os ensaios geotécnicos realizados nas amostras de solo e nas misturas solo-grits abrangeram as seguintes determinações: (i) granulometria (DNIT, 1994 – ME 051); (ii) peso específico dos grãos do solo (DNIT, 1994 – ME 093); (iii) limites de Atterberg (DNIT, 1994 – ME 122 e DNIT, 1994 – ME 082) e (iv)  $CBR_{5\text{pontos}}$  (DNIT, 1994 – ME 129) referente a energia do ensaio Proctor modificado, obtendo-se além dos valores de capacidade de suporte CBR e de expansão<sub>CBR</sub>, os parâmetros ótimos de compactação ( $W_{ót.}$  e  $\gamma_{dmáx.}$ ).

Foi respeitado o período de cura de 1 dia, em câmara úmida, para as misturas solo-grits compactadas na energia modificada, antes da imersão por 96 horas em água, conforme recomendação da norma técnica do ensaio CBR. Após a obtenção da umidade ótima ( $W_{ót.}$ ) e com base no seu valor, executaram-se a molhagem de misturas solo-grits para realização de ensaios de  $CBR_{1\text{ponto}}$  considerando-se o melhor traço de resíduo encontrado com variações de  $\pm 2\%$  e os seguintes períodos de cura: 7, 14 e 28 dias.

#### **5.10.2.5. Classificação geotécnica das amostras de solo**

Empregou-se o sistema americano rodoviário internacionalmente utilizado TRB (*Transportation Research Board*) para a classificação geotécnica das amostras de solo provenientes da microrregião de Ipatinga-MG. Fez-se, também, uma classificação quanto a textura das amostras.

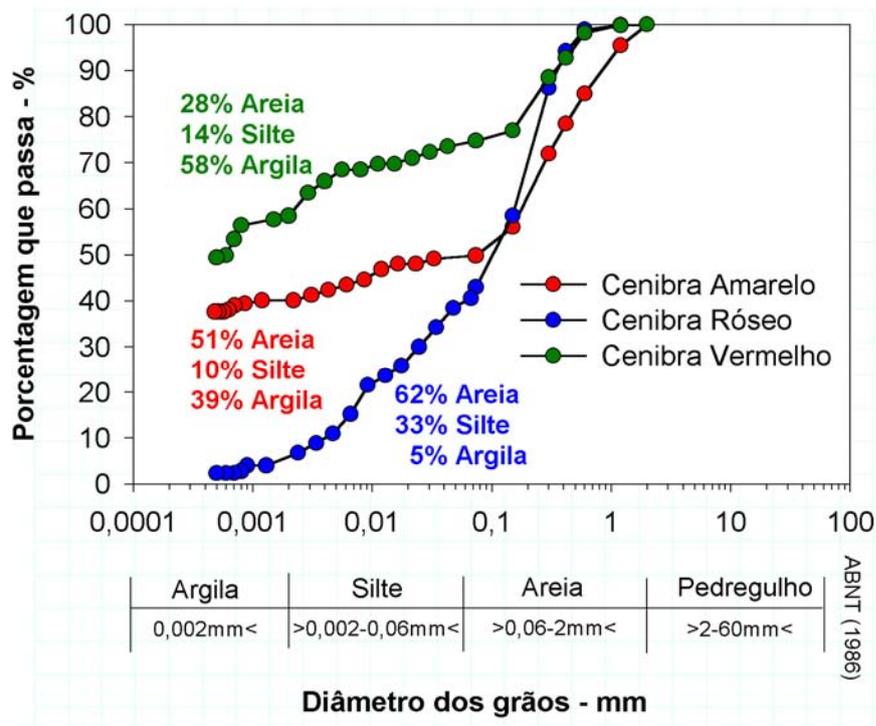
#### **5.10.2.6. Execução do trecho experimental**

Finalizado o programa experimental de laboratório e com base na melhor resposta solo-grits, procedeu-se ao dimensionamento do trecho experimental a ser construído na empresa CENIBRA S/A. Tomou-se como base o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes - DNIT (antigo DNER).

### 5.10.3. Resultados e discussão

#### 5.10.3.1. Características geotécnicas

A granulometria dos três exemplares de Ipatinga-MG é ilustrada na Figura 5.30. A amostra cenibra amarela possui predominância de tamanho de partículas referentes a fração areia (51 %) sendo suas frações argila e silte representadas, respectivamente, por 39 % e 10 %. O solo cenibra róseo, também, possui em sua constituição predominância da fração areia (62 %), entretanto, esta difere texturalmente da amostra anterior por possuir fração silte maior, com 33 %. A amostra cenibra vermelho trata-se de um solo predominantemente argiloso (fração argila 58 %), possuidor de 28 % de areia e 14 % de silte. Nota-se, dessa forma, que as três amostras diferem, significativamente, quanto a granulometria das frações silte e argila.



**Figura 5.30** – Curvas granulométricas dos solos de Ipatinga-MG.

O peso específico dos grãos do solo determinado com a fração de material que passa na peneira de abertura nominal de 2,0 mm (Nº 10) tem os

valores de 25,99, 25,99 e 26,48 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente, para os solos cenibra amarelo, cenibra róseo e cenibra vermelho. As características de plasticidade dessas amostras são: (i) solo cenibra amarelo – médio LL (47 %) e médio IP (20 %); (ii) solo cenibra róseo – médio LL (36 %) e médio IP (12 %) e solo cenibra vermelho – alto LL (82 %) e alto IP (36 %).

As características de compactação, CBR e expansão medida no ensaio CBR estão ilustradas no Quadro 5.28; ressalta-se que esses parâmetros foram obtidos apenas para compactação na energia referente ao ensaio Proctor modificado. Notou-se maior exigência em conteúdo de água para se atingir o ótimo, para a amostra cenibra vermelho, por quanto, as amostras cenibra amarelo e cenibra róseo apresentaram maiores valores de  $\gamma_{dm\acute{a}x.}$  em virtude, da elevada fração areia. Quanto aos valores de CBR, as amostras cenibra amarelo e cenibra vermelho apresentaram valores próximos de recomendações técnicas do DNIT (1996), de materiais para base de pavimentos rodoviários sendo suas características de expansão relativamente baixas. Já o solo cenibra róseo apresentou-se problemático quanto as suas características expansivas (4,20 %).

**Quadro 5.28** – Compactação, CBR e expansão dos solos de Ipatinga-MG

Amostra	Ensaio de Compactação		Ensaio CBR	
	$W_{\acute{o}t.}$ (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$ (kN/m <sup>3</sup> )	CBR (%)	Expansão (%)
<i>Cenibra Amarelo</i>	15,96	17,97	57	0,09
<i>Cenibra Róseo</i>	13,93	16,99	24	4,20
<i>Cenibra Vermelho</i>	26,25	15,75	59	0,47

### 5.10.3.2. Classificação do solos

As classificações texturais e as obtidas pelo sistema TRB encontram-se apresentadas no Quadro 5.29. A classificação quanto a textura das amostras de solo de Ipatinga-MG mostra três materiais bem distintos. Entretanto, à luz das recomendações do sistema TRB, os três exemplares são considerados

integrantes do grupo de materiais argilosos, solos finos, podendo apresentar um comportamento de fraco a pobre como camada de subleito.

**Quadro 5.29 – Classificações dos solos de Ipatinga-MG**

Amostra	Classificações	
	Textural	TRB
<i>Cenibra Amarelo</i>	areno-argilo-siltoso	A-7-6 (6)
<i>Cenibra Róseo</i>	areno-silto-argiloso	A-6 (3)
<i>Cenibra Vermelho</i>	argilo-areno-siltoso	A-7-5 (20)

### 5.10.3.3. Influência da adição de grits na plasticidade dos solos

Os reflexos da adição do resíduo grits nas características de plasticidade das amostras de solo podem ser evidenciados no Quadro 5.30. Notou-se que a adição de grits aos três solos estudados proporcionou reduções em seus valores de plasticidade, representados pelo LL e pelo IP, ocorrendo uma tendência a menores valores para esses índices, quanto mais quantitativo de grits foi adicionado as amostras. Entretanto, as reduções notadas na plasticidade dos solos não foram suficientes para enquadrá-los na especificação técnica do DNIT (1996), quanto ao LL e IP para materiais a serem empregados em base de pavimentos rodoviários, as quais são,  $LL \leq 25\%$  e  $IP \leq 6\%$ .

**Quadro 5.30 - Plasticidade dos solos com e sem adição do resíduo grits**

Grits (%)	Amostras de Solo					
	<i>Cenibra Amarelo</i>		<i>Cenibra Róseo</i>		<i>Cenibra Vermelho</i>	
	LL (%)	IP (%)	LL (%)	IP (%)	LL (%)	IP (%)
0	60,10	20,12	37,73	13,75	60,83	23,62
12	56,13	16,65	41,53	11,42	51,00	16,69
16	53,80	14,87	37,24	2,01	51,20	17,69
20	49,07	11,90	36,05	0,00	50,67	18,88
24	49,20	11,00	35,52	2,46	49,73	17,58

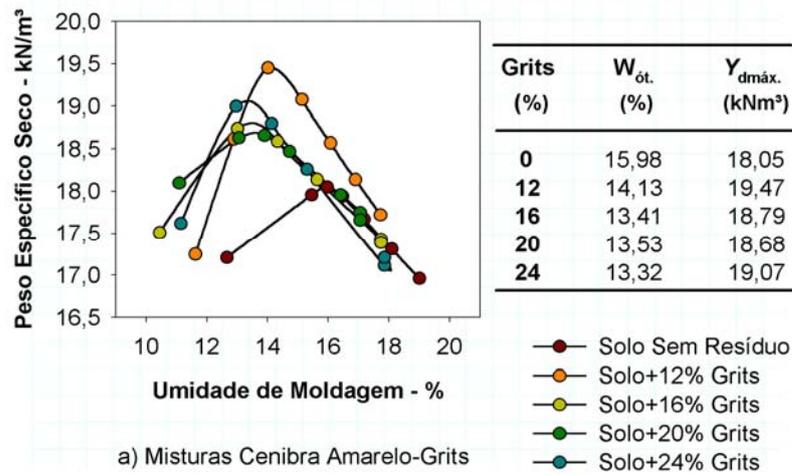


#### 5.10.3.4. Comportamento das misturas solo-grits compactadas

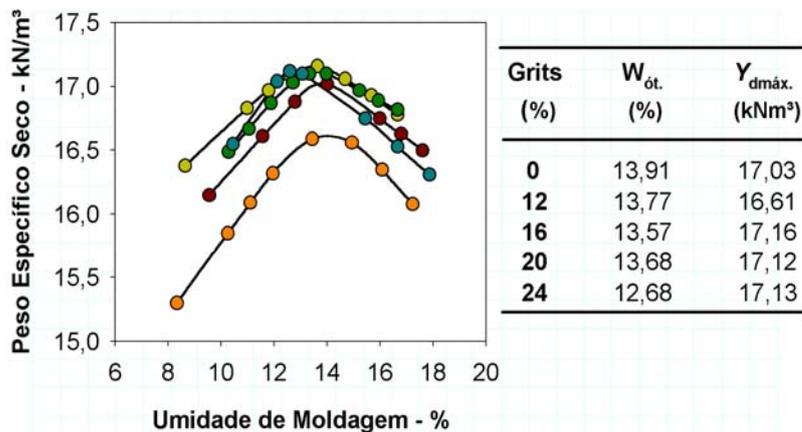
A ilustração apresentada na Figura 5.31 traz a influência da adição do grits nas curvas de compactação e nos seus respectivos parâmetros  $W_{ót.}$  e  $\gamma_{dmax.}$ , quando de compactação em energia modificada. Notaram-se que quando incorporou-se o resíduo aos solos da microrregião de Ipatinga-MG ocorreu uma tendência a deslocamentos das curvas de compactação dos solos em suas formas naturais para à esquerda e para acima, proporcionando menores valores de umidade ótima e maiores valores de peso específico seco máximo. Nas misturas cenibra amarelo-grits e cenibra vermelho-grits, essa tendência foi mais significativa, visto que, levou a reduções de  $W_{ót.}$  de até 4 % e aumentos de  $\gamma_{dmax.}$  de até 1 kN/m<sup>3</sup>. Nas misturas cenibra róseo-grits, a influência nos parâmetros ótimos de compactação foram menos expressivas.

