

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM  
INCORPORAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS**

**Luciano Pivoto Specht**

Porto Alegre  
Abril 2004

**LUCIANO PIVOTO SPECHT**

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM  
INCORPORAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre

Abril 2004

SPECHT, Luciano Pivoto

Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de  
borracha reciclada de pneus / Luciano Pivoto Specht –  
Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2004.

n p. 279

Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul; Doutor em Engenharia. Orientador:  
Jorge Augusto Pereira Ceratti.

1. Pavimentos. 2. Misturas Asfálticas. 3. Borracha de  
Pneus. 4. Reciclagem. 5. Asfalto-Borracha I. Título

CCAA2

**LUCIANO PIVOTO SPECHT**

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM  
INCORPORAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 29 de abril de 2004

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti  
Dr. pela UFRJ  
orientador

Prof. Américo Campos Filho  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Leni Figueredo Matias Leite**  
(CENPES)  
Dra. pela UFRJ

**Profa. Liédi Légi Bariani Bernucci**  
(EPUSP)  
Dra. pela UPUSP

**Prof. José Leomar Fernandes Junior**  
(EESC -USP)  
Dr. pela EESC - USP

**Prof. Washington Peres Núñez**  
(UFRGS)  
Dr. pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais Cláudio  
e Clemisse e à minha noiva Márcia.

## AGRADECIMENTOS

Desejo extremar os mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma auxiliaram no desenvolvimento desta tese. Seja através de orientação técnica e científica, seja através de apoio, de incentivo e da amizade. Muitas pessoas, instituições e empresas tiveram importante papel neste trabalho de doutorado.

Mesmo correndo o risco de um indesculpável esquecimento, julgo importante particularizar alguns agradecimentos.

Ao Prof. Jorge Augusto P. Ceratti, orientador deste trabalho, pela confiança, participação e competência na orientação do trabalho.

Aos técnicos do LAPAV, Croaci Souza de Mello, Carlos Ivan H. Ribas, Ivo de Azevedo e Vinicius da Silva Alves. Sem a ajuda de vocês esta pesquisa não teria sido realizada dentro do cronograma.

Aos alunos de graduação, que como bolsistas, não mediram esforços para o sucesso e cumprimento dos cronogramas da pesquisa: Gustavo Rossini, Lélío A. T. Britto, Thiago Vitorello e Eduardo Borba.

As funcionárias do PPGEC e do DECIV, Carmem, Elódia, Liliane, Rita, Raquel e especialmente a Bernardete pelo apoio durante a pesquisa.

A Profa. Carla Ten Caten da Engenharia de Produção da UFRGS pelo auxílio no planejamento do experimento.

A Profa. Madalena Fortes da Engenharia de Materiais e a aluna de doutorado Letícia S. da Silva pelo auxílio prestado durante a caracterização química das borrachas.

A Profa. Leni Leite pela possibilidade de realização de ensaios em ligantes na Pretobras/CENPES no Rio de Janeiro. Agradeço também aos técnicos do CENPES, Áurea, Adriana, Mariana e Luis Rosa pela paciência e auxílio na consecução dos ensaios em ligantes.

A Profa. Liédi Bernucci pela oportunidade de realização de ensaios de ATR no simulador LCPC na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e ao Eng. Edson Moura pela ajuda na condução dos ensaios e pelas trocas de informações via e-mail.

A Salete Zaltron, técnica do Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUI a ao aluno Jackson Beck pela condução dos ensaios de caracterização dos ligantes.

A Ipiranga Asfaltos, notadamente aos Engenheiros Leonardo e Fabiano pelo material cedido à pesquisa e ao Eng. Rafael Reis pela caracterização do ligante no CDT em Paulínea/SP.

A Britta Mineradora, notadamente a Engenheira Adriana, pela doação dos agregados utilizados na pesquisa.

Ao DAER/RS, Eng. Somacal e Eng. Oliveira, pelo incentivo e apoio logístico.

A VIPAL Borrachas S.A. pelo apoio incondicional durante todo desenvolvimento da pesquisa, em especial aos Engenheiros André Hamerski, Ilda Paludo e Ana Paludo.

Aos técnicos da SMOV, sobretudo ao Eng. Arno, pela possibilidade de testar a aplicação da mistura borracha-agregado em pista.

Ao professores do PPGEC, especialmente aos professores e incentivadores Prof. Washington Peres Núñez, Wai Ying Yuk Gehling e Prof. Nilo César Consoli.

Aos membros do exame de qualificação, Profa. Leni Figueredo Matias Leite, Profa. Liédi Légi Bariani Bernucci, Prof. José Leomar Fernandes Junior e Prof. Washington Perez Núñez pelas sugestões na condução da pesquisa.

Aos professores do Curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul pela confiança e apoio.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de formação. Neste país onde poucos têm acesso aos assentos universitários, sinto-me privilegiado e ao mesmo tempo com grande responsabilidade pelo título de doutor.

A CAPES e ao CNPq as bolsas que me possibilitaram à dedicação à pesquisa.

Por fim agradeço a minha família, a meus pais Cláudio e Clemisse pela serenidade que sempre me passaram. A minha noiva e companheira Márcia Bernardi pelo apoio e confiança, está conquista também é sua.

## RESUMO

SPECHT, L.P. Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Este trabalho apresenta uma pesquisa experimental que buscou o entendimento dos fatores influentes no desempenho de misturas asfálticas preparadas com incorporação de borracha reciclada de pneus. Foram estudados tanto os ligantes modificados (asfalto-borracha) e misturas preparadas com tais ligantes, como as misturas tipo agregado-borracha. As misturas de ligantes modificados com borracha (processo úmido) foram preparadas em laboratório e caracterizadas segundo ensaios tradicionais e da Metodologia SUPERPAVE™. Para as misturas agregado-borracha (processo seco) foram preparadas e ensaiadas, misturas tipo concreto asfáltico variando-se os principais fatores intervenientes no desempenho, tais como: granulometria da borracha e do agregado, tempo de digestão da borracha e percentual de borracha. Para caracterização e verificação de desempenho, realizaram-se os ensaios da Metodologia Marshall, ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência à compressão diâmetral, fadiga à tensão controlada, adesividade (Metodologia Lottman Modificada), abrasão (Cântabro) e deformação permanente (creep dinâmico e simulador tipo LCPC). Foi construído, também, um pequeno trecho experimental comparativo, para verificação de aspectos executivos e monitoramento de superfície (com borracha-agregado). Os resultados obtidos demonstraram a superioridade tanto dos ligantes modificados quanto das misturas asfálticas preparadas com tais ligantes. Pode-se afirmar que a adição de 12 a 18% de borracha ao ligante, leva à produção de misturas com maior resistência à fadiga e a deformações permanentes e maior durabilidade. A incorporação de borracha, através do processo seco, melhora as características de resistência à fadiga e ao trincamento térmico, devido à menor sensibilidade a variações de temperatura. O efeito do tempo de digestão mostrou-se altamente relevante no comportamento das misturas. As medidas de macrotextura *in situ* indicaram que o revestimento tipo borracha-agregado possui características funcionais melhores que as do trecho comparativo em concreto asfáltico convencional. Ficou evidente a existência de viabilidade técnica para execução de revestimentos com a utilização de borracha reciclada, tanto com o emprego do processo úmido quanto seco.

Palavras-chave: pavimentos; misturas asfálticas; borracha de pneus; reciclagem; asfalto-borracha



## ABSTRACT

SPECHT, L.P. Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

This work presents an experimental study that searched for a better understanding of hot mix asphalt performance when tire crumb rubber is added. Were studied both modified binder (asphalt rubber) and mixes prepared with this binder, such as the rubber-aggregate mixes. The modified binders (wet process) were prepared on laboratory and characterized according to traditional tests and SUPERPAVE™ Methodology as well. The rubber-aggregate mixes (dry process) were prepared and tested, varying the main factors that interfere on the performance like rubber size, aggregate size distribution, time of digestion and rubber content. To characterize and verify the laboratorial mixes performance, tests were carried out: Marshall Methodology tests, tensile strength, resilient modulus, fatigue (controlled stress mode), stripping (Modified Lottman test), weight loss (Cantabro Methodology) and permanent deformation (dynamic creep and LCPC simulator). It was also built a comparative full scale test section to verify the construction features and the surface texture (rubber-aggregate). The results showed a superior performance of both modified binders and mixes prepared with those binders. The use of 12 to 18% of rubber on binder improve mixes fatigue behavior, permanent deformation and resistance. Rubber use through the dry process improves fatigue behavior and reduces thermal cracking, due to the reduction of temperature susceptibility. The time of digestion showed high influence in the mixes behavior. The macrotexture measurement indicated that the rubber-aggregate surface has better frictional features than comparative conventional mixes. It was evident the technical viability to use recycled rubber as flexible pavement material, so much with the wet or dry process.

Key-words: pavement; asphalt mixes; tire rubber; recycle; asphalt rubber

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	p.14
LISTA DE TABELAS.....	p.18
LISTA DE QUADROS.....	p.21
LISTA DE SIGLAS.....	p.22
1. INTRODUÇÃO.....	p.26
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA .....	p.26
1.1.1 Desempenho de pavimentos .....	p.27
1.1.2 Utilização de borracha em misturas asfálticas.....	p.29
1.2 OBJETIVO GERAL.....	p.31
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	p.31
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	p.32
2. REUTILIZAÇÃO E RECICLAGEM DE PNEUS.....	p.34
2.1 INTRODUÇÃO.....	p.34
2.2 LEGISLAÇÃO .....	p.36
2.3 UTILIZAÇÃO DE PNEUS USADOS .....	p.37
2.3.1 Recauchutagem.....	p.38
2.3.2 Fonte energética.....	p.38
2.3.3 Muros de gravidade e obras de contenção.....	p.39
2.3.4 Estruturas de absorção de energia ou barreiras de inércia.....	p.40
2.3.5 Proteção contra marés e reprodução da fauna marinha .....	p.41
2.3.6 Construção de edificações .....	p.41
2.3.7 Drenagem .....	p.41
2.3.8 Concreto de baixo desempenho.....	p.41
2.3.9 Agregado para placas de concreto .....	p.42
2.3.10 Agregado para argamassa.....	p.42
2.3.11 Pavimentação.....	p.42
2.3.12 Impermeabilização.....	p.42
2.3.13 Cobertura de aterros sanitários .....	p.43
2.3.14 Extração de óleo e voláteis .....	p.43
2.3.15 Absorção de óleos.....	p.44

2.3.16 Barreiras contra ruído .....	p.44
2.3.17 Reforço de material cimentado.....	p.44
2.3.18 Compostagem.....	p.44
2.3.19 Produção de artefatos .....	p.45
2.3.20 Co-processamento em fábricas de cimento .....	p.45
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	p.45
3. UTILIZAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA COMO MATERIAL DE PAVIMENTAÇÃO .....	p.47
3.1 HISTÓRICO.....	p.47
3.2 PROCESSO ÚMIDO .....	p.51
3.2.1 Variáveis que influenciam o comportamento do ligante asfalto-borracha.....	p.54
3.2.2 Comportamento de ligantes modificados com borracha .....	p.57
3.2.3 Utilização do asfalto-borracha em obras de pavimentação .....	p.67
3.2.3.1 Concreto asfáltico.....	p.69
3.2.3.2 Camada porosa de atrito .....	p.79
3.2.3.3 Camada anti-reflexão de trincas .....	p.80
3.2.3.4 Selagem de trincas.....	p.84
3.2.3.5 Selagem de juntas em pavimentos rígidos.....	p.86
3.3 PROCESSO SECO.....	p.87
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	p.93
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	p.95
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	p.95
4.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.....	p.95
4.2.1 Processo úmido.....	p.96
4.2.2 Processo seco .....	p.99
4.2.2.1 Composição e caracterização das misturas de referência.....	p.100
4.2.2.2 Avaliação do teor de borracha .....	p.100
4.2.2.3 Avaliação do tempo de digestão .....	p.102
4.2.2.4 Avaliação da granulometria da borracha .....	p.103
4.2.2.5 Avaliação de misturas através de ensaios especiais .....	p.104
4.2.2.6 Construção de trecho experimental .....	p.105
4.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	p.106

4.3.1 Ligantes .....	p.106
4.3.2 Agregados.....	p.107
4.3.3 Borrachas.....	p.108
4.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	p.110
4.4.1 Preparação do ligante modificado .....	p.110
4.4.2 Preparação das amostras de concreto asfáltico.....	p.111
4.5 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS E DESCRIÇÃO DE EQUIPAMENTOS.....	p.114
4.5.1 Ensaio em amostras de ligantes .....	p.114
4.5.1.1 Penetração.....	p.114
4.5.1.2 Ponto de amolecimento .....	p.114
4.5.1.3 Ponto de fulgor .....	p.115
4.5.1.4 Densidade e massa específica.....	p.115
4.5.1.5 Estabilidade à estocagem.....	p.115
4.5.1.6 Ductilidade .....	p.116
4.5.1.7 Recuperação elástica .....	p.116
4.5.1.8 Envelhecimento de curto prazo .....	p.116
4.5.1.9 Envelhecimento de longo prazo .....	p.117
4.5.1.10 Viscosidade aparente .....	p.117
4.5.1.11 Cisalhamento dinâmico .....	p.118
4.5.1.12 Rigidez e fluência na flexão .....	p.118
4.5.2 Ensaio em amostras de concreto asfáltico.....	p.119
4.5.2.1 Dosagem Marshall.....	p.119
4.5.2.2 Resistência à tração por compressão diametral.....	p.120
4.5.2.3 Módulo de resiliência .....	p.121
4.5.2.4 Fadiga .....	p.123
4.5.2.5 Deformação Permanente.....	p.124
4.5.2.6 Perda de massa por desgaste.....	p.127
4.5.2.7 Efeito deletério da água.....	p.128
4.5.3 Ensaio de campo .....	p.129
4.5.3.1 Microtextura .....	p.129
4.5.3.2 Macrotextura.....	p.130

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM LIGANTES MODIFICADOS COM BORRACHA .....	132
---	-----

5.1 PENETRAÇÃO.....	p.132
5.2 PONTO DE AMOLECIMENTO .....	p.135
5.3 PONTO DE FULGOR .....	p.137
5.4 MASSA ESPECÍFICA.....	p.139
5.5 ESTABILIDADE À ESTOCAGEM.....	p.141
5.6 DUCTILIDADE E RECUPERAÇÃO ELÁSTICA .....	p.144
5.7 ENVELHECIMENTO EM CURTO PRAZO.....	p.146
5.8 VISCOSIDADE APARENTE.....	p.147
5.9 PROPRIEDADES REOLÓGICAS MEDIDAS NO DSR .....	p.154
5.10 PROPRIEDADES REOLÓGICAS MEDIDAS NO BBR.....	p.161
5.11 GRAU DE DESEMPENHO SUPERPAVE™ .....	p.165
5.12 VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO ROTOR.....	p.167
5.13 RESUMO .....	p.168
6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM CONCRETO ASFÁLTICO.....	p.170
6.1 PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS DAS MISTURAS.....	p.170
6.1.1 Misturas asfálticas preparadas com ligante asfalto-borracha .....	p.171
6.1.2 Avaliação do teor de borracha em misturas borracha-agregado.....	p.173
6.1.3 Avaliação do tempo de digestão em misturas borracha-agregado .....	p.176
6.1.4 Avaliação da granulometria da borracha em misturas borracha-agregado.....	p.177
6.2 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA .....	p.180
6.2.1 Misturas asfálticas preparadas com ligante asfalto-borracha .....	p.180
6.2.2 Avaliação do teor de borracha em misturas borracha-agregado.....	p.181
6.2.3 Avaliação do tempo de digestão em misturas borracha-agregado .....	p.183
6.2.4 Avaliação da granulometria da borracha em misturas borracha-agregado.....	p.183
6.3 DEFORMABILIDADE ELÁSTICA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	p.184
6.3.1 Misturas asfálticas preparadas com ligante asfalto-borracha .....	p.185
6.3.2 Avaliação do teor de borracha em misturas borracha-agregado.....	p.187
6.3.3 Avaliação do tempo de digestão em misturas borracha-agregado .....	p.189
6.3.4 Avaliação da granulometria da borracha em misturas borracha-agregado.....	p.191
6.3.5 Avaliação de Mr e Rt em diferentes temperaturas .....	p.191
6.4 RESISTÊNCIA À FADIGA.....	p.196
6.5 RESISTÊNCIA AO ACÚMULO DE DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS .....	p.204

6.6 RESISTÊNCIA AO DESGASTE .....	p.208
6.7 RESISTÊNCIA AO EFEITO DELETÉRIO DA ÁGUA.....	p.210
6.8 RESUMO .....	p.212
7. CONSTRUÇÃO E MONITORAMENTO DO TRECHO BORRACHA-AGREGADO .....	p.213
.....	
7.1 MATERIAIS UTILIZADOS E DOSAGEM DAS MISTURAS .....	p.213
7.2 CONSTRUÇÃO DO TRECHO .....	p.218
7.3 LEVANTAMENTO DE SUPERFÍCIE .....	p.223
7.3.1 Microtextura .....	p.224
7.3.2 Macrotextura.....	p.224
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	p.229
8.1 CONCLUSÕES.....	p.229
8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	p.232
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	p.235
ANEXO I – CARACTERIZAÇÃO DAS BORRACHAS.....	p.249
ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA.....	p.275

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Processos de mistura da borracha e terminologia.....	p.30
Figura 2.1 – Esquema da execução de muro de pneus.....	p.39
Figura 2.2 – Foto do muro de pneus executado na rodovia RS 30.....	p.40
Figura 3.1 – Utilização do AB no estado do Arizona – EUA.....	p.50
Figura 3.2 – Fotos de MEV de cimento asfáltico modificado com polímero.....	p.52
Figura 3.3 – Efeito do teor de borracha na resistência ao acúmulo de deformação permanente.....	p.61
Figura 3.4 – Efeito do teor de borracha no ângulo de fase, $\delta$ .....	p.61
Figura 3.5 – Relação entre viscosidade, % de borracha e temperatura.....	p.62
Figura 3.6 – Efeito do teor de borracha na viscosidade do AB.....	p.63
Figura 3.7 – Variáveis influentes na viscosidade da mistura AB.....	p.64
Figura 3.8 – Relação entre temperatura e percentual de borracha sem reação.....	p.65
Figura 3.9 – Viscosidade em função da taxa de cisalhamento.....	p.66
Figura 3.10 – Curvas de <i>creep</i> dos cimentos asfálticos com e sem borracha.....	p.66
Figura 3.11 – Efeito do tempo de digestão na viscosidade do AB.....	p.67
Figura 3.12 – Influência do agregado e do ligante no desempenho do CBUQ.....	p.71
Figura 3.13 – Comportamento à fadiga de algumas misturas testada no Alaska.....	p.74
Figura 3.14 – Percentagem de área trincada em um período de 15 anos com e sem AB.....	p.76
Figura 3.15 – Custo de manutenção com e sem AB (US\$/pista/km).....	p.77
Figura 3.16 – Modos de fratura e movimentação de trincas.....	p.80
Figura 3.17 – Fases de crescimento da fissura em concreto asfáltico.....	p.81
Figura 3.18 – Concentração de tensões, com e sem membrana de borracha.....	p.83
Figura 3.19 – Comparação do desempenho das duas alternativas.....	p.85
Figura 3.20 – Ilustração de misturas com partículas sólidas de borracha.....	p.87
Figura 3.21 – Granulometrias utilizadas no processo seco e especificação do Instituto do Asfalto.....	p.92
Figura 4.1 – Curvas granulométricas densas e descontínuas.....	p.100
Figura 4.2 – Composição granulométrica 80/20 (% cis)/(>#30).....	p.101
Figura 4.3 – Curvas granulométricas densas.....	p.102
Figura 4.4 – Curvas granulométricas descontínuas.....	p.102

Figura 4.5 – Ajustes granulométricos com diferentes borrachas.....	p.104
Figura 4.6 – Localização do trecho experimental (desenho sem escala).....	p.105
Figura 4.7 – Localização da jazida e do derrame basáltico.....	p.107
Figura 4.8 – Análises granulométricas das borrachas.....	p.109
Figura 4.9 – Misturador asfalto polímero desenvolvido na pesquisa.....	p.111
Figura 4.10 – Equipamentos utilizados nas etapas de preparação das amostras.....	p.113
Figura 4.11 – Estado de tensões gerado no ensaio brasileiro.....	p.121
Figura 4.12 – Corte esquemático do equipamento de módulo de resiliência.....	p.122
Figura 4.13 – Registro gráfico típico de ensaio do módulo de resiliência.....	p.123
Figura 4.14 – Resultado típico de um ensaio de <i>creep</i> dinâmico com confinamento.....	p.125
Figura 4.15 – Corte esquemático do equipamento de <i>creep</i> dinâmico com confinamento.....	p.126
Figura 4.16 – Conjunto de equipamentos de ATR tipo LCPC.....	p.127
Figura 4.17 – Equipamentos portátil de medição de textura tipo pêndulo inglês.....	p.130
Figura 4.18 – Equipamentos utilizados na mensuração da macrotextura.....	p.131
Figura 5.1 – Valores previstos <i>versus</i> observados para variável PN.....	p.134
Figura 5.2 – Superfície de resposta da variável PN.....	p.134
Figura 5.3 – Valores previstos <i>versus</i> observados para variável PA.....	p.136
Figura 5.4 – Superfície de resposta da variável PA.....	p.136
Figura 5.5 – Valores previstos <i>versus</i> observados para variável PF.....	p.138
Figura 5.6 – Superfície de resposta da variável PF.....	p.138
Figura 5.7 – Valores previstos <i>versus</i> observados para variável ME.....	p.140
Figura 5.8 – Superfície de resposta da variável ME.....	p.140
Figura 5.9 – Valores previstos <i>versus</i> observados para variável IC.....	p.143
Figura 5.10 – Superfície de resposta da variável IC.....	p.143
Figura 5.11 – Resultados dos ensaios de ductilidade e recuperação elástica.....	p.145
Figura 5.12 – Perda de massa em RTFOT <i>versus</i> teor de borracha.....	p.147
Figura 5.13 – Valores previstos <i>versus</i> observados para variável $\eta$ .....	p.151
Figura 5.14 – Superfície de resposta $\eta$ x PB x TL.....	p.151
Figura 5.15 – Comparação entre valores medidos e estimados pela equação de Einstein .....	p.152
Figura 5.16 – Comportamento não-newtoniano do ligante AB.....	p.153
Figura 5.17 – Viscosidade de ligantes virgens e envelhecidos em RTFOT e PAV.....	p.154
Figura 5.18 – Comportamento elástico e viscoso dos ligantes (após RTFOT, T= 64°C).....	p.158



Figura 5.19 – Relação entre $G^*$ e $\delta$ com percentual de borracha (após RTFOT).....	p.159
Figura 5.20 – Relação entre $G^*/\text{sen } \delta$ e temperatura (ligante virgem).....	p.160
Figura 5.21 – Relação entre $G^*/\text{sen } \delta$ e temperatura (após RTFOT).....	p.160
Figura 5.22 – Relação entre $G^*/\text{sen } \delta$ e temperatura (após PAV).....	p.161
Figura 5.23 – Relação tempo/deflexão em BBR.....	p.164
Figura 5.24 – Graus de desempenho PG dos ligantes estudados.....	p.166
Figura 5.25 – Viscosidade aparente dos ligantes preparados com 2000, 4000 e 6000rpm.....	p.168
Figura 6.1 – Teor de ligante de projeto (VV = 4,0%) <i>versus</i> teor de borracha adicionada ao ligante.....	p.172
Figura 6.2 – Relação entre o teor de borracha adicionada ao ligante e VAM/RBV.....	p.173
Figura 6.3 – Relação entre teor de ligante e percentual de borracha adicionada em composições granulométricas densas e descontínuas.....	p.175
Figura 6.4 – Relação entre VAM e RBV e percentual de borracha adicionada em composições granulométricas densas e descontínuas.....	p.176
Figura 6.5 – Relação entre teor de ligante e volume de vazios para misturas com 1% de borracha com diferentes tempos de digestão.....	p.177
Figura 6.6 – Relação entre superfície específica da borracha adicionada e teor de ligante para misturas com 1% de borracha com diferentes granulometrias.....	p.179
Figura 6.7 – Relação entre superfície específica da borracha adicionada e VAM/RBV para misturas com 1% de borracha com diferentes granulometrias.....	p.179
Figura 6.8 – Relação entre teor de borracha no ligante e estabilidade/fluência.....	p.181
Figura 6.9 – Relação entre teor de borracha adicionada e estabilidade/fluência para as misturas densas e descontínuas.....	p.182
Figura 6.10 – Relação entre tempo de digestão e estabilidade/fluência.....	p.183
Figura 6.11 – Relação entre superfície específica da borracha adicionada e estabilidade/fluência.....	p.184
Figura 6.12 – Relação entre volume de vazios e módulo de resiliência (T = 25°C) de misturas preparadas com ligante convencional e ligantes modificados com borracha.....	p.186
Figura 6.13 – Relação entre volume de vazios e resistência à tração (T = 25°C) de misturas preparadas com ligante convencional e ligantes modificados com borracha.....	p.187
Figura 6.14 – Relação entre teor de borracha adicionada e $M_r$ e $R_t$ (T = 25°C).....	p.189
Figura 6.15 – Relação entre tempo de digestão <i>versus</i> $M_r$ e $R_t$ (T = 25°C).....	p.190
Figura 6.16 – Relação entre temperatura e módulo de resiliência.....	p.193

Figura 6.17 – Relação entre temperatura e resistência à tração.....	p.194
Figura 6.18 – Relação entre vida de fadiga e tensão de tração.....	p.198
Figura 6.19 – Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões.....	p.199
Figura 6.20 – Relação entre vida de fadiga e deformação específica inicial.....	p.200
Figura 6.21 – Estrutura de pavimento analisada.....	p.202
Figura 6.22 – Vida de fadiga das estruturas analisadas.....	p.203
Figura 6.23 – Valores previstos pelo modelo e medidos de vida de fadiga.....	p.204
Figura 6.24 – Deformação plástica em ensaio de <i>creep</i> dinâmico (T = 45°C).....	p.206
Figura 6.25 – Afundamento em trilha de roda em simulador de tráfego tipo LCPC (T = 60°C).....	p.207
Figura 6.26 – Perda de massa Cantabro.....	p.209
Figura 6.27 – Resultado de ensaios de resistência à tração (Ensaio Lottman Modificado).....	p.211
Figura 6.28 – Resultado do ensaio de resistência ao efeito deletério da água (Ensaio Lottman Modificado).....	p.212
Figura 7.1 – Relação temperatura <i>versus</i> viscosidade rotacional.....	p.214
Figura 7.2 – Granulometria dos agregados minerais.....	p.214
Figura 7.3 – Ajuste granulométrico das misturas de referência e borracha-agregado.....	p.215
Figura 7.4 – Propriedades das misturas de referência e borracha-agregado.....	p.215
Figura 7.5 – Propriedades das misturas de referência e borracha-agregado.....	p.216
Figura 7.6 – Propriedades das misturas de referência e borracha-agregado.....	p.217
Figura 7.7 – Vista panorâmica dos silos carregados com agregados.....	p.219
Figura 7.8 – Sacos com aproximadamente trinta quilogramas de borrachas.....	p.219
Figura 7.9 – Vista panorâmica da usina.....	p.220
Figura 7.10 – Controle de temperatura da massa na caçamba do caminhão.....	p.220
Figura 7.11 – Vista da área pintada pronta para receber novo revestimento.....	p.221
Figura 7.12 – Aplicação da massa em pista.....	p.221
Figura 7.13 – Aplicação da massa em pista.....	p.222
Figura 7.14 – Compactação da massa em pista com rolo pneumático.....	p.222
Figura 7.15 – Camada executada sobre camadas de CBUQ convencional.....	p.223
Figura 7.16 – Textura superficial imediatamente após a construção (outubro/2002).....	p.227
Figura 7.17 – Textura superficial em agosto de 2003.....	p.227
Figura 7.18 – Textura superficial do trecho de referência em agosto de 2003.....	p.228

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Uso de pneus inservíveis no Arizona no ano de 1998.....	p.46
Tabela 2.2 – Uso de pneus inservíveis na Califórnia no ano de 1998.....	p.46
Tabela 2.3 – Uso de pneus inservíveis na Flórida no ano de 1998.....	p.46
Tabela 3.1 – Faixas granulométricas especificadas para borracha em alguns estados americanos.....	p.56
Tabela 3.2 – Especificações para misturas com faixas granulométricas da Flórida.....	p.57
Tabela 3.3 – Características especificadas para ligantes modificados com borracha de pneus.....	p.57
Tabela 3.4 – Resultados da caracterização reológica dos ligantes.....	p.60
Tabela 3.5 – Classificação do ligante modificado com CRM.....	p.64
Tabela 3.6 – Equivalências estruturais utilizadas na Califórnia (mm).....	p.78
Tabela 3.7 – Especificações do ligante modificado com borracha utilizado por Sainton (1990).....	p.79
Tabela 3.8 – Composição granulométrica dos agregados para misturas abertas e densas	p.88
Tabela 3.9 – Especificações recomendadas segundo o volume diário de tráfego.....	p.89
Tabela 3.10 – Especificações para a granulometria da borracha.....	p.89
Tabela 3.11 – Faixa granulométrica da metodologia genérica a seco.....	p.91
Tabela 4.1 – Variáveis independentes selecionadas e níveis a serem estudados.....	p.96
Tabela 4.2 – Análise de correlação para a otimização apresentada.....	p.98
Tabela 4.3 – Valores médios das análises granulométricas dos agregados.....	p.108
Tabela 4.4 – Análises granulométricas das borrachas estudadas.....	p.109
Tabela 4.5 – Propriedades das borrachas estudadas.....	p.110
Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de penetração.....	p.133
Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de ponto de amolecimento.....	p.135
Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de ponto de fulgor.....	p.137
Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios de massa específica.....	p.139
Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios de estabilidade à estocagem.....	p.142
Tabela 5.6 – Resultados dos ensaios de ductilidade e retorno elástico.....	p.144
Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios de perda de massa em RTFOT.....	p.146

Tabela 5.8 – Viscosidades de mistura e compactação para cimentos asfálticos convencionais e modificados com polímeros.....	p.148
Tabela 5.9 – Resultados dos ensaios de viscosidade aparente.....	p.149
Tabela 5.10 – Resultados do ensaio DSR para o ligante CAP 20.....	p.155
Tabela 5.11 – Resultados do ensaio DSR para o ligante AB 14.....	p.156
Tabela 5.12 – Resultados do ensaio DSR para o ligante AB 41.....	p.156
Tabela 5.13 – Resultados do ensaio DSR para o ligante AB 68.....	p.157
Tabela 5.14 – Resultados do ensaio BBR para o ligante CAP 20 (T = -12°C).....	p.162
Tabela 5.15 – Resultados do ensaio BBR para o ligante AB 14 (T = -12°C).....	p.162
Tabela 5.16 – Resultados do ensaio BBR para o ligante AB 14 (T = -18°C).....	p.162
Tabela 5.17 – Resultados do ensaio BBR para o ligante AB 41 (T = -12°C).....	p.163
Tabela 5.18 – Resultados do ensaio BBR para o ligante AB 41 (T = -18°C).....	p.163
Tabela 5.19 – Resultados do ensaio BBR para o ligante AB 68 (T = -18°C).....	p.163
Tabela 6.1 – Propriedades das misturas preparadas com ligante convencional e modificado com borracha.....	p.171
Tabela 6.2 – Propriedades das misturas densas preparadas com diferentes teores de borracha.....	p.174
Tabela 6.3 – Propriedades das misturas descontínuas preparadas com diferentes teores de borracha.....	p.174
Tabela 6.4 – Propriedades das misturas densas preparadas com diferentes tempos de digestão.....	p.177
Tabela 6.5 – Propriedades das misturas densas preparadas com diferentes tipos de borracha.....	p.178
Tabela 6.6 – Valores de estabilidade e fluência da mistura com ligante convencional e com ligantes modificados com borracha.....	p.181
Tabela 6.7 – Valores de estabilidade e fluência das misturas densas com diferentes teores de borracha.....	p.181
Tabela 6.8 – Valores de estabilidade e fluência das misturas descontínuas com diferentes teores de borracha.....	p.182
Tabela 6.9 – Valores de estabilidade e fluência de misturas densas com diferentes tempos de digestão.....	p.183
Tabela 6.10 – Valores de estabilidade e fluência de misturas densas com diferentes tipos de borracha.....	p.184

Tabela 6.11 – Valores de módulo de resiliência e resistência à tração da mistura com ligante convencional e com ligantes modificados com borracha (T = 25°C).....	p.185
Tabela 6.12 – Valores de módulo de resiliência e resistência à tração das misturas densas com diferentes teores de borracha (T = 25°C).....	p.188
Tabela 6.13 – Valores de módulo de resiliência e resistência à tração das misturas descontínuas com diferentes teores de borracha (T = 25°C).....	p.188
Tabela 6.14 – Valores de módulo de resiliência e resistência à tração das misturas densas com diferentes tempos de digestão (T = 25°C).....	p.189
Tabela 6.15 – Valores de módulo de resiliência e resistência à tração de misturas densas com diferentes tipos de borracha (T = 25°C).....	p.191
Tabela 6.16 – Valores de módulo de resiliência e resistência à tração à diferentes temperaturas.....	p.192
Tabela 6.17 – Constantes dos modelos de módulo de resiliência e resistência à tração em função da temperatura.....	p.195
Tabela 6.18 – Constantes dos modelos de fadiga (curva de Wöhler).....	p.197
Tabela 6.19 – Valores de tensão, deformação e vida de fadiga calculados.....	p.203
Tabela 6.20 – Valores de deformação plástica em ensaio de <i>creep</i> dinâmico com amostra confinada (T = 45°C).....	p.206
Tabela 6.21 – Constantes dos modelos de afundamento em trilha de roda.....	p.207
Tabela 6.22 – Resultados dos ensaios de perda de massa Cantabro (T = 25°C).....	p.208
Tabela 6.23 – Resultados dos ensaios de efeito deletério da água (Lottman Modificado)..	p.210
Tabela 7.1 – Propriedades de projeto da mistura de referência e da mistura borracha-agregado .....	p.217
Tabela 7.2 – Medidas de microtextura, resultante dos ensaios com Pêndulo Britânico realizados nos trechos de referência e borracha-agregado.....	p.224
Tabela 7.3 – Alturas de areia, em mm, resultante dos ensaios de mancha de areia realizados nos trechos de referência e borracha-agregado.....	p.225
Tabela 7.4 – Tempos de escoamento da água, em segundos, resultante dos ensaios de drenabilidade realizados nos trechos de referência e borracha-agregado.....	p.226

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Valores encontrados na literatura a respeito das variáveis de mistura para modificação de ligantes com boracha.....	p.55
Quadro 3.2 – Variáveis que afetam as propriedades da mistura .....	p.70
Quadro 3.3 – Variáveis estudadas nas misturas borracha-agregado .....	p.87
Quadro 4.1 – Matriz fatorial estudada.....	p.97
Quadro 4.2 – Matriz experimental e número de amostras para dosagem Marshall, Mr e Rt .....	p.101
Quadro 4.3 – Matriz experimental para avaliação do tempo de digestão.....	p.103
Quadro 4.4 – Matriz experimental para avaliação do tempo de digestão.....	p.103
Quadro 4.5 – Características dos ligantes utilizados .....	p.106
Quadro 4.6 – Características dos agregados utilizados .....	p.108
Quadro 5.1 – Propriedades dos ligantes preparados a 2000, 4000 e 6000rpm.....	p.167
Quadro 5.2 – Quadro-resumo dos resultados encontrados nos ensaios em ligantes.....	p.169
Quadro 6.1 – Quadro-resumo do efeito de borracha no concreto asfáltico.....	p.212

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABGE: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AB: Asfalto-Borracha

AC: *Asphalt Cement*

AI: *Asphalt Institute*

ANIP: Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos

ANOVA: Análise de Variância

AR: *Aged Residue*

ASTM: *American Society of Testing and Materials*

ATR: Afundamento de Trilha de Roda

BBR: *Bending Beam Rheometer*

CAM: Cimento Asfáltico Modificado

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado à Quente

CENPES: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPA: Camada Porosa de Atrito

CRM: *Crumb Rubber Modified*

DAER/RS: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DSR: *Dynamic Shear Rheometer*

EPUSP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

EUA: Estados Unidos da América

EVA: Copolímero Etileno – Acetato de Vinila

$\varepsilon_p$  : erro padrão de estimativa

ESALs: *Equivalent Single Axel Loads*

FHWA: *Federal Highway Administration*

GB: Granulometria da Borracha

IC: Índice de Compatibilidade

I<sub>c</sub>: Índice de instabilidade coloidal

ISTEA: *Intermodal Surface Transportation Efficiency Act*

IRI: *International Roughness Index*

LACER: Laboratório de Materiais Cerâmicos

LAPAV: Laboratório de Pavimentação

LAPOL: Laboratório de Polímeros

LCCA: *Life Cycle Cost Analysis*

LCPC: *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

LTPP: *Long Term Pavement Performance*

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

m: inclinação da curva de rigidez *versus* tempo de carga, medido em BBR

ME: Massa Específica

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

MMA: Ministério do Meio Ambiente

MS: Ministério da Saúde

Mr: Módulo de resiliência

$\eta$ : viscosidade aparente

N: Número de repetições de carga

N<sub>f</sub>: vida de fadiga

PA: Ponto de Amolecimento

PAV: *Pressure Aging Vessel*

PB: Percentual de Borracha

PE: Polietileno



Pen: Penetração (1/100 mm)

PETROBRAS: Petróleo Brasileiro S.A.

PF: Ponto de Fulgor

PG: *Performance Grade*

PN: Penetração

R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinação

R<sup>2</sup><sub>ajust.</sub>: Coeficiente de determinação ajustado

rpm: rotações por minuto

RRL: *Road Research Laboratory*

RRt: Resistência Retida à tração

Rt: Resistência à tração por compressão diâmetral

RTFOT: *Rolling Thin Film Oven Test*

RUMAC: *Rubber Modified Asphalt Concrete*

s: segundo

S: rigidez em creep, medida em BBR

$\sigma_3$ : tensão confinante

SAM: *Stress Absorbing Membrane*

SAMI: *Stress Absorbing Membrane Interlayer*

SE: Superfície Específica

SBS: Copolímero Estireno – Butadieno – Estireno

SBR: Borracha – Butadieno – Estireno

SHRP: *Superior Highway Research Program*

SMA: *Stone Matrix Asphalt*

SMOV: Secretaria Municipal de Obras Viárias

SUPERPAVE™: *Superior Performance Asphalt Pavements*

t: tempo

T: Temperatura

TF: Trincamento por Fadiga

TGA: Análise Termogravimétrica

TM: Tempo de Mistura

TP: Temperatura de Mistura

TRB: *Transportation Research Board*

$\mu$  : Coeficiente de Poisson

UNIJUÍ: Universidade do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

USDOT: *United States Department of Transportation*

USP: Universidade de São Paulo

VAM: Vazios de Agregado Mineral

VV : Volume de Vazios

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Podemos definir pavimento como uma estrutura formada por múltiplas camadas capazes de suportar a ação danosa do tráfego e do meio ambiente. O desempenho de um pavimento é condicionado por um complexo conjunto de fatores, dentre eles as propriedades físicas e mecânicas das camadas que o constitui.

As camadas de revestimento incluem componentes de alto custo e merecem atenção especial. Dentre os fatores que influenciam o desempenho de uma camada asfáltica pode-se citar: características dos materiais, dosagem, condições de compactação, processo construtivo e plano de manutenção e restauração.

Com o aumento do custo dos materiais de construção, notavelmente os derivados de petróleo, e redução da disponibilidade de materiais naturais, aliado às novas exigências/limitações impostas na construção e manutenção de pavimentos, é imperativo que os pesquisadores busquem materiais que possam apresentar bom desempenho com custo relativamente baixo.

Numerosas pesquisas têm verificado os benefícios da adição de materiais poliméricos aos ligantes asfálticos. As propriedades esperadas com adição de polímeros são a redução da suscetibilidade térmica e aumento da ductilidade, proporcionando estabilidade em altas temperaturas e reduzindo o risco de fratura em baixas temperaturas. Os polímeros, também podem contribuir para uma maior resistência ao intemperismo e uma melhor adesão ligante/agregado. Vários trabalhos têm sido publicados, nos últimos anos, na literatura internacional, dentre eles Bonemazzi *et al.* (1996), Jacobs *et al.* (1996) e Shin *et al.* (1996). No Brasil destacam-se as pesquisas de Ceratti *et al.* (1996), DNER (1998a), Gonçalves *et al.* (2000), Leite (1999), Silva (2000) e Silva *et al.* (2002).

De forma semelhante, tem-se estudado, também, a incorporação de fragmentos de borracha proveniente da reciclagem de pneus em ligantes asfálticos ou diretamente no CBUQ (Bahia e

Davies, 1995; Fager, 1996; Takallou *et al.*, 1997; Sousa *et al.*, 1999; Way, 2000; Oda, 2000; Leite *et al.*, 2000; Bertolo, 2002).

A quantidade de resíduos sólidos provenientes da indústria de borracha e do descarte de pneumáticos têm incentivado vários estudos acerca da reutilização e reciclagem deste material, motivados, principalmente, pelo grande volume gerado e seu longo período de degradação (400 a 800 anos). Várias tentativas de reciclagem têm sido testadas: confecção de tapetes e artefatos de borracha, estabilização de encostas, controle de erosão com mantas de pneus, utilização como combustível etc. Entretanto, com o grande volume de material produzido, principalmente em países onde o transporte rodoviário é predominante, os pesquisadores têm vislumbrado como alternativa atrativa à utilização de pneu moído incorporado em pavimentos betuminosos.

Apesar da utilização da borracha reciclada de pneumáticos inservíveis em pavimentos ser uma possível solução para atenuar o problema e da deposição desse resíduo, cabe salientar que o principal objetivo da inclusão de pó de pneus em cimento asfáltico ou misturas modificadas é a melhoria das propriedades dos materiais de pavimentação.

Para que sejam desenvolvidos novos materiais, em qualquer área do conhecimento, é importante que se conheçam as propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais de constituição, bem como suas possíveis combinações. Neste contexto, o presente trabalho pretende contribuir para uma melhor compreensão do comportamento mecânico de ligantes e misturas asfálticas, com a adição de borracha reciclada de pneu.

### 1.1.1 Desempenho de pavimentos

A degradação de pavimentos está associada à várias patologias, dentre elas: deformações permanentes excessivas, fissuras de fadiga e de retração térmica e desagregação. As duas primeiras estão mais relacionadas com o tráfego atuante e a estrutura do pavimento, enquanto as duas últimas com as características dos materiais utilizados e as condições climáticas atuantes.

As misturas asfálticas são freqüentemente utilizadas nos pavimentos como camadas de revestimento. Os mais severos defeitos que ocorrem em estruturas flexíveis, se refletem no revestimento e permitem identificar dois modos distintos de sollicitação mecânica: flexão

repetida, responsável pela fadiga do material (associada ao trincamento do revestimento ou de camadas cimentadas), e a compressão simples, que conduz ao acúmulo de deformações permanentes. No Brasil, é o trincamento a principal causa de ruptura dos pavimentos rodoviários (Rodrigues, 1991). No caso de rodovias urbanas o afundamento em trilhas de roda é um fenômeno bastante presente.

O trincamento é o início de uma fase de deterioração estrutural que modifica o estado de tensões e de deformações do sistema estratificado e, assim, o seu desempenho. Portanto, é fundamental conhecer as características de ruptura dos materiais envolvidos na construção dos pavimentos, tendo em vista que o comportamento dos revestimentos sob solicitações à flexão e à compressão é caracterizado por leis fenomenológicas específicas: lei de fadiga e lei de deformação permanente. Essas constituem leis de comportamento mecânico e devem ser abordadas em um projeto estrutural de pavimentos (Pinto, 1991).

Os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis podem ser classificados em duas categorias. Na primeira, estão os métodos semi-empíricos e estatísticos, baseados em informações obtidas a partir da observação do comportamento de pavimento. Na segunda categoria, estão os métodos que consideram o comportamento de um pavimento de acordo com a teoria das camadas elásticas.

A análise de tensões e deformações em estruturas de pavimento como sistema de múltiplas camadas e a aplicação da teoria da elasticidade e do método dos elementos finitos deram ensejo à consideração racional das deformações resilientes no dimensionamento de pavimentos. Esta é a tendência observada a partir dos anos 60. Assim, cresceu em importância a obtenção dos parâmetros elásticos ou resilientes dos solos e materiais utilizados em pavimentos, bem como a caracterização à fadiga dos materiais cimentados (Yoder, 1959; Preussler, 1986; Huang, 1993; Medina, 1997).

Apesar de indispensável, os ensaios de laboratório apresentam algumas limitações. O efeito de escala é uma delas. Para evitar este inconveniente têm-se utilizado seções testes em rodovias e simuladores de tráfego. Devido à possibilidade de se controlar os fatores intervenientes no desempenho de um pavimento, avaliação em escala real de novos materiais e redução do tempo de cada experimento (em relação às seções teste), os simuladores de tráfego vêm se tornando uma ferramenta bastante útil no entendimento e modelagem do desempenho de pavimentos em todo o mundo. Metcalf (1996) apresenta uma revisão da

evolução dos ensaios acelerados em verdadeira grandeza. Em nosso país destacam-se as pesquisas de Núñez (1997) e Gonçalves (2003) onde foi utilizado um simulador linear de tráfego, e as pesquisas do Instituto de Pesquisas Rodoviárias no Rio de Janeiro com um simulador circular (Silva, 2001).

Nos Estados Unidos a partir do ano de 1987, iniciou-se, como parte da pesquisa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) o programa LTPP (*Long Term Pavement Performance*) o qual está monitorando, pelo período 20 anos, o desempenho de mais de 2400 seções de pavimentos rígidos e flexíveis *in situ*, nos EUA e no Canadá. Gerenciado pelo FHWA (*Federal Highway Administration*) o LTPP possibilitará aos estados e províncias tomar decisões sobre a vida de serviço, o desempenho e a relação custo/benefício das soluções de projeto e dos programas de manutenção a serem adotados. Atualmente o DNIT (Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre) também participa do programa LTPP com o monitoramento de algumas rodovias brasileiras.

Atualmente, em projetos de grande importância, é comum que seja feita uma análise do custo/benefício, levando em consideração o custo total de transporte para um determinado empreendimento em um dado tempo futuro. Mesmo antes do projeto ser executado são avaliadas as alternativas de manutenção e restauração, através de modelos de previsão de desempenho tanto das condições estruturais quanto funcionais do pavimento (Ullidtz, 1987; DNER, 1998b; Hicks e Epps, 1999).

### 1.1.2 Utilização de borracha em misturas asfálticas

As misturas asfálticas com borracha são normalmente produzidas com restos ou resíduos de borracha e de acordo com várias técnicas, incluindo o processo seco e úmido. Estas misturas podem conter aditivos ou modificadores adicionais como diluentes, óleos, cales, etc. (RPA, 2000). Na Figura 1.1 são apresentados esquematicamente os processos de mistura e suas respectivas terminologias.

