

FABRÍCIO CARLOS FRANÇA

**ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS PARA FINS  
RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE CASO COM O PRODUTO  
“RBI GRADE 81”**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2003

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

T

F814e  
2003  
França, Fabrício Carlos, 1976-  
Estabilização química de solos para fins rodoviários :  
estudo de caso com o produto “RBI Grade 81” /  
Fabrício Carlos França. – Viçosa : UFV, 2003.  
104p. : il.

Orientador: Carlos Alexandre Braz de Carvalho  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Viçosa

1. Solos - Compactação. 2. Misturas. 3. Pavimentos de  
solo. 4. Solos - Resistência. 5. Pavimentos - Projetos e  
construção. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 624.151363

CDD 20.ed. 624.151363

FABRÍCIO CARLOS FRANÇA

**ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS PARA FINS  
RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE CASO COM O PRODUTO  
“RBI GRADE 81”**

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

APROVADA: 31 de julho de 2003.

---

Prof. Dario Cardoso de Lima

(Conselheiro)

---

Prof. Cláudio Henrique de Carvalho  
Silva

(Conselheiro)

---

Prof. Mitsuo Tsutsumi

---

Prof. Carlos Cardoso Machado

---

Prof. Carlos Alexandre Braz de Carvalho  
(Orientador)

---

*A Deus.  
À toda minha família.*

---

## AGRADECIMENTO

A Deus por tudo.

À minha família, especialmente aos meus pais (José França e Heloisa) e a minha irmã (Elaine), pela ajuda e incentivo.

À Sheila, Delci e Ana, pelo carinho e amizade durante esta etapa da minha vida.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do DEC (Departamento de Engenharia Civil), pela oportunidade de realizar este curso.

Ao Professor Carlos Alexandre Braz de Carvalho, pelos ensinamentos, pela valiosa orientação e, sobretudo, pelos momentos de atenção.

Aos conselheiros, Professor Dario Cardoso de Lima e Professor Cláudio Henrique de Carvalho Silva, pelos ensinamentos e amizade.

Ao Professor Paulo Sérgio, pelas sugestões apresentadas e pela dedicação, principalmente, no Laboratório de Geotecnia da UFV (Universidade Federal de Viçosa).

Aos demais professores do Curso de Mestrado em Engenharia Civil, pelo apoio e incentivo, dedicados durante o Curso.

Ao engenheiro civil Gersonito Silva Vieira e a bolsista de iniciação científica CNPq Iara Andrade Couto, pela amizade e auxílio na execução dos ensaios de laboratório.

---

À Cristina (secretária da Pós-Graduação), pela amizade e atenção.

Aos técnicos Júlio Carlos, Paulo Capelão e Francisco Martins Moreira (Chiquito), pela importante colaboração durante a execução da pesquisa.

Ao Senhor Josy Cohen, diretor da Road Building International, Cape Town - África do Sul, que introduziu o produto RBI Grade 81 no Brasil.

Ao Professor Laércio Couto do Departamento de Engenharia Florestal da UFV, pelo apoio e participação na introdução do produto RBI Grade 81 no Brasil.

À empresa Vallourec & Mannesmann, por intermédio dos Senhores Paulo Bahia e Sedio Pires, pelo apoio e fornecimento de amostras de RBI Grade 81, para que este trabalho fosse realizado.

À empresa Tecflora (Tecnologia Florestal Avançada) que é representante do produto no Brasil, pela colaboração neste trabalho.

À SIF (Sociedade de Investigações Florestais), pelo apoio dispensado.

À todos os colegas de curso e amigos (Alexandre, Gisele, Danilo, Tiago, Reginaldo, Giovani e Rodrigo), pelo convívio no laboratório do DEC e pelas gratas recordações.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior), pela concessão da bolsa de estudo do autor.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico), pela concessão da bolsa de iniciação científica à acadêmica de engenharia civil da UFV Iara Andrade Couto e de bolsa de aperfeiçoamento ao engenheiro civil Gersonito Silva Vieira.

---

## **BIOGRAFIA**

FABRÍCIO CARLOS FRANÇA, filho de José França e Heloisa Carlos Jorge França, nasceu em Montes Claros - MG, em 31 de julho de 1976.

Em março de 2001, graduou-se em Engenharia Civil, na Universidade Federal de Viçosa.

Em abril de 2001, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia, pela Universidade Federal de Viçosa – MG.

---

## CONTEÚDO

	Página
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE QUADROS .....	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES .....	xx
RESUMO .....	xxi
ABSTRACT .....	xxiii
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Considerações Iniciais .....	1
1.2. Objetivo .....	3
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1. Introdução .....	4
2.2. Solo .....	4
2.3. Estabilização do Solo .....	6
2.3.1. Experiências Anteriores .....	8
2.3.1.1. Estabilização Solo-Cimento .....	8
2.3.1.2. Estabilização Solo-Cal .....	11
2.3.1.3. Estabilização Solo-Betume .....	14
2.3.1.3.1. Estabilização Solo-Alcatrão de Madeira .....	15

---

2.3.1.4. Estabilização Solo-Licor Negro Kraft .....	17
2.3.1.5. Estabilização Solo-DS-328 .....	19
2.3.1.6. Estabilização Solo-Vinhoto .....	21
2.4. RBI Grade 81 .....	23
2.4.1. Faixa de Composição Química do RBI Grade 81 .....	25
2.4.2. Mecanismos de Reação .....	25
2.4.3. Avaliação Ambiental .....	27
2.4.3.1. Ensaio de Lixiviação .....	28
2.4.4. Processo e Construção de uma Estrada com RBI Grade 81 .....	30
2.4.4.1. Antes da Construção da Camada Estabilizada .....	30
2.4.4.2. Preparação da Camada .....	30
2.4.4.3. Aplicação do Agente Estabilizante .....	30
2.4.4.4. Mistura do Agente Estabilizante .....	31
2.4.4.5. Umedecimento .....	31
2.4.4.6. Conformação .....	32
2.4.4.7. Compactação .....	32
2.4.4.8. Cura da Camada Estabilizada .....	33
2.4.4.9. Limitações de Construção .....	33
2.4.5. Experiência Brasileira .....	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	36
3.1. Introdução .....	36
3.2. Materiais .....	36
3.2.1. Solos .....	36
3.2.2. Aditivo Químico .....	39
3.3. Métodos .....	39
3.3.1. Metodologia de Campo .....	40
3.3.2. Metodologia de Laboratório .....	40
3.3.2.1. Ensaio de Caracterização .....	42
3.3.2.2. Misturas Solo-Aditivo Químico .....	42
3.3.2.3. Ensaio de Compactação .....	43
3.3.2.4. Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR) .....	43
3.3.2.5. Ensaio de Resistência à Compressão Não- Confinada .....	43
3.3.2.6. Ensaio Triaxial Dinâmico .....	47

---

3.3.2.7. Normas Técnicas Utilizadas no Presente Trabalho ..	49
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	50
4.1. Considerações Iniciais .....	50
4.2. Ensaio de Caracterização .....	50
4.2.1. Classificação dos Solos .....	52
4.3. Ensaio de Compactação .....	53
4.4. Índice de Suporte Califórnia e Expansão .....	59
4.4.1. Influência da Energia de Compactação no CBR e na Expansão .....	69
4.4.2. Influência do Teor de RBI Grade 81 no CBR e na Expansão .....	70
4.4.3. Influência do Período de Cura no CBR e na Expansão ..	71
4.5. Resistência à Compressão Não-Confinada .....	73
4.5.1. Influência da Energia de Compactação na Resistência à Compressão Não-Confinada .....	79
4.5.2. Influência do Teor de RBI Grade 81 na Resistência à Compressão Não-Confinada .....	80
4.5.3. Influência do Período de Cura na Resistência à Compressão Não-Confinada .....	81
4.6. Módulo Resiliente .....	82
4.7. Considerações Finais .....	87
5. CONCLUSÕES .....	90
6. RECOMENDAÇÕES .....	92
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94
APÊNDICE A .....	100

---

## LISTA DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1</b> – Variação do CBR e da Expansão com o teor de cimento, para misturas de solos com cimento compactadas na energia do ensaio Proctor Normal .....	10
<b>Figura 2</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada com o teor de cimento, para misturas de solos com cimento compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (FERRAZ, 1994) .....	11
<b>Figura 3</b> – Variação do CBR e da Expansão com o teor de cal, para misturas de solos com cal compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (FERRAZ, 1994) .....	13
<b>Figura 4</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada com o teor de cal, para misturas de solos com cal compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (FERRAZ, 1994) .....	13
<b>Figura 5</b> – Variação do CBR e da Expansão com o teor de betume, para misturas de solos com betume compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (BUENO et. al., 1991)	15
<b>Figura 6</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada com o teor de betume, para misturas de solos com	

---

betume compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (CARVALHO et al., 1992) .....	15
<b>Figura 7</b> – Variação do CBR e da Expansão com o teor de alcatrão, para misturas de solos com alcatrão compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (FERNANDES, 2000) .	17
<b>Figura 8</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada com o teor de alcatrão, para misturas de solos com alcatrão compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (SANT’ANNA, 2002) .....	17
<b>Figura 9</b> – Variação do CBR e da Expansão com o teor de licor negro kraft, para misturas de solos com licor negro compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (VIEIRA, 1994) .....	18
<b>Figura 10</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada com o teor de licor negro kraft, para misturas de solos com licor negro compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (VIEIRA, 1994) .....	19
<b>Figura 11</b> – Variação do CBR e da Expansão (7 dias de cura) para misturas de solos com DS-328, utilizando sulfato de alumínio como neutralizante, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário (VAILLANT, 1995) .....	20
<b>Figura 12</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada para misturas de solos com DS-328, utilizando sulfato de alumínio como neutralizante, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário (VAILLANT, 1995) .....	20
<b>Figura 13</b> – Variação do CBR e da Expansão com o teor de vinhoto, para misturas de solos com vinhoto compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (FERRAZ, 1994)....	22
<b>Figura 14</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada com o teor de vinhoto, para misturas de solos com vinhoto compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (FERRAZ, 1994) .....	22
<b>Figura 15</b> – Embalagem de 25 kg de RBI Grade 81 .....	24
<b>Figura 16</b> – Amostra de RBI Grade 81 .....	24

---

<b>Figura 17</b> – Microscopia eletrônica de varredura mostra a matriz de cristal preenchendo os espaços vazios do solo estabilizado com RBI Grade 81 (RBI, 2000) .....	27
<b>Figura 18</b> – Pátio da empresa Vallourec & Mannesmann em Belo Horizonte, poucos dias após a estabilização de 15 cm da camada de base com RBI Grade 81 .....	35
<b>Figura 19</b> – Pátio da empresa Vallourec & Mannesmann em Belo Horizonte, 1 ano após a estabilização de 15 cm da camada de base com RBI Grade 81 .....	35
<b>Figura 20</b> – Talude da estrada que liga Viçosa ao distrito de Palmital – Solo PVB .....	37
<b>Figura 21</b> – Talude da rodovia que liga Viçosa a Paula Cândido, próximo à estação de tratamento de água da cidade – Solo ETA.....	37
<b>Figura 22</b> – Talude com corte de mais de 20 metros, situado adjacente à rodovia que liga Viçosa a Paula Cândido, em frente à entrada do bairro Romão dos Reis – Solo SP.....	38
<b>Figura 23</b> – Talude existente próximo à Vila Secundino, dentro do Campus da Universidade Federal de Viçosa – Solo VS .....	39
<b>Figura 24</b> – Fluxograma dos procedimentos adotados no trabalho .	41
<b>Figura 25</b> – Equipamento utilizado para moldagem dos corpos-de-prova na energia do ensaio Proctor Intermediário (compactação por impacto).....	45
<b>Figura 26</b> – Equipamento utilizado para moldagem dos corpos-de-prova na energia do ensaio Proctor Modificado (compactação estática) .....	46
<b>Figura 27</b> – Conjunto para realização do ensaio triaxial dinâmico ..	47
<b>Figura 28</b> – Câmara triaxial contendo amostra, célula de carga e LVDT .....	48
<b>Figura 29</b> – Curvas granulométricas dos solos em estudo.....	51

---

<b>Figura 30</b> – Teor ótimo de umidade em função da adição de RBI Grade 81 ao solo PVB – energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado .....	54
<b>Figura 31</b> – Peso específico seco máximo em função da adição de RBI Grade 81 ao solo PVB – energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado .....	54
<b>Figura 32</b> – Teor ótimo de umidade em função da adição de RBI Grade 81 ao solo ETA – energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado .....	55
<b>Figura 33</b> – Peso específico seco máximo em função da adição de RBI Grade 81 ao solo ETA – energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado .....	55
<b>Figura 34</b> – Teor ótimo de umidade em função da adição de RBI Grade 81 ao solo SP – energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado .....	56
<b>Figura 35</b> – Peso específico seco máximo em função da adição de RBI Grade 81 ao solo SP – energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado .....	56
<b>Figura 36</b> – Teor ótimo de umidade em função da adição de RBI Grade 81 ao solo VS – energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado .....	57
<b>Figura 37</b> – Peso específico seco máximo em função da adição de RBI Grade 81 ao solo VS – energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado .....	57
<b>Figura 38</b> – Variação do CBR em função do período de cura das misturas PVB-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário .....	61
<b>Figura 39</b> – Variação do CBR em função do período de cura das misturas PVB-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado .....	61
<b>Figura 40</b> – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas PVB-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário .....	62
<b>Figura 41</b> – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas PVB-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado.....	62

---

<b>Figura 42</b> – Variação do CBR em função do período de cura das misturas ETA-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário .....	63
<b>Figura 43</b> – Variação do ETA em função do período de cura das misturas PVB-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado .....	63
<b>Figura 44</b> – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas ETA-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário .....	64
<b>Figura 45</b> – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas ETA-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado.....	64
<b>Figura 46</b> – Variação do CBR em função do período de cura das misturas SP-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário .....	65
<b>Figura 47</b> – Variação do CBR em função do período de cura das misturas SP-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado .....	65
<b>Figura 48</b> – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas SP-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário .....	66
<b>Figura 49</b> – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas SP-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado .....	66
<b>Figura 50</b> – Variação do CBR em função do período de cura das misturas VS-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário .....	67
<b>Figura 51</b> – Variação do CBR em função do período de cura das misturas VS-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado .....	67
<b>Figura 52</b> – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas VS-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio do Proctor Intermediário .....	68
<b>Figura 53</b> – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas VS-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado .....	68

---

<b>Figura 54</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas PVB-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário .....	75
<b>Figura 55</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas PVB-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado .....	75
<b>Figura 56</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas ETA-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário .....	76
<b>Figura 57</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas ETA-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado .....	76
<b>Figura 58</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas SP-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário .....	77
<b>Figura 59</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas SP-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado .....	77
<b>Figura 60</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas VS-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário .....	78
<b>Figura 61</b> – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas VS-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado .....	78
<b>Figura 62</b> – Módulo resiliente em função da tensão desvio, das misturas PVB-6% RBI Grade 81, compactadas nas energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, com 7 dias de cura .....	83
<b>Figura 63</b> – Módulo resiliente em função da tensão desvio, das misturas ETA-6% RBI Grade 81, compactadas nas	

---

energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, com 7 dias de cura .....	83
<b>Figura 64</b> – Módulo resiliente em função da tensão confinante, das misturas SP-6% RBI Grade 81, compactadas nas energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, com 7 dias de cura .....	84
<b>Figura 65</b> – Módulo resiliente em função do primeiro invariante de tensões, das misturas SP-6% RBI Grade 81, compactadas nas energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, com 7 dias de cura.....	85
<b>Figura 66</b> – Módulo resiliente em função da tensão confinante, das misturas VS-6% RBI Grade 81, compactadas nas energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, com 7 dias de cura .....	86
<b>Figura 67</b> – Módulo resiliente em função do primeiro invariante de tensões, das misturas VS-6% RBI Grade 81, compactadas nas energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, com 7 dias de cura.....	86
<b>Figura A1</b> – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo PVB com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Intermediário .....	101
<b>Figura A2</b> – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo PVB com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Modificado.....	101
<b>Figura A3</b> – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo ETA com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Intermediário .....	102
<b>Figura A4</b> – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo ETA com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Modificado.....	102
<b>Figura A5</b> – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo SP com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Intermediário .....	103
<b>Figura A6</b> – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo SP com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Modificado.....	103

---

<b>Figura A7</b> – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo VS com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Intermediário .....	104
<b>Figura A8</b> – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo VS com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Modificado.....	104

---

## LISTA DE QUADROS

	Página
<b>Quadro 1</b> – Faixa de composição química do RBI Grade 81 (resíduo de 99,2% a 105 °C e resíduo de 95,8 a 600 °C).	25
<b>Quadro 2</b> – Concentração de metais pesados no RBI Grade 81 e na cal .....	28
<b>Quadro 3</b> – Ânions e cátions (mg/L) encontrados nas amostras analisadas .....	29
<b>Quadro 4</b> – Metais pesados (µg/L = partes por bilhão) encontrados nas amostras analisadas .....	29
<b>Quadro 5</b> – Ensaios de caracterização, compactação, CBR, resistência à compressão não-confinada, módulo de resiliência e respectivas Normas.....	49
<b>Quadro 6</b> – Granulometria (ABNT), limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade e peso específico dos sólidos dos solos em estudo .....	51
<b>Quadro 7</b> – Identificação dos solos pelas classificações HRB, USC e MCT .....	52

---

<b>Quadro 8</b> – Peso específico seco máximo e teor ótimo de umidade das misturas solo-RBI Grade 81 – energias de compactação dos ensaio Proctor Intermediário e Modificado.....	53
<b>Quadro 9</b> – CBR e Expansão dos solos e misturas solo-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário .....	59
<b>Quadro 10</b> – CBR e Expansão dos solos e misturas solo-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado.....	60
<b>Quadro 11</b> – Ganho percentual de CBR devido ao aumento da energia de compactação para as misturas dos solos PVB, ETA, SP e VS com RBI Grade 81.....	69
<b>Quadro 12</b> – Percentual de CBR alcançado com 1 e 7 dias de cura em relação aos 28 dias de cura para as misturas PVB, ETA, SP e VS com RBI Grade 81.....	72
<b>Quadro 13</b> – Resistência à Compressão Não-Confinada dos solos e misturas solo-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário .....	73
<b>Quadro 14</b> – Resistência à Compressão Não-Confinada dos solos e misturas solo-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado.....	74
<b>Quadro 15</b> – Ganho percentual de Resistência à Compressão Não-Confinada devido o aumento da energia de compactação para as misturas dos solos PVB, ETA, SP e VS com RBI Grade 81 .....	80
<b>Quadro 16</b> – Percentual de Resistência à Compressão Não-Confinada alcançado com 1 e 7 dias de cura em relação aos 28 dias de cura para as misturas PVB, ETA, SP e VS com RBI Grade 81 .....	81

---

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações

CNA – Confederação Nacional da Agricultura  
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem  
DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes  
AASHTO – American Association of State Highway and  
Transportation Officials  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
TRB – Transportation Research Board  
USC – Unifield Soil Classification  
MCT – Miniatura Compactada Tropical  
CBR – Índice de Suporte Califórnia  
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio  
DEC – Departamento de Engenharia Civil  
UFV – Universidade Federal de Viçosa  
LL – Limite de Liquidez  
LP – Limite de Plasticidade  
IP – Índice de Plasticidade  
 $\gamma_s$  – Peso Específico dos Sólidos  
 $\gamma_{dm\acute{a}x}$  – Peso Específico Seco Máximo  
W<sub>ót</sub> – Teor Ótimo de Umidade  
CP – Corpo-de-Prova  
H – Altura  
D – Diâmetro  
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal

---

## RESUMO

FRANÇA, Fabrício Carlos, M.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2003. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”**. Orientador: Carlos Alexandre Braz de Carvalho. Conselheiros: Dario Cardoso de Lima e Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

Este trabalho teve como objetivo caracterizar, tecnologicamente, em laboratório, misturas de quatro tipos de solos da Microrregião de Viçosa – MG, Brasil, com o aditivo químico RBI Grade 81, para fins rodoviários. Dois desses solos são constituídos de textura argilo-areno-siltosa e referidos neste trabalho como ETA e PVB, de classificação TRB A-7-5 (20). Os demais, são de textura areno-silto-argilosa, de classificação TRB A-2-6 (3) e A-2-4 (0) e referidos nesta investigação de SP e VS, respectivamente.

O aditivo químico é um pó de cor cinza, pH básico, inodoro e de baixa solubilidade em água. Segundo o fabricante, o produto vem sendo utilizado em vários países como estabilizante químico dos materiais empregados nas camadas dos pavimentos de rodovias. O seu uso no Brasil ainda não foi difundido, sendo este o primeiro trabalho de pesquisa com o referido produto na área de pavimentação.

Nos quatro solos foram realizados ensaios de índice de suporte Califórnia (CBR) e resistência à compressão não-confinada, com três teores

---

de RBI Grade 81 (2%, 4% e 6%) e três períodos de cura (1, 7 e 28 dias), trabalhando com duas energias de compactação (Proctor Intermediário e Modificado). Isto possibilitou observar a influência do teor de aditivo, da energia de compactação e do período de cura no comportamento mecânico das misturas. Determinou-se também o módulo de resiliência das misturas dos solos com 6% de RBI Grade 81, com 7 dias de cura, nas duas energias de compactação citadas anteriormente.

Através dos resultados obtidos nesta pesquisa, observou-se que apesar de algumas misturas apresentarem resultados diferentes do esperado, a maioria das misturas solo-RBI Grade 81 tiveram melhorias significativas no comportamento mecânico aqui representados pelos parâmetros CBR e resistência à compressão não-confinada, com o aumento do teor de RBI Grade 81, da energia de compactação e do período de cura.

---

## ABSTRACT

FRANÇA, Fabrício Carlos, M.S., Universidade Federal de Viçosa, July de 2003. **Chemical stabilization of soils for road engineering applications: case study using RBI Grade 81.** Adviser: Carlos Alexandre Braz de Carvalho. Committee members: Dario Cardoso de Lima e Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

This study is directed to the laboratory geotechnical characterization of soil-RBI Grade 81 mixtures for road engineering applications. Four soils from the microregion of the country of Viçosa, Minas Gerais state, Brazil, are used throughout the experiment. Two of those soils, named ETA and PVB, are silty-sandy clays, and following the Transportation Research Board (TRB) classification system are A-7-5 (20). The other two soils, named SP and VS, are clayey-silty sands classified, respectively, as A-2-6 (3) and A-2-4 (0).

The RBI Grade 81 is a gray powder stabilizer presenting basic pH, low water solubility, and without odor. The manufacturer informs that this product has been used worldwide as a stabilizer for road engineering application. However, in Brazil, there is no information regarding its use, as well as this is the first research already developed for this purpose.

The laboratory testing program encompassed the following tests: soil geotechnical characterization, California Bearing Ration (CBR), unconfined compression, and dynamic triaxial.

---

In order to evaluate the influence of stabilizer content, curing time, and compaction effort on mixtures mechanical strength mixtures specimens were prepared using three RBI Grade 81 contents (2, 4 and 6%), three curing times (1, 7 and 28 days), and two compaction efforts (Intermediate and Modified Proctor). Dynamic triaxial tests were performed on specimens prepared at the two referred compaction efforts at 6% of stabilizer, and 7 days curing time.

Data analysis support that increases in stabilizer content, curing time, and compaction effort are responsible for increase in mixtures mechanical strength.

---

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações Iniciais

Presentemente, nota-se que o quadro de descaso e abandono das rodovias brasileiras pouco se alterou nos últimos anos. Destaca-se que a rede pavimentada e não pavimentada nacional, somadas às redes federais, estaduais e municipais, conta com aproximadamente 1,89 milhão de quilômetros. Desse total, apenas 165 mil quilômetros são pavimentados, perfazendo apenas 9% da rede total (GEIPOT, 2002).

Supondo-se que a parcela dessas rodovias em terra justificasse os serviços de pavimentação, seja pelo número de veículos, como pela importância regional ou estratégica, algumas centenas de milhares de quilômetros necessitariam ser pavimentadas nos próximos anos.

Por causa da precariedade das rodovias brasileiras perdeu-se, no ano 2002, algo em torno de 10% da safra recorde que alcançou mais de 100 milhões de toneladas de grãos. Segundo a Confederação Nacional da Agricultura (CNA), o prejuízo foi de R\$ 2,7 bilhões, excluído desse montante, o aumento de 30% no custo de manutenção dos caminhões de cargas, por conta da deficiência das rodovias (JORNAL ESTADO DE MINAS, 21/01/2002).

---

O final do ano de 2002 e o início de 2003 foram caracterizados por períodos de chuvas intensas, principalmente em Minas Gerais, onde as estradas foram manchetes nos jornais, como: “Perigo nas estradas”, “Buracos ameaçam férias”, “BR-040 exige manobras arriscadas”. Com a falta de manutenção adequada, as estradas vão se deteriorando cada vez mais; conseqüentemente, aumentando as perdas materiais e humanas. Também, com a falta de fiscalização, verifica-se um aumento do transporte de cargas com excesso por eixo nas rodovias mineiras, reduzindo o período de vida útil das estradas (Pesquisa elaborada pela fundação João Pinheiro citada pelo JORNAL ESTADO DE MINAS, 22/12/2002).

Somando-se ao quadro anteriormente apresentado, a crise econômica que o país tem enfrentado nos últimos anos e a escassez de recursos financeiros, quando se considera a totalidade das obras viárias a serem recuperadas ou implantadas, torna-se necessário estudar materiais alternativos que possam ser utilizados na construção rodoviária, sob o ponto de vista técnico-econômico. Nesse trabalho, sob esta ótica, foi utilizado o aditivo químico RBI Grade 81.

Em alguns países como, por exemplo, África do Sul, Itália, Portugal, esse produto tem sido aplicado com êxito, principalmente em estradas vicinais, aumentando a resistência da camada de subleito e reduzindo consideravelmente a formação de pó. Assim, outra importante possibilidade de emprego das misturas estabilizadas solo-RBI Grade 81 é nas estradas florestais, cuja malha é estimada em 600.000 km (MACHADO e MALINOVSKI, 1986), e em geral não pavimentada, possuindo apenas revestimento primário. Tal aplicação é de interesse das grandes empresas florestais que necessitam manter a sua malha viária operante, principalmente nos períodos de safra, de modo a não comprometer o cronograma de produção.

Neste trabalho foi usado o termo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem) em substituição da denominação atual DNIT (Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes).

---

## 1.2. Objetivo

O objetivo geral deste trabalho foi caracterizar, tecnologicamente, em laboratório, misturas de quatro tipos de solos da Microrregião de Viçosa - MG com o aditivo químico RBI Grade 81, para fins rodoviários. Os objetivos específicos foram os seguintes:

- avaliar a influência do teor de RBI Grade 81 na resistência mecânica das misturas (solo-RBI Grade 81);
- verificar a influência da variação do período de cura e das energias de compactação na resistência mecânica das misturas; e
- contribuir para a formação de um banco de dados geotécnicos associados à estabilização química e mecânica de solos.

---

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Introdução**

Na engenharia rodoviária, o solo é considerado um material natural de construção. Em estradas, seu emprego vai desde o subleito até às camadas mais nobres do pavimento. Devido à importância das estradas no contexto sócio-econômico, político e estratégico de um país, é necessário que elas sejam construídas de forma racional, isto é, atendendo simultaneamente os padrões técnicos, como também os de conforto e segurança dos usuários.

### **2.2. Solo**

Segundo NOGAMI e VILLIBOR (1995), o solo é um material natural não consolidado, isto é, constituído de grãos separáveis por processos mecânicos e hidráulicos relativamente suaves, como dispersão em água com uso de aparelho dispersor de laboratório, e que pode ser escavado com equipamentos comuns de terraplanagem.

---

As dimensões das partículas do solo são muito variáveis sendo designadas pelas frações pedregulho, areia, silte e argila. Os limites entre essas frações podem apresentar pequenas variações, conforme a seguir apresentado.