O Quadro 5.32 contém os resultados dos ensaios de CBR e expansão na energia do ensaio Proctor modificado das amostras de solo em seus estados naturais e em diferentes misturas com o grits considerando-se o período de cura de 1 dia. Notaram-se que os valores de CBR e expansão das misturas solo-grits foram influenciados pelo tipo de solo e teor de resíduo na mistura. Para as misturas cenibra amarelo-grits e cenibra róseo-grits não houveram ganhos significativos nos valores de CBR para a maioria das misturas solo-grits em nenhum dos tratamentos, sendo os melhores resultados alcançados nos teores de 20 e 24 % de grits. Para as misturas cenibra vermelho-grits os ganhos de resistência foram significativos, visto que, para todas as misturas solo-grits ocorreram incrementos no índice CBR, notando-se para teores de grits superiores a 16 % ganhos que suplantaram a casa dos 150 % quando comparado com o solo cenibra vermelho sem adição de grits.

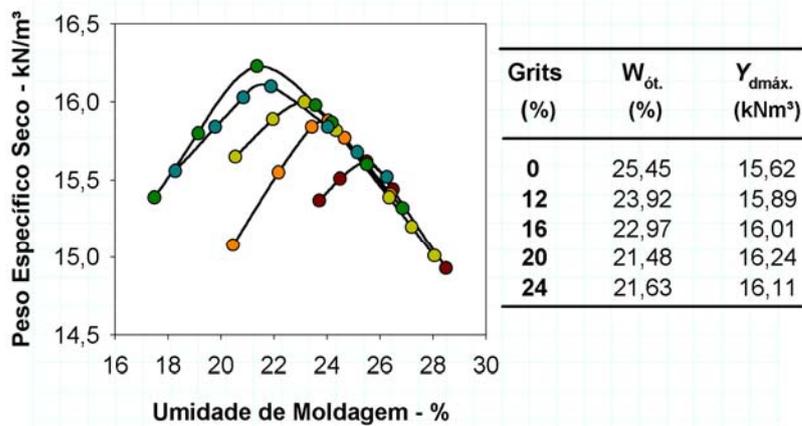
Com relação a expansão das misturas cenibra amarelo-grits, essas praticamente não tiveram grandes discrepâncias em seus valores considerados para efeito de pavimentação como de pequena monta. A adição de grits a amostra cenibra róseo, que possui um elevadíssimo valor de expansão (4,20 %), proporcionou a redução desse valor, chegando-se a valores 30 % menores, caso das misturas com 12 e 24 % de resíduo.



a) Misturas Cenibra Amarelo-Grits



b) Misturas Cenibra Róseo-Grits



c) Misturas Cenibra Vermelho-Grits

**Figura 5.31** – Curva de compactação e parâmetros ótimos das misturas solo-grits compactadas na energia do ensaio Proctor modificado.

As misturas cenibra vermelho-grits tiveram oscilações em seus valores de expansão não podendo-se inferir, seja por erro de medição ou por inconsistência de dados, sobre uma tendência lógica das respostas; ressalta-se, que para mistura com 24 % de grits o valor de expansão se manteve próximo ao do solo vermelho em sua forma natural permanecendo com valor de expansão inferior à 0,50 %, que é o recomendado para camada de base de pavimentos rodoviários conforme concepção do DNIT (1996).

**Quadro 5.31** – CBR e expansão<sub>CBR</sub> das misturas solo-grits compactadas na energia modificada e curadas a 1 dia em câmara úmida

Misturas	CBR (%)	Expansão <sub>CBR</sub> (%)
Cenibra Amarelo Sem Adição de Grits	57	0,09
Cenibra Amarelo + 12 % Grits	41	0,05
Cenibra Amarelo + 16 % Grits	59	0,02
Cenibra Amarelo + 20 % Grits	62	0,16
Cenibra Amarelo + 24 % Grits	68	0,12
Cenibra Róseo Sem Adição de Grits	24	4,20
Cenibra Róseo + 12 % Grits	13	2,90
Cenibra Róseo + 16 % Grits	19	4,21
Cenibra Róseo + 20 % Grits	29	3,63
Cenibra Róseo + 24 % Grits	24	2,89
Cenibra Vermelho Sem Adição de Grits	17	0,47
Cenibra Vermelho + 12 % Grits	28	0,88
Cenibra Vermelho + 16 % Grits	43	0,29
Cenibra Vermelho + 20 % Grits	50	0,96
Cenibra Vermelho + 24 % Grits	43	0,41

De posse dos resultados de resistência e expansão das misturas solo-grits compactadas na energia modificada e curadas a 1 dia decidiu-se pelo emprego do teor de 24 % de resíduo com variações de  $\pm 2$  %, procurando-se minimizar possíveis ocorrências de erros de dosagem em campo. Assim sendo, na Figura 5.32 são ilustrados os resultados dos ensaios de CBR e expansão

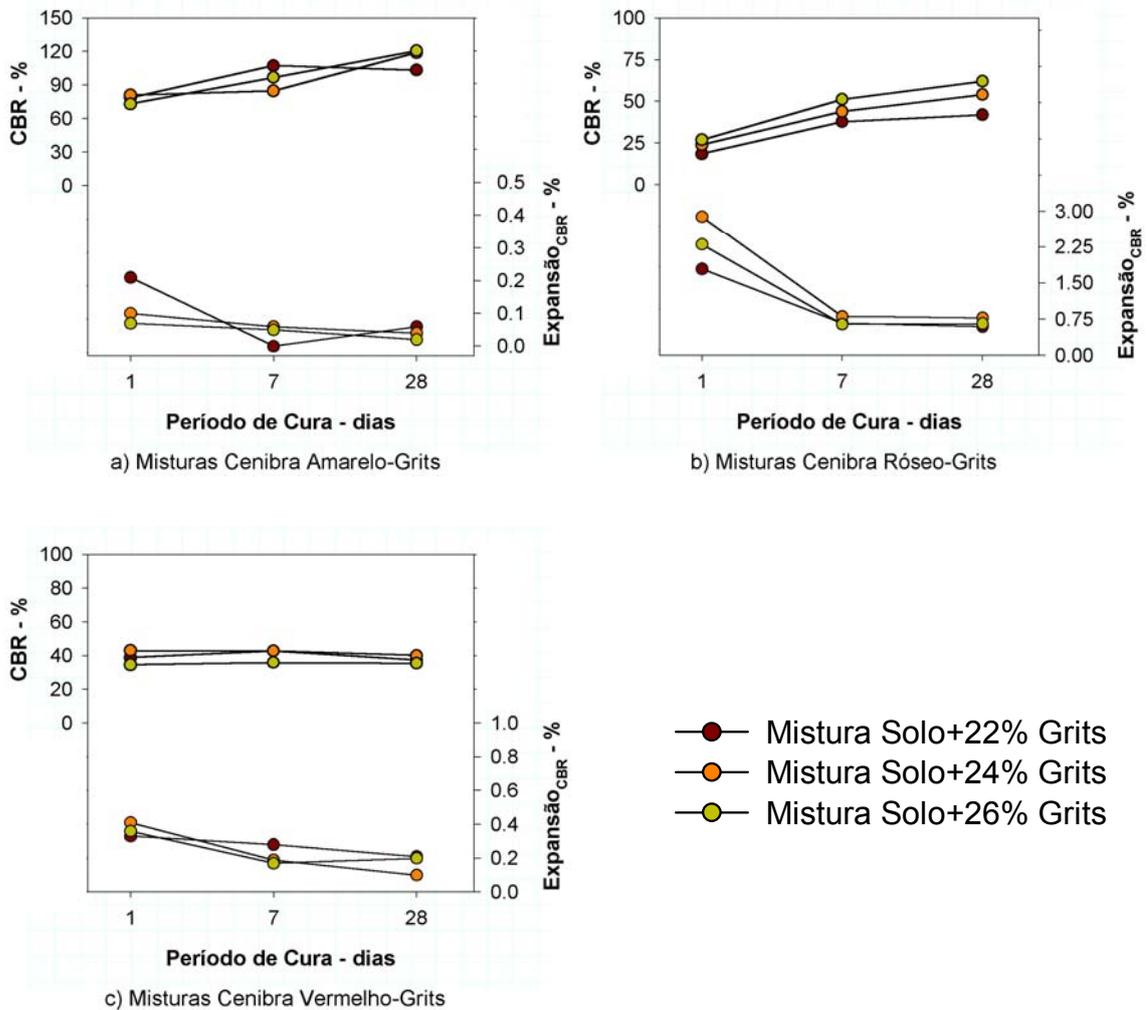
considerando-se os períodos de cura de 1, 7 e 28 dias. Considerando-se as misturas cenibra amarelo-grits notaram-se tendência a acréscimos no índice CBR para os períodos de cura entre 7 e 28 dias, sendo para todas essas misturas curadas a 28 dias obtidos valores de CBR superiores a 100 %. Ressalta-se, também, que com 7 dias de cura todas as misturas cenibra amarelo-grits atingiram valores de CBR superiores a 80 % valor esse, recomendado para camada de base de pavimentos rodoviários (DNIT, 1996). O índice expansão para as misturas cenibra amarelo-grits, considerado insignificante para cura de 1 dia, com 7 e 28 dias reduziu-se a valores próximos de zero.

As misturas cenibra róseo-grits tiveram ganhos nos valores de CBR em função do aumento do período de cura onde a taxa de incremento foi maior entre os períodos de 1 e 7 dias, atingindo-se aumentos superiores a 80 % na resistência. O valor máximo atingido em termos de CBR foi de 64 %, encontrado para a mistura com 26 % de grits compactada e curada a 28 dias. O valor de expansão do solo cenibra róseo (4,20 %) que com 1 dia de cura sofreu uma redução drástica devida a incorporação de 24 % de grits, com cura de 7 e 28 dias teve sua expansão reduzida para menos de 1 % em todos os tratamentos, como pode ser observado na Figura 5.32b.

Nas misturas cenibra vermelho-grits o aumento do período de cura não se mostrou eficiente em termos de ganhos de resistência CBR, visto que, quando compactadas e curadas a 7 e 28 dias não se observaram incrementos significativos nas taxas de resistência em comparação com a cura de 1 dia. Com relação a expansão dessas misturas notaram-se uma pequena redução, quando de cura a 7 e 28 dias, em comparação ao solo em sua forma natural.