No processo seco (misturas modificadas com borracha ou borracha-agregado), os grânulos da borracha representam de 0,5 a 3,0 % da massa do agregado, enquanto que no processo úmido (AB – asfalto-borracha), o pó de pneu representa aproximadamente 15 % da massa do ligante

ou menos que 1,5 % da massa da mistura. O processo seco utiliza, em média, 2 a 4 vezes mais CRM (*Crumb Rubber Modified*) que o processo via úmida.

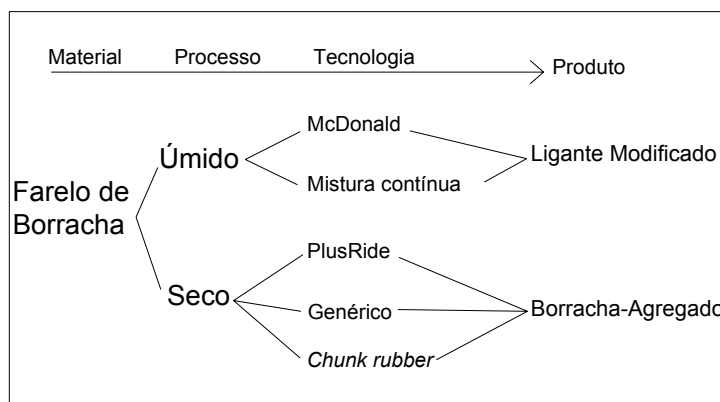


Figura 1.1 – Processos de mistura da borracha e terminologia  
Fonte: Heitzman (1992)

As aplicações típicas do asfalto-borracha são tanto em pavimento novos quanto em restaurações. O ligante é empregado em praticamente todas as utilizações comuns a ligantes asfálticos, entretanto seus benefícios são mais evidentes quando utilizados em SAM – *Stress Absorbing Membrane*, em SAMI – *Stress Absorbing Membrane Interlayer* (estes processos constituem no espalhamento do ligante sobre o pavimento e posterior cobertura por um agregado pré-aquecido) ou em CBUQ, utilizado para recuperação de pavimentos com fissuração excessiva.

O desmonte dos pneus pode ser feito de várias maneiras, incluindo o cisalhamento mecânico da borracha à temperatura ambiente, o congelamento do material e posterior cisalhamento e o processo de extrusão com o uso de aditivos (Bahia e Davies, 1995). Outra maneira de se obter borracha granulada é o reaproveitamento da raspa proveniente da preparação dos pneumáticos para recauchutagem.

Além dos processos úmido e seco, existe um terceiro denominado processo misto no qual a mistura é feita de forma semelhante ao da via seca, porém com o uso do ligante modificado com borracha. A melhor interação entre os ligantes modificados e os grânulos de borracha leva a concretos asfálticos de boa qualidade e um grande consumo de borracha, o que torna o processo misto bastante atrativo do ponto de vista ambiental.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral estudar o potencial da utilização de resíduos de borracha como material de pavimentação, aspectos principalmente referentes à viabilidade técnica da utilização de pó de borracha reciclada, como polímero melhorador das propriedades mecânicas dos ligantes (processo úmido) e em substituição parcial dos agregados (processo seco).

Algumas questões orientaram o desenvolvimento da pesquisa: qual a influência da adição de borracha de pneu nas características dos ligantes asfálticos? Que características da borracha ou da mistura mais afetam estas respostas? Quais as influências do uso deste ligante em concreto asfáltico? Quais fatores são importantes no projeto de misturas asfálticas modificadas com borracha? Quais as potencialidades e limitações dos concretos asfálticos produzidos com borracha seguindo o processo úmido e seco? Que aspectos diferem as misturas modificadas com borracha das misturas convencionais, quando aplicadas em pista?

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa podem ser divididos em dois grandes grupos:

Para a mistura via úmida:

- a) testar os efeitos do percentual da granulometria de borracha, do tempo e da temperatura de mistura e suas interações e efeitos quadráticos nas propriedades do ligante, segundo ensaios tradicionais e da Metodologia SUPERPAVE™;
- b) verificar, para uma mistura de níveis médios (níveis medianos das variáveis independentes), o efeito da rotação do cisalhador durante o processo de mistura do ligante com a borracha;
- c) avaliar as propriedades de separação de fases asfalto/borracha durante a estocagem;
- d) conhecer o efeito da adição de grânulos de borracha (via úmida) sob os vários aspectos que condicionam o bom desempenho de um mistura (propriedades volumétricas, estabilidade e fluência, deformabilidade elástica, resistência à tração, propriedades à fadiga, deformação permanente, adesividade etc.).



Para a mistura via seca:

- a) conhecer o efeito da adição de grânulos de borracha sob os vários aspectos que condicionam o bom desempenho de um mistura em campo (propriedades volumétricas, estabilidade e fluência, deformabilidade elástica, resistência à tração, propriedades à fadiga, deformação permanente, adesividade, desgaste etc.);
- b) estudar a possibilidade de utilização de curvas granulométricas densas (usuais no Brasil) e descontínuas na dosagem de misturas asfálticas modificadas com borracha;
- c) avaliar o efeito do tempo de digestão nas características das misturas;
- d) testar diferentes granulometrias de borracha;
- e) executar e monitorar comparativamente trechos em escala real com e sem utilização de borracha na camada de revestimento.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em 8 capítulos. Inicialmente, neste capítulo 1 é apresentado o tema da pesquisa, seus objetivos, abrangência e importância.

Os capítulos 2 e 3 constituem uma revisão da literatura existente a respeito dos temas deste trabalho. O capítulo 2, trata do problema ambiental causado pela deposição irregular de pneus velhos, bem como apresenta as possibilidades de reutilização e reciclagem dos pneus, com vistas a reduzir o dano ambiental e em busca da auto-sustentabilidade. O capítulo 3 é resultado da busca por trabalhos científicos que pudessem fornecer subsídios para o desenvolvimento de um programa experimental adequado à pesquisa proposta. Neste sentido, são apresentados desde aspectos históricos da utilização de borracha em materiais asfálticos, até o estado da arte do conhecimento tanto do processo seco quanto úmido.

No Capítulo 4 é apresentada a descrição do programa experimental, além da descrição dos materiais utilizados na pesquisa, dos detalhes da preparação das amostras e das técnicas experimentais adotadas para a realização dos ensaios. O planejamento do programa experimental permitiu que os objetivos fossem alcançados com minimização de tempo e custo

e maximização na obtenção de resultados confiáveis. Nesta etapa, determinaram-se, também, quais as variáveis de respostas seriam relevantes e adequadas aos objetivos propostos.

Para melhor entendimento da pesquisa, os resultados serão apresentados e discutidos em três capítulos: 5, 6 e 7. O capítulo 5 apresenta os resultados e análise dos ensaios realizados em laboratório, onde as diversas amostras de ligante preparadas com borracha foram submetidas a diversos ensaios, alguns já tradicionais na caracterização de cimentos asfálticos e outros preconizados pela especificação SUPERPAVE™. Os resultados são apresentados em gráficos e tabelas, e também, em forma de modelos estatísticos que representam o comportamento das variáveis de resposta em função das variáveis significativas.

O capítulo 6 traz os resultados dos numerosos ensaios realizados em amostras de concreto asfáltico modificado com borracha (via seca) e amostras de concreto asfáltico preparado com ligante modificado, além de uma sem borracha, denominada mistura de referência. Os resultados são apresentados em forma de gráficos e tabelas. Modelos estatísticos foram também gerados para auxiliar na análise.

No capítulo 7 é apresentada a experiência acumulada com a execução de um trecho experimental com revestimento em concreto asfáltico modificado com borracha, em comparação com um trecho de referência. São apresentados os projetos das misturas, aspectos executivos e os levantamentos de superfície realizados posteriormente à construção.

O capítulo 8 tem por propósito a sistematização do conhecimento gerado durante a pesquisa, suas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REUTILIZAÇÃO E RECICLAGEM DE PNEUS

### 2.1 INTRODUÇÃO

Paralelamente ao aumento da industrialização, houve também um incremento na geração de resíduos e subprodutos, tornando importante a regulamentação da destinação destes materiais. O custo de deposição e manutenção dos depósitos de lixo tem aumentado, tanto pelo volume gerado, quanto pelas novas exigências de cunho ambiental. Existe a necessidade de criação de técnicas capazes de reutilizar e reciclar tais materiais. Lund (1993) e Grippi (2001) discutem sobre este tema.

As obras de Engenharia Civil, por utilizar grandes quantidades de material com alto peso específico e baixo valor agregado (comparativamente a outras engenharias), desenvolvem importante papel na utilização de diversos resíduos. Esta possibilidade tem motivado o desenvolvimento de tecnologias capazes de reutilizar estes materiais em obras de pavimentação. O FHWA publicou, em 1997, uma ampla revisão sobre a utilização de subprodutos na construção de rodovias, que contempla, de maneira generalista, a utilização de dezenove tipos de resíduos: vidro, fibras e tiras plásticas, cinza volante, escória de aciaria, pavimento asfáltico reciclado, cinza de termoelétrica, resíduo de incinerador, borrachas, entre outros.

Como é sabido, os transportes são vitais para o desenvolvimento e o bem-estar econômico e social, no entanto, é reconhecido o seu elevado efeito nocivo em nível ambiental. Dentre os vários modais existentes (rodoviário, ferroviário, fluvial, marítimo e aéreo), é o rodoviário que produz um maior impacto nos vários componentes do ambiente. Os principais efeitos negativos causados são a poluição do ar, pela emissão de gases e partículas resultantes da combustão e a poluição dos solos por resíduos de óleos, pneus usados e sucatas.

O pneu possui papel fundamental e indiscutível em nossa vida diária, tanto no transporte de passageiros como no transporte de cargas. Esse papel torna-se ainda mais importante nos países em desenvolvimento, onde o transporte de bens é feito em sua grande maioria por caminhões e carretas.

No século XIX, o norte americano Charles Goodyear descobriu o processo de vulcanização, misturando acidentalmente borracha e enxofre. Mais tarde, a Alemanha começou a

industrializar borracha sintética, a partir do petróleo, mas foi o escocês John Dunlop que utilizou, pela primeira vez em 1888, borracha para revestir rodas de bicicleta. Segundo Lund (1993), a composição química da borracha de pneu é, em média, a seguinte: 83,5% de Carbono, 7,2% de Hidrogênio, 2,5% de Oxigênio, 0,3% de Enxofre e 6,5% de Cinzas.

Os pneumáticos quando inservíveis acarretam uma série de problemas: são de degradação lenta, incomodamente perceptíveis e volumosos, necessitando de condições apropriadas de armazenamento e deposição. Segundo a classificação de resíduos vigente no Brasil (ABNT/NBR 10004), o pneu é considerado resíduo classe III (resíduos inertes). A colocação de pneus sem uso em aterros sanitários não tem se mostrado uma boa solução, uma vez que o material é praticamente incompressível e de lenta degradação, quando comparado aos resíduos aos quais os aterros sanitários municipais se destinam. Outro fato a ser considerado é a possibilidade de incêndio, visto o grande poder energético dos pneus. Epps (1994) comenta que durante a combustão dos pneumáticos ocorre a liberação de óleos tóxicos que podem contaminar o solo e o lençol freático. Durante a combustão é liberado, também, dióxido de enxofre, altamente nocivo à saúde humana. No Brasil, há restrições legais quanto à queima de pneumáticos usados.

Não há nenhuma monitoração, por parte do Governo Estadual do Rio Grande do Sul ou Federal, sobre as formas de deposição final dos pneus usados, assim como não há levantamento dos depósitos de pneus abandonados em todo o país. Algumas estimativas indicam que são gerados 35 milhões de carcaças de pneus anualmente (Fiori, 1998), e que existem mais de 100 milhões de pneus abandonados em todo o Brasil (Sato, 1999). Hollanda (2003) afirma que, no ano de 2002, mais de 36 milhões de pneumáticos foram vendidos no mercado brasileiro.

Nos Estados Unidos tem-se informação de que são gerados mais de 1 pneu/habitante/ano. Bertollo (2002) estima que no estado de São Paulo são gerados 0,46 pneu/habitante/ano e no Brasil 0,26 pneu/habitante/ano. Este último valor remete a uma geração anual de aproximadamente 44 milhões de carcaças de pneus.

É inaceitável, sob o ponto de vista sanitário, que carcaças de pneus sejam descartadas a céu aberto, uma vez que é foco de proliferação de insetos e roedores. Essa problemática pode ainda ser acentuada em locais onde existam doenças transmitidas por esses animais, a dengue por exemplo. A febre amarela, quando urbana, é transmitida pelo *Aedes aegypti*, que havia

sido erradicado do Brasil e retornou devido à negligência dos programas preventivos. Houve, igualmente, importação a partir da Ásia, de outro vetor concernente à dengue, o *Aedes albopictus*, que, vindo dentro de pneus usados e carregamentos de madeira, adaptou-se bem a nosso território tropical. Segundo dados publicados pelo Ministério da Saúde em 2002 (MS, 2002), 20% dos casos registrados no país são causados por mosquitos que nascem em águas acumuladas em pneus velhos. Logicamente que a melhor forma de combater este vetor é a eliminação do seu ambiente de reprodução.

## 2.2 LEGISLAÇÃO

A senadora Marina Silva, querendo proibir a importação de pneus usados, encaminhou um projeto que pretende minorar o acúmulo de pneus abandonados (depositados) em terrenos baldios, rios, córregos, lixões e aterros sanitários, com conseqüências nocivas ao meio ambiente. Os EUA e alguns países da Ásia vendem para o Brasil parte dos pneumáticos usados para “reciclagem”. A vida útil desses pneus é extremamente curta. O governo federal editou normas proibindo sua comercialização, mas muitas contestações judiciais têm garantido essa verdadeira exportação de dejetos industriais dos países desenvolvidos para o Brasil.

Outro fato que vem sendo veiculado na mídia (Hollanda, 2003) é a importação de pneumáticos usados vindos da Comunidade Européia e recauchutados no Uruguai. Apesar da reduzida vida útil deste produto, sua vinda tem sido garantida judicialmente pela existência do Tratado do Mercosul.

Em 26 de agosto de 1999, foi aprovada uma resolução do CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA 258), que institui a responsabilidade, ao produtor e importador, pelo ciclo total da mercadoria. Desde janeiro de 2002, fabricantes e importadores de pneus são obrigados a coletar e dar destino final de forma ambientalmente correta para os produtos que colocam no mercado. Pela proposta o Ibama ficará responsável pela aplicação da resolução, podendo punir os infratores com base na Lei de Crimes Ambientais. Inicialmente, para quatro pneus novos fabricados no Brasil ou importados, os fabricantes deverão reciclar

ou reutilizar um pneu usado. Em março de 2003 foi aprovada a CONAMA 301, que vem reforçar e esclarecer pontos dúbios da resolução CONAMA 258 (MMA<sup>1</sup>, 2003).

Muitos países legislaram para direcionar seus departamentos de transporte a investigar a possibilidade de utilização de materiais recicláveis em obras de pavimentação. O governo americano, em especial, tem incentivado a incorporação de borracha modificada (vulcanizada) nas misturas asfálticas. A seção 1038, da Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície de 1991 (*Intermodal Surface Transportation Efficiency Act – ISTEA*), que trata do uso de material reciclado em pavimentação, visando a proteção ambiental, estabelece a utilização de um percentual mínimo de borracha reciclada nas misturas asfálticas. Esta lei garante benefícios fiscais aos estados que utilizam borracha de pneus nas misturas asfálticas e prevê punições aos estados que não a obedecerem. Em alguns estados como a Flórida, Califórnia e Arizona a reciclagem de pneus para pavimentação já é uma realidade (Carlson e Zhu, 1999).

Vários estados americanos cobram dos fabricantes de pneus uma taxa, em torno de cinco dólares, que é empregada para financiar os mais diversos projetos que envolvam reciclagem dos pneus usados, tais como: usinas de desmonte e de produção de CRM (Crumb Rubber Modified).

## 2.3 UTILIZAÇÃO DE PNEUS USADOS

Devido ao grande volume de material gerado e problemas de deposição, às pesquisas envolvendo a reciclagem e reaproveitamento de pneus tem envolvido a comunidade científica nos últimos anos. Lund (1993) apresenta casos de reciclagem de pneus em diversos estados americanos, bem como, estatísticas de utilização de pneus naquele país. A borracha proveniente do pneu ou o próprio pneu inteiro possuem atrativos para sua utilização como subproduto:

- i) a "carcaça" de pneu se constitui em um resíduo de fácil transporte e pode ser encontrado em qualquer aglomerado urbano;
- ii) seu manuseio não oferece riscos aos operadores (material inerte e atóxico);

---

<sup>1</sup> Ministério do Meio Ambiente

- iii) material com alta resistência ao intemperismo e ao envelhecimento;
- iv) é um material homogêneo, permitindo a determinação das suas características de comportamento com mínima variação;
- v) seu custo resume-se ao transporte dos locais onde foram gerados aos pontos de utilização;
- vi) os pneus possuem dimensões geométricas padronizadas, o que facilita o desenvolvimento de equipamentos de desmonte e trituração, caso sejam necessários.

A seguir serão apresentadas algumas possibilidades para utilização de pneus usados, tanto de pneus inteiros quanto de pneus moídos.

### 2.3.1 Recauchutagem

A forma mais natural de utilização da carcaça do pneu é sua recauchutagem; ou seja, levar o pneu a uma condição de pneu novo, para que possa ser utilizado novamente como material rodante. O pneu pode ser recauchutado, aproximadamente, três vezes, dependendo do estado de conservação da carcaça. Estima-se que no Brasil sejam recauchutados 8 milhões de pneus de caminhão por ano e 4 milhões de pneus de veículos de passeio.

Durante o processo de recauchutagem a borracha da banda de rodagem deve ser toda removida, o que é feito através de escovas metálicas rotativas, gerando um pó de borracha denominado neste trabalho de Raspa. A Raspa pode ser utilizada como insumo para produção de pavimentos asfálticos.

### 2.3.2 Fonte energética

As termoelétricas têm um grande potencial de utilização de pneus como fonte de energia calorífica. Um dos inconvenientes é a necessidade da instalação de sistemas para amenizar o problema da emissão de resíduos para a atmosfera. Em alguns estados americanos as termelétricas têm utilizado como combustível pneus velhos. Na Califórnia (EUA) existem usinas termelétricas que têm como combustíveis pneus inteiros, sendo consumidos aproximadamente 700 pneus/hora. Segundo Lund (1993) o poder calórico do pneu varia de 3000kcal/kg a 9000kcal/kg, enquanto o do carvão varia de 4200kcal/kg a 6700kcal/kg.







Figura 2.2 – Foto do muro de pneus executado na rodovia RS 30

Podem também ser utilizados pneus como reforço de maciços de terra. Os pneus ficam próximos a superfície do terreno e a alguns metros dentro do corpo do aterro, ligados por um geossintético ou cinta metálica. As diretrizes de projeto podem ser encontradas em Clayton *et al.* (1993).

#### 2.3.4 Estruturas de absorção de energia ou barreiras de inércia

Os pneus servem para amortecer o impacto em caso de acidente, quando montados em estruturas tipo muro nas laterais das rodovias. Esta aplicação é comum em autódromos e pistas de corrida.

#### 2.3.5 Proteção contra marés e reprodução da fauna marinha

Utilizado como estruturas alongadas com diversos pneus amarrados como recifes artificiais, no mar, criando ambiente adequado para reprodução de animais marinhos. Os pneus podem atuar também na contenção de marés.

### 2.3.6 Construção de edificações

No Chile, no Reino Unido e no Brasil (Mato Grosso) existem experiências bastante recentes da utilização de pneus inteiros para construção de edificações. Os pneus são preenchidos com material granular ou solo local e possuem algumas vantagens em relação às paredes tradicionais: a estrutura possui um excelente isolamento térmico e acústico e flexibilidade para absorver possíveis recalques nas fundações, além de economizar materiais de construção que utilizam grande quantidade de energia para sua produção. A mão-de-obra para execução das paredes pode ser de cunho social.

Um dos inconvenientes dessas habitações são suas dimensões, que dificultariam a execução em grandes aglomerados urbanos. Maiores informações são apresentadas por *Earthship Global WebSite*.

### 2.3.7 Drenagem

No Estado do Rio Grande do Sul existem iniciativas de se utilizar módulos compostos por vários pneus amarrados para servir como tubos de drenagem. Esta experiência tem tido especial sucesso em áreas rurais. A utilização destes tubos é restrita a águas pluviais e fluviais.

### 2.3.8 Concreto de baixo desempenho

Fedroff *et al.* (1996) desenvolveram uma pesquisa sobre a viabilidade da aplicação de farelos de pneus em concreto. Os resultados mostraram uma importante redução nas características de qualidade do concreto denominado “rubcrete”, entretanto, sugerem a utilização deste tipo de material para aplicação em pavimentação como reforço do subleito ou camadas de pouca sollicitação estrutural. A aplicação do “rubcrete” pode ter maior potencial na construção civil como isolante térmico ou acústico.

### 2.3.9 Agregado para placas de concreto

A prefeitura da cidade gaúcha de Santa Cruz do Sul, distante 155 km de Porto Alegre, desenvolveu com tecnologia própria, uma metodologia para utilização de raspa de pneu como agregado na confecção de placas de concreto para construção de habitações populares (Folha do Meio, 2001).

### 2.3.10 Agregado para argamassa

Ripoli *et al.* (2002) apresentaram pesquisa sobre utilização de raspa (ou escória) de pneus como agregado de argamassa para produção de blocos de vedação. Os blocos são constituídos de argamassa e garrafas PET recicladas. Na pesquisa, são apresentados, também outros materiais alternativos para confecção de blocos.

### 2.3.11 Pavimentação

É na pavimentação uma das áreas mais estudadas e que tem maior potencial de utilização, devido a dois fatores: a utilização de um grande volume de pneumáticos usados e a melhoria das características dos ligantes asfálticos e do concreto asfáltico com a adição de farelo de pneu.

### 2.3.12 Impermeabilização

Uma mistura semelhante ao asfalto-borracha tem sido utilizada para impermeabilização de aterros sanitários, resíduos de extração de minérios e solos contaminados (Roberts *et al.*, 1989).

### 2.3.13 Cobertura de aterros sanitários

O pó ou farelo de pneus é utilizado como cobertura diária de aterros sanitários, para evitar a proliferação de roedores e insetos, bem como evitar o espalhamento do lixo pelo vento. Não há necessidade de remoção desta cobertura; ao contrário do que seria prática em caso de utilização de solo. As camadas de borracha podem auxiliar também na drenagem interna dos aterros.

### 2.3.14 Extração de óleo e voláteis

Em processo de aquecimento, sob condições controladas, pode ser recuperado o óleo e alguns gases existentes na borracha. Esse processo, conhecido como pirólise, tem sido testado no Brasil, entretanto sua viabilidade ainda é questionável.

Na unidade de xisto da Petrobrás em São Mateus do Sul (Paraná), são reciclados, anualmente, até 140 mil pneus sem uso; os pneus são recebidos cortados em tiras de 80 cm e misturados ao xisto, aquecidos a uma temperatura de aproximadamente 500°C; com isso o mineral libera matéria orgânica em forma de óleo e gás. Em seguida, o xisto e a borracha passam por um processo de limpeza para retirada de óleo leve e extração de gases (gás combustível e gás liquefeito). As sobras desse processo são levadas para as cavas das minas de xisto onde são recobertas por uma camada de argila e solo vegetal, permitindo, assim, a utilização da área para a criação de animais, plantio ou urbanização (Ribeiro, 2002). Até setembro de 2000, a Petrobrás havia consumido mais de sete milhões de unidades de pneus

Yousefi *et al.* (1999) descrevem em seu trabalho experimental os procedimentos utilizados para o aproveitamento do óleo derivado de pneus velhos em cimentos asfálticos modificados por polímeros. O óleo foi extraído dos pneus através do processo de pirólise a vácuo; para tanto foram utilizadas temperaturas de 500/550°C e pressão de 10 e 16 kPa, dependendo do óleo que se desejava extrair.

Park *et al.* (1996 e 1997) utilizaram o “negro de fumo” derivado do processo de pirólise como aditivo de misturas asfálticas e, através de ensaios tradicionais (Metodologia Marshall, resistência à tração, creep, etc.) verificaram uma grande melhoria no desempenho das misturas asfálticas testadas. A quantidade de resíduo utilizada foi de 5 a 20%.

### 2.3.15 Absorção de óleos

Utilizado em caso de derramamento de óleo ou produtos químicos semelhantes ou para filtragem e absorção de resíduos líquidos.

### 2.3.16 Barreiras contra ruído

Zhu e Carlson (1999) apresentaram em seu trabalho um estudo experimental onde as barreiras de absorção de ruído usadas em rodovias foram comparadas a placas moldadas com borracha moída (tamanhos de partículas entre 0,5 e 2 mm). Para moldagem das placas foi utilizado um aglomerante sintético para que a superfície da placa tomasse uma textura rugosa. Os resultados dos ensaios demonstraram a superioridade das placas de borracha na absorção de ruídos e a potencialidade desta aplicação para atenuar dois problemas ambientais: a poluição sonora gerada pelos veículos e o descarte de pneus velhos.

### 2.3.17 Reforço de material cimentado

Krizek e Sobhan (1995) vislumbraram e estudaram a incorporação de pedaços alongados de borracha de pneu, no formato de fibras, como reforço de material granular cimentado para utilização como base de pavimentos flexíveis. A principal dificuldade encontrada pelos pesquisadores foi de produzir em campo, mesmo em pequena escala, amostras onde as fibras de borracha ficassem homoganeamente distribuídas na matriz de material granular, de forma a melhorar as características de ductilidade e tenacidade.

### 2.3.18 Compostagem

O pneu não pode ser transformado em adubo; entretanto sua borracha, cortada em pedaços de aproximadamente cinco centímetros pode servir para aeração de compostos orgânicos (Lund, 1993).

### 2.3.19 Produção de artefatos

Depois de picada a borracha reprocessada (com adição de óleos aromáticos) serve para produção de artefatos como pisos industriais, sola de sapato, tapetes de automóveis, tapetes para banheiros, borracha de vedação, protetores para *playground* dentre outros.

### 2.3.20 Co-processamento em fábricas de cimento

No Brasil, a indústria de cimento consome, aproximadamente 3 milhões de unidades de pneus por anos. O pneu é picado mecanicamente e adicionado ao clínquer, matéria prima do cimento, à uma temperatura de 1200°C. Estima-se que as 66 plantas de produção de cimento, instaladas no Brasil, tenham capacidade de consumir até 14 milhões de unidade de pneumáticos inservíveis por ano.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre as diversas possibilidades de utilização de pneus velhos, aquelas que conseguem aliar viabilidade econômica e redução do passivo ambiental, ao encontro da sustentabilidade, devem receber maior atenção dos organismos ambientais e da comunidade científica. Dados de estados americanos (Tabela 3.1 a 3.3) apresentam com maior potencial a utilização do pneu como combustível, em co-processamento em cimenteiras, e em pavimentação.

Para se ter idéia do volume de pneus utilizados em pavimentação, os dados seguintes dão a dimensão de valores. Ao restaurar 100 km de rodovia considerando 3,6 m cada faixa e um reforço com 5 cm de CBUQ com ligante modificado com borracha, (massa específica aparente da mistura asfáltica igual a 22 kN/m<sup>3</sup> e quantidade de ligante 5 % com 20 % de CRM), seriam utilizados 792 kg de farelo a cada 100 m, ou 79,2 t deste material nos 100 km. Supondo pneus de 7,5 kg cada<sup>2</sup> (dos quais 85 % são de borracha), utilizar-se-ia a cada 100 m 124 pneus e nos 100 km 124.235 unidades de pneumáticos inservíveis.

---

<sup>2</sup> Referente ao um pneu de veículo de passeio – R13 175/70

Tabela 2.1 – Uso de pneus inservíveis no Arizona no ano de 1998

Fonte: Carlson e Zhu, 1999

<i>Utilização</i>	<i>Quantidade (unidades)</i>
Cimenteiras / Geração energia	0,0 milhão
Exportação ou cobertura de aterros sanitários	1,0 milhão
Reuso / retrabalho em outros produtos	0,4 milhões
Aplicações em pavimentação	2,6 milhões

Tabela 2.2 – Uso de pneus inservíveis na Califórnia no ano de 1998

Fonte: Carlson e Zhu, 1999

<i>Utilização</i>	<i>Quantidade (unidades)</i>
Cimenteiras	4,9 milhões
Geração energia	3,5 milhões
Reuso / retrabalho em outros produtos	4,3 milhões
Aplicações em pavimentação	2,7 milhões

Tabela 2.3 – Uso de pneus inservíveis na Flórida no ano de 1998

Fonte: Carlson e Zhu, 1999

<i>Utilização</i>	<i>Quantidade (unidades)</i>
Cimenteiras / Geração energia	9,1 milhões
Reuso / retrabalho em outros produtos	6,3 milhões
Aplicações em pavimentação	3,0 milhões

Nas análises de custo/benefício de implantação de uma nova rodovia, outros custos, além dos tradicionais (materiais, mão-de-obra, equipamentos e transporte), estão sendo incorporados, principalmente custos ambientais, tais como as externalidades negativas, geradas pela possível perda de locais para praças e recreações, aumento do ruído, degradação em áreas de pedreiras e poluição visual e do ar. Outro custo que deveria ser incorporado a análise é a possibilidade de retirada, em grande escala, de algum resíduo poluente que gera um alto custo para a sociedade (custos diretos como estocagem e indiretos como gastos em saúde pública). Estes custos são ainda de difícil quantificação e estão sendo estudados em nível de estado-da-arte (Pearce *et al.*, 1989).

A partir do que foi exposto, acredita-se que, apesar do grande potencial de utilização do pó de pneu como material de pavimentação, essa alternativa isolada não constitui uma solução efetiva para atenuação do passivo ambiental já existente e gerado a cada ano no Brasil. A conjugação desta solução com a geração de energia e co-processamento levariam a uma solução bastante eficaz.

### 3. UTILIZAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA COMO MATERIAL DE PAVIMENTAÇÃO

#### 3.1 HISTÓRICO

Segundo Zanzotto e Kennephol (1996) as primeiras inclusões de polímeros em alcatrões datam de 1823, quando T. Hancock patenteou um produto a prova d'água para impermeabilização de madeira em cascos de navios. A primeira patente que combinou borracha natural com betume para utilização como material de construção de pavimentos foi feita por E. E. Cassel em 1844. As aplicações práticas de asfalto modificado começaram em 1901 em Cannes, na França.

Outra importante tentativa de se modificar as propriedades dos betumes com borracha data de 1898 na Inglaterra, cujo processo patentado originava um produto chamado “*rubber-bitumen*”. Em 1930, primeiro na Holanda e depois na Inglaterra, começou-se a utilizar borracha granulada para melhorar as características dos ligantes, várias pesquisas foram começadas e interrompidas devido a Segunda Guerra Mundial (RRL, 1962).

As primeiras tentativas de se utilizar borracha de pneus inservíveis em asfalto datam da década de 50, entretanto, o desempenho do material resultante não instigava os pesquisadores a continuar. Foi apenas na década de 60, quando o engenheiro de materiais Charles H. McDonald (funcionário da *U.S. Bureau of Public Roads*, hoje FHWA) atravessava o país em um trailer para inspecionar rodovias, utilizou uma mistura de pó de pneu com asfalto para selar trincas no teto do seu veículo. Ele observou que com o passar de tempo a mistura emborrachada não oxidava, ao contrário daquelas com asfalto convencional (Carlson e Zhu, 1999).

Depois de aposentado McDonald foi trabalhar na cidade de Phoenix, no Arizona, e então experimentou, para os usuais serviços de “tapa-buracos”, sua já conhecida mistura de pó de pneu e asfalto quente. Ele costumava misturar o pó com asfalto e deixava reagir por 45 minutos à uma hora para que um material com novas propriedades se formasse, o *asphalt-rubber* (Carlson e Zhu, 1999).

No ano de 1963 foram publicados pelo HRB (Highway Research Board) os primeiros artigos científicos apontando para qualidades do novo material que surgia. Em 1975, por ocasião da Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus



publicação da edição especial sobre rodovias com baixo volume de tráfego, Schnormeler relatou pesquisas e constatações, muito bem sucedidas, da aplicação de asfalto-borracha em ruas com baixo volume de tráfego na cidade de Phoenix (Schnormeler, 1975).

O material apresentou características tão favoráveis que, em 1968, o Departamento de Transportes do Arizona iniciou uma série de pesquisas envolvendo o *asphalt-rubber* principalmente como selante de trincas. Em 1975 foi então incorporado ao concreto betuminoso usinado à quente, obtendo ótimos resultados. Nos anos seguintes, outros estados como Califórnia e Texas, também começaram a pesquisar, utilizando selantes na década de 70 e CBUQ na década de 80. O estado americano da Flórida desenvolveu, na década de 80, um produto muito semelhante ao asfalto-borracha utilizando o resíduo de pneus em pequenas quantidades. Foi a maneira que o Departamento de Transportes da Flórida encontrou para evitar as questões legais envolvendo a patente do produto.

Paralelamente às descobertas de McDonald, no Arizona, surgiu, na Suécia, um processo denominado *Rubit*. Esse processo foi levado aos Estados Unidos pela empresa Pavetech e Bellevue, de Washington e lá denominado *PlusRide*. Estavam sendo desenvolvidas tecnologias para aplicação da borracha no ligante (processo úmido) e diretamente na mistura asfáltica (processo seco).

Na década de 90, mais de 30 estados americanos desenvolveram pesquisas em conjunto com a FHWA e o Corpo de Engenheiros do Exército Americano. No ano de 1992, a patente, que até então havia inibido a aplicação desta tecnologia em larga escala expirou, tornando então a tecnologia do asfalto-borracha de domínio público.

Com as exigências da ISTEA (*Intermodal Surface Transportation Efficiency Act*) sobre a utilização de um percentual de borracha em pavimentação, a partir de 1991 muitos estados americanos iniciaram pesquisas e construíram pavimentos com borracha reciclada. Nem todos os resultados foram positivos, devido à falta de informação e de experiência de alguns departamentos de transporte acerca deste assunto.

O KDOT (*Kansas Department of Transportation*) iniciou, no ano de 1990, pesquisas sobre a utilização de pneus em pavimentação, voltadas, principalmente para utilização de concreto betuminoso usinado a quente com ligante modificado (processo úmido) em restaurações de pavimentos rígidos e flexíveis. Durante 3 anos, mais de nove seções testes foram construídas e mais de 608 toneladas de pó de pneus foram utilizados.

Os estados de Califórnia, Flórida e Arizona já possuem, atualmente, um grande conhecimento a respeito da utilização de resíduos de borracha em pavimentação, possuindo inclusive normalizações e especificações de execução de camadas anti-reflexão de trincas, recapeamentos, selagem de trincas e camadas novas com ligante modificado com borracha reciclada. Segundo dados apresentados por Carlson e Zhu (1999) os três estados americanos consumiram, no ano de 1998, aproximadamente 8,3 milhões de unidades de carcaças de pneus inservíveis em serviços de pavimentação.

Atualmente, existem várias empresas norte-americanas especializadas na produção de CRM (*Crumb Rubber Modified*<sup>3</sup>), ou seja, especializadas no desmonte e moagem das carcaças inservíveis, bem como construtores dedicados à produção de misturas asfálticas modificadas com borracha (Bahia e Davies, 1995).

Em nosso país já existem empresas que possuem equipamentos para desmonte e moagem de pneus, entretanto, utilizam o pó em outras atividades industriais. Dentre os trabalhos sobre utilização de borracha de pneus que destacam-se em nosso país: Bertollo *et al.* 2000; Oda e Fernandes Jr. 2000 e Leite *et al.* 2000.

Segundo Way (2003) somente no estado do Arizona mais de 28000 km de pavimento foram construídas ou restauradas utilizando ligantes modificados com borracha. Na Figura 3.1 é apresentado um mapa rodoviário do estado do Arizona onde aparecem grifados as rodovias com AB (Asfalto Borracha).

Recentemente foi criada na cidade de Temple, estado do Arizona, a *Rubber Pavement Association*, uma entidade sem fins lucrativos que tem por finalidade divulgar e encorajar pesquisas e aplicações de pavimentos asfálticos contendo borracha reciclada de pneus. Esta associação é formada por empresas produtoras de pó de pneu, construtoras, departamentos de transporte e várias universidades americanas. Fazem parte a Universidade de Nevada (Prof. Jon Epps, Ph. D.), Universidade Estadual de Oregon (Prof. Gary Hicks, Ph. D.), Universidade da Califórnia (Prof. Carl L. Monismith, Ph. D.) e a Universidade do Arizona (Prof. Rudy Jimenez, Ph. D.). Os estados do Arizona, Califórnia, Florida e Texas também se fazem presentes, através de seus departamentos de transportes.

---

<sup>3</sup>CRM é o produto derivado da moagem de pneus .

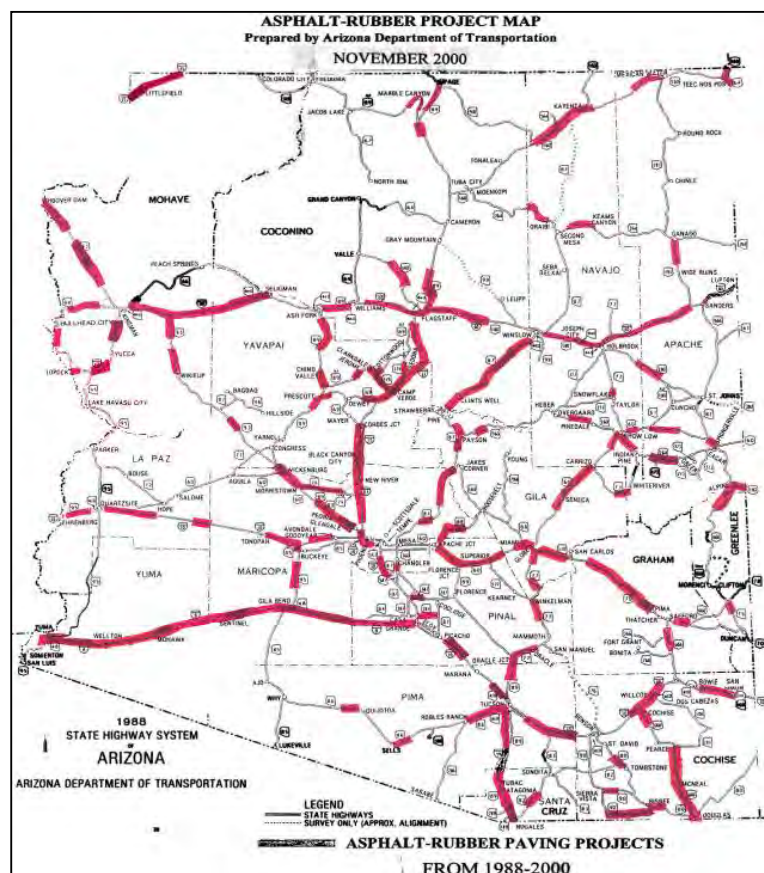


Figura 3.1 – Utilização do AB no estado do Arizona – EUA  
 Fonte: Way, 2000

Países como Portugal tem investido nesta tecnologia, construindo vários trechos de rodovias usando AB, juntamente com as empresas Consulpav e Recipav. Na Coreia, empresas produtoras de cimentos asfálticos têm se interessado por esta nova tecnologia, começando a introduzir este produto naquele país.

Uma das pesquisas mais relevante que envolve AB está sendo realizada pelo Caltrans (Departamento de Transportes da Califórnia) e pela Universidade de Califórnia utilizando-se do HVS (Heavy Vehicle Simulator) para acelerar a degradação do pavimento contendo borracha (Harvey *et al.*, 2000).

No estado do Rio Grande do Sul, uma parceria envolvendo a Metrovias (empresa concessionária de rodovias) a Greca Asfaltos e a UFRGS, foi construído o primeiro trecho de Asfalto Borracha via úmida do país. Trata-se de um trecho de dois quilômetros (entre os quilômetros 318 e 320 da BR 116), próximo a cidade de Guaíba, (região metropolitana de

Porto Alegre) construído em agosto de 2001 (Ribeiro, 2001). Estima-se que até a presente data aproximadamente 600km de rodovias tenham sido restauradas com ligante AB no Brasil.

### 3.2 PROCESSO ÚMIDO

O processo úmido é o que dá origem ao ligante denominado asfalto-borracha, definido pela ASTM D 6114-97 como *“uma mistura de cimento asfáltico, borracha de pneu reciclada e certos aditivos, dos quais o percentual de borracha deve ser pelo menos 15 % em massa da total da mistura e sofrer reação com o ligante asfáltico aquecido de forma a causar um inchamento das partículas de borracha”*.

Muitos materiais poliméricos com alto peso molecular (como as borrachas – polímeros hidrofóbicos) podem apresentar variação de volume, quando imersos em materiais com baixo peso molecular. O que acontece é que as partículas de borracha aumentam de volume (em média cinco vezes, segundo RRL, 1962) absorvendo, pelas cadeias de polímeros, certos óleos aromáticos contidos no cimento asfáltico, tornando-o mais dúctil, mais viscoso e com menor suscetibilidade térmica. Em contrapartida, são transferidas para o asfalto, através do negro de fumo, algumas características químicas das borrachas vulcanizadas como inibidores de raios ultravioleta e antioxidantes, produzindo assim, um material mais resistente ao envelhecimento e com maior resistência a fissuração, contribuindo para uma maior durabilidade do pavimento.

O inchamento da borracha é uma difusão e não uma reação química (não há ligações livres nas borrachas vulcanizadas para interação química com o asfalto) e resulta do movimento de líquidos em direção ao interior da matriz do polímero. Logo após sua imersão em meio oleoso, a superfície da borracha fica com alta concentração de líquidos. Com o passar do tempo estes líquidos movem-se para o interior da partícula, sendo este movimento controlado pela compatibilidade molecular da borracha e do líquido, o tempo de imersão e a viscosidade do líquido. As fortes atrações moleculares nas cadeias da borracha evitam sua decomposição em meio oleoso; entretanto, pode haver, em casos de longa exposição em condições favoráveis, uma degradação do polímero.

Shin *et al.* (1996) apresentaram fotografias obtidas em MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), mostradas na Figura 3.2, da cadeia de polímeros formada após a adição de 2% e 5% do polímero SBS em ligante asfáltico puro (AC 10).

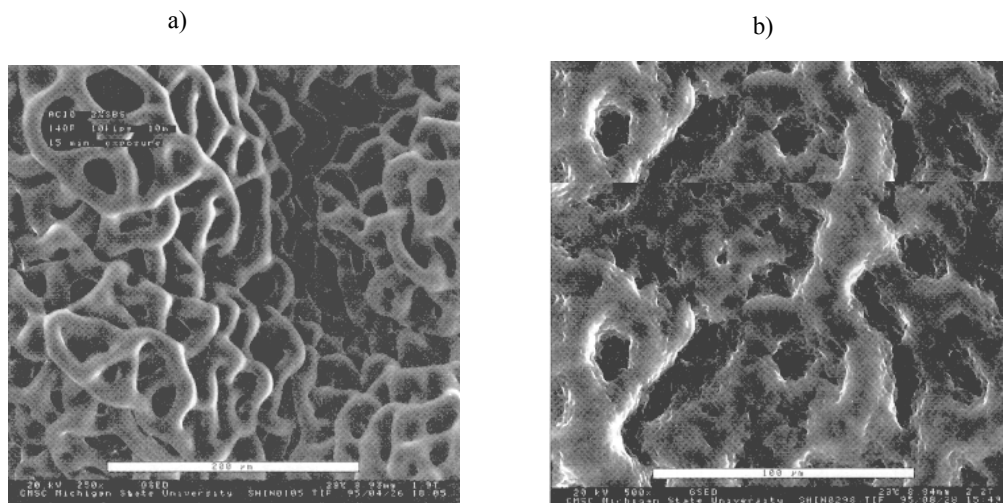


Figura 3.2 – Fotos de MEV de cimento asfáltico modificado com polímero

a) ligante AC 10 com 2 % de polímero SBS

b) ligante AC 10 com 5 % de polímero SBS

Fonte: Shin *et al.* (1996)

O asfalto é um material formado basicamente de quatro frações químicas: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos (SARA), sendo que as três primeiras frações constituem a porção maltênica e a última denomina-se porção asfáltica. Os saturados e aromáticos funcionam como plastificantes das frações de resinas e asfaltenos (Corbett, 1969; Rostler e White, 1959). A variação na proporção entre estas frações origina asfaltos com diferentes composições químicas. O equilíbrio entre os teores de cada fração é extremamente importante na estabilidade coloidal do betume. O índice de instabilidade coloidal ( $I_C$ ) de um asfalto é calculado a partir do teor de suas frações químicas (SARA), e permite que se tenha uma idéia sobre a compatibilidade desse com o polímero SBS (Gooswilligen e Vonk, 1994).

Enquanto a natureza química do líquido determina o valor do inchamento, a viscosidade do líquido, a velocidade, o grau de inchamento aumenta com o decréscimo da viscosidade do líquido. Baseado nesta relação uma maior velocidade de inchamento pode ser esperada quando a borracha é adicionada a asfaltos com alta penetração (considerando o mesmo cru). Silva (2000) verificou que a interação de polímeros é mais efetiva com asfaltos com fração leve (maltênica) maior.

A interação entre o ligante e os polímeros podem ser avaliadas de várias maneiras, através de ensaios mecânicos e reológicos, da análise química ou da análise microscópica. Brulé e Druon (1975) apresentaram uma metodologia que utiliza a microscopia ótica de fluorescência para avaliar a qualidade e interação de misturas asfalto/polímero, principalmente os fatores referentes à homogeneidade e a estabilidade à estocagem.

Segundo Newcomb *et al.* (1994) a presença de carga mineral pode inibir o inchamento das partículas de borracha. Com o aumento da quantidade de negro de fumo há uma redução linear no aumento de volume do polímero. Segundo Epps (1997) o negro de fumo, um dos componentes da borracha, inibe o envelhecimento do ligante aumentando sua durabilidade.

A mistura de asfalto e partículas finas de borracha formam um fluido médio com partículas aleatoriamente distribuídas, ou seja, uma suspensão. Vários fatores são considerados na avaliação da suspensão incluindo: concentração de partículas sólidas, forma, orientação, interação e distribuição granulométrica (Newcomb *et al.* 1994). Einstein, no início do século passado, propôs uma tentativa de prever a mudança de viscosidade do material com a adição de partículas. Postulou que uma energia extra seria dissipada devido ao perfil de velocidade no entorno da esfera em um fluido em movimento.