- Pedregulho: 76 – 2 mm, AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem)  
76 – 4,8 mm, ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas);
- Areia: 2 – 0,075 mm, AASHTO e DNER  
4,8 – 0,05 mm, ABNT;
- Silte: 0,075 – 0,005 mm, AASHTO e DNER  
0,05 – 0,002 mm, ABNT;
- Argila: < 0,005 mm, AASHTO e DNER  
< 0,002 mm, ABNT.

Na natureza, os solos são geralmente compostos de mais de uma das frações. Neste caso, uma dada fração pode influir de modo marcante no comportamento geral dos solos, havendo necessidade de levar em conta outras propriedades, além da distribuição granulométrica. Apesar de os solos serem compostos de várias frações, em diversas situações seu estudo baseia-se no comportamento arenoso ou argiloso.

Segundo o Manual de Pavimentação do DNER (1996), areias e pedregulhos são solos de granulação grossa e de comportamento arenoso, com grãos de formas cúbicas ou arredondadas, constituídos principalmente de quartzo. Para essas frações do solo, a quantidade de água que os envolve não interfere significativamente no seu comportamento. São solos praticamente desprovidos de coesão; sua resistência à deformação depende fundamentalmente de entrosamento e atrito entre os grãos e da

---

tensão normal que atua sobre o solo. As Argilas são solos de granulação fina e comportamento argiloso, com grãos de formas lamelares, alongadas (de elevada superfície específica), cuja constituição principal é de argilominerais: caulinita, illita e montmorilonita, isto é, silicatos hidratados de alumínio e/ou ferro e magnésio, que formam arca-bouços cristalinos constituídos de unidades fundamentais. Devido à finura, forma e composição mineralógica de seus grãos, o comportamento geral das argilas varia sensivelmente com a quantidade de água que envolve os grãos. Assim, apresentam esses solos em determinada gama de umidade, características marcantes de plasticidade, permitindo a mudança de forma (moldagem) sem variação de volume, sob a ação de certo esforço. Sua coesão é função do teor de umidade; quanto menos úmida, maior a coesão apresentada. Siltes são solos intermediários, podendo tender para o comportamento arenoso ou argiloso, dependendo da sua distribuição granulométrica, da forma e da composição mineralógica de seus grãos. Os siltes graúdos têm comportamento aproximadamente arenoso, derivando a sua resistência fundamentalmente de atrito interno, embora apresentem, ao contrário das areias, o fenômeno da coesão capilar. Entretanto, os siltes finos têm comportamento aproximadamente argiloso, apresentando variações de volume em função da variação do teor de umidade (FERNANDES, 2000).

Para classificar o solo, há diversos sistemas de classificação. Para fins rodoviários, no Brasil, os mais utilizados são: classificação TRB (*Transportation Research Board*), USC (*Unified Soil Classification*), proposta por CASAGRANDE (1948) e MCT (Miniatura Compactada Tropical), proposta por (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

### **2.3. Estabilização do Solo**

A estabilização de um solo consiste em dotá-lo de condições de resistir às ações climáticas e aos esforços e desgaste induzidos pelo tráfego, sob as condições mais adversas consideradas no projeto.

A prática da estabilização de solos é bastante antiga, havendo referências na literatura de que ela seja milenar e que tenha sido utilizada

---

como recurso técnico na construção civil, ainda que em condições primitivas (GUIMARÃES, 1980; NÓBREGA, 1985).

A construção de estradas certamente é a área da engenharia que envolve o maior número de tipos de solos dentro de uma mesma obra e onde as suas características têm um papel preponderante na qualidade e no custo final das construções. Assim, por envolver um grande volume de serviços, tais como cortes e aterros, em que muitas vezes o item “distância de transporte” onera, em muito, o custo total o ideal seria que na construção fossem utilizados os solos do próprio local da obra como materiais de construção. No entanto, trabalhar com solos locais, buscando minimizar custos de transporte, nem sempre é possível, pois, na maioria das vezes, esses materiais raramente atendem a todos os requisitos necessários para sua utilização (FERRAZ, 1994). Nesse caso, há necessidade de lançar mão de alguma técnica de estabilização, de forma a torná-los aptos para serem empregados nas obras de engenharia rodoviária (INGLES e METCALF, 1973).

Dentre as inúmeras possibilidades teóricas de estabilização de solos em estradas, a estabilização mecânica e a química são as mais utilizadas na prática.

Na estabilização mecânica, as melhorias introduzidas no comportamento do solo originam-se de mudanças no seu sistema trifásico, isto é, nas fases sólida, líquida e gasosa. No que tange às técnicas comumente aplicadas na construção de estradas, a estabilização mecânica, em geral, restringe-se a dois métodos para a alteração das propriedades dos solos: (a) rearranjo de partículas (compactação), e (b) adição ou retirada de partículas (correção granulométrica) (LIMA et al., 1993).

A estabilização química de um solo refere-se às alterações produzidas na sua estrutura pela introdução de uma certa quantidade de aditivo, suficiente para melhorar as propriedades físicas e mecânicas do solo, possibilitando o seu emprego para fins de projeto. Na literatura, há uma série de aditivos químicos utilizados como estabilizante de solos, podendo ser desde produtos industrializados, até sub-produtos ou resíduos industriais.

---

### **2.3.1. Experiências Anteriores**

Os Departamentos de Engenharia Civil e Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa têm sido ativos no estudo de estabilização de solos, objetivando avaliar o potencial técnico do emprego de aditivos químicos convencionais, como cimento, cal, betume e não convencionais como Licor Negro kraft, DS-328, vinhoto, alcatrão, dentre outros, para ampliar o leque de soluções técnicas de engenharia disponíveis. A seguir são apresentados algumas informações e resultados das misturas destes aditivos com dois solos que também foram estudados neste trabalho, sendo um argiloso referido de Estação de Tratamento de Água (ETA) e outro arenoso referido de Vila Secundino (VS).

#### **2.3.1.1. Estabilização Solo-Cimento**

A estabilização solo-cimento é o produto da mistura homogênea de solo, cimento e água, em proporções adequadas que, após compactação e cura úmida, resulta num produto com características mínimas exigidas de resistência mecânica e durabilidade (ABCP, 1989b).

A aplicação desse material em pavimentos, no Brasil, teve início em 1940, influenciada pelas experiências bem sucedidas nos Estados Unidos, onde o solo-cimento era utilizado, principalmente, na área de pavimentação (BNH, 1983). A partir de então, a estabilização solo-cimento tem sido estudada no Brasil e em outros países, podendo citar algumas referências como INGLES e METCALF (1973), ABCP (1986b), LIMA et al. (1993), TRINDADE et al. (2003).

A dosagem solo-cimento consiste na realização de ensaios em laboratório, variando os quantitativos de cimento e água, e na análise e interpretação dos resultados via critérios técnicos e econômicos. No Brasil, a dosagem solo-cimento em geral são referenciadas pelas recomendações da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1986b) e Associação Brasileira de Normas Técnicas, via NB 1336/90 “Solo-Cimento-Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento”.

---

Um dos fatores de grande importância na estabilização solo-cimento é a presença de sulfatos no solo, pois de acordo com PETRUCCI (1978), os sulfatos podem reagir com o hidróxido de cálcio e a alumina livre do cimento, formando o sulfo-aluminato de cálcio, de natureza expansiva, podendo até inviabilizar o uso do cimento como estabilizante químico em estradas.

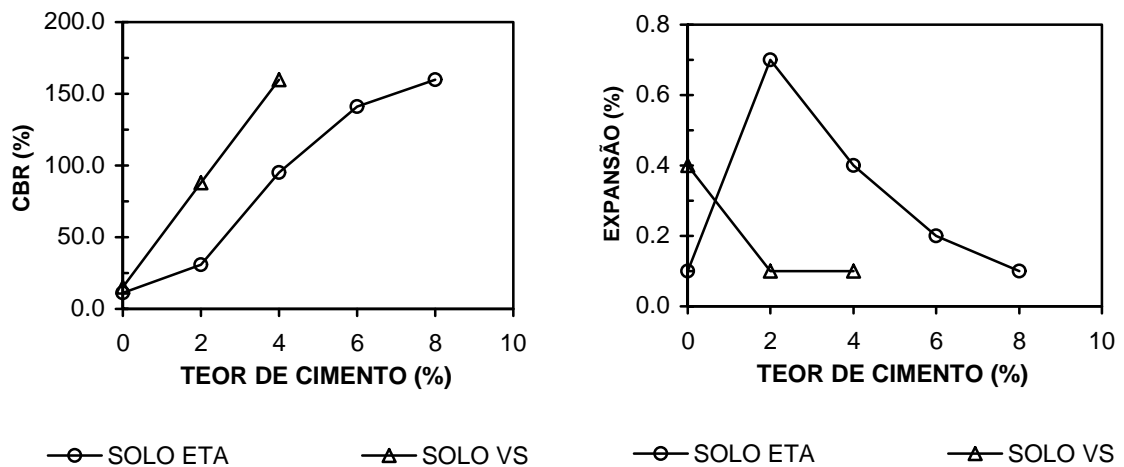
A cimentação que ocorre na mistura solo-cimento deve-se, principalmente, ao endurecimento das partículas de cimento Portland, resultante de sua hidratação, e também em função do endurecimento dos produtos da reação pozolânica, que ocorre entre a cal e as partículas do solo. Quanto à contribuição na resistência final da mistura, as reações de hidratação do cimento são as mais importantes e respondem pela maior parte da resistência final alcançada (SILVA, 1968).

O efeito do cimento, nos solos granulares, destina-se, principalmente, a criar ligações nos contatos intergranulares, de modo a garantir um aumento da parcela resistente relativa à coesão. Nos solos finos, os grãos de cimento comportam-se como núcleos, aos quais aderem as partículas que o rodeiam formando regiões de material floculado que apresentam ligações oriundas dos fenômenos de cimentação (LIMA et al., 1993).

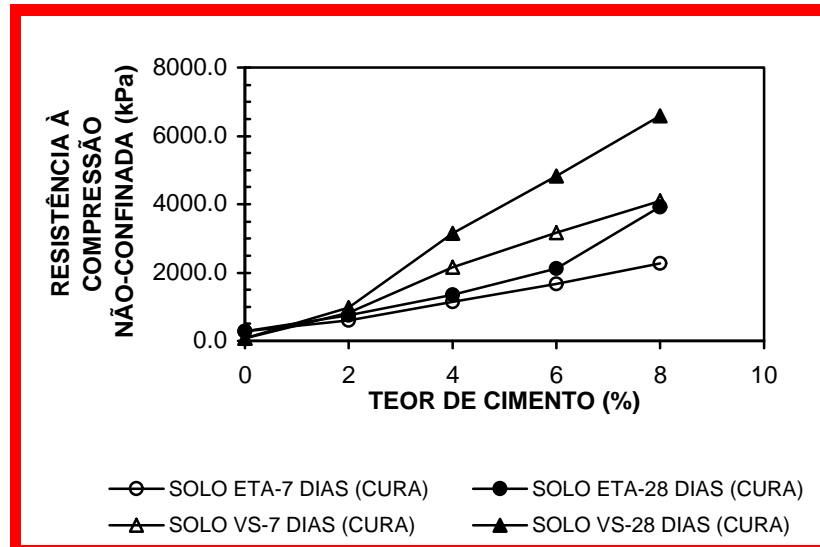
FERRAZ (1994) estudou os efeitos da adição do cimento aos solos ETA e VS nos teores de 2, 4, 6 e 8% de cimento, em relação ao peso de solo seco. A energia do ensaio Proctor Normal foi utilizada para realização dos ensaios de compactação, CBR e resistência à compressão não-confinada. Observou-se neste trabalho que com o aumento do teor de cimento não houve variação significativa do teor ótimo de umidade e do peso específico seco máximo. Conforme as Figuras 1 e 2, foram obtidos ganhos na capacidade de suporte (CBR), na resistência à compressão não-confinada para ambos os solos (ETA e VS). Quanto à expansão, o solo ETA não apresentou um desempenho satisfatório em relação à sua expansão no seu estado natural. Ao ser misturado com 2% de cimento, a expansão teve um aumento significativo. A partir desse limite, começou a diminuir gradativamente, até alcançar um valor aproximadamente igual à expansão deste solo no seu estado natural. Já para o solo VS, houve uma

queda na expansão deste solo ao passar do seu estado natural para uma condição de mistura com 2% de cimento e, a partir de 2%, a expansão tendeu a se estabilizar.

Maiores informações, a respeito da estabilização solo-cimento podem ser obtidas nos trabalhos de LIMA et al. (1993), FERRAZ (1994) e ALCÂNTARA (1995).



**Figura 1** – Variação do CBR e da Expansão com o teor de cimento, para misturas de solos com cimento compactadas na energia do ensaio Proctor Normal e ensaiados após a compactação, respeitado o período de imersão de 4 dias (FERRAZ, 1994)



**Figura 2** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada com o teor de cimento, para misturas de solos com cimento compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (FERRAZ, 1994)

### 2.3.1.2. Estabilização Solo-Cal

A cal é o aglomerante resultante da calcinação de rochas calcárias (calcários ou dolomitos), a uma temperatura inferior à de início de fusão do material no intervalo de temperatura de 850 a 900°C (ALVES, 1977).

A literatura refere-se à estabilização solo-cal como uma prática milenar, havendo referências de que ela já tenha sido utilizada pelos romanos a dois mil anos para construção de pavimentos (HERRIN e MITCHELL, 1961). Entretanto, seu estudo teve grande impulso a partir de 1955, em particular no Estado do Texas (DIAMOND e KINTER 1965). A partir desta data, a estabilização solo-cal é estudada em muitos países, podendo citar como referência THOMPSON (1966), INGLES e METCALF (1973), LIMA (1981) e FERRAZ (1994).

Quanto aos mecanismos da estabilização solo-cal, vários tipos de reações químicas ocorrem; contudo, as mais importantes são as reações de troca catiônica, floculação e as reações pozolânicas (reações de cimentação). As reações de troca catiônica e floculação se processam rapidamente e produzem alterações imediatas na plasticidade e, em menor escala, na resistência mecânica da mistura. Também, podem ocorrer

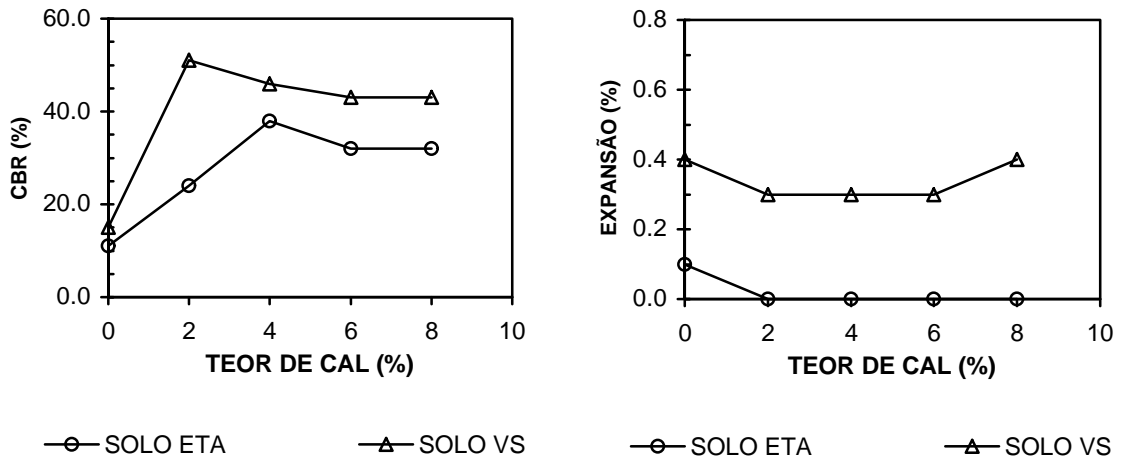
---

reações pozolânicas entre o solo e a cal, dependendo das características dos solos a serem estabilizados. Essas reações resultam na formação de vários compostos de cimentação, que aumentam a resistência e a durabilidade da mistura e desenvolvem-se a longo prazo (LIMA et. al., 1993).

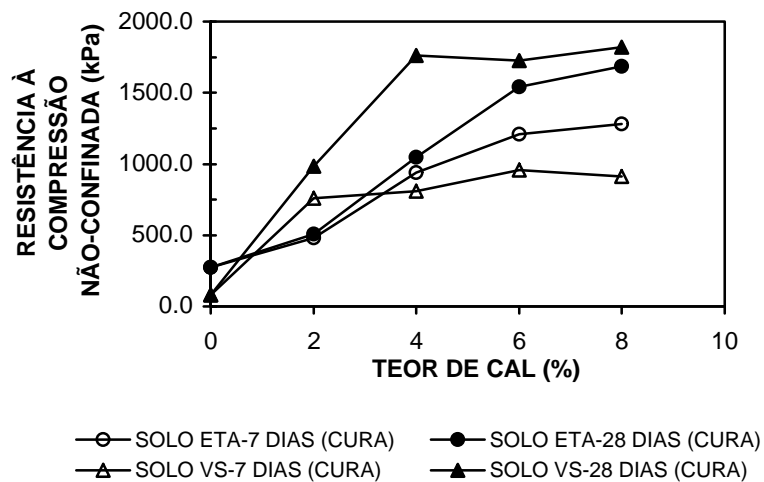
FERRAZ (1994) estudou os efeitos da adição da cal aos solos ETA e VS nos teores de 2, 4, 6 e 8% de cal, em relação ao peso de solo seco. A energia do ensaio Proctor Normal foi utilizada para realização dos ensaios de compactação, CBR e resistência à compressão não-confinada. Observou-se neste trabalho que ao acrescentar cal ao solo, houve uma queda no peso específico seco máximo e aumento do teor ótimo de umidade. Quanto à expansão, conforme Figura 3, o aumento do teor de cal pouco afetou a expansão dos dois solos. No solo VS a expansão situou-se entre 0,3% e 0,4%. Já para o solo ETA, a expansão caiu de 0,1% (estado natural) para 0% independente dos teores de cal utilizados nas misturas. Quanto ao suporte CBR ambos os solos tiveram aumento neste índice. Para o solo VS o CBR passou de aproximadamente, 15% para 50%. A partir desse limite, o CBR praticamente não variou com o aumento do teor de cal. Para o solo ETA, o CBR aumentou significativamente até o teor de cal igual a 4%, a partir desse limite, começou a reduzir gradativamente. Esse comportamento pode ser explicado pelo 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, pois, tempo suficiente para um desenvolvimento significativo das reações pozolânicas entre a cal e os argilominerais dos solos. Logo, os efeitos observados, provavelmente, ocorreram apenas em virtude das reações de troca catiônicas e da floculação das partículas dos solos ocasionados pela adição de cal. A resistência à compressão não-confinada apresentou ganho com o aumento do teor de cal para ambos os solos. Quanto ao solo ETA, de características argilosas, a resistência à compressão não-confinada aumentou pelo acréscimo do teor de cal e período de cura. Já o solo VS, até um certo teor de cal, apresentou aumento na resistência à compressão não-confinada. Por exemplo, com o teor de 2% de cal e 7 dias de cura, a resistência teve um aumento significativo, tendendo a se estabilizar a partir desse teor.

Ainda para esse mesmo solo, com 28 dias de cura, o ganho significativo de resistência correspondeu a 4% de cal. A partir daí, tendeu a se estabilizar, como apresentado na Figura 4.

Maiores informações, a respeito da estabilização solo-cal com solos brasileiros podem ser obtidas nos trabalhos de LIMA (1981), FERRAZ (1994), ALCÂNTARA (1995) e MENDONÇA (1998).



**Figura 3** – Variação do CBR e da Expansão com o teor de cal, para misturas de solos com cal compactadas na energia do ensaio Proctor Normal, respeitado o período de imersão de 4 dias (FERRAZ, 1994)



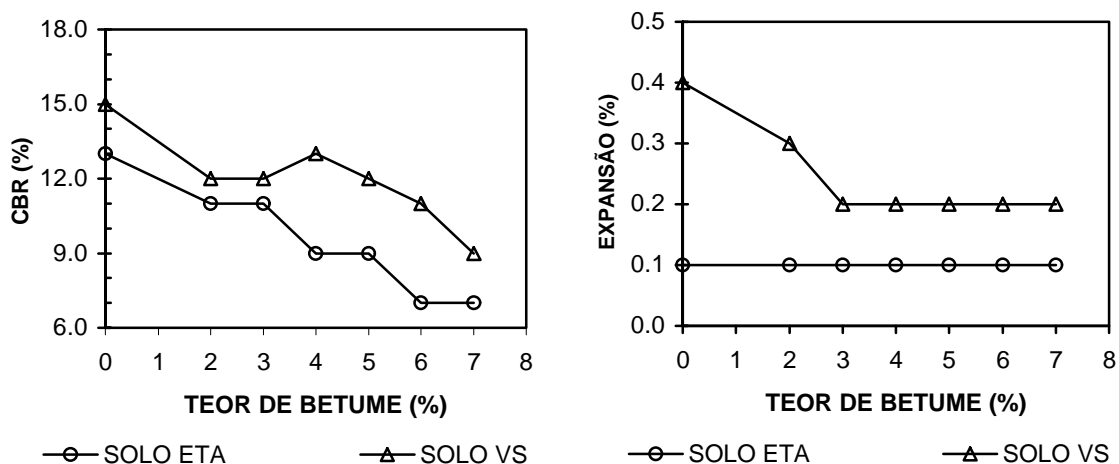
**Figura 4** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada com o teor de cal, para misturas de solos com cal compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (FERRAZ, 1994)

---

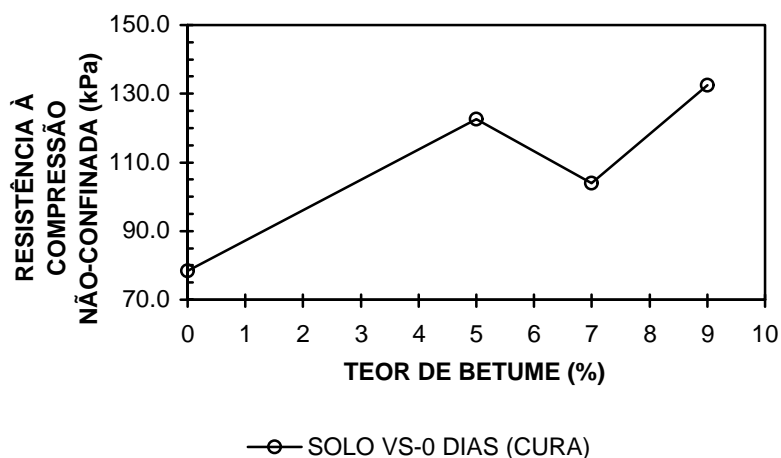
### 2.3.1.3. Estabilização Solo-Betume

Os mecanismos de estabilização dos solos com betume podem ser sumarizados, considerando-se os solos de natureza arenosa e os de granulometria fina. Nos primeiros, o betume tem por função promover a ação ligante das partículas e, no segundo, considerando-se que estes já apresentam parcela coesiva, o aditivo tem por função promover a impermeabilização do solo, de forma a serem conservadas as suas características inerentes às condições de compactação (SILVA, 1968). No trabalho de BUENO et al. (1991), utilizou uma emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL-1C) para ser misturada a dois solos, um arenoso e outro argiloso. Em termos de resistência mecânica, os solos tiveram redução na capacidade de suporte (CBR) e na expansão, principalmente, no solo arenoso, Figura 5.

CARVALHO et al. (1992), variou o teor de betume e o período de exposição da mistura solo-betume, antes da compactação. Neste estudo, o betume utilizado na estabilização da mistura solo-betume foi o mesmo empregado por BUENO et al. (1991). Os resultados mostraram que não ocorreram variações significativas no teor ótimo de umidade e no peso específico seco máximo, mas a resistência à compressão não-confinada variou com o teor de betume e com o período de exposição. A Figura 6 mostra os melhores resultados encontrados de resistência à compressão não-confinada do solo arenoso (VS), com 4 horas de exposição da mistura, antes da compactação.



**Figura 5** – Variação do CBR e da Expansão com o teor de betume, para misturas de solos com betume compactadas na energia do ensaio Proctor Normal, respeitado o período de imersão de 4 dias (BUENO et al., 1991)



**Figura 6** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada com o teor de betume, para misturas de solos com betume compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (CARVALHO et al., 1992)

### 2.3.1.3.1. Estabilização Solo-Alcatrão de Madeira

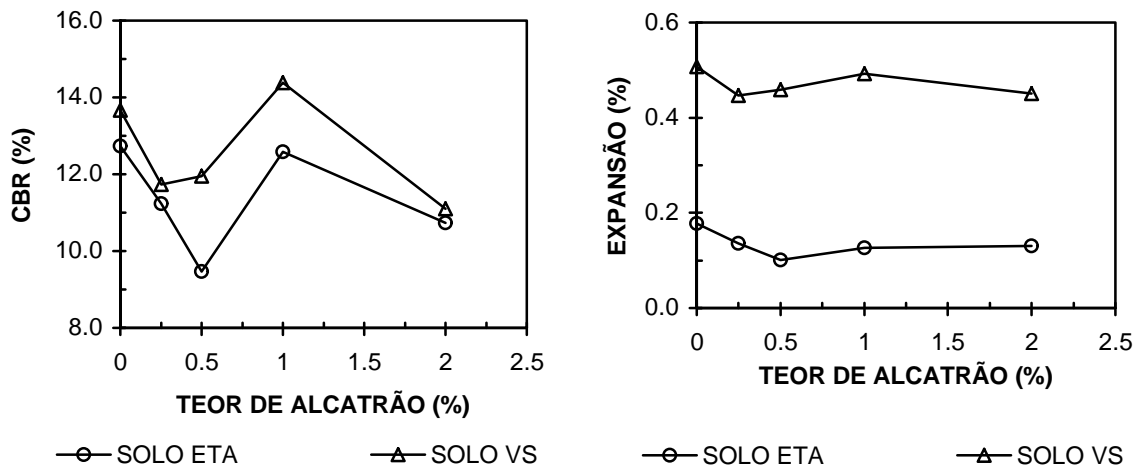
A obtenção do alcatrão vegetal baseia-se no aproveitamento das fumaças expelidas pelos fornos durante a carbonização, processo no qual

---

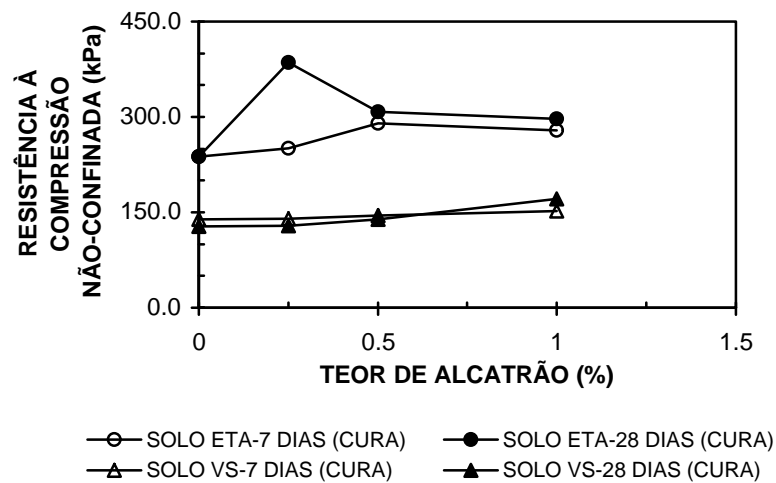
a madeira é submetida a aquecimento em ambiente fechado com atmosfera controlada, pobre em oxigênio. Durante este processo de decomposição térmica da madeira, cada um dos seus componentes sofre degradação pela ação da temperatura, resultando em um produto sólido, carvão vegetal, e em material volátil que por sua vez pode ser condensado, gerando o líquido pirolenhoso, constituído por ácido pirolenhoso e alcatrão. A como destaca SANT'ANNA (2002).

FERNANDES (2000) estudou os efeitos da adição de alcatrão de madeira aos solos ETA e VS nos teores de 0,25, 0,5, 1 e 2% de alcatrão, em relação ao peso de solo seco. A energia do ensaio Proctor Normal foi utilizada para realização dos ensaios de compactação, CBR e resistência à compressão não-confinada. Observou-se neste trabalho que a ação do alcatrão promoveu pequena melhoria nas características de compactação dos solos, o que pode ser comprovado pela tendência de decréscimo no teor ótimo de umidade e acréscimo do peso específico seco máximo com teores crescentes de alcatrão. Analisou-se, também, a variação da resistência mecânicas das misturas em função do teor de alcatrão e período de cura utilizados. Ganhos de resistência foram verificados apenas para alguns teores de alcatrão e períodos de cura, conforme pode ser observado nas Figuras 7 e 8, (FERNANDES, 2000 e SANT'ANNA, 2002).