#### **5.10.3.5. Desenvolvimento e controle tecnológico do trecho experimental**

Com base nos dados de laboratório e nas respostas de resistência mecânica obtidas, decidiu-se pela construção do trecho experimental num solo de subleito semelhante a amostra cenibra amarela, devido a seu melhor comportamento geotécnico quando em misturas com o resíduo grits. As seguintes premissas foram adotadas com relação aos dados laboratoriais:



**Figura 5.32** – Influência do período de cura na resistência das misturas solo-grits compactadas na energia modificada.

- teor de resíduo:  $24 \pm 2$  %;
- energia de compactação: modificada;
- controle tecnológico: baseado na  $W_{ot}$ . (13,32 %) e  $\gamma_{dmáx}$ . (19,07 kN/m<sup>3</sup>).

O controle da camada de reforço do subleito a ser executada foi feito com base no grau de compactação admitindo-se um desvio de  $100 \pm 2$  %. Esse desvio foi escolhido com base nos dados do Quadro 5.33 extraídos das curvas de compactação e CBR dos ensaios de laboratório com a mistura cenibra amarelo + 24 % grits. Nesse controle empregou-se o método do funil e areia (DNIT, 1994 – ME 092) para determinação da massa específica aparente in

.situ e para a determinação do teor de umidade fez-se uso de *speedy* (DNIT, 1994 – ME 052).

As etapas de construção do trecho experimental envolveram: (i) a regularização do subleito e a compactação; (ii) dimensionamento da camada de reforço e (iii) execução da camada de reforço. Todas essas serão descritas como se segue:

**Quadro 5.32** – Valores de  $\gamma_{dm\acute{a}x.}$  e de CBR em função de variações de  $\pm 2\%$  na  $W_{\acute{o}t.}$  de compactação da mistura cenibra amarelo +24 % grits

Umidade de Compactação	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$ (kN/m <sup>3</sup> )	CBR (%)
Ótima – 2 %	17,76	31
Ótima	19,07	68
Ótima + 2 %	18,25	41

#### Regularização do subleito e compactação

Após a abertura do trecho estradal, ou seja, concluída a fase de terraplenagem, passou-se a operação de regularização do subleito com intuito de conformar o leito estradal, transversal e longitudinalmente, o que envolveu cortes e aterros de acordo com os perfis indicados no projeto. A Figura 5.33 ilustra o aspecto final do trecho após a execução dessa etapa, evidenciando a remoção de toda vegetação ou material orgânico do leito da estrada;



- Fez-se uso do próprio solo local do subleito;
- Controle tecnológico realizado pelo método do funil e areia adotando-se para o grau de compactação um valor mínimo de 100 % da energia do ensaio Proctor normal.

**Figura 5.33** - Vista do trecho experimental após a regularização do subleito.

### Dimensionamento da camada de reforço

Para o dimensionamento da camada de reforço do subleito fez-se uso do método do DNIT (1996) que se baseia no índice CBR. Efetuados os cálculos e em função do tráfego a que seria submetido o trecho, a espessura da camada final após devida compactação foi de 20 cm. Para a execução da camada de reforço do subleito procedeu-se da seguinte forma para quantificar o teor de 24 % de grits em campo:

- cálculo do volume do trecho:

$$V = 700 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 0,20 \text{ m} = \mathbf{980 \text{ m}^3}$$

- cálculo da massa seca da mistura:

$$\gamma_{d\text{Mistura}} = M_{\text{seca}}/V \Rightarrow 1944,60 \text{ kg/m}^3 = M_{\text{seca}}/980 \text{ m}^3 \Rightarrow$$

$$\text{massa seca calculada da mistura} = \mathbf{1.905.706,84 \text{ kg}}$$

- cálculo do quantitativo de 24 % de grits:

$$X + 0,24 X = 1.905.706,84 \text{ kg} \Rightarrow 1,24 X = 1.905.706,84 \text{ kg} \Rightarrow$$

$$X = 1.536.860,36 \text{ kg (massa de solo seco)} \Rightarrow$$

$$1.905.706,84 \text{ kg} - 1.536.860,36 \text{ kg} = \mathbf{368.846,48 \text{ kg de grits}}$$

- cálculo do número de caminhões (capacidade de 6,0 m<sup>3</sup>):

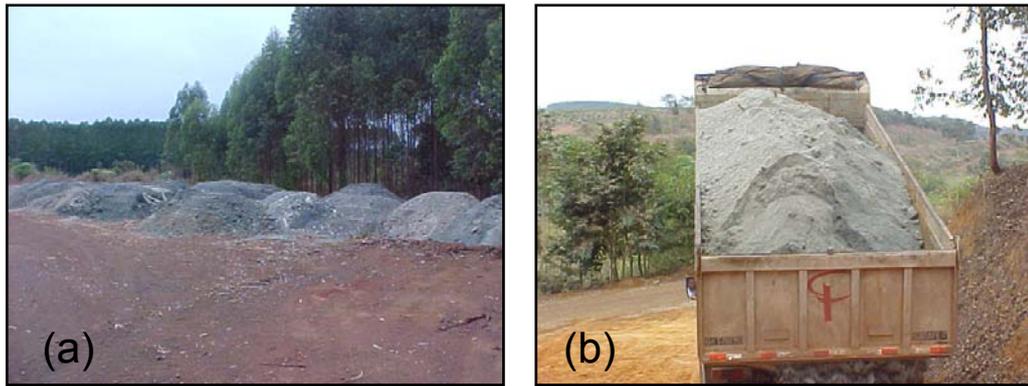
$$\text{massa específica natural do grits} = 1.670,30 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow$$

$$\text{volume (m}^3\text{) de grits a ser gasto} = 368.846,48 \text{ kg}/1.670,30 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow$$

$$220,83 \text{ m}^3 \Rightarrow 220,83/6,0 \text{ m}^3 \cong \mathbf{37 \text{ caminhões de grits}}$$

### Execução da camada de reforço

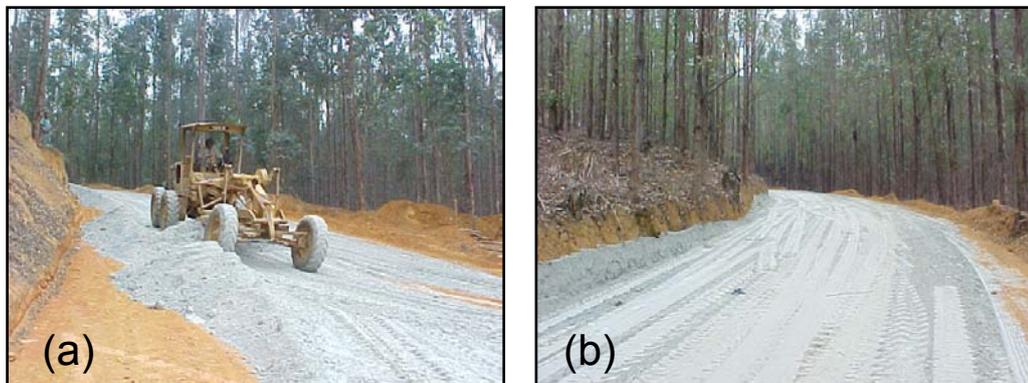
Definidos o quantitativo de grits a ser aplicado ao trecho experimental procedeu-se a aplicação e espalhamento do mesmo sobre o solo de subleito. Com o auxílio de uma patrol procurou-se distribuir o mais homogêneo possível o resíduo, conforme ilustração da Figura 5.35. Ressalta-se que o lançamento do grits, realizado pelo caminhão basculante, foi feito em espaçamentos de



(a) coletou-se o grits no pátio da empresa CENIBRA S/A antes da disposição no aterro sanitário; o resíduo estava com teor de umidade de  $\cong 18\%$  e  
 (b) fez uso de caminhões com capacidade de carga de  $6,0\text{ m}^3$ .

**Figura 5.34** – Grits e caminhão utilizados na execução do trecho experimental.

15 m ao longo do trecho experimental, jogando aproximadamente  $0,80\text{ m}^3$  em cada divisão, o que facilitou o trabalho da patrol. Com o auxílio de uma grade de discos executou-se o gradeamento da mistura solo de subleito +  $24\%$  grits (Figura 5.36). Após, efetuou-se a molhagem fazendo-se uso de um caminhão pipa, com intuito de se atingir o teor de umidade ótimo definido previamente em laboratório. Realizadas essas etapas, procedeu-se a um novo nivelamento e preparo do greide com a patrol.



(a) início do processo de distribuição do resíduo ao longo do trecho experimental e (b) processo de espalhamento do grits finalizado.

**Figura 5.35** – Vista parcial da distribuição do resíduo em campo.

A compactação da mistura solo-grits foi realizada com o rolo pé-de-carneiro (Figura 5.37). Para se atingir o esforço de compactação definido em laboratório para a mistura, ou seja, referente ao ensaio Proctor modificado, o rolo compactador empregado tinha um peso aproximado de  $30\text{ t}$  e foi do tipo



vibratório tracionado pé-de-carneiro, que efetuou 8 passadas ao longo de toda a extensão do trecho experimental. O controle tecnológico foi feito pelo método do funil e areia.



(a) operação de gradeamento da mistura solo-grits; (b) aspecto final do gradeamento da mistura solo-grits e (c) nivelamento e preparo do greide com a parol

**Figura 5.36 – Execução da mistura solo + 24 % grits.**



(a) operação de compactação com rolo pé-de-carneiro e  
(b) vista parcial do trecho experimental finalizado.

**Figura 5.37 – Aspectos da compactação da camada de reforço do subleito.**

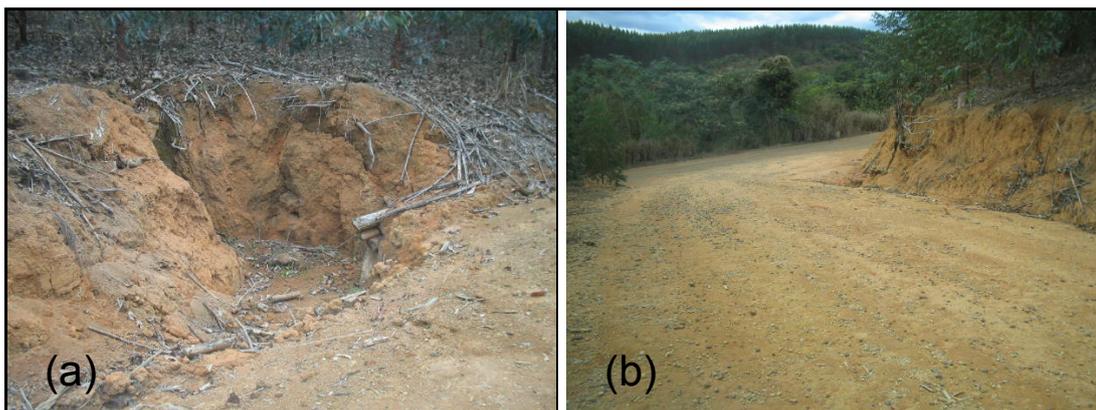
#### 5.10.3.6. Avaliação do trecho em teste

Um ano após a execução do trecho experimental constituído de camada de reforço do subleito envolvendo solo local mais resíduo grits, foi feita uma avaliação visual dos defeitos ocorrentes ao longo do trecho. As Figuras 5.38 e 5.39 trazem além das ilustrações do trecho os respectivos comentários sobre os defeitos detectados.