Para o equacionamento considerou-se um fluido Newtoniano incompressível de fluxo lento sem deslizamento entre as esferas e o fluido, esferas rígidas e sem interação entre si, sem influência das condições de contorno, não migração de partículas e que a média da velocidade do fluido fosse a mesma, com e sem esferas. Todas estas considerações, resultaram na equação 3.1, para estimar a mudança da viscosidade do fluido com a adição de uma certa quantidade de esferas.

$$\eta = \eta_s \left(1 + \frac{5}{2} \theta\right) \quad (3.1)$$

onde:

$\eta$  = viscosidade do fluido com esferas;

$\eta_s$  = viscosidade do fluido;

$\theta$  = concentração de esferas, em volume (%).

Se a borracha ser incompatível com um dado cimento asfáltico, então, o aumento observado

da viscosidade deve ser próximo ao teorizado por Einstein.

Um dos fatores que diferem a utilização, em larga escala, dos asfaltos modificados por SBS e EVA e por borracha de pneu moída é a estabilidade. Quando se prepara uma mistura em uma planta (SBS e EVA) o produto pode ficar estocado e entregue na obra. Normalmente, a preparação do ligante modificado com borracha é *just in time* preparada no canteiro de obras e utilizada imediatamente. No Brasil está sendo utilizado o processo úmido através da tecnologia *terminal blending*, onde a mistura é efetuada em uma unidade central e transportada até o local de aplicação.

As principais utilizações dos ligantes asfálticos modificados com borracha em pavimentação são: ligante para macadame de penetração, selantes para juntas e trincas, concreto asfáltico usinado à quente, concreto asfáltico poroso e membranas tipo SAM e SAMI.

O processo úmido, usado nos últimos 40 anos, tem sido pesquisado e testado extensivamente por departamentos de transportes nos quatro continentes. Na Europa a ênfase dada ao asfalto-borracha é, principalmente, para utilização como ligante de concreto asfáltico poroso, o qual reduz de forma expressiva o nível de ruído e aumenta a segurança em pista molhada (Sainton, 1990; RPA, 2000).

Além do processo de produção de AB em bateladas (*McDonald Process*) pode-se modificar o ligante com adição contínua de um pó ultrafino no ligante asfáltico com um tempo mínimo de reação. Este processo é denominado *Rouse Process* (Maupin Jr., 1996).

### 3.2.1 Variáveis que influenciam o comportamento do ligante asfalto-borracha

Não existem receitas prontas a despeito da quantidade e granulometria da borracha a ser adicionada ao ligante nem tampouco das temperaturas e tempos de reação. No Quadro 3.1 são apresentados alguns valores encontrados na literatura. A temperatura e tempo da mistura dependem principalmente da granulometria da borracha. Quanto mais fina, maior a área superficial e menor temperatura e tempo de mistura para se obter um material homogêneo. Segundo RRL (1962), o tempo de mistura dobra com a diminuição de 10°C na temperatura.

A borracha empregada para utilização na modificação do ligante deve possuir algumas características, tais como: o material deve ser uniforme, tanto física quanto quimicamente

(facilita a mistura e torna o processo constante), ser livre de metais e conter baixos teores de fibras.

Quadro 3.1 – Valores encontrados na literatura a respeito das variáveis de mistura para modificação de ligantes com boracha

<i>Referência</i>	<i>% borracha vulcanizada</i>	<i>tempo mistura (min)</i>	<i>temperatura mistura (°C)</i>	<i>ligante utilizado</i>
RRL (1962)	5 <sup>1</sup> – 15	30 a 60	160 – 180	---
Larsen (1989)	20	---	---	AC - 20
Sainton (1990) <sup>2</sup>	15 – 25	90	> 200	80/100 pen
Harvey (1992)	18	---	---	AR - 2000
Fager (1994)	16 – 18	45 a 90	177	AC - 5
Newcomb <i>et al.</i> (1994)	10 – 15 – 20	10 a 60	177 – 232	85/100 pen 120/150 pen
Page <i>et al.</i> (1992)	3,1 – 20,5	10 a 30	149 – 190	AC – 20/30
FHWA/USDOT (1995)	12 – 25	10 a 45	150 – 175	---
Bahia e Davies (1995)	0 – 20	60	160 ± 5	AR - 2000
Fager (1996)	13 – 16	45 a 90	200	AC - 10
Madapati <i>et al.</i> (1996)	15	---	---	AC - 10/20
Maupin Jr. (1996)	5 – 20	---	175 – 180	AC - 10/20/30
Troy <i>et al.</i> (1996)	10 – 20	---	170 – 185	AC – 10/20
Liang e Lee (1996)	---	120	190	AC – 5/10/20
Zanzotto e Kennephol (1996)	6 – 25	60 a 240	200 – 280	85 a 300 pen
Gowda <i>et al.</i> (1996)	5 – 15	60	160	AC - 30
Epps (1997)	15	---	---	AC - 10
Takallou <i>et al.</i> (1997)	15 – 20	1,5 <sup>3</sup>	160 – 204	AR - 400 AR - 4000
Brown <i>et al.</i> (1997) <sup>4</sup>	6 – 10	35	171	AC - 20
Daly e Negulesco (1997)	0 – 25	49	170 – 240	AC – 5/ 10/20/30
Sousa <i>et al.</i> (1999)	20	60	180	30/35 pen
Oda e Fernandes Jr. (2000)	6 – 24	30	160 – 170	CAP 20
Way (2000)	20	60	177	AC - 10

Nota:

<sup>1</sup> – Este valor de 5 % refere-se a borracha não vulcanizada; <sup>2</sup> – Ligante utilizado em concreto asfáltico poroso; <sup>3</sup> – Após a mistura era feita uma cura por 45 minutos; <sup>4</sup> – Caso de aplicação de asfalto-borracha em reciclagem;



De acordo com a ASTM 6114-97 a borracha utilizada para modificação do ligante deve ter no máximo 0,75 % de umidade, massa específica de  $1,15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05$  e possuir no máximo 0,01 % de metais. A quantidade de fibra tolerável para ligantes de concretos asfálticos é inferior a 0,5 % em massa, no caso de ligante para aspersão, o valor aceitável é 0,1 %. É permitido adicionar até 4 % de material inerte fino (talco, por exemplo) para prevenir o empolamento das partículas de borracha.

Em relação à granulometria, há em alguns órgãos oficiais, especificações como aquelas fornecidas pelos Departamentos de Transporte dos estados do Arizona, Califórnia e Flórida, apresentadas na Tabela 3.1 (FHWA/ USDOT, 1995).

Tabela 3.1 – Faixas granulométricas especificadas para borracha em alguns estados americanos

<i>Peneira n°</i>	<i>Abertura (mm)</i>	<i>Arizona</i>	<i>Califórnia</i>	<i>Flórida - Tipo A</i>	<i>Flórida - Tipo B</i>	<i>Flórida - Tipo C</i>
8	2,38	---	100	---	---	---
10	2,00	100	95 – 100	---	---	100
16	1,19	75 – 100	40 – 80	---	---	---
20	0,84	---	---	---	100	85 – 100
30	0,59	25 – 100	5 – 30	---	---	---
40	0,42	---	---	100	85 – 100	20 – 60
50	0,297	0 – 45	0 – 15	---	--	---
80	0,177	---	---	90 – 100	10 – 50	5 – 20
100	0,149	0 – 10	---	70 – 90	5 – 30	---
200	0,074	0	0 – 3	35 – 60	---	---

Nota: os valores apresentados referem-se ao percentual passante

O estado da Flórida especifica ainda, para cada granulometria, características específicas de mistura, apresentados na Tabela 3.2.

Roberts *et al.* (1989) considera como fator importante, além dos já mencionados, a composição química da borracha a ser utilizada. Quão maiores os teores de borracha natural na composição do CRM, melhores as características da mistura resultante. O autor refere-se, também ao peso específico da borracha, quanto menor melhor, devido a suas maior porosidade e melhor interação com o asfalto.

O mesmo autor recomenda os ensaios tradicionais de caracterização dos ligantes asfálticos para caracterizar as misturas com borracha: ponto de amolecimento, ductilidade, tenacidade, viscosidade absoluta etc.

Tabela 3.2 – Especificações para misturas com faixas granulométricas da Flórida  
Fonte: FHWA/USDOT (1995)

<i>Especificação</i>	<i>Flórida - Tipo A</i>	<i>Flórida - Tipo B</i>	<i>Flórida - Tipo C</i>
% mínimo de borracha	5	12	20
tipo de asfalto	AC - 30	AC - 30	AC - 20
temperatura mín. mistura (°C)	149	149	168
temperatura máx. mistura (°C)	168	177	190
tempo de mistura	10	15	30
massa específica (15 °C)	1,03 g/cm <sup>3</sup>	1,04 g/cm <sup>3</sup>	1,05 g/cm <sup>3</sup>
viscosidade mínima (poises)	4 a 148°C	10 a 148°C	15 a 176°C

A ASTM 6114-97 especifica características físicas para ligantes modificados com borracha de pneus, apresentadas na Tabela 3.3. Com relação aos tipos I, II e III de AB, a escolha deve ser feita em relação à temperatura da área alvo do projeto. O Tipo I (ligante mais rígido) é recomendado para temperaturas médias entre -1 e 43°C (ou maiores). O segundo tipo é aplicável em áreas onde a temperatura varia entre -9 e 43°C e o tipo III em áreas com temperaturas entre -9 e 27°C (ou menores).

Tabela 3.3 – Características especificadas para ligantes modificados com borracha de pneus  
Fonte: ASTM 6114-97

<i>Especificação</i>		<i>Tipo I</i>	<i>Tipo II</i>	<i>Tipo III</i>
viscosidade aparente 175°C (cP)	mín.	1500	1500	1500
penetração, 25°C, 100 g, 5 s ( <sup>1</sup> / <sub>10</sub> mm)		25-75	25-75	50-100
penetração, 4°C, 200 g, 60 s ( <sup>1</sup> / <sub>10</sub> mm)	mín.	10	15	25
ponto de amolecimento (°C)	mín.	57,2	54,4	51,7
ponto de fulgor (°C)	mín.	232,2	232,2	232,2

### 3.2.2 Comportamento de ligantes modificados com borracha

Denomina-se reologia o estudo da deformabilidade dos materiais quando submetidos a um carregamento qualquer, levando em consideração o tempo de aplicação de carga. No caso específico de cimentos asfálticos, a consideração da temperatura é importante, tendo em vista

ser um material termo-sensível, ou seja, sua consistência varia consideravelmente com a temperatura. Assim, o estudo reológico dos ligantes asfálticos para uma amplitude de temperaturas de -28°C a temperaturas superiores a 60°C caracteriza o seu comportamento em serviço (temperaturas dependentes da região). Portanto, o comportamento elástico, viscoelástico e viscoso do betume são funções da temperatura e do tempo de aplicação do carregamento.

No Brasil, os asfaltos são classificados pelo ensaio de penetração, em 1/10 mm (CAP 30/45, 50/60 e 85/100) ou pelo ensaio de viscosidade a 60°C (em poise) (CAP 7, 20 e 40).

Os cimentos asfálticos são exemplos de materiais ou fluídos Newtonianos, ou seja, possuem relação linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento. Fluídos Não-Newtonianos, por sua vez apresentam viscosidade dependente da taxa de cisalhamento, sendo assim, a viscosidade determinada para uma taxa será diferente para outra. Exemplos destes materiais são os asfaltos modificados por polímeros e o asfalto-borracha.

Em 1987, nos Estados Unidos, iniciou-se a pesquisa SHRP (*Strategic Highway Research Program*); a maior pesquisa já desenvolvida para a obtenção de uma metodologia de projeto de misturas asfálticas fundamentada no desempenho esperado *in situ*. Como parte integrante da pesquisa SHRP foi desenvolvido o sistema SUPERPAVE™ (*Superior Performing Asphalt Pavements*), o qual consiste em um conjunto de ensaios de laboratório tanto para os componentes da mistura (ligantes e agregados), quanto para a mistura estabelecida (AI, 1994; AI, 1995b).

No sistema SUPERPAVE™ a escolha do ligante asfáltico é feita em função do seu desempenho (PG – *Performance Grade*) sob condições climáticas e de tráfego específicas. O grau de desempenho é apresentado por dois valores, de alta e de baixa temperatura, por exemplo, um ligante com PG 70-10, possui propriedades físicas adequadas entre -10°C e 70°C. Além disso, devem ser feitas considerações adicionais em termos de condições de tráfego (volume e tempo de aplicação de carga) selecionando um ligante com PG superior ao especificado.

O sistema SUPERPAVE™ recomenda os seguintes ensaios para caracterizar as propriedades fundamentais dos ligantes: Viscosidade Rotacional, Reometria de Cisalhamento Dinâmico, Envelhecimento de curto prazo (RTFOT), Envelhecimento de longo prazo (PAV), Reometria de Flexão e Ensaio de Tração Direta.

Com relação a sensibilidade à água não há ensaios específicos para o ligante, tendo-se proposto o Ensaio de Efeito Deletério da Água (AASHTO T 283-89) para avaliar combinações asfalto-agregado quanto a problemas de adesividade.

Apesar de todo desenvolvimento tecnológico que cerca a metodologia SUPERPAVE™, existem críticas a respeito de se prever o comportamento de misturas asfálticas baseado apenas em características dos ligantes. Nesta linha de raciocínio Wegan e Brulé (1999) estudaram o comportamento de asfaltos modificados com polímero (SBS e EVA) e observaram a importância da interação asfalto-polímero-agregado no comportamento mistura. A interação entre o ligante e o agregado só pode ser analisada em ensaios com composições de CBUQ.

Troy *et al.* (1996) realizaram juntamente com o Departamento de Transportes de Nevada um estudo para constatar se as metodologias propostas pelo SHRP poderiam ser aplicadas para caracterização de misturas com CRM, bem como uma avaliação do método de Hveem<sup>4</sup> para uso com AB. Os pesquisadores estabeleceram as seguintes conclusões: (1) existe uma forte influência das partículas sólidas de borracha nos procedimentos de ensaio (principalmente partículas maiores que 0,84 mm); (2) a metodologia Hveem pode ser utilizada para projeto de misturas asfálticas contendo AB, entretanto, os autores propõem uma nova metodologia de compactação – o corpo-de-prova deve ser compactado em duas camadas; (3) o desempenho observado nos ensaios de módulo de resiliência e deformações plásticas indicaram um melhor desempenho das misturas com AB.

Leite (1999) e Leite *et al.* (2000) investigaram em laboratório as propriedades dos ligantes modificados com três tipos de polímeros diferentes: 4 % de SBS (estireno-butadieno-estireno), 20 % CR (*crumb rubber*) e 4 % de EVA (etileno acetato de vinila), além do ligante CAP 20 e obtiveram os resultados apresentados na Tabela 3.4. Podem ser observadas melhorias nas características elásticas do ligante com a adição de polímeros, principalmente da borracha, sendo seu PG o que abrange uma maior amplitude de temperaturas. Este resultado confirma o bom desempenho do AB em condições climáticas adversas.

---

<sup>4</sup> Maiores informações sobre a Metodologia Hveem de dosagem de misturas asfálticas são apresentadas por AI (1995a)

Tabela 3.4 – Resultados da caracterização reológica dos ligantes

Fonte: Leite *et al.* (2000)

<b>Ligante testado →</b>	<b>CR</b>	<b>SBS</b>	<b>EVA</b>	<b>CAP 20</b>
compatibilidade, 48 h, 163°C, $\Delta$ °C	5	0,8	1,3	-
penetração a 25°C, 100 g, 5 s, $1/10$ mm	50	58	54,2	53
penetração a 4°C, 200 g, 60 s, $1/10$ mm	18	-	-	-
resiliência a 25°C, %	56	-	-	-
viscosidade Brookfield a 135°C, cP	2900	954	925	450
cisalhamento dinâmico: $G^*/\text{sen } \delta$ , °C	88	76	70	64
Após RTFOT				
cisalhamento dinâmico: $G^*/\text{sem } \delta$ , °C	82	70	76	70
recuperação elástica a 25°C, %	85	90	47	< 20
penetração a 4°C, 200 g, 60 s, $1/10$ mm	14	-	-	-
ponto de amolecimento, °C	69	60	67,7	52
Após RTFOT / PAV				
cisalhamento dinâmico: $G^*/\text{sen } \delta$ , °C	13	19	22	28
reômetro de flexão (BBR) a 60 s, °C	-18	-12	-12	-6
intervalo plástico, °C	110	92	92	80
PERFORMANCE GRADE	82 – 28	70 – 22	70 – 22	64 – 16

Nota: CR – Crumb Rubber

Oda e Fernandes Jr. (2000) avaliaram o ligante CAP 20 enriquecido com vários teores de borracha (6, 12, 18 e 24 % em duas granulometrias # 40 e 50) com ensaios tradicionais das especificações brasileiras e com os ensaios da especificação SUPERPAVE™. Foram adotadas como temperaturas de mistura ligante/borracha 160 e 170°C. As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam os efeitos do teor de borracha (encontrado como mais importante) nas propriedades reológicas diretamente relacionadas com as principais formas de deterioração estrutural de uma mistura asfáltica. Pode se observar que as misturas com os maiores teores de borracha apresentam os maiores valores de  $G^*/\text{sen } \delta$ , ou seja, são mais resistentes ao acúmulo de deformações permanentes. Também apresentam valores de ângulo de fase ( $\delta$ , delta) decrescente com o teor de borracha, o que significa um aumento da resistência à formação de trincas por fadiga no pavimento (devido a maior elasticidade do ligante).

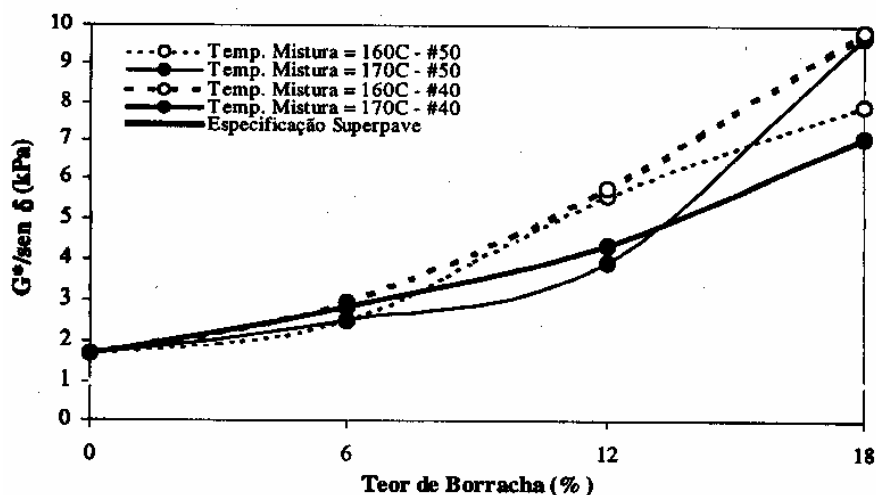


Figura 3.3 – Efeito do teor de borracha na resistência ao acúmulo de deformação permanente  
Fonte: Oda e Fernandes Jr. (2000)

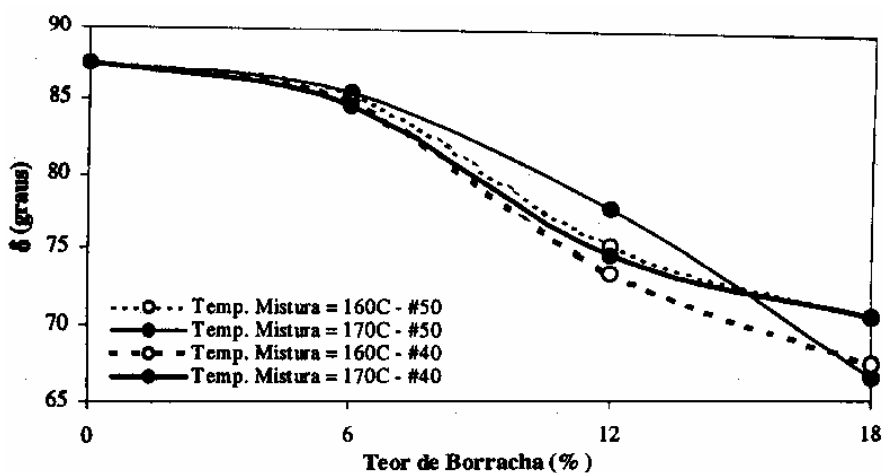


Figura 3.4 – Efeito do teor de borracha no ângulo de fase,  $\delta$   
Fonte: Oda e Fernandes Jr. (2000)

Daly e Meguescu (1997) avaliaram os efeitos da adição de duas granulometrias de borracha em misturas com dois cimentos asfálticos (AC-5 a AC-30). Os autores constataram que as propriedades mecânicas do asfalto-borracha são influenciadas pela granulometria da borracha, composição química do asfalto e quantidade de pó de borracha adicionado. Os autores verificaram compatibilidade e interação, apenas para aquelas misturas feitas com a menor granulometria.

Bahia e Davies (1995) realizaram um estudo de laboratório para avaliação dos parâmetros de resposta baseados nas especificações da pesquisa SHRP. Como fatores controláveis foram  
Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus

eleitas a fonte e a quantidade de CRM (três tipos de produção: cisalhamento, criogenia e extrusão, e teores entre 0 a 25 % em relação à massa de asfalto), tipos de asfalto (dois tipos, 200/300 pen e AR-2000) e a temperatura de ensaio. Na Figura 3.5 são apresentados os resultados típicos da influência do percentual de borracha e da temperatura na viscosidade do ligante, sendo que as análises ANOVA apresentadas, denotam o fator controlável percentual de borracha como principal.

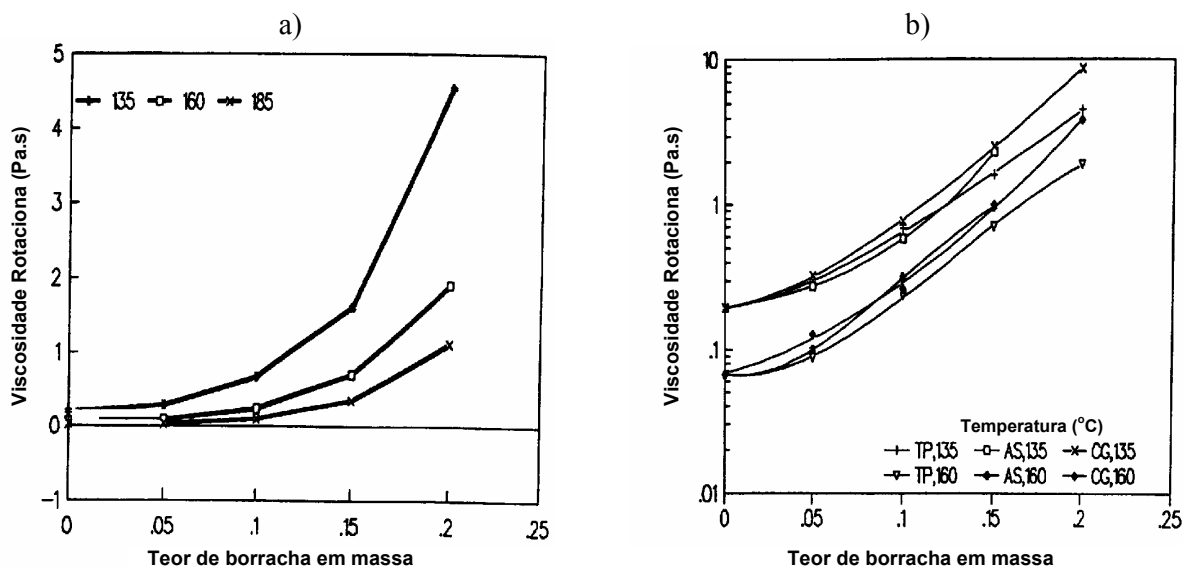


Figura 3.5 – Relação entre viscosidade, % de borracha e temperatura  
Fonte: Bahia e Davies (1995)

Para os demais parâmetros medidos ( $G^*/\text{sen}\delta$ ,  $G^*\text{sen}\delta$  e *creep*) aparecem como fatores significativos: a temperatura, seguida do percentual de borracha e do tipo de asfalto. A influência do processo de obtenção de CRM é desprezível, quando comparado às outras variáveis estudadas.

Roberts *et al.* (1989) apresentam uma comparação entre o AB produzido com dois resíduos de borrachas vulcanizadas e desvulcanizadas. Na Figura 3.6 é apresentada a relação entre o percentual de borracha adicionada e a viscosidade para os dois materiais.

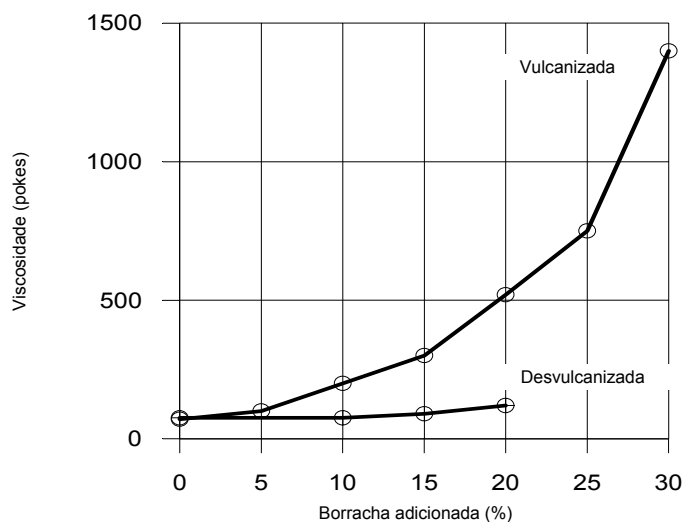


Figura 3.6 – Efeito do teor de borracha na viscosidade do AB  
 Fonte: Roberts *et al.* (1989)

Liang e Lee (1996) avaliaram em laboratório o desempenho de dezoito misturas com CRM. O reômetro de cisalhamento dinâmico e o viscosímetro Brookfield foram utilizados para medição da viscosidade das misturas, observando-se que, quanto menores as granulometrias e maiores os percentuais de CRM, tanto maiores as viscosidades medidas, como apresentado na Figura 3.7 (a) e (b). O envelhecimento do ligante foi testado através do TFOT (Thin Film Oven Test) e os ligantes modificados apresentaram uma menor perda de massa em relação ao ligante convencional. Os ligantes modificados com CRM apresentaram altos valores de  $G'/G''$  (proporcionalidade entre percentual de CRM e a razão entre  $G'$  e  $G''$ ) indicando melhores características elásticas e maiores resistências à deformação permanente. Com relação aos ensaios de tração indireta, as misturas com ligante convencional apresentaram maiores diferenças de resultados antes e depois do envelhecimento em relação às misturas com borracha.



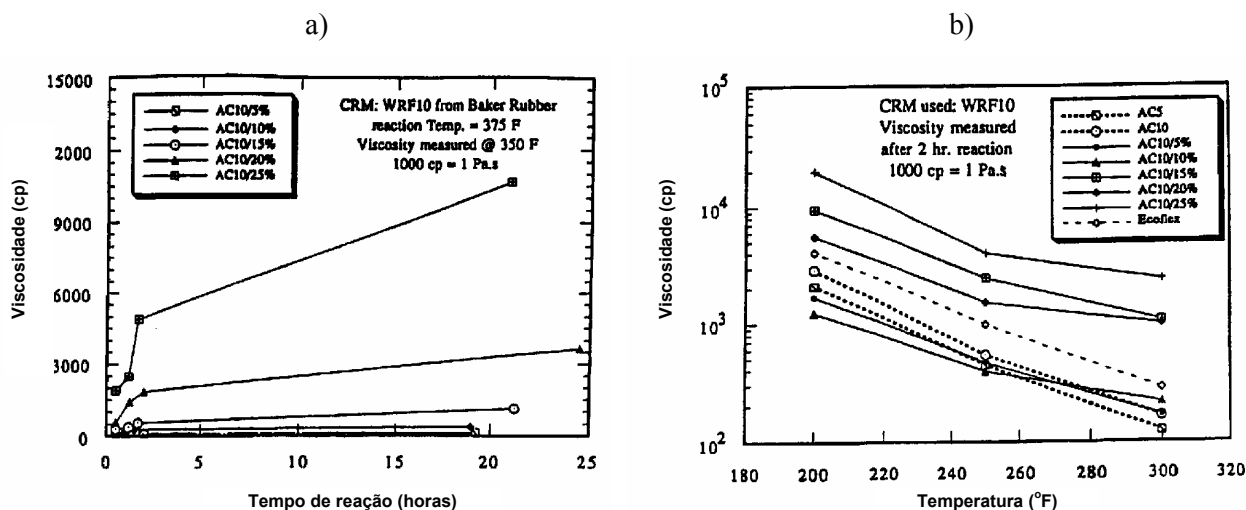


Figura 3.7 – Variáveis influentes na viscosidade da mistura AB

(a) – relação entre tempo de reação e viscosidade

(b) – suscetibilidade térmica das misturas de AB

Fonte: Liang e Lee (1996)

A adição de borracha vulcanizada em ligantes asfálticos amplia a faixa de temperaturas de aplicação, conforme demonstrados por Gowda *et al.* (1996). A Tabela 3.5 apresenta as classificações, segundo a metodologia SHRP, obtidas a partir da adição de CRM em asfalto convencional (AC-30) a 160°C por 1 hora.

Tabela 3.5 – Classificação do ligante modificado com CRM

Fonte: Gowda *et al.* (1996)

% borracha vulcanizada	Classificação (SHRP)
0	PG 64 - 22
5	PG 70 - 28
10	PG 80 - 28
15	PG 80 - 34

Zanzotto e Kennepohl (1996) estudaram várias formas de incorporação do pó de pneu ao asfalto e concluíram que, com a combinação de altas temperaturas e a agitação ou cisalhamento, as propriedades finais da mistura seriam mais adequadas. Na Figura 3.8 é apresentada a relação entre temperatura e percentual de borracha que não reagiu com o asfalto após 3 horas de mistura (teor adicionado = 25% em massa de ligante).

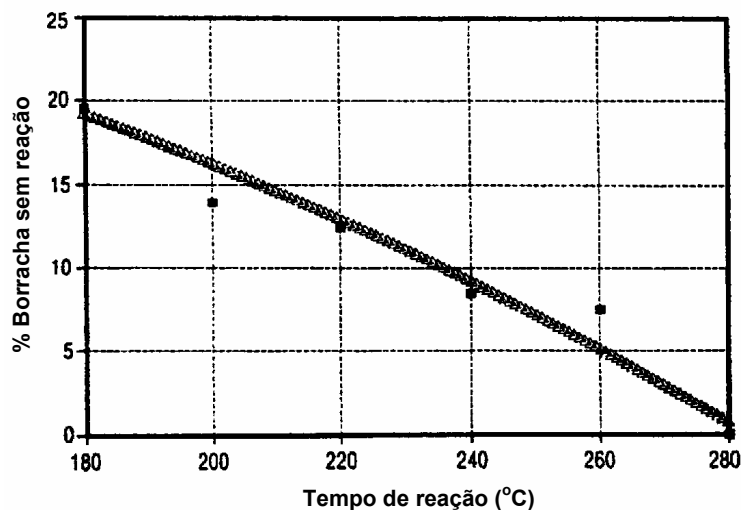


Figura 3.8 – Relação entre temperatura e percentual de borracha sem reação  
Fonte: Zanzotto e Kennepohl (1996)

Zamam *et al.* (1995) testaram sob vários aspectos o comportamento reológico de ligantes asfálticos modificados com diferentes percentuais de borracha (2,5 a 10 %). A melhoria do comportamento do ligante com borracha foi observado em ensaios de viscosidade dinâmica e *creep*. Pode ser observado, na Figuras 3.9, que as misturas modificadas com borracha, principalmente com os maiores teores, possuem um patamar de viscosidade constante sobre uma amplitude maior de graus de cisalhamento, o que é benéfico do ponto de vista de engenharia. Em relação ao comportamento de *creep*, também foi observado uma melhoria do AB em relação ao asfalto convencional, conforme mostrado na Figura 3.10.

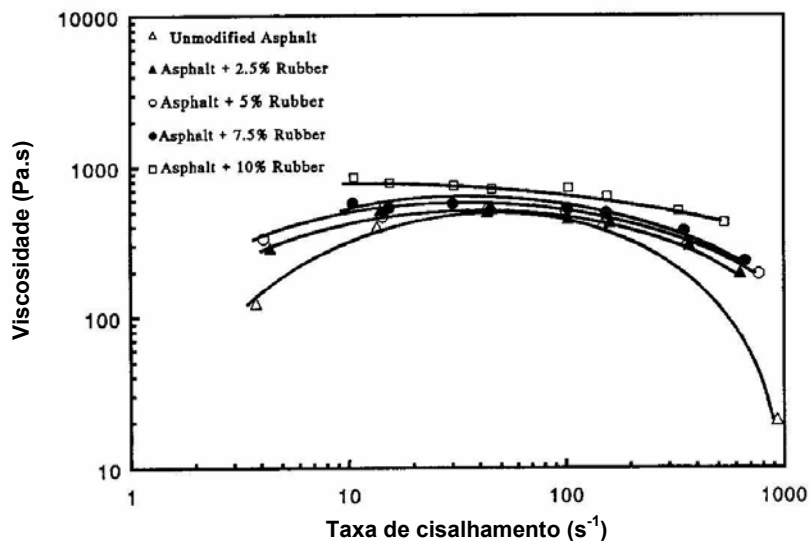


Figura 3.9 – Viscosidade em função do taxa de cisalhamento  
Fonte: Zamam *et al.* (1995)

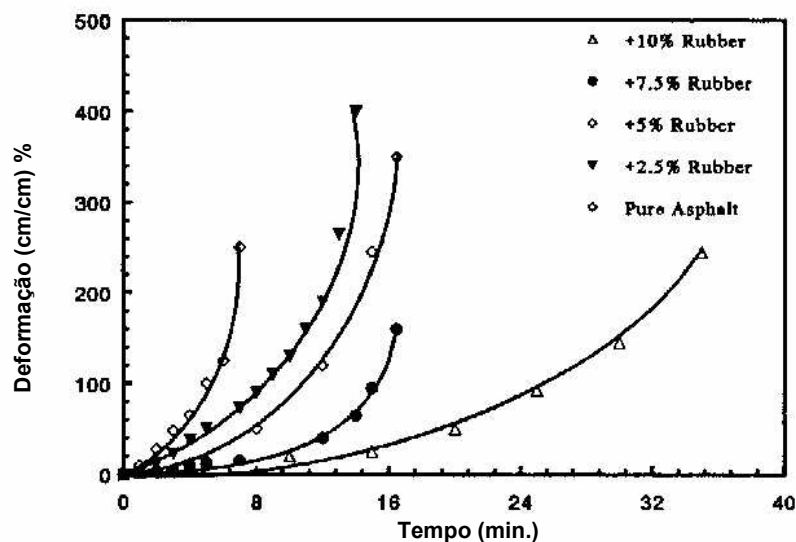


Figura 3.10 – Curvas de *creep* dos cimentos asfálticos com e sem borracha  
Fonte: Zamam *et al.* (1995)

Com relação ao tempo de reação Takallou e Sainton (1992), afirmam que, após um determinado tempo de digestão, ocorre uma alteração na viscosidade do ligante acrescido de borracha, conforme apresentado na Figura 3.11. Essa alteração leva a crer que, após um determinado tempo, o ligante aquecido a altas temperaturas tende a se deteriorar.

Os mesmos autores acreditam que uma das barreiras para utilização do AB é a sua baixa estabilidade à estocagem. Neste sentido, os autores estudaram a possibilidade de adicionar

catalisadores e óleos à mistura. Como resultado, os autores conseguiram misturas com muito boa estabilidade, podendo ser estocada por até seis dias sem nenhuma degradação.

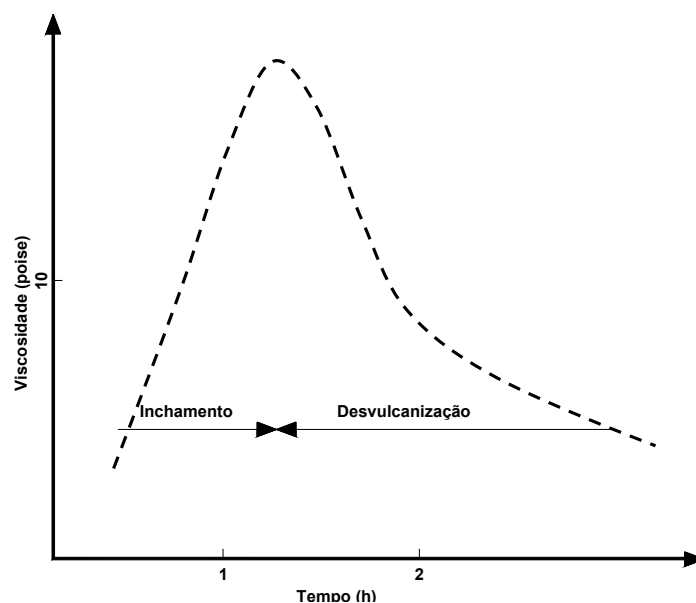


Figura 3.11 – Efeito do tempo de digestão na viscosidade do AB  
Fonte: Takallou e Sainton (1992)

### 3.2.3 Utilização do asfalto-borracha em obras de pavimentação

As técnicas de execução e manutenção de pavimentos utilizando o AB são basicamente as mesmas daquelas com misturas convencionais, entretanto, algumas modificações devem ser feitas na usina; devido as maiores viscosidades dos ligantes as bombas e canalizações devem possuir dimensões maiores que as usuais, bem como proteção térmica (em caso de temperaturas externas baixas).

As temperaturas de mistura e compactação são pouco acima das convencionais devido a maior viscosidade do ligante com borracha. Way (2000) relata em seu trabalho condições satisfatórias de mistura realizadas com ligante AC-10 e 20 % de borracha de pneu (100 % passando na peneira nº 10 – 2 mm e não mais que 5 % passando na peneira de nº 200 - 75 µm) à temperatura de 177°C, e compactação entre 135 e 104°C.

Kandhal (1992) recomenda temperaturas de mistura entre 163 – 190°C para utilização do AB em misturas de granulometria fechada e entre 135 – 163°C para misturas abertas de concreto betuminoso usinado a quente.

Fager (1996) apresenta o tipo de equipamento utilizado no estado do Kansas e CALTRANS (2003) traz a experiência californiana de produção do AB e a produção de misturas asfálticas com este ligante modificado.

O inconveniente de se utilizar o processo úmido, é a instabilidade do ligante asfáltico, ou seja a separação do ligante e da borracha durante a estocagem. Normalmente o AB é produzido junto à usina para imediata utilização. O tempo de espera está relacionado ao tamanho das partículas de borracha e da interação do asfalto com a borracha. Kandhal (1992) não recomenda a estocagem do AB, afirma que o produto deve ser feito e utilizado o mais rápido possível.

Roberts *et al.* (1989) recomendam como tempo máximo de armazenamento do AB, 16 horas após a produção. Para armazenamento e transporte o tanque ou caminhão não deve ser untado com produtos destilados de petróleo, o uso de misturas água/cal e emulsões a base de silicone são indicadas.

Para aplicação de concreto asfáltico como camada de reforço, é recomendação do FHWA/USDOT (1995) que, o pavimento esteja a uma temperatura mínima de 26°C. Roberts *et al.* (1989) sugerem a temperatura mínima do ar de 15°C para aplicação do CBUQ com AB.

Quanto ao processo de compactação o FHWA/USDOT (1995) recomenda a utilização de rolos lisos, com ou sem vibração. Rolos pneumáticos não devem ser utilizados, eles podem aderir ao ligante, tornando a superfície do pavimento bastante irregular. Recomenda-se, também a aspersão de água com detergente para evitar a aderência do rolo ao pavimento. Kandhal (1992) complementa afirmando que o uso de uma camada de areia sobre o pavimento (0,5 – 1,0 kg/m<sup>2</sup> de pavimento) pode facilitar a compactação, evitando aderência entre o rolo e o cimento asfáltico e permitindo a liberação do tráfego em um menor período de tempo.

Um aspecto que tem sido levantado e questionado a respeito da utilização da borracha em pavimentação, é a saúde dos trabalhadores devido a emissão de fumos durante os processos de mistura e de compactação, tanto no processo úmido quanto seco. Adams (2001) relatou que,

no estado norte-americano de New Jersey, foram monitoradas as emissões de gases de usinas que utilizavam ambos os processos de mistura e ambas estavam em acordo com a legislação americana.

São muitas as possibilidades de utilização do AB na engenharia rodoviária, praticamente as mesmas daquelas dos cimentos asfálticos convencionais e modificados com outros tipos de polímeros. Na seqüência serão abordadas as aplicações de maior freqüência.

### 3.2.3.1 Concreto asfáltico

O comportamento das misturas betuminosas tem sido extensivamente estudado, nos últimos anos, em diversos países do mundo (Monismith *et al.*, 1989; Goetz, 1989; Charles, 1989; Yondell e Smith, 1989; Ruth *et al.*, 1989; Hunter, 1994; AI, 1994; Epps *et al.*, 2000). Existe uma forte tendência de se abolir receitas prontas de misturas asfálticas e projetá-las de acordo com as solicitações e especificações de cada projeto (tráfego, estrutura, condições climáticas, etc.).

Para que a mistura asfáltica tenha um adequado comportamento no sistema multicamadas do pavimento existem algumas propriedades desejáveis: habilidade de distribuir tensões (rigidez), capacidade de resistir a deformações permanente excessivas, resistência à fissuração e durabilidade.

Vários fatores influenciam no comportamento e desempenho das misturas betuminosas: características do ligante e dos agregados, aditivos, temperaturas, umidade, carregamentos, envelhecimento, estado de tensões e método de compactação.

As principais características das camadas de rolamento em pavimentos flexíveis são de oferecer baixa deformabilidade (limites aceitáveis, de acordo com a estrutura do pavimento), resistência ao carregamento e as condições ambientais, além de proporcionar conforto de rolamento e de serem impermeáveis (exceto camadas porosas de atrito). No Quadro 3.2 são apresentadas as variáveis que afetam as propriedades das misturas em função de suas características fundamentais.

Uma patologia bastante comum encontrada em regiões de clima temperado é a fissuração por retração térmica e a fissuração por fadiga induzida por variações de temperatura. Fissuras de

retração ocorrem em temperaturas extremamente baixas (abaixo de  $-7^{\circ}\text{C}$ ) ou em condições de quedas abruptas de temperatura. As fissuras térmicas de fadiga ocorrem em temperaturas entre  $-7^{\circ}\text{C}$  e  $21^{\circ}\text{C}$  (Epps 1997). Quando o concreto asfáltico envelhece torna-se mais frágil e suscetível a fissuras térmicas.

Quadro 3.2 – Variáveis que afetam as propriedades da mistura  
Fonte: Monismith *et al.*, 1989

<i>Propriedade</i>	<i>Definição</i>	<i>Exemplo de variáveis de mistura que têm influência</i>
Rigidez	Relação entre tensão e deformação à determinada temperatura e tempo de carregamento	granulometria rigidez do asfalto grau de compactação sensibilidade à água teor de ligante
Estabilidade	Resistência à deformação permanente (geralmente a altas temperaturas e longos tempos de carregamento)	textura sup. do agregado granulometria rigidez do asfalto grau de compactação sensibilidade à água teor de ligante
Durabilidade	Resistência ao intemperismo (ar, água) e a ação abrasiva do tráfego	teor de ligante granulometria grau de compactação sensibilidade à água
Resistência à fadiga	Abilidade da mistura deformar sob carregamento repetido sem romper	granulometria teor de ligante grau de compactação rigidez do asfalto sensibilidade à água
Características de fratura	Resistência da mistura sobre aplicação de carga	granulometria tipo de agregado teor de ligante grau de compactação rigidez do asfalto sensibilidade à água
Atrito	Abilidade da mistura de prover adequado coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento molhado	textura do agregado e resistência ao polimento granulometria teor de ligante
Permeabilidade	Abilidade do ar, água e vapor d'água mover-se através da mistura	granulometria teor de ligante grau de compactação

Hunter (1994) separa de forma bem clara, dentro de certos limites, o comportamento das misturas betuminosas como dependentes das características dos agregados, (características de deformabilidade plástica) e do ligante (características de fadiga). Torna-se evidente a

importância da seleção desses materiais, bem como sua interação, para o bom desempenho da mistura final. Na Figura 3.12 está apresentado uma tentativa de quantificação do percentual de influência de agregados e ligante para cada uma das patologias mais comuns em pavimentos asfálticos.

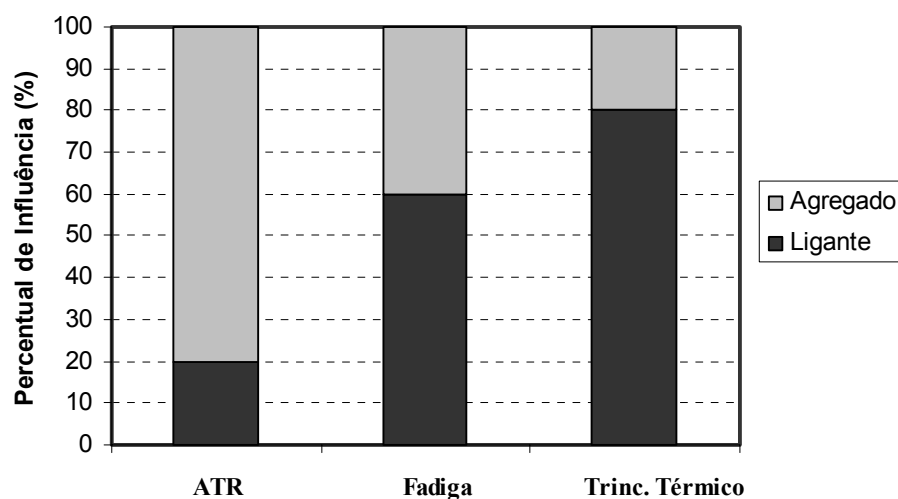


Figura 3.12 – Influência do agregado e do ligante no desempenho do CBUQ  
Fonte: FHWA (2002)

No Brasil, os projetos de misturas asfálticas são feitos de acordo com a metodologia Marshall. O Método Marshall foi desenvolvido na década de 30, nos Estados Unidos e é baseado na estabilidade e fluência que a mistura apresenta, além da densidade e volume de vazios (DNER, 1964; DNER, 1994; Hunter, 1994; AI, 1995a). Como consequência dos avanços internacionais, ensaios adicionais têm se tornado rotina em projetos de camadas asfálticas, tais como módulo de resiliência e resistência à tração (DNER, 1984; DNER, 1986).

Von Quintus *et al.* (1989) apresentaram uma nova filosofia de projeto de misturas asfálticas, o AAMAS – *Asphalt-Aggregate Mixtures Analysis Sistem*, onde se lança mão das ferramentas tradicionais complementadas com ensaios que represente de forma adequada as características fundamentais das misturas, tais como módulo de resiliência, vida de fadiga, deformação permanente e *creep*. O mesmo autor salienta a importância da reprodução das características de compactação do campo em laboratório para adequada caracterização dos materiais.