Maiores informações, a respeito da estabilização solo-alcatrão de madeira podem ser obtidas no trabalho de FERNANDES (2000) e SANT'ANNA (2002).



**Figura 7** – Variação do CBR e da Expansão com o teor de alcatrão, para misturas de solos com alcatrão compactadas na energia do ensaio Proctor Normal, respeitado o período de imersão de 4 dias (FERNANDES, 2000)



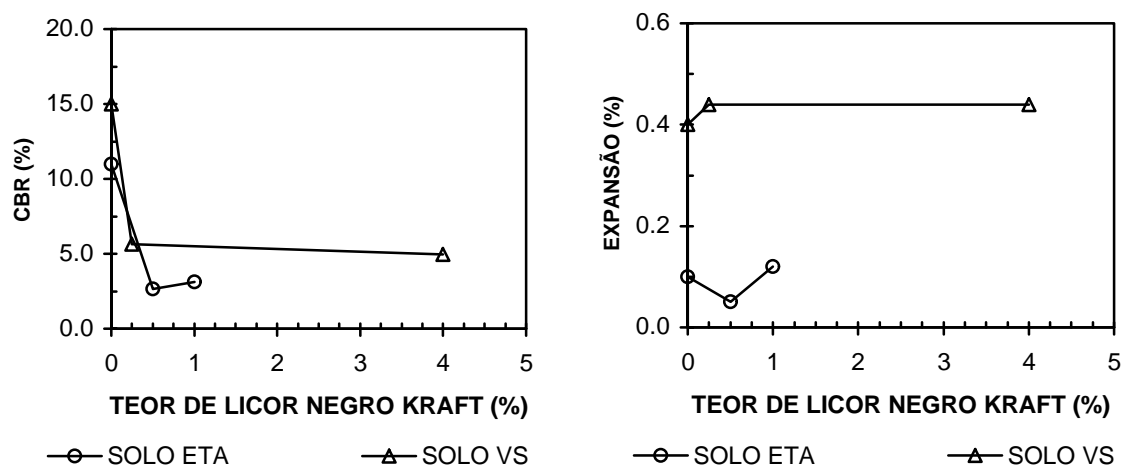
**Figura 8** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada com o teor de alcatrão, para misturas de solos com alcatrão compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (SANT'ANNA, 2002)

#### 2.3.1.4. Estabilização Solo-Licor Negro Kraft

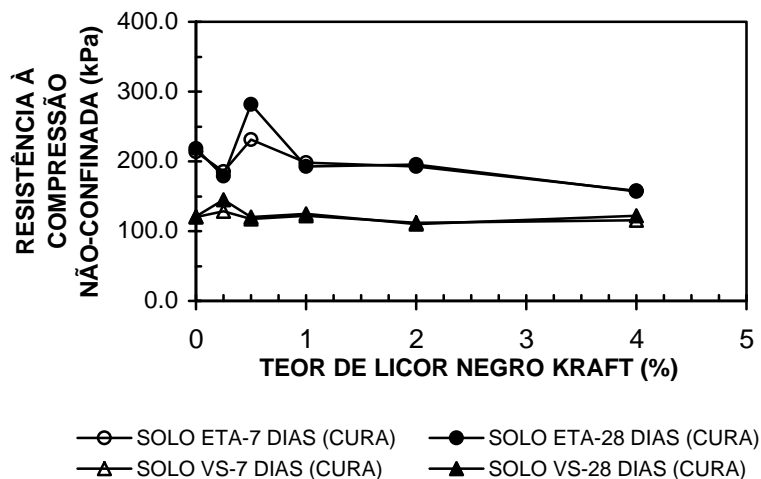
VIEIRA (1994) relatou que a madeira de *Eucalyptus* sp. é transformada em polpa kraft, quando, aproximadamente 50% do seu peso é dissolvido em uma solução cáustica, compondo o mais importante

subproduto interno na fabricação de celulose, o licor negro residual. Complementou este autor que o processo kraft consiste no cozimento dos cavacos de madeira, em forte solução alcalina de soda cáustica e sulfeto de sódio, com o objetivo de facilitar a separação das fibras, pela dissolução da lignina. Neste trabalho estudaram-se os efeitos da adição do licor negro kraft aos solos ETA e VS nos teores de 0,25, 0,50, 1, e 4% de sólidos presentes no licor, por peso de solo seco. A energia do ensaio Proctor Normal foi utilizada para realização dos ensaios de compactação, CBR e resistência à compressão não-confinada. Observou-se também, neste trabalho, que com o acréscimo do teor de licor negro houve um decréscimo do peso específico seco máximo e aumento do teor ótimo de umidade. A mistura solo-licor negro kraft não proporcionou aumentos significativos na resistência mecânica e na maioria das misturas ocorreu decréscimo da resistência mecânica em relação ao solo natural. Como ilustram as Figuras 9 e 10.

Maiores informações, a respeito da estabilização solo-licor negro kraft podem ser obtidas no trabalho de VIEIRA (1994).



**Figura 9** – Variação do CBR e da Expansão com o teor de licor negro kraft, para misturas de solos com licor negro compactadas na energia do ensaio Proctor Normal, respeitado o período de imersão de 4 dias (VIEIRA, 1994)



**Figura 10** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada com o teor de licor negro kraft, para misturas de solos com licor negro compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (VIEIRA, 1994)

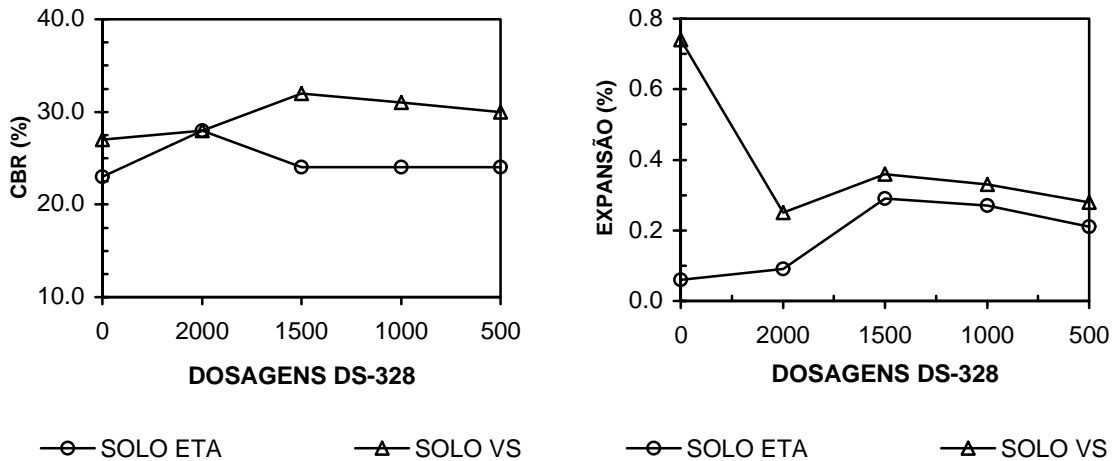
### 2.3.1.5. Estabilização Solo-DS-328

Segundo VAILLANT (1995), o DS-328 é um líquido de cor verde solúvel em água que foi desenvolvido, exclusivamente, para a estabilização de solos, sendo um composto metalo-orgânico que atua nas partículas finas do solo. Isto implica dizer que na sua composição existem duas substâncias: uma mineral e outra orgânica. Neste trabalho o autor estudou os efeitos da adição do DS-328 aos solos ETA e VS nas dosagens de 1:500, 1:1000 1:1500 e 1:2000, ou seja, a dosagem 1:1000 significa a proporção de 1 kg de DS-328 para 1000 kg de solo seco. O DS-328 pode ser utilizado com ou sem neutralizante; no caso de se utilizar o neutralizante, o fabricante recomenda o cimento, a cal, o sulfato de alumínio e o hidróxido de cálcio.

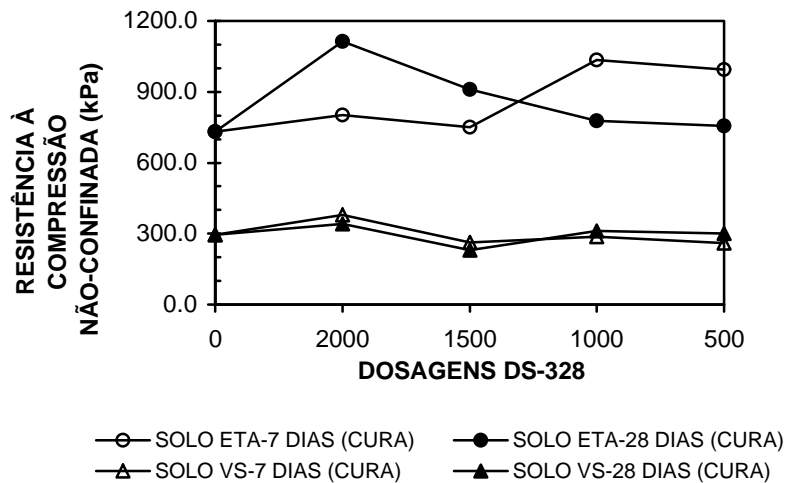
VAILLANT (1995) trabalhou na energia de compactação do ensaio Proctor Intermediário e realizou ensaios de compactação, CBR e resistência à compressão não-confinada, e observou que nos parâmetros de compactação (teor ótimo de umidade e peso específico seco máximo) não houve alterações significativas. O ganho de resistência mecânica dependeu do tipo de solo, do neutralizante utilizado e do tempo de cura.

Alguns resultados obtidos para as misturas solo-DS-328 foram abaixo dos encontrados para o solo não-tratado, conforme ilustram as Figuras 11 e 12.

Maiores informações, a respeito da estabilização solo-DS-328 com alguns tipos de solos, podem ser obtidas no trabalho de VAILLANT (1995).



**Figura 11** – Variação do CBR e da Expansão (7 dias de cura) para misturas de solos com DS-328, utilizando sulfato de alumínio como neutralizante, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário, respeitado o período de imersão de 4 dias (VAILLANT, 1995)



**Figura 12** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada para misturas de solos com DS-328, utilizando sulfato de alumínio como neutralizante, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário (VAILLANT, 1995)

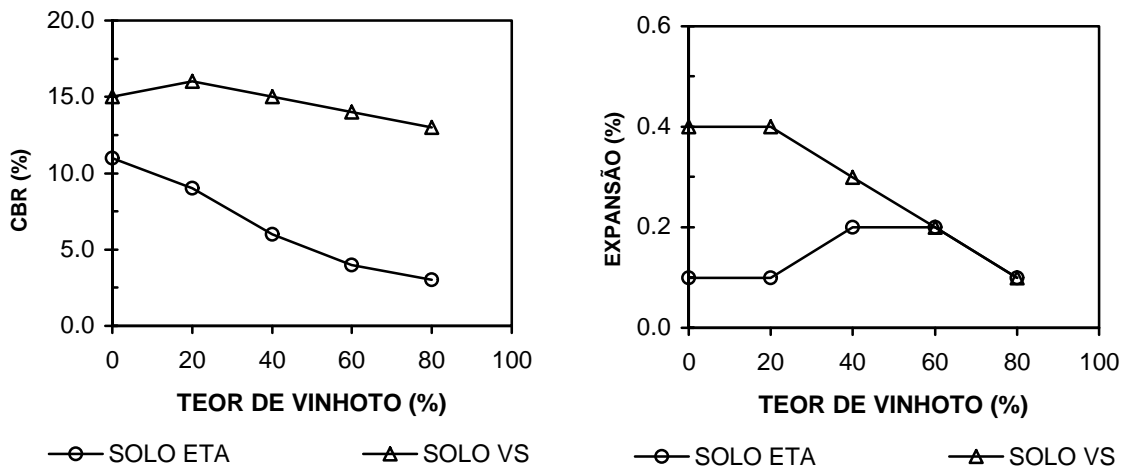
---

### **2.3.1.6. Estabilização Solo-Vinhoto**

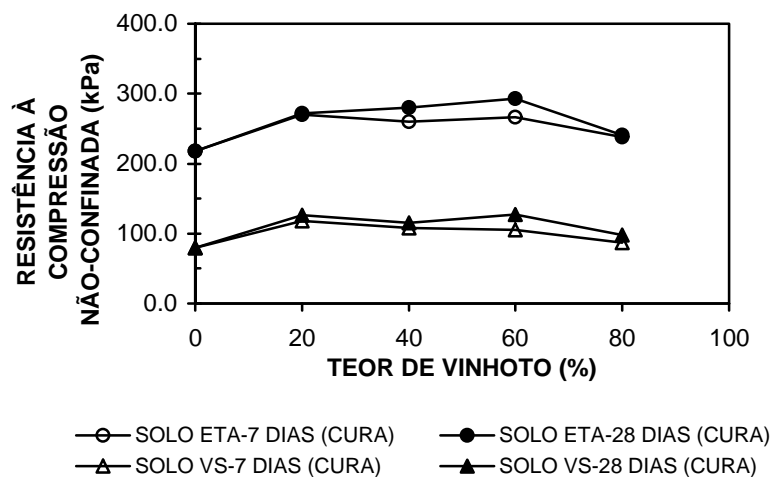
O vinhoto é um dos resíduos gerados na produção de açúcar e álcool. É líquido de coloração clara, escurecendo à medida que se oxida, pela exposição ao ar e é altamente poluidor. Apresenta alto índice de DBO (demanda bioquímica de oxigênio). Cabe ressaltar que a DBO de 1 litro de vinhoto é 100 vezes superior à de igual volume de esgoto doméstico (EPAMIG, 1985).

FERRAZ (1994) estudou os efeitos da adição do vinhoto “in natura” aos solos ETA e VS. As dosagens utilizadas foram de 0, 20, 40, 60 e 80%, em relação à quantidade de líquido total presente no solo. Essa metodologia foi utilizada pela maior facilidade no procedimento de dosagem, uso do vinhoto “in natura” e pelo fato deste produto ser muito solúvel em água. A energia do ensaio Proctor Normal foi utilizada para a realização dos ensaios de compactação, CBR e resistência à compressão não-confinada. Relatou-se neste trabalho que houve uma tendência de queda no teor ótimo de umidade e de um ligeiro acréscimo no peso específico seco máximo, com o aumento do teor de vinhoto. Com adição de vinhoto ao solo, não se observou melhoria substancial na resistência mecânica da mistura, conforme apresentado nas Figuras 13 e 14.

Maiores informações, a respeito da estabilização solo-vinhoto com alguns tipos de solos, podem ser obtidas no trabalho de FERRAZ (1994).



**Figura 13** – Variação do CBR e da Expansão com o teor de vinhoto, para misturas de solos com vinhoto compactadas na energia do ensaio Proctor Normal, respeitado o período de imersão de 4 dias (FERRAZ, 1994)



**Figura 14** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada com o teor de vinhoto, para misturas de solos com vinhoto compactadas na energia do ensaio Proctor Normal (FERRAZ, 1994)

---

## 2.4. RBI Grade 81

O RBI Grade 81 é um estabilizante químico desenvolvido na África do Sul, em 1990. Sendo fabricado em Israel e comercializado em embalagens de 25 kg, como ilustrado na Figura 15, e em containers de 1 tonelada.

Segundo informações do fabricante (RBI, 2000), esse produto é um pó de cor cinza, não tóxico, inodoro, pH básico (pH da pasta em torno de 12,5), densidade igual a 2,5, baixa solubilidade em água, apresenta fibras naturais e é composto de substâncias inorgânicas naturais que agem conjuntamente no solo para produzir um material resistente, estável e relativamente impermeável. A Figura 16 apresenta uma amostra de RBI Grade 81.

O RBI Grade 81 já foi utilizado em países como África do Sul, Itália, Espanha, Portugal e Namíbia, tendo sido testado em uma gama de solos que variam de muito plástico (solos argilosos) a não-plástico (solos arenosos). Os resultados dos ensaios revelaram que houve significativos ganhos de resistência mecânica e durabilidade.



**Figura 15** – Embalagem de 25 kg de RBI Grade 81



**Figura 16** – Amostra de RBI Grade 81

---

No manuseio do RBI Grade 81 é recomendado o uso dos seguintes equipamentos de proteção individual:

- máscara anti-pó, para evitar inalação;
- luvas, calçado fechado e roupa adequada para evitar o contato com a pele;
- óculos de proteção e não é recomendado usar lentes de contato.

#### **2.4.1. Faixa de Composição Química do RBI Grade 81**

O RBI Grade 81 tem composição química variável, como apresentado no Quadro 1.

**Quadro 1** – Faixa de composição química do RBI Grade 81 (resíduo de 99,2% a 105 °C e resíduo de 95,8 a 600 °C)

<b>Elemento químico</b>	<b>Faixa de variação (%)</b>
Cálcio (Ca)	25 – 45%
Silício (Si)	5 – 20%
Magnésio (Mg)	0 – 10%
Ferro (Fe)	0 – 5%
Cobre (Cu)	0 – 2%
Enxofre (S)	5 – 15%
Potássio (K)	0 – 5%
Alumínio (Al)	0 – 5%
Zinco (Zn)	0 – 2%
Manganês (Mn)	0 – 2%

Fonte: RBI (2000).

#### **2.4.2. Mecanismos de Reação**

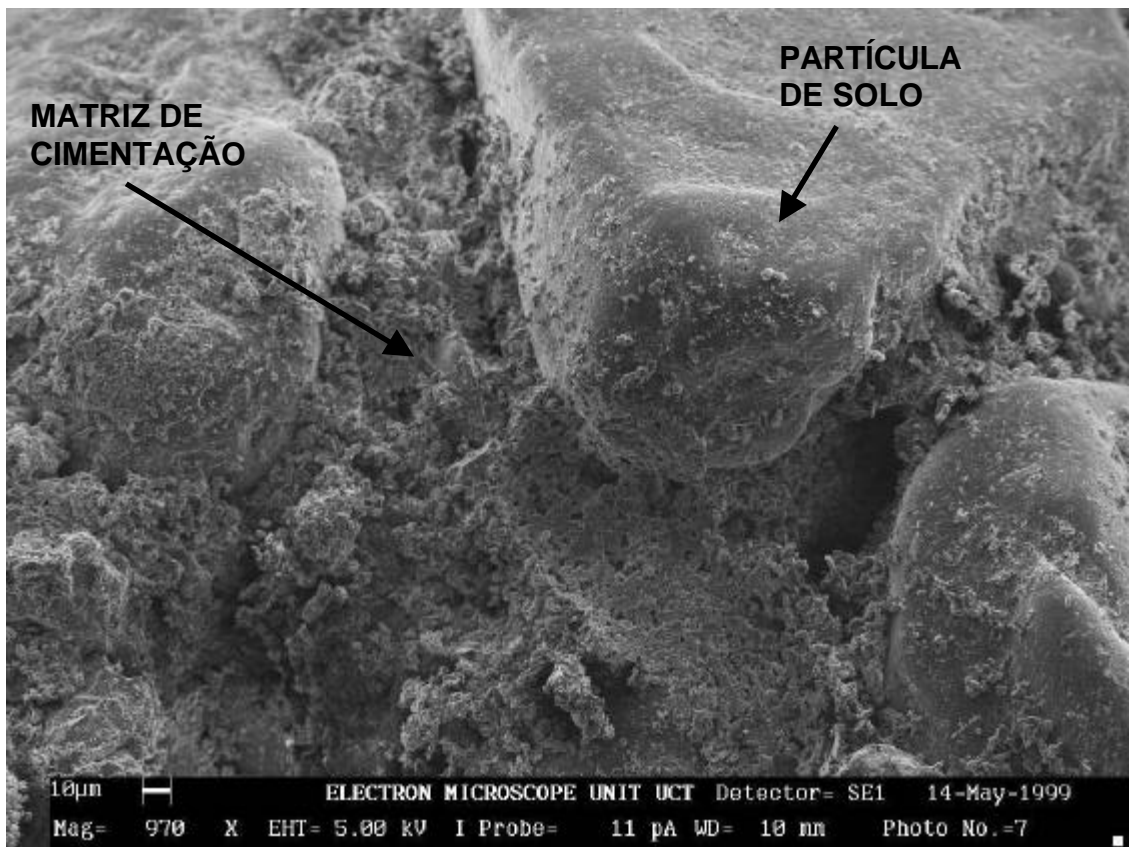
De acordo com a ROAD BUILDING INTERNATIONAL (2001 e 2003), os componentes do RBI Grade 81 conduzem a uma série de reações químicas formando uma matriz de cimentação interpartículas irreversível, iniciada principalmente pelo fenômeno de hidratação, mas também

---

ocorrem reações de troca iônica e reações pozolânicas dependendo do tipo de solo, que juntamente com a hidratação, aumentam, substancialmente, a capacidade de suporte da camada estabilizada, a trabalhabilidade, além de reduzir a plasticidade e a expansão do solo.

O RBI GRADE 81 não precisa necessariamente de um componente específico no solo para que ocorra estabilização, como por exemplo a pozolana que é necessária no caso da estabilização com cal, podendo ser utilizado em muitos tipos de solos, desde que seja feito um estudo adequado (RBI, 2001).

A Figura 17 mostra através da microscopia eletrônica de varredura, a matriz de cimentação preenchendo os espaços vazios do solo estabilizado com RBI Grade 81. As micro e macro ligações das fibras naturais constituintes do RBI Grade 81 aumentam a flexibilidade da mistura, minimizando a ocorrência de fissuras na camada estabilizada. As reações do RBI Grade 81 ocorrem a curto, médio e longo prazos, sendo que nas primeiras 24 horas, após a mistura, uma quantidade significativa já se processou (dependendo do tipo de solo), sendo comum liberar o tráfego após um período de cura de 3 dias; além do mais, cerca de 90% das reações ocorrem até 7 dias após a compactação. Como as reações são baseadas na hidratação, os 10% restantes continuam ao longo do tempo (RBI, 2003) e relacionam-se, especialmente, com o desenvolvimento de reações pozolânicas, se aplicável.



**Figura 17** – Microscopia eletrônica de varredura mostra a matriz de cimentação preenchendo os espaços vazios do solo estabilizado com RBI Grade 81 (RBI, 2000)

### 2.4.3. Avaliação Ambiental

Os componentes que são utilizados na fabricação do RBI Grade 81 são de ocorrência natural e, em muitos casos, são resíduos de processos industriais. Não foi relatado qual tipo de ocorrência natural e quais resíduos industriais que podem ser utilizados na fabricação do produto. O Quadro 2 mostra as concentrações dos metais pesados encontrados na amostra de RBI Grade 81 em comparação com a cal (RBI, 2003).

**Quadro 2** – Concentração de metais pesados no RBI Grade 81 e na cal

<b>Metais Pesados</b>	<b>Unidades</b>	<b>RBI Grade 81</b>	<b>Cal</b>
Sb	mg/kg Sb	2,3	---
As	mg/kg As	1,9	0,1 – 25
Ba	mg/kg Ba	100	---
Cd	mg/kg Cd	3,9	0,04 – 0,1
Co	mg/kg Co	6,1	0,4 – 3
Cr	mg/kg Cr	18,8	10 – 15
Hg	mg/kg Hg	< 1	---
Ni	mg/kg Ni	17,3	10 – 20
Pb	mg/kg Pb	6,7	20 –1250
Cu	mg/kg Cu	12,7	2 –125
Se	mg/kg Se	< 1	0,08 – 0,1
Zn	mg/kg Zn	21,9	10 – 450

Fonte: RBI (2003).

#### **2.4.3.1. Ensaio de Lixiviação**

Para avaliar o potencial de contaminação ambiental de metais pesados do RBI Grade 81, o fabricante realizou ensaios de lixiviação. Os ensaios foram realizados em três amostras (amostra **A**, amostra **B** e amostra **C**) contendo RBI Grade 81, como se segue. A amostra **A**, contendo 100% de RBI Grade 81 e pesando 143 gramas, foi compactada em um cilindro de 33 mm de diâmetro e curada por 7 dias; a amostra **B**, contendo solo com 5% de RBI Grade 81, também foi compactada e curada como a amostra **A** e, a amostra **C**, contendo RBI Grade 81 em pó e pesando 143 gramas foi ensaiada no estado natural.

Os percolados da passagem de água pelas amostras foram coletados para ser medido o pH e realizar a análise dos principais íons que são mostrados no Quadro 3 e as concentrações dos metais pesados que estão associadas com a toxicidade, Quadro 4 (RBI, 2000).

**Quadro 3** – Ânions e cátions (mg/L) encontrados nas amostras analisadas

Amostra	pH	F	Cl	NO <sub>2</sub>	Br	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub>	Na	K	M g	Ca
A	10,43	2,6	14,8	5,3	BDL	BDL	BDL	288	15,1	5,0	2,0	136
B	8,87	0,79	4,23	BDL	BDL	1,20	BDL	180	0,66	0,81	3,39	77,7
C	12,45	23,7	135	BDL	BDL	BDL	BDL	2510	70,0	53,0	22,0	2332

Fonte: RBI (2000).

BDL = abaixo do limite detectável

**Quadro 4** – Metais pesados ( $\mu\text{g/L}$  = partes por bilhão) encontrados nas amostras analisadas

Amostra	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Pb
A	9,78	3,96	0,60	3,66	2,34	7,20	0,36	2,16	BDL	BDL
B	3,51	4,08	0,63	7,23	22,6	23,9	0,57	0,45	0,24	0,57
C	559	36	BDL	37	451	572	9	36	1	BDL

Fonte: RBI (2000).

BDL = abaixo do limite detectável

O cálcio e o sulfato foram os íons de maiores concentrações, o que era esperado devido à composição do RBI Grade 81. Na amostra C, as concentrações dos íons foram muito maiores que nas outras amostras. Isto se deve à maior área específica superficial do produto, sendo que, em contato com a água, o processo de hidratação é mais ativo favorecendo a dissociação dos íons em solução. As amostras A e B foram compactadas diminuindo a permeabilidade e com isso reduzindo os percentuais lixiviados. Além disso, na amostra B houve formação de agentes de cimentação (solo-RBI Grade 81), o que também favoreceu a diminuição dos percentuais lixiviados.

O alto valor de pH é outro fator importante no processo, porque diminui a solubilidade de alguns metais pesados como o cobre (Cu), cádmio (Cd) e chumbo (Pb), impedindo a sua lixiviação para camadas inferiores ou lençóis freáticos. Com isso, pode-se antever o emprego do RBI Grade 81, como um elemento para redução da velocidade de movimentação de metais pesados no solo, por exemplo oriundos de aterros sanitários.

---

#### **2.4.4. Processo de Construção de uma Estrada com RBI Grade 81**

O processo construtivo de misturas de solo e RBI é bastante semelhante ao das misturas de solo com cal, cimento ou betume. Entretanto, em algumas fases do processo construtivo há diferenças. Com base no Guide to the construction of pavement layers and stabilized materials using RBI Grade 81 (RBI, 2001), apresenta-se a seguir os principais procedimentos para construção de uma estrada usando RBI Grade 81.

##### **2.4.4.1. Antes da Construção da Camada Estabilizada**

- i) camadas estabilizadas devem ser construídas apenas quando as camadas inferiores ou de fundação se encontrarem de acordo com as especificações de projeto. Caso isto não ocorra, a correção deve ser feita antes do lançamento de uma nova camada.

##### **2.4.4.2. Preparação da Camada**

O material a ser estabilizado deve ser espalhado, ou no caso da camada de pavimento existente, escarificado a uma profundidade especificada, se necessário, e misturar até se obter uma camada homogênea. Caso haja materiais com tamanhos maiores do que o especificado no projeto, estes devem ser removidos.