- (a) vista parcial do trecho experimental um ano após a sua construção evidenciando a perda de material devido à lixiviação pelas chuvas associada à declividade do terreno; e
- (b) na camada do trecho experimental composta da mistura solo + 24 % grits compactada, evidenciou-se a ocorrência de erosão laminar em praticamente toda a extensão do trecho experimental.

**Figura 5.38** – Presença de erosão laminar ao longo do trecho.



**Figura 5.39** – Aspectos dos bueiros e adição de escórias de aciaria

- a) apesar da correta seção transversal obtida no trecho experimental e de adequada drenagem, através da execução de três bueiros ao longo do trecho, a mistura solo-grits, em campo, não apresentou uma boa estabilização e aglutinação junto ao solo de subleito, ocorrendo o desprendimento de partículas do solo devido a falta de cimentação; e
- b) não foram notados afundamentos de trilhas de roda no trecho experimental quando o mesmo foi submetido a tráfego de caminhões extrapesados, mostrando a camada de revestimento primário constituído da mistura solo-grits, boa capacidade de suporte, entretanto, evidenciaram-se problemas de patinagem desses veículos devido a declividade do terreno e a falta de aderência da camada o que levou a necessidade de incorporação de escórias de aciaria como material agregante.

#### **5.10.4. Conclusões**

As seguintes conclusões podem ser extraídas do presente artigo: (i) o resíduo grits alterou as propriedades mecânicas das amostras de solo em estudo mostrando potencial para a estabilização de solos, principalmente, em elevados teores (acima de 20 %); (ii) as melhores respostas mecânicas foram obtidas para as misturas com a amostra cenibra amarela que atingiram elevados valores de CBR e baixos valores de expansão, enquadrando-se as misturas solo-grits nas exigências técnicas do método de dimensionamento do DNIT (1996) como material para base de pavimentos rodoviários flexíveis e (iii)

a execução do trecho experimental, em áreas da empresa CENIBRA S/A, com a mistura cenibra amarelo + 24 % grits possibilitou a descrição didática das etapas e peculiaridades da aplicação do grits em solo de subleito estradal.

#### **5.10.5. Agradecimentos**

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq e a FAPEMIG pelo apoio financeiro ao presente projeto, bem como à CAPES e à UFV, respectivamente, pela concessão de bolsa de doutorado e instalações físicas para a execução deste trabalho. Agradece-se, também, a empresa de Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA) pelo fornecimento do resíduo grits.

#### **5.10.6. Referências bibliográficas**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 051**: solos: análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 12 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 093**: solos: determinação da densidade real. Rio de Janeiro, RJ, 1994, 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 122**: solos: determinação do limite de liquidez: método de referência e método expedito. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 082**: solos: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 129**: solos: compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 052**: solos e agregados miúdos: determinação da umidade com emprego do speedy. Rio de Janeiro, 1994. 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 092**: solo: determinação da massa específica aparente *in situ* do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1994. 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação**, 2. ed., Rio de Janeiro, 1996. 320 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ES 299**: pavimentação: regularização do subleito. Rio de Janeiro, RJ, 1997. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ES 300**: pavimentação: reforço do subleito. Rio de Janeiro, RJ, 1997. 6 p.

MACHADO, C.C.; LOPES, E.S.; BIRRO, M.H.B. **Elementos básicos do transporte florestal rodoviário**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 167 p.

MACHADO, C.C. PEREIRA, R.S. Qualidade da rodovia versus desempenho e custo do transporte rodoviário de madeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 6., Belo Horizonte, MG, 2003. **Anais...** Belo Horizonte, MG: SIF/UFV, 8-10 jul. 2003. p. 132-149.

### **5.11. Utilização do resíduo sólido industrial lama de cal em pavimentos de estradas florestais: análise técnica e avaliação de trechos rodoviários experimentais**

RESUMO – Trechos rodoviários experimentais são ferramentas úteis para a avaliação da eficiência de materiais de construção de estradas. No presente artigo, apresenta-se uma avaliação do desempenho de trechos experimentais construídos com camadas de solo estabilizados com o resíduo sólido industrial denominado lama de cal, que é um subproduto gerado em indústrias de celulose. Com base nos resultados de ensaios de resistência mecânica de um extenso programa de laboratório, onde se realizaram ensaios de caracterização dos solos e estudos de dosagem das misturas, foram construídos três trechos experimentais na região de Alagoinhas, Bahia, Brasil. Em uma avaliação qualitativa desses trechos experimentais, o melhor desempenho de campo foi associado àquele construído com 70 % de cascalho de primeira e 30 % de lama de cal.

Palavras-chave - estrada florestal, lama de cal, estabilização de solo.

### **Use of the industrial solid waste whitewash mud in forest road pavements: technical analysis and evaluation of experimental field road sites**

ABSTRACT – Experimental field road test sites are useful technical tools for evaluating the efficiency of road engineering materials. This paper is directed to the evaluation of performance of experimental field road test sites built using mixtures of in place soils and an industrial waste from the cellulose industry named *whitewash mud*. Analysis of data from an extensive laboratory testing program including soils geotechnical characterization and mixtures mechanical strength tests led to the construction of three experimental field road test sites in the region of the city of Alagoinhas, Bahia State, Brazil. Data from a qualitative evaluation of these sites under field traffic conditions support that best

performance can be associated to the road pilot test site built using mixture contents of 70 % of first class gravel and 30% of whitewash mud.

Key Words – Forest road, whitewash mud, soil stabilization.

### **5.11.1. Introdução**

Em muitas situações um solo no estado natural não apresenta propriedades geotécnicas adequadas para emprego em camadas de pavimentos rodoviários, daí decorre a importância do estudo da estabilização de solos no sentido de adequar os parâmetros geotécnicos dos mesmos, em conformidade com as exigências contidas nas especificações técnicas dos órgãos rodoviários. O problema de suporte nas estradas esta basicamente relacionado ao solo a ser utilizado; quando este se caracteriza como areia, se obtém grande capacidade de suporte, sob quaisquer condições ambientais, se adequadamente confinadas lateralmente; por outro lado, condições de ocorrência de poeira em estradas (vicinais) estão geralmente associadas a solos argilosos, argilo-silto-arenosos e, mesmo, areias silto-argilosas, desde que apresentem perda substancial de partículas superficiais sob a ação do tráfego e dos fatores climáticos locais.

Em estradas, considerando-se a experiência brasileira e as relações custo-benefício dos empreendimentos rodoviários é comum o emprego dos estabilizantes químicos e dos métodos mecânicos de estabilização de solos. A adição, por exemplo, do cimento ao solo pode melhorar determinadas características desse sem conferir caráter estrutural da mistura solo-cimento desejada em outros fins de engenharia. Em geral, os quantitativos de cimento usados para a estabilização são na faixa de 1 a 5 %; esporadicamente, também, para alguns tipos de solos é possível o emprego da cal como estabilizante.

No entanto, principalmente para as estradas florestais, os custos destas técnicas são inviáveis. Uma solução tecnológica para o setor florestal, de baixo custo, poderá ser a aplicação de resíduos gerados no processo de produção, como aditivos químicos, com o intuito de melhorar as características

geotécnicas dos solos; essa técnica é essencial para solucionar a problemática da pavimentação para muitas regiões brasileiras, em geral cobertas por solos de baixa resistência mecânica, bem como garantir a retirada dos resíduos industriais, muitas vezes poluentes do meio ambiente e confiná-los em condições controladas na estrutura das rodovias. Um resíduo com grande potencialidade de uso para esse fim é a lama-de-cal, subproduto da indústria de celulose.

O propósito deste estudo foi analisar: (i) em laboratório - o comportamento geotécnico de misturas solo-lama de cal, com base nos resultados dos ensaios de caracterização e índice de suporte califórnia (ISC ou CBR) e (ii) em campo – avaliar o desempenho dessas misturas quando aplicadas a solos de subleito em áreas da empresa BAHIA PULP S/A, e submetidas a tráfego.

#### **5.11.2. Materiais e métodos**

##### **5.11.2.1. Amostras de solos e resíduo**

Sete amostras de solo representativas da microrregião de Alagoinhas-Ba, pertencentes a áreas da empresa de celulose BAHIA PULP S/A, foram coletadas. Essas amostras foram submetidas ao Laboratório de Geotecnia da UFV (*Universidade Federal de Viçosa*) para caracterização geotécnica e classificação pelo sistema rodoviário americano TRB (*Transportation Research Board*). Dessas amostras duas foram selecionadas para os estudos com os ensaios de compactação e CBR, as quais foram: (i) subleito areia e (ii) cascalho de primeira. As razões para esta decisão foram: (i) as amostras são distintas granulometricamente e representam, adequadamente, os demais solos da microrregião de Alagoinhas-Ba, sendo muito utilizadas como subleito (caso da amostra subleito areia) ou como camada de reforço do subleito (caso da amostra cascalho de primeira) e (ii) o transporte de grande quantidade de material da Bahia para Viçosa-MG, poderia onerar os custos do programa de ensaios do estudo.



O resíduo industrial lama de cal, gerado no processo de produção de celulose, foi coletado no aterro industrial da empresa BAHIA PULP S/A, onde atualmente é disposto, no quantitativo de 500 kg; esse resíduo sólido, friável, de granulometria fina e de coloração acizentada, é classificado pela ABNT (1987) como resíduo classe II, ou seja, trata-se de material não inerte. Após a coleta foi submetido Laboratório de Geotecnia da UFV e estocado em tambores plásticos que foram hermeticamente vedados evitando, assim, a exposição do resíduo as intempéries climáticas, para posterior utilização nos ensaios geotécnicos.

#### **5.11.2.2. Dosagens das misturas solo-lama cal**

As dosagens de lama de cal utilizadas nos estudos de laboratório, em relação a massa de solo seco ao ar, foram de: 10, 15, 20 e 25 %; dosagens essas escolhidas com base em ensaios preliminares.

#### **5.11.2.3. Ensaio de laboratório**

Os ensaios realizados com as amostras de solos em estado natural e em misturas com lama de cal, em diferentes traços, abrangeram as seguintes determinações: (i) granulometria (DNIT, 1994 – ME 051); (ii) peso específico dos grãos do solo (DNIT, 1994 – ME 093); (iii) limites de Atterberg (DNIT, 1994 – ME 122 e DNIT, 1994 – ME 082) e (iv)  $CBR_{5\text{pontos}}$  (DNIT, 1994 – ME 129) referente a energia do ensaio Proctor intermediário, obtendo-se além dos valores de capacidade de suporte CBR e de expansão $_{CBR}$ , os parâmetros ótimos de compactação ( $W_{ót.}$  e  $\gamma_{dmáx.}$ ). Ressalta-se que não foram empregados períodos de cura úmida para os corpos-de-prova do ensaio CBR.