Epps (1997) comparou, através de ensaios de laboratório que simulam as severas oscilações térmicas dos desertos norte americanos, misturas asfálticas confeccionadas com ligantes



convencionais e modificados com CRM e constatou as melhorias causadas pela adição de borracha aos ligantes asfálticos sob estas condições. A autora constatou, também, que as análises dos ligantes não são suficientes para quantificar esta melhoria, são necessários, ainda ensaios em amostras de concreto asfáltico.

Madapati *et al.* (1996) estudaram a viabilidade do uso de borracha de pneus em misturas asfálticas. A pesquisa foi baseada em estudo de laboratório juntamente com a aplicação de modelos para previsão de desempenho das misturas. Foram estudadas misturas com processo seco e úmido de incorporação da borracha. O projeto das misturas asfálticas foi feito segundo a metodologia Marshall e SUPERPAVE™ nível 1. Os teores de ligante para os 4 agregados testados foram de 1 a 2 % maiores para as misturas com borracha em relação as misturas de referência (asfalto puro). Comparativamente, a metodologia Marshall apresentou para todos os casos, teores de ligante 0,1 a 0,5 % superiores ao do SUPERPAVE™. Os valores de rigidez e resistência não apresentaram variação significativa entre as misturas com e sem borracha. Ensaio de *creep* foram realizados e modelos de deformação permanente aplicados supondo um tráfego de  $62 \times 10^6$ , temperaturas locais (*Rhode Island – USA*) e período de projeto de 20 anos. Os resultados indicaram um decréscimo de 18 % no afundamento de trilha de roda para as misturas que utilizaram o processo úmido e um pequeno acréscimo (1,4 %) para as misturas com o processo seco.

Harvey (1992) verificou, através da metodologia Hveen, que o teor de ligante de projeto de misturas asfálticas com dois agregados diferentes é de aproximadamente 2 % superior quando se utiliza AB. O autor verificou a superioridade das misturas com ligante emborrachado quando submetidas a ensaios de deformação permanente e, em contrapartida, seu mau desempenho nos valores de estabilidade Hveen.

Page *et al.* (1992) relatam uma pesquisa, no estado da Flórida, onde foram construídas 18 seções teste para estudar a adição de borracha em concreto asfáltico. Os teores de borracha variaram de 3,1 a 20,5 % em relação à massa do ligante. Os autores relatam a importância da combinação das variáveis que influenciam a mistura: tamanho das partículas de borracha, temperatura de mistura e tipo de ligante. Em relação ao ligante, quanto maior a fração oleosa mais eficiente a interação com o CRM. Foi observado que a estocagem em condições controladas pode ser de até seis horas.

Sousa *et al.* (1999) realizaram pesquisa visando à caracterização de misturas asfálticas com ligante convencional e modificado com 20 % de borracha. Foram realizados ensaios de fadiga, módulo de elasticidade e dois tipos de ensaios para caracterizar a deformação permanente. Os ensaios de fadiga e módulo foram realizados a partir de amostras com e sem envelhecimento (envelhecimento simulado em estufa a 85°C durante 5 dias). A resistência à fadiga das misturas com borracha chega a ser, para certas condições, 10 vezes superior, quando comparada a convencional. Os resultados dos ensaios à fadiga realizados em amostras submetidas a envelhecimento apresentam uma diferença bastante significativa, sendo as de AB pouco sensíveis a ação simulada de envelhecimento. Com relação aos ensaios de rigidez, os autores observaram valores maiores para a mistura convencional, sendo que este se mostrou também mais sensível ao envelhecimento. Os ensaios de deformação permanente apresentaram uma inconsistência, os ensaios realizados com simulação de tráfego indicaram como melhores as misturas convencionais (apesar de ambas estarem dentro das especificações espanholas), e os ensaios de cisalhamento dinâmico permitiram concluir que as misturas modificadas com 20 % de borracha são superiores.

Saboundjian e Raad (1997) avaliaram o desempenho de vários trechos de concreto asfáltico construídos no estado americano do Alaska, nas décadas de 70 e 80. O objetivo principal do estudo foi avaliar comparativamente o desempenho de misturas asfálticas com borracha, tanto o processo úmido quanto o *PlusRide* comparado com misturas convencionais. Foram retiradas amostras de várias rodovias e realizados ensaios de fadiga, deformação plástica e trincamento térmico. Os ensaios de fadiga, apresentados na Figura 3.13 (a) e (b), realizados à deformação controlada indicaram que a incorporação de borracha vulcanizada as misturas melhoram a resistência à fadiga das misturas. Com relação ao trincamento térmico, os resultados mostraram que a presença da borracha melhora a resistência da mistura, principalmente quando o processo úmido é utilizado. Os autores verificaram uma boa concordância entre os resultados dos ensaios de trincamento (térmico) e a suscetibilidade do ligante à variação de temperatura. Sugerem que estes ensaios podem dar idéia do fendilhamento a baixas temperaturas. Com referência aos ensaios de deformação plástica observou-se maiores valores para as misturas com borracha, notadamente aquelas onde o *PlusRide* foi usado, sugerindo que as partículas de borracha sirvam como lubrificante dos agregados pétreos.

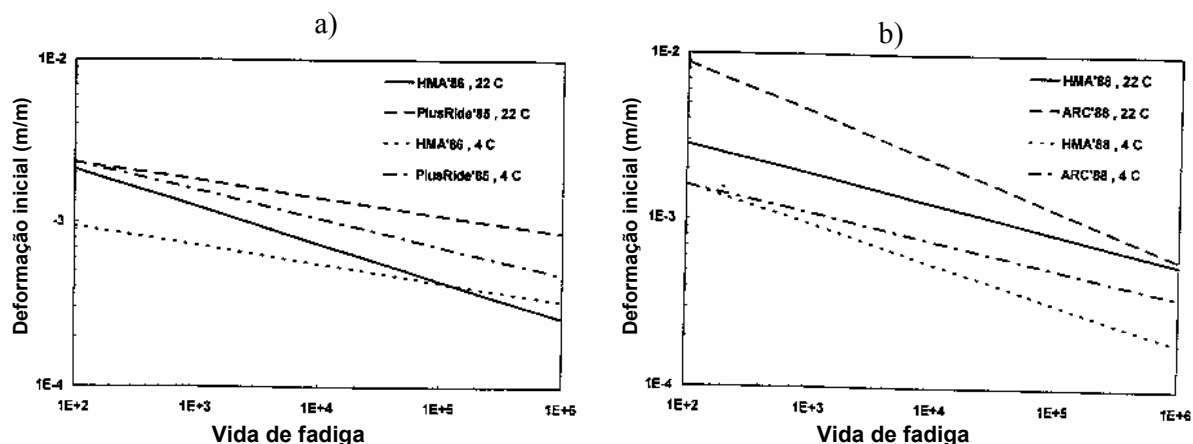


Figura 3.13 – Comportamento à fadiga de algumas misturas testada no Alaska  
 (a) – misturas convencionais e com borracha (*Plusride*)  
 (b) – misturas convencionais e com borracha (*AB – processo úmido*)  
 Fonte: Saboundjian e Raad (1997)

Larsen (1989) publicou um relato do desempenho de uma seção teste de AB no estado do Connecticut, a qual foi monitorada durante oito anos. Tratava-se de um recapeamento asfáltico em uma superfície trincada. O parâmetro de qualidade controlado foi o trincamento refletido na camada de revestimento (quantidade e severidade de trincas), e foi observado um melhor desempenho da camada executada com borracha.

Gowda *et al.* (1996) desenvolveram uma ampla pesquisa em laboratório, para avaliar o comportamento mecânico das misturas com borracha, envolvendo os processos úmido e seco de mistura. Foram projetadas sete misturas, uma de referência, 3 com *wet process* (5, 10 e 15 % de CRM) e 3 com *dry process* (1, 2 e 3 % de CRM) seguindo as metodologias Marshall e SUPERPAVE™ nível 1, e realizados ensaios de deformação plástica, módulo de resiliência e tração indireta. Os autores chegaram as seguintes conclusões: (1) para todas as misturas testadas o teor de asfalto determinado através do método Marshall é superior (0,9 a 1,3 %) aos valores do SUPERPAVE™ – conclusão concordante com a de Madapati *et al.* (1996); (2) o processo seco de adição de borracha demonstra uma tendência de redução na rigidez em relação à mistura ligante convencional, com AB não houve variação significativa; (3) os ensaios de deformação permanente com envelhecimento apresentaram resultados mais adequados quando da presença de CRM à mistura.

Misturas asfálticas fabricadas com AB requerem, normalmente maiores teores de ligante do que as misturas com ligantes convencionais. Existem pelo menos duas razões para que isto ocorra: (1) o *asphalt-rubber* é significativamente mais viscoso que os ligantes convencionais,

formando um filme mais espesso na superfície do agregado e (2) as partículas de borracha que acaso não tenham reagido com o asfalto, atuarão como sólidos, aumentando o volume de ligante, mas não necessariamente às suas características de adesividade. Segundo Epps (1994) pode se considerar que se for adicionado 20 % de borracha ao ligante o teor de ligante aumentará 20 % em relação à mistura sem borracha.

Fager (1996) relata uma experiência do KDOT (Kansas Department of Transportation), onde foram construídos 15,25 km de CBUQ com borracha (*wet process*) na *Interstate 135*, próximo a McPerson Conty. Em 1993 foram realizadas várias análises de custo e algumas estratégias de recuperação da I 135. Para um período de 30 anos o desempenho da mistura enriquecida com borracha deveria durar 27 % a mais para que compensasse o investimento inicial 50 % mais alto. Quatro alternativas foram executadas, tipo *full depth* com AB, com duas camadas de asfalto-borracha iguais de mesma espessura àquela tida como referência e uma quarta com mesmo custo, ou seja, com espessuras reduzidas de AB. O autor acredita que misturas descontínuas são mais efetivas no controle da fissuração, motivo este que levou as camadas de rolamento serem construídas com esta granulometria. Até a data de publicação do trabalho o pavimento não apresentava nenhum tipo de patologia.

As misturas descontínuas tendem a combinar a estabilidade do agregado ou esqueleto mineral com a elasticidade proporcionada pelo ligante modificado. O teor de ligante é geralmente maior que o utilizado em misturas densas variando de 8 a 9%.

Maupin Jr. (1996) descreve a experiência realizada pelo departamento de transporte do estado da Virginia, onde foram construídas 4 seções testes em rodovias daquele estado, utilizando os processos úmidos McDonald e Rouse. As principais conclusões foram: (1) ambos os processos úmidos utilizados são viáveis para utilização de CRM em concreto asfáltico; (2) apesar do curto espaço de tempo para análise, as misturas com borracha apresentaram um comportamento global tão bom quanto às misturas convencionais, além de apresentar um menor afundamento de trilha de roda; (3) houve um acréscimo no custo de produção de misturas modificadas de 50 a 100 % nestes trechos experimentais, entretanto, os autores acreditam que com o aumento da demanda estes custos possam ser reduzidos.

Way (2000b), como engenheiro do Departamento de Transportes do Arizona, o caso de obra em que foi restaurado um trecho de 16,7 km da *Interstate 40* próximo a Flagstaff, no ano de 1990. Trata-se de uma rodovia com grande volume de tráfego (20000 veículos por dia, dos

quais aproximadamente 35 % são caminhões pesados) construída em pavimento rígido, que se encontrava em péssimas condições devido a grande percentagem de área trincada. O clima da região é semelhante ao alpino com temperaturas variando entre 27°C no verão e - 31°C no inverno. Várias soluções de reabilitação foram cogitadas, entretanto, devido as restrições econômicas e temporais o projeto ficou estabelecido em uma camada de recapeamento com 12,5 cm de espessura, das quais 7,5 de concreto asfáltico convencional e 5 de concreto asfáltico com AB. Em alguns trechos foi ainda construída uma camada de 12,5 cm de concreto asfáltico poroso com AB. Um pequeno trecho com apenas concreto asfáltico convencional, também foi construído como referência.

O autor verificou um aumento de 100 % no custo de produção da mistura asfáltica com borracha, custo diluído facilmente com a redução na espessura e nas manutenções. Durante os nove anos em que a rodovia foi acompanhada, apresentou excelente desempenho, não apresentando deformações plásticas excessivas nem fissuras, as condições de superfície, monitoradas com o *Mu meter* também foram bastante satisfatórias. Nas Figuras 3.14 e 3.15 são apresentadas as comparações de área trincada e custo de manutenção para as misturas convencionais e com ligante modificado com borracha de pneus (dados publicados pelo mesmo autor em 2003).

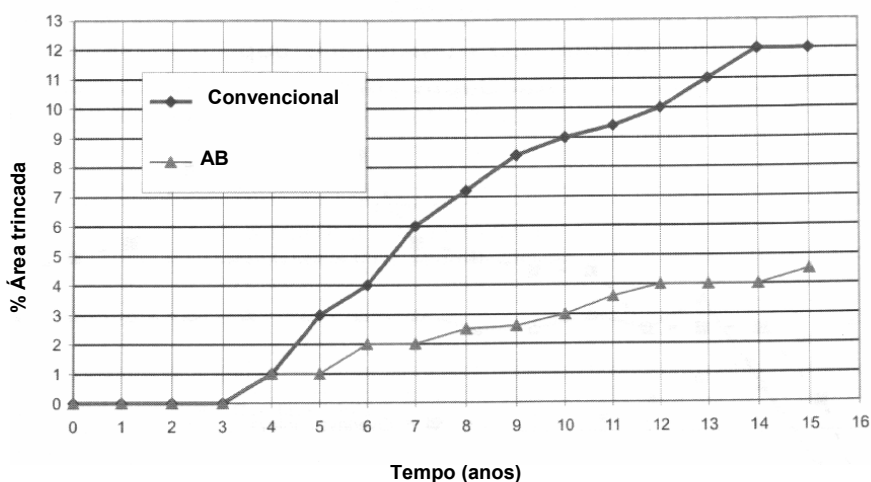


Figura 3.14 – Percentagem de área trincada em um período de 15 anos com e sem AB  
Fonte: Way (2003)

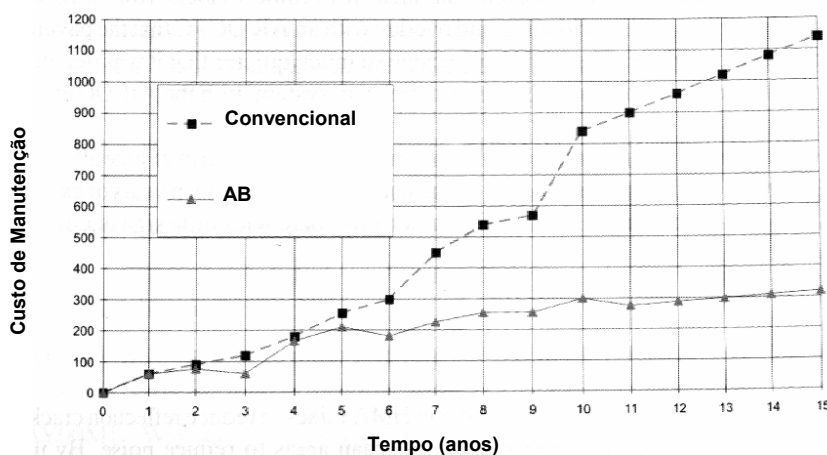


Figura 3.15 – Custo de manutenção com e sem AB (US\$/pista/km)  
Fonte: Way (2003)

O LCCA (*Life Cycle Cost Analysis*) é reconhecidamente uma grande ferramenta para auxiliar na tomada de decisão, tanto na manutenção como em implantação de rodovias, no que diz respeito ao conjunto de estratégias de conservação e restauração a serem adotadas. Hicks e Epps (1999) analisaram o custo do ciclo de vida para misturas contendo AB, considerando um período de 40 anos. Como conclusões gerais do estudo, os autores mencionam: (1) na grande maioria dos casos as estratégias que utilizam materiais com AB (SAMI, CBUQ, etc.) possuem uma relação custo/benefício vantajosa quando comparada aquelas que utilizam cimentos asfálticos convencionais; (2) a maior potencialidade da utilização do AB é em camadas de reforço onde a reflexão de trincas é esperada; (3) a vantagem da utilização do AB em concreto asfáltico se dá somente se houver redução na espessura da camada ou uma sobrevida em relação às misturas convencionais.

A utilização de misturas com asfalto-borracha têm demonstrado um desempenho muito superior às das misturas convencionais. Deste modo as especificações da Califórnia chegam a permitir uma redução de 50 % na espessura das camadas betuminosas quando o AB é utilizado (FHWA/U.S.DOT, 1995). Na Tabela 3.6 são apresentados os coeficientes de equivalência estrutural recomendados pelo CALTRANS.

Raad *et al.* (1993) publicou pesquisa em que se compararam as propriedades à fadiga do concreto asfáltico usinado à quente com AB (misturas descontínuas) e concreto asfáltico usinado à quente convencional (mistura densa). Os resultados dos ensaios de laboratório foram combinados com uma análise mecânica para que fossem determinados os coeficientes de equivalência estrutural. Os valores variavam entre 1,5:1 a 3:1 dependendo da rigidez da camada de base.

Tabela 3.6 – Equivalências estruturais utilizadas na Califórnia (mm)

Fonte: FHWA/U.S.DOT (1995)

<i>CBUQ Denso</i>	<i>AB – Descontínuas<sup>1,5</sup></i>	<i>AB – Descontínuas + SAMI</i>
45	30 <sup>2</sup>	-
60	30	-
75	45	30
90	45	30
105	60	45
120	60	45
135	45 <sup>3</sup>	60
150	45 <sup>4</sup>	60
165	60 <sup>3</sup>	45 <sup>3</sup>
180	60 <sup>4</sup>	45 <sup>4</sup>

<sup>1</sup> – A máxima equivalência não experimental permitida é 2:1;<sup>2</sup> – A espessura mínima de AB permitida é 30 mm;<sup>3</sup> – Colocar 45 mm de CBUQ novo antes;<sup>4</sup> – Colocar 60 mm de CBUQ novo antes;<sup>5</sup> – Em áreas sujeitas a cobertura do pavimento por neve, substituir a mistura descontínua por densa.

Epps (1994) revisou o estado-da-prática da utilização de resíduos de pneus na engenharia rodoviária e da aplicação do pó em misturas asfálticas traçando as seguintes considerações a respeito das propriedades da mistura:

- i) estabilidade e fluência: com relação ao projeto da mistura seguindo a Metodologia Marshall, os valores de estabilidade podem ser reduzidos e os de fluência aumentados;
- ii) módulo de resiliência e resistência à tração: os valores de módulo de resiliência e resistência à tração podem aumentar ou diminuir, dependendo das condições particulares da mistura (granulometria dos agregados, % borracha etc.);
- iii) deformação permanente: não há consenso a respeito do efeito da borracha na deformação permanente, há experiências positivas e negativas;
- iv) fadiga: a vida de fadiga é melhorada quando o farelo de borracha é adicionado às misturas asfálticas;
- v) trincamento térmica: há um aumento na resistência ao trincamento térmico. As características da mistura têm papel importante neste aspecto do comportamento em serviço;
- vi) abrasão superficial: no estado da Califórnia é reportado melhoramento nas características de resistência à abrasão superficial;

vii) susceptibilidade à água: a susceptibilidade à água pode ser um problema quando a borracha é adicionada a mistura;

vii) atrito: em geral a presença de borracha reduz o atrito.

### 3.2.3.2 Camada porosa de atrito

O uso de concreto asfáltico poroso ou camada asfáltica drenante em rodovias tem sido cada vez mais freqüente, principalmente em países da Europa. As vantagens deste material são: redução ou inexistência do *spray* e da aquaplanagem, melhoria da visibilidade noturna (redução do efeito espelho noturno), redução do nível de ruído e aumento da aderência pneu/pavimento (Sainton,1990; Van der Zwan, 1990; Hunter,1994). Normalmente o volume de vazios varia entre 18 e 24 %, para tanto é necessário a utilização de curvas granulométricas mais uniformes que as utilizadas em concreto asfáltico denso.

Devido ao grande volume de vazios da mistura e do baixo percentual de ligante utilizado, os ligantes asfálticos com resistência à oxidação e baixa suscetibilidade térmica são requeridos para a manutenção das características de rigidez, de resistência à fadiga e de desagregação superficial das camadas porosas de atrito.

Sainton (1990) estudou comparativamente a utilização de ligantes modificados com borracha e ligantes convencionais. As especificações para o ligante modificado com borracha são apresentadas na Tabela 3.7. O autor verificou que as propriedades reológicas do AB são notavelmente superiores para aplicação em camadas porosas: viscosidade a 200°C dez vezes maior que a do asfalto convencional, a alta elasticidade mesmo a baixas temperaturas e boa resistência ao envelhecimento.

Tabela 3.7 – Especificações do ligante modificado com borracha utilizado por Sainton (1990)

<i>Especificação</i>	<i>Valor</i>
penetração, 25°C, 100 g, 5 s ( $1/10$ mm)	50-80
ponto de amolecimento (°C)	maior que 60°C
massa específica, 18°C (g/cm <sup>3</sup> )	1,0

Heystraeten e Moraux (1990) acreditam que os ligantes modificados com borracha, quando utilizados em camada porosa possibilitam uma cobertura mais uniforme do agregado e por serem resistentes a intempéries aumentam a vida de serviço do pavimento. Na Bélgica 60 %



dos pavimentos construídos com camadas de concreto asfáltico poroso, usam ligantes modificados com borracha reciclada.

Way (2000) relata casos de sucesso da aplicação do *asphalt rubber* em camadas de atrito no Arizona, na *Interstate 19*, próximo a Flagstaff e na *Interstate 19*, próximos a cidade de Tucson, onde utilizou 6 % de ligante.

### 3.2.3.3 Camada anti-reflexão de trincas

O fenômeno do trincamento tem sido bastante estudado, devido a sua relevância no desempenho de pavimentos. A formação das trincas em pavimentos novos é, normalmente consequência da fadiga ou da retração térmica nos revestimentos asfálticos. Na Figura 3.16 são apresentados os modos de fratura característicos e movimentos nos bordos das trincas. O modo 1 é relativo a retração térmica, o segundo é a combinação do modo 1 mais a movimentação induzida pela carga de roda dos veículos, e o modo 3, representa o rasgamento do pavimento gerado pelo carregamento em apenas um dos lados da fissura.

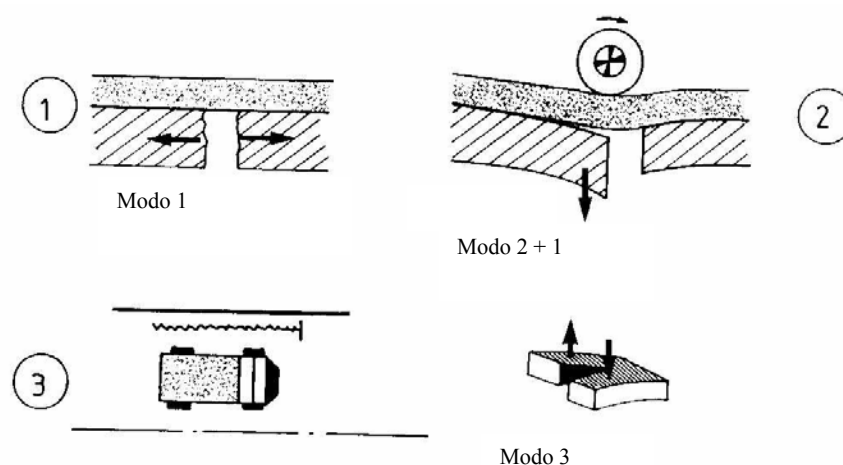


Figura 3.16 – Modos de fratura e movimentação de trincas  
Fonte: Colombier (1989)

Jacobs *et al.* (1996) verificaram em seu estudo sobre o crescimento de fissuras em misturas de concretos asfálticos, três fases distintas, como pode ser observado na Figura 3.17: (i) fase de crescimento adesivo – referente a adesão ligante/agregado, a fissura se propaga na interface;

(ii) fase de crescimento coesivo da fissura – referente as características do betume e da argamassa ou mástique; (iii) fase de retardamento da fissura – processo que cessa temporariamente ou redireciona a trinca, por exemplo quando encontra um agregado em sua extremidade.

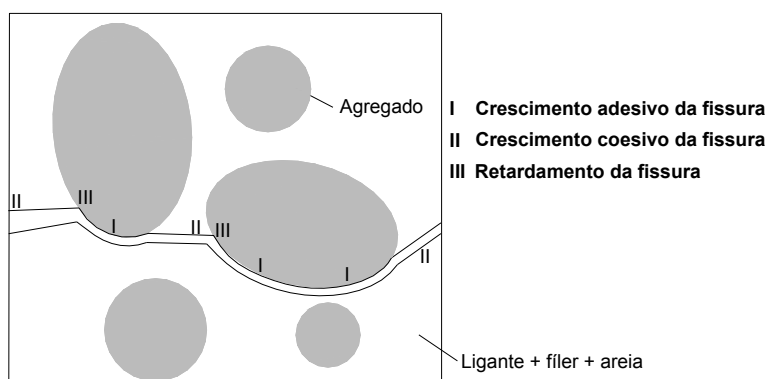


Figura 3.17 – Fases de crescimento da fissura em concreto asfáltico  
Fonte: Jacobs *et al.* (1996)

A reflexão de trincas pode ser definida como o reaparecimento na superfície de uma camada asfáltica de recapeamento, do padrão de trincamento que existe na camada subjacente. É um fenômeno que tende a controlar o desempenho do pavimento restaurado, comprometendo sua vida de serviço. Sua ocorrência está associada a incapacidade que as misturas asfálticas convencionais têm de suportar as elevadas concentrações de tensões e as deformações a que são submetidas na região do entorno da extremidade das trincas subjacentes, quando da passagem de uma carga de roda ou de movimentações de natureza térmica das camadas.

A reflexão de trincas pode ser reduzida, através das seguintes alternativas:

- i) reciclagem do revestimento trincado antes do recapeamento, com a finalidade de eliminar as trincas existentes;
- ii) aplicação de recapeamento com misturas asfálticas com asfalto de baixa viscosidade;
- iii) aumento da espessura da camada de recapeamento, de modo atrasar a ascensão da trinca. Pode ser necessário um grande aumento de espessura;

vi) atrasar o início do trincamento na face inferior da camada de recapeamento, através da construção de camada intermediária com característica específica.

A literatura mostra que existem várias alternativas para se minorar o problema da reflexão das trincas. Em relação às camadas intermediárias, elas podem ser classificadas da seguinte forma:

i) camadas de alívio de deslocamento: quando a severidade do trincamento é grande, recomenda-se a colocação de uma camada de areia ou brita entre a camada fendilhada e o novo revestimento (Pinto, 1991);

ii) camadas de desvio de trinca: camada intermediária que provoca um redirecionamento da trinca com a repetição de carga. Este mecanismo é devido a um desligamento, diminuindo, portanto, o fornecimento de energia para a trinca atingir a superfície da camada superior. A concentração de tensões na extremidade da trinca que é transferida para a camada subjacente é atenuada. Exemplos deste tipo de camada são os geotêxteis impregnados com ligantes betuminosos. No Brasil, destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Pinto (1991), Vilches (1996) e Palma *et al.* (2000).

iii) camadas de alívio de tensões: trata-se da construção de membranas de asfalto-borracha impregnado com agregado miúdo pré-aquecido. A mistura resultante tem elevada deformabilidade e proporciona uma excelente ligação com o revestimento antigo. Essas membranas suportam elevadas deformações sem romper, nas faixas de temperaturas observadas nos pavimentos.

Segundo Sainton (1990) o primeiro uso de ligantes modificados com borracha foi em camadas anti-reflexão de trincas, como SAM (*stress absorbing membrane*) e SAMI (*stress absorbing membrane interlayer*). SAMI's são dispositivos colocados no interior ou na base da camada asfáltica de reforço para retardar a reflexão de trincas. Nessa alternativa são, normalmente, misturados 25 a 30 % de borracha na mistura asfáltica. Para facilitar a aplicação por aspersão do ligante pode ser adicionado querosene para reduzir sua viscosidade.

Heitzman (1992) relata que, no estado do Arizona, as primeiras aplicações de membranas de asfalto-borracha datam do final da década de 60 e são muito utilizadas até hoje.

Bingfu (1989) cita importante experiência realizada na China, onde foram realizados trechos experimentais com SAM e SAMI para verificar a eficiência destas soluções na redução da

reflexão de trincas em recapeamentos asfálticos. Após um ano de acompanhamento os resultados demonstraram as grandes potencialidades deste tipo de solução, reduzindo não apenas a reflexão de trincas, mas a qualidades superficial da rodovia, evitando a entrada d'água nas camadas de base e subleito do pavimento. Os autores trazem recomendações sobre as quantidades de ligante e agregado para um desempenho otimizado das membranas. A quantidade de borracha utilizada neste caso foi de 20 a 25 % em relação a massa do asfalto e a reação foi obtida à 180°C durante duas horas.

Coetzee (1979) citado por Rodrigues (1991), realizou uma análise de tensões na extremidade de uma trinca em uma camada de concreto de cimento Portland reforçada com uma camada asfáltica de recapeamento, com e sem o uso de membrana de AB (SAMI). A análise, a partir do Método dos Elementos Finitos apresentada na Figura 3.18, demonstra a eficácia da utilização de membranas como camadas anti-reflexão de trincas.

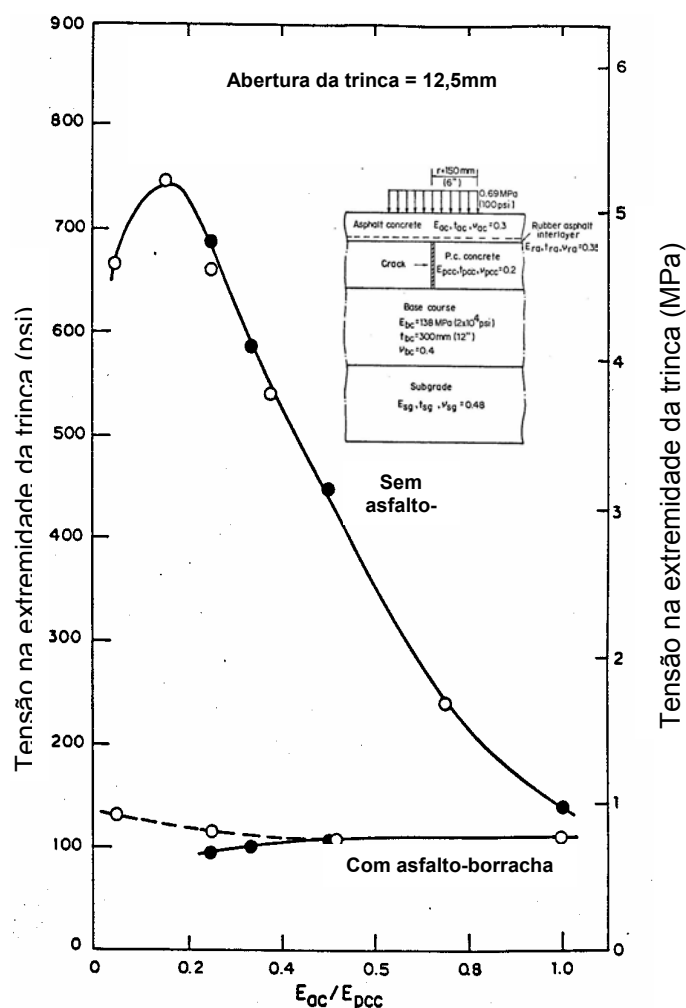


Figura 3.18 – Concentração de tensões, com e sem membrana de borracha  
Fonte: Coetzee (1979) (apud Rodrigues, 1991)

A experiência texana, relatada por Estakhri *et al.* (1992), demonstra que naquele estado as membranas utilizando asfalto-borracha no lugar do asfalto convencional são preferidas, principalmente em condições adversas de temperatura, tráfego pesado e trincamento severo da camada a ser restaurada.

#### 3.2.3.4 Selagem de trincas

A presença de água nas camadas de base do pavimento representa, na maioria das vezes, a perda da capacidade de carga e ruptura do mesmo. A entrada de água nas camadas granulares e de solo abaixo do revestimento acarretará alteração na umidade de equilíbrio das camadas de solo e contaminação por finos das camadas granulares. Os finos ou a água em camadas granulares agem como lubrificantes nas superfícies de contato dos grãos, causando uma redução no atrito entre as partículas e reduzindo a resistência da camada.

A entrada d'água pode acontecer tanto pela falta de manutenção/drenagem insuficiente, quanto pela capilaridade/infiltração por trincas no revestimento betuminoso. A selagem de trincas consiste em um processo de conservação do pavimento, o qual pode manter sua integridade estrutural, e não tem função de reforçar a estrutura ou corrigir irregularidades.

A selagem de trincas é uma atividade preventiva que apresentará maior eficiência e retorno dos investimentos, caso seja levada a cabo tão logo as trincas se manifestem. Balbo (1997) reforça a idéia de que a definição do momento ideal para se realizar a selagem é a chave do problema. Complementa que a literatura estadunidense e canadense aponta para um ganho de vida de serviço entre dois e cinco anos dependendo das circunstâncias, quando se emprega tal técnica preventiva.

As trincas alteram seu espaçamento conforme as variações térmicas, de umidade e as solicitações do tráfego. Os selantes convencionais de alta viscosidade, geralmente, possuem pouca aderência com as paredes da trinca e são arrancados pela ação do tráfego. Já os selantes de baixa viscosidade, apesar de possuírem boa interação com as paredes da trinca, são muito sensíveis às variações térmicas e podem escorrer para fora das trincas ou aderir aos pneus dos

veículos. Diferentemente, o AB propicia características ideais de viscosidade e baixa sensibilidade térmica, além de melhorar a condição de aderência com as laterais da fissura.

Nos Estados Unidos, aproximadamente 80% dos estados utilizam algum tipo de selante de trincas com borracha, entre eles: Arizona, Califórnia, Geórgia, Novo México, Nevada, Nebraska, Nova Iorque, Pensilvânia, Texas e Winsconsin. Esta é a aplicação do AB com maior utilização nos EUA.

Ponniah e Kennepohl (1996) realizaram estudo sobre a selagem de trincas com ligante modificado com borracha, demonstrando as boas qualidades deste material e a vantagem econômica de se fazer manutenção preventiva em pavimentos asfálticos. A Figura 3.19 apresenta uma comparação, na alternativa 1 nenhum tipo de selamento foi feito, enquanto que na 2, foram seladas as trincas com ligante modificado com borracha. As vantagens da alternativa 2 são evidentes, os autores mostram que ao final de 30 anos tem-se uma redução de 13 % nos custos de manutenção, além da diminuição de custos para o usuário, tendo em vista que a selagem de trincas traz menos inconvenientes do que os serviços de restauração convencionais.

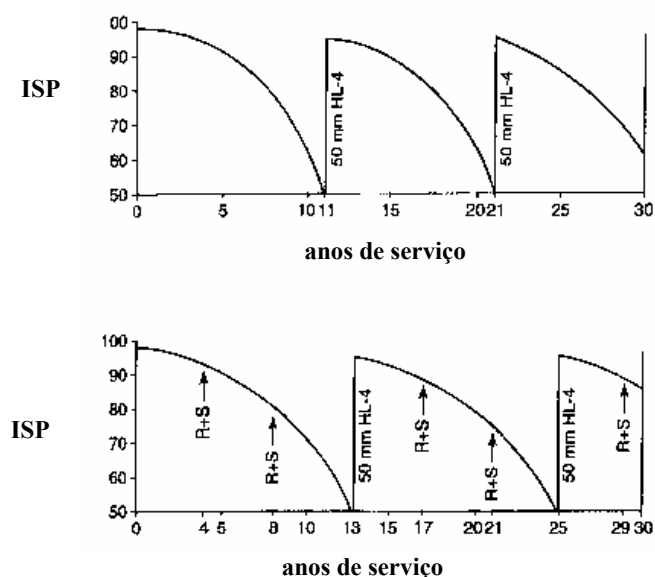


Figura 3.19 – Comparação do desempenho das duas alternativas

Nota: ISP – índice de serventia do pavimento

R+S – manutenção e selagem de trincas

50 mm HL 4 – alternativa de reforço tipo CBUQ

Fonte: Ponniah e Kennepohl (1996).

Para que se faça a selagem de maneira adequada alguns cuidados devem ser seguidos. Não se recomenda a selagem nas seguintes condições: (1) abertura de fissuras menores que 3 mm; (2) fendilhamento em forma de mapa (coro de jacaré); (3) fissuração severa onde já houve o comprometimento do pavimento; (4) pavimentos com camada asfáltica muito delgada ou rodovias com baixo volume de tráfego.

A especificação norte-americana para selantes de trincas é encontrada na ASTM D-3405-97 e D-3406-95.

### 3.2.3.5 Selagem de juntas em pavimentos rígidos

A adequada selagem das juntas entre placas de concreto é fundamental para a manutenção da serventia dos pavimentos de concreto de cimento Portland, evitando a entrada d'água e bombeamento dos finos das camadas de base e sub-base. Devido ao melhoramento das características de envelhecimento e, conseqüentemente a manutenção da elasticidade com o passar do tempo, uma das utilizações do AB é a selagem das referidas juntas, aumentando o tempo entre as manutenções.

### 3.2.3.6 Camada de separação e impermeabilização do subleito

A importância do equilíbrio hídrico no solo do subleito tem sido enfatizada em vários autores (Huang, 1993; Hunter, 1994; Yoder e Witczak, 1975; Medina, 1997). Existem relatos de sucesso na literatura, quando da aplicação de uma membrana de asfalto-borracha (semelhante a uma imprimação) no topo da camada de subleito ou sub-base (Epps, 1994; Newcomb *et al.* 1994). Esta membrana tem dupla função: impermeabilização das camadas de solo e separação das camadas granulares (evitando contaminação com finos).

Mahboub (1996) utilizou membranas com pedaços de pneus de forma diferenciada. Já conhecidas as inconveniências causadas pela alteração da umidade do subleito (por exemplo a perda da capacidade de suporte e o trincamento por retração de camadas argilosas), o autor utilizou uma membrana de asfalto modificado com 3 % de SBS impregnada com agregado miúdo e pedaços de borracha com o objetivo de manter a umidade de equilíbrio do subleito. Os autores monitoraram a umidade do subleito, através de sensores eletrônicos e observaram o bom desempenho da membrana com borracha.

### 3.3 PROCESSO SECO

O processo de utilização de pó de pneu reciclado em concreto asfáltico a seco caracteriza-se por utilizar o resíduo como um aditivo ao agregado. Neste processo pedaços sólidos de borracha são adicionados como substituição de no máximo 5 % do agregado (ver Figura 3.2). Existe na literatura uma certa ambigüidade a respeito da nomenclatura do produto final do processo seco. Alguns autores tratam como *rubber-aggregate* (Heitzman 1992) e outros como *rubber modified hot mix asphalt* (Epps, 1994).

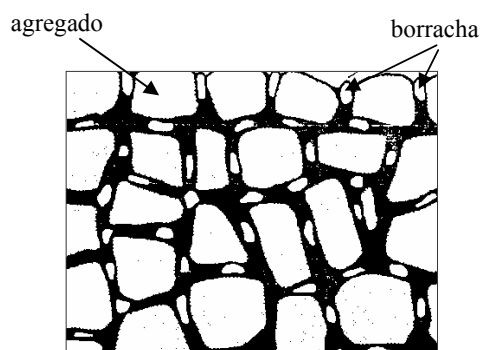


Figura 3.20 – Ilustração de misturas com partículas sólidas de borracha  
Fonte: Takallou e Hicks (1988)

Um dos processos de mistura a seco existente foi desenvolvido na Suécia e é conhecido como *PlusRide*. O tamanho de partículas de borracha utilizado varia entre 1,6 e 6,4 mm (Kandhal, 1992; RPA, 1999). No Quadro 3.3 são apresentados alguns dados encontrados na literatura referente ao percentual de borracha e tipo de ligante para composição deste tipo de concreto asfáltico.

Quadro 3.3 – Variáveis estudadas nas misturas borracha-agregado

<i>Referência</i>	<i>% borracha vulcanizada</i>	<i>Ligante utilizado</i>
Stroup-Gardiner <i>et al.</i> (1996)	1	120 a 150 pen
Gowda <i>et al.</i> (1996)	1 - 3	AC - 30
Galego (2000)	1 - 2	---
Bertollo (2002)	2	CAP 20

A FHWA (*Federal Highway Administration*) define o processo seco como qualquer método que adicione CRM (*crumb rubber modified*) diretamente no concreto asfáltico, onde o agregado pré-aquecido é misturado com a borracha e, posteriormente, misturado com o cimento asfáltico. O processo que costuma adicionar CRM em misturas de granulometria aberta, antes da adição do ligante, é conhecido como RUMAC (*rubber modified hot-mix asphalt*) (Madapati, 1996).



A granulometria normalmente é a mesma que a utilizada em misturas convencionais, entretanto temperaturas maiores são necessárias para mistura (160-188°C) e para compactação (148-160°C). Nas Tabelas 3.8 e 3.9 são apresentadas as composições granulométricas recomendadas pelo FHWA e pela metodologia *PlusRide*, respectivamente. A interação existente entre o ligante e a borracha é muito pequena, quando comparada ao processo úmido, razão pela qual recebe esta denominação. Os inibidores de raios ultravioleta e os antioxidantes presentes na borracha não chegam a ser transmitidos para o asfalto, por esta razão vários estados americanos têm optado por utilizar apenas o processo úmido.

Takallou e Hicks (1998) apresentaram uma revisão geral sobre a utilização de misturas com borracha no processo seco. Com relação à composição granulométrica, os autores recomendam misturas descontínuas onde a borracha entra em substituição a uma fração de agregado. Na Tabela 3.10, além das especificações granulométricas estão apresentados critérios preliminares da mistura.

Tabela 3.8 – Composição granulométrica dos agregados para misturas abertas e densas  
Fonte: Liang e Lee, 1996

Peneira ("ou nº)	Abertura (mm)	% passante em massa	
		Gap-RUMAC	Dense-RUMAC
1/2"	12,7	100	100
3/8"	9,5	90	90
4	4,76	52	60
8	2,38	30	40
16	1,19	23	28
50	0,29	7	8
200	0,074	2	2

Tabela 3.9 – Especificações recomendadas segundo o volume diário de tráfego

Fonte: Takallou e Hicks, 1998

<i>Característica</i>	<i>Especificação</i>		
	<i>A – Plus Ride 9</i>	<i>B – Plus Ride 12</i>	<i>C – Plus Ride 16</i>
Tráfego médio diário	2500	2500 - 10000	10000
Espessura mínima (cm)	2,50	3,80	4,45
<i>Peneira (% agr. passante)</i>			
$\frac{3}{4}$ "			100
$\frac{5}{8}$ "		100	
$\frac{1}{2}$ "			
$\frac{3}{8}$ "	100	60 – 80	50 – 62
$\frac{1}{4}$ "	60 – 80	30 – 40	30 – 44
10	23 – 38	19 – 32	19 – 32
30	15 – 27	13 – 25	12 – 23
200	8 – 12	8 – 12	7 – 11
$\frac{1}{4}$ " - peneira 10	---	12 máx.	12 máx.
<i>Crítérios preliminares de mistura</i>			
% borracha <sup>1</sup>	3,0	3,0	3,0
Volume (aprox.)	6,7	6,7	6,7
% asfalto	8,0 – 9,5	7,5 – 9,0	7,5 – 9,0
Vol. máx. vazios	2,0	2,0	4,0

Nota: <sup>1</sup> - em relação à massa total da mistura

Tabela 3.10 – Especificações para a granulometria da borracha

Fonte: Takallou e Hicks, 1998

<i>Peneira ("ou n°)</i>	<i>Percentual Passante</i>		
	<i>Borracha Granular</i>	<i>Borracha Fina</i>	<i>Mistura 80/20<sup>1</sup></i>
$\frac{1}{4}$ "	100	---	100
4	70 – 90	---	76 – 92
10	10 – 20	100	28 – 36
20	0 – 5	50 – 100	10 – 24

Nota: <sup>1</sup> – 80/20 significa 80 % de Borracha Granular e 20 % de Borracha Fina

Em relação a granulometria da borracha, é apresentada na Tabela 3.10 a especificação da metodologia *PlusRide*.

A experiência Sul-africana recomenda que após a mistura da borracha com o agregado pré-aquecido (200-210°C) com o asfalto (140-160°C) a mistura deve ficar estocada a 180°C por, no mínimo, uma hora antes da utilização (Visser e Verhaeghe, 2000). De maneira semelhante, Gallego *et al.* (2000) ressaltam a importância do tempo de digestão (definido como o tempo necessário para interação entre o ligante e os grânulos de borracha) como fator dominante

sobre o desempenho das misturas asfálticas modificadas com borracha. Os autores relatam problemas de desagregação da mistura observados em pista quando o tempo de cura não é considerado.

Vários estados americanos desenvolveram estudos a respeito da incorporação, via seca, de borracha em misturas asfálticas; têm-se observado bons resultados, principalmente em estados de clima frio. No Alaska tem-se percebido as boas propriedades deste material, principalmente no que se refere à resistência à derrapagem e ao comportamento do material em períodos de degelo.

Mahboub (1996) relata experiência sobre a dificuldade de se misturar agregado com pedaços de borracha. O autor atribui a alta segregação dos materiais devido a grande diferença de densidade existente entre os materiais pétreos e a borracha de pneus.

Na cidade americana de Babbitt, estado do Minnesota, Stroup-Gardiner *et al.* (1996) realizaram uma experiência de utilização de misturas asfálticas utilizando o processo a seco. Os autores trataram a borracha com óleo derivado de petróleo, antes de ser misturada ao concreto asfáltico, provocando, assim o inchamento das partículas de CRM. Os ensaios de laboratório não indicaram diferenças significativas entre as misturas com a borracha tratada e não tratada com as misturas de controle, a não ser por apresentarem maior sensibilidade à temperatura (ensaios de tração indireta e módulo de resiliência). Foram executadas sete seções testes para avaliação das misturas em campo, entretanto, resultados conclusivos ainda não foram apresentados.

Huang *et al.* (2002) apresentaram a experiência do estado da Louisiana em misturas utilizando processo seco e úmido. Foram executados, além de ensaios de laboratório, oito trechos com borracha e oito trechos de controle, monitorados durante cinco à sete anos. Os ensaios de laboratório levantavam dúvida a respeito dos benefícios da adição de borracha; entretanto, diversas medidas *in situ* (IRI, ATR e TF) indicam o melhor comportamento da misturas com borracha.

O condado de Sacramento, estado da Califórnia, publicou recentemente um estudo sobre a utilização das misturas com borracha na redução do nível de ruído. Os resultados apresentados demonstram a grande potencialidade deste material. A utilização de misturas com borracha torna dispensável o uso de barreiras acústicas, as quais têm um alto custo. (Sacramento County, 1999).