##### **2.4.4.3. Aplicação do Agente Estabilizante**

Antes da aplicação do produto, deve-se proceder à caracterização geotécnica do solo a ser estabilizado, bem como à dosagem de mistura solo-RBI Grade 81, como se segue:

- a) ensaios para a determinação dos Limites de Atterberg (LL e LP) e granulometria do solo;

- 
- b) ensaio de compactação, para a determinação do peso específico seco máximo (Energia do ensaio Proctor Modificado) e do teor ótimo de umidade do solo e da mistura;
  - c) ensaio CBR e/ou resistência à compressão não-confinada do solo e da mistura;
  - d) ensaios para fins da avaliação do CBR e/ou resistência das misturas, para diferentes teores de RBI Grade 81;

Depois que a camada do material (solo ou pedregulho) estiver homogeneizada, o agente estabilizante deve ser espalhado uniformemente sobre toda a área da camada por meio mecânico ou manual. Se a aplicação for feita manualmente, embalagens do agente estabilizante devem ser espaçados em intervalos iguais ao longo da seção a ser estabilizada para que a porcentagem especificada na aplicação seja alcançada.

#### **2.4.4.4. Mistura do Agente Estabilizante**

Imediatamente após o agente estabilizante ser espalhado deve ser misturado com o material. Atenção especial deve ser tomada para não atingir a camada abaixo já compactada e para não misturar o agente estabilizante além da profundidade desejada. A mistura deve persistir quanto necessária e deve ser repetida até que se assegure a homogeneidade completa da mistura solo-RBI Grade 81 sobre toda área aplicada. A mistura pode ser feita por motoniveladora, grade de disco, misturador rotativo ou equipamento equivalente sobre sucessivas passadas.

#### **2.4.4.5. Umedecimento**

Logo após a mistura do RBI Grade 81 com o material, a determinação da umidade deve ser realizada para se obter o quantitativo de água a ser adicionado à mistura, para se atingir o teor ótimo de umidade de projeto. Cada aplicação ou incremento de água deve ser bem

---

misturada com o material, evitando acúmulo de água na superfície ou grumos dentro da camada. Em toda a área onde será aplicado o produto, deve-se ter um cuidado especial no que diz respeito à homogeneidade da mistura, sob o ponto de vista do teor de umidade e do teor do agente estabilizante. Recomenda-se compactar a mistura na energia do ensaio Proctor Modificado no teor ótimo de umidade.

Se uma porção da mistura tornar-se muito úmida depois da adição do agente estabilizante e antes de ser compactada, por exemplo por causa de ocorrência de uma chuva, a aplicação será rejeitada. A água adicionada e o equipamento de molhagem devem ser adequados para assegurar a qualidade do serviço.

#### **2.4.4.6. Conformação**

As camadas compactadas devem ser abauladas adequadamente (inclinação 2-3%) para impedir que a água percole pela camada estabilizada. A execução da regularização da camada deve ser realizada por um operador de motoniveladora experiente, para que a inclinação reflita a forma especificada no projeto, sem que haja necessidade de remoção ou adição na espessura da camada.

#### **2.4.4.7. Compactação**

A compactação deve ser realizada numa série de operações contínuas cobrindo toda a largura e o comprimento da camada. O tipo de equipamento de compactação usado e a quantidade de passagens deve ser realizada de tal forma que assegure o grau de compactação especificado. A camada deve ser mantida na forma especificada e os cortes transversais, buracos, sulcos e laminações devem ser removidos. Caso haja perda de umidade por evaporação deve ser corrigida através de nova aplicação de água sobre a superfície. Durante a compactação da camada estabilizada e antes do término da passagem do rolo na superfície, deve escarificar levemente para impedir a formação de laminações próxima à superfície da camada.

---

A compactação mínima exigida é 100% da energia do ensaio Proctor Modificado, para camada de base estabilizada e 97% da energia do ensaio Proctor Modificado, para sub-base ou camadas imediatamente inferiores.

Após a compactação, determinações do grau de compactação da camada do pavimento devem ser realizadas para se determinar a eficiência do esforço de compactação aplicado e assegurar que a mínima compactação seja obtida. O controle de compactação deve ser realizado até 24 horas após terminada a compactação.

#### **2.4.4.8. Cura da Camada Estabilizada**

A camada estabilizada deve ser protegida contra perda d'água por 3 dias após a sua compactação. Nesse período, deve-se manter a camada úmida, molhando-a em intervalos freqüentes, mas a aplicação de água deve ser controlada de forma que a camada não umedeça demasiadamente e ao mesmo tempo, não permita perda de água, pois a camada tende a perder água rapidamente, podendo prejudicar o mecanismo de estabilização.

A camada estabilizada deve ser protegida contra chuvas intensas e inundações, pois pode prejudicar a estabilização. No caso da ocorrência de chuvas leves sobre a superfície da camada compactada, estas não causam danos, podendo até ajudar nas reações entre o estabilizante e o solo.

#### **2.4.4.9. Limitações de Construção**

- i) RBI Grade 81 deve ser aplicado em áreas que possibilitem o término do processo de umedecimento e compactação em um único dia de trabalho;
- ii) a estabilização não deve ser realizada durante tempo chuvoso ou sob condições de vento forte; caso uma dessas opções ocorra, a estabilização pode ser prejudicada, sendo necessário recomeçar o processo;

- 
- iii) o material para estabilizar a camada não pode ser lançado se a camada inferior se encontrar com umidade e/ou grau de compactação diferentes do especificado;
  - iv) as espessuras mínima e máxima da camada que deve ser compactada no campo são, respectivamente, 75 mm e 150 mm. Espessuras acima de 150 mm podem ser executadas, quando o compactador utilizado possuir eficiência necessária para compactar as regiões mais inferiores da camada.

#### **2.4.5. Experiência Brasileira**

A única experiência de estabilização solo-RBI Grade 81 no Brasil foi realizada no pátio de armazenagem de tubos de aço da empresa Vallourec & Mannesmann, em Belo Horizonte – Minas Gerais. A camada de 15 cm estabilizada foi utilizada como base do pavimento; em outro pátio, sem o uso do RBI Grade 81, fizeram a substituição do solo local, numa profundidade de 45 a 60 cm. O tráfego de veículos que demandam o pátio é pesado e a carga estática dos tubos nele armazenados alcançam 80 a 90 toneladas, sendo um bom teste para a camada estabilizada.

Segundo o relatório fornecido pelos representantes da Road Building International (RBI GRADE 81 APPLICATION AT VALLOUREC & MANNESMANN, 2002), os resultados encontrados para a camada estabilizada com RBI Grade 81 foram consideravelmente satisfatórios. A camada se mostrou bastante rígida e resistente, após poucos dias da execução do serviço. Entretanto, em duas áreas do pátio estabilizado, observaram-se problemas de aderência de revestimento com a camada de base. A causa desse problema pode estar associada aos seguintes fatores: má homogeneização da mistura, uso de equipamento inadequado na compactação e chuvas intensas que ocorreram após a aplicação de RBI Grade 81. As áreas danificadas foram estabilizadas novamente e, após um ano em serviço, o pátio encontra-se em boas condições de uso, como mostrado nas Figuras 18 e 19.



**Figura 18** – Pátio da empresa Vallourec & Mannesmann em Belo Horizonte, poucos dias após a estabilização de 15 cm da camada de base com RBI Grade 81



**Figura 19** – Pátio da empresa Vallourec & Mannesmann em Belo Horizonte, 1 ano após a estabilização de 15 cm da camada de base com RBI Grade 81

---

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1. Introdução**

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). A investigação experimental foi direcionada à caracterização tecnológica de misturas de solo-RBI Grade 81 para fins rodoviários.

### **3.2. Materiais**

#### **3.2.1. Solos**

Neste estudo utilizaram-se quatro amostras que constituem formações representativas no universo de solos da Microrregião de Viçosa – MG, Brasil. Essas amostras têm sido objetos de estudos geotécnicos prévios no laboratório anteriormente citado.

- a) Amostra 1 – coletada no horizonte B, em um talude da estrada que liga Viçosa ao distrito de Palmital. Ela é classificada, pedologicamente, como Podzólico Vermelho Amarelo Bruno Micáceo

---

e apresenta textura argilo-areno-siltosa. Neste trabalho, essa amostra foi referida como PVB, a qual se encontra ilustrada na Figura 20;



**Figura 20** – Talude da estrada que liga Viçosa ao distrito de Palmital – Solo PVB

- b) Amostra 2 – coletada, também, no horizonte B, num talude da rodovia que liga as cidades de Viçosa e Paula Cândido, próximo à estação de tratamento de água da primeira cidade. Ela é classificada, pedologicamente, como Latossolo Vermelho-Amarelo e apresenta textura argilo-areno-siltosa. Nesse trabalho, essa amostra foi referida como ETA, a qual se encontra ilustrada na Figura 21;



**Figura 21** – Talude da rodovia que liga Viçosa a Paula Cândido, próximo à estação de tratamento de água da cidade – Solo ETA

- 
- c) Amostra 3 – coletada no horizonte C, na parte central de um talude de corte de mais de 20 metros de altura, situado adjacente à rodovia que liga Viçosa a Paula Cândido, em frente à entrada do bairro Romão dos Reis, na área urbana de Viçosa. Ela é classificada geotecnicaamente como solo saprolítico de gnaiss e apresenta textura areno-silto-argilosa. Neste trabalho, essa amostra foi referida como SP, a qual se encontra ilustrada na Figura 22;



**Figura 22** – Talude com corte de mais de 20 metros, situado adjacente à rodovia que liga Viçosa a Paula Cândido, em frente à entrada do bairro Romão dos Reis – Solo SP

- d) Amostra 4 – coletada na parte inferior do horizonte C, num talude existente próximo à Vila Secundino, dentro do Campus da Universidade Federal de Viçosa. O solo é classificado geotecnicaamente como solo residual de gnaiss e apresenta textura areno-silto-argilosa. Nesse trabalho, essa amostra foi referida como VS, a qual se encontra ilustrada na Figura 23.



**Figura 23** – Talude existente próximo à Vila Secundino, dentro do Campus da Universidade Federal de Viçosa – Solo VS

### **3.2.2. Aditivo Químico**

O RBI Grade 81 é um estabilizante químico de solos produzido pela empresa Road Building International, com representação no Brasil pela empresa Tecnologia Florestal Avançada (Tecflora) que, gentilmente, conseguiu com a empresa Vallourec & Mannesmann amostras desse aditivo químico para que fosse realizado este estudo. Por ser um produto importado, o seu custo ainda está acima dos estabilizantes químicos tradicionais, estando em torno de US\$ 0,55/kg entregue na obra, de acordo com o seu representante no Brasil. A intenção da empresa Tecflora é instalar uma fábrica de RBI Grade 81 no Brasil e, com isto, reduzir os custos do produto.

### **3.3. Métodos**

Na Figura 24, estão sumarizados os procedimentos adotados neste trabalho, sendo estes descritos de forma detalhada, nos itens a seguir.

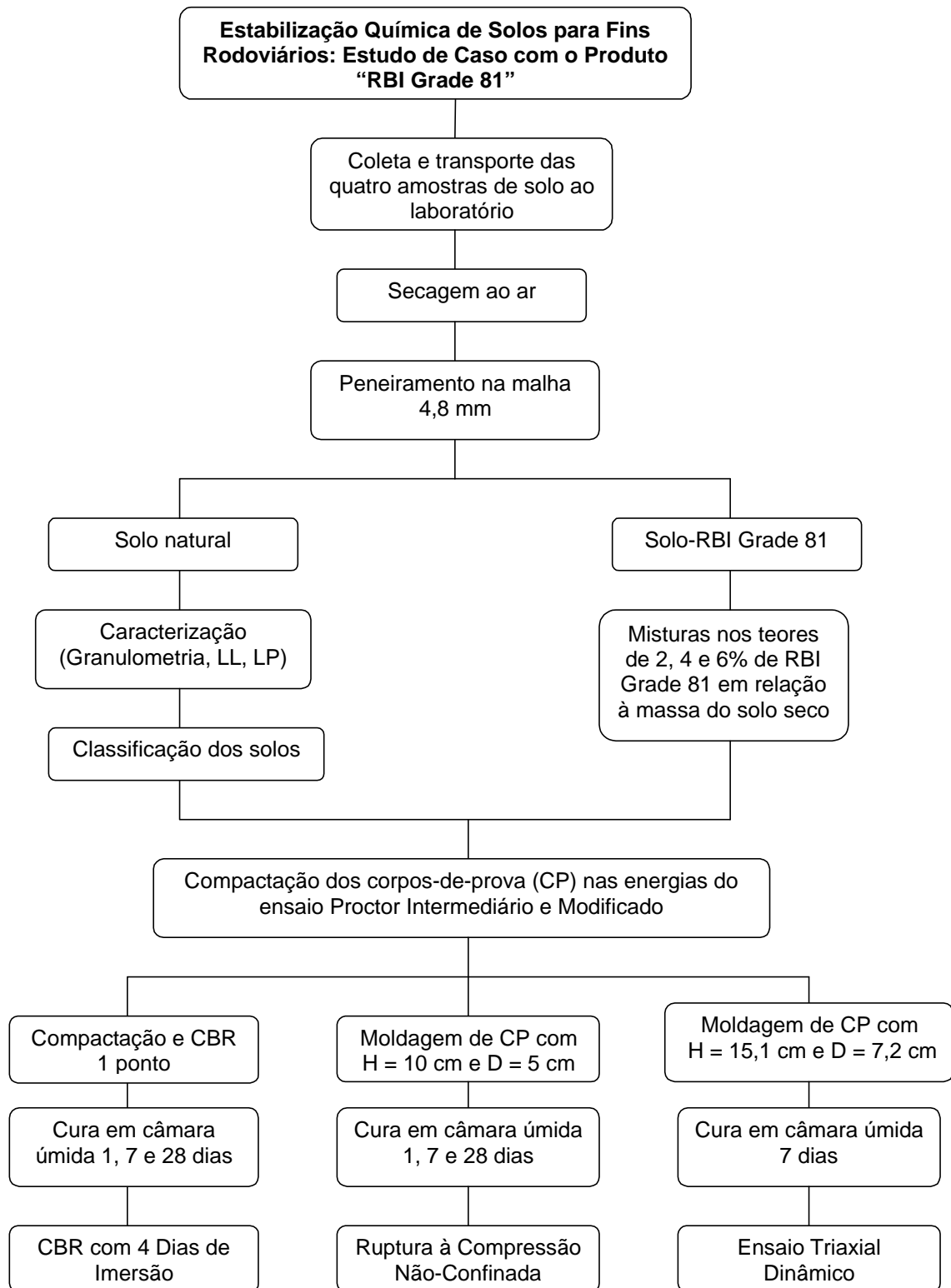
---

### **3.3.1. Metodologia de Campo**

As amostras coletadas no campo foram acondicionadas em embalagens plásticas, devidamente identificadas e posteriormente conduzidas para o Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

### **3.3.2. Metodologia de Laboratório**

As amostras de solos anteriormente citadas foram colocadas em bandejas para secagem ao ar. Em seguida, foram homogeneizadas e passadas na peneira 4,8 mm. Depois de receberem esse tratamento inicial, foram novamente armazenadas em tambores para serem submetidas aos ensaios geotécnicos apresentados na Figura 24.



**Figura 24** – Fluxograma dos procedimentos adotados no trabalho

---

### **3.3.2.1. Ensaios de Caracterização**

Os ensaios de caracterização foram realizados para identificar as quatro amostras de solos pelas classificações TRB (Transportation Research Board), USC (Unified Soil Classification) e MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1995), segundo os procedimentos normativos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os ensaios realizados foram os seguintes: granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade e peso específico dos sólidos.

### **3.3.2.2. Misturas Solo-Aditivo Químico**

O procedimento da mistura solo-RBI Grade 81 foi realizado de acordo com as recomendações do fabricante. Primeiro, o aditivo químico 81 foi adicionado ao solo natural, até completa homogeneização desses materiais. Em seguida, adicionou-se água à mistura na quantidade prevista no ensaio de compactação e, posteriormente, nova homogeneização foi realizada.

O estudo dos efeitos da adição do RBI Grade 81 aos solos selecionados foi feito nos teores de 2, 4 e 6% de RBI Grade 81 em relação ao peso de solo seco. No entanto, para a determinação da quantidade de aditivo a adicionar ao solo, considerou-se a umidade do RBI Grade 81, pois apesar de ser baixa (em torno de 1%), para teores maiores de aditivo, observou-se a sua influência na quantidade de água a adicionar, para alcançar a umidade final da mistura. Posteriormente, a mesma foi transferida para uma embalagem plástica e deixada em repouso por 24 horas, antes de iniciar os ensaios pretendidos. Para o controle da umidade, foram retiradas amostras imediatamente após a realização da mistura e depois de 24 horas. A tolerância fixada para o teor de umidade foi de  $\pm 0,3\%$ . A partir do mês de novembro de 2002, muitas dificuldades surgiram no controle da umidade, pois com o calor intenso ocorria perda de água muito rápida em algumas misturas, e muitas delas tiveram que ser repetidas.

---

Os períodos de cura para as misturas solo-RBI Grade 81 foram de 1, 7 e 28 dias, tanto para o CBR, quanto para o ensaio de resistência à compressão não-confinada.

### **3.3.2.3. Ensaio de Compactação**

Os ensaios de compactação foram realizados nas quatro amostras de solo natural e nas misturas dessas amostras com RBI Grade 81. Trabalhou-se com as energias de compactação do ensaio Proctor Intermediário e Modificado, de acordo com as recomendações da ABNT. Nestes ensaios, foram determinados o peso específico seco máximo e o teor ótimo de umidade, nas energias anteriormente citadas.

### **3.3.2.4. Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR)**

Os ensaios CBR foram realizados, segundo recomendações da ABNT, nos teores ótimos de umidade, obtidos através dos resultados dos ensaios de compactação, para avaliar a capacidade de suporte e expansão dos solos no estado natural e nas misturas solo-RBI Grade 81. Trabalhou-se com períodos de cura de 1, 7 e 28 dias para as misturas.

### **3.3.2.5. Ensaio de Resistência à Compressão Não-Confinada**

Foram realizados ensaios de resistência à compressão não-confinada, com as quatro amostras de solo natural e com as misturas solo-RBI Grade 81, nos teores ótimos de umidade e com períodos de cura de 1, 7 e 28 dias.

A determinação da resistência à compressão não-confinada foi realizada pela média das tensões de ruptura de três corpos-de-prova, admitindo uma tolerância de  $\pm 10\%$  em torno da média. Se um dos três corpos-de-prova não atendesse esse intervalo, procedia-se à determinação de nova média, com os dois restantes. Caso o fato voltasse a se repetir,

---

abandonava-se esse ensaio e procedia-se novamente à moldagem de três novos corpos-de-prova. Adotaram-se para a moldagem dos corpos-de-prova, os dados obtidos na compactação, procurando reproduzir 100% do grau de compactação, com tolerância de  $\pm 0,3\%$ . Trabalhou-se com equipamento reduzido nas dimensões de 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura, mantendo-se, assim, a relação altura/diâmetro da base em valor próximo de dois.

Os procedimentos e equipamentos utilizados para moldagem dos corpos-de-prova nas energias do ensaio Proctor Intermediário e Modificado foram diferenciados. Na energia intermediária, os corpos-de-prova foram moldados em três camadas, com escarificação intermediária nos contatos, de modo a se garantir a homogeneidade e ligação entre camadas. A compactação foi através de processo dinâmico por impacto. A Figura 25 mostra o equipamento utilizado na compactação dos corpos-de-prova na energia intermediária. Neste caso, o peso específico desejado foi alcançado com o auxílio do impacto de um soquete, de tal forma que a mistura no molde cilíndrico se adequasse à aquela definida pelo ensaio de compactação. Na energia modificada, os corpos-de-prova foram moldados em apenas uma camada com a utilização de um cilindro tripartido, desenvolvido neste trabalho. A compactação foi do tipo estática com a utilização de uma prensa hidráulica adquirida pelo Laboratório de Geotecnia do Engenharia Civil da UFV. A Figura 26 mostra o equipamento utilizado na compactação dos corpos-de-prova na energia modificada. Houve a necessidade do desenvolvimento desse novo equipamento, para moldagem dos corpos-de-prova na energia modificada, porque a qualidade e o grau de compactação desejados, não estavam sendo obtidos. Ocorria dificuldades na compactação, e principalmente na retirada dos corpos-de-prova do cilindro.



**Figura 25** – Equipamento utilizado para moldagem dos corpos-de-prova na energia do ensaio Proctor Intermediário (compactação por impacto)



**Figura 26** – Equipamento utilizado para moldagem dos corpos-de-prova na energia do ensaio Proctor Modificado (compactação estática)

---

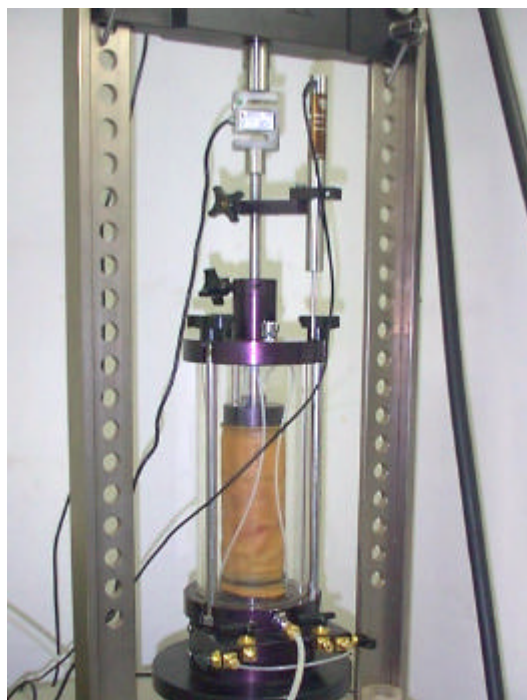
### 3.3.2.6. Ensaio Triaxial Dinâmico

Trata-se de um ensaio que procura reproduzir em laboratório uma condição de sollicitação mais próxima daquela que ocorre no campo. O parâmetro por ele fornecido é o módulo resiliente que é um dos principais elementos para análise mecânica de pavimentos.

O Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa – MG, dispõe de um sistema automatizado para realização do ensaio triaxial dinâmico. Esse sistema foi adquirido através de projeto de pesquisa financiado pela FAPEMIG (Processo TEC 2431/97), junto à Geocomp Corporation, Boxborough – MA, USA, em julho de 2001, apresentado nas Figuras 27 e 28. Ele é constituído de uma célula triaxial, sistema de controle e registro das deformações e das tensões aplicadas e um sistema hidráulico. A força axial é aplicada repetidamente no topo da amostra por meio de um pistão e registrada por uma célula de carga de 2,22 kN nele acoplada. As deformações resilientes são obtidas por um transdutor de deslocamentos conhecido por LVDT (*linear variable differential transformer*) instalado no exterior da câmara triaxial. A aquisição de dados é realizada através do software “RM Test” que acompanha o equipamento. Os dados são armazenados em um arquivo e, posteriormente, é feita a elaboração de um relatório construído pelo software.



**Figura 27** - Conjunto para realização do ensaio triaxial dinâmico



**Figura 28** - Câmara triaxial contendo amostra, célula de carga e LVDT

O ensaio do módulo resiliente foi realizado segundo as recomendações do método (DNER, 1994).

Para as misturas que apresentaram melhores resultados de CBR e resistência à compressão não-confinada, foram também determinados os valores de seus módulos de resiliência, obedecendo um período de cura de 7 dias, nas duas energias trabalhadas. Os corpos-de-prova foram moldados em cinco camadas, procurando reproduzir 100% do grau de compactação com tolerância de  $\pm 0,3\%$ , através da utilização de equipamento reduzido nas dimensões de 7,2 cm de diâmetro e 15,1 cm de altura, com escarificação intermediária nos contatos entre camadas, de modo a se garantir a homogeneidade e ligação entre elas. A compactação dos corpos-de-prova foi por impacto, utilizando equipamento mostrado na Figura 25.

---

### 3.3.2.7. Normas Técnicas Utilizadas no Presente Trabalho

O Quadro 5 contém as normas designadas pela ABNT e pelo DNER, referentes aos ensaios descritos nos itens anteriores desta seção.

**Quadro 5** – Ensaios de caracterização, compactação, CBR, resistência à compressão não-confinada, módulo resiliente e respectivas normas técnicas

Ensaio		Norma ABNT	Normas DNER
Caracterização	Granulometria	NBR 7181/84	
	Limite de Liquidez	NBR 6459/84	
	Limite de Plasticidade	NBR 7180/94	
	Peso Específico dos Sólidos	NBR 6508/84	
Compactação		NBR 7182/86	
CBR		NBR 9895/87	
Resistência à Compressão Não-Confinada		NBR 12253/92	
Módulo Resiliente			ME 131/94

---

## **4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1. Considerações Iniciais**

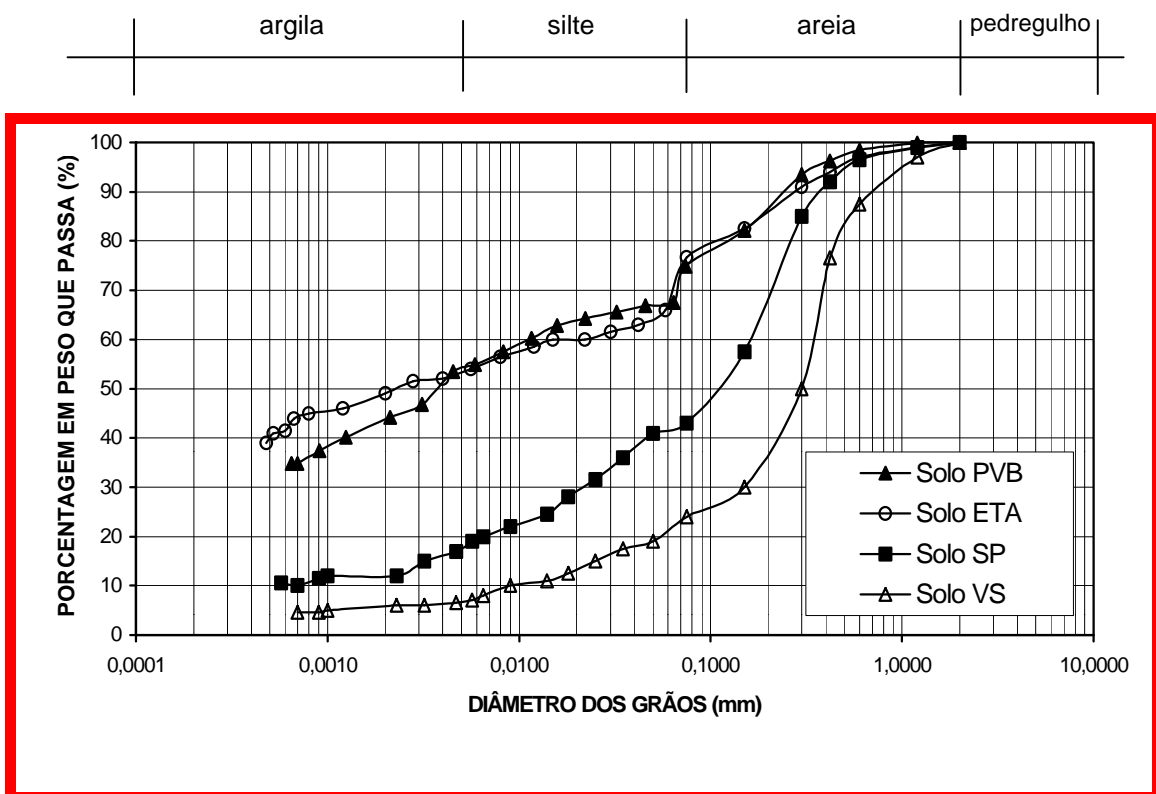
A seguir apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios de laboratório referentes à caracterização, compactação, CBR, resistência à compressão não-confinada e módulo resiliente dos solos objetos de investigação neste trabalho e as discussões pertinentes.

### **4.2. Ensaio de Caracterização**

O Quadro 6 mostra os resultados dos ensaios de granulometria, limites de liquidez e plasticidade e peso específico dos sólidos, bem como a Figura 29 apresenta as curvas granulométricas dos solos analisados.

**Quadro 6** – Granulometria (DNER), limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade e peso específico dos sólidos dos solos em estudo

Solos	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$g_s$ (kN/m <sup>3</sup> )
PVB	54	21	25	67	32	35	26,63
ETA	53	23	23	68	35	33	27,25
SP	17	26	57	31	18	13	25,53
VS	7	17	76	29	19	10	26,15



**Figura 29** – Curvas granulométricas dos solos em estudo

Os solos PVB e ETA assemelham-se quanto às suas propriedades físicas, conforme dados contidos no Quadro 6. Ambos apresentaram fração argila elevada e considerando-se as outras frações granulométricas, foram enquadrados como um material argilo-areno-siltoso. FERRAZ (1994) ressalta a influência que exerce esta fração nos processos de estabilização química dos solos, já que ela é a principal origem dos fenômenos físico-químicos que se processam nesses materiais. Entretanto, os solos SP e VS apresentam características de material areno-silto-argiloso, com valores de LL, LP e IP bem inferiores aos solos PVB e ETA.