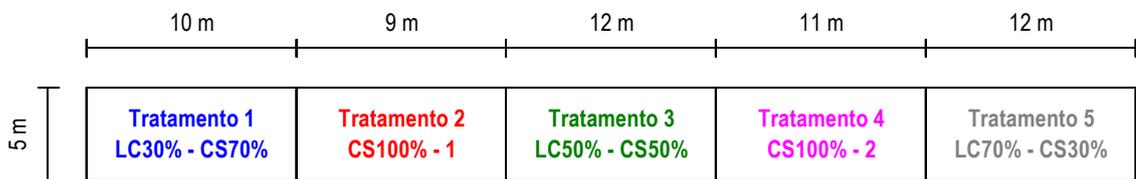
#### **5.11.2.4. Avaliação de trechos experimentais**

A área de avaliação dos trechos experimentais situa-se na microrregião de Alagoinhas-Ba em dois projetos pertencentes a Empresa BAHIA PULP S/A. Os croquis dos três trechos experimentais avaliados encontram-se ilustrados

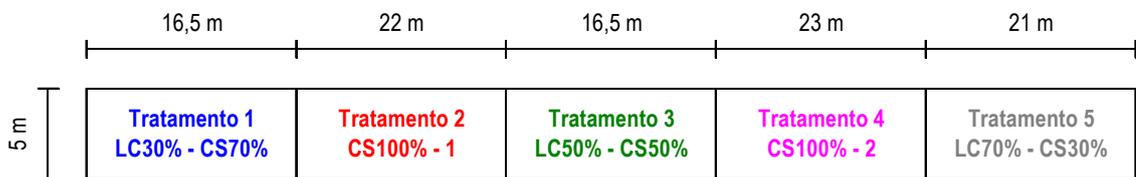
na Figura 5.40, na qual pode-se visualizar as dimensões de cada trecho bem como os materiais utilizados para a sua construção.

A metodologia adotada para a avaliação dos trechos experimentais envolveu a análise de defeitos e determinação do peso específico aparente seco. Para a análise de defeitos empregou-se como referência Baesso e Gonçalves (2003) para a determinação do Índice de Condição da Rodovia Não Pavimentada (ICRNP). Os defeitos analisados foram: (i) seção transversal imprópria; (ii) drenagem inadequada; (iii) corrugações; (iv) excesso de poeira; (v) buracos; (vi) trilhas-de-roda e (vii) perda de agregados. A ficha de avaliação empregada encontra-se no Anexo C desse trabalho.

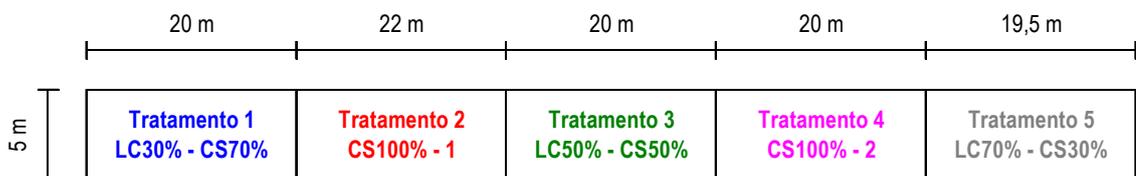
**Croqui Esquemático dos Trechos de Jandaíra**



**Croqui Esquemático dos Trechos de Água Boa (Baixa Intensidade de Tráfego)**



**Croqui Esquemático dos Trechos de Água Boa (Alta Intensidade de Tráfego)**



**Legenda:**

LC30% - CS70% = Combinação de 30% do resíduo lama de cal com 70% de cascalho de jazidas locais;  
 CS100% - 1 = Primeiro trecho com 100% de cascalho de jazidas locais;  
 LC50% - CS50% = Combinação de 50% do resíduo lama de cal com 50% de cascalho de jazidas locais;  
 CS100% - 2 = Segundo trecho com 100% de cascalho de jazidas locais; e  
 LC70% - CS30% = Combinação de 70% do resíduo lama de cal com 30% de cascalho de jazidas locais.

**Figura 5.40 - Croqui dos trechos experimentais avaliados.**

A determinação do peso específico aparente seco foi feita realizando-se furos, com dimensões aproximadas de 12 cm de diâmetro por 10 cm de altura, distribuídos ao longo dos trechos estradais, conforme Figura 5.41, sendo feito dois furos para cada tratamento exceto para os trechos com 100 % de cascalho. Após a execução dos furos colocou-se uma sacola plástica dentro do mesmo e adicionou-se água até preencher a sacola nas dimensões do furo; com o auxílio de uma balança determinou-se a massa de solo retirada do furo e da água necessária para o preenchimento do mesmo. Determinou-se em laboratório a umidade das amostras extraídas dos furos chegando-se a massa seco de cada amostra. Por meio da relação entre a massa de solo seco e a massa de água que corresponde aproximadamente ao volume do furo, determinou-se o peso específico aparente seco para cada furo.



**Figura 5.41** - Furos executados nos trechos experimentais: (a) aspecto geral e (b) colocação da sacola plástica e preenchimento com água.

### 5.11.3. Resultados e discussão

#### 5.11.3.1. Caracterização e classificação geotécnica

No Quadro 5.34 encontram-se ilustradas as porcentagens das frações granulométricas constitutivas dos solos de Alagoinhas-Ba bem como, os valores de limites de plasticidade e pesos específicos dos sólidos. É possível

notar que os solos subleito areia e subleito baixo possuem frações granulométricas próximas, com predominância de areia, seguida de silte e argila em menor quantidade; os solos subleito alto e subleito se diferenciam dos anteriores por possuírem fração argila superior a fração silte, tendo também, predominância da fração areia. Para as amostras cascalho de primeira e cascalho de segunda notou-se que a fração pedregulho ( $\phi > 2,0$  mm) supera, em ambas, a casa dos 50 %, sendo a fração areia a segunda mais representativa e as frações silte e argila praticamente equivalentes. O solo cascalho de primeira é um pouco mais granular que o de segunda, visto que, a sua fração pedregulho (76 %) é superior. De todas as amostras analisadas o solo cascalho, da Fazenda Matinha, é o que apresenta a granulometria mais uniforme, com predominância da fração pedregulho (32 %) e com valores próximos de 20 % para as demais frações constituintes do material.

Quanto a plasticidade, notaram-se que os solos subleito areia, subleito baixo e subleito foram classificados como NP (Não Plásticos); os dois primeiros devido a pequena porcentagem de sua fração argila (2 %) e o terceiro devido ao valor de sua fração areia (76 %). Para as demais amostras, segundo o critério do DNIT (1996, CLA 259), seus valores de LL e de IP podem ser assim descritos: (i) subleito alto - baixo LL (27 %) e médio IP (10 %); cascalho de primeira – baixo LL (21 %) e baixo IP (6 %); cascalho de segunda - médio LL (34 %) e médio IP (11 %); e cascalho – baixo LL (20 %) e baixo IP (6% ).

As respectivas classificações dos solos da microrregião de Alagoinhas, encontram-se descritas no Quadro 5.35. Pelo sistema TRB tem-se que somente o solo subleito alto se enquadrado no grupo de materiais finos siltosos, sendo os demais enquadrados no grupo de materiais granulares possuidores de índices de grupo iguais a zero, mostrando-se como materiais de bom a excelente comportamento para subleito de estradas. Pelo mesmo sistema, os solos do grupo A2 referem-se a areia e areias siltosas ou argilosas, mostrando coerência com a classificação textural apresentada, também, no Quadro 5.35; o solo cascalho de primeira (A-1-a) refere-se ao grupo das pedras britadas, pedregulhos e areias.

**Quadro 5.33 – Parâmetros de caracterização dos solos de Alagoinhas-Ba**

Solo	Granulometria				Plasticidade			$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )
	------(%)-----				------(%)-----			
	<i>Pedregulho</i>	<i>Areia</i>	<i>Silte</i>	<i>Argila</i>	<i>LL</i>	<i>LP</i>	<i>IP</i>	
<i>Subleito Areia</i>	-	85	13	2	-	-	NP	26,5
<i>Subleito Baixo</i>	-	78	20	2	-	-	NP	26,0
<i>Subleito Alto</i>	-	59	16	25	27	17	10	26,5
<i>Cascalho Primeira</i>	76	16	3	5	21	15	6	27,5
<i>Cascalho Segunda</i>	50	26	10	14	34	22	12	27,0
<i>Subleito</i>	-	76	3	21	-	-	NP	26,0
<i>Cascalho</i>	32	24	21	23	20	14	6	27,0

**Quadro 5.34 – Classificações dos solos de Alagoinhas-Ba**

Amostra	Classificações	
	<i>Textural</i>	<i>TRB</i>
Subleito Areia	areno-silto-argiloso	A-2-4 (0)
Subleito Baixo	areno-silto-argiloso	A-2-4 (0)
Subleito Alto	areno-argilo-siltoso	A-4 (3)
Cascalho Primeira	Pedregulho areno-argilo-siltoso	A-1-a (0)
Cascalho Segunda	Pedregulho areno-argilo-siltoso	A-2-6 (0)
Subleito	areno-argilo-siltoso	A-2-4 (0)
Cascalho	Pedregulho areno-argilo-siltoso	A-2-4 (0)

**5.11.3.2. Fase de laboratório: Compactação, CBR e expansão**

O Quadro 5.36 apresenta os parâmetros ótimos de compactação ( $W_{ót.}$  e  $\gamma_{dmáx.}$ ) e os índices CBR e  $Expansão_{CBR}$  dos solos e das misturas solo-lama de cal. Os parâmetros de compactação dos solos sofreram pouca variação na umidade ótima e no peso específico seco máximo com relação a adição de diferentes traços da lama de cal. Os valores de CBR para alguns teores do resíduo foram superiores aos dos solos em suas formas naturais, sendo os

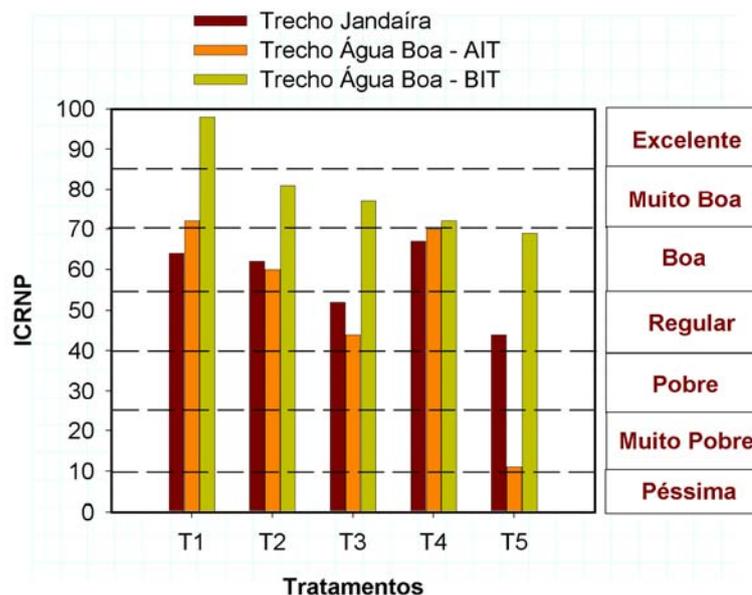
melhores resultados alcançados para o solo cascalho de primeira nos traços de 20 e 25 % de lama de cal. Entretanto, nessas dosagens houve um aumento da expansão do solo, o que não é favorável do ponto de vista da pavimentação.