Além da metodologia *PlusRide* foi desenvolvida nos Estados Unidos uma outra forma de mistura a seco denominada “tecnologia genérica a seco”. Esta técnica utiliza um percentual de borracha um pouco menor que o *PlusRide* (no máximo 3%) entretanto o princípio de interação é o mesmo: partículas mais finas de borracha reagem parcialmente com o ligante melhorando suas propriedades enquanto as partículas maiores preenchem o vazio deixado na curva granulométrica. A distribuição granulométrica é apresentada na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Faixa granulométrica da metodologia genérica a seco  
Fonte: Newcomb et al., 1994

<i>Peneira (" ou nº)</i>	<i>% Agregado passante</i>	<i>Tolerância (Faixa Trabalho)</i>
1" (25,4 mm)	100	---
1/2" (12,7 mm)	95 – 100	---
1/4" (6,35 mm)	65 – 85	± 7
1/8" (3,165 mm)	36 – 65	± 7
# 20 (0,85 mm)	15 – 39	± 7
# 40 (0,425 mm)	8 – 27	± 7
# 80 (0,180 mm)	4 – 16	± 4
# 200 (0,075 mm)	2 – 6	± 2

Existem na literatura várias sugestões no que diz respeito à composição granulométrica a ser utilizada em misturas com borracha. Na Figura 3.21 são apresentadas várias curvas granulométricas (centro das faixas) utilizadas na composição de misturas via seca. É apresentada também, para comparação, a faixa IV-B do Instituto do Asfalto que é similar à faixa B especificada pelo DAER/RS (utilizada nesta pesquisa).

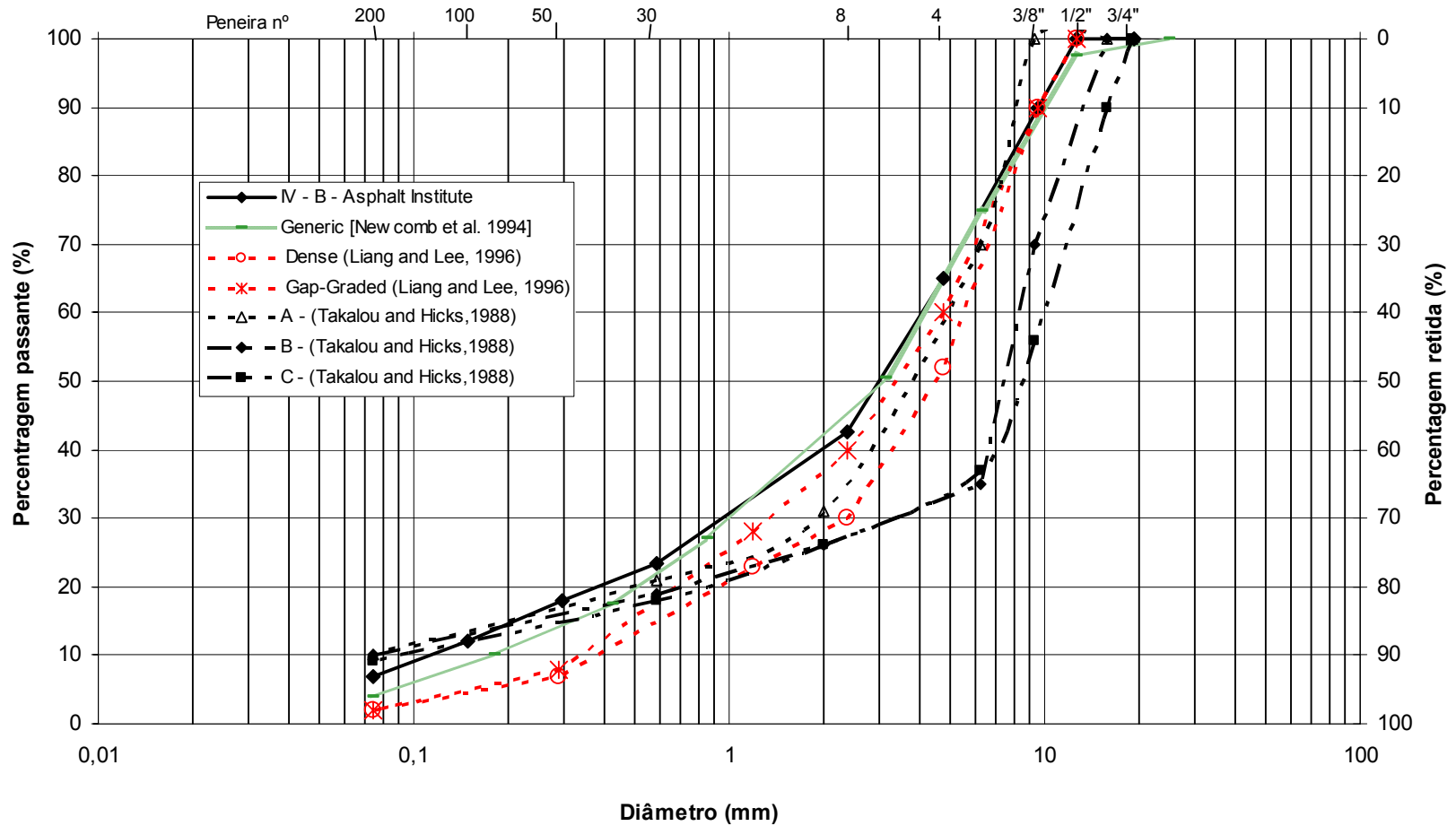


Figura 3.21 – Granulometrias utilizadas no processo seco e especificação do Instituto do Asfalto

A produção de misturas borracha-agregado pode ser feita em unidades de mistura do tipo volumétricas ou gravimétricas. Quando são utilizadas usinas do tipo tambor é recomendado que a borracha entre após o queimador, geralmente no anel de entrada de material reciclado. A compactação da massa deve seguir as recomendações já conhecidas para pavimentos asfálticos como: temperatura e umidade do ar, temperatura da massa asfáltica, qualidade de equipamentos etc. Epps (1994) acrescenta que a compactação deve ser efetuada até a camada atingir temperatura de 60°C, devido ao inchamento das partículas de borracha.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A incorporação de borracha reciclada de pneus tanto em misturas asfálticas como em outras aplicações em pavimentação é uma realidade em muitos países. Os processos de incorporação úmido e seco têm sido pesquisados em nível internacional. Nota-se uma preferência pelo processo úmido de incorporação o que atende, também, a interesses comerciais.

A cada vez mais estão se buscando produtos asfálticos com melhor desempenho, o que coloca os ligantes asfálticos modificados em situação de destaque.

A análise reológica, feita com equipamentos tecnologicamente evoluídos, demonstra a superioridade dos ligantes modificados, entretanto alguns ensaios de laboratório realizados em amostras de concreto asfáltico, nem sempre confirmam esta tendência. Este fato está ligado à dificuldade de simular-se em laboratório condições peculiares da vida de serviço em campo.

O grande avanço da utilização de AB está ligado ao desempenho superior em campo, notado, muitas vezes, anos após a execução do pavimento.

Devido à grande complexidade envolvida na construção de rodovias utilizando borracha reciclada, alguns países e estados têm-se destacado ao longo dos anos, como a África do Sul e o Arizona. É patente que cada um trata os processos envolvidos de maneira peculiar, em função das diversas variáveis: materiais, clima, processos executivos, custos, etc. Desta forma não é possível buscar receitas prontas, deve-se aprender com a experiência acumulada e desenvolver materiais que atendam condições específicas.

Algumas barreiras ainda são encontradas no Brasil para a utilização em larga escala das misturas modificadas com borracha. A primeira delas é a questão econômica; há muito tempo

existe escassez de recursos, tanto para manutenção da malha quanto para implantação de novas rodovias. A relação custo/benefício só é atrativa para quem possui todo o capital no início do empreendimento. Outras barreiras que também contribuem para este cenário são a falta de qualificação (tanto de material como de pessoal) e a desinformação dos tomadores de decisões.

## 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para avaliação do comportamento do ligante asfalto-borracha e de misturas asfálticas modificadas com borracha desenvolveu-se uma programação de ensaios, com o objetivo de determinar propriedades de engenharia relevantes e quantificar o efeito dos principais fatores intervenientes nestas respostas.

Neste capítulo, está detalhado o planejamento do experimento, a caracterização das matérias primas utilizadas, as técnicas de preparação das amostras e as técnicas de ensaio adotadas para leitura das variáveis de resposta.

### 4.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

O objetivo do planejamento é de explorar as relações entre fatores ou confirmar hipóteses, tendo em vista a otimização da pesquisa, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Segundo Montgomery (1984) o processo de planejamento deve contemplar as seguintes etapas: reconhecimento e definição do problema, escolha dos fatores e níveis, definição da técnica de análise, condução do experimento, análise dos resultados e conclusões e recomendações.

Pelas restrições técnicas e econômicas que qualquer pesquisa experimental apresenta, foram escolhidos, a partir de experiências anteriores, fatores e níveis que seriam pesquisados, chamados de variáveis independentes. Foram selecionadas também, propriedades de engenharias que representam o comportamento destes materiais, estas propriedades são medidas através de ensaios, e chamadas de variáveis dependentes ou variáveis de resposta.

Durante todo processo de coleta de dados foram estabelecidos procedimentos de treinamento, controle e registro para que se pudesse monitorar cuidadosamente todo processo, evitando assim, erros que pudessem comprometer a análise de dados.



Para análise dos resultados, efetuaram-se análises de regressão múltipla, estudos de correlação e análises de variância, além de recursos gráficos, tais como: gráficos de superfície de resposta e gráficos de sensibilidade.

Devido ao grande número de variáveis envolvidas, o processo de planejamento foi separado em duas partes: um planejamento para avaliação dos ligantes modificados e misturas produzidas a partir destes ligantes e outro para avaliação da adição de borracha diretamente nas misturas.

#### 4.2.1 Processo úmido

As variáveis intervenientes nas propriedades de um cimento asfáltico modificado, bem como suas interações, são bastante complexas e dependem de inúmeros fatores: tipo de modificador utilizado, forma e grau de interação, temperatura e tempo de mistura, condições de estocagem e transporte, etc.

Para cumprir com os objetivos propostos montou-se um programa experimental tipo fatorial e, a partir do fatorial completo, lançou-se mão das técnicas de planejamento de experimentos, para otimizar e adequar as condições (restrições) técnicas existentes. As variáveis independentes selecionadas, bem com seus níveis, estão apresentadas na Tabela 4.1. A seleção das variáveis e níveis foi feita baseando-se em trabalhos anteriores e experiências descritas na literatura. O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 20 e não foi utilizado nenhum tipo de diluente.

Tabela 4.1 – Variáveis independentes selecionadas e níveis a serem estudados

<i>Variável Independente</i>	<i>Níveis</i>	<i>Descrição níveis</i>
Percentual de Borracha (PB)	3	6, 12 e 18%
Granulometria da Borracha (GB) <sup>1</sup>	3	#50, #30 e >#30
Temperatura de Mistura (TP)	3	160, 180 e 200°C
Tempo de Mistura (TM)	3	30, 45 e 60 minutos

Nota: <sup>1</sup>: para análise de dados a granulometria será quantificada em função de sua superfície específica (SE)

Montgomery (1984) e Nanni e Ribeiro (1987) destacam a importância do planejamento para otimização de experimentos, possibilitando a redução de tempo e recursos financeiros, sem comprometer a qualidade das informações resultantes.

No Quadro 4.1 é apresentada a matriz fatorial completa e a otimização realizada. Para se chegar a este formato foram feitas inúmeras tentativas e, para cada uma delas, realizada uma análise de correlação para verificar quais os níveis e interações seriam prejudicados com a não realização de alguns experimentos. Na Tabela 4.2 está apresentada a análise de correlação para a matriz executada.

Quadro 4.1 – Matriz fatorial estudada

		PB - 6%			PB - 12%			PB - 18%		
		GB - #50	GB - #30	GB ->#30	GB - #50	GB - #30	GB ->#30	GB - #50	GB - #30	GB ->#30
TM - 160°C	TP - 30m	1	10	19	28	37	46	55	64	73
	TP - 45m	2	11	20	29	38	47	56	65	74
	TP - 60m	3	12	21	30	39	48	57	66	75
TM - 180°C	TP - 30m	4	13	22	31	40	49	58	67	76
	TP - 45m	5	14	23	32	41	50	59	68	77
	TP - 60m	6	15	24	33	42	51	60	69	78
TM - 200°C	TP - 30m	7	16	25	34	43	52	61	70	79
	TP - 45m	8	17	26	35	44	53	62	71	80
	TP - 60m	9	18	27	36	45	54	63	72	81

Legenda	
	realização de ensaios
	teste de velocidade de rotação

No Quadro 4.1 pode ser verificada que a amostra (ou mistura) de número 41 aparece como selecionada para teste de rotação do rotor. Será um teste paralelo ao programa fatorial otimizado e serve para avaliar a influência, nestes níveis médios, da influência da rotação do rotor nas propriedades das misturas de asfalto-borracha.

Para a obtenção das variáveis de resposta foram selecionados os seguintes ensaios: ensaio de penetração, ponto de amolecimento, ponto de fulgor, densidade, estabilidade à estocagem e viscosidade aparente. Apenas com as amostras de CAP 20, AB<sup>5</sup> 14, 41 e 68 (ambas preparados à 180°C por 45 minutos, borracha #30 e teores de 6, 12 e 18%, respectivamente) foram realizados os seguintes ensaios: ductilidade, retorno elástico, reometria de cisalhamento dinâmico, envelhecimento em curto e longo prazo e reometria à flexão.

<sup>5</sup> AB – sigla de Asfalto-Borracha (ligante modificado)

Tabela 4.2 – Análise de correlação para a otimização apresentada

<i>Variáveis</i>	<i>PB</i>	<i>SE</i>	<i>TM</i>	<i>TP</i>	<i>PBxSE</i>	<i>PBxTM</i>	<i>PBxTP</i>	<i>SE x TM</i>	<i>SExTP</i>	<i>TMxTP</i>	<i>PB x PB</i>	<i>SExSE</i>	<i>TMxTM</i>	<i>PBxSExT MxTP</i>
<i>PB</i>	1.000													
<i>GB</i>	0.000	1.000												
<i>TM</i>	0.000	0.000	1.000											
<i>TP</i>	0.000	0.087	0.000	1.000										
<i>PB x SE</i>	-0.253	0.000	0.000	0.122	1.000									
<i>PB x TM</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000								
<i>PB x TP</i>	0.000	0.126	0.000	0.000	0.150	0.000	1.000							
<i>SE x TM</i>	0.000	0.000	-0.253	0.122	0.000	0.000	0.057	1.000						
<i>SE x TP</i>	0.121	0.052	0.121	-0.389	0.000	0.056	-0.148	0.000	1.000					
<i>TM x TP</i>	0.000	0.126	0.000	0.000	0.057	0.000	0.000	0.150	-0.148	1.000				
<i>PB x PB</i>	0.000	0.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.092	0.000	1.000			
<i>SE x SE</i>	0.000	0.381	0.000	0.093	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.009	0.000	0.067	1.000		
<i>TM x TM</i>	0.000	0.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.092	0.000	0.067	0.067	1.000	
<i>PBxSExT MxTP</i>	0.095	-0.068	0.095	0.000	-0.105	0.117	0.000	-0.105	0.056	0.000	0.125	0.285	0.125	1.000

Os dados experimentais serão quantitativamente analisados através de modelos de regressão múltipla, pela correlação de cada variável de resposta  $y$  com  $n$  níveis. A equação obtida da análise de regressão múltipla tem a seguinte formato:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_{11} \cdot x_1^2 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n + \dots + a_{nn} \cdot x_n^2 + \dots + a_{n_1 n_2} \cdot x_{n_1} \cdot x_{n_2} \quad (4.1)$$

onde  $x_n$  é o número variáveis de entrada,  $a_n$  é o coeficiente de cada uma das variáveis de entrada e  $a_0$  é a média de valores. Estas equações são válidas apenas para a gama de valores investigados, e com os valores devidamente codificados (sempre de  $-1$  a  $1$ ). Para verificar quão bem os modelos representam os dados experimentais, recorre-se a verificação do coeficiente ajustado de determinação ( $R^2_{ajustado}$ ) e ao erro padrão de estimativa ( $\epsilon_p$ ).

Foram dosadas então, misturas asfálticas com os ligantes de modificados AB 14, 41 e 68 para determinação das seguintes variáveis de resposta: volume de vazios; relação betume vazios; vazios do agregado mineral; densidade aparente; estabilidade; fluência; resistência à tração a  $25^\circ\text{C}$  e módulo de resiliência a  $25^\circ\text{C}$ . A faixa granulométrica utilizada foi a IVB<sup>6</sup> do Instituto do Asfalto, cujo tamanho máximo de granulares é de 19mm.

Determinado, então, o teor de ligante de projeto, foram preparadas 25 a 30 amostras para realização dos seguintes ensaios: ensaio de módulo de resiliência em três temperaturas ( $10^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$  e  $45^\circ\text{C}$ ), tração por compressão diametral em três temperaturas ( $10^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$  e  $45^\circ\text{C}$ ), perda de massa, efeito deletério da água, fadiga e deformação plástica.

#### 4.2.2 Processo seco

Foram definidos cinco etapas para o estudo da adição de borracha seguindo o processo seco de incorporação: (i) composição e caracterização das misturas de referência; (ii) avaliação do teor de borracha; (iii) avaliação do tempo de digestão; (iv) avaliação da granulometria da borracha; (v) avaliação de misturas através de ensaios especiais; (vi) construção de um trecho experimental.

---

<sup>6</sup> A faixa IVB do Instituto do Asfalto é especificada sob a designação B no DAER/RS.

#### 4.2.2.1 Composição e caracterização das misturas de referência

Foram dosadas e caracterizadas duas misturas de controle, uma seguindo as especificações granulométricas do Instituto do Asfalto, faixa IVB (mistura densa), e outra denominada faixa descontínua, sugerida por Takallou e Hicks (1988) (conforme apresentado no item 3.3). As misturas descontínuas têm sido utilizadas nos EUA e na Europa, entretanto, a experiência brasileira é bastante limitada. As faixas granulométricas utilizadas, bem como a composição granulométrica, são apresentadas na Figura 4.1.

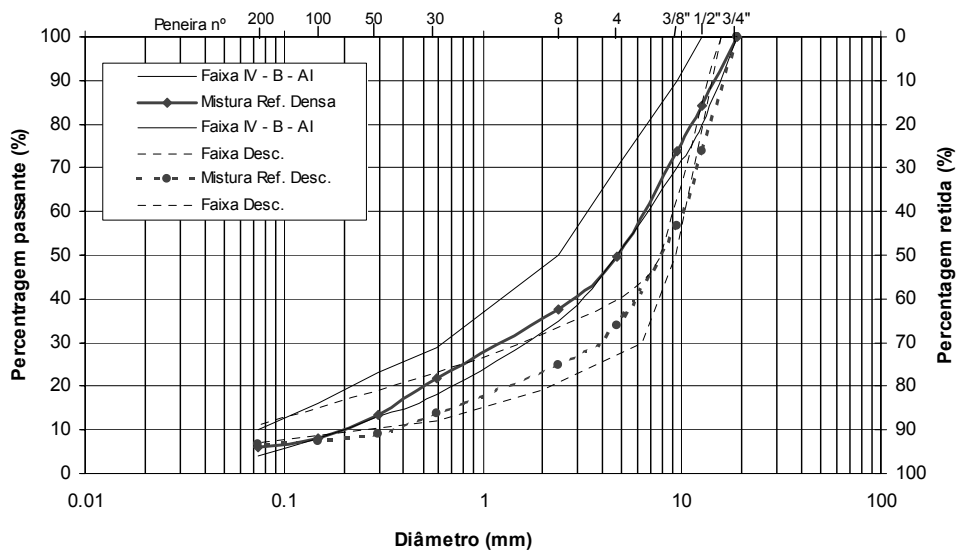


Figura 4.1 – Curvas granulométricas densas e descontínuas

#### 4.2.2.2 Avaliação do teor de borracha

Nesta etapa são dosadas misturas com borracha, conforme mostra o programa experimental apresentado no Quadro 4.2 (são apresentadas o nº de amostras que foram preparadas). Nesta segunda fase, são verificados a influência do teor de borracha e da curva granulométrica nas variáveis de resposta referentes da dosagem Marsall, do ensaio de módulo de resiliência e resistência à tração.

Quadro 4.2 – Matriz experimental e número de amostras para dosagem Marshall, Mr e Rt

Ensaio	Faixa granulométrica densa <sup>1</sup>				Faixa descontínua <sup>2</sup>			
	Percentual de borracha (%)				Percentual de borracha (%)			
	0,2 %	0,6 %	1,0 %	3,0 %	0,2 %	0,6 %	1,0 %	3,0 %
Dosagem Marshall	15	15	15	15	15	15	15	15
Mr e Rte	10	10	10	10	10	10	10	10
Totais	25	25	25	25	25	25	25	25

Nota: <sup>1</sup> IVB do Instituto do Asfalto. <sup>2</sup> Takallou e Hicks (1988); total de amostras = 200.

O teor de borracha é calculado em relação à massa de agregado seco e o ajuste granulométrico é realizado substituindo-se em volume uma fração do agregado mineral por um fração de borracha.

A borracha a ser adicionada nestas misturas é uma composição entre dois grupos de borrachas. Foi utilizado 80 % da borracha cisalhada mecanicamente (cis) e 20 % da borracha proveniente do processo criogênico denominada >#30. Esta mistura das duas borrachas tenta otimizar o resultado, ou seja, se utilizará 80 % de uma borracha com custo menor de moagem (não utiliza o processo de moagem criogênico) e 20 % de uma borracha que, apesar de custo maior, terá uma maior interação com o ligante asfáltico. A tentativa é de chegar, com os materiais disponíveis, o mais próximo possível da sugestão de Takallou e Hicks (1988); o ajuste está apresentado na Figura 4.2.

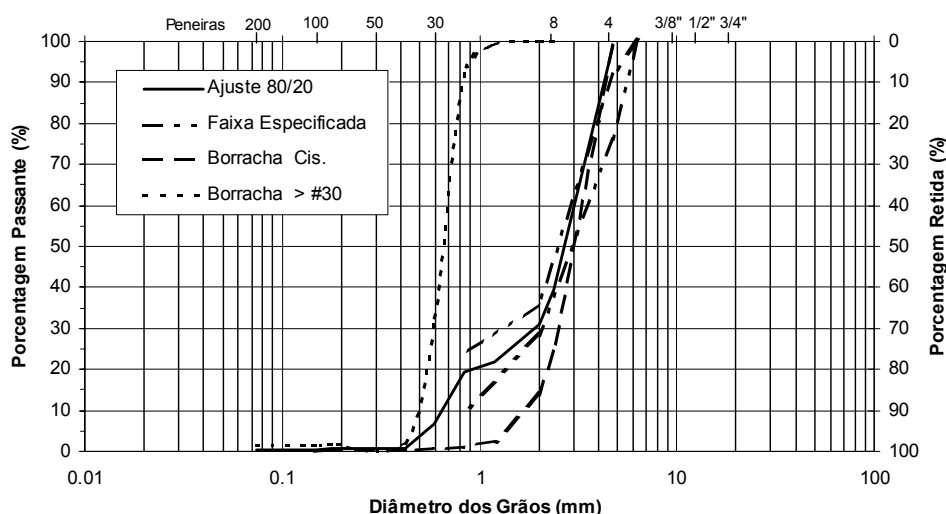


Figura 4.2 – Composição granulométrica 80/20 (% cis)/(&gt;#30)

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os ajustes granulométricos para os diversos teores de borracha com a composição densa e descontínua, respectivamente.

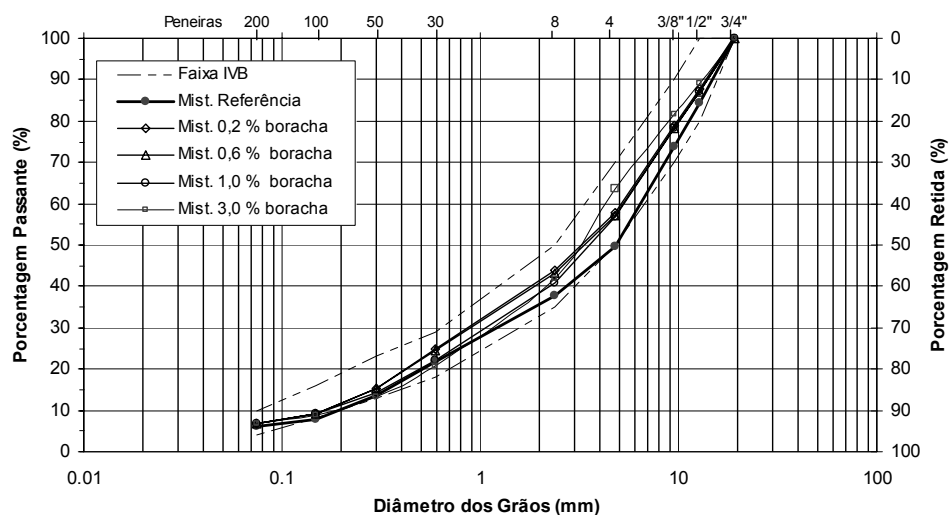


Figura 4.3 – Curvas granulométricas densas

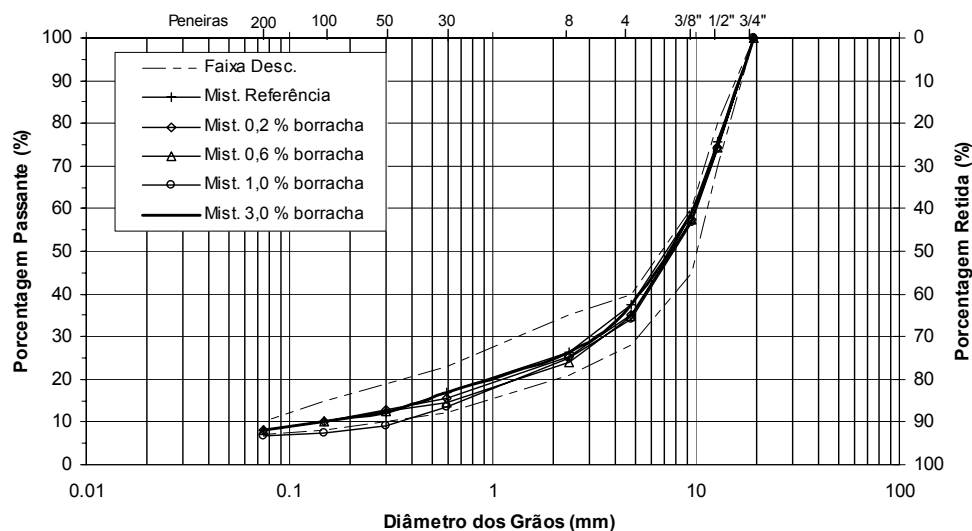


Figura 4.4 – Curvas granulométricas descontínuas

#### 4.2.2.3 Avaliação do tempo de digestão

Esta etapa da pesquisa consiste em verificar a influência do tempo de digestão, ou interação asfalto x borracha, na mistura asfáltica, após a mistura e antes da compactação.

Nesta etapa foram selecionadas misturas já ensaiadas na etapa anterior. Logo após a mistura agregado/borracha/asfalto a massa será mantida em aquecimento por três tempos (zero, uma e duas horas). Em campo este processo pode ser representado pelo tempo de transporte entre a

usina e o local de aplicação do CBUQ. A matriz experimental da terceira etapa é apresentada no Quadro 4.3, juntamente com o número de amostras que foram preparadas. O teor de borracha foi definido em 1% em função dos resultados da etapa anterior, bem como a faixa granulométrica densa.

Quadro 4.3 – Matriz experimental para avaliação do tempo de digestão

<i>Ensaio</i>	<i>Tempo e digestão(horas)</i>		
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
<i>Dosagem Marshall</i>	15	15	15
<i>Mr e Rt</i>	10	10	10
<i>Totais</i>	25	25	25

Nota: Serão utilizadas apenas misturas densas com 1% de borracha; total de amostras = 75.

#### 4.2.2.4 Avaliação da granulometria da borracha

Para verificar a influência da adição de borrachas com diferentes granulometrias, foram preparadas misturas, adicionando-se separadamente, as borrachas denominadas Criogênica >#30, Cisalhada e aquela proveniente da raspa de pneus (denominada Raspa). Na caso da Raspa foram descartadas as partículas maiores que 6,35 mm (retidas na peneira 1/4") para evitar segregação da mistura, bem como problemas de compactação.

A matriz experimental desta etapa está apresentada no Quadro 4.4, juntamente com o número de amostras preparadas. O tempo de cura de 1 hora e o percentual de borracha de 1% foram definidos a partir das etapas anteriores. Os ajustes granulométricos estão apresentados na Figura 4.5.

Quadro 4.4 – Matriz experimental para avaliação do tempo de digestão

<i>Ensaio</i>	<i>Borracha Utilizada</i>		
	<i>Criogênica &gt;#30</i>	<i>Cisalhada</i>	<i>Raspa</i>
<i>Dosagem Marshall</i>	15	15	15
<i>Mr e Rt</i>	10	10	10
<i>Totais</i>	25	25	25

Nota: Serão utilizadas apenas misturas densas com 1% de borracha e 1h de cura; total de amostras = 75.



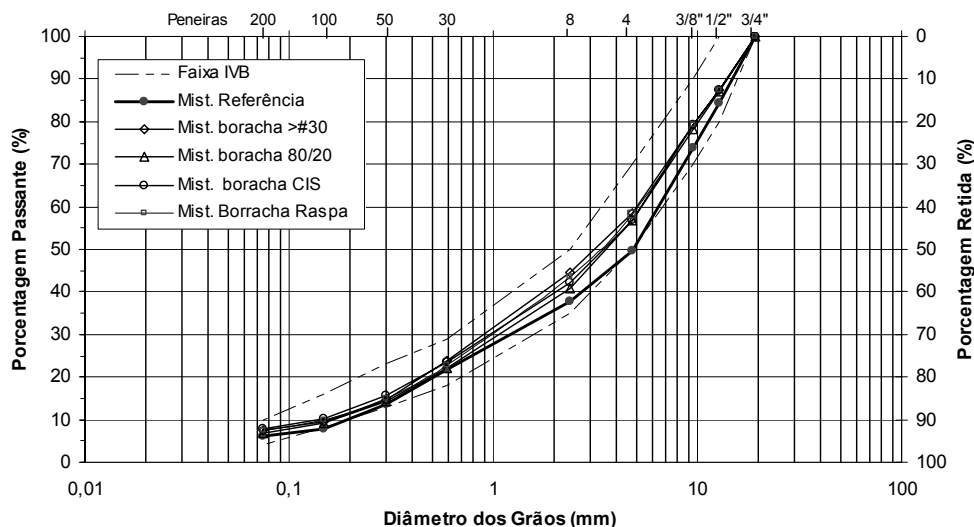


Figura 4.5 – Ajustes granulométricos com diferentes borrachas

#### 4.2.2.5 Avaliação de misturas através de ensaios especiais

A partir das etapas anteriores foi possível definir algumas variáveis mais importantes (em relação à granulometria do agregado, ao teor de borracha, ao tempo de cura e a granulometria da borracha) e então foram preparadas amostras no teor de ligante de projeto para a determinação das seguintes propriedades de engenharia:

- i) determinação da deformabilidade elástica – ensaio de módulo de resiliência ( $M_r$ ) realizado em várias temperaturas (10°C, 25°C e 45°C);
- ii) determinação da resistência à tração – ensaio de tração por compressão diametral (Ensaio Brasileiro) ( $R_t$ ) realizado em várias temperaturas (10°C, 25°C e 45°C);
- iii) determinação da perda de massa ou desgaste – Metodologia Cantabro;
- iv) determinação da adesividade ou efeito deletério da água – Metodologia Lottman Modificada (RRT);
- v) determinação da vida de fadiga – ensaio à tensão controlada e 25°C ( $N_f$ );
- vi) determinação da deformação plástica – ensaio de *creep* dinâmico com confinamento e simulador de tráfego tipo LCPC.

#### 4.2.2.6 Construção de trecho experimental

Apesar de indispensável, os ensaios de laboratório possuem algumas restrições. O efeito de escala é uma delas. Para que se desenvolva experiência, acerca da construção em concreto asfáltico com adição de borracha e para verificar suas propriedades em campo, foi construído um trecho experimental comparativo – parte com mistura convencional e parte com borracha-agregado.

A parceria entre o LAPAV e a SMOV viabilizou a construção, no ano de 2002, de um pequeno trecho de, aproximadamente, 80m na Avenida João Elustondo Filho nº 500 na cidade de Porto Alegre, onde 40m foram de borracha-agregado e 40m de concreto asfáltico convencional (ver Figura 4.6).

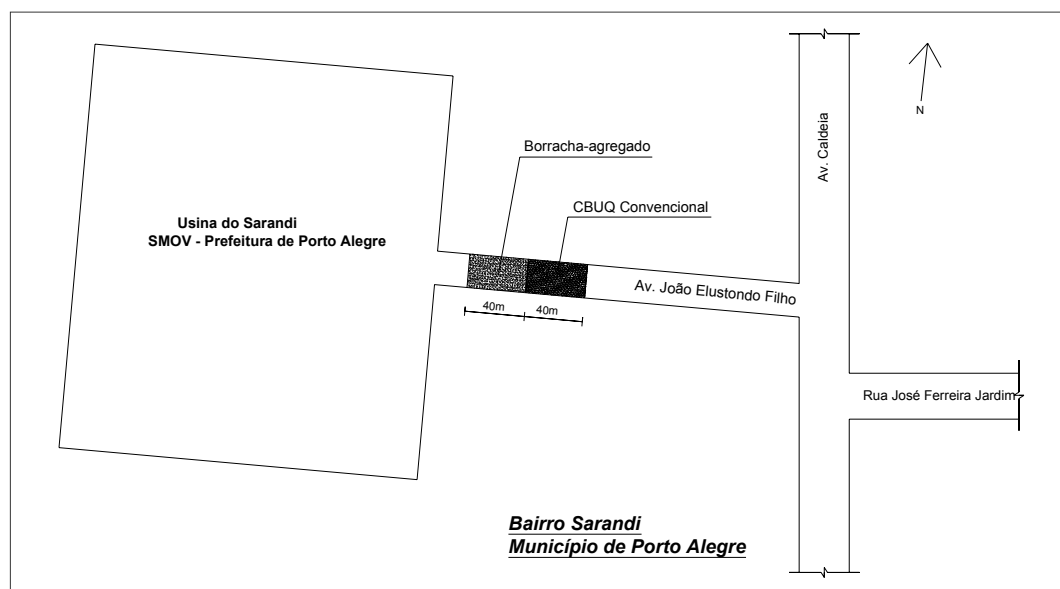


Figura 4.6 – Localização do trecho experimental (desenho sem escala)

O projeto da mistura foi realizado no LAPAV e está apresentado no Capítulo 7. A borracha utilizada foi a mesma utilizada nas etapas anteriores da pesquisa. Constituíam-se em uma mistura de 80% da borracha cisalhada mecanicamente e 20% da borracha moída no processo criogênico denominada >#30. A borracha utilizada foi doada pela empresa Borrachas Vipal S.A.

Foram verificadas durante a execução aspectos relevantes tais como: dosagem do silo com borracha; homogeneidade da massa; controle de temperaturas; utilização e aplicabilidade das técnicas e equipamento tradicionais para execução do CBUQ.

Foram feitos levantamentos de superfície (micro e macrotextura), bem como controle visual de patologias na superfície do pavimento.

## 4.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

### 4.3.1 Ligantes

O cimento asfáltico utilizado neste trabalho foi o CAP 20 comercializado no estado e proveniente da Refinaria Alberto Pascoalini em Canoas/RS. A empresa Ipiranga Asfaltos S.A. forneceu o ligante em duas oportunidades (denominados lote 1 e lote 2). O CAP 20 lote 1 foi utilizado para a preparação das misturas borracha-agregado e o lote 2 para as misturas AB. No Quadro 4.5 estão as propriedades dos ligantes utilizados.

Quadro 4.5 – Características dos ligantes utilizados

<i>Ensaio</i>	<i>Unid</i>	<i>CAP 20 lote 1</i>	<i>CAP 20 lote 2</i>
<i>Ponto de Amolecimento</i>	°C	49,1	45,5
<i>Penetração a 25°C, 100g, 5 seg</i>	<i>dmm</i>	56	56
<i>Viscosidade Aparente a 60°C</i>	<i>Pa.s</i>	2,270	2,420
<i>Viscosidade Aparente a 135°C</i>	<i>Pa.s</i>	0,329	0,375
<i>Viscosidade Aparente a 155°C</i>	<i>Pa.s</i>	0,138	0,158
<i>Viscosidade Aparente a 175°C</i>	<i>Pa.s</i>	0,072	0,082
<i>Viscosidade Aparente a 195°C</i>	<i>Pa.s</i>	0,045	0,053
<i>Ponto de Fulgor</i>	°C	314	318
<i>Ductilidade a 25°C</i>	<i>cm</i>	> 100	> 100
<i>Massa Específica</i>	<i>g/cm<sup>3</sup></i>	1,0143	1,0162
<i>Varição em Massa - Efeito de Calor e Ar (ECA)</i>	%	0,04	0,06
Cromatografia – SARA			
<i>Saturados</i>	%	---	8,1
<i>Aromáticos</i>	%	---	46,9
<i>Resinas</i>	%	---	23,5
<i>Asfaltenos</i>	%	---	21,5
<i>Índice de instabilidade coloidal<sup>2</sup></i>	---	---	0,42

Nota: <sup>2</sup>:  $I_C = (A+S)/(R+Ar)$  onde A=Asfaltenos; S=Saturados; R=Resinas; Ar=Aromáticos.

O cimento asfáltico foi coletado diretamente na empresa em latas de 3,6 litros e armazenado em local seco e arejado no laboratório.

### 4.3.2 Agregados

O material pétreo utilizado na pesquisa foi fornecido pela empresa Brita Mineração e Construção de sua unidade industrial na cidade de Dois Irmãos/RS. O material pétreo é uma rocha basáltica básica da formação Serra Geral, semelhante à encontrada em outros pontos do estado e considerada a mais representativa desta região do país. A localização da jazida e a representatividade do derrame basáltico no Brasil e no estado do Rio Grande do Sul podem ser observados na Figura 4.7. O derrame basáltico cobre, aproximadamente, 54% do território gaúcho. Foi utilizado também areia de várzea de grãos duros e arredondados encontrados na mesma região do estado e fornecido pela mesma empresa.

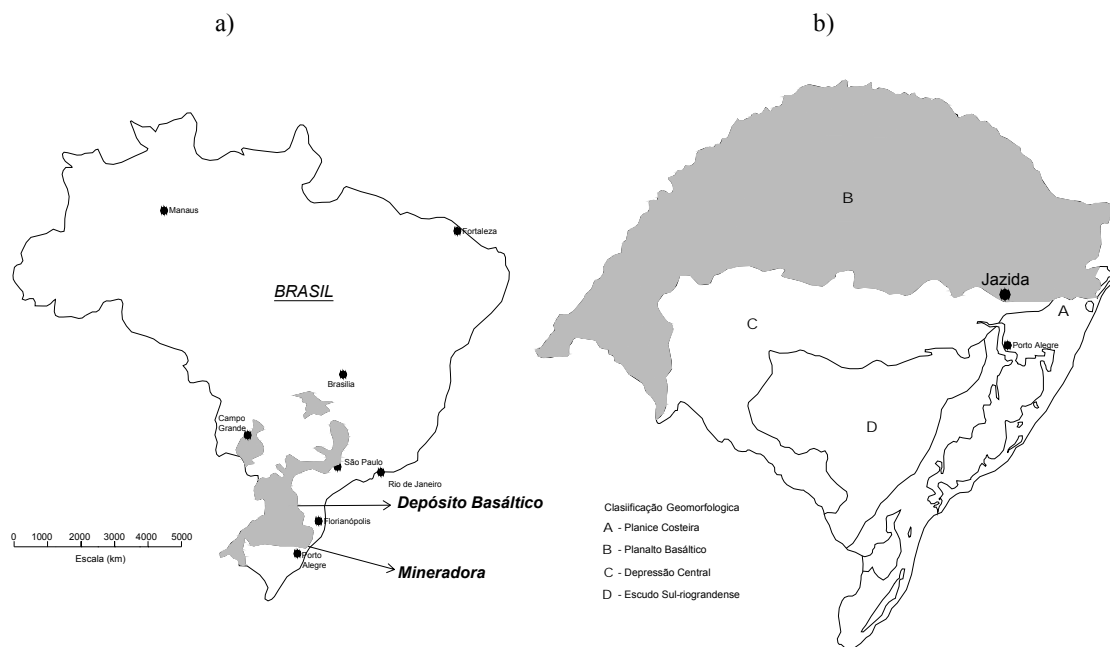


Figura 4.7 – Localização da jazida e do derrame basáltico  
a) no Brasil  
b) no estado do Rio Grande do Sul

Segundo ABGE (1998) os basaltos são as rochas ígneas vulcânicas mais abundantes e sua maior ocorrência é na forma de derrames, no Brasil, constituem a Formação Serra Geral da Bacia do Paraná, onde perfazem mais de 90% dos rochas vulcânicas aí existentes. A mineralogia essencial é plagioclásio cálcico (labradorita) (35-50%), augita (20-40%), magnetita ou ilemita (5-15%) e quantidades muito variáveis de matriz vítrea. A textura é afanítica, microgranular, por vezes amigdaloidal.

A coleta do material foi feita em uma única oportunidade recolhendo-se os granulares em sacos plásticos impermeáveis diretamente das pilhas de estocagem. Antes da coleta parte da

Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus

pilha foi homogeneizada com o auxílio de uma unidade escavotransportadora. A rocha tem aparência de sã com pouquíssima argila ou materiais deletérios.

Na Tabela 4.3 estão apresentados os resultados médios das análises granulométrica realizadas nos agregados utilizados na pesquisa. No Quadro 4.6 estão apresentadas algumas características dos agregados; as técnicas do cesto metálico e do picnômetro foram utilizadas para determinação da densidades dos agregado graúdos e miúdos, respectivamente.

Tabela 4.3 – Valores médios das análises granulométricas dos agregados

<i>Peneira</i>		<i>Porcentagem passante em massa (%)</i>			
<i>n°</i>	<i>mm</i>	<i>Brita 3/4"</i>	<i>Brita 3/8"</i>	<i>Pó-de-Pedra</i>	<i>Areia</i>
<i>3/4"</i>	<i>19,1</i>	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>1/2"</i>	<i>12,7</i>	47,9	100,0	100,0	100,0
<i>3/8"</i>	<i>9,5</i>	13,4	99,6	100,0	100,0
<i>n 4</i>	<i>4,76</i>	0,3	6,8	92,8	100,0
<i>n 8</i>	<i>2,38</i>	0,2	0,7	66,2	95,4
<i>n 30</i>	<i>0,59</i>	0,2	0,6	33,6	67,5
<i>n 50</i>	<i>0,297</i>	0,2	0,6	25,5	27,7
<i>n 100</i>	<i>0,149</i>	0,2	0,6	19,5	2,8
<i>n 200</i>	<i>0,074</i>	0,2	0,5	15,0	0,9

Nota: os ensaios de granulometria foram feitos com lavagem dos agregados na #200

Quadro 4.6 – Características dos agregados utilizados

<i>Propriedade</i>	<i>Método</i>	<i>Brita 3/4"</i>	<i>Brita 3/8"</i>	<i>Pó-de-Pedra</i>	<i>Areia</i>
<i>Absorção</i>	<i>DNER 081/98</i>	0,62%	0,62%	--	--
<i>Massa Específica (kN/m<sup>3</sup>)</i>	--	28,86 <sup>1</sup>	28,73 <sup>1</sup>	23,13	21,29
<i>Índice de Lamelaridade</i>	<i>DAER 108/01</i>	35,6%	30,5%	--	--
<i>Sanidade</i>	<i>DNER 089/1984</i>	2,4%			
<i>Perda à Abrasão LA</i>	<i>NBR 465/1984</i>	17%			

Nota: <sup>1</sup>: densidade efetiva – média aritmética da densidade real e aparente dos grãos

### 4.3.3 Borrachas

Foram selecionadas duas fontes de borracha: borracha proveniente da produção de bandas para recapagem e borracha proveniente da raspagem de pneumáticos na preparação para o processo de recauchutagem (Raspa). A borracha foi doada pela empresa Vipal Borrachas S.A. de Nova Prata.

Specht (2002) apresentou uma comparação entre borrachas provenientes da produção de bandas e de pneus convencionais moídos. A análise química e física indicam enorme semelhança entre os dois materiais. Tais dados estão apresentados no Anexo 1.

Na Tabela 4.4 e na Figura 4.8 estão apresentados os resultados médios das análises granulométricas das borrachas.

Tabela 4.4 – Análises granulométricas das borrachas estudadas

<i>Processo Produção</i>		<i>Criogênico</i>	<i>Criogênico</i>	<i>Criogênico</i>	<i>Cisalhamento Mecânico</i>	<i>Raspagem</i>
<i>Designação</i>		<i>#50</i>	<i>#30</i>	<i>&gt;#30</i>	<i>Cis</i>	<i>Raspa</i>
<i>Peneira</i>		<i>Porcentagem passante em massa (%)</i>				
<i>n°</i>	<i>mm</i>					
3/8"	9,50	---	---	---	---	100
4	4,76	---	---	---	100	94
8	2,38	---	---	---	24	73
10	2,00	---	---	100	14	54
16	1,19	---	---	99	2	38
20	0,84	---	100	92	1	26
30	0,59	100	99	31	1	14
40	0,42	99	69	1	1	8
80	0,177	9	9	1	1	2
100	0,149	1	1	1	0	1
200	0,074	1	1	1	0	0

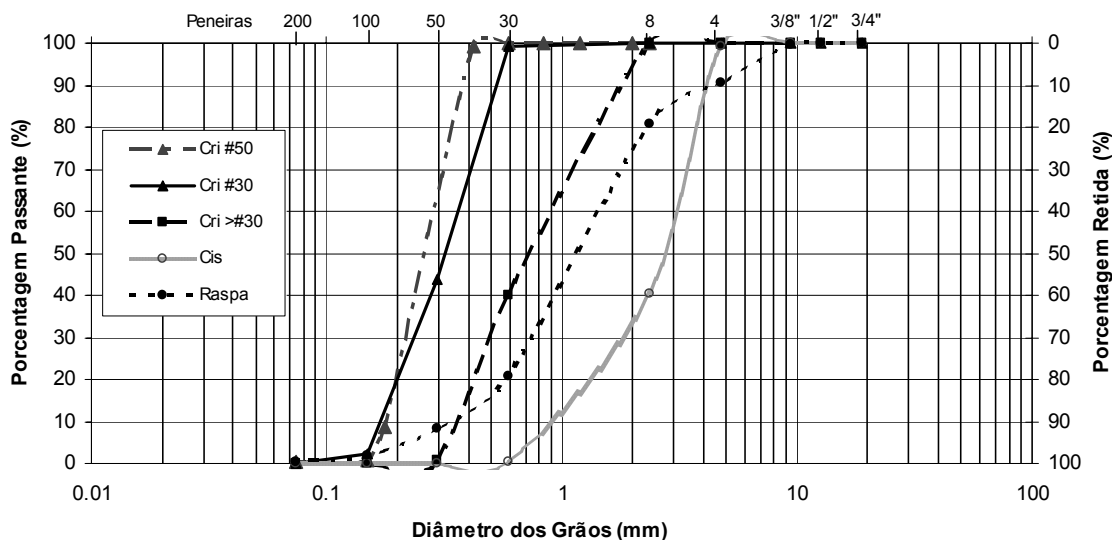


Figura 4.8 – Análises granulométricas das borrachas

Na Tabela 4.5 estão apresentadas as características médias das amostras de borracha. A metodologia adotada para determinação da massa específica real das borrachas, neste estudo, foram a picnometria com álcool e a picnometria com hélio, aquela recomendada pelo Departamento de Transporte do Estado do Tennessee (EUA) e normalizada pela ASTM D 297. O valor característico de massa específica e recomendado pela ASTM D 6114, para utilização da borracha como modificador de ligantes asfálticos, é de  $11,5 \text{ kN/m}^3 \pm 0,05$ . Maiores detalhes acerca destes ensaios encontram-se no anexo 1.