---

#### 4.2.1. Classificação dos Solos

O Quadro 7 contém a identificação dos solos pelas classificações TRB, USC e MCT.

**Quadro 7** – Identificação dos solos pelas classificações TRB, USC e MCT

Solos	Sistema de Classificação		
	TRB	USC	*MCT
PVB	A-7-5 (20)	CH	NG'
ETA	A-7-5 (20)	MH	LG'
SP	A-2-6 (3)	SC	NS'
VS	A-2-4 (0)	SC	NA'

\* Os resultados da classificação MCT para os solos PVB, ETA e SP foram retirados de AZEVEDO (1999) e para o solo VS de BATISTA (2001).

Consultando as tabelas de classificação dos solos segundo os sistemas TRB, USC e pela metodologia MCT, pode-se definir as classes que se enquadraram os solos pesquisados neste trabalho como:

- o solo PVB, pela classificação TRB, é considerado de comportamento fraco a pobre para emprego em camadas de pavimento; pela USC, trata-se de um solo argilo inorgânico de alta plasticidade; e, pela metodologia MCT como não-laterítico argiloso;
- o solo ETA, pela classificação TRB, é considerado de comportamento fraco a pobre para emprego em camadas de pavimento; pela USC, trata-se de um solo silte inorgânico de alta plasticidade; e, pela metodologia MCT como laterítico argiloso;
- o solo SP, pela classificação TRB, é considerado de comportamento fraco a pobre para emprego em camadas de pavimento; pela USC, trata-se de um solo areno argiloso; e, pela metodologia MCT como não-laterítico siltoso;
- o solo VS, pela classificação TRB, é considerado excelente a bom para emprego em camadas de pavimento; pela USC, trata-se de um solo areno argiloso; e, pela metodologia MCT como não-laterítico arenoso.

### 4.3. Ensaios de Compactação

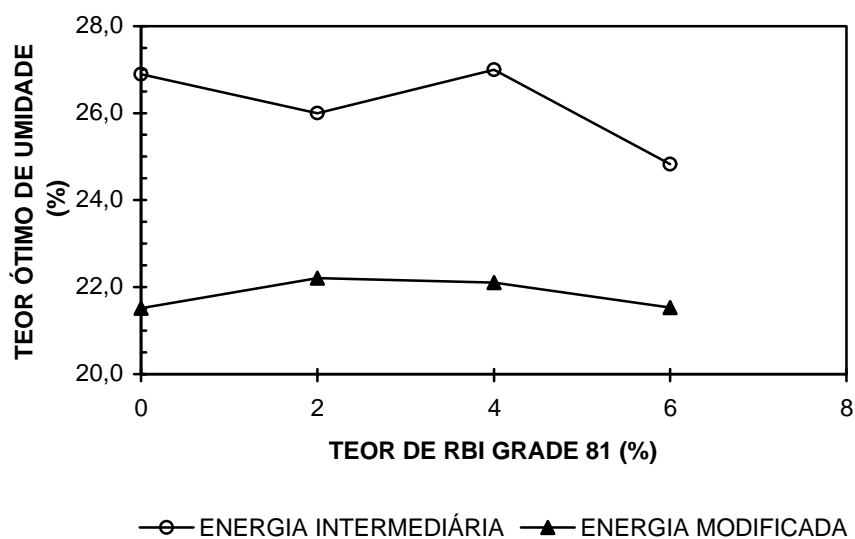
O Quadro 8 mostra os resultados encontrados de peso específico seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e teor ótimo de umidade ( $W_{\acute{o}t}$ ), nas energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, para as misturas solo-RBI Grade 81.

As curvas de compactação e saturação dos solos e das misturas solo-RBI Grade 81, nas energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, encontram-se no apêndice A deste trabalho.

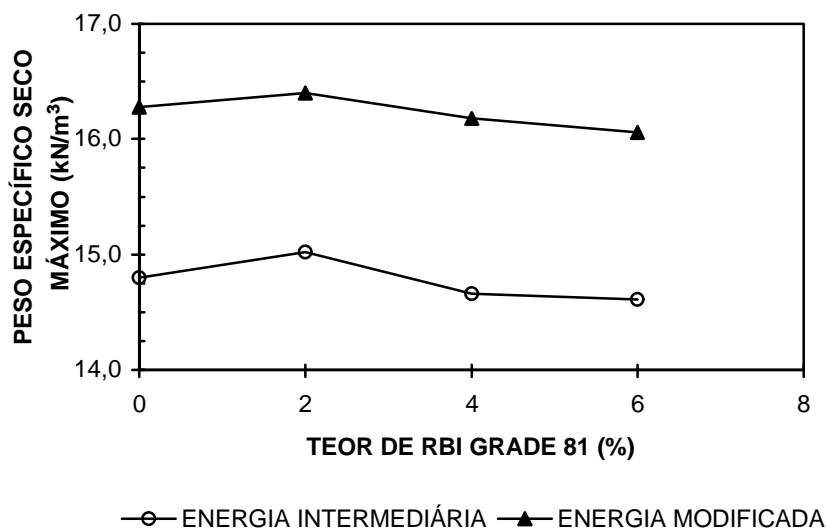
**Quadro 8** – Peso específico seco máximo e teor ótimo de umidade das misturas solo-RBI Grade 81 - energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado

Solos	RBI Grade 81 (%)	Wót (%)		$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m <sup>3</sup> )	
		Energia Intermediária	Energia Modificada	Energia Intermediária	Energia Modificada
PVB	0	26,89	21,51	14,80	16,28
	2	26,00	22,20	15,02	16,40
	4	27,00	22,10	14,66	16,18
	6	24,83	21,53	14,61	16,06
ETA	0	28,44	28,37	14,44	15,03
	2	27,91	27,95	14,71	15,24
	4	30,60	28,94	14,13	14,97
	6	32,19	30,10	13,80	14,46
SP	0	15,51	14,05	17,01	17,46
	2	15,24	14,76	16,81	17,35
	4	16,68	15,64	16,33	17,07
	6	18,66	16,60	16,24	16,91
VS	0	12,38	9,78	18,81	19,69
	2	12,56	11,46	17,55	19,19
	4	15,54	11,95	17,03	18,26
	6	15,77	12,22	17,00	18,12

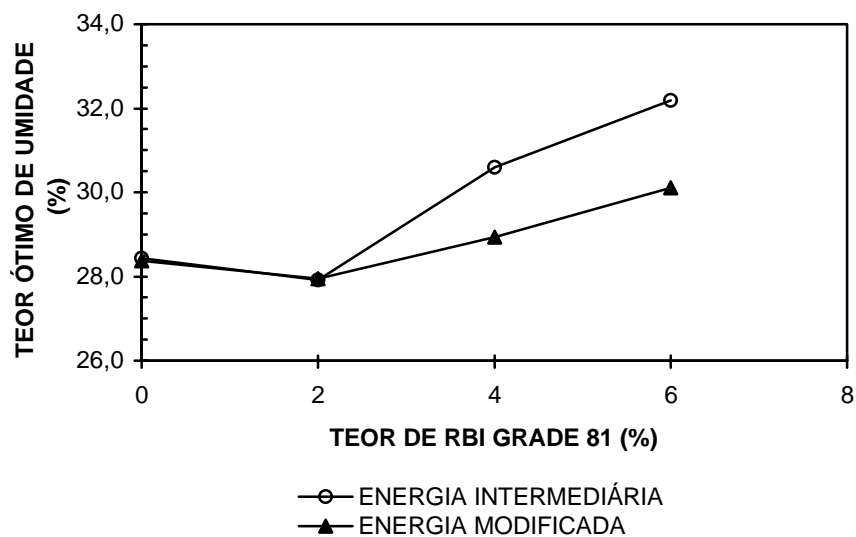
As Figuras 30 a 37 foram obtidas com base nas informações contidas no Quadro 8.



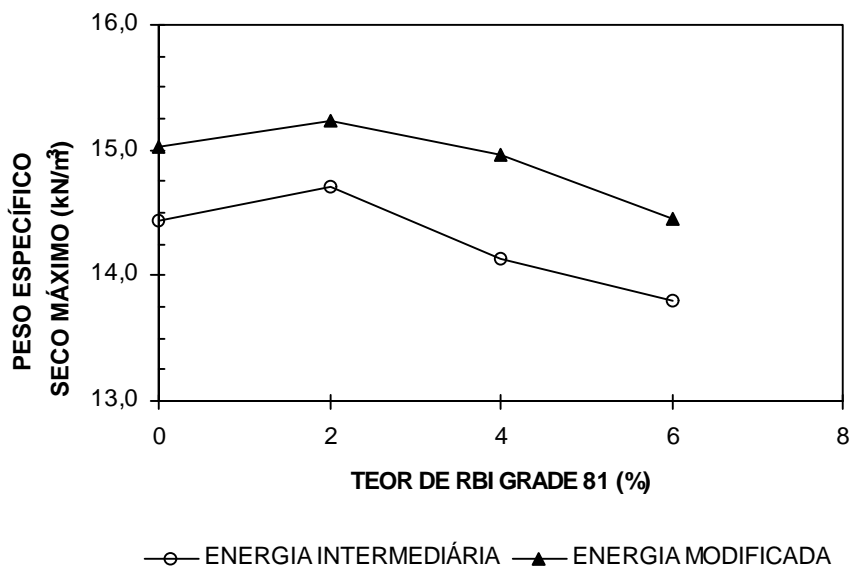
**Figura 30** – Teor ótimo de umidade em função da adição de RBI Grade 81 ao solo PVB - energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado



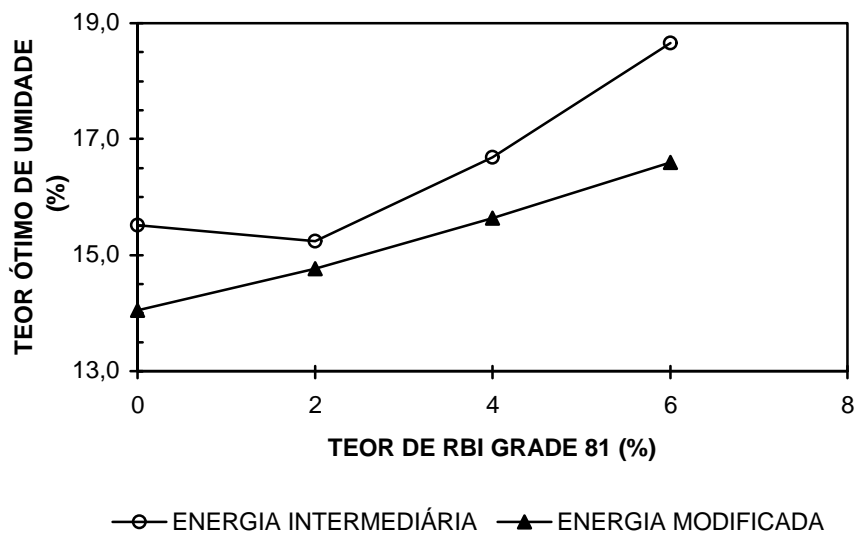
**Figura 31** – Peso específico seco máximo em função da adição de RBI Grade 81 ao solo PVB - energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado



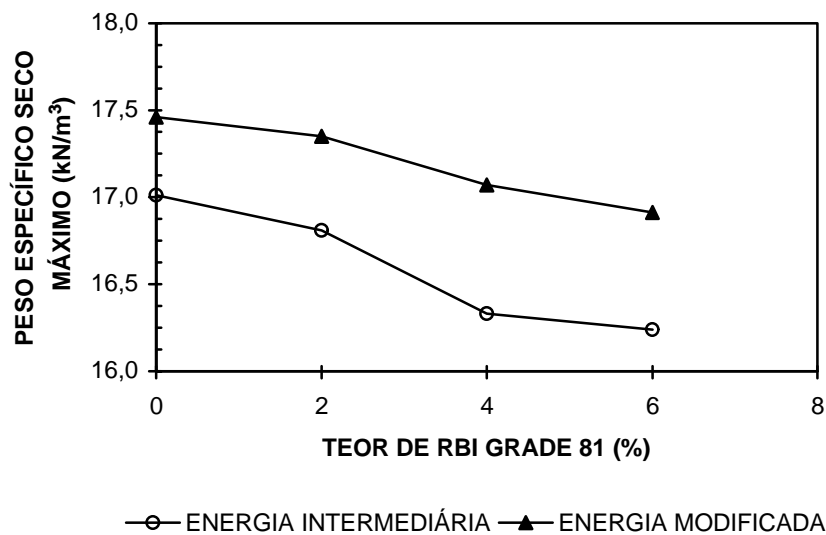
**Figura 32** – Teor ótimo de umidade em função da adição de RBI Grade 81 ao solo ETA - energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado



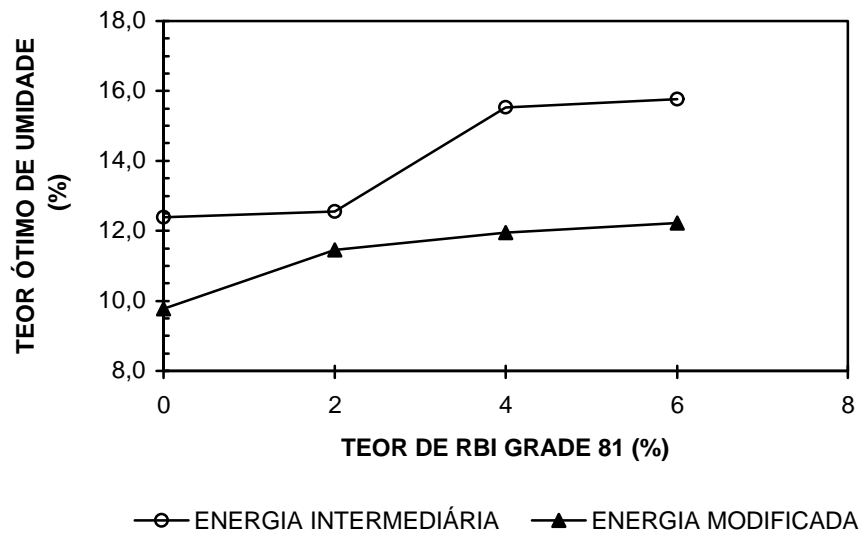
**Figura 33** – Peso específico seco máximo em função da adição de RBI Grade 81 ao solo ETA - energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado



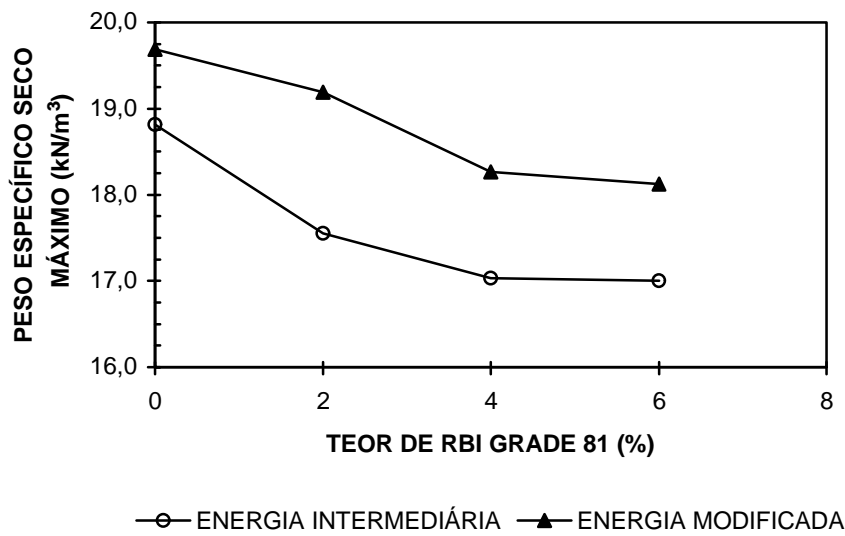
**Figura 34** – Teor ótimo de umidade em função da adição de RBI Grade 81 ao solo SP - energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado



**Figura 35** – Peso específico seco máximo em função da adição de RBI Grade 81 ao solo SP - energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado



**Figura 36** – Teor ótimo de umidade em função da adição de RBI Grade 81 ao solo VS - energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado



**Figura 37** – Peso específico seco máximo em função da adição de RBI Grade 81 ao solo VS - energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado

As Figuras 30 a 37 apresentam a variação de peso específico seco máximo e teor ótimo de umidade das misturas em função do teor de RBI

---

Grade 81 e da energia de compactação. Como era de se esperar, os valores dos pesos específicos secos máximos na energia modificada, superaram os valores encontrados para a energia intermediária. O aumento foi da ordem: 10% - solo PVB, 5% - solo ETA, 4% - solo SP e 7% - solo VS. Com relação ao teor ótimo de umidade, ocorreu o contrário, ou seja, aumentando a energia de compactação o teor de umidade diminuiu. Em média, as variações do teor ótimo de umidade foram as seguintes: 4% - solo PVB, 1% - solo ETA, 1% - solo SP e 3% - solo VS

Além do aumento da energia ter influenciado nos parâmetros de compactação, os crescentes teores de RBI Grade 81 na mistura conduziram a menores valores de peso específico seco máximo e maiores valores de teor ótimo de umidade, exceto para a mistura de RBI Grade 81 com o solo PVB que apresentou um comportamento atípico em relação aos demais solos, ou seja, o teor de umidade aumentou e diminuiu com o acréscimo do teor de RBI, na energia intermediária. Na energia modificada, o comportamento do solo PVB foi também diferente dos demais solos, isto é, com o acréscimo de RBI, o teor ótimo de umidade diminuiu. Como se mostra na Figura 30.

Acredita-se que o aumento do teor ótimo de umidade com o acréscimo do teor de RBI Grade 81 nas misturas, deve-se ao aumento do teor de finos e ao consumo de água necessário às reações de hidratação, que ocorre durante o período de cura das misturas.

#### 4.4. Índice de Suporte Califórnia e Expansão

Os Quadros 9 e 10 mostram os resultados encontrados de índice suporte Califórnia (CBR) e expansão, nas energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado dos solos e misturas solo-RBI Grade 81.

**Quadro 9 – CBR e Expansão dos solos e misturas solo-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário**

Solo	RBI Grade 81 (%)	Período de Cura (dias)					
		1		7		28	
		CBR (%)	Expansão (%)	CBR (%)	Expansão (%)	CBR (%)	Expansão (%)
PVB	2	14	1,66	20	1,39	24	0,74
	4	27	1,14	40	0,55	42	0,36
	6	8	6,26	20	2,73	26	1,60
	* 6	6	7,55				
PVB <sub>NATURAL</sub> - CBR = 14%; Expansão = 1,69%							
ETA	2	32	0,04	33	0,08	33	0,23
	4	30	0,05	41	0,05	53	0,20
	6	54	0,29	69	0,04	71	0,15
ETA <sub>NATURAL</sub> - CBR = 21%; Expansão = 0,53%							
SP	2	12	3,15	19	1,43	34	0,66
	4	25	2,54	51	0,32	58	0,27
	6	34	3,17	74	0,52	102	0,06
SP <sub>NATURAL</sub> - CBR = 14%; Expansão = 2,37%							
VS	2	26	0,57	30	0,13	38	0,22
	4	80	0,50	105	0,02	113	0,08
	6	94	1,63	159	0,05	178	0,04
	* 6	96	0,84				
VS <sub>NATURAL</sub> - CBR = 33%; Expansão = 0,90%							

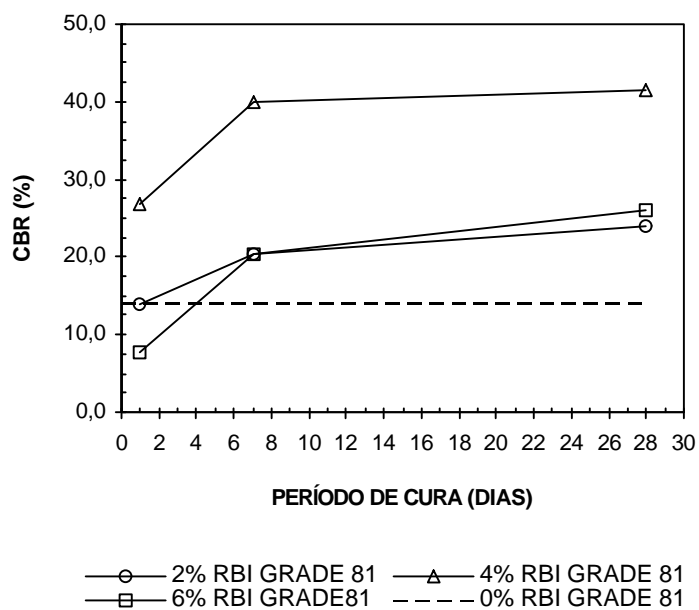
\* Ensaio repetido, pois o resultado obtido foi diferente do esperado

**Quadro 10 – CBR e Expansão dos solos e misturas solo-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado**

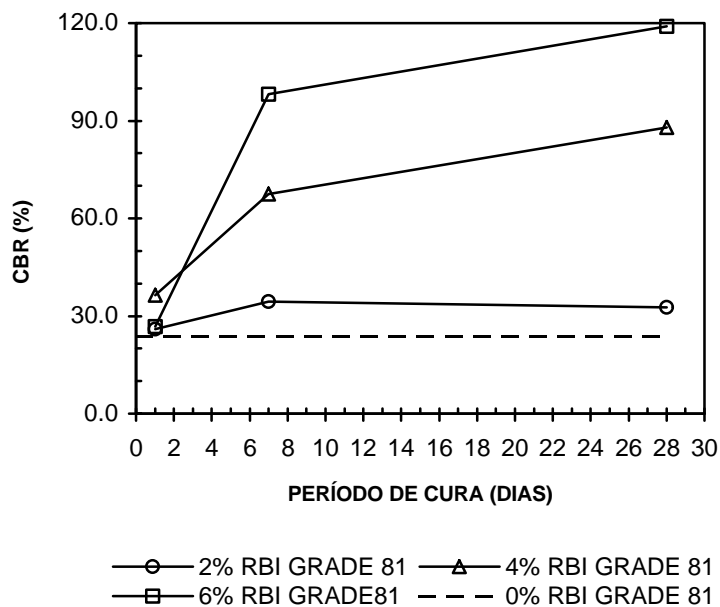
Solo	RBI Grade 81 (%)	Período de Cura (dias)					
		1		7		28	
		CBR (%)	Expansão (%)	CBR (%)	Expansão (%)	CBR (%)	Expansão (%)
PVB	2	26	0,51	35	0,39	33	0,17
	4	36	1,24	67	0,5	88	0,18
	6	27	3,44	98	0,58	119	0,47
	* 6	33	2,66				
PVB <sub>NATURAL</sub> - CBR = 24%; Expansão = 1,19%							
ETA	2	24	0,05	20	0,11	37	0,21
	4	52	0,39	70	0,22	103	0,25
	6	51	0,30	97	0,24	108	0,06
ETA <sub>NATURAL</sub> - CBR = 16%; Expansão = 0,10%							
SP	2	23	2,48	43	0,99	43	0,64
	4	59	1,74	103	0,14	108	0,05
	6	54	3,00	152	0,21	149	0,06
SP <sub>NATURAL</sub> - CBR = 18%; Expansão = 3,15%							
VS	2	33	1,48	43	0,80	59	0,46
	4	59	0,90	96	0,07	124	0,05
	6	109	0,36	125	0,02	142	0,04
VS <sub>NATURAL</sub> - CBR = 15%; Expansão = 2,97%							

\* Ensaio repetido, pois o resultado obtido foi diferente do esperado

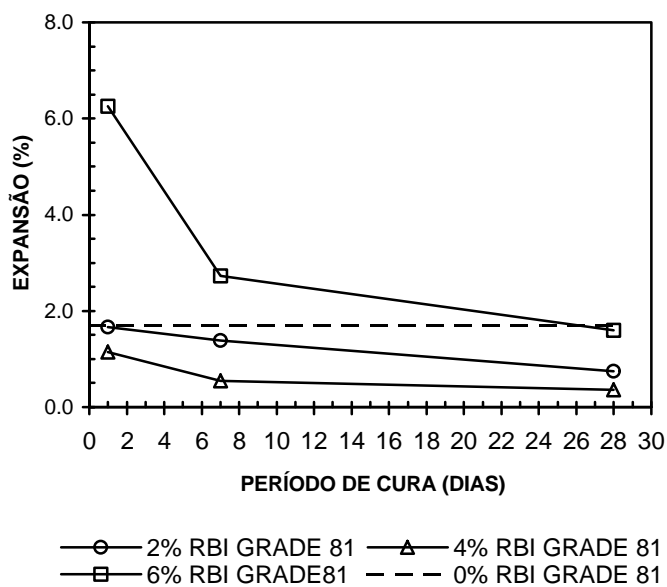
As Figuras 38 a 53 ilustram a variação de CBR e da expansão, em função do período de cura, nas energias acima citadas.