**Quadro 5.35** – Características de compactação, CBR e expansão<sub>CBR</sub> das misturas solo-lama de cal compactadas na energia do ensaio Proctor intermediário

Misturas	Compactação		CBR	
	$W_{ót.}$ (%)	$\gamma_{dmáx.}$ (kN/m <sup>3</sup> )	CBR (%)	Exp <sub>CBR</sub> (%)
<i>Subleito Areia sem LC</i>	8,10	16,66	26,40	0,04
<i>Subleito Areia + 10 % LC</i>	8,20	15,97	12,50	0,10
<i>Subleito Areia + 15 % LC</i>	10,00	16,25	11,30	0,16
<i>Subleito Areia + 20 % LC</i>	11,40	17,05	27,30	0,26
<i>Subleito Areia + 25 % LC</i>	10,80	16,56	11,40	0,48
<i>Cascalho de Primeira sem LC</i>	11,05	18,04	35,50	1,03
<i>Cascalho de Primeira + 10 % LC</i>	10,40	16,26	23,00	0,21
<i>Cascalho de Primeira + 15 % LC</i>	11,20	15,73	27,00	0,22
<i>Cascalho de Primeira + 20 % LC</i>	11,40	17,93	40,50	0,88
<i>Cascalho de Primeira + 25 % LC</i>	11,80	18,08	52,00	0,10

### 5.11.3.3. Fase de campo: avaliação dos trechos experimentais

Os dados elucidados na Figura 5.42 trazem um comparativo entre os valores do Índice de Condição da Rodovia Não Pavimentada (ICRNP) para os tratamentos dos trechos de Jandaíra, Água Boa (Baixa Intensidade de Tráfego) e Água Boa (Alta Intensidade de Tráfego). A partir desses resultados foi possível observar que os tratamentos LC 30 % - CS 70 % para os três trechos experimentais foram os que apresentaram melhor desempenho quando comparados com os tratamentos LC 50 % - CS 50 % e LC 70 % - CS 30 %. A exceção do trecho de Jandaíra, o tratamento LC 30 % - CS 70 apresentou-se superior quando comparado com os tratamentos testemunhas (CS 100 %).



**Figura 5.42** – Avaliação dos trechos experimentais com a lama de cal.

Os Quadros 5.36 a 5.38 trazem os valores dos pesos específicos aparentes secos determinados em campo. Em todos os casos, foram determinados valores de peso específico aparente seco superiores aos valores obtidos em laboratório em estudo prévio realizado pela UFV com o resíduo lama de cal da empresa BAHIA PULP S/A. Acredita-se que esse grau de compactação alto não se deveu tão somente ao esforço imposto pelo rolo compactador mas, também, pela ação do tráfego de caminhões pesados sobre os trechos experimentais, tendo em vista que a avaliação foi realizada seis meses após a construção dos mesmos. A partir dos resultados, ficou evidente que o tratamento LC 70 % - CS 30 % para todos os trechos experimentais não conseguiu alcançar valores de peso específico aparente seco da mesma ordem dos outros tratamentos.

As Figuras 5.43 a 5.45 ilustram os defeitos identificados nos trechos experimentais de Jandaíra, Água Boa (Baixa Intensidade de Tráfego) e Água Boa (Alta Intensidade de Tráfego). Os defeitos encontrados nesses trechos foram identificados e anotados em um formulário de campo, para posteriormente serem inseridos nas planilhas, por meio das quais se determinaram os valores de ICRNP.

**Quadro 5.36** - Valores dos pesos específicos aparentes secos determinados para os tratamentos do trecho de Jandaíra

Tratamentos	Parâmetros determinados em campo			
	$\gamma_d$ médio (kN/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kN/m <sup>3</sup> )	$W$ médio (%)	Desvio padrão (%)
LC 30 % - CS 70 %	21,65	1,73	4,19	0,54
CS 100 % - 1	19,39	-	2,91	-
LC 50 % - CS 50 %	21,06	2,40	6,85	0,71
CS 100 % - 2	20,35	-	2,65	-
LC 70 % - CS 30 %	18,77	0,97	7,37	0,84

**Quadro 5.37** - Valores dos pesos específicos aparentes secos determinados para os tratamentos do trecho de Água Boa - BIT

Tratamentos	Parâmetros determinados em campo			
	$\gamma_d$ médio (kN/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kN/m <sup>3</sup> )	$W$ médio (%)	Desvio padrão (%)
LC 30 % - CS 70 %	22,60	1,55	2,64	0,50
CS 100 % - 1	20,80	-	2,53*	-
LC 50 % - CS 50 %	22,26	2,29	3,07	0,42
CS 100 % - 2	19,36	-	2,34*	-
LC 70 % - CS 30 %	18,78	1,70	2,10	0,11

**Quadro 5.38** - Valores dos pesos específicos aparentes secos determinados para os tratamentos do trecho de Água Boa - AIT

Tratamentos	Parâmetros determinados em campo			
	$\gamma_d$ médio (kN/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kN/m <sup>3</sup> )	$W$ médio (%)	Desvio padrão (%)
LC 30 % - CS 70 %	21,51	0,14	2,57	0,01
CS 100 % - 1	19,57*	-	2,24*	-
LC 50 % - CS 50 %	20,75	1,22	2,07	0,32
CS 100 % - 2	19,53*	-	1,69*	-
LC 70 % - CS 30 %	19,30	1,50	1,64	0,06





Seção transversal imprópria e drenagem inadequada, ambas de baixo nível de severidade



Excesso de poeira com baixo nível de severidade, observado nos trechos com os seguintes tratamentos: LC 30 % - CS 70 % e CS 100 %



Excesso de poeira com médio nível de severidade, observado no trecho com o seguinte tratamento: LC 50 % - CS 50 %



Excesso de poeira com Alto nível de severidade, observado no trecho com o seguinte tratamento: LC 70 % - CS 30 %



Trilhas de roda com médio nível de severidade, presentes nos trechos com os seguintes tratamentos: LC 50 % - CS 50 % e LC 70 % - CS 30 %



Excesso de material solto com baixa coesão, observado nos trechos com os seguintes tratamentos: LC 50 % - CS 50 % e LC 70 % - CS 30 %

**Figura 5.43** - Fotos dos tratamentos do trecho de Jandaíra.



Seção transversal e drenagem, executadas de maneira correta



Perda de agregado de baixo nível de severidade, observada no trecho com o seguinte tratamento: CS 100 %



Trilhas de roda com baixo nível de severidade, presentes no trecho com o seguinte tratamento: LC 70 % - CS 30 %



Trilhas de roda de baixo nível de severidade, observadas no trecho com o seguinte tratamento: CS 100 %



Buracos de baixo nível de severidade, encontrados nos trechos com os seguintes tratamentos: CS 100 %, LC 50 % - CS 50 % e LC 70 % - CS 30 %

**Figura 5.44** - Fotos dos tratamentos do trecho de Água Boa - BIT.



Seção transversal e drenagem executadas de maneira correta. Entretanto, o trecho com o tratamento LC 70 % - CS 30 % teve suas condições iniciais comprometidas devido à superposição de trilhas de roda e ao afundamento da camada.



Buracos com médio nível de severidade, presentes nos trechos com os tratamentos: LC 50 % - CS 50 % e LC 70 % - CS 30 %

Trilhas de roda e buracos de baixo nível de severidade, observados nos trechos com os seguintes tratamentos: LC 30 % - CS 70 % e CS 100 %



Trilha de roda com baixo nível de severidade, observada no trecho com o seguinte tratamento: LC 50 % - CS 50 %

Superposição de defeitos de médio e alto nível de severidade, encontrados no trecho com o seguinte tratamento: LC 70 % - CS 30 %

**Figura 5.45** - Fotos dos tratamentos do trecho de Água Boa - AIT.

#### 5.11.4. Conclusões

Em laboratório, as melhores respostas nas características mecânicas dos solos, foram alcançados com as misturas cascalho de primeira – lama de cal, nos traços de 20 e 25 % de resíduo, onde obtiveram-se valores de CBR de 40 e 53 %, respectivamente, demonstrando o potencial do produto como estabilizante químico de solos. Em campo, em todos os trechos estradais avaliados a mistura envolvendo LC 30 % - CS 70 %, ou seja, 30 % de lama de cal com 70 % de cascalho mostrou-se pela análise de defeitos, como a mais promissora, visto que, apresentou menos defeitos e conseqüentemente um melhor desempenho quando comparada com as demais. Além desse fato, em todos os trechos avaliados os maiores valores de peso específico aparente seco foram observados para essa mistura, evidenciando um melhor entrosamento entre as partículas da mistura.

#### 5.11.5. Agradecimentos

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq e a FAPEMIG, pelo apoio financeiro ao presente projeto, bem como à CAPES e a empresa BAHIA PULP S/A, respectivamente, pela concessão da bolsa de doutorado ao primeiro autor e fornecimento dos solos e da lama de cal.

#### 5.11.6. Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.004**: classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ, 1987. 63 p.

BAESSO, D.P.; GONÇALVES, F.L.R. **Estradas Rurais**: técnicas adequadas de manutenção. Florianópolis, Santa Catarina, DER-SC, 2003. 236 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 051**: solos: análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 12 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 093**: solos: determinação da densidade real. Rio de Janeiro, RJ, 1994, 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 122**: solos: determinação do limite de liquidez: método de referência e método expedito. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 082**: solos: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, 1994. 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ME 129**: solos: compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **CLA 259**: classificação de solos tropicais para finalidades viárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamentos miniatura. São Paulo, SP, 1996. 6 p.

## 6. CONCLUSÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório com solos, misturas solo-grits e misturas solo-lama de cal e, também, na análise do desempenho em campo dessas misturas, apresentam-se as seguintes conclusões finais:

### Para as misturas solo-grits

- (i) os solos ensaiados no presente trabalho apresentaram graus de reatividade com o resíduo grits dependentes de suas texturas granulométricas, sendo as melhores respostas de resistência mecânica e expansibilidade das misturas associadas aos solos de textura arenosa;
- (ii) os melhores resultados de resistência mecânica obtidos corresponderam às misturas dos solos com teores de grits superiores a 20 %, podendo-se referir a 24 % do resíduo como o teor ótimo para fins de estabilização dos solos analisados no presente trabalho;
- (iii) a energia de compactação empregada na compactação e o período de cura, também, influenciaram significativamente a resistência mecânica e a expansibilidade das misturas;
- (iv) a presença de sódio (0,70 %), que é um agente dispersante de solos, na composição do grits influenciou negativamente na resistência mecânica