Tabela 4.5 – Propriedades das borrachas estudadas

<i>Propriedade</i>	<i>#50</i>	<i>#30</i>	<i>&gt;#30</i>	<i>Cis</i>	<i>Raspa</i>
<i>Massa específica real (kN/m<sup>3</sup>)<sup>1</sup></i>	11,34	11,46	11,47	11,38	11,24
<i>Massa específica real (kN/m<sup>3</sup>)<sup>2</sup></i>	10,80	12,10	11,00	11,40	11,11
<i>Massa específica aparente (kN/m<sup>3</sup>)</i>	3,20	3,90	4,20	4,80	3,20
<i>Superfície específica (m<sup>2</sup>/kN)</i>	141301	131656	78808	9798	42615
<i>% Negro de fumo<sup>3</sup></i>	35,62	32,26	32,21	33,61	31,25
<i>% Resíduo<sup>3</sup></i>	4,68	3,86	1,07	2,41	4,68
<i>T<sub>inicial de decomposição</sub> (°C)<sup>3-4</sup></i>	176	172	175	175	168
<i>T<sub>final de decomposição</sub> (°C)<sup>3-4</sup></i>	484	498	484	492	494

Nota: <sup>1</sup>: método de ensaio – picnometria com álcool; <sup>2</sup>: método de ensaio – picnometria com hélio; <sup>3</sup>: valores determinados através de análise termogravimétrica; <sup>4</sup>: valores das temperaturas iniciais e finais de decomposição do polímero.

## 4.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

### 4.4.1 Preparação do ligante modificado

As misturas de cimento asfáltico e borracha foram executadas em misturador de cisalhamento, com a amostra dentro de cuba térmica com controle eletrônico de temperatura. Este aparato foi projetado e desenvolvido durante a presente pesquisa e está apresentado nas Figura 4.9.

O ligante era pré-aquecido em estufa, pesado e colocado na cuba (também pré-aquecida), o rotor era ligado e então, colocava-se a borracha. A metade do tempo de colocação da borracha era adicionado ao tempo total. O percentual de borracha foi calculado em relação à massa total da mistura.

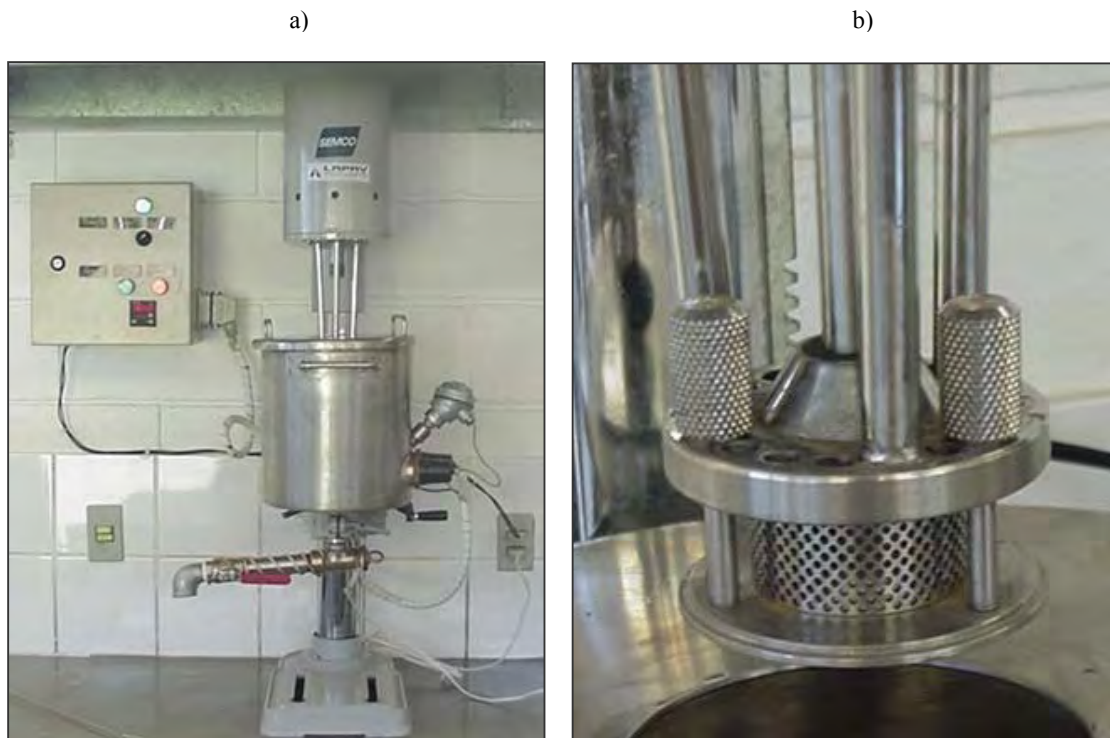


Figura 4.9 – Misturador asfalto polímero desenvolvido na pesquisa  
 a) vista geral do equipamento  
 b) detalhe do rotor de furo fino

#### 4.4.2 Preparação das amostras de concreto asfáltico

Primeiramente, foram coletados e armazenados cada um dos materiais componentes das misturas: agregados, ligantes e borrachas. Tomou-se o cuidado de armazenar o agregado em sacos impermeáveis, devidamente identificados, e em local isento de umidade. O ligante foi acondicionado e armazenado em latas de 3,6 litros para evitar seu reaquecimento. A borracha foi armazenada em sacos plásticos impermeáveis.

Para a moldagem das amostras de concreto asfáltico foram seguidos os seguintes passos:

i) separação dos agregados: cada uma das frações de agregado utilizada (brita 3/4", brita 3/8", pó-de-pedra e areia) eram secos em estufa à 60°C e separada em frações granulométricas, seguindo as mesmas peneiras da especificação do DAER/RS; em seguida cada fração era lavada na respectiva peneira e então seca em estufa e acondicionada em sacos plásticos; para separação dos agregados foi utilizado um agitador de peneiras específico para esta finalidade;



ii) pesagem e mistura: a partir do ajuste granulométrico, feito com auxílio de uma planilha eletrônica, o material pétreo era pesado em bandejas metálicas, e então levado à estufa para aquecimento; a determinação das temperaturas de mistura e compactação foram determinadas através da relação temperatura *versus* viscosidade. Segundo Pinto (1998) a temperatura ideal de aquecimento do CAP para a confecção de concreto asfáltico corresponde a uma viscosidade do CAP de  $85 \pm 10$  segundos, e a temperatura correspondente à viscosidade  $140 \pm 15$  segundos é a indicada para compactação da massa asfáltica. A temperatura de mistura foi entre 150 e 156 °C e a temperatura de compactação entre 138 e 143 °C (ligante CAP 20). Para as misturas borracha-agregado as temperaturas adotadas foram 10°C acima.

A mistura dos agregados foi feita em um misturador eletromecânico desenvolvido durante a pesquisa. Esse equipamento é composto por um motor elétrico trifásico, controle eletrônico de rotação, cuba térmica dotada de duas resistências elétricas (2000W cada) imersas em óleo térmico e com capacidade para 10 litros; o controle de temperatura da cuba era feito através de um controlador digital com precisão de 2°C. A massa era preparada, aproximadamente, para 5,5 amostras em cada batelada para preparação de 5 amostras.

iii) compactação: a densificação dos corpos-de-prova foi realizada em compactador mecânico tipo Marshall com frequência de 60hz e contador eletrônico do número de golpes. A massa era colocada em três camadas dentro de um molde pré-aquecido e sofria acomodação por golpes de um bastão de cobre. A energia de compactação, salvo casos especiais, era de 75 golpes por face, como preconizam as normas sobre a metodologia Marshall com frequência de 1golpe por segundo.

iv) desmoldagem: após a compactação as amostras eram deixadas em descanso por vinte e quatro horas e então extraídas dos moldes, que sofriam um leve aquecimento para facilitar o processo; as amostras eram então identificadas, medidas, pesadas e encaminhadas aos ensaios específicos.

Na Figura 4.10 são apresentados os equipamentos utilizados em cada uma das 4 etapas de preparação de amostras.



Figura 4.10 – Equipamentos utilizados nas etapas de preparação das amostras  
 a) agitador de peneiras para agregados  
 b) misturador elétrico com cuba aquecida  
 c) compactador Marshall  
 d) molde utilizado para preparação das amostras de CBUQ

A preparação das placas de CBUQ a serem submetidas ao ensaio de deformação permanente em simulador francês seguiu metodologia própria de preparação, as quais são descritas por Moura (2001).

## 4.5 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS E DESCRIÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Diversas técnicas laboratoriais foram selecionadas e utilizadas para avaliação dos ligantes modificados com borracha e das misturas borracha-agregado. Os ensaios foram realizados no DAER/RS, na UFRGS, na Petrobrás/CENPES, na UNIJUÍ e na EPUSP. Foram realizados, também, ensaios de campo no trecho experimental, executado durante a pesquisa.

### 4.5.1 Ensaio em amostras de ligantes

#### 4.5.1.1 Penetração

A penetração (PN) é a distância em décimo de milímetros que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra sob condições prefixadas de carga e temperatura. O equipamento utilizado para este fim é o penetrômetro.

O ensaio é normalizado pela ABNT/NBR 6576 – Determinação da Penetração de Materiais Betuminosos. Para realização do ensaio a amostra é fundida, colocada em um recipiente adequado, resfriada a temperatura de ensaio (comumente 25 °C), em banho de água e submetida à penetração de uma agulha padrão com sobrecarga de  $100 \pm 0,5$  g durante 5 s.

#### 4.5.1.2 Ponto de amolecimento

O asfalto amolece lentamente sob aquecimento e não possui ponto de fusão. Para se ter uma referência semelhante ao ponto de fusão, várias metodologias foram desenvolvidas a fim de medir a temperatura na qual o asfalto possui certa consistência, o mais conhecido e empregado é o ponto de amolecimento anel e bola.

O ponto de amolecimento do asfalto foi determinado conforme a norma NBR 6560 (Método Anel e Bola). Neste teste a amostra é fundida e colocada em um molde que consiste de um anel de latão. O anel contendo a amostra é mantido suspenso em um banho, a temperatura controlada, e sobre ele é colocada uma esfera padronizada de aço. O conjunto é aquecido a uma velocidade constante fazendo com que a amostra amoleça dentro do anel e ceda ao peso da bola que se deslocará a uma determinada distância.

O ponto de amolecimento (PA) é a temperatura lida no momento em que a esfera metálica atravessa o anel perfeitamente cheio de material betuminoso e toca uma placa de referência após ter percorrido uma distância de 25,4 mm.

#### 4.5.1.3 Ponto de fulgor

O ponto de fulgor (PF) é a menor temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento do material betuminoso se inflamam, quando sobre ele passa uma chama sob determinadas condições. Tem por finalidade evitar acidentes de trabalho e verificar possível contaminação do cimento asfáltico com solventes

O equipamento adotado para a realização do ensaio é o Vaso Aberto Cleveland e o procedimento detalhado encontra-se na NBR 11341.

#### 4.5.1.4 Densidade e massa específica

Densidade é a relação entre a massa do cimento asfáltico de petróleo a 25 °C e a massa de igual volume de água à 4°C. A determinação deste parâmetro tem por finalidade a transformação de unidades gravimétricas em volumétricas e é utilizado no cálculo do volume de vazios da mistura betuminosa. Massa específica é a relação entre massa e volume do material. A sistemática do ensaio está padronizada no método DNER – ME 193/96.

#### 4.5.1.5 Estabilidade à estocagem

Um dos aspectos práticos que condicionam a uniformidade da produção de misturas com asfaltos modificados por polímero é a compatibilidade asfalto/polímero ou a segregação destas fases durante o transporte e estocagem.

Nesta pesquisa a estabilidade à estocagem foi avaliada através do método preconizado pela ASTM D 5892. O ensaio consiste em colocar a amostra líquida de ligante modificado em um tubo cilíndrico de alumínio (2,54mm de diâmetro e 139.7mm de comprimento) fechado em uma das extremidades. Esse tubo é selado e levado à estufa por 48 horas à  $163 \pm 5^\circ\text{C}$ ; realizam-se, então, ensaios de ponto de amolecimento anel e bola de amostras do topo e fundo. O resultado é a diferença das medidas e é expresso em graus.

#### 4.5.1.6 Ductilidade

A ductilidade é a propriedade de um material suportar grandes deformações (alongamento) sem ruptura, caracteriza uma resistência à tração e a flexibilidade do material. A ductilidade é a distância em centímetros que uma amostra de material betuminoso, em condições padronizadas, submetida à tração, se rompe. A temperatura de ensaio é de  $25^\circ\text{C}$  e a velocidade de deformação de 5 cm/mim. O ensaio é normalizado pela NBR 6293.

Os ensaios de ductilidade, retorno elástico, envelhecimento, reometria em DSR e BBR, também foram realizados no CENPES.

#### 4.5.1.7 Recuperação elástica

A Recuperação Elástica ou Resposta Elástica é a capacidade do ligante de recuperar sua dimensão, após ter sido tracionado 20 cm à  $25^\circ\text{C}$ . O ensaio é realizado no mesmo aparelho utilizado para medir a ductilidade. A resposta elástica expressa a distância, em centímetros (ou percentual da distância inicial), que um corpo-de-prova retorna, após uma hora da remoção da tensão de tração. O ensaio é normalizado pelo DNER – ME 382/99

#### 4.5.1.8 Envelhecimento de curto prazo

O método de envelhecimento em estufa de filme delgado rotativo ou RTFOT (*Rolling Thin-Film Oven Test* – ASTM D 2872) foi selecionado para representar o envelhecimento do ligante que ocorre no processo de mistura.

O ensaio RTFOT é realizado em uma estufa elétrica especial com circulação de ar (4 litros por minuto) onde amostras com  $35 \pm 0,5\text{g}$  de ligante virgem são colocados em recipientes

cilíndricos abertos e aquecidas a 163°C por  $80 \pm 5$  minutos em um suporte rotativo. Em seguida as amostras são resfriada à temperatura ambiente, pesadas e, então, é calculada a perda de massa das amostras.

Este procedimento serviu também para produzir amostras envelhecidas para serem ensaiadas no DSR e a serem submetidas ao envelhecimento à longo prazo. Os ensaios foram realizados em uma estufa da marca James Cox & Sons Inc modelo CS 325A.

#### 4.5.1.9 Envelhecimento de longo prazo

O ensaio de envelhecimento acelerado, por meio de ar sob pressão e temperatura, em um vaso de pressão PAV (*Pressure Aging Vassel* – ASTM D6521) simula o envelhecimento do ligante durante a vida de serviço do pavimento. O ensaio de envelhecimento em longo prazo ou envelhecimento em serviço consiste em expor o ligante, previamente envelhecido em RTFOT a condições extremas de temperatura e pressão.

O equipamento consiste em um forno com capacidade para várias amostras simultaneamente e funciona a pressão de 2070 kPa e temperaturas de 100°C durante 20 horas. O equipamento utilizado é da marca Prentex modelo 9300 PAV System.

#### 4.5.1.10 Viscosidade aparente

A consistência dos ligantes é medida através da viscosidade. O ensaios de viscosidade rotacional foi selecionado para medir esta propriedade. O ensaio, normalizado pela ASTM D 4402, consiste na medição do torque necessário para rodar uma haste de prova (*spindle*) imersa em uma amostra de ligante aquecida sob velocidade constante.

A quantidade de amostra utilizada no ensaio depende do tamanho da haste de prova, que deve ser selecionada em função do ligante; para ligantes convencionais é utilizado o spindle 21 e para ligantes modificados o 27 (AI, 1994; AI, 2000). A velocidade de ensaio deve ser mantida constante, preferencialmente 20rpm. Foram realizadas medidas de viscosidade à 135, 155, 175 e 195°C.

#### 4.5.1.11 Cisalhamento dinâmico

O ensaio realizado com o equipamento Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR – *Dynamic Shear Rheometer*), mede o módulo de cisalhamento complexo,  $G^*$ , e o ângulo fase  $\delta$ . O parâmetro  $G^* \text{ sen } \delta$  pode ser relacionado ao trincamento por fadiga e o  $G^* / \text{sem } \delta$  com deformações permanentes. Foram ensaiadas tanto amostras virgens quanto envelhecidas a curto prazo em estufa de filme rotativo (RTFOT). Foram estabelecidos valores mínimos capazes de garantir adequada resistência ao acúmulo de deformações permanentes ( $G^* / \text{sem } \delta$  maiores que 1,0 kPa e 2,2 kPa para amostras virgens e envelhecidas, respectivamente).

Quando o ensaio é realizado em amostras envelhecidas a longo prazo em vaso de pressão (PAV – *Pressure Aging Vassel*), o valor de  $G^* \text{ sen } \delta$  especificado para evitar o aparecimento de trincas por fadiga deverá ser menor que 5000 kPa. A deformação de cisalhamento, que varia de 1 a 20 %, depende do estado de envelhecimento da amostra (amostras virgens ou envelhecidas em ensaio de filme rotativo normalmente entre 10 e 20 % e amostras envelhecidas em vaso de pressão a deformação é de 1 %).

O ensaio consiste em colocar uma amostra circular de ligante entre duas placas paralelas, uma fixa e outra oscilante; as amostras virgens e após RTFOT com 25mm de diâmetro e 1mm de espessura e as amostras após PAV com 8mm de diâmetro e 2mm de espessura; determina-se a temperatura que se deseja fazer o ensaio; espera-se 15 minutos até equalização da temperatura; aciona-se o equipamento que gira a parte móvel com uma frequência de 10 radianos por segundo aplicando então uma tensão cisalhante na amostra. Os dados de tensão, deformação e deslocamento são lidos e gravados por um microcomputador.

Os ensaios de cisalhamento dinâmico foram realizados em um equipamento da TA Instruments modelo CSA100. Maiores detalhes sobre este e os demais ensaios SUPERPAVE™ são descritos por AI (1994).

#### 4.5.1.12 Rigidez e fluência na flexão

Para avaliar as propriedades dos ligantes a baixas temperaturas foi utilizado o reômetro de viga à flexão (BBR – *Bending Beam Rheometer* – ASTM D6648) onde se mede a rigidez em *creep*,  $S$ , a baixas temperaturas e a inclinação da curva de rigidez em *creep versus* tempo de

carga,  $m$ . Ambos os parâmetros foram relacionados ao trincamento térmico a baixas temperaturas, sendo que  $m$ , também foi relacionado ao trincamento por fadiga.

O ensaio consiste em submeter uma amostra prismática de ligante envelhecido (após RTFOT e PAV), simplesmente apoiada a um carregamento constante no centro do vão, durante 240 segundos. A amostra é mantida imersa em banho de líquido refrigerante, o qual mantém constante a temperatura do ensaio.

A especificação SUPERPAVE™ recomenda que o valor de rigidez no ensaio BBR seja menor que 300MPa em 60 segundos. Ligantes com altos valores de  $m$  são mais eficientes na dissipação de tensões formada durante a contração do ligante, em quedas abruptas de temperatura. Recomenda-se que o valor de  $m$ , calculado para  $t=60s$ , seja maior que 0,300.

## 4.5.2 Ensaio em amostras de concreto asfáltico

### 4.5.2.1 Dosagem Marshall

No Brasil, os projetos de misturas asfálticas são feitos quase que exclusivamente em acordo com a metodologia Marshall. O Método Marshall foi desenvolvido na década de 30 por Bruce G. Marshall, do Departamento de Transporte do Estado do Mississippi nos Estados Unidos. Esse método foi idealizado para efeito da determinação da quantidade de ligante que deveria ser usada na composição de mistura betuminosa, destinadas a serviços de pavimentação rodoviária.

Durante o período da segunda guerra mundial, o exército dos EUA passou a procurar um método simples, prático e eficiente para a tarefa de dosagem e controle da qualidade das misturas asfálticas preparadas a quente, para uso na pavimentação de pistas de aeroportos militares. A razão determinante dessa necessidade foi o crescente aumento das cargas e das pressões dos pneus impostos pela aviação militar, devido ao desenvolvimento de pesados aviões de bombardeiro.

O estudo desta questão foi encaminhado ao Corpo de Engenheiros do Exército Americano que, após uma análise comparativa entre os métodos disponíveis até então, optou pelo método Marshall, por sua rapidez, simplicidade e relativa eficiência, aliado a sua portabilidade e fácil



disponibilidade dos equipamentos necessários à realização dos ensaios requeridos. Em face disso, uma extensa pesquisa sobre o método Marshall foi desenvolvida por esse órgão. Em decorrência desse estudo, o referido método teve seu uso adotado pelo exército e acabou tornando-se internacionalmente conhecido e utilizado.

Em síntese, a sistemática de procedimentos do método consiste no seguinte: molda-se por compactação a quente, uma série de corpos-de-prova com diferentes porcentagens de ligante asfáltico<sup>1</sup>, dentro de molde cilíndricos metálicos que depois são armazenados, ao ar livre, durante 24 horas; em seguida, esses corpos-de-prova são imersos num banho de 60 °C de temperatura, sendo a seguir retirados do banho e, imediatamente, submetidos a uma compressão diametral, aplicada por uma prensa, através de um molde de compressão cilíndrico, idealizado por Marshall.

O valor da carga máxima suportada pelos corpos-de-prova é conhecido como estabilidade Marshall e a deformação de ruptura de fluência. Além destes dois parâmetros são calculados também, a densidade, o volume de vazios e a relação entre vazios do agregado mineral preenchidos por betume. Os valores limites dos parâmetros Marshall são normalizados por diversos órgãos rodoviários. Os valores de estabilidade e fluência foram determinados à 60°C e corrigidos em função da altura ou volume do corpo-de-prova, conforme preconiza DNER 043/95. AI (1995a) traz maiores detalhes a respeito dos procedimentos do ensaio.

Kandhall e Koehler (1985), Withe (1985), Sidiqi *et al.* (1988), e Ogurtsova *et al.* (1999) comentam a respeito das limitações e variáveis que influenciam os procedimento Marshal de dosagem de misturas asfálticas.

#### 4.5.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral, tração indireta ou tração por compressão diametral é conhecido internacionalmente como “ensaio brasileiro”; foi desenvolvido, inicialmente, pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro para determinar a resistência à tração de corpos-de-prova de argamassa, através de solicitação estática.

---

<sup>1</sup> Nesta pesquisa foram moldados pelo menos 5 amostras com 5 teores e as variáveis de resposta eram medidas no ajuste estatístico (curva de regressão).

A realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, realizadas em amostras Marshall com 116,0mm de diâmetro e 63,5mm de altura, seguiu as prescrições da norma DNER-ME 138/86. A velocidade de avanço do carregamento é de 0,8mm/s e a equação utilizada para o cálculo de  $R_t$  é a seguinte:

$$q_{ut} = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (4.2)$$

onde  $F$  é a força aplicada,  $h$  e  $d$  são a altura e o diâmetro do corpo-de-prova, respectivamente.

O ensaio consiste na aplicação de um carregamento de compressão em amostras cilíndricas; o carregamento é aplicado em planos paralelos, diametralmente opostos. Esta configuração de carga, gera um plano de tensões de tração, razoavelmente uniforme no plano perpendicular ao da aplicação da carga. O estado biaxial de tensões, gerado na amostra durante o carregamento, está esquematicamente apresentado na Figura 4.11. Esta configuração de solicitação é verificada também nos ensaios de módulo de resiliência e fadiga.

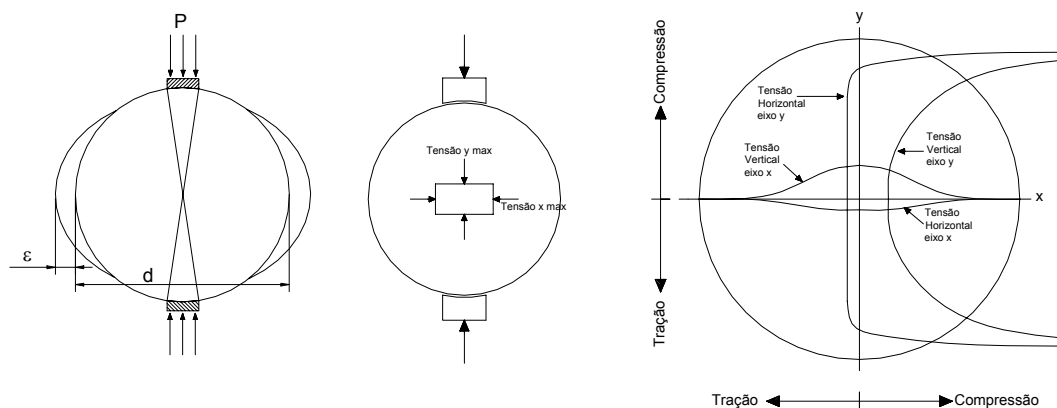


Figura 4.11 – Estado de tensões gerado no ensaio brasileiro

#### 4.5.2.3 Módulo de resiliência

O módulo de resiliência das amostras de concreto asfáltico foi determinado através da prescrições do DNER-ME 133/94 e do TRB (1975).

Utilizaram-se para estes ensaios, corpos-de-prova de 101,6mm de diâmetro e 63,5mm de altura. O equipamento utilizado, conforme Figura 4.12, é composto por uma estrutura metálica, um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. O equipamento funciona dentro de uma câmara com temperatura controlada; isso permite ensaios em diversas temperaturas.

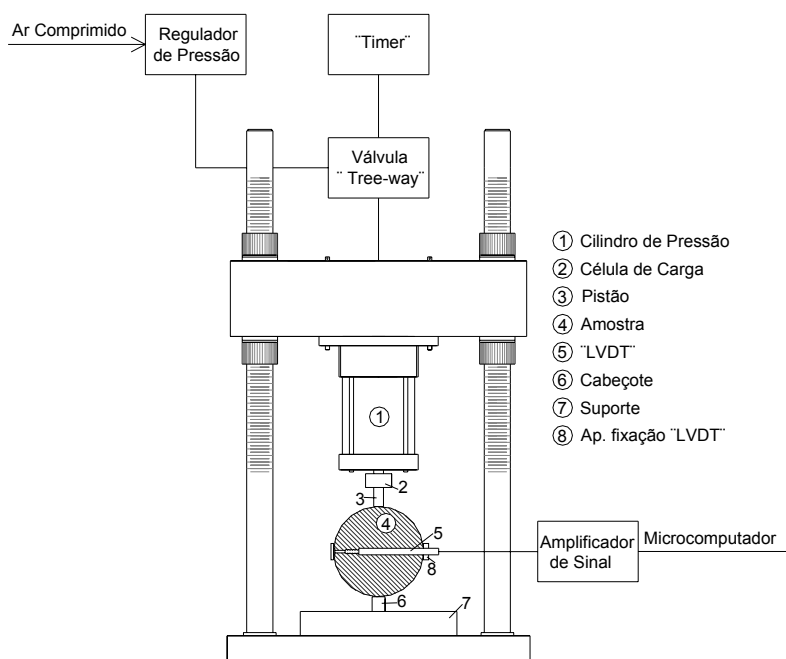


Figura 4.12 – Corte esquemático do equipamento de módulo de resiliência

A partir da aplicação do carregamento, com tempo de 0,1s e 0,9s de repouso, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um L.V.D.T., ligado a um microcomputador. O ensaio é realizado em duas direções: após a execução do ensaio a amostra é rotacionada em 90° e o ensaio é novamente conduzido.

O coeficiente de Poisson foi fixado em 0,30 para 25°C (DNER-ME 133/94); para temperatura de ensaio de 10°C o  $\mu$  foi de 0,25 e para 45°C de 0,45 (BSI, 1993). A consideração de diferentes coeficientes de Poisson para distintas temperaturas se faz necessário, devido a alteração, nas propriedades mecânicas, das misturas com a alteração da temperatura.

A Equação 4.3 foi utilizada para o cálculo.

$$Mr = \frac{P}{\Delta h} \cdot (0,2692 + 0,9976 \cdot \mu) \quad (4.3)$$

Onde  $Mr$  é o módulo de resiliência,  $P$  é a carga aplicada,  $\Delta$  a deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga,  $h$  a altura do corpo-de-prova e  $\mu$  o coeficiente de Poisson. Na Figura 4.13 estão apresentados o pulso de carga e o pulso de deformação *versus* tempo, típicos dos ensaios realizados.

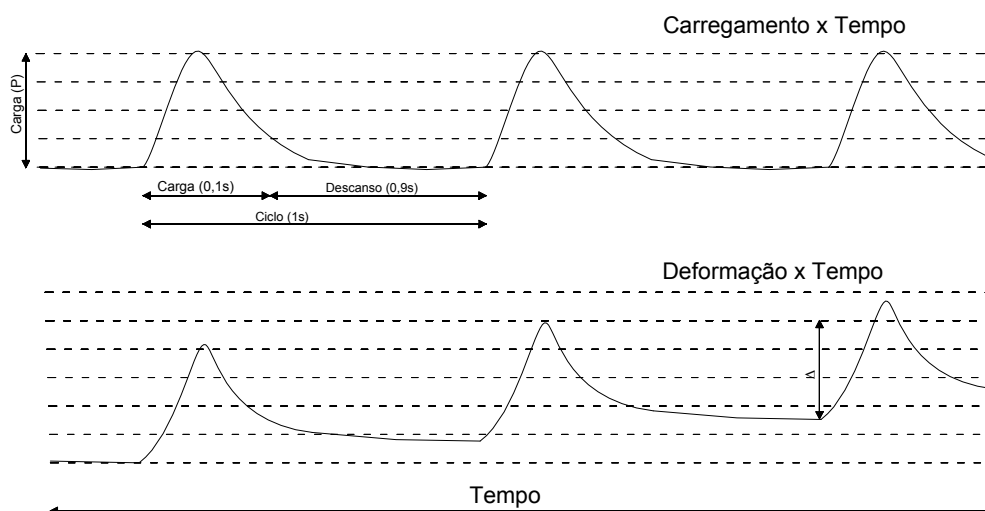


Figura 4.13 – Registro gráfico típico do ensaio de módulo de resiliência

#### 4.5.2.4 Fadiga

Os tipos de ensaios laboratoriais mais utilizados para a determinação da vida de fadiga distinguem-se quanto ao processo de desenvolvimento das tensões: flexão, torção, tração direta ou indireta, que se aplicam a corpos-de-prova de geometria apropriada e diferente para cada um (disco cilíndrico, vigas, amostra trapezoidais com seção variável, etc.). No Brasil, o ensaio mais comum é o de compressão diametral à tensão controlada. Este ensaio tem sido utilizado em todo mundo, devido a sua simplicidade, tanto na execução quanto na preparação das amostras. As amostras podem ser preparadas com o uso do soquete Marshall ou extraídas de placas ou da pista.

Nesta pesquisa foi utilizado, para determinação da vida de fadiga dos concretos asfálticos testados, o mesmo sistema de carregamento do ensaio de módulo de resiliência, entretanto a amostra era submetida a diversos níveis de tensão (proporcionais à tensão de tração estática) e levadas à ruptura por fadiga. A temperatura dos ensaios foi de 25°C e as amostras ensaiadas tinham volume de vazios igual a 4%.

Segundo Tangella *et al.* (1990) e Read e Collop (1997) as principais vantagens deste ensaio são: simplicidade de execução, possibilidade de correlação dos resultados com desempenho em campo, o equipamento é utilizado para outros ensaios como módulo de resiliência e resistência à tração, o trincamento inicia em uma zona com estado uniforme de tensões, estado biaxial de tensões, possibilitando uma melhor representação das condições de campo, o ensaio pode ser realizado com amostras preparadas em laboratório ou extraídas de pista, é de boa repetibilidade e reprodutibilidade, é barato, comercialmente viável e experimentalmente sensível.

#### 4.5.2.5 Deformação Permanente

Uma das propriedades das misturas asfálticas, que condicionam seu adequado comportamento estrutural, é a sua capacidade de resistir ao afundamento plástico em trilhas de roda. Diversos trabalhos têm tratado deste tema, bem como da qualificação, através ensaios de laboratório, de misturas asfálticas submetidas à deformação plástica: Souza *et al.* (1991), Brown e Gibb (1996), Merighi (1999) e Brown *et al.* (2001).

Nesta pesquisa duas técnicas laboratoriais foram utilizadas:

##### a) Ensaio de *creep* dinâmico com amostra confinada

O ensaio de *creep* dinâmico com amostra confinada trata-se de um teste realizado à 60°C, em uma câmara triaxial, onde é possível aplicar uma tensão confinante (137,8kPa) e uma tensão vertical pulsante (826,8kPa). Este ensaio é mais representativo, devido ao maior intertravamento e mobilização dos agregados pela tensão confinante, que o *creep* convencional (sem confinamento) (Brown *et al.* 2001).

Alguns ensaios preliminares realizados em corpos-de-prova, testados nas condições descritas, apontaram para necessidade de redução da temperatura e/ou da tensão vertical. Manteve-se,

então o estado de tensões original e a temperatura adotada foi de 45°C. O frequência da aplicação de carga foi de 1Hz, com duração de 0,1s.

A realização do ensaio consiste em: i) condicionar as amostras com aplicação da tensão confinante de 137,8kPa e 30 repetições de carga com tensão normal de 640kPa; ii) aplicar uma tensão normal vertical de 826,8kPa durante 1 hora (3600 ciclos); iii) suspender a aplicação de carga e registrar as deformações de expansão da amostra durante 15 minutos. A deformação acumulada ao final deste período é considerada deformação permanente (ver Figura 4.14).

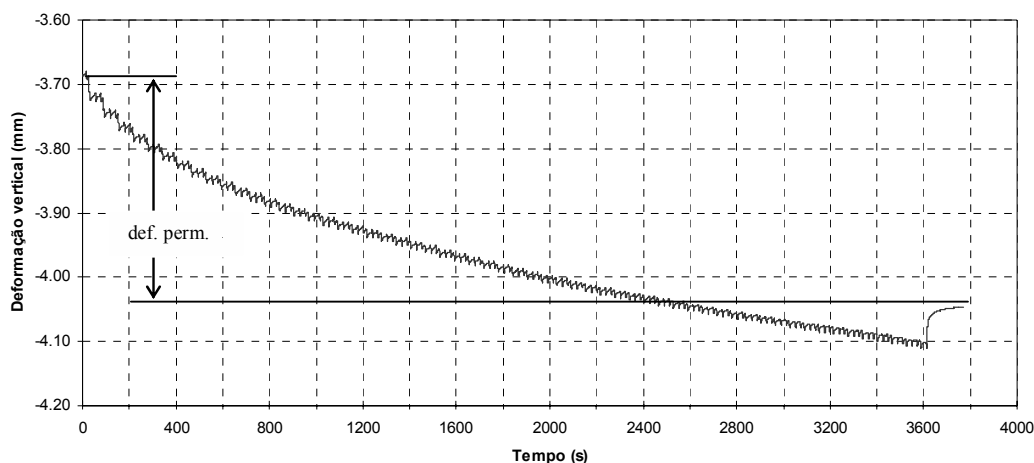


Figura 4.14 – Resultado típico de um ensaio de *creep* dinâmico com confinamento

O equipamento utilizado é composto por um sistema de aplicação de carga e uma câmara triaxial, situados no interior de uma câmara com controle automático de temperatura. Esse aparato foi montado por Homem (2002). O corte esquemático do equipamento pode ser visualizado na Figura 4.15.

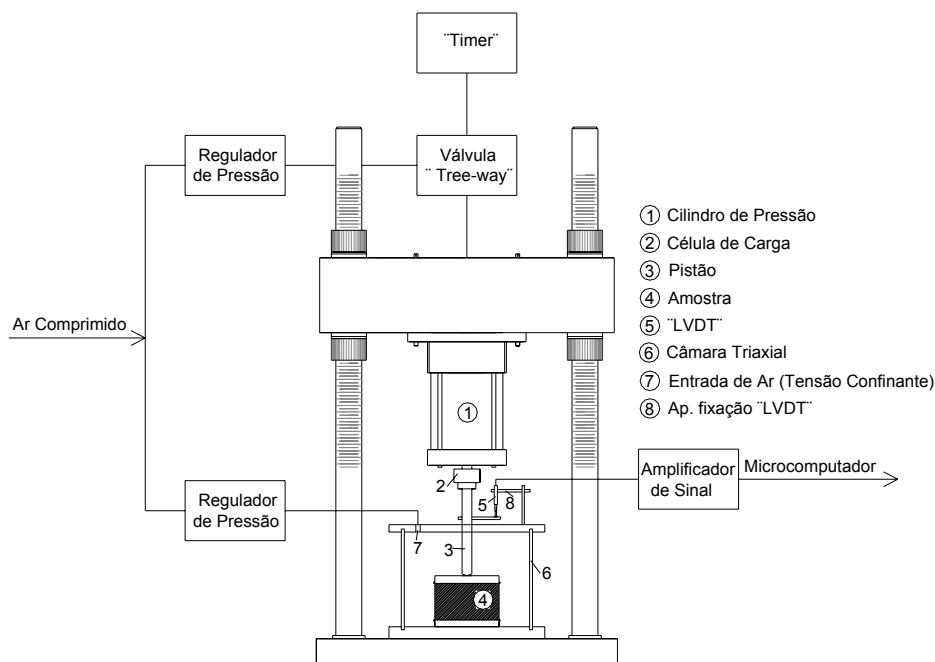


Figura 4.15 – Corte esquemático do equipamento de *creep* dinâmico com confinamento

O sistema de aplicação de carga utilizado é semelhante ao utilizado nos ensaios de módulo de resiliência e fadiga. Os instrumentos de medição (LVDT e célula de carga) foram ligados a um microcomputador para aquisição automática de dados.

#### b) Ensaio em simulador de tráfego tipo LCPC

Os ensaios de deformação permanente, com a utilização do simulador de tráfego francês tipo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – essai d’ornièrage*), foi realizado em acordo com a norma francesa NF P 98-253-1, no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

O simulador de tráfego francês utiliza um par de placas moldadas em mesa compactadora tipo LCPC. As dimensões dessas placas são: 180mm de largura, 500mm de comprimento e 50mm de altura. A compactação se dá por amassamento da mistura asfáltica pelo pneumático, alterando sua pressão de inflação e posição de passagem. Após a compactação, as placas são deixadas em repouso por um período mínimo de 48 horas. Na Figura 4.16 a e b estão apresentadas, a mesa compactadora e o simulador de tráfego tipo LCPC.

O ensaio consiste em submeter duas placas iguais, uma em cada lado do equipamento, a carregamentos repetidos (1Hz) de um pneu com pressão de inflação e carga reguláveis. A pressão de inflação dos pneus utilizada foi de 600kPa, enquanto a carga foi de 5,4kN e a área de contato 0,00935m<sup>2</sup> (pressão de contato igual a 577kPa). A aplicação da carga é feita em movimentos de ida e retorno da roda sobre a parte central do corpo-de-prova (sentido longitudinal). A temperatura utilizada no ensaio é de 60°C e a frequência de 1Hz. O sistema de leitura do afundamento da trilha de roda é feita por um conjunto de extensômetros no início do ensaio e após 100, 300, 1000, 3000, 10000 e 30000 ciclos. Merighi (1999), Brown *et al.* (2001) e Moura (2001) apresentam maiores detalhes a respeito da preparação das placas e da consecução do ensaio.

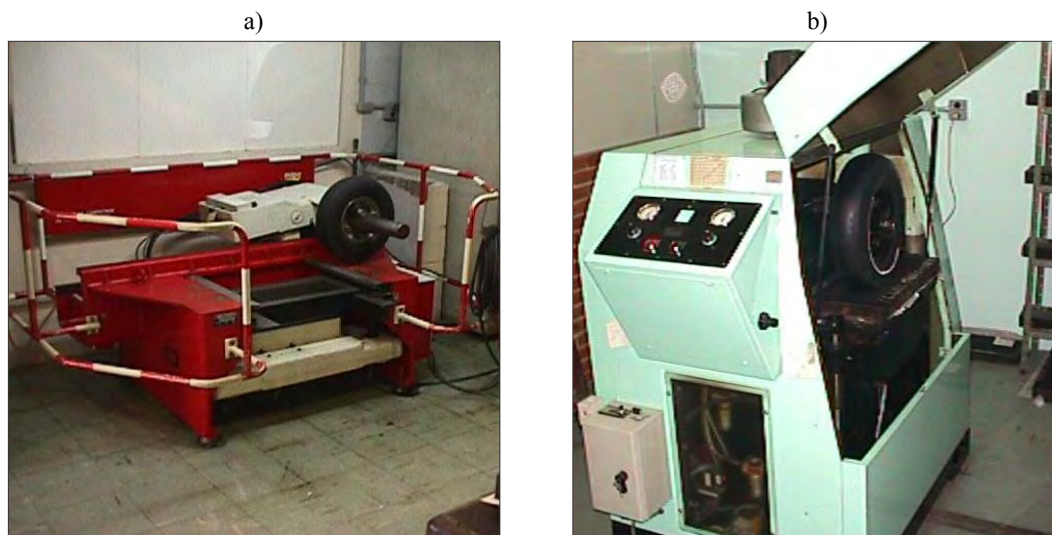


Figura 4.16 – Conjunto de equipamentos de ATR tipo LCPC

a) mesa compactadora

b) simulador de tráfego francês

#### 4.5.2.6 Perda de massa por desgaste

A metodologia Cantabro foi selecionada para avaliar a perda de massa por desgaste ou abrasão. Este ensaio, desenvolvido para avaliar misturas abertas, foi criado e normalizado, inicialmente, no *Centro de Estudios Carreteras* na Espanha (CEC 325/86) e, posteriormente normalizado e no Brasil sob as normas DNER – ES 383/99 e DAER – EL215/01.

O ensaio consiste em submeter amostras (uma por vez) de concreto asfáltico à 300 revoluções (33rpm), dentro da máquina de abrasão Los Angeles, sem as esferas metálicas (temperatura Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus



das amostras = 25°C). A massa das amostras é determinada antes e depois do ensaio e é calculada a perda de massa por desgaste. Este ensaio avalia de maneira indireta a coesão, resistência à abrasão e a resistência à desagregação de misturas asfálticas.

Para misturas de pré-misturado a quente, com asfalto polímero, para utilização como camada porosa de atrito, o valor máximo de perda de massa aceitável é de 25% (DNER – ES 386/99). Ressalta-se que nesta pesquisa as amostras ensaiadas tinham 4% de vazios.

Estes ensaios foram realizados com o a Máquina de Abrasão Los Angeles da Unidade de Normas e Pesquisas do DAER/RS em Porto Alegre.

#### 4.5.2.7 Efeito deletério da água

O ensaio Lottman Modificado (AASHTO T 283-89 ou ASTM D4867) avalia as propriedades de adesividades em misturas asfálticas, considerando o efeito deletério da água, em amostras cilíndricas, preparadas através da Metodologia Marshall, com volume de vazios de aproximadamente 7% ( $\pm 1\%$ ). A análise é feita pela relação entre a resistência à tração de amostras com condicionamento prévio e amostras sem condicionamento. Esta relação é denominada Resistência Retida à Tração (RRt).

O valor obtido desta relação pode ser utilizado para prever o desempenho de misturas asfálticas, em campo (4 à 12 anos), face a adesividade ligante/agregado e também para verificar o efeito da adição de aditivos químicos ou pulverulentos, na adesividade da mistura.

Kandhal (1992) e Moura (2001) apresentam estudos sobre a susceptibilidade de misturas asfálticas ao dano induzido pela umidade. O primeiro autor afirma que a Metodologia Lottman Modificada (AASHTO T 283-89) tem sido recomendada, em várias agências estaduais americanas, para avaliar o potencial de desagregação de misturas asfálticas. Ambos os autores fazem recomendações sobre a utilização de aditivos e da cal como melhoradores da adesividade de misturas asfálticas.

A marcha do ensaio é a seguinte: i) preparam-se seis amostras, seguindo a Metodologia Marshall, com volume de vazios entre 6% e 8% e separa-se em dois grupos com 3 amostras cada; ii) o primeiro grupo é submetido ao ensaio de resistência à tração (ensaio de tração por compressão diametral) após a imersão em água à 25°C, por duas horas, em sacos plásticos

impermeáveis, determina-se o valor de  $Rt_1$  (média dos três valores); iii) as amostras do segundo grupo são, inicialmente, saturadas (o grau de saturação deve ficar entre 55 e 80%<sup>7</sup>). Essa saturação é conseguida com a aplicação de pressão de vácuo de, aproximadamente, 660mmHg, durante 30 minutos; iv) acondicionam-se os corpos-de-prova em sacos plásticos com, aproximadamente, 3ml de água destilada dentro de cada saco; v) colocam-se, então, os corpos-de-prova sob refrigeração à temperatura de -18°C, durante 15 horas; vi) as amostras são removidas da refrigeração e imediatamente imersas em banho (em água destilada), à temperatura de 60°C, por um período de 24 horas; vii) transferem-se, cuidadosamente, as amostras para um banho, à temperatura de 25°C, por um período de 2 horas; viii) rompem-se os corpos-de-prova submetidos ao condicionamento e determina-se o valor de  $Rt_2$ ; ix) calcula-se, através do quociente entre  $Rt_2$  e  $Rt_1$  (em percentagem), o valor de  $RRt$ .

Este ensaio pode, também, ser realizado com amostras extraídas de pista. O valor mínimo, indicador de boa resistência ao efeito deletério da água, de  $RRt$  recomendado por Hicks (1991) é de 70%; a Metodologia SUPERPAVE™ recomenda o valor de 80%, como mínimo.

### 4.5.3 Ensaio de campo

#### 4.5.3.1 Microtextura

A técnica que utiliza o Pêndulo Britânico foi usada para estimar a microtextura dos pavimentos, seguindo as prescrições da ASTM (ASTM D303). O ensaio consiste em friccionar, sob movimento pendular, uma sapata padronizada de borracha na superfície do pavimento molhado. A leitura é dada pelo deslocamento do pêndulo após o contato com o pavimento. O equipamento utilizado foi da marca Mastrad, modelo S885, e está apresentado na Figura 4.17.