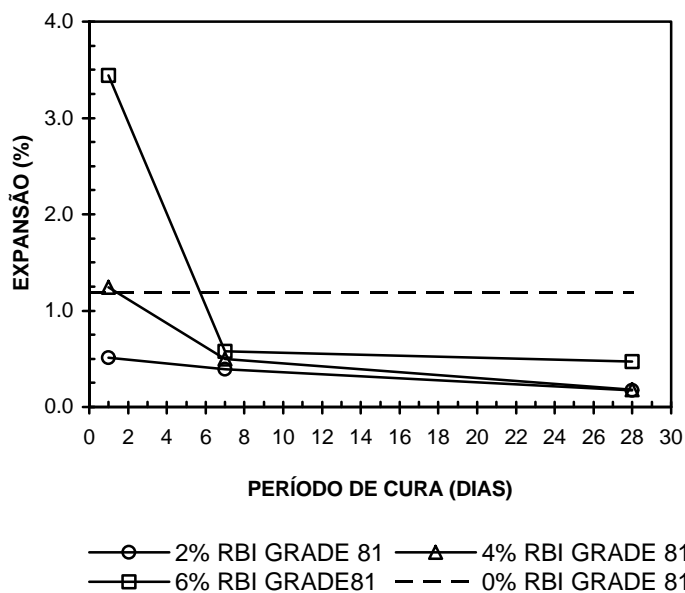
**Figura 38** – Variação do CBR em função do período de cura das misturas PVB-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário



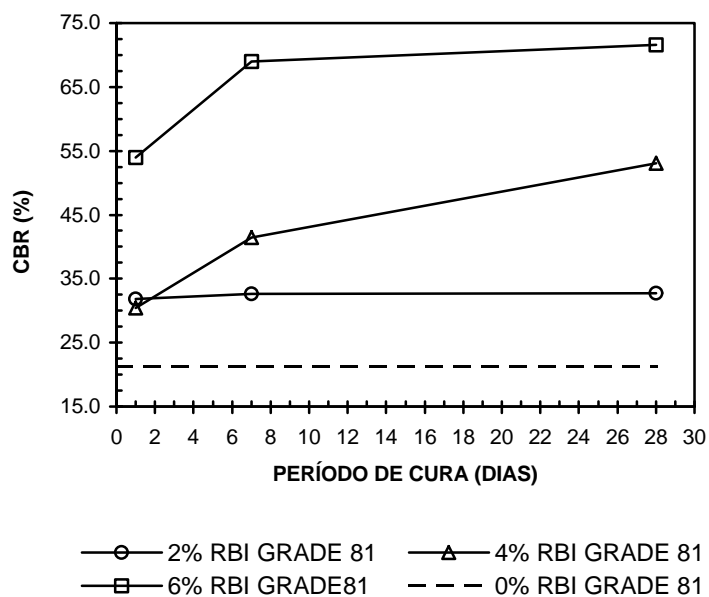
**Figura 39** – Variação do CBR em função do período de cura das misturas PVB-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado



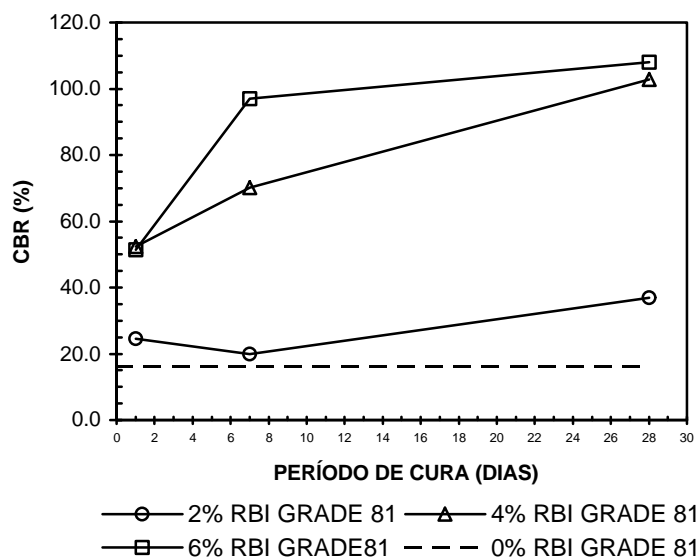
**Figura 40** – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas PVB-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário



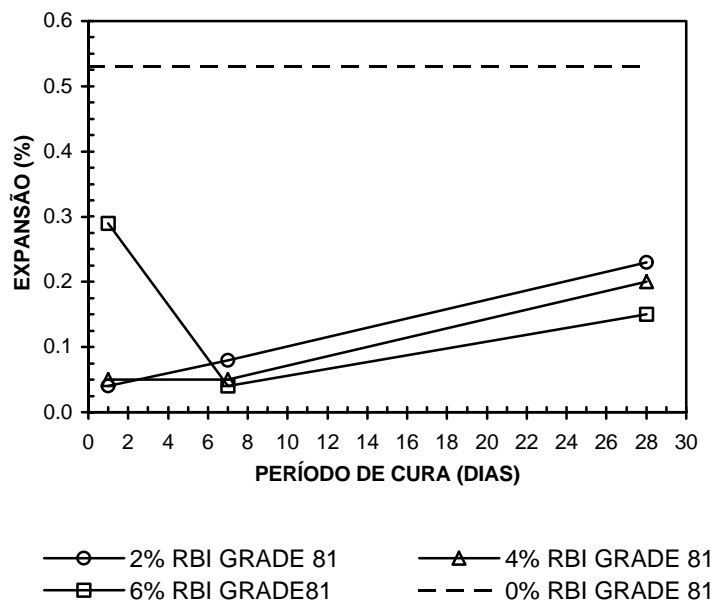
**Figura 41** – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas PVB-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado



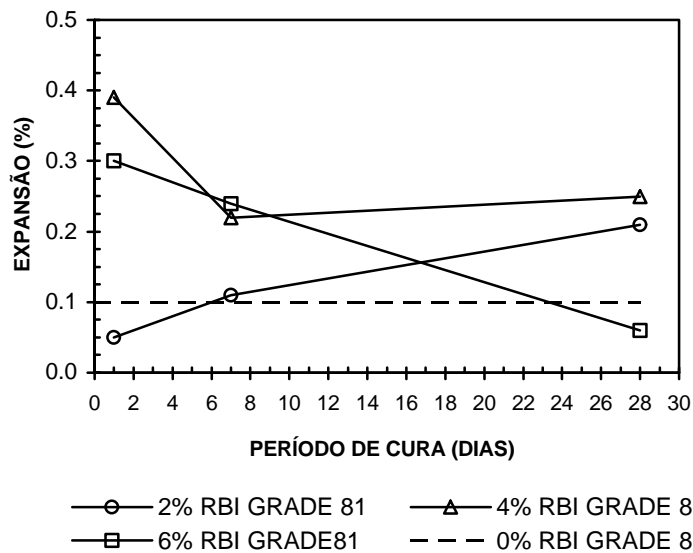
**Figura 42** – Variação do CBR em função do período de cura das misturas ETA-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário



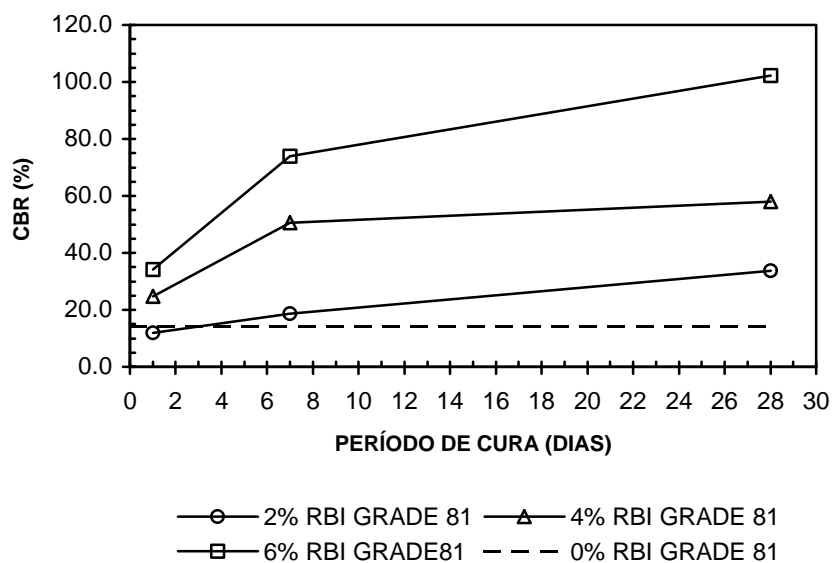
**Figura 43** – Variação do CBR em função do período de cura das misturas ETA-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado



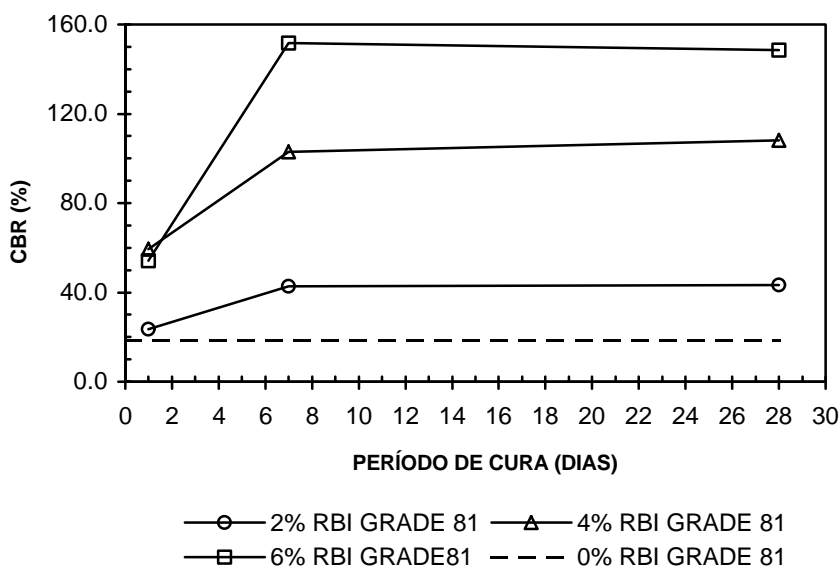
**Figura 44** – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas ETA-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário



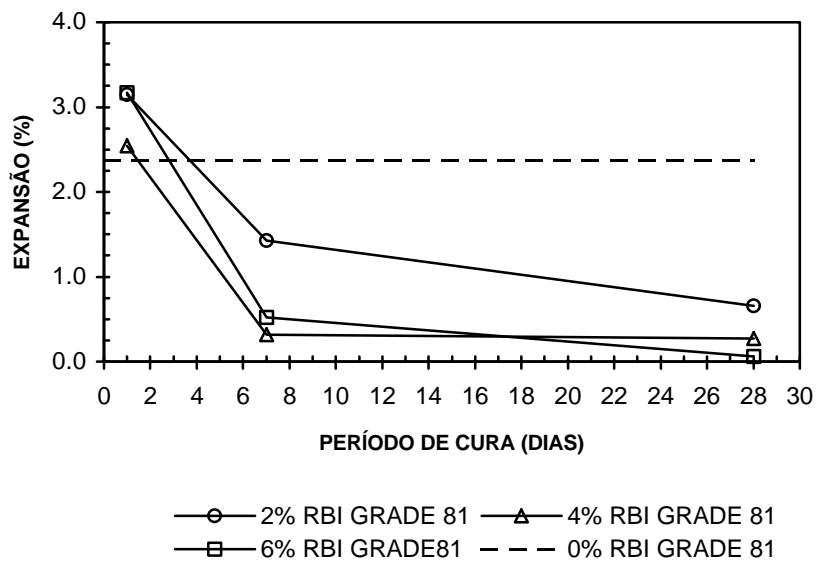
**Figura 45** – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas ETA-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado



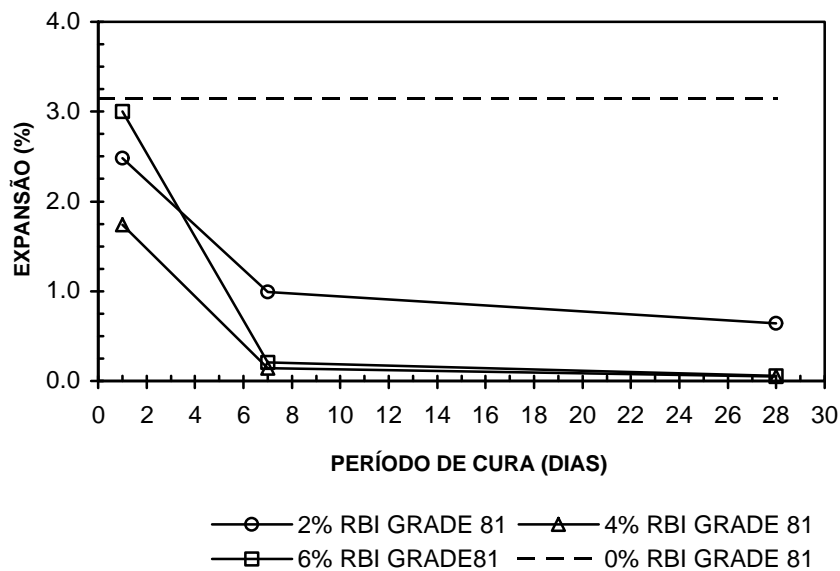
**Figura 46** – Variação do CBR em função do período de cura das misturas SP-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário



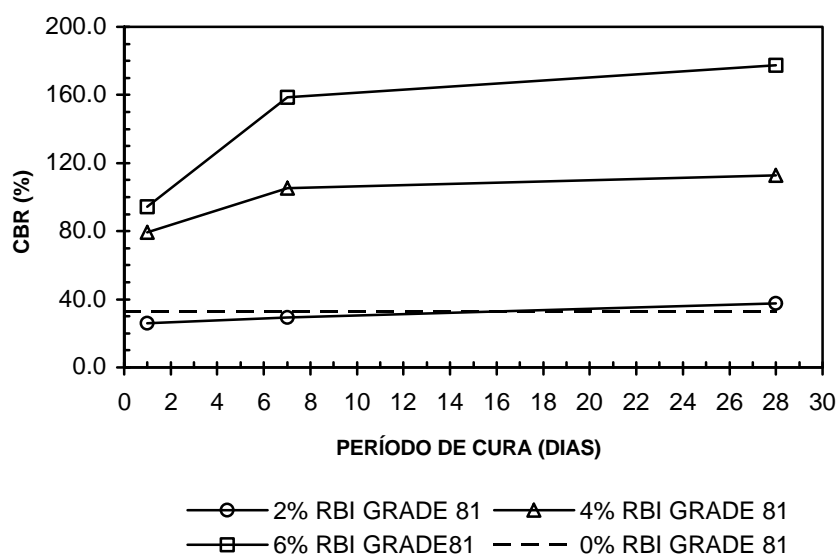
**Figura 47** – Variação do CBR em função do período de cura das misturas SP-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado



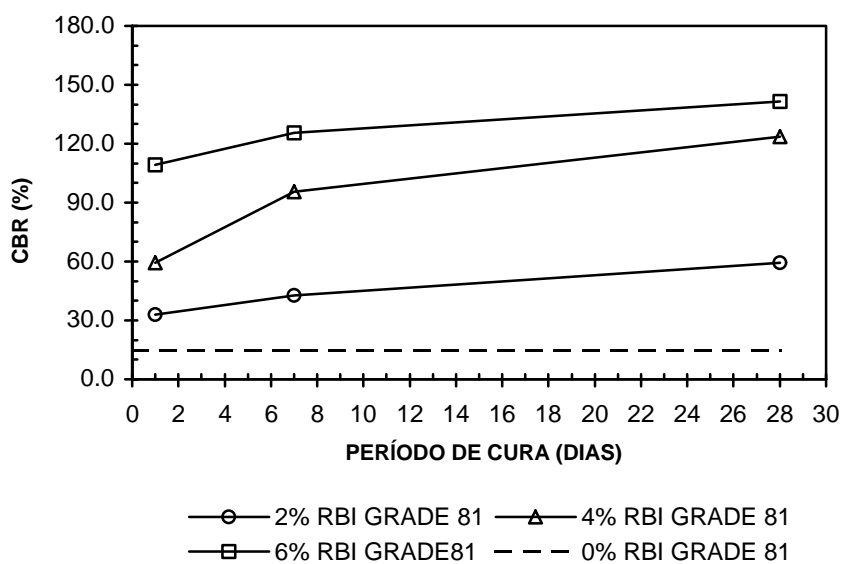
**Figura 48** – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas SP-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário



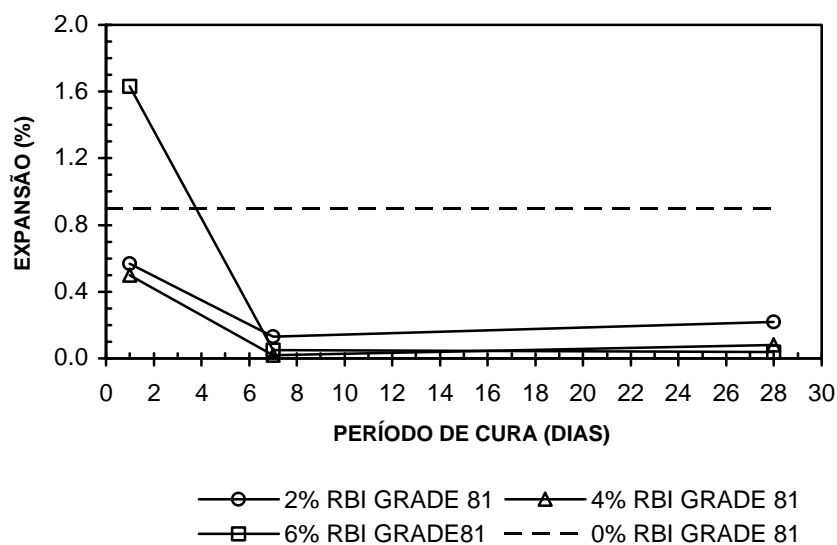
**Figura 49** – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas SP-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado



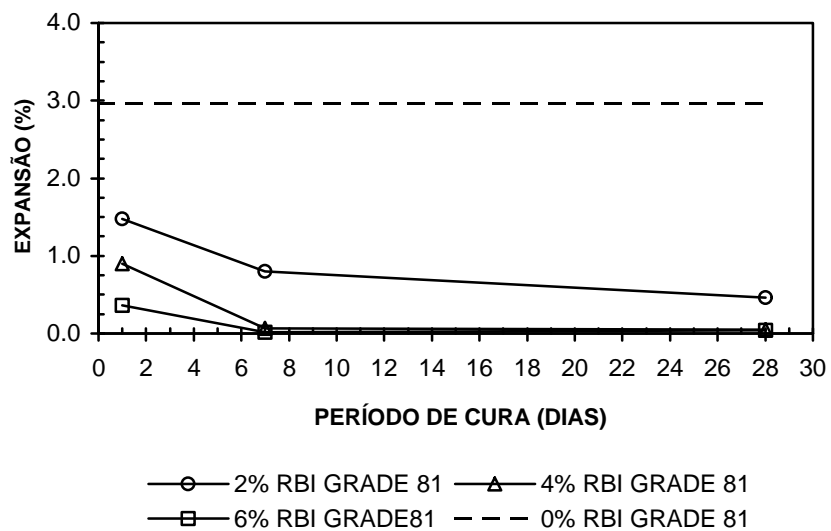
**Figura 50** – Variação do CBR em função do período de cura das misturas VS-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário



**Figura 51** – Variação do CBR em função do período de cura das misturas VS-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado



**Figura 52** – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas VS-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário



**Figura 53** – Variação da Expansão em função do período de cura das misturas VS-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado

#### 4.4.1. Influência da Energia de Compactação no CBR e na Expansão

O Quadro 11 mostra que com o aumento da energia de compactação (intermediária para modificada) houve um ganho elevado de CBR na maioria das misturas solo-RBI Grade 81 com o período de cura e o teor de aditivo. As variações foram as seguintes: 36% a 357% para o PVB, 13% a 94% para o ETA, 29% a 140% para o SP e 10% a 58% para o VS. Entretanto, para algumas misturas, solos ETA e VS com RBI Grade 81, o valor de CBR diminuiu com o aumento da energia de compactação.

**Quadro 11** – Ganho percentual de CBR devido ao aumento da energia de compactação para as misturas dos solos PVB, ETA, SP e VS com RBI Grade 81

Solo	RBI Grade 81 (%)	Período de Cura (dias)		
		1	7	28
PVB	2	86%	69%	36%
	4	36%	69%	111%
	6	242%	248%	357%
PVB <sub>NATURAL</sub> = 67%				
ETA	2	-23%	-39%	13%
	4	72%	69%	94%
	6	-5%	40%	51%
ETA <sub>NATURAL</sub> = -25%				
SP	2	95%	127%	29%
	4	140%	103%	86%
	6	59%	105%	45%
SP <sub>NATURAL</sub> = 30%				
VS	2	26%	45%	58%
	4	-25%	-9%	10%
	6	16%	-21%	-20%
VS <sub>NATURAL</sub> = -56%				

Os valores de expansão medidos no ensaio CBR tiveram uma tendência de redução com o aumento da energia de compactação. Porém, na mistura PVB-4% RBI, com 1 dia de cura e nas misturas solo ETA-RBI Grade 81, praticamente não se alteraram, pois as expansões nas duas

---

energias foram muito baixas. Também, observou-se o mesmo nas misturas SP e VS com 4 e 6% de RBI Grade 81, a partir dos 7 dias de cura. No entanto, o SP natural e o VS natural, com 2% de RBI, tiveram um acréscimo significativo na expansão, com o aumento da energia de compactação.

Comparando os valores máximos de CBR encontrados com o emprego de RBI Grade 81, em cada solo estudado, com o valor de CBR do solo natural, nota-se que elevados ganhos percentuais foram alcançados nas energias intermediária e modificada de: 194% e 404% para o solo PVB, 238% e 675% para o solo ETA, 625% e 729% para o solo SP, 435% e 874% para o solo VS, respectivamente. Quanto aos valores de expansão correspondentes aos valores máximos de CBR, para o solo PVB a expansão foi ligeiramente menor que 0,5% e para os demais solos, foi desprezível.

#### **4.4.2. Influência do Teor de RBI Grade 81 no CBR e na Expansão**

Através dos resultados de CBR, observou-se que o aumento do teor de RBI proporcionou acréscimo nos valores de CBR nas duas energias de compactação, apesar de que em algumas misturas, isto não ocorreu, pois na energia intermediária os valores de CBR do solo PVB com 4% de RBI foram maiores que os de 6%. No solo ETA, os valores de CBR com 2 e 4% de RBI e 1 dia de cura não tiveram variações substanciais. Na energia modificada para o solo PVB, verificou-se que nos três teores de RBI com 1 dia de cura os valores de CBR foram próximos, em torno de 30%; o mesmo verificou-se para os valores de CBR para as misturas dos solos ETA e SP com 4 e 6% de RBI e 1 dia de cura.

Quanto aos valores de expansão medida no ensaio CBR, nas misturas PVB-RBI Grade 81 observaram-se aumentos com o acréscimo do teor de RBI Grade 81 nas duas energias de compactação, sendo que, na energia intermediária, as misturas com 4% de RBI apresentaram menor expansão que as com 2 e 6%, como apresentado nas Figuras 40 e 41. As

---

expansões medidas nas misturas ETA-RBI Grade 81 foram muito baixas. As diferenças nos valores apresentados nas Figuras 44 e 45 devem-se, provavelmente, à pouca precisão nas determinações dos valores de expansão durante a execução do ensaio CBR. Nos solos SP e VS, com o aumento do teor de RBI Grade 81, houve uma tendência de redução da expansão. Entretanto, para o solo SP os valores de expansão das misturas com 4 e 6% de RBI foram próximos nas duas energias de compactação, como apresentado nas Figuras 48 e 49. Para o solo VS, a expansão da mistura, com 6% de RBI e 1 dia de cura, compactada na energia intermediária, foi maior do que as misturas com 2 e 4% do aditivo químico, como apresentado na Figura 52. Este efeito contrário ao esperado pode, provavelmente, estar associado à ocorrência de fenômenos de dispersão na mistura.

#### **4.4.3. Influência do Período de Cura no CBR e na Expansão**

Observou-se através das Figuras 38 a 53 que com o aumento do período de cura para as misturas solo-RBI Grade 81 houve acréscimo nos valores de CBR e redução da expansão nas duas energias de compactação, principalmente nos 7 primeiros dias. Esta redução na expansão ocorreu porque houve o desenvolvimento de reações de cimentação entre o solo e o produto, gerando uma massa com características de rocha branda. Assim, sendo essas ligações mais fortes do que aquelas geradas pela tendência de expansão, controlou-se esse parâmetro. O Quadro 12 mostra a relação percentual entre os valores de CBR com 1 e 7 dias de cura com 28 dias. Na totalidade dos resultados contidos no Quadro 12, os valores de CBR correspondentes a 28 dias de cura superaram os valores de CBR correspondentes a 1 e 7 dias.

**Quadro 12** – Percentual de CBR alcançado com 1 e 7 dias de cura em relação aos 28 dias de cura para misturas PVB, ETA, SP e VS com RBI Grade 81

Solo	RBI Grade 81 (%)	Período de Cura (dias)			
		1		7	
		Energia Intermediária	Energia Modificada	Energia Intermediária	Energia Modificada
PVB	2	58%	80%	85%	106%
	4	64%	41%	96%	77%
	6	30%	23%	78%	82%
ETA	2	97%	66%	100%	54%
	4	57%	51%	78%	68%
	6	75%	48%	96%	90%
SP	2	36%	54%	56%	98%
	4	43%	55%	87%	95%
	6	33%	37%	72%	102%
VS	2	69%	55%	79%	72%
	4	70%	48%	93%	77%
	6	53%	77%	89%	89%

---

#### 4.5. Resistência à Compressão Não-Confinada

Os Quadros 13 e 14 mostram os resultados encontrados de resistência à compressão não-confinada, nas energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado dos solos e misturas solo-RBI Grade 81.

**Quadro 13** – Resistência à Compressão Não-Confinada dos solos e misturas solo-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário

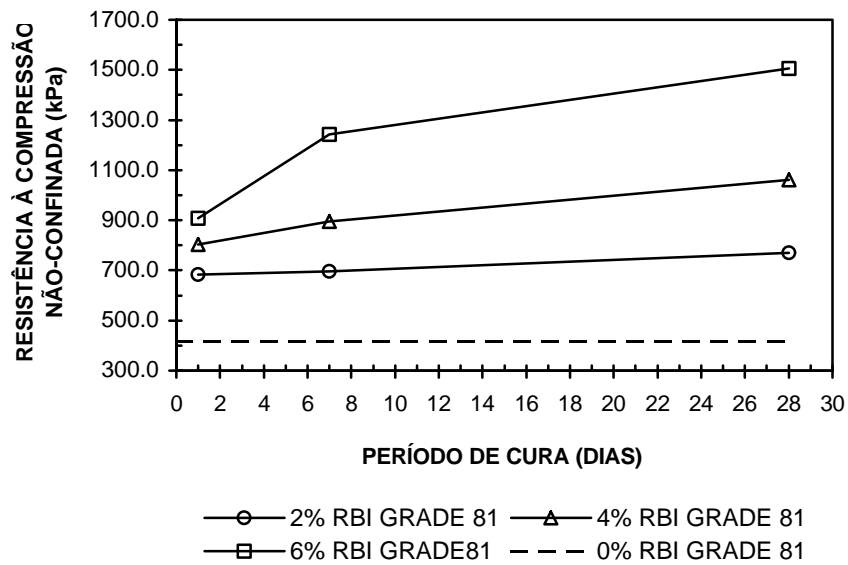
Solo	RBI Grade 81 (%)	Período de Cura (dias)		
		1	7	28
		Resistência (kPa)	Resistência (kPa)	Resistência (kPa)
PVB	2	683	696	771
	4	804	896	1060
	6	907	1242	1505
PVB <sub>NATURAL</sub> – Resistência = 414 kPa				
ETA	2	952	870	985
	4	826	929	1170
	6	981	1105	1810
ETA <sub>NATURAL</sub> – Resistência = 361 kPa				
SP	2	654	728	817
	4	669	937	1207
	6	671	1021	1452
SP <sub>NATURAL</sub> - Resistência = 387 kPa				
VS	2	333	474	493
	4	455	779	876
	6	640	1137	1530
VS <sub>NATURAL</sub> - Resistência = 394 kPa				

**Quadro 14** – Resistência à Compressão Não-Confinada dos solos e misturas solo-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado

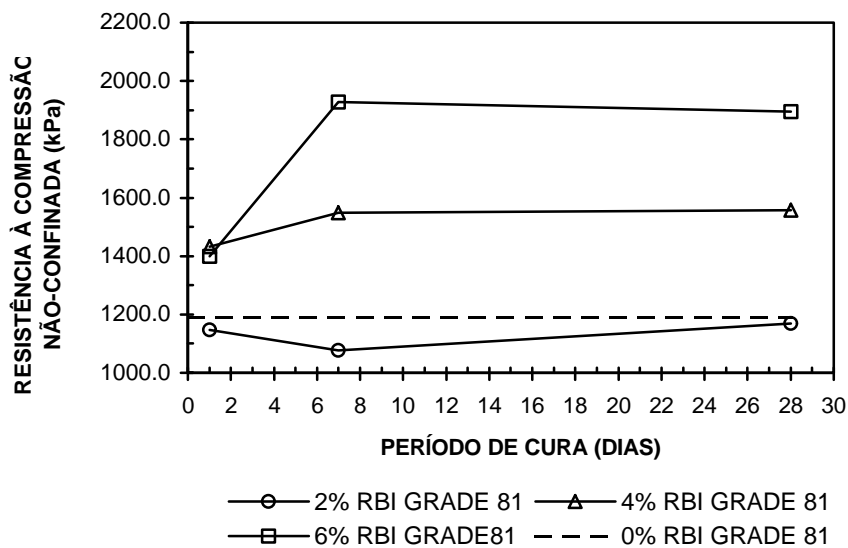
Solo	RBI Grade 81 (%)	Período de Cura (dias)		
		1 Resistência (kPa)	7 Resistência (kPa)	28 Resistência (kPa)
PVB	2	1147	1077	1170
	4	1431	1549	1557
	6	1399	1928	1895
PVB <sub>NATURAL</sub> - Resistência = 1189 kPa				
*ETA	2	2414	2436	2267
	4	1906	2284	2332
	6	1977	2374	2194
*ETA <sub>NATURAL</sub> – Resistência = 2020---				
SP	2	629	573	871
	4	978	1007	1304
	6	923	1372	1758
SP <sub>NATURAL</sub> - Resistência = 567 kPa				
VS	2	654	666	787
	4	555	910	1095
	6	869	1449	2416
VS <sub>NATURAL</sub> - Resistência = 486 kPa				

\*Resultados diferentes do esperado, provavelmente devido a problemas de compactação

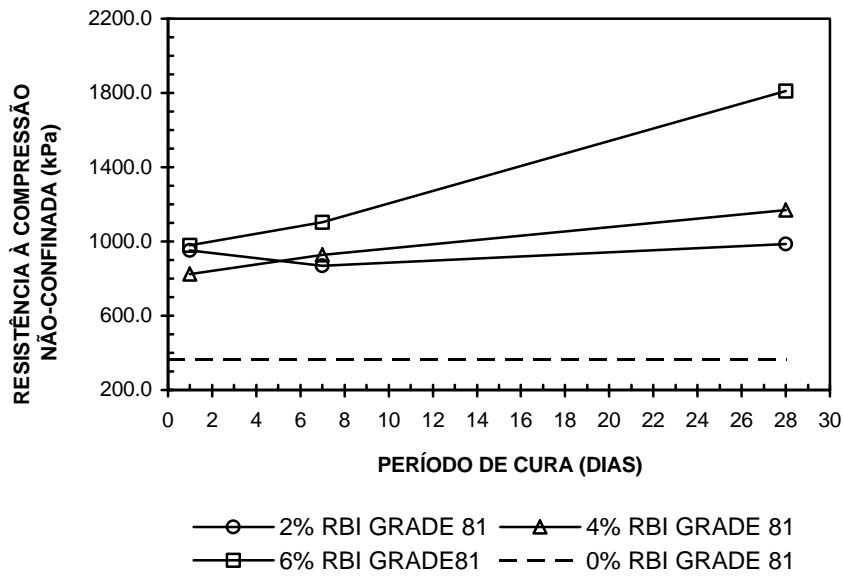
As Figuras 54 a 60 ilustram a variação de resistência à compressão não-confinada das misturas, em função do período de cura, nas energias de compactação dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado.