- das misturas com solos de texturas predominantemente argilosas, em função do aumento do período de cura;
- (v) o tempo decorrido entre a mistura dos solos e grits e a realização dos ensaios de compactação, em laboratório, influenciou os valores CBR e respectivas expansões das misturas, sendo este fato mais significativo para aquelas preparadas com o solo 2, tipicamente arenoso. Nessas, observou-se o crescimento dos valores CBR e o decréscimo da expansão nos materiais estabilizados compactados imediatamente após a mistura dos seus componentes;
  - (vi) em função de suas composições químicas, os lotes de procedência do grits produziram respostas mecânicas diferentes nas misturas solo 2-grits. As misturas com o lote de grits proveniente do pátio da empresa CENIBRA S/A, com 53,5 % de óxido de cálcio em sua composição, apresentaram maior potencialidade de uso do que as misturas com grits coletado no aterro industrial da CENIBRA S/A, que apresentaram 35,38 % de óxido de cálcio;
  - (vii) com relação às frações granulométricas que compõem o resíduo grits, a fração fina ( $\phi \leq 0,074$  mm) é a que mais contribuiu para os ganhos de resistência mecânica dos solos, evidenciando a influência deste parâmetro na reatividade das misturas;
  - (viii) o tipo de solo, o teor de grits, a energia de compactação e o período de cura influenciaram significativamente as perdas de resistência dos corpos-de-prova ensaiados após saturação em água. Nas misturas solo 1-grits, foram observados trincamentos nos corpos-de-prova compactados que podem ser associados à ação dispersante do sódio presente no resíduo. Esses trincamentos influenciaram o comportamento dessas misturas, principalmente, quando curadas a 90 dias. Nas misturas solo 2-grits, evidenciou-se que o resíduo não proporcionou coesão entre as partículas do solo, sendo que, para a maioria dos tratamentos, os corpos-de-prova não suportaram a imersão em água, em especial aqueles compactados na energia do Proctor modificado;

- (ix) o tratado térmico do grits em mufla tornou-o mais reativo nas misturas com os solos. Em termos de resistência mecânica, nas misturas solo 1-grits as melhores respostas obtidas para as temperaturas de 800 e 900 °C, bem como nas misturas solo 2-grits, para a temperatura de 800 °C;
- (x) quando em misturas com amostras de solos da região de Ipatinga-MG, o melhor desempenho do grits como estabilizante foi na mistura cenibra amarelo + 24 % grits, que se enquadrou nas exigências técnicas do DNIT (1996) com referência aos valores CBR e expansão de solos que compõem as camadas de base de pavimentos rodoviários. O desempenho dessa mistura, em campo, avaliada um ano após a construção do trecho experimental na CENIBRA S/A, evidenciou a falta de cimentação promovida pelo grits entre as partículas do solo, observando-se a ocorrência de erosão laminar que removeu parte da camada estabilizada e, interrompeu o fluxo de veículos. Como agravantes observados para este tipo de comportamento, pode-se referir ao tráfego extrapesado de caminhões observado no trecho experimental, à declividade excessiva do terreno em que o mesmo foi construído e à ação das águas das chuvas, que, em conjunto, favoreceram a ocorrência de quebra de ligações entre partículas de solo e lixiviação do resíduo.

*Para as misturas solo-lama de cal*

- (i) as misturas cascalho de primeira + 20 % lama de cal e cascalho de primeira + 25 % lama de cal, apresentaram, em laboratório as melhores respostas de resistência mecânica;
- (ii) no campo, contudo, o melhor desempenho das misturas solo-lama de cal, avaliado através da construção e acompanhamento do desempenho em serviço dos trechos experimentais construídos na região de Alagoinhas-Ba, foi para a mistura com 30 % de lama de cal e 70 % de cascalho de primeira.



## **ANEXO A**

Nesse apêndice, encontram-se os custos de construção de estradas florestais estimados por Lopes (2001).

**Quadro A1 - Custo total de construção de estradas florestais**

Qualidade da Rodovia		Atividades de Construção Custos (US\$/km)		Custo Total (US\$/km)
Greide	Largura e Pista de Rolamento	Infra-Estrutura	Pavimentação	
Plano (≤5%)	Pista dupla (≥7m) revestimento asfáltico	2.275,34	22.562,00	24.837,34
Ondulado (6-8%)	Pista dupla revestimento asfáltico	2705,06	22.562,00	25.267,06
Montanhoso (9-15%)	Pista dupla revestimento asfáltico	3134,84	22.562,00	25.696,84
Plano	Pista dupla revestimento primário	2.275,34	2.809,00	5.084,34
Ondulado	Pista dupla revestimento primário	3.716,29	2.809,00	6.525,29
Montanhoso	Pista dupla revestimento primário	5.157,31	2.809,00	7.966,31
Plano	Pista dupla sem revestimento	2.275,34	-	2.275,34
Ondulado	Pista dupla sem revestimento	3.716,29	-	3.716,29
Montanhoso	Pista dupla sem revestimento	5.157,31	-	5.157,31
Plano	Pista simples (≤5m) revestimento primário	1.647,01	1.755,62	3402,63
Ondulado	Pista simples revestimento primário	2.262,41	3.125,00	5.387,41
Montanhoso	Pista simples revestimento primário	3.602,82	1.755,62	5.358,44
Plano	Pista simples sem revestimento	1.647,01	-	1.647,01
Ondulado	Pista simples sem revestimento	2.262,41	-	2.262,41
Montanhoso	Pista simples sem revestimento	3.602,82	-	3.602,82

Fonte: Modificado de Lopes (2001).

## **ANEXO B**

Nesse apêndice, encontram-se uma revisão bibliográfica do processamento industrial pelo qual os resíduos grits e lama de cal da indústria de celulose são obtidos, bem como os seus respectivos quantitativos gerados no processo.

## Revisão Bibliográfica – Resíduos da Indústria de Celulose

Os resíduos sólidos gerados nas fábricas de celulose e papel dependem das características do processo e das técnicas de reaproveitamento empregadas; podem variar de uma unidade fabril para outra, mesmo nos casos em que os produtos finais sejam semelhantes (CPRH, 1998).

No processo de polpação kraft, utiliza-se uma solução quente (cerca de 170 °C), denominada de licor branco, rica em hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S), para a deslignificação da madeira. Como resultado do cozimento da madeira, tem-se a celulose e um licor preto, rico em álcali e matéria orgânica dissolvida da madeira. Esse licor deve passar por um processo de recuperação, em que, ao final, é convertido novamente em licor branco e utilizado no processo de digestão (OSSES, 1991).

Na produção de pasta sulfato (processo kraft), que abrange o polpamento alcalino, algumas etapas são fundamentais, após o preparo da madeira nos pátios, as quais são, segundo a concepção de Clark (1985), Assumpção e Pinho et al., (1988), Smook (1994) e o relatório CPRH (1998):

- (i) *cozimento* - provoca a formação de fibras individuais, do licor negro e dos gases da digestão. O licor de cocção é constituído basicamente de hidróxido de sódio (NaOH) e de sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>S); outros sais de sódio também são encontrados, em quantidades pequenas, incluindo aí, o carbonato de sódio, o tiosulfato de sódio, o sulfito de sódio e o silicato de sódio. Os reagentes químicos são preparados a partir do chamado licor branco, proveniente da unidade de recuperação de produtos químicos. A mistura reagente é encaminhada ao Blow Tank, sendo os gases condensados e a massa (polpa e licor) levados para a lavagem;
- (ii) *preparo da massa pela lavagem, depuração e espessamento* - a lavagem tem por finalidade separar a polpa celulósica do licor negro; é feita em filtros rotativos especiais operados em série, com lavagem em contracorrente. A depuração é feita em depuradores centrifugos (ou peneiras finas) e serve para separar pedaços de cavacos que não foram devidamente desfibrados. O espessamento serve para aumentar a

consistência da massa que é, posteriormente, enviada ao branqueamento e máquina de papel. O processamento do licor negro gera gases odoríferos (reduzidos de enxofre).

- (iii) *branqueamento* - consiste basicamente na remoção das substâncias que conferem cor à massa de celulose. Estas substâncias encontram-se associadas à lignina, representando apenas uma porção pequena em relação a ela. É realizado em três etapas fundamentais: deslignificação por oxidantes, tratamento cáustico, e branqueamento propriamente dito por agentes fortemente oxidantes;
- (iv) *recuperação de produtos químicos* - o licor negro é excelente fonte para recuperar o hidróxido de sódio e a energia armazenada, energia esta que supre em grande parte as necessidades de vapor da fábrica.

As etapas de interesse para o trabalho, determinantes na recuperação dos produtos químicos são:

- (i) *concentração do licor negro* - realizada em evaporadores de múltiplo efeito e no geral a concentração de sólidos no licor passa de 15 % para 55 %. Concentração posterior é feita em evaporadores de contato indireto passando para 65-70 % de sólidos. Nesta etapa, ocorre a formação e liberação de compostos reduzidos de enxofre (TRS);
- (ii) *incineração do licor concentrado* - feita na caldeira de recuperação, em que os gases de combustão usados para geração de vapor e o material fundido, constituído basicamente de carbonato de sódio e sulfeto de sódio é dissolvido com o licor branco fraco da recaustificação, formando o licor verde; o licor verde é clarificado, dando origem a impurezas sólidas que, após lavagem, se constituem nos resíduos chamados de *Dregs*. A caldeira de recuperação gera, também, material particulado, gases odoríferos, além de gases oxidados de enxofre e nitrogênio;
- (iii) *caustificação do licor verde* - constitui-se basicamente na reação de cal com o licor verde, formando o carbonato de sódio e o hidróxido de sódio, visa recuperar o NaOH para ser utilizado na digestão dos cavacos de

madeira. Um clarificador separa a lama contendo carbonato de cálcio do clarificado (hidróxido de sódio). A lavagem da lama acontece com água fresca, água dos condensadores da evaporação ou água de lavagem dos Dregs e constitui-se no licor branco fraco. Os sólidos aqui retidos são chamados de *Grits*. Formam-se também gases malcheirosos (TRS);

(iv) *recuperação da cal* - a lama de cal é adensada em filtros a vácuo e calcinada em forno de cal, transformando-se em óxido de cálcio, que retorna ao processo. O forno de cal é grande fonte de emissão de material particulado e compostos reduzidos de enxofre. Nem todas as empresas de celulose possuem um forno de cal para recuperação da lama-de-cal, sendo esse resíduo descartado em aterros.

A Figura B1 ilustra o fluxograma básico do processo Kraft com a indicação dos principais pontos de geração de poluentes, de interesse do presente trabalho.

Segundo Patinöl (1998), de uma maneira geral, o sistema de recuperação química é composto por dois ciclos em separado: (i) o ciclo do sódio (circuito líquido) e (ii) o ciclo do cálcio (circuito sólido). Para o circuito líquido, o licor negro resultante do processo de digestão é enviado para um sistema de evaporação e, após concentrado (60 a 70% de consistência), para a fornalha, onde a lignina e outros constituintes da madeira presentes no licor negro concentrado mantêm a combustão, enquanto os compostos de enxofre passam por reações. Ainda segundo o autor as reações mais importantes são as de conversão dos compostos orgânicos de sódio em carbonato de sódio e a redução de sulfato a sulfeto.

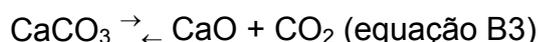
Patinöl (1998) descreveu, também, que a massa fundida formada, denominada smelt, é composta, principalmente, de carbonato de sódio e sulfeto de sódio. O smelt é, então, dissolvido em um licor branco fraco. A solução resultante, denominada licor verde (contém também sulfeto de ferro que confere a cor verde), é bombeado ao clarificador que tem a função de separar as impurezas insolúveis (dregs) por decantação. O licor verde segue, então, para o tanque de estabilização, onde é tratado com uma suspensão

concentrada de hidróxido de cálcio para caustificar o carbonato de sódio em hidróxido de sódio, produzindo licor branco para ser usado no cozimento.