---

<sup>7</sup> A nova especificação fixa estes valores entre 70 e 80%



Figura 4.17 – Equipamentos portátil de medição de textura tipo pêndulo inglês

#### 4.5.3.2 Macrotextura

Foram selecionadas duas metodologias distintas para medição da macrotextura do pavimento:

##### a) Altura de Areia

O processo de mensuração da macrotextura, pelo método da altura de areia (ASTM E965), consiste em espalhar, com movimentos circulares de um dispositivo apropriado na superfície do pavimento, um volume conhecido de areia (microesferas de vidro com 90% de esfericidade) com tamanho padronizado (90% passante na peneira nº60 e retida na nº80). Mede-se o tamanho da mancha, e então calcula-se a altura da macrotextura. No momento do ensaio o pavimento deve estar perfeitamente limpo e seco. O aparato utilizado neste ensaio está apresentado na Figura 4.18 (a).

##### b) Drenabilidade

A metodologia avalia a rugosidade do pavimento pela medição da capacidade de drenar a água. O equipamento foi construído no Laboratório de Pavimentação da UFRGS com as mesmas dimensões do drenômetro do *Institute for Highways, Railroads and Rock Engineering* (ISETH) de Zurique, conforme mostra a Figura 4.18b.

O método utiliza um tubo de acrílico transparente acoplado a um fundo perfurado em dimensão padrão, colado a um anel de borracha com dureza especificada que entra em contato com a superfície do pavimento. O tubo é preenchido com um volume conhecido de água que irá drenar através dos canais que a borracha não vedar.

Mede-se o tempo que a água leva para drenar, sob pressão atmosférica, após a abertura do furo no fundo do tubo.

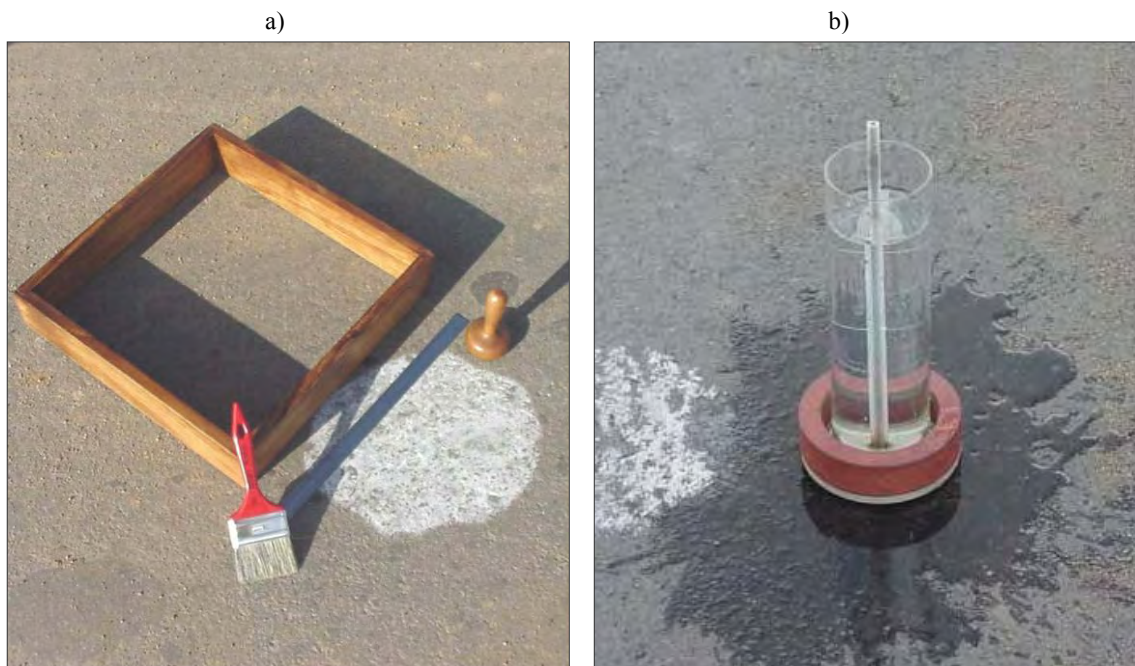


Figura 4.18 – Equipamentos utilizados na mensuração da macrotextura  
a) método da altura/mancha de areia  
b) método da drenabilidade

## **5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM LIGANTES MODIFICADOS COM BORRACHA**

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliar as propriedades físicas, químicas e mecânicas das amostras de asfalto-borracha preparadas durante a pesquisa.

Para análise dos resultados obtidos, utilizaram-se técnicas estatísticas de forma a avaliar a influência de cada um dos fatores controláveis (PB, SE, TP e TB), bem como suas interações e efeitos quadráticos nas variáveis de resposta. Para tanto, foram realizadas análises de regressão múltipla e análise de variância (ANOVA) para cada variável de resposta. O nível de significância adotado para estas análises foi de 0,05, ou seja, ao se aceitar a hipótese de que o modelo representa significativamente os pontos experimentais, ou que um fator controlável influencia a variável de resposta, há, no máximo, uma probabilidade de 5% desta hipótese não ser verdadeira. Todos os detalhes acerca das ferramentas estatísticas utilizadas encontram-se detalhados no trabalho de Nanni e Ribeiro (1987).

### **5.1 PENETRAÇÃO**

O ensaio de penetração é uma medida indireta de consistência dos materiais asfálticos que serve para qualificação e especificação de cimentos asfálticos. A medida de penetração foi feita em triplicata, à 25°C, com 100g e 5s. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.1. O ligante convencional apresentou penetração de 56 décimos de milímetros e o desvio padrão médio entre três leituras (mesma amostra) foi de 3,1 décimos de milímetros. Ressalta-se que este ensaio, apesar de prática corrente em muitos países, trás uma medida não aplicável diretamente ao projeto de misturas asfálticas.

Nota-se uma queda do valor de PN quando comparamos o ligante convencional com AB<sup>8</sup>, como era de se esperar, afinal a borracha aumenta a rigidez em alta temperatura e reduz em baixa. Silva (2000) verificou a redução de PN quando o ligante foi modificado com SBS e PE.

---

<sup>8</sup> AB – sigla de Asfalto-Borracha (ligante modificado)

A partir dos dados obtidos foi realizada uma análise estatística, utilizando o *software* Statistica for Windows (versão 4.3B), para se determinar o modelo de regressão que indique a influência das variáveis independentes na variável de respostas (variável dependente), bem como interações e efeitos quadráticos. Os modelos utilizam sempre valores codificados (de -1 a 1) e usam apenas as variáveis significativas. O fato de se utilizar valores codificados permite a comparação direta dos coeficientes do modelo.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de penetração

Amostra n°	Variáveis Independentes				Penetração (1/10 mm)				
	PB (%)	GB	TM (°C)	TP (mín.)	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Média	Desvio Padrão
2	6	# 50	160	45	47	46	48	47	1,0
6	6	# 50	180	60	52	60	52	55	4,6
7	6	# 50	200	30	47	53	56	52	4,6
10	6	# 30	160	30	45	47	45	46	1,2
14	6	# 30	180	45	47	55	61	54	7,0
18	6	# 30	200	60	56	55	53	55	1,5
21	6	># 30	160	60	47	39	49	45	5,3
22	6	># 30	180	30	52	53	50	52	1,5
26	6	># 30	200	45	53	50	54	52	2,1
30	12	# 50	160	60	47	47	46	47	0,6
33	12	# 50	180	60	49	51	44	48	3,6
34	12	# 50	200	30	54	46	47	49	4,4
38	12	# 30	160	45	46	46	54	49	4,6
40	12	# 30	180	30	45	45	39	43	3,5
41	12	# 30	180	45	53	60	71	61	9,1
44	12	# 30	200	45	51	49	49	50	1,2
46	12	># 30	160	30	33	38	38	36	2,9
50	12	># 30	180	45	44	53	49	49	4,5
54	12	># 30	200	60	42	43	44	43	1,0
55	18	# 50	160	30	31	39	40	37	4,9
58	18	# 50	180	30	41	44	41	42	1,7
63	18	# 50	200	60	32	46	37	38	7,1
66	18	# 30	160	60	37	38	38	38	0,6
68	18	# 30	180	45	40	44	40	41	2,3
70	18	# 30	200	30	36	34	39	36	2,5
74	18	># 30	160	45	36	39	38	38	1,5
78	18	># 30	180	60	40	39	41	40	1,0
80	18	># 30	200	45	44	44	40	43	2,3

Nota: O CAP 20 apresentou PN=56; segundo ASTM 6114 o PN para AB deve estar entre 25 e 75 décimos de milímetros.

O modelo 5.1, gerado para a variável PN, indica como fator principal o percentual de borracha (PB), reduzindo o PN; aparecem também reduzindo PN os efeitos quadráticos de tempo (TP) e temperatura (TM).

$$PN (1/10mm) = 51,56 - 5,75.PB - 3,78. TP.TP - 3,62.TM.TM + 2,13.TM \quad (5.1)$$

O coeficiente de determinação,  $R^2$ , é de 0,69, o  $R^2_{ajust.}$  é 0,63 e o erro padrão de estimativa,  $\varepsilon_p$ , é de 4,4 décimos de milímetros. O  $R^2_{ajust.}$  indica o percentual de variabilidade da resposta que pode ser explicada pelo modelo.

A Figura 5.1 apresenta os valores previstos pelo modelo *versus* os valores medidos nos ensaios. Nota-se uma distribuição bastante razoável de dados. A Figura 5.2 mostra a superfície de resposta, a qual é gerada a partir do modelo, para PN quando PB (percentual de borracha) e TP.TP (efeito quadrático do tempo de mistura) variam concomitantemente. A superfície de resposta permite avaliar graficamente a influência das variáveis independentes principais na resposta dada pelo modelo. Para confecção destas superfícies foram utilizados os dois fatores mais importantes indicados pelo modelo (no eixo das abscissas e ordenadas, respectivamente), contra a elevação (variável de resposta).

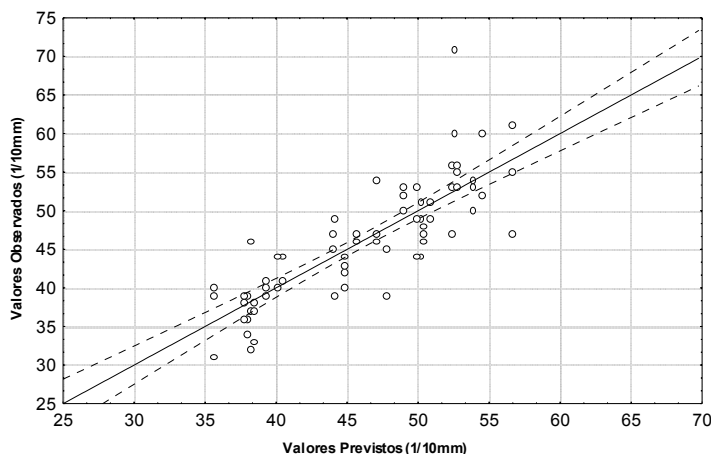


Figura 5.1 – Valores previstos *versus* observados para variável PN

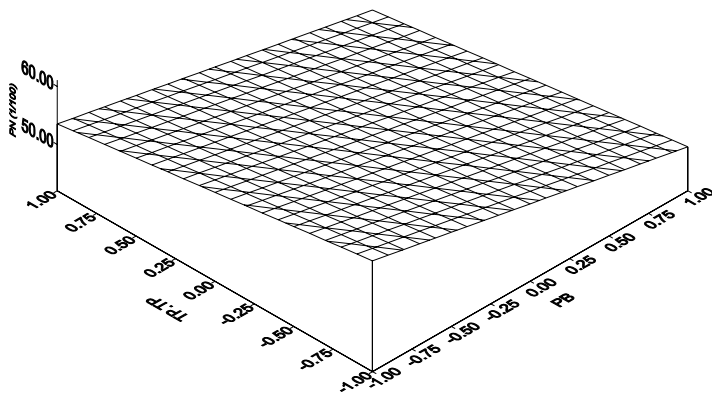


Figura 5.2 – Superfície de resposta da variável PN

## 5.2 PONTO DE AMOLECIMENTO

O asfalto amolece lentamente quando submetido ao calor e não possui ponto de fusão. Para se ter uma referência semelhante ao ponto de fusão, vários métodos foram desenvolvidos. O mais conhecido é o ponto de amolecimento anel e bola. Segundo Hunter (1994) o PA corresponde à temperatura em que o ligante apresenta viscosidade aparente de 1300Pa.s.

Na Tabela 5.2 estão apresentados os resultados dos ensaios de PA das réplicas ensaiadas. O PA encontrado para o CAP 20 foi 45,5°C e o desvio padrão médio entre cada medida (réplica) foi de 0,8°C. A partir deste conjunto de dados foi realizada a análise estatística que indicou o modelo 5.2 como representativo desta variável de resposta.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de ponto de amolecimento

<i>Amostr a n°</i>	<i>Variáveis Independentes</i>				<i>Ponto de Amolecimento (°C)</i>			
	<i>PB (%)</i>	<i>GB</i>	<i>TM (°C)</i>	<i>TP (mín.)</i>	<i>Leitura 1</i>	<i>Leitura 2</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
2	6	# 50	160	45	50,0	50,0	50,0	0,0
6	6	# 50	180	60	48,0	49,0	48,5	0,7
7	6	# 50	200	30	47,0	48,0	47,5	0,7
10	6	# 30	160	30	50,0	51,0	50,5	0,7
14	6	# 30	180	45	49,0	61,0	55,0	8,5
18	6	# 30	200	60	48,0	48,0	48,0	0,0
21	6	># 30	160	60	48,0	49,0	48,5	0,7
22	6	># 30	180	30	49,0	50,0	49,5	0,7
26	6	># 30	200	45	49,0	50,0	49,5	0,7
30	12	# 50	160	60	51,0	52,0	51,5	0,7
33	12	# 50	180	60	50,0	51,0	50,5	0,7
34	12	# 50	200	30	52,0	53,0	52,5	0,7
38	12	# 30	160	45	52,0	53,0	52,5	0,7
40	12	# 30	180	30	52,0	52,0	52,0	0,0
41	12	# 30	180	45	62,0	62,0	62,0	0,0
44	12	# 30	200	45	50,0	52,0	51,0	1,4
46	12	># 30	160	30	54,0	53,0	53,5	0,7
50	12	># 30	180	45	50,0	50,0	50,0	0,0
54	12	># 30	200	60	51,0	53,0	52,0	1,4
55	18	# 50	160	30	52,0	53,0	52,5	0,7
58	18	# 50	180	30	49,0	50,0	49,5	0,7
63	18	# 50	200	60	55,0	55,0	55,0	0,0
66	18	# 30	160	60	53,0	53,0	53,0	0,0
68	18	# 30	180	45	60,0	63,0	61,5	2,1
70	18	# 30	200	30	55,0	56,0	55,5	0,7
74	18	># 30	160	45	54,0	54,0	54,0	0,0
78	18	># 30	180	60	58,0	58,0	58,0	0,0
80	18	># 30	200	45	58,0	58,0	58,0	0,0

Nota: O CAP 20 apresentou PA=45,5; segundo ASTM 6114 o PA do AB deve ser superior à 54,4°C.



$$PA (^{\circ}C) = 58,22 - 4,15.SE.SE + 2,86.PB - 1,99.TP.TP \quad (5.2)$$

O  $R^2_{ajust.}$  encontrado foi 0,45 e coeficiente de determinação,  $R^2$ , 0,59; o erro padrão de estimativa igual a 2,9°C. As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam, respectivamente, os valores previstos *versus* observados e a superfície de resposta para a variável PA.

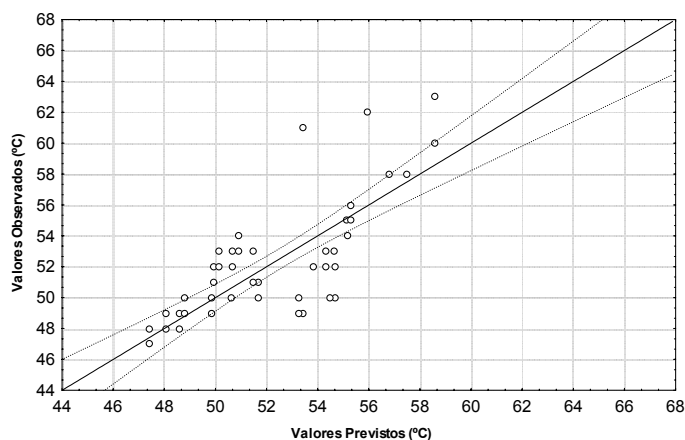


Figura 5.3 – Valores previstos *versus* observados para variável PA

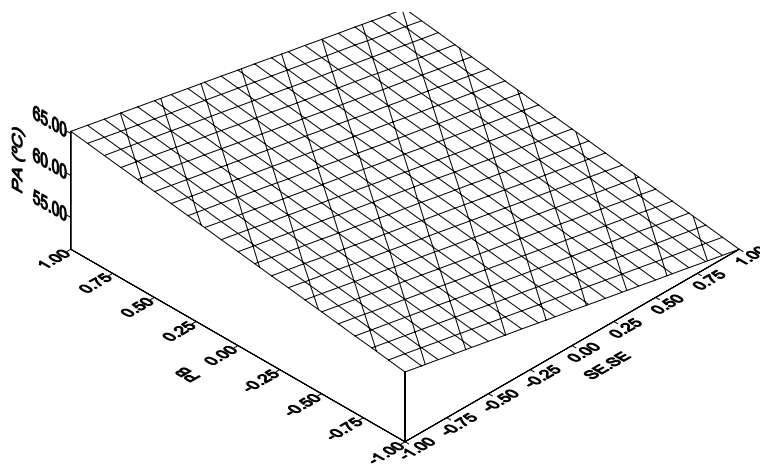


Figura 5.4 – Superfície de resposta da variável PA

O valor de PA tem sido, frequentemente, relacionado com a ocorrência de deformações plásticas em materiais asfálticos e ao quociente estabilidade/fluência do ensaio Marshall (Hunter 1994); quanto menor o PA maior a possibilidade de ocorrência de ATR. Então, a partir dos resultados apresentados, depreende-se que o ligante AB terá um melhor comportamento neste quesito. O valor de PA é, inversamente proporcional ao efeito quadrático da superfície específica (SE.SE), e diretamente proporcional ao teor de borracha adicionado.

Para os níveis testados, caso se deseje alcançar altos valores PA com a máxima economia, o modelo indica que se deve utilizar grandes quantidades de borracha, borracha com granulometria em níveis medianos (SE.SE) e níveis médios de tempo de mistura (TP.TP).

### 5.3 PONTO DE FULGOR

O ensaio de ponto de fulgor tem como objetivo garantir condições de segurança durante o transporte e manuseio do material asfáltico. O valor mínimo exigido por diversas especificações é de 230°C ou 232,2°C. A Tabela 5.3 apresenta os resultados do PF das amostras ensaiadas.

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de ponto de fulgor

<i>Amostra n°</i>	<i>Variáveis Independentes</i>				<i>Ponto de Fulgor (°C)</i>
	<i>PB (%)</i>	<i>GB</i>	<i>TM (°C)</i>	<i>TP (min.)</i>	
2	6	# 50	160	45	345
6	6	# 50	180	60	324
7	6	# 50	200	30	322
10	6	# 30	160	30	326
14	6	# 30	180	45	327
18	6	# 30	200	60	338
21	6	># 30	160	60	318
22	6	># 30	180	30	323
26	6	># 30	200	45	322
30	12	# 50	160	60	318
33	12	# 50	180	60	324
34	12	# 50	200	30	321
38	12	# 30	160	45	334
40	12	# 30	180	30	320
41	12	# 30	180	45	315
44	12	# 30	200	45	330
46	12	># 30	160	30	290
50	12	># 30	180	45	330
54	12	># 30	200	60	320
55	18	# 50	160	30	311
58	18	# 50	180	30	332
63	18	# 50	200	60	290
66	18	# 30	160	60	300
68	18	# 30	180	45	308
70	18	# 30	200	30	266
74	18	># 30	160	45	335
78	18	># 30	180	60	310
80	18	># 30	200	45	338

Nota: O CAP 20 apresentou PF=318.

O modelo 5.3 representa os dados coletados nos ensaios de PF. O  $R^2_{ajust.}$  encontrado para o modelo foi de 0,18,  $R^2=0,61$  e o erro padrão de estimativa foi de 15,2°C. Para este modelo o nível de significância utilizado foi de 0,067 ao invés de 0,05; isto foi necessário devido à natureza do ensaio que leva a uma maior dispersão de dados.

$$PF (^\circ C) = 315,65 - 14,34.TP.TP - 7,61.PB \quad (5.3)$$

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam os valores previstos *versus* observados e a superfície de resposta para PF.

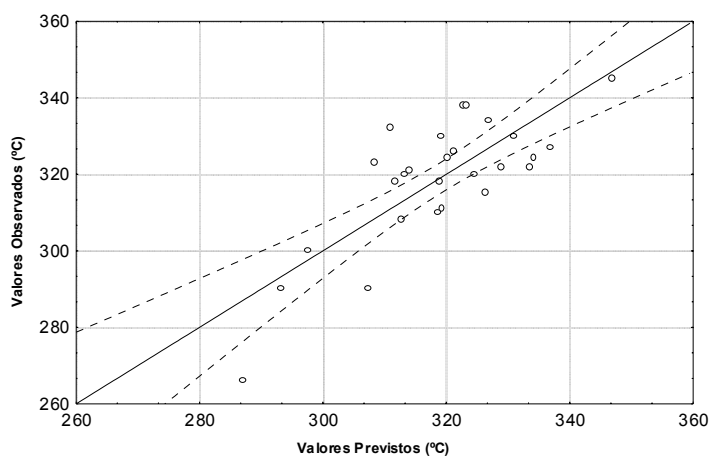


Figura 5.5 – Valores previstos *versus* observados para variável PF

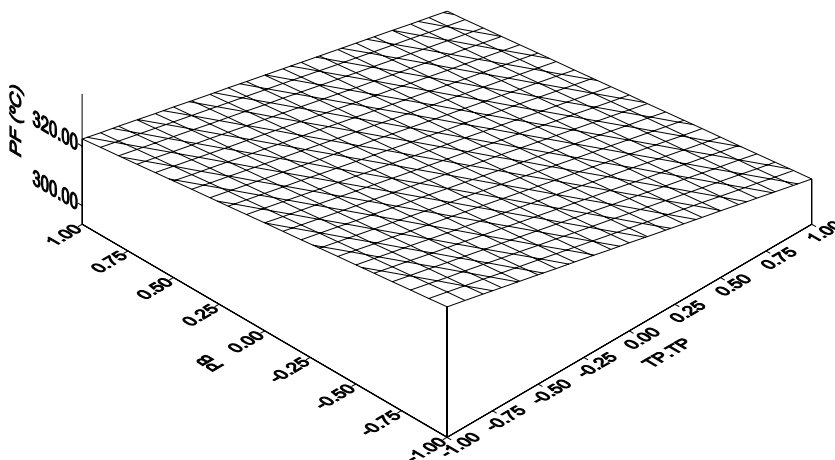


Figura 5.6 – Superfície de resposta da variável PF

As grandes maiorias dos valores medidos indicam o aumento do valor de PF das misturas AB em relação ao CAP convencional. Como fatores importantes indicados pelo modelo, estão reduzindo o PF, o efeito quadrático da temperatura e o percentual de borracha.

## 5.4 MASSA ESPECÍFICA

A correta determinação das propriedades volumétricas de misturas asfálticas (volume de vazio, vazios de agregado mineral e relação betume vazios) é de fundamental importância tanto em nível de projeto quanto em nível de controle de qualidade. A determinação destas propriedades, pelo cálculo da densidade máxima teórica, necessita do conhecimento das massas específicas dos componentes da mistura: ligantes, agregados e finos. Ressalta-se que pequenos desvios nesses valores levam a desvios importantes nas propriedades calculadas.

A Tabela 5.4 traz os resultados das determinações da massa específica dos ligantes estudados nesta pesquisa. A leitura 1 foi feita em picnômetro cilíndrico e a 2 em picnômetro cônico.

Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios de massa específica

Amostra n°	Variáveis Independentes				Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )			
	PB (%)	GB	TM (°C)	TP (mín.)	Leitura 1	Leitura 2	Média	Desvio Padrão
2	6	# 50	160	45	1,024	1,013	1,018	0,0083
6	6	# 50	180	60	1,020	1,017	1,019	0,0023
7	6	# 50	200	30	1,022	1,019	1,020	0,0016
10	6	# 30	160	30	1,030	1,027	1,028	0,0018
14	6	# 30	180	45	1,025	1,018	1,022	0,0048
18	6	# 30	200	60	1,012	1,019	1,016	0,0050
21	6	># 30	160	60	1,026	1,018	1,022	0,0054
22	6	># 30	180	30	1,025	1,018	1,022	0,0048
26	6	># 30	200	45	1,018	1,011	1,015	0,0052
30	12	# 50	160	60	1,035	1,030	1,033	0,0037
33	12	# 50	180	60	1,023	1,027	1,025	0,0030
34	12	# 50	200	30	1,037	1,032	1,034	0,0037
38	12	# 30	160	45	1,037	1,025	1,031	0,0081
40	12	# 30	180	30	1,028	1,028	1,028	0,0002
41	12	# 30	180	45	1,033	1,029	1,031	0,0028
44	12	# 30	200	45	1,034	1,032	1,033	0,0012
46	12	># 30	160	30	1,029	1,025	1,027	0,0029
50	12	># 30	180	45	1,027	1,021	1,024	0,0039
54	12	># 30	200	60	1,026	1,020	1,023	0,0041
55	18	# 50	160	30	1,032	1,033	1,032	0,0005
58	18	# 50	180	30	1,022	1,025	1,023	0,0021
63	18	# 50	200	60	1,041	1,040	1,040	0,0011
66	18	# 30	160	60	1,037	1,037	1,037	0,0004
68	18	# 30	180	45	1,039	1,031	1,035	0,0053
70	18	# 30	200	30	1,033	1,029	1,031	0,0030
74	18	># 30	160	45	1,038	1,034	1,036	0,0024
78	18	># 30	180	60	1,040	1,035	1,038	0,0035
80	18	># 30	200	45	1,036	1,031	1,033	0,0036

Nota: O CAP 20 apresentou  $M_{esp}=1,016$ . O desvio padrão médio entre duas determinações foi de  $0,0034\text{g/cm}^3$ .

Nota-se, a partir dos dados apresentados, o aumento do valor de ME do ligante modificado em relação ao CAP (ME do CAP 20 = 1,016g/cm<sup>3</sup>). Era de se esperar esse aumento, visto que estamos adicionando ao ligante um material com a massa específica aproximadamente 12% superior. O modelo (5.4) indicou como fator mais importante o percentual de borracha (PB), seguido da interação percentual de borracha x tempo de mistura (PB.TP). O coeficiente de determinação,  $R^2_{ajust.}$ , encontrado para o modelo foi de 0,67 e o erro padrão de estimativa foi de 0,0043g/cm<sup>3</sup>; o valor de  $R^2$  foi de 0,76.

$$ME \text{ (g/cm}^3\text{)} = 1,030 + 0,0069.PB + 0,0038.PB.TP \quad (5.4)$$

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam os valores previstos *versus* observados e a superfície de resposta para ME com os fatores intervenientes nesta variável de resposta.

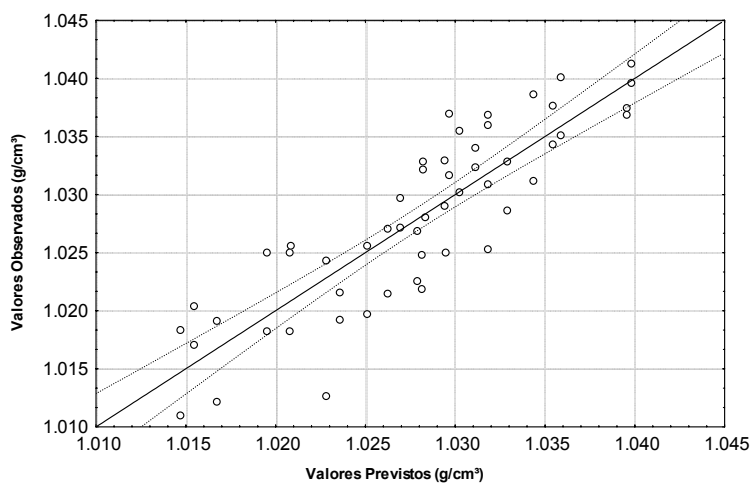


Figura 5.7 – Valores previstos *versus* observados para variável ME

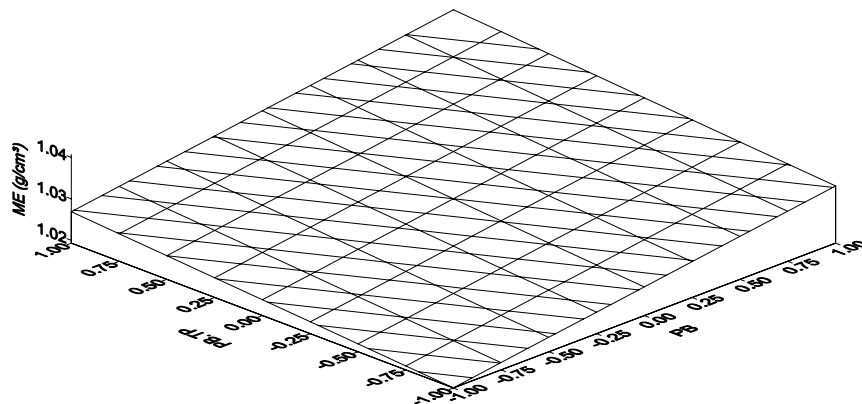


Figura 5.8 – Superfície de resposta da variável ME

Se compararmos a médias de massa específica medidas dos ligantes com 6, 12 e 18% (1,020, 1,029 e 1,034g/cm<sup>3</sup>, respectivamente) com o valor estimado, a partir da média ponderada das massas específicas do CAP e da borracha (1,023, 1,031 e 1,039g/cm<sup>3</sup>), chegaremos a mesma tendência de valores, entretanto, o calculado é sensivelmente maior. Isso denota, também a importância do percentual de borracha nesta variável de resposta.

## 5.5 ESTABILIDADE À ESTOCAGEM

Uma das dificuldades de se utilizar modificadores de ligantes asfálticos é a possibilidade de separação de fases, durante o transporte e estocagem, os quais são realizados à quente e em tanques apropriados.

No caso de polímero tipo SBS ou PE, menos densos que o ligante, se não houver compatibilização entre as fases asfalto/polímero esses poderão flotar no tanque. No caso da borracha de pneus, o fenômeno é invertido, ou seja, a borracha desce e se deposita no fundo do tanque.

Esta compatibilidade depende de vários fatores relacionados à natureza dos materiais e das condições de mistura. A quantidade de frações leves do asfalto e as propriedades químicas e físicas do modificador (peso molecular, por exemplo) são fatores bastante relevantes.

No caso de AB podemos dividir, do ponto de vista da estabilidade à estocagem, em dois grupos: misturas estocáveis e não-estocáveis. Nos EUA, os estados com grande experiência com AB têm preferido utilizar o produto não-estocável, sendo sua produção realizada *just in time* para utilização em, no máximo, algumas horas após a produção. O tanque de depósito deste material deverá ser dotado de agitadores.

O ensaio para avaliar a estabilidade à estocagem (ou compatibilidade), utilizado nesta pesquisa, foi o preconizado pela ASTM D 5892 de 1997; não se trata de um ensaio de desempenho, mas uma referência para avaliar a separação de fases asfalto/modificador sob a condição estática (sem agitação). A norma, no entanto, não fornece valores para uma análise quantitativa.

A Tabela 5.5 apresenta os valores de PA para amostras extraídas do topo e do fundo do tubo de alumínio, após 48 horas em estufa à 163°C e o IC – Índice de Compatibilidade. O desvio padrão dos valores de PA do topo foi de 0,5°C e do fundo 1,1°C.

Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios de estabilidade à estocagem

Amostra n°	Variáveis Independentes				Ponto de Amolecimento (°C)				IC (°C)
	PB (%)	GB	TM (°C)	TP (mín.)	PA topo 1	PA topo 2	PA fundo 1	PA fundo 2	
2	6	# 50	160	45	56,5	57,0	62,0	64,0	6,3
6	6	# 50	180	60	53,0	55,0	60,5	61,0	6,8
7	6	# 50	200	30	51,0	51,0	58,5	58,5	7,5
10	6	# 30	160	30	53,0	54,5	59,0	59,5	5,5
14	6	# 30	180	45	52,5	52,0	59,0	59,5	7,0
18	6	# 30	200	60	55,0	56,0	57,5	60,5	3,5
21	6	># 30	160	60	54,0	53,0	59,5	60,0	6,3
22	6	># 30	180	30	51,0	52,0	54,0	56,0	3,5
26	6	># 30	200	45	54,0	54,5	52,5	53,0	-1,5
30	12	# 50	160	60	58,0	58,0	65,5	66,0	7,8
33	12	# 50	180	60	54,5	54,5	59,0	60,0	5,0
34	12	# 50	200	30	58,0	59,0	59,0	59,0	0,5
38	12	# 30	160	45	55,0	55,0	68,0	67,0	12,5
40	12	# 30	180	30	55,5	56,0	60,5	63,0	6,0
41	12	# 30	180	45	52,0	53,0	63,0	64,0	11,0
44	12	# 30	200	45	51,5	52,0	64,0	65,0	12,8
46	12	># 30	160	30	52,5	52,5	61,0	64,4	10,2
50	12	># 30	180	45	51,0	52,0	61,5	63,0	10,8
54	12	># 30	200	60	58,0	58,0	65,0	66,5	7,8
55	18	# 50	160	30	69,0	70,0	70,5	73,0	2,3
58	18	# 50	180	30	54,5	55,0	63,0	63,5	8,5
63	18	# 50	200	60	63,5	66,0	77,0	77,0	12,3
66	18	# 30	160	60	62,0	62,0	72,5	73,0	10,8
68	18	# 30	180	45	64,0	64,2	69,0	75,0	7,9
70	18	# 30	200	30	65,0	65,5	69,0	69,5	4,0
74	18	># 30	160	45	66,0	67,0	73,5	78,5	9,5
78	18	># 30	180	60	57,0	57,5	64,5	70,5	10,3
80	18	># 30	200	45	65,0	65,0	66,0	67,0	1,5

Nota: O CAP 20 apresentou IC=4,2.

O modelo 5.5 apresenta a regressão para a variável IC. O coeficiente de determinação,  $R^2$ , encontrado para o modelo foi de 0,64, enquanto o  $R^2_{ajust.}$  foi de 0,27 e o erro padrão de estimativa foi de 3,29 °C. A Figura 5.9 apresenta valores previstos *versus* observados.

$$IC (°C) = 11,19 - 2,36.SE.TM - 1,87.TM \quad (5.5)$$

A partir do modelo depreende-se que a interação entre as variáveis SE.TM (quanto maior o SE mais o TM é importante) e da TM (temperatura de mistura) atuam na melhoria da compatibilidade das misturas asfalto/borracha (ver Figura 5.10). Este fato é perfeitamente explicável do ponto de vista físico, afinal, quanto menor o tamanho das partículas conjugado a uma maior temperatura no momento da mistura (há redução da viscosidade do ligante) melhor a interação.

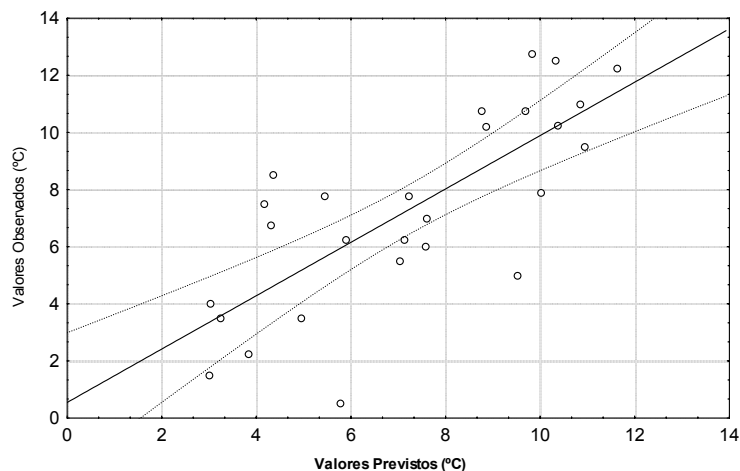


Figura 5.9 – Valores previstos *versus* observados para variável IC

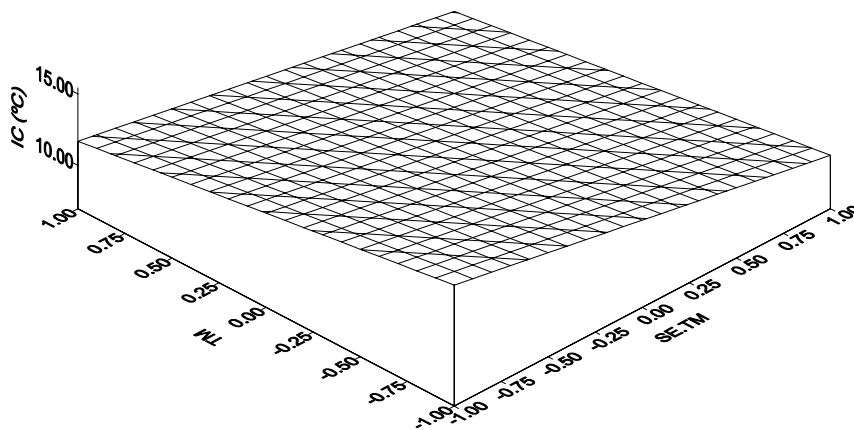


Figura 5.10 – Superfície de resposta da variável IC

Ao analisar-se os valores obtidos de maneira absoluta, tendo em mente o valor máximo de IC = 5°C (Leite, 1999), observa-se que apenas 8 das 27 misturas testada seriam consideradas estocáveis. O CAP 20, inclusive, apresentou IC = 4,2, o que indicaria a necessidade de agitação do tanque de estocagem e mesmo da unidade de transporte para longos períodos de tempo.



Os valores de IC podem estar relacionados, também, ao índice de instabilidade coloidal ( $I_C$ )<sup>9</sup> do asfalto utilizado, de 0,42. Segundo Serfass *et al.* (1992), citado por Silva (2000), cimentos asfálticos com  $I_C > 0,25$  não possuem boa compatibilidade com SBS, e conseqüentemente com borracha vulcanizada. Uma possibilidade de melhorar esta compatibilidade é a adição de um óleo de base maltênica (o que reduziria também o índice de instabilidade coloidal).

## 5.6 DUCTILIDADE E RECUPERAÇÃO ELÁSTICA

A ductilidade dos cimentos asfálticos foi medida através de um ensaio de alongamento em amostras com formato de briquete à 25°C. Já a resposta elástica ou recuperação elástica mede a recuperação que as amostras apresentam após terem sido alongadas. Ressalta-se que os ensaios são realizados separadamente e as amostras possuem formatos distintos.

Os referidos ensaios foram realizados apenas para os ligantes denominados AB 14, AB 41 e AB 68, além do ligante convencional; os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 5.6. Ressalta-se que, das variáveis independentes, apenas a variável PB possui valores diferentes (crescentes).

Tabela 5.6 – Resultados dos ensaios de ductilidade e retorno elástico

Amostra	Variáveis Independentes				Ductilidade (cm)	Retorno Elástico (%)
	PB (%)	GB	TM (°C)	TP (mín.)		
CAP 20	---	---	---	---	>150	12
AB 14	6	# 30	180	45	43	19
AB 41	12	# 30	180	45	36	45
AB 68	18	# 30	180	45	32	55

A Figura 5.11 apresenta respectivamente, os valores de ductilidade e retorno elástico para ligantes com teores crescentes de borracha. Nota-se a melhoria das propriedades de elasticidade dos ligantes modificados, proporcional ao teor de borracha, passando de 12cm, CAP convencional, para 55cm quando 18% de borracha foi utilizada na preparação do ligante. Ressalta-se que a maior taxa de incremento do retorno elástico está entre 6 e 12% de adição de borracha.

<sup>9</sup> Índice de instabilidade coloidal  $I_C = (A+S)/(R+Ar)$  onde A=Asfaltenos; S=Saturados; R=Resinas; Ar=Aromáticos.

Para a variável ductilidade o oposto foi verificado; quanto maiores os teores de borracha adicionados menores foram os valores observados. Durante a execução do ensaio pôde-se notar que, a partir de um determinado alongamento, os ligantes modificados por não apresentarem homogeneidade de fases (era possível notar os grãos de borracha no ligante), não conseguiam, ao contrário do CAP 20, reduzir sua espessura e rompiam-se prematuramente.

Pesquisas realizadas com polímero tipo SBS apresentam resultados iguais do CAM e do CAP por ambos atingirem os valores máximos de ductilidade permitidos no equipamento (Silva, 2000).

Alguns engenheiros consideram a ductilidade uma característica importante dos cimentos asfálticos. Entretanto, é a existência ou não de ductilidade que se considera, usualmente, mais importante do que o grau de ductilidade. Alguns cimentos asfálticos que tem um grau de ductilidade excessivamente alto, também são mais suscetíveis à temperatura (AI 1989).

A partir do exposto é possível apontar para a não adequabilidade do ensaio de ductilidade na avaliação de ligantes modificados com borracha.

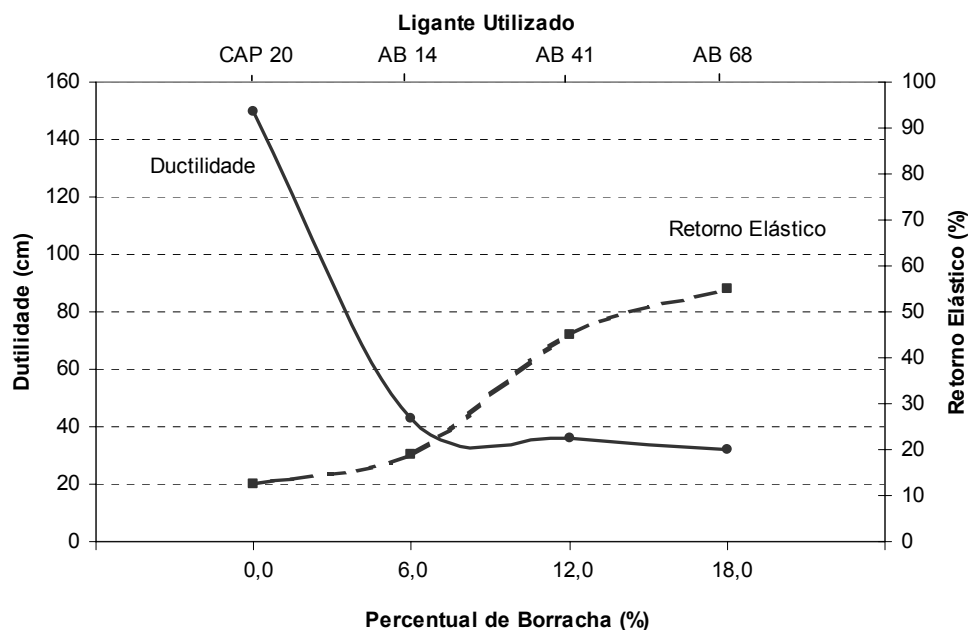


Figura 5.11 – Resultados dos ensaios de ductilidade e recuperação elástica

## 5.7 ENVELHECIMENTO EM CURTO PRAZO

O fenômeno da oxidação do asfalto, que acontece devido à reação das moléculas com o oxigênio do meio ambiente, o torna mais rígido e, por conseguinte, mais suscetível ao trincamento térmico e por fadiga. Na prática, uma considerável parcela de enrijecimento por oxidação e perda de voláteis ocorre antes mesmo do asfalto ser aplicado, durante os processos de transporte (ligante e massa asfáltica), mistura e compactação. Durante o processo de mistura e transporte da massa, devido ao delgado filme de ligante que recobre o agregado pré-aquecido, a oxidação ocorre em taxas bastante expressivas.

Os ensaios de envelhecimento têm dois propósitos: simular o envelhecimento dos ligantes a curto (envelhecimento durante a usinagem, transporte e aplicação da massa, RTFOT) e longo prazo (envelhecimento em serviço, PAV) e determinar a perda de massa do asfalto durante o processo de usinagem e aplicação.

A perda de massa em estufa de filme delgado rotativo determina a perda de voláteis durante o processo de mistura e aplicação da massa asfáltica. Alguns ligantes podem ganhar massa durante o processo devido à oxidação do asfalto. O valor máximo de perda de massa, segundo a especificação SUPERPAVE™, é de 1% (AI, 1994)<sup>10</sup>.

Ressalta-se que o envelhecimento das misturas durante a vida de serviço do pavimento é influenciado por outros fatores que não são contemplados nos ensaios com ligante, tais como propriedades dos agregados e das misturas asfálticas. Maiores informações acerca deste assunto são encontradas em Bell (1989), Hunter (1994), Bell *et al.* (1994) e Epps (1997).

A Tabela 5.7 traz os resultados dos ensaios realizados em 4 amostras de ligante com teores crescentes de borracha de pneus. Os valores estão com sinal negativa para indicar a redução da massa original.

Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios de perda de massa em RTFOT

Amostra	Variáveis Independentes				Perda de massa em RTFOT (%)					
	PB	GB	TM	TP	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Média	Desvio Padrão
CAP 20	---	---	---	---	-0,322	-0,330	-0,307	-0,315	-0,319	0,008
AB 14	6	# 30	180	45	-0,306	-0,331	<sup>1</sup>	-0,268	-0,302	0,026
AB 41	12	# 30	180	45	-0,357	-0,278	-0,310	-0,303	-0,312	0,029
AB 68	18	# 30	180	45	-0,374	-0,378	-0,345	-0,359	-0,364	0,013

Nota: PB em %, TM em °C e TP em minutos; <sup>1</sup> houve vazamento de ligante durante o ensaio.

<sup>10</sup> A nova especificação fixa este valor em 0,5%.

A partir dos dados apresentados (ver Figura 5.12) é possível verificar que todas as amostras testadas apresentaram valores menores que 1,0% de perda de massa (entre 0,302 e 0,364%). Nota-se uma pequena tendência de aumento de perda de massa proporcional ao teor de borracha adicionado à mistura; no entanto este aumento não compromete o ligante neste quesito e, para os níveis de borracha normalmente utilizados para produção de AB (até 25%) não se espera grandes alterações nos valores de perda de massa em RTFOT.

O incremento da perda de massa nas amostras com maiores teores de borracha pode estar associado à perda de voláteis da borracha, afinal estamos com um percentual importante de borracha que não foi incorporada ao ligante.