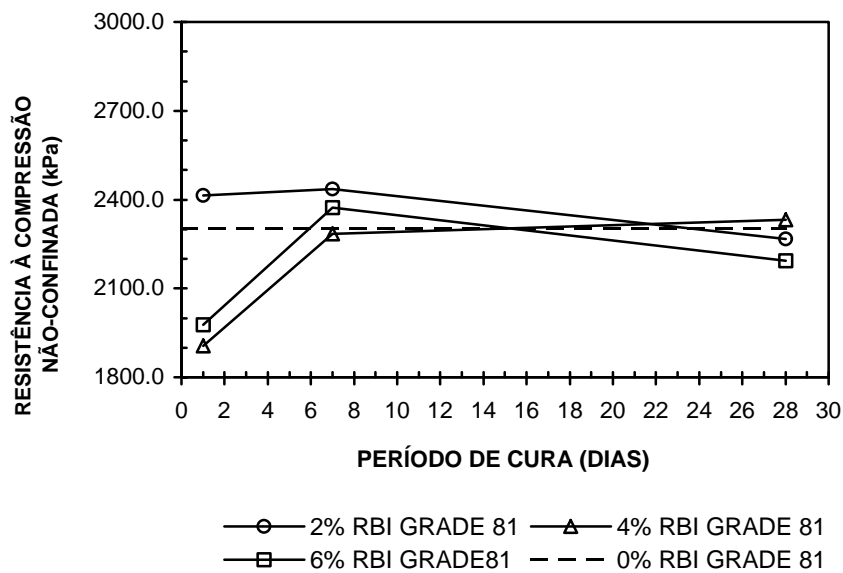
**Figura 54** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas PVB-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário



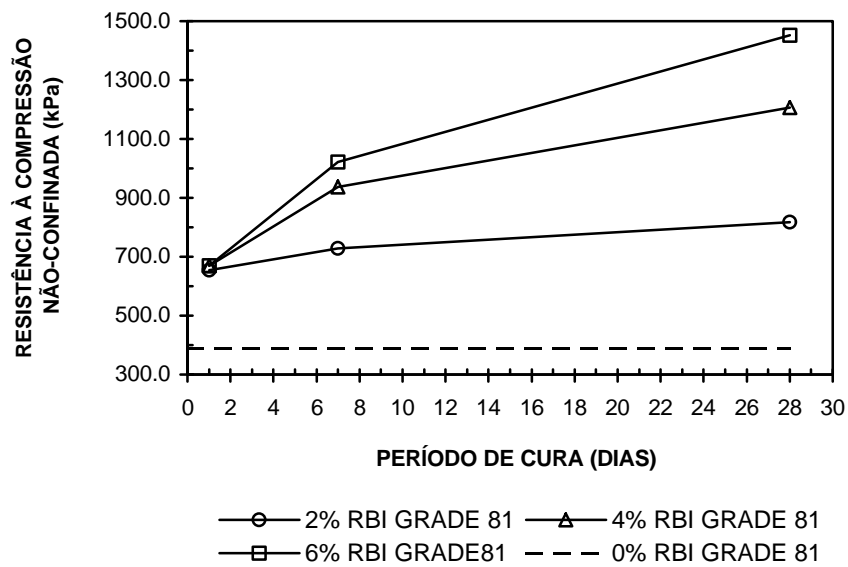
**Figura 55** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas PVB-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado



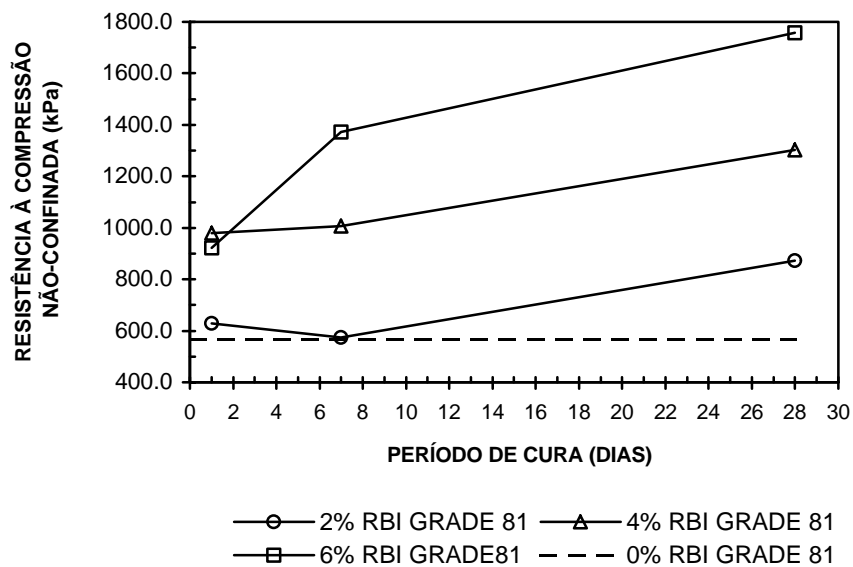
**Figura 56** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas ETA-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário



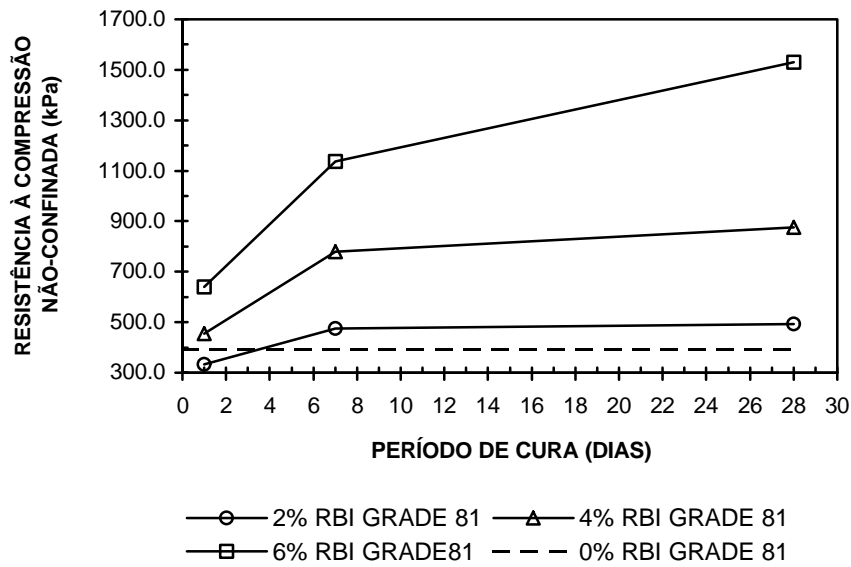
**Figura 57** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas ETA-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado



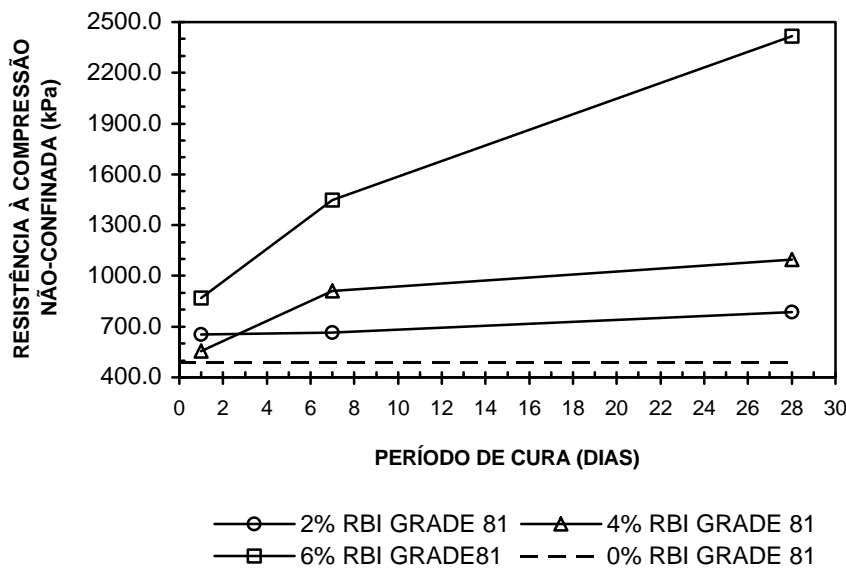
**Figura 58** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas SP-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário



**Figura 59** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas SP-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado



**Figura 60** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas VS-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Intermediário



**Figura 61** – Variação da Resistência à Compressão Não-Confinada em função do período de cura das misturas VS-RBI Grade 81, compactadas na energia do ensaio Proctor Modificado

---

#### **4.5.1. Influência da Energia de Compactação na Resistência à Compressão Não-Confinada**

Nas misturas dos solos PVB, SP e VS verificou-se o aumento da resistência à compressão não-confinada com o aumento da energia de compactação. Observou-se, também, que no solo SP, o ganho foi menor em comparação ao ganho dos outros solos, pois houve até redução de resistência com o aumento da energia de compactação nas misturas com 2% de RBI Grade 81, para períodos de cura de 1 e 7 dias. O Quadro 15 contém o ganho percentual de resistência com o aumento da energia de compactação.

Os resultados de resistência à compressão não-confinada com o uso de RBI Grade 81 em cada solo estudado evidenciaram ganhos substanciais, quando comparados com o valor de resistência à compressão não-confinada do solo natural, alcançando valores nas energias intermediária e modificada de: 263% e 62% para o solo PVB, 401% e 6% para o solo ETA, 276% e 210% para o solo SP, 288% e 397% para o solo VS, respectivamente.

**Quadro 15** – Ganho percentual de Resistência à Compressão Não-Confinada devido o aumento da energia de compactação para misturas PVB, ETA, SP e VS com RBI Grade 81

Solo	RBI Grade 81 (%)	Período de Cura (dias)		
		1	7	28
PVB	2	68%	55%	52%
	4	78%	73%	47%
	6	54%	55%	26%
PVB <sub>NATURAL</sub> = 187%				
ETA	2	154%	180%	130%
	4	131%	146%	99%
	6	102%	115%	21%
ETA <sub>NATURAL</sub> = 538%				
SP	2	-4%	-21%	7%
	4	46%	7%	8%
	6	38%	34%	21%
SP <sub>NATURAL</sub> = 47%				
VS	2	96%	40%	60%
	4	22%	17%	25%
	6	36%	27%	58%
VS <sub>NATURAL</sub> = 23%				

#### 4.5.2. Influência do Teor de RBI Grade 81 na Resistência à Compressão Não-Confinada

Analisando os resultados de resistência à compressão não-confinada, notou-se que o aumento do teor de RBI proporciona acréscimo de resistência, apesar de que em algumas misturas, isto não ocorreu. Na energia intermediária, o solo ETA com 2% de RBI e com 1 dia de cura obteve resistência maior que o teor de 4%. Para o solo SP, as misturas com 2, 4, 6% de RBI e com 1 dia de cura, não apresentaram entre si, variação significativa de resistência à compressão não-confinada. Na energia modificada, os solos PVB e SP, com 4 e 6% de RBI e 1 dia de cura, praticamente não ocorreram variações nas suas resistências, na energia modificada. O ganho de resistência do solo VS foi atípico na energia modificada, isto é, com 2% de RBI e 1 dia de cura o valor encontrado superou o teor de 4% para o mesmo período de cura.

### 4.5.3. Influência do Período de Cura na Resistência à Compressão Não-Confinada

O período de cura após a compactação também foi um fator importante no ganho de resistência à compressão não-confinada. Observou-se, através do Quadro 16, que grande parte do ganho de resistência dos solos estudados ocorreu entre 1 e 7 dias de cura na maioria das misturas, pois a resistência alcançada foi próxima ou até mesmo superior à de 28 dias de cura. A partir do 7<sup>o</sup> dia, na energia modificada, a variação do período de cura não influenciou significativamente a resistência dos solos PVB e ETA. Acredita-se que mesmo nos solos de textura argilosa como o PVB e o ETA que têm, respectivamente, 25% e 23% de fração areia e 21% e 23% de fração silte, provavelmente, os 28 dias de cura não foram suficientes para a ocorrência de reações pozolânicas, ou a contribuição das mesmas para a resistência total foi pequena, ou a parcela reativa desses solos (argilominerais) não reagiu com o RBI, a não ser na forma majoritária de reações de hidratação.

**Quadro 16** – Percentual de Resistência à Compressão Não-Confinada alcançado com 1 e 7 dias de cura, em relação aos 28 dias, para os solos PVB, ETA, SP e VS estabilizados com RBI Grade 81

Solo	RBI Grade 81 (%)	Período de Cura (dias)			
		1		7	
		Energia Intermediária	Energia Modificada	Energia Intermediária	Energia Modificada
PVB	2	89%	98%	90%	92%
	4	76%	92%	84%	100%
	6	60%	74%	83%	102%
ETA	2	97%	107%	88%	107%
	4	71%	82%	79%	98%
	6	54%	90%	61%	108%
SP	2	80%	72%	89%	66%
	4	55%	75%	78%	77%
	6	46%	53%	70%	78%
VS	2	68%	83%	96%	85%
	4	52%	51%	89%	83%
	6	42%	36%	74%	60%

---

#### 4.6. Módulo Resiliente

Adotou-se como representação do comportamento resiliente das misturas solo-RBI Grade 81 apresentadas nas Figuras 62 a 67, os seguintes modelos:

- solos argilosos (MOTTA et al., 1990)

$$MR = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2} \quad (1)$$

- solos arenosos e pedregulhosos (DEHLEN e MONISMITH, 1970)

$$MR = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \quad (2)$$

$$MR = K_1 \cdot \theta^{K_2} \quad (3)$$

onde:

MR - módulo de resiliência;

$K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , e  $K_4$  – parâmetros da equação obtidos experimentalmente;

$\sigma_d$  – tensão desvio aplicada repetidamente;

$\sigma_3$  – tensão confinante;

$\theta$  - primeiro invariante de tensões.

Nas funções 4 a 15 que a seguir serão apresentadas, as tensões  $\sigma_d$  e  $\sigma_3$ ,  $\theta$  e MR são em kPa.

##### (a) PVB-6% RBI Grade 81

- Energia intermediária

$$MR = 6.112,05 \cdot \sigma_d^{0,71} \quad (R^2 = 0,99) \quad (4)$$

- Energia modificada

$$MR = 13.292,12 \cdot \sigma_d^{0,50} \quad (R^2 = 0,97) \quad (5)$$

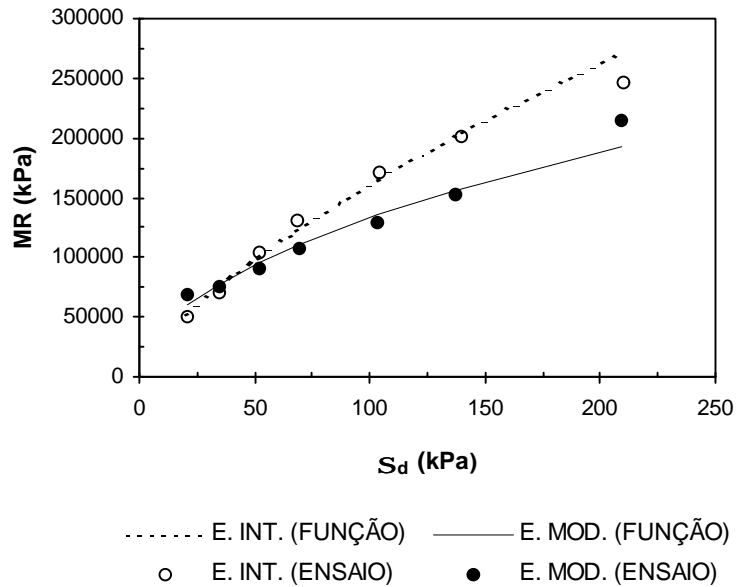
##### (b) ETA-6% RBI Grade 81

- Energia intermediária

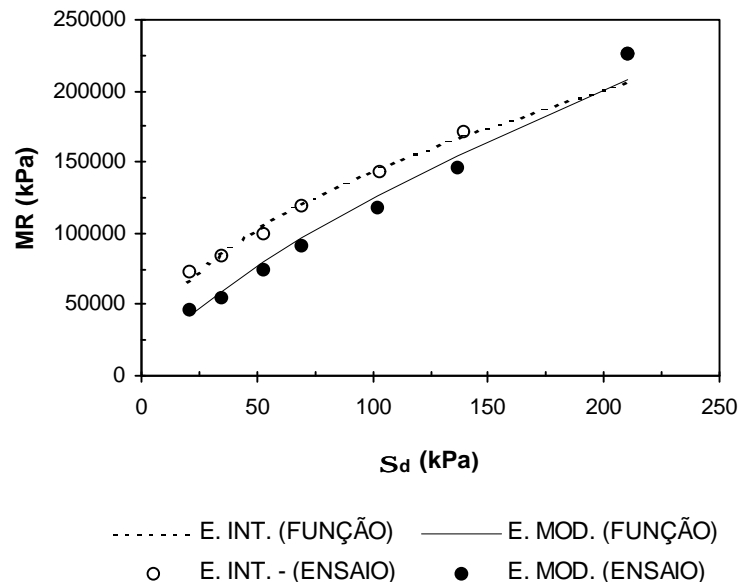
$$MR = 15.078,66 \cdot \sigma_d^{0,49} \quad (R^2 = 0,98) \quad (6)$$

- Energia modificada

$$MR = 5.191,86 \cdot \sigma_d^{0,69} \quad (R^2 = 0,98) \quad (7)$$



**Figura 62** – Módulo de resiliente em função da tensão desvio, das misturas PVB-6% RBI Grade 81, compactadas nas energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, com 7 dias de cura



**Figura 63** – Módulo resiliente em função da tensão desvio, das misturas ETA-6% RBI Grade 81, compactadas nas energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, com 7 dias de cura

**(c) SP-6% RBI Grade 81**

- Energia intermediária

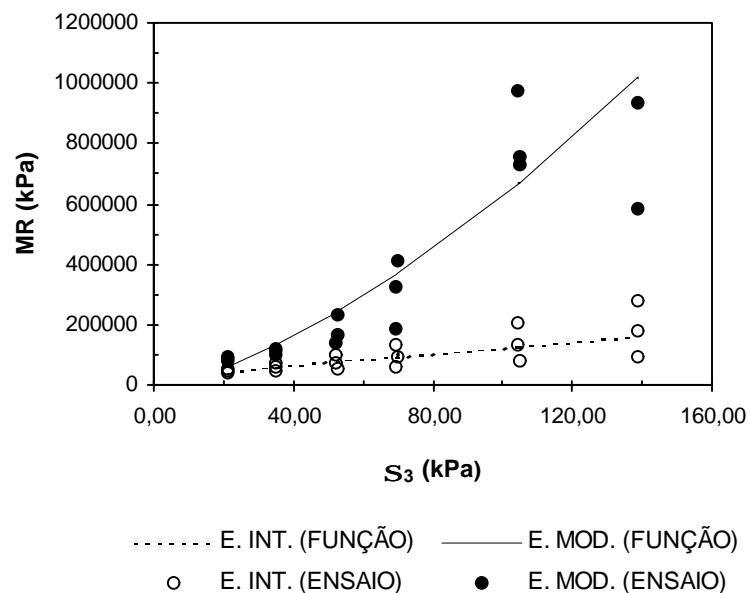
$$MR = 4.722,13 \cdot \sigma_3^{0,71} \quad (R^2 = 0,67) \quad (8)$$

$$MR = 1.059,68 \cdot \theta^{0,77} \quad (R^2 = 0,86) \quad (9)$$

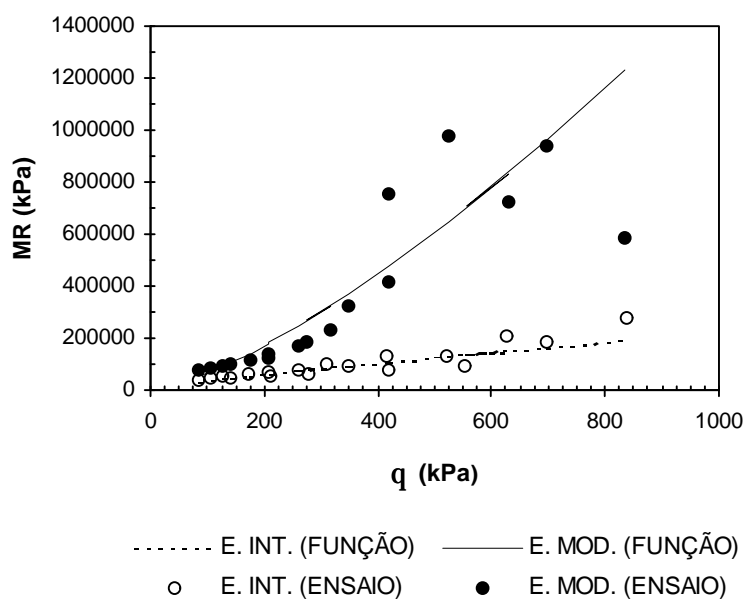
- Energia modificada

$$MR = 686,60 \cdot \sigma_3^{1,48} \quad (R^2 = 0,85) \quad (10)$$

$$MR = 114,44 \cdot \theta^{1,38} \quad (R^2 = 0,80) \quad (11)$$



**Figura 64** – Módulo resiliente em função da tensão confinante, das misturas SP-6% RBI Grade 81, compactadas nas energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, com 7 dias de cura



**Figura 65** – Módulo resiliente em função do primeiro invariante de tensões, das misturas SP-6% RBI Grade 81, compactadas nas energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, com 7 dias de cura

**(d) VS-6% RBI Grade 81**

- Energia intermediária

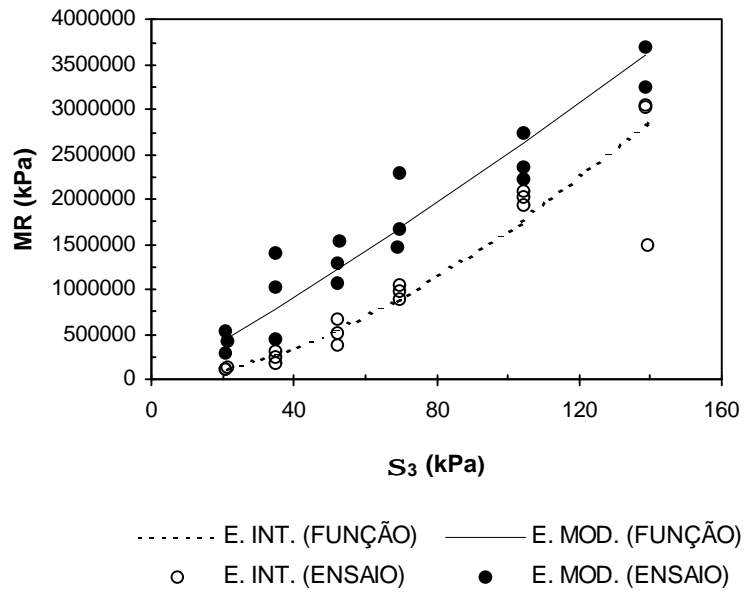
$$MR = 646,93 \cdot \sigma_3^{1,70} \quad (R^2 = 0,96) \quad (12)$$

$$MR = 71,05 \cdot \theta^{1,61} \quad (R^2 = 0,92) \quad (13)$$

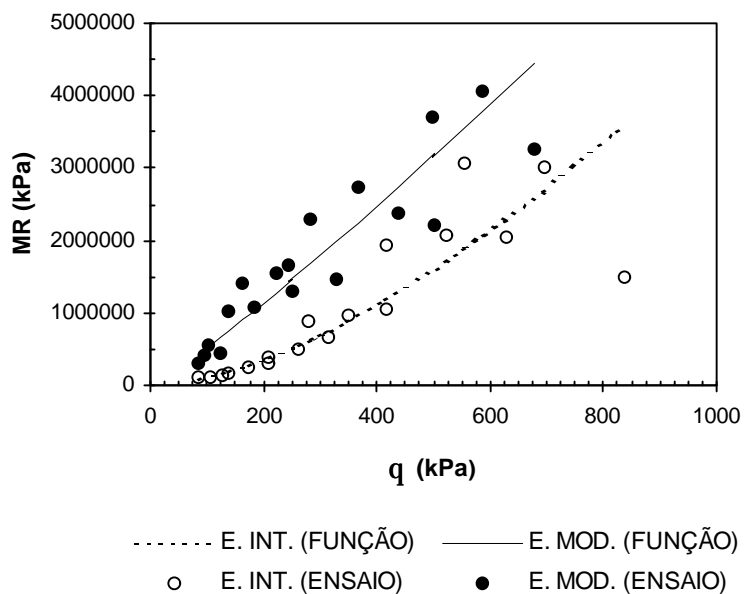
- Energia modificada

$$MR = 15.087,49 \cdot \sigma_3^{1,11} \quad (R^2 = 0,88) \quad (14)$$

$$MR = 3.010,71 \cdot \theta^{1,12} \quad (R^2 = 0,88) \quad (15)$$



**Figura 66** – Módulo resiliente em função da tensão confinante, das misturas VS-6% RBI Grade 81, compactadas nas energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, com 7 dias de cura



**Figura 67** – Módulo resiliente em função do primeiro invariante de tensões, das misturas VS-6% RBI Grade 81, compactadas nas energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, com 7 dias de cura

---

Com base nas Figuras 61 a 66, verificou-se que as misturas solo-RBI Grade 81 apresentaram redução nos módulos resilientes, para os solos argilosos PVB e ETA e, acréscimo para os solos arenosos SP e VS, com o aumento da energia de compactação. Destaca-se que, para o solo SP, o aumento do módulo resiliente foi mais acentuado, com o aumento da energia de compactação. O comportamento das misturas dos solos arenosos SP e VS, em função da tensão confinante e do primeiro invariante de tensões, foi semelhante. Vale ressaltar, que estes solos apresentaram módulos resilientes maiores que os solos argilosos, principalmente para a energia modificada.

#### **4.7. Considerações Finais**

Cabe salientar que, apesar da granulometria dos solos ETA e PVB serem próximas, aparentemente o solo PVB responde melhor ao aditivo como se fosse um material que se torna mais granular com a adição do RBI Grade 81. Isto faz sentido, pois neste caso ocorrem trocas catiônicas entre o solo e o aditivo que levam à formação de partículas maiores (floculação), reduzindo, assim, o teor ótimo de umidade em comparação com o solo natural.

Advoga-se que as reações de curto prazo das misturas solo-RBI Grade 81 assemelham-se àquelas das misturas solo-cimento, mas incluem, também, a hidratação quase instantânea de componentes que cimentam as partículas do solo, independentemente de seu tipo, o que produz um aumento imediato na capacidade de carga do solo. Inclusive, é com base neste comportamento esperado para as misturas, que o fabricante informa que a obra pode ser aberta ao tráfego quase imediato após a execução. Porém, não é isto o que se observa nos casos dos solos SP, VS e PVB, no que se refere à expansão. Se o ganho de resistência é quase imediato e alto, ele deveria ser o suficiente para evitar as expansões observadas nestes solos para 1 dia de cura. Provavelmente, a razão está em outro aspecto da questão: esses solos, em especial os solos PVB e SP têm teor de silte de 21 e 26%, com frações de areia de 25 e 57%, respectivamente.