Essa etapa consiste, segundo o CNP, FINEP e IPT (1985), na adição de óxido de cálcio (CaO) ao licor verde para ser apagado com água, fornecendo o hidróxido de cálcio, usado para converter o carbonato de sódio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) em hidróxido de sódio (NaOH). No apagador de cal ocorre a extinção da cal e as reações iniciais de caustificação. As reações químicas envolvidas são:



A lama aquosa proveniente dos caustificadores contém carbonato de cálcio sólido (lama de cal) que deve ser removido do licor branco, o que normalmente é realizado em clarificadores, sendo o material sólido resultante enviado para o forno de cal, onde ocorre a seguinte reação (PATIÑOL, 1998):



Como esta reação é reversível, não se consegue, mesmo sob as condições mais favoráveis, uma conversão maior do que de 85 a 90 %. A reação incompleta decorre do aumento da solubilidade do carbonato de cálcio com o da quantidade de íons hidroxila na solução e do fato da reação ocorrer na superfície das partículas de cal em suspensão, as quais perdem sua reatividade à medida que ficam cobertas por uma camada de carbonato de cálcio (ASSUMPÇÃO; PINHO; CAHEN et al., 1988). Assim, fica evidente que o objetivo da calcinação é obter cal virgem (CaO) a partir da lama de cal (CaCO<sub>3</sub>) para ser reutilizada no processo (CNP; FINEP; IPT, 1985).

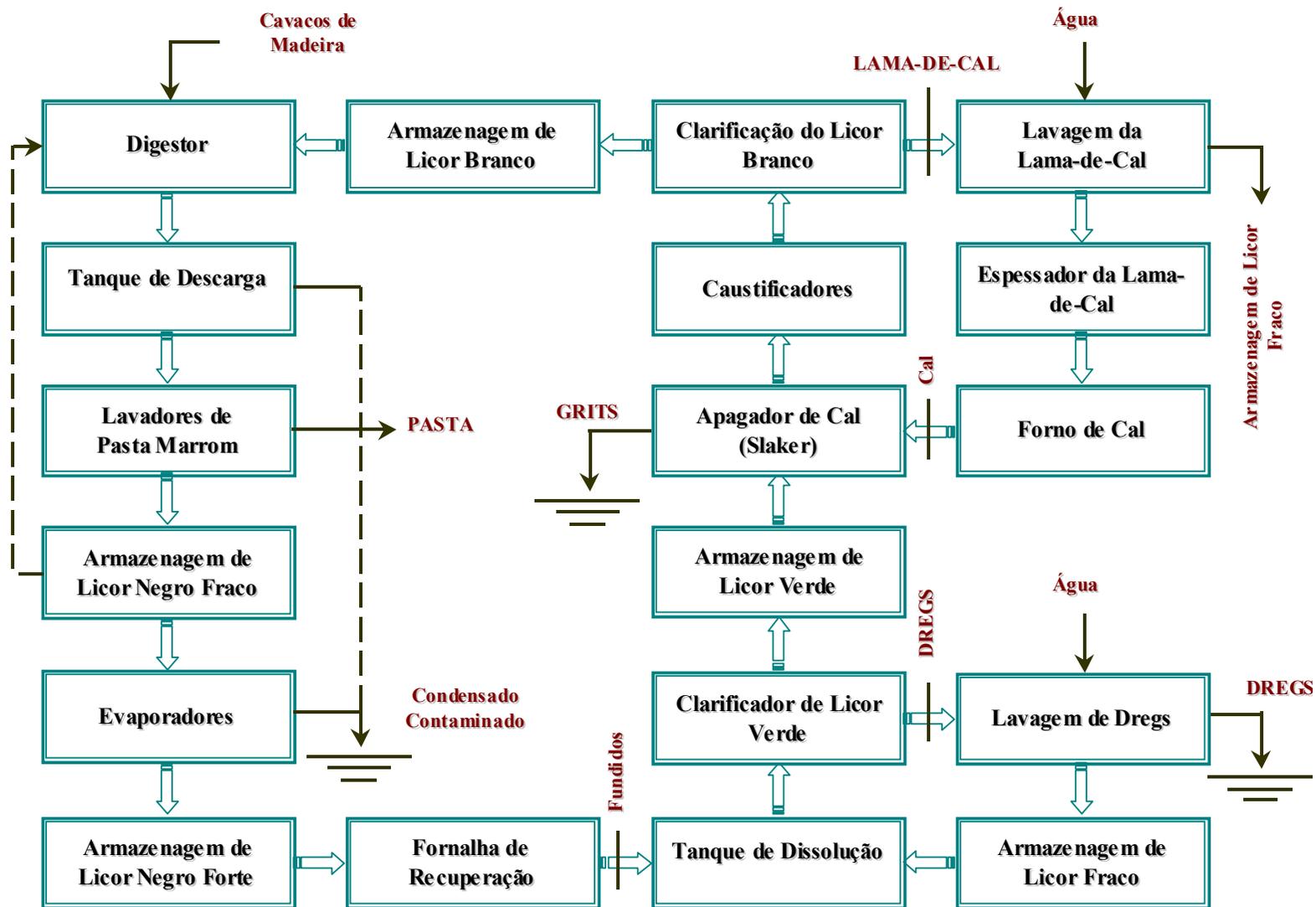


Figura B1 – Fluxograma da produção e recuperação kraft mostrando a geração dos resíduos grits e lama de cal.



De uma maneira geral, pode-se dizer que o *grits* se origina no slaker ou apagador de cal, onde ocorre a hidratação da cal proveniente da recuperação da *lama de cal* ou de silos de CaO novos para repor possíveis perdas no processo, que reage com o licor verde (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). O slaker possui um canal inclinado onde há um classificador com raspadores para retirar os sólidos não dissolvidos passando-os por baixo de chuveiros até a descarga de refugos, que nada mais são do que os chamados *grits*, constituídos por areia, pedregulho, calcário, e outras impurezas que não reagiram, podendo possuir também, quantidades de CaO, Ca(OH)<sub>2</sub> e Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Já a *lama de cal* é o resíduo proveniente da clarificação do licor branco, sendo constituída por CaCO<sub>3</sub> e alguma quantidade de NaOH.

No Quadro B1 encontram-se os tipos de resíduos gerados nas fábricas de celulose e papel com seus respectivos quantitativos e classificação quanto a classe de toxidez, de acordo com o CPRH (1998). Nota-se que a quantidade de *grits* gerada é extremamente superior a de *lama de cal*, visto que a mesma, em algumas empresas, é recuperada; os dois resíduos são classificados pela ABNT (1987), como classe II, ou seja, materiais não-inertes, apesar do elevado pH desses dois ser um indicativo de materiais altamente corrosivos, pela presença de soda cáustica, levando-os a classe I.

**Quadro B1 – Resíduos sólidos gerados nas fábricas de celulose e papel**

Área de Origem	Tipo	Carga Espec. (kg/t <sub>csa</sub> *)	Nível de Toxidez (ABNT - NBR 10.004)
<i>Manuseio da Madeira</i>	Areia	13	classe II
<i>Caldeira Auxiliar</i>	Cinzas	8	classe II
<i>Caustificação</i>	Dregs	3	classe II
	Grits	12	classe II
<i>Planta Química</i>	Lamas	0,4	classe II
<i>Estação Trat. Despejos</i>	Lodo Primário	28	classe II
<i>Diversos</i>	Gerais	1,0	classe II
<i>Total</i>		65,40	-

\*kg/t<sub>csa</sub> – quantidade (kg) gerada por toneladas de celulose seca ao ar (csa)

Fonte: Modificado de CPRH (1998), dados da FACELPA (1977).

## Referências bibliográficas

ASSUMPÇÃO, R.M.V.; PINHO, M.R.R.; CAHEN, R.; PHILIPP, P. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. São Paulo, SP: IPT, v. 1, 2. ed., 1988. p. 169-319.

CLARK, J.A. **Pulp technology and treatment for paper**. San Francisco, USA: Miller Freeman Publications, 2. ed., 1985. 878 p.

CNP, FINEP, IPT. **Conservação de energia na indústria de celulose e papel**. Manual de Recomendações, v. 1, cap. 3, São Paulo, 1985. p. 17-70.

COMPANIA PERNAMBUCANA DE MEIO AMBIENTE – CPRH. **Roteiro complementar de licenciamento e fiscalização: indústria de papel de celulose**. Recife, Pernambuco: Publicações Projeto CPRH/GPZ, 1998. 95 p.

OSSES, M. **Las emisiones de olores de una planta de celulosa kraft**. Celulosa y Papel, 1991. p. 6-16.

PATIÑO, O.A. **SENAI-CETCEP – Centro Nacional de Tecnologia em Celulose e Papel**. e-mail: cetcep@teb.convoy.com.br (1998).

SMOOK, G.A. **Handbook for pulp & paper technologists**. Vancouver, Bellingham, Canada: Angus Wilde Publications, 2. ed., 1994. 419 p.

## **ANEXO C**

Nesse apêndice, encontra-se a ficha de avaliação de defeitos em estradas vicinais, que foi empregada nos trechos experimentais com o resíduo sólido lama de cal na microrregião de Alagoinhas-Ba, em áreas da empresa BAHIA PULP S/A, segundo metodologia de Baesso e Gonçalves (2003).

	<b>Universidade Federal de Viçosa</b> Departamento de Engenharia Civil Setor de Estradas e Transportes		<b>Inspeção de Rodovia Não Pavimentada</b>					
	Sigla da Rodovia: <u>Jandaíra</u>		Data: <u>17/02/2004</u>					
Ramo: <u>01</u>		Inspetor: <u>Tiago e Reginaldo</u>						
Seção: <u>001 - LC30% CS70%</u>		Área da US: <u>50.00</u> m <sup>2</sup>						
Unidade Simples: <u>01</u>								
<u><b>Tipos de Defeitos</b></u>		<u><b>Croquis</b></u>						
1 - Seção Transversal Imprópria (m) 2 - Drenagem Inadequada (m) 3 - Corrugações (m) 4 - Excesso de Poeira 5 - Buracos (unid.) 6 - Trilha de Roda (m <sup>2</sup> ) 7 - Perda de Agregados (m)								
<u><b>Quantidade de Defeitos e Severidade</b></u>								
Tipo de Defeito		1	2	3	4	5	6	7
Quantidade e Severidade	B		7.5		x			2
	M							
	A							
Nota: B = Severidade baixa; M = Severidade média; e A = Severidade alta.								
<u><b>Cálculo do ICRNP</b></u>								
Tipo de Defeito	Densidade	Severidade	Valor Dedutível	Observações:				
1								
2	49.2	Baixo (B)	32.0					
3								
4	-	Baixo (B)	2.0					
5								
6								
7	13.1	Baixo (B)	15.6					
Total do Valor Dedutível = .....			49.6					
Valor "q" = .....			2.0					
Valor do ICRNP =	<b>64</b>	<b>Classificação</b>	<b>Boa</b>					
Nota: ICRNP = Índice da Condição da Rodovia Não Pavimentada								
0	10	25	40	55	70	85	100	
Péssima	Muito Pobre	Pobre	Regular	Boa	Muito Boa	Excelente		

**Figura C1**– Ficha utilizada na avaliação dos trechos da Alagoinhas-Ba.