---

Por uma questão de combinação granulométrica, esses solos, após serem compactados a altos esforços de compactação (como é o presente caso), absorvem energia (pelo comportamento elástico induzido pelas partículas siltosas mais areia fina), mas não a utiliza em processos dissipativos de energia, que é o âmago dos processos de compactação; os corpos-de-prova compactados apresentaram uma tendência a devolverem parte da energia aplicada no processo de compactação ao meio, gerando aumentos de volumes. Essa tendência é, inicialmente, em parte evitada pelo atrito lateral desenvolvido entre a superfície do corpo-de-prova e a parede lateral do cilindro. Após vencida esta inércia, tem-se a ocorrência do aumento de volume. Isto poderia explicar o que ocorre com a expansão desses solos até o período de cura de 1 dia. Contrariamente a esta explicação, que pode ser válido para os solos SP e VS e menos para o solo PVB, não se explica o comportamento observado para a expansão do solo ETA, que tem 23% de silte e areia (sendo a areia predominantemente areia fina).

Outra explicação para o que ocorre para os primeiros solos analisados é através do trabalho de CARDOSO (1994) que deparou-se com a seguinte situação: utilizando pequenos teores de cal (até 2%) esse autor detectou que, em 13 de 19 solos estabilizados com cal, para teores de 0,5 e 1%, ocorriam aumentos na expansibilidade LNEC (CASTRO, 1964). Uma explicação para este fato (apresentada pelo autor) refere-se à constatação de que a expansão nos solos está associada à espessura da dupla camada difusa das suas partículas finas. Assim, a superfície da argila carregada negativamente adsorve cátions que podem neutralizar suas cargas negativas. Mas, no complexo de troca catiônica dos solos tropicais encontram-se principalmente,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ . Com a adição de cal, a concentração de íons  $\text{Ca}^{2+}$  na solução do solo aumenta e passa a agir no sentido de aumentar a pressão dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  sobre os demais cátions do complexo sortivo, fazendo com que eles sejam deslocados, liberando as cargas que eles estavam neutralizando. Agora, os íons  $\text{Ca}^{2+}$  passam a ocupar os sítios negativos da superfície dos colóides. Se o  $\text{Ca}^{2+}$  substitui um cátion de maior força de ligação, como o  $\text{Al}^{3+}$ , o que eleva carga líquida negativa do sistema. Como resultado vai ocorrer a dispersão do solo devido à expansão da dupla camada difusa. Por outro

---

lado, se a cal é adicionada em concentrações maiores, os íons  $\text{Ca}^{2+}$ , em quantidade suficiente, podem neutralizar todas as cargas negativas das superfícies das partículas, controlando (reduzindo) o fenômeno da expansão. Nesse caso, o pH do solo aumenta, o  $\text{Al}^{3+}$  precipita-se como  $\text{Al}(\text{OH})_3$  e a concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  é suficiente para comprimir a dupla camada difusa, o que leva a fenômenos de floculação e conseqüentemente redução da expansão. Assim, verificou-se que o RBI Grade 81 não é adequado para aplicação em todos os tipos de solos, pois no caso do solo PVB, em especial, observou-se decréscimo no CBR para o teor de 6%, para todos os períodos de cura, compactados na energia do ensaio Proctor Intermediário e para o período de cura de 1 dia, compactados na energia do ensaio Proctor Modificado. Em relação a expansão, medida no ensaio CBR para o solo PVB, verificou-se acréscimo para o teor de 6%, para todos os períodos de cura.

Comparando o ganho de CBR e resistência à compressão não-confinada em relação aos valores do solo natural, observou-se que para os solos argilosos PVB e ETA, o ganho de resistência à compressão foi maior que o alcançado com o CBR para a energia intermediária e menor para energia modificada. Para os solos arenosos SP e VS, o ganho de CBR foi bem maior que o alcançado pela resistência à compressão não-confinada nas duas energias de compactação.

---

## 5. CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório e, também, com base na análise desses resultados realizada no capítulo anterior, apresentam-se as seguintes conclusões.

a) O emprego do produto RBI Grade 81 na estabilização de solos para fins rodoviários, em especial para os solos finos, requer dosagens específicas para cada tipo de solo considerado.

b) De um modo geral, o aumento da energia de compactação conduziu a maiores valores de peso específico seco máximo e a menores valores de teor de ótimo de umidade. O acréscimo do teor de RBI Grade 81 produziu menores valores de peso específico seco máximo e maiores valores de teor ótimo de umidade.

c) Para as misturas dos quatro solos estudados com o teor de 2% de RBI Grade 81, não apresentaram variações significativas de resistências mecânicas com o período de cura, o que leva a conclusão de que ocorreram, basicamente, reações de hidratação.

d) Apesar de algumas misturas apresentarem resultados diferentes do esperado, a maioria das misturas solo-RBI Grade 81 tiveram ganhos significativos de resistência mecânica, com o aumento do teor de RBI Grade 81, da energia de compactação e do período de cura, atingindo valores de CBR com expansões menores que 0,50 % e resistência à

---

compressão não-confinada, respectivamente de: 119% e 1928 kPa para as misturas com o solo PVB, 108% e 2436 kPa para as misturas com o solo ETA, 152% e 1758 kPa para as misturas com o solo SP e 178% e 2416 kPa para as misturas com o solo VS. Observou-se, também, que nos 7 primeiros dias de cura, as resistências mecânicas obtidas foram próximas de 90% da resistência final.

e) O comportamento resiliente dos solos com 6% de RBI Grade 81, com 7 dias de cura, foi influenciado pela variação da energia de compactação, principalmente para os solos de características arenosas.

---

## 6. RECOMENDAÇÕES

As recomendações para trabalhos futuros são, como se segue:

- avaliar a possibilidade de emprego de solos estabilizados com RBI Grade 81, como camadas de base de estradas não pavimentadas, principalmente para estradas vicinais. Neste caso, sugerem-se estudos de desgaste e de resistência à tração das misturas;
- construção de trechos experimentais e seu monitoramento ao longo do tempo, com as misturas de solo com RBI Grade 81 e outros aditivos químicos convencionais como cal e cimento, para fins de comparação do desempenho das misturas em condições de serviço;
- analisar a questão ambiental, para que o produto possa ser empregado em rodovias, sem causar danos ao meio ambiente e, também, para que o seu uso possa ser estendido a outras obras (aterros sanitários, quadras de esportes, calçadas, áreas para secagem de café, entre outros);
- analisar as misturas do solo PVB com RBI Grade 81, através da constituição química e mineralógica, para observar a influência desses

---

elementos, na resistência mecânica das misturas (pois ocorreu queda de CBR e elevação da expansão com o aumento do teor de RBI);

- analisar através da microscopia eletrônica de varredura, a variação da forma das partículas do solo natural e das misturas, quando se trabalha com a energia de compactação do ensaio Proctor Intermediário e do Proctor Modificado, principalmente para o solo VS.

---

## 7. 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: UFV, 1995. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- ALVES, J. D. *Materiais de Construção*. São Paulo, Nobel, 1977. V.1., 327p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. *Dosagem das Misturas de Solo-Cimento; Normas de Dosagem*. 3. ed. rev. atual. São Paulo, 1986b. 51p. (Estudo técnico, 35).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. *O Solo-Cimento e suas Aplicações Rurais*. São Paulo, 1989b. 16p. (Boletim técnico 117).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 12253/92 Solo-Cimento; dosagem para emprego como camada de pavimento*. Rio de Janeiro: 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 6459/84 Solo; determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro: 1984b. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 6508/84 Solo; determinação da massa específica aparente*. Rio de Janeiro: 1984d. 8p.

- 
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 7180/94 Solo*; determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro: 1994. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 7181/84 Solo*; análise granulométrica. Rio de Janeiro: 1984a. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 7182/86 Solo*; ensaio de compactação. Rio de Janeiro: 1986. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 9895/87 Solo*; ensaio de índice suporte Califórnia. Rio de Janeiro: 1987. 14p.
- AZEVEDO, M. A. *Contribuição à Caracterização Geotécnica de Solos de Viçosa-MG*. Viçosa:UFV, 1999. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- BANCO NACIONAL DE HABITAÇÃO – BNH. *Tecnologias Simplificadas para a Construção Habitacional*; resumo das experiências realizadas. Rio de Janeiro, 1983. 27p.
- BATISTA, I. M. *Comportamento Mecânico de Dois Solos Típicos da Região de Viçosa-MG, para Fins de Utilização em Camadas de Pavimentos Flexíveis*. Viçosa:UFV, 2001. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- BUENO, B. S., CARVALHO, C.A.B., FILHO, J. D. e LIMA, D. C. (1991). *Estudo de Laboratório de Solos Estabilizados com Betume*, In: 25ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPV, Anais, São Paulo, 21 a 25 de outubro.
- CARDOSO, D. L. *Contribuição à Identificação e Tratamento dos Solos Expansivos da Região de Viçosa-MG*. Viçosa:UFV, 1994. 194p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, 1994.
- CARVALHO, A. B., FILHO, J. D., SANTOS, N. R. E. *Uma Análise de Desgaste e de Resistência à Compressão Simples – Mistura Solo-Betume*. Anais da 26ª RAPv, Aracaju – Sergipe, 1992. 691p.
- CASAGRANDE, A. Classification and identification of soil. *Transactions*, v.113, p.901-91, 1948. Paper 2351.
- CASTRO, E. *Soil Swelling Test*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1964. 11p. (Technical paper, 235).

- 
- DAS, B. M. *Advance Soil Mechanics*. Washington, Hemisfere Publishing Corporation, 1983. 511p.
- DEHLEN, G.L.; MONISMITH, C.L. *Effect of nonlinear material response on the behavior of pavement under traffic*. Highway Reserch Record, Washington, DC, n. 310, 1970. p. 1-16.
- DER-MG. *Especificações Técnicas – Caderno Número 1: Projeto*. DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS - Belo Horizonte (s. Ed.), 1976.
- DIAMOND, S. & KINTER, B. E. *Mechanisms of Soil-lime Stabilization*. Washington D. C., Highway Research Board, 1965. p81 – 103 (Bulletin H.R.R, 92).
- DNER. *Manual de Pavimentação – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM*. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Divisão de Capacitação Tecnológica, 2ª Ed., IPR – Publicação 697. Rio de Janeiro – RJ, 1996. 320p.
- DNER. *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM*, Instituto de pesquisas rodoviárias, 1981. 34p.
- DNER-ME 131/94. *Solos – Determinação do Módulo de Resiliência – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM* , 1984. 8p.
- DUNCAN, J.M.; MONISMITH, C.L.; WILSON, E.L. (1968). *Finite element analyses of pavements*. Highway Research Record, Washington, DC, n. 228, p. 18-33.
- EPAMIG. *Produção Energética a Partir da Cana-de-Açúcar e Derivados – EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS*, s. I., 1985. 163p. (Boletim).
- FERNANDES, D. C. M. *Viabilidade do Uso de Alcatrão de Madeira de Eucalipto na Estabilização de Solos Residuais para Fins Rodoviários*. Viçosa: UFV, 2000. 124p. Dissertação (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 2000.
- FERRAZ, R. L. *Contribuição ao Estudo da Estabilização de Solos para Fins Rodoviários e Habitacionais*. Viçosa: UFV, 1994. 180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, 1994.

- 
- GEIPOT (2002) - EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTE -. *Sistema de Informações Técnicas em Transportes*, <<http://www.geipot.org.br>>, 2002.
- GUIMARÃES, J. E. Notas Introdutórias. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DE CAL, 6, São Paulo., 1980. *Anais*. São Paulo, Associação Brasileira de Produtores de cal, 1980. P. 4 – 12.
- HERRIN, M. & MTCHELL, H. *Soil Lime Mixtures*. Washington D. C., Highway Research Board, 1961. P99-138 (Bulletin H.R.R, 304).
- INGLES, O. G. & METCALF, J. B. *Soil Stabilization Principles and Practice*. New York, E.U.A, Swikey e Sans, 1973. 374p.
- JORNAL ESTADO DE MINAS. *Buracos nas Rodovias Afetam 10% da Safra*, 21/01/2002.
- JORNAL ESTADO DE MINAS. *Perigo nas Estradas*, 22/12/2002.
- LIMA, D. C. *Algumas Considerações Relativas a Aspectos da Estabilização dos Solos, em Particular à Estabilização Solo-Cal*. São Carlos: USP, 1981, 171p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, 1981.
- LIMA, D. C., BUENO, B. S., FONTES, M. P. F. Utilização de levantamentos de solos em geotecnia. In: ALVAREZ V., V.H., FONTES, L.E.F., FONTES, M.P.F., Eds. *O Solos nos Grandes Domínios Morfoclimáticos do Brasil e o Desenvolvimento Sustentado*. Viçosa: SBCS, 1996. p.703-720.
- LIMA, D. C., BUENO; B. S., SILVA, C. H. C. *Estabilização de Solo II – Técnicas e Aplicação a Solos da Microregião de Viçosa-MG*. Viçosa-MG: UFV, 1993, 32p. (Publicação, 333)
- LIMA, D. C., RÖHM, S. A., BARBOSA, P. S. A. *Estabilização de Solo III – Mistura Solo-Cal para Fins Rodoviários*. Viçosa-MG: UFV, 1993, 46p. (Publicação, 334)
- MACHADO, C. C.; MALINOVSKI, J. R. *Rede Viária Florestal*. Curitiba: FUPEF, Paraná, Brasil, 157p., 1986.
- MENDONÇA, A. A. *Caracterização de Misturas Solo-Cal*. Viçosa: UFV, 1998. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, 1998.

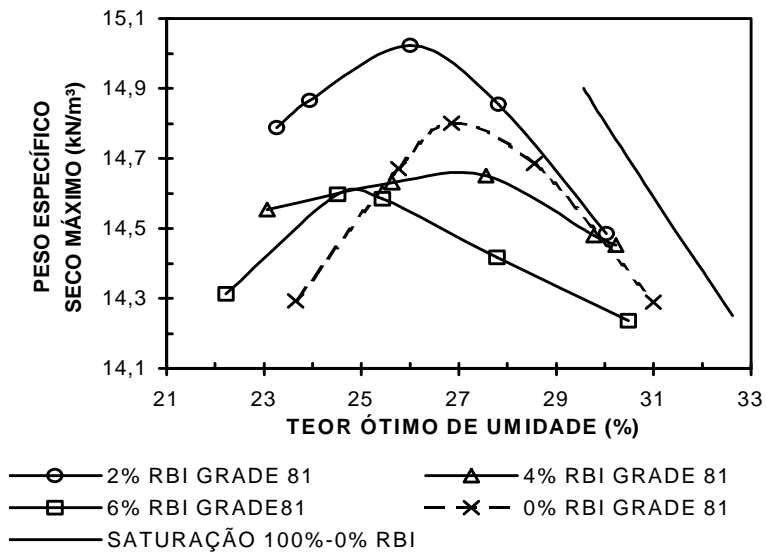
- 
- MOTTA, Laura M.G. et al. (1990). *Resiliência de Solos Pedregulhosos Lateríticos*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 24, Belém/PA, ABPV, v.1, p. 233-255.
- NÓBREGA, M. T. *As Reações dos Argilos-Minerais com a Cal*. São Paulo, Associação Brasileira de Produtores de cal, 1985. P. 57 – 78 (Boletim, 14).
- NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. São Paulo: Vilibor, 1995. 213p.
- NOGAMI, J.S., VILLIBOR, D.F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1981, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1981. p.39.41.
- O' FLAHERTY, C. A. *Highway Engineering*. London, Edward Arnold, 1979. V.2, 458p.
- PETRUCCI, E. G. R. *Materiais de Construção*. Porto Alegre – RS, Globo, 1978. 435p.
- ROAD BUILDING INTERNATIONAL - RBI. *Contrast and Comparisson Between the Diagnostic Properties of Stabilisation of Soils with Lime and RBI Grade 81 Soil Stabiliser*. Cape Town, 2001. 5p.
- ROAD BUILDING INTERNATIONAL - RBI. Disponível em: <<http://www.rbi.global.com>> Acesso em: 08 de janeiro de 2003.
- ROAD BUILDING INTERNATIONAL - RBI. *Enviromental Overview of RBI-81*. Cape Town, 2000. 9p.
- ROAD BUILDING INTERNATIONAL - RBI. *Guide to the Construction of Pavement Layers and Stabilized Materials Using RBI Grade 81*. Cape Town, 2001. 11p.
- ROAD BUILDING INTERNATIONAL - RBI. *Materials Safety Data Sheet*. Cape Town, 2000. 5p.
- ROAD BUILDING INTERNATIONAL - RBI. *RBI Grade 81 Application at Vallourec & Mannesmann, Belo Horizonte, Brazil*. Amsterdam The Netherlands, 2002. 8p.
- SANT'ANNA, G. L. *Módulo de Resiliência de Misturas Solo-Alcatrão, Solo-Cal-Alcatrão e Solo-Cimento-Alcatrão para Pavimentação de Estradas Florestais*. Viçosa: UFV, 2002. 124p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 2002.

- 
- SENÇO, W. *Manual de Técnicas de Pavimentação*. São Paulo: Pini, 1997. 746p.
- SILVA, D. P. *Estudo do Comportamento Reológico de Solos Estabilizados com Cimento, Processos Gerais de Estabilização*. Lisboa, Ministério das Obras Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1968. 343p.
- THOMPSON, M. R. *Lime Reativity of Illinois Soils*. Washington, D. C, ASCE, 1966. p.67-92.
- TRINDADE, T. P., CARVALHO, C.A.B., SILVA, C.H.C., LIMA, D.C., and BARBOSA, P.S.A. *Resilient Modulus of Structured/Cemented Soils Stabilized with Cement*. Symposium on Resilient Modulus Testing for Pavement Components, ASTM STP 1437, G.N. Durham, W.A. Marr and W. DeGroff, Eds., American Society for testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2003.
- VAILLANT, J. M. M. *Efeitos Estabilizantes do DS-328 sobre Três Solos de Viçosa-MG, para Fins Rodoviários*. Viçosa: UFV, 1995. 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- VIEIRA, S. V. *Estabilização de Solos com Licor Negro Kraft Concentrado para Fins Rodoviários*. Viçosa: UFV, 1994. 126p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 1994.

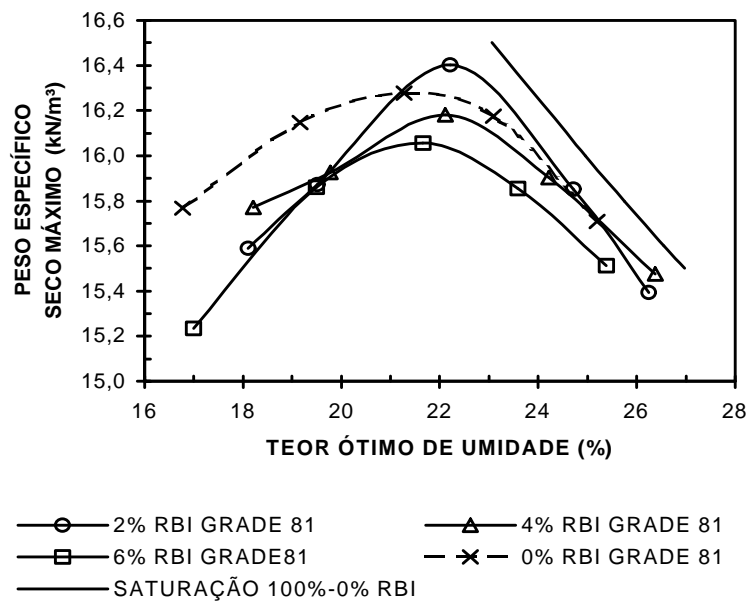
---

## **APÊNDICE A**

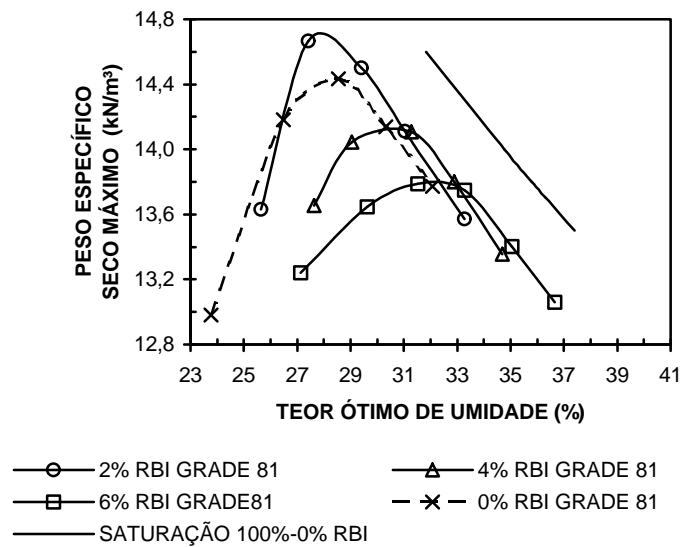
Neste Apêndice, encontram-se as curvas obtidas dos ensaios de compactação das misturas dos solos estabilizados com RBI Grade 81, compactadas nas energias do ensaio Proctor Intermediário e Modificado. Como ilustram as Figuras A1 a A8.



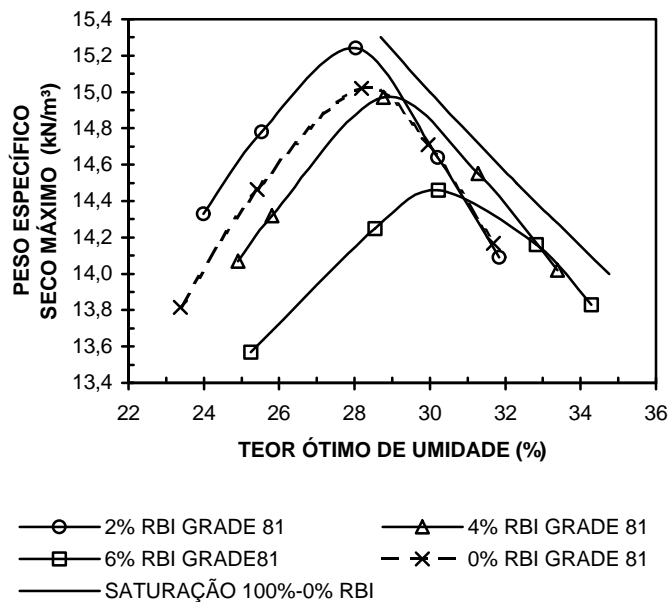
**Figura A1** – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo PVB com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Intermediário



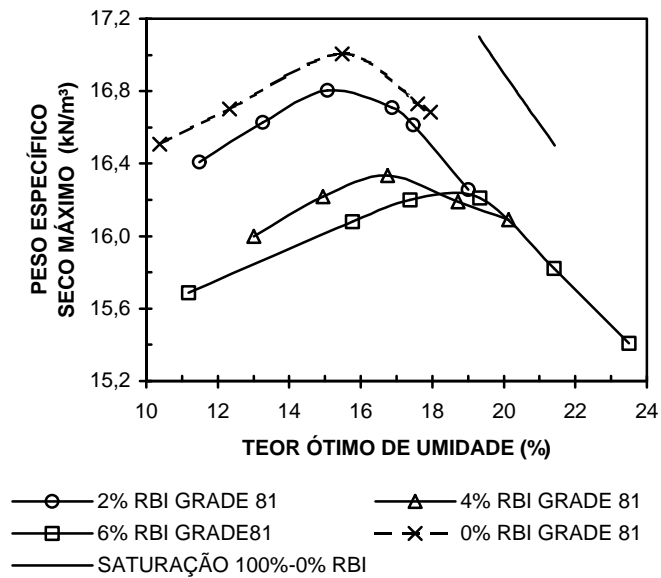
**Figura A2** – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo PVB com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Modificado



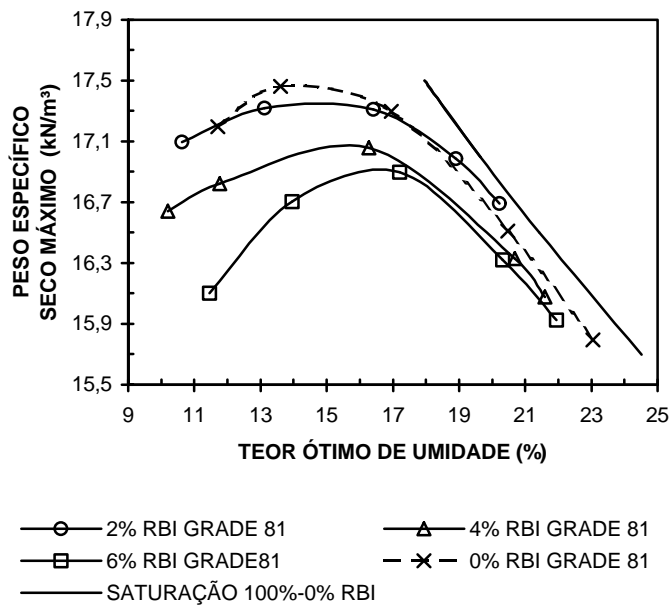
**Figura A3** – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo ETA com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Intermediário



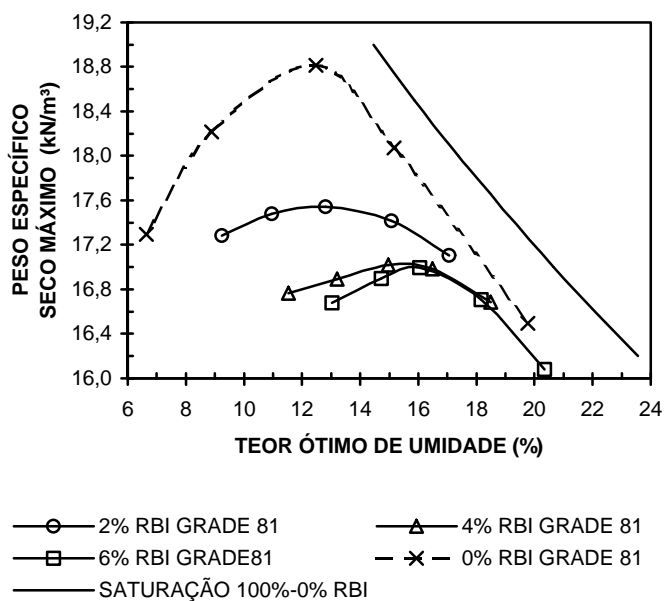
**Figura A4** – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo ETA com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Modificado



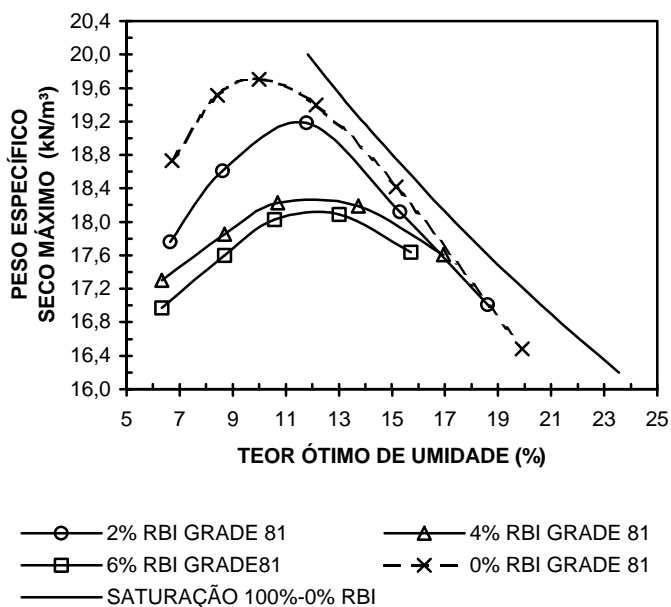
**Figura A5** – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo SP com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Intermediário



**Figura A6** – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo SP com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Modificado



**Figura A7** – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo VS com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Intermediário



**Figura A8** – Curvas de compactação e saturação das misturas do solo VS com RBI Grade 81 - energia do ensaio Proctor Modificado