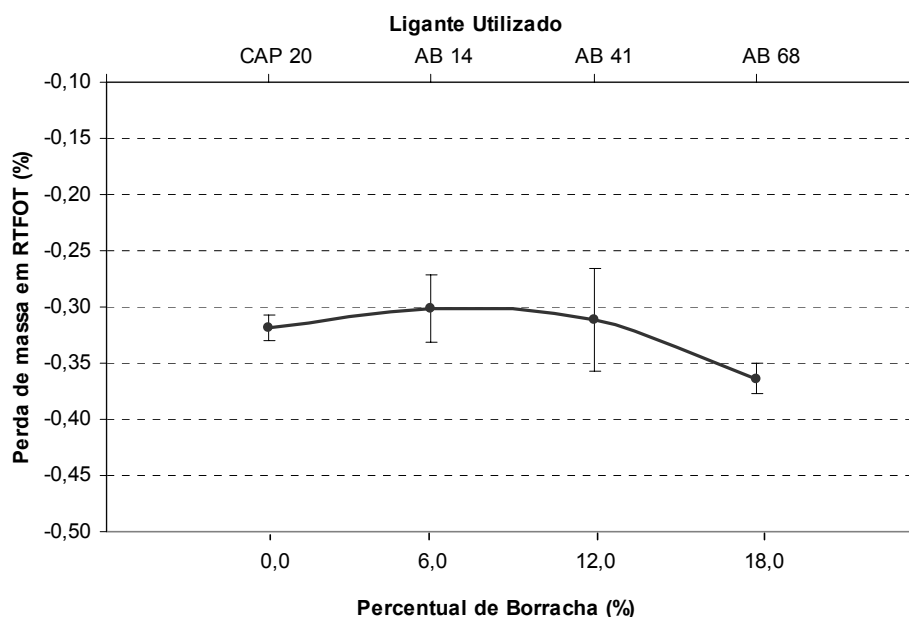


Figura 5.12 – Perda de massa em RTFOT *versus* teor de borracha

## 5.8 VISCOSIDADE APARENTE

A viscosidade pode ser definida como a resistência ao fluxo desenvolvida por um material submetido a tesões. As cadeias moleculares quando submetidas a esforços de cisalhamento, umas sobre as outras, tendem a resistir. Esta relação entre a taxa de deformação aplicada e sua resistência ao cisalhamento é particular de cada material e depende, para os materiais termoplásticos, da temperatura em que o material se encontra.

Quando a relação entre taxa de cisalhamento e tensão cisalhante é constante, ou seja, existe linearidade entre a taxa aplicada e a tensão medida diz-se que o fluido é newtoniano, quando é verificado o contrário diz-se, então que o fluido é não-newtoniano.

A metodologia SUPERPAVE™, de especificação de ligantes asfálticos, preconiza a utilização do Viscosímetro Brookfield para medição das propriedades a altas temperaturas, as quais são de fundamental importância para o bombeamento, mistura e aplicação dos ligantes e misturas asfálticas.

Inúmeras observações já foram feitas a respeito do comportamento não-newtoniano dos ligantes modificados com polímeros; esse fato levou o Asphalt Institute (AI 2000) a apresentar o conceito de viscosidade a taxa de cisalhamento nula. A definição das temperaturas de mistura e compactação devem ser tomadas a partir de uma viscosidade calculada à taxa de cisalhamento zero. Para tanto foi apresentado o modelo de Cross-Williamsons (equação 5.6), onde modela matematicamente a curva taxa de cisalhamento *versus* viscosidade.

$$\eta = \eta_0 + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (k\dot{\gamma})^n}$$

(5.6)

onde:  $\eta$  = viscosidade;

$\eta_0$  = a viscosidade à taxa de cisalhamento zero;

$\eta_\infty$  = a viscosidade à taxa de cisalhamento infinita;

$\dot{\gamma} = d\gamma/dt$  = taxa de cisalhamento;

k, n = constantes do modelo.

A temperatura de mistura e compactação são consideradas em faixas diferenciadas de viscosidade para asfaltos convencionais e modificados, conforme apresentado na Tabela 5.8. As viscosidades apresentadas para o asfalto modificado são referentes a viscosidade à taxa de cisalhamento zero.

Tabela 5.8 – Viscosidades de mistura e compactação para cimentos asfálticos convencionais e modificados com polímeros

<i>Material</i>	<i>Viscosidade de Mistura (Pa.s)</i>	<i>Viscosidade de Compactação (Pa.s)</i>
<i>Asfalto Convencional<sup>1</sup></i>	0,15 – 0,19	0,25 – 0,31
<i>Asfalto Modificado<sup>2</sup></i>	0,27 – 0,33	0,54 – 0,66

Fonte: <sup>1</sup> Asphalt Institute (1994); <sup>2</sup> Asphalt Institute (2000)

Na Tabela 5.9 estão apresentadas as médias das medidas de viscosidade aparente (quatro medidas para cada temperatura) das amostras de AB. Ressalta-se que os ensaios em amostras de CAM foram realizadas com o spindle 27, ao invés do 21 recomendado para ligantes convencionais, e com rotação de 20rpm (taxa de cisalhamento de 6,8/s).

A partir dos dados obtidos foram gerados modelos estatísticos para a viscosidade aparente, medida em cada temperatura. Os modelos 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 representam as regressões para as temperaturas de 135, 155, 175 e 195°C, respectivamente. São válidos apenas para as condições testadas e devem ser utilizados níveis codificados (-1 a 1) para as variáveis independentes.

Tabela 5.9 – Resultados dos ensaios de viscosidade aparente

<i>Amostra n°</i>	<i>Variáveis Independentes</i>				<i>Viscosidade (Pa.s)</i>			
	<i>PB (%)</i>	<i>GB</i>	<i>TM (°C)</i>	<i>TP (mín.)</i>	<i>135°C</i>	<i>155°C</i>	<i>175°C</i>	<i>195°C</i>
2	6	# 50	160	45	0,628	0,241	0,113	0,063
6	6	# 50	180	60	0,763	0,325	0,163	0,100
7	6	# 50	200	30	0,728	0,288	0,138	0,088
10	6	# 30	160	30	0,488	0,184	0,075	0,038
14	6	# 30	180	45	0,563	0,213	0,113	0,075
18	6	# 30	200	60	0,625	0,263	0,125	0,075
21	6	># 30	160	60	0,438	0,163	0,075	0,050
22	6	># 30	180	30	0,463	0,188	0,100	0,075
26	6	># 30	200	45	0,447	0,163	0,075	0,038
30	12	# 50	160	60	1,587	0,663	0,356	0,275
33	12	# 50	180	60	1,972	0,875	0,475	0,338
34	12	# 50	200	30	1,847	0,813	0,463	0,350
38	12	# 30	160	45	0,925	0,375	0,250	0,375
40	12	# 30	180	30	1,400	0,613	0,375	0,450
41	12	# 30	180	45	1,375	0,563	0,328	0,363
44	12	# 30	200	45	1,788	0,750	0,425	0,375
46	12	># 30	160	30	0,809	0,638	0,472	0,378
50	12	># 30	180	45	1,028	0,563	0,438	0,334
54	12	># 30	200	60	1,300	0,728	0,661	0,584
55	18	# 50	160	30	4,084	2,088	1,747	2,509
58	18	# 50	180	30	1,028	0,563	0,438	0,334
63	18	# 50	200	60	9,757	5,147	3,344	3,047
66	18	# 30	160	60	3,653	1,675	1,075	1,319
68	18	# 30	180	45	4,822	2,310	1,481	1,644
70	18	# 30	200	30	5,262	2,463	1,597	1,620
74	18	># 30	160	45	2,200	1,456	1,716	1,738
78	18	># 30	180	60	4,859	2,444	1,650	1,628
80	18	># 30	200	45	3,700	1,928	1,494	1,506

Nota: O CAP 20 apresentou viscosidade de 0,375, 0,150, 0,063 e 0,025Pa.s para temperaturas de 137, 155, 175 e 195°C, respectivamente.

$$\eta_{135} \text{ (Pa.s)} = 0,72 + 1,80.PB + 1,07.PB.PB + 0,83.PB.TP + 0,72.PB.TM + 0,58.TP - 0,57.SE$$

$$(R^2= 0,88; R^2_{ajust.}=0,77; \varepsilon_p= 1,01Pa.s) \quad (5.7)$$

$$\eta_{155} \text{ (Pa.s)} = 0,15 + 0,96.PB + 0,57.PB.PB + 0,42.PB.TP + 0,36.PB.TM + 0,28.TP + 0,38.TM.TP$$

$$(R^2= 0,89; R^2_{ajust.}=0,79; \varepsilon_p= 0,50Pa.s) \quad (5.8)$$

$$\eta_{175} \text{ (Pa.s)} = - 0,0014 + 0,74.PB + 0,42.PB.PB + 0,27.TM.TP$$

$$(R^2= 0,90; R^2_{ajust.}=0,79; \varepsilon_p= 0,36Pa.s) \quad (5.9)$$

$$\eta_{195} \text{ (Pa.s)} = - 0,40 + 0,80.PB + 0,40.PB.PB + 0,30.TM.TP$$

$$(R^2= 0,86; R^2_{ajust.}=0,70; \varepsilon_p= 0,45Pa.s) \quad (5.10)$$

A análise conjunta dos modelos permite as seguintes considerações: dos 18 termos das funções relacionados a variáveis independentes, em 12 aparecem a variável percentual de borracha, PB, (com sinal positivo e com os maiores coeficientes) denotando ser esta a variável mais importante que influencia a variável de reposta viscosidade. A variável tempo de mistura, TP, aparece 7 vezes e a variável temperatura, TM, 5 vezes, ambas aumentando a viscosidade e melhorando a interação asfalto/borracha. Nota-se, também interações importantes como PB.TP e PB.TM, ressaltando a importância de maior tempo e temperatura de mistura quando o teor de borracha for alto.

Outra maneira de verificar quais variáveis independentes influenciam na viscosidade é incluir a variável temperatura de leitura, TL, resultando o modelo 5.11. Nota-se novamente que a variável PB é a que influencia de maneira mais forte a viscosidade, aparecendo antes, inclusive, da temperatura de leitura TL. A Figura 5.13 apresenta os valores de viscosidade previstos pelo modelo *versus* os observados nos ensaios e, a Figura 5.14 plota viscosidade  $\eta$  *versus* PB *versus* TL.

$$\eta \text{ (Pa.s)} = 0,23 + 1,07.PB - 0,67.TL + 0,64.PB.PB + 0,42.PB.TP + 0,31.PB.TM + 0,29.TP - 0,27.SE - 0,27.SE.TM - 0,24.PB.SE - 0,21.TM$$

$$(R^2= 0,72; R^2_{ajust.}=0,88; \varepsilon_p= 0,79Pa.s) \quad (5.11)$$

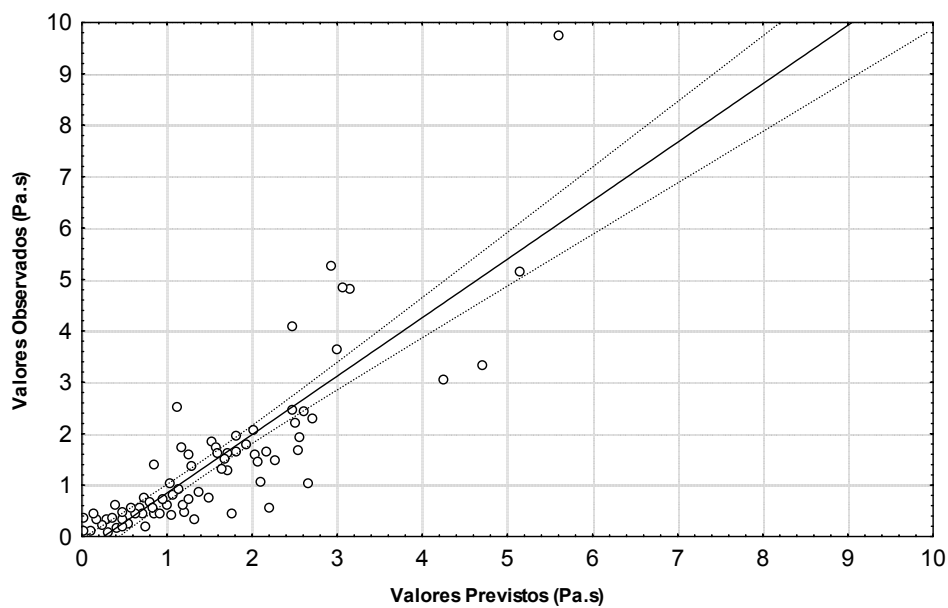


Figura 5.13 – Valores previstos *versus* observados para variável  $\eta$

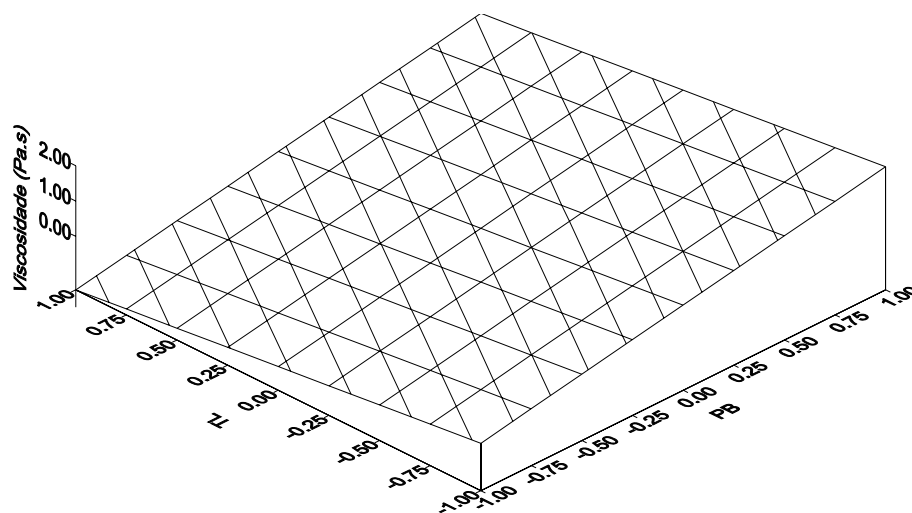


Figura 5.14 – Superfície de resposta  $\eta$  x PB x TL

O fato da granulometria da borracha, quantificada através da superfície específica, aparecer com muito pouca influência nas variáveis de resposta pode estar ligado a utilização de um misturador de alto cisalhamento que tende a uniformizar ao tamanho dos grãos da borracha.



Confirmando o modelo apresentado (5.11) estão plotados, na Figura 5.15, os valores médios de viscosidade para os três níveis da variável PB (Percentual de Borracha) e os quatro níveis da variável TL (Temperatura de Leitura) estudados. Estão plotados também, para comparação, os valores estimados a partir da equação de Einstein (apresentado na Equação 3.1).

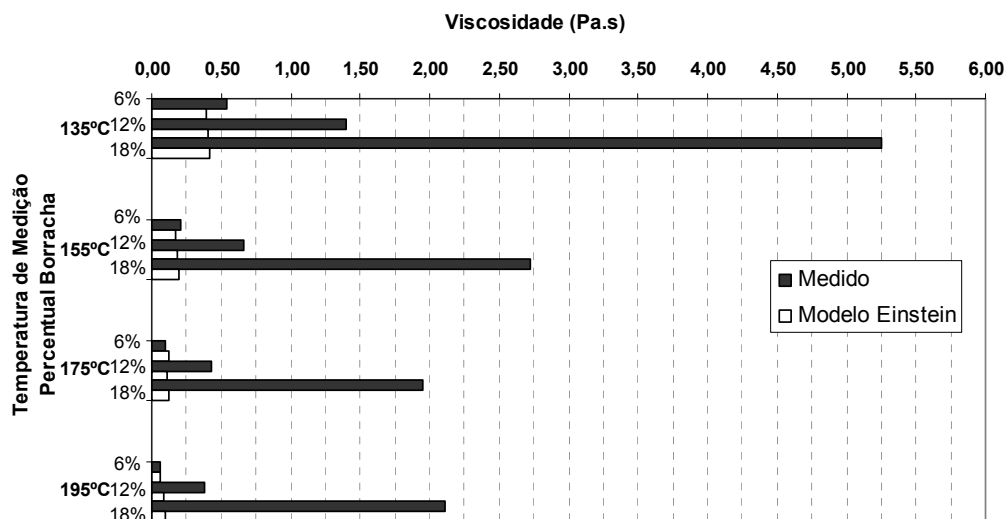


Figura 5.15 – Comparação entre valores medidos e estimados pela equação de Einstein

Aplicando-se o referido modelo teórico e confrontando com os valores medidos, verifica-se um aumento de viscosidade muito além do que supõe o modelo (mistura de grãos inertes em um meio aquoso). Por mais que as misturas sejam não-estocáveis, como foi visto, é possível afirmar que existe uma importante interação entre a borracha e o ligante asfáltico.

A partir das 448 leituras de viscosidade realizadas no ligante AB foram calculadas as médias de viscosidade para as mesmas taxas de cisalhamento, que é correspondente a rotação durante o ensaio. Observou-se a não-linearidade desta relação (ver Figura 5.16), o que demonstra o comportamento não-newtoniano dos ligantes AB. O fato da viscosidade diminuir com o aumento da taxa de cisalhamento é característico de materiais pseudoplástico.

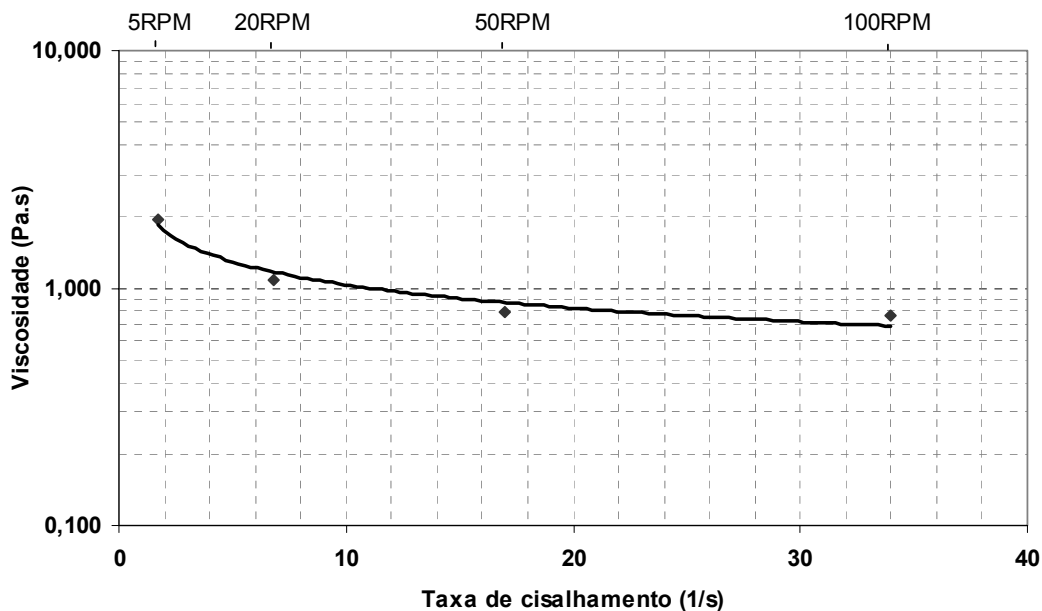


Figura 5.16 – Comportamento não-newtoniano do ligante AB

Conforme já foi comentado, as faixas de temperatura de mistura e compactação são determinadas em função da relação viscosidade/temperatura. A Figura 5.17 apresenta esta relação para alguns dos ligantes estudados (CAP 20, AB 14, 41 e 68, com teores de 0, 6, 12 e 18% de borracha). As linhas cheias são modelos dos ligantes virgens (sem envelhecimento) enquanto que as tracejadas são dos ligantes submetidos a envelhecimento em RTFOT e PAV. Estão plotados, também as faixas de viscosidade correspondente as temperaturas de mistura e compactação (para CAM conforme Tabela 5.7).

O primeiro aspecto observado é que os ligantes modificados com altos teores de borracha não atingem as faixas especificadas, mesmo à 195°C, para mistura e compactação. Como o asfalto sofre perda de voláteis e oxidação quando submetido a temperaturas elevadas devem ser revistos estes critérios, quando o ligante AB for utilizado. Há indicações de que as temperaturas, tanto de mistura quanto compactação, podem ser inferiores aquelas determinadas experimentalmente, visto a existência de forças cisalhantes elevadas durante o bombeamento e mistura do ligante. Segundo a ASTM 6114 a viscosidade mínimo do ligante AB à 175°C deve ser de 1,5Pa.s, o que acontece para a maioria dos ligantes com 18% de borracha.

O segundo aspecto que chama atenção é a suscetibilidade térmica dos ligantes, nota-se que quanto maior o teor de borracha, menos influência tem a temperatura de medida, indicando ligantes termicamente mais estáveis.

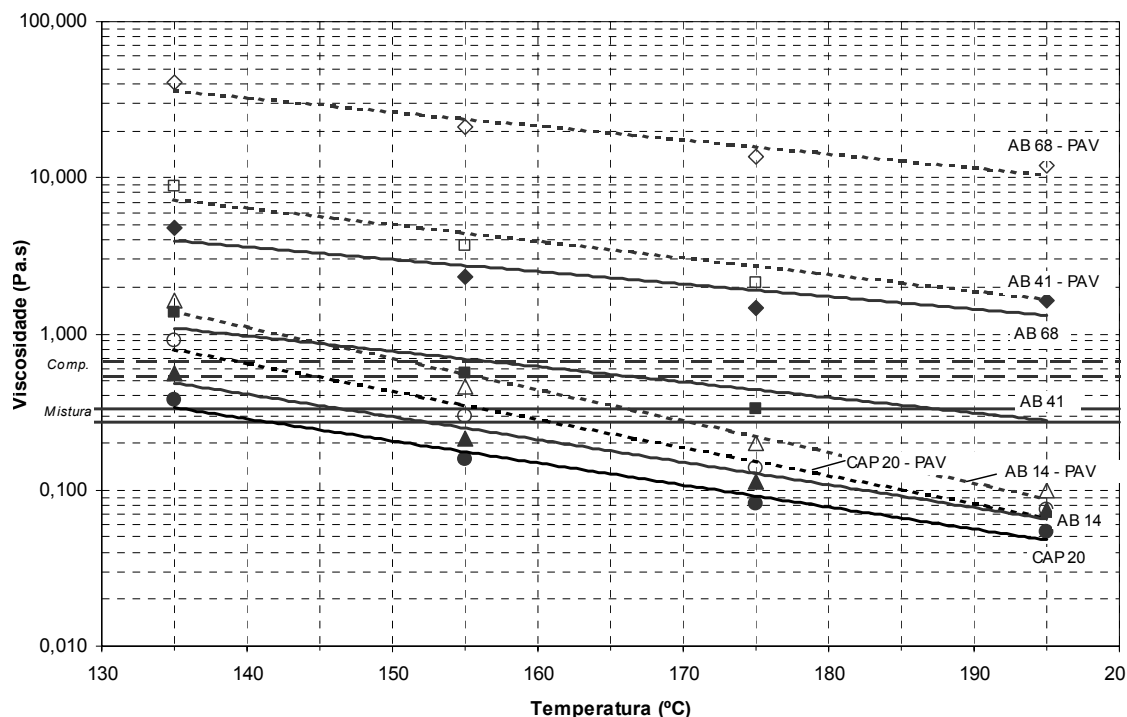


Figura 5.17 – Viscosidade de ligantes virgens e envelhecidos em RTFOT e PAV

A comparação da viscosidade dos ligantes virgens e envelhecidos permite verificar, sempre um aumento expressivo na viscosidade, proporcional ao teor de borracha adicionado. Todavia, nota-se que a susceptibilidade térmica aumenta de maneira mais expressiva para o ligante com baixos teores de borracha quando comparamos o mesmo ligante na condição com e sem envelhecimento.

## 5.9 PROPRIEDADES REOLÓGICAS MEDIDAS NO DSR

O comportamento de ligantes asfálticos depende essencialmente das condições de ensaio, tempo de carregamento e temperatura, e um ensaio adequado de caracterização deverá levar em conta estas duas variáveis. Um destes ensaios é o realizado com o DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) para avaliar as propriedades viscoelásticas dos ligantes asfálticos.

O ensaio pode ser realizado em amostras de ligantes virgens, envelhecidos à curto e/ou longo prazos e, para cada situação a especificação SUPERPAVE™ fornece valores limites, os quais definem o grau de desempenho (PG) de alta temperatura e do critério de fadiga.

O ensaio fornece valores de módulo complexo de cisalhamento  $G^*$ , e o ângulo de defasagem, ou ângulo de fase,  $\delta$ ;  $G^*$  é a medida de resistência total do ligante asfáltico à deformação permanente, quando o material é submetido a pulsos repetidos de carregamento cisalhante; o ângulo de fase indica a quantidade de deformação recuperável e não recuperável, apresentando valores menores quando o material é mais elástico.

O  $G^*$  é calculado dividindo a diferença de tensões cisalhantes ( $\tau_{\text{máx}} - \tau_{\text{min}}$ ) pelo total de deformações cisalhantes ( $\gamma_{\text{máx}} - \gamma_{\text{min}}$ ). A defasagem de tempo entre a aplicação da tensão e a respectiva deformação é o  $\delta$  que, para materiais perfeitamente elásticos, iguala-se a zero.

A análise das características reológicas dos ligantes foi realizada com quatro amostras: ligante convencional, AB 14, AB 41 e AB 68 nas condições: virgem (sem envelhecimento), após RTFOT e após PAV. As Tabelas 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam os resultados dos ensaios em DSR.

Tabela 5.10 – Resultados do ensaio DSR para o ligante CAP 20

<i>Virgem (não envelhecido)</i>			
T (°C)	G*(Pa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
58	2737	87,31	2,740
64	1232	88,21	1,233
70	574	88,85	0,575
<i>Após RTFOT</i>			
T (°C)	G*(Pa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
58	5785	84,85	5,819
64	2521	86,40	2,526
70	1127	87,58	1,128
<i>Após PAV</i>			
T (°C)	G*(Pa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
34	1146	60,00	0,992
31	1890	56,84	1,582
28	3043	53,59	2,449
25	4858	50,16	3,730
22	7885	46,34	5,704

Tabela 5.11 – Resultados do ensaio DSR para o ligante AB 14

<i>Virgem (não envelhecido)</i>			
T (°C)	G*(Pa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
58	3414	84,53	3,429
64	1575	86,46	1,578
70	734	87,81	0,774
<i>Após RTFOT</i>			
T (°C)	G*(Pa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
58	8767	79,33	8,922
64	3957	81,93	3,997
70	1825	84,31	1,834
<i>Após PAV</i>			
T (°C)	G*(Pa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
34	853	57,48	0,719
31	1361	54,74	1,111
28	2135	51,82	1,678
25	3356	48,64	2,519
22	5385	45,03	3,810
19	8536	41,29	5,633

Tabela 5.12 – Resultados do ensaio DSR para o ligante AB 41

<i>Virgem (não envelhecido)</i>			
T (°C)	G*(Pa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
58	6581	75,88	6,786
64	3265	80,39	3,311
70	1643	83,62	1,653
76	865	85,58	0,867
<i>Após RTFOT</i>			
T (°C)	G*(Pa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
64	6400	73,45	6,676
70	3274	77,04	3,359
76	1666	80,45	1,689
<i>Após PAV</i>			
T (°C)	G*(Pa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
34	755	53,64	0,608
31	1160	51,96	0,913
28	1773	49,92	1,357
25	2721	47,62	2,010
22	4288	44,96	3,030
19 <sup>3</sup>	6779	42,04	4,540
16	10600	38,99	6,671

Tabela 5.13 – Resultados do ensaio DSR para o ligante AB 68

<i>Virgem (não envelhecido)</i>			
T (°C)	G*(Pa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
58	12140	68,94	13,010
64	6241	75,24	6,540
70	3241	79,97	3,291
76	1740	82,97	1,753
82	971	84,90	0,974
<i>Após RTFOT</i>			
T (°C)	G*(Pa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
58	19410	56,18	23,36
64	11420	60,58	13,11
70	6419	66,72	6,987
76	3604	72,66	3,776
82	2033	77,43	2,083
<i>Após PAV</i>			
T (°C)	G*(Pa)	$\delta$ (°)	G*/sen $\delta$ (kPa)
34	514	51,59	0,403
31	776	50,79	0,602
28	1170	49,46	0,889
25	1772	47,74	1,311
22	2772	45,51	1,977
19	4359	42,98	2,972
16	6835	40,27	4,418

Durante a vida de serviço dos pavimentos, sob cargas normais e temperaturas medianas, os ligantes asfálticos apresentam, simultaneamente, características elásticas e viscosas. A Figura 5.18 apresenta no plano comportamento elástico/comportamento viscoso os vetores de  $G^*$  e ângulo fase  $\delta$ . A inclinação do vetor tendendo para o eixo das ordenadas indica um material com comportamento mais viscoso, enquanto que a aproximação do vetor com a abscissa indica comportamento elástico. O valor de  $G^*$  é indicativo da resistência à deformação plástica do ligante em estudo.

Nota-se claramente a influência da borracha no comportamento do material, reduzindo o ângulo de fase, de modo a incrementar a parcela elástica de comportamento e aumentar o valor de  $G^*$ , melhorando as características de deformação permanente do ligante. As taxas de incremento de  $G^*$  e  $\delta$  são maiores para os maiores teores de borracha.

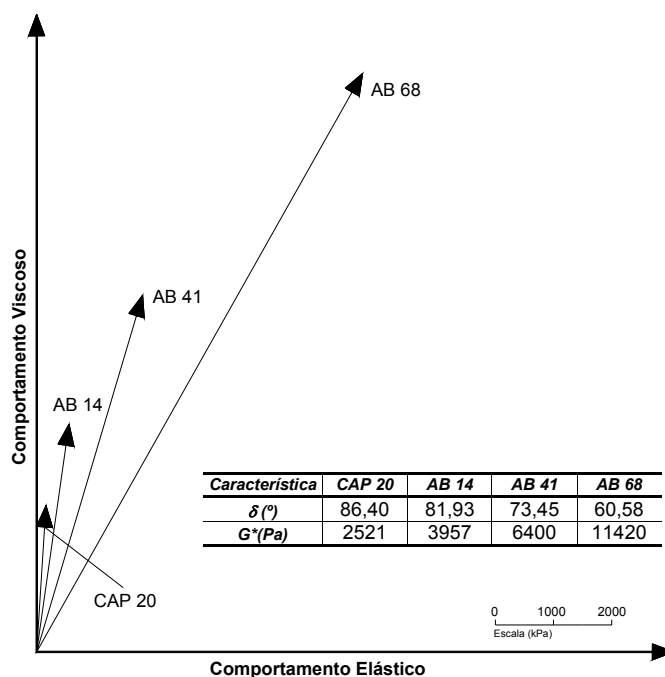


Figura 5.18 – Comportamento elástico e viscoso dos ligantes (após RTFOT, T = 64°C)

A Figura 5.19 apresenta a variação do módulo complexo e do ângulo de fase *versus* o teor de borracha; os dados são provenientes do ensaio realizado após envelhecimento de curto prazo. Nota-se a importante contribuição da borracha, aumentando a resistência a deformações permanentes ( $G^*$ ) e a elasticidade do ligante, expressa pela redução do ângulo de fase,  $\delta$ .

Para comparação, foram plotados resultados de ensaios realizados em duas temperaturas (64 e 70°C); os valores de  $\delta$  aumentam com a temperatura, denotando o aumento da parcela viscosa no comportamento do ligante; a redução do  $G^*$  confirma esta observação, quanto maiores as temperaturas menos resistente está o ligante à deformações plásticas.

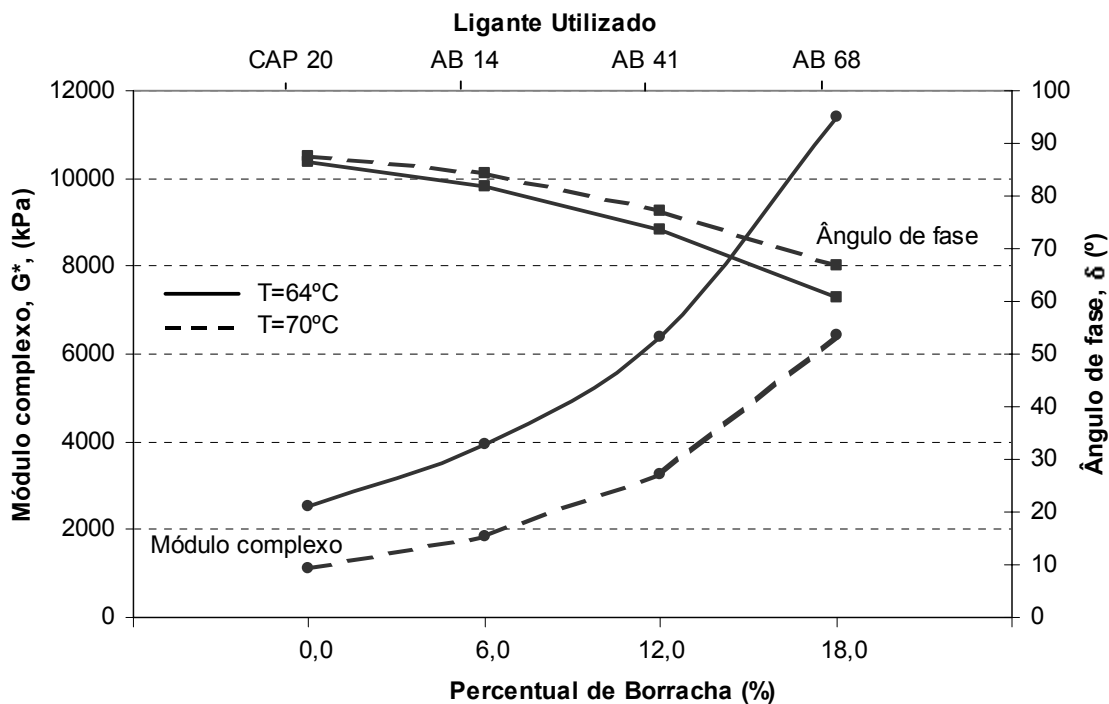


Figura 5.19 – Relação entre  $G^*$  e  $\delta$  com percentual de borracha (após RTFOT)

A especificação é baseada no desempenho que o ligante apresenta nas temperaturas da área de sua utilização. Os valores especificados (mínimos e máximo) são sempre os mesmos; o que se altera é a temperatura que o ligante atinge a especificação. O ensaio em DSR determina a máxima temperatura que um ligante pode ser utilizado e o ensaio em BBR a mínima.

As Figuras 5.20 e 5.21 apresentam os resultados de  $G^*/\text{sen } \delta$  para os ligantes virgens e envelhecidos em RTFOT; é apresentado, também, o valor da especificação SUPERPAVE™. Nota-se, em ambos os casos, que a adição de borracha reciclada de pneus eleva a máxima temperatura de aplicação do ligante; este aumento é mais expressivo para os teores de 12 e 18%. Isso significa que o AB apresentara desempenho similar ao convencional (quanto ao ATR) mesmo aplicado em ambientes com temperaturas superiores.



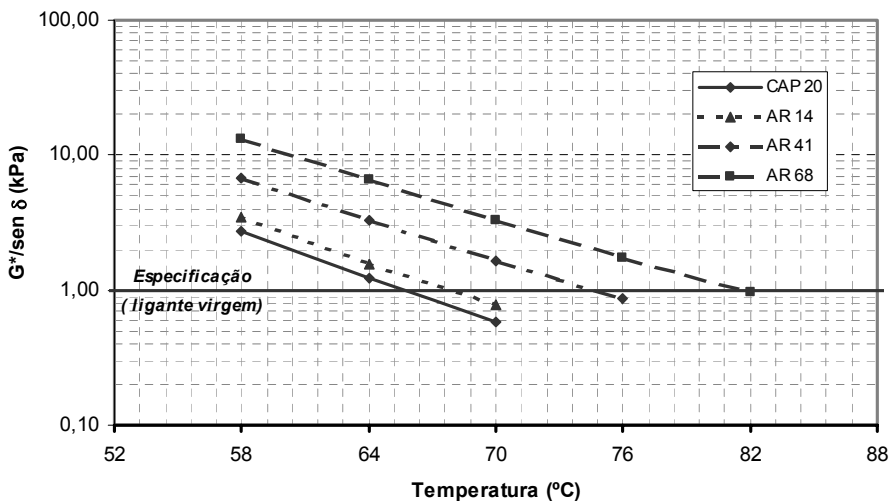


Figura 5.20 – Relação entre  $G^*/\text{sen } \delta$  e temperatura (ligante virgem)

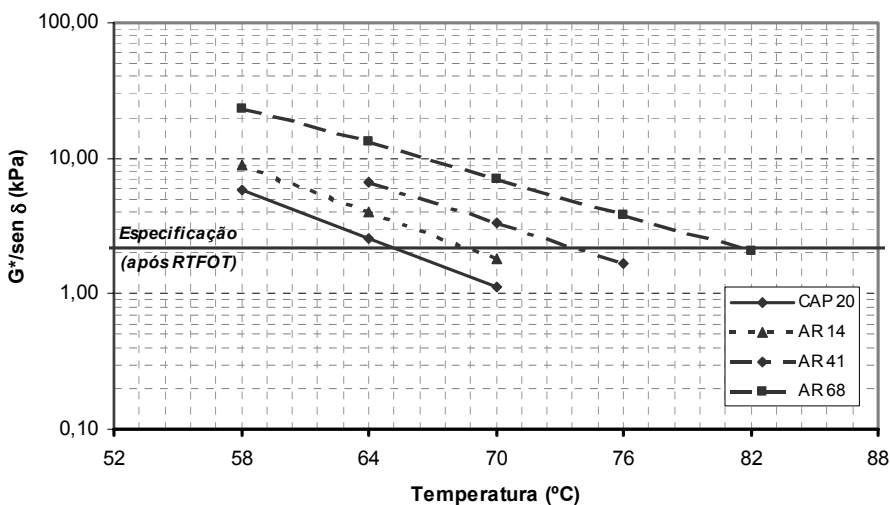


Figura 5.21 – Relação entre  $G^*/\text{sen } \delta$  e temperatura (após RTFOT)

A Figura 5.22 apresenta o produto  $G^*\text{sen } \delta$  para os ligantes ensaiados na condição de envelhecimento a longo prazo. Neste procedimento se avalia a resistência à fadiga do ligante. O valor máximo de 5000kPa é exigido para assegurar adequados desempenho quanto a este critério. O ligante convencional apresentaria desempenho satisfatório acima de 25°C, enquanto que os ligantes AB 14, 41 e 68 (PB=6, 12 e 18%) estariam adequados a partir de 22, 19 e 16°C, respectivamente.

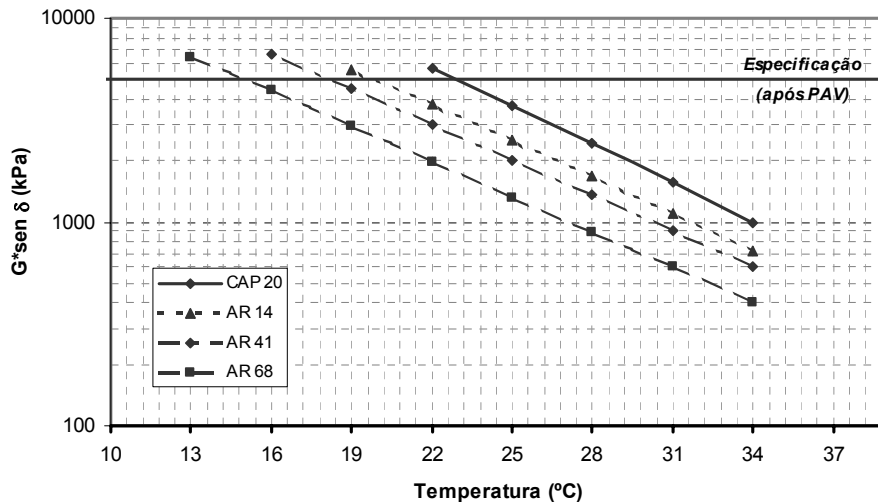


Figura 5.22 – Relação entre  $G^* \text{sen } \delta$  e temperatura (após PAV)

## 5.10 PROPRIEDADES REOLÓGICAS MEDIDAS NO BBR

Quando acontecem quedas bruscas de temperatura o concreto asfáltico pode vir a trincar; caso o atrito entre o revestimento e a base não permitam movimentos de retração, serão geradas tensões de tração no interior do revestimento; se estas tensões superarem as máximas tensões resistentes do pavimento aconteceram trincas de retração térmica, ou simplesmente trincas térmicas.

Para avaliar o desempenho do ligante em baixas temperaturas foram realizados ensaios em BBR (*Bending Beam Rheometer*). O ensaio consiste em aplicar um carregamento em um pequeno corpo-de-prova prismático preparado com ligante envelhecido à curto e logo prazo.

A metodologia SUPERPAVE™ especifica que a rigidez em fluência (*creep stiffness*) ou módulo de relaxação não deva exceder 300MPa com 60s de carregamento na temperatura de ensaio. Outro valor a ser avaliado é o  $m$ , que representa a taxa de variação da rigidez com o tempo ( $\geq 0,300$  em 60s).

Alguns ligante modificados podem exibir uma rigidez estática  $S$  maior que o indicado e, assim mesmo, não trincar a baixas temperaturas, devida a capacidade de deformar sem romper. Se, no entanto, esses ligantes apresentam  $m$  superior ao limite estabelecido poderão

ser aceitos desde que apresentem um resultado satisfatório no ensaio de tração direta (DTT – *Direct Tension Test*).

O valor de rigidez que se deseja conhecer é após duas horas de carregamento na mínima temperatura do pavimento, entretanto, a partir da relação tempo/temperatura, pode-se determinar os valores em um tempo de 60s reduzindo a temperatura em 10°C (AI 1994).

Foram ensaiados quatro amostras no BBR, CAP 20, AB 14, AB 41 e AB 68. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 5.14 à 5.19.

Tabela 5.14 – Resultados do ensaio BBR para o ligante CAP 20 (T = -12°C)

<i>Tempo (s)</i>	<i>Força (mN)</i>	<i>Defexão (mm)</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>m - value</i>
8	970	0.190	402	0.243
15	972	0.222	346	0.266
30	971	0.270	284	0.291
60	974	0.336	229	0.316
120	973	0.420	183	0.341
140	976	0.537	143	0.366

Tabela 5.15 – Resultados do ensaio BBR para o ligante AB 14 (T = -12°C)

<i>Tempo (s)</i>	<i>Força (mN)</i>	<i>Defexão (mm)</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>m - value</i>
8	973	0.216	356	0.227
15	976	0.253	305	0.253
30	978	0.303	255	0.283
60	977	0.373	207	0.312
120	944	0.455	167	0.342
140	948	0.581	129	0.371

Tabela 5.16 – Resultados do ensaio BBR para o ligante AB 14 (T = -18°C)

<i>Tempo (s)</i>	<i>Força (mN)</i>	<i>Defexão (mm)</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>m - value</i>
8	976	0.108	712	0.193
15	977	0.120	637	0.215
30	975	0.142	541	0.239
60	975	0.172	447	0.264
120	977	0.206	374	0.288
140	975	0.253	304	0.313

Tabela 5.17 – Resultados do ensaio BBR para o ligante AB 41 (T = -12°C)

<i>Tempo (s)</i>	<i>Força (mN)</i>	<i>Deflexão (mm)</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>m - value</i>
8	1209	0.310	308	0.254
15	1202	0.360	262	0.268
30	1199	0.439	216	0.283
60	1209	0.541	177	0.297
120	1228	0.673	143	0.312
140	1256	0.865	115	0.327

Tabela 5.18 – Resultados do ensaio BBR para o ligante AB 41 (T = -18°C)

<i>Tempo (s)</i>	<i>Força (mN)</i>	<i>Deflexão (mm)</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>m - value</i>
8	988	0.137	569	0.214
15	990	0.159	493	0.239
30	988	0.187	414	0.266
60	987	0.228	341	0.293
120	989	0.284	276	0.320
140	990	0.356	219	0.347

Tabela 5.19 – Resultados do ensaio BBR para o ligante AB 68 (T = -18°C)

<i>Tempo (s)</i>	<i>Força (mN)</i>	<i>Deflexão (mm)</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>m - value</i>
8	963	0.216	352	0.272
15	962	0.255	298	0.290
30	963	0.317	240	0.310
60	963	0.392	194	0.329
120	964	0.504	151	0.349
140	962	0.637	119	0.369

A Figura 5.23 apresenta a relação tempo *versus* deflexão, para o ligante convencional e para ligantes modificados com de borracha ensaiados à -12 e -18°C. Nota-se que, para qualquer tempo considerado, os ligantes modificados testados apresentam maior deflexão, ou seja, possuem capacidade de deformar-se, mesmo em condições de temperaturas extremamente baixas. A maior diferença se dá entre o ligante com 6 e 12% de borracha. Para -18°C acontece o mesmo, quanto maior o PB maior a elasticidade das amostras.

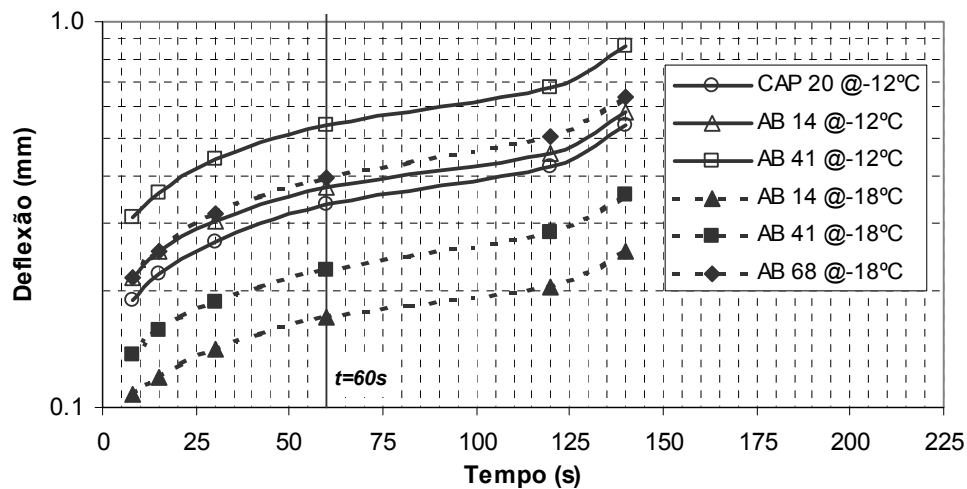


Figura 5.23 – Relação tempo/deflexão em BBR

Outra maneira de comparar as características do ligante convencional aos modificados é através do módulo de relaxação. Valores elevados indicam ligantes frágeis. A Figura 5.24 apresenta a relação entre módulo de relaxação e tempo. Verifica-se que, para os ligantes ensaiados a -12 e -18 °C, acontece um aumento de rigidez com a redução da temperatura. O percentual de borracha reduz o valor do módulo, melhorando as propriedades elásticas dos ligantes.

A taxa de variação da rigidez com o tempo, quantificada pelo *m-value*, (ver tabelas 5.14 a 5.19) também é reduzida com a adição de borracha reciclada de pneus, denotando a melhoria das propriedades dos ligantes AB à baixas temperaturas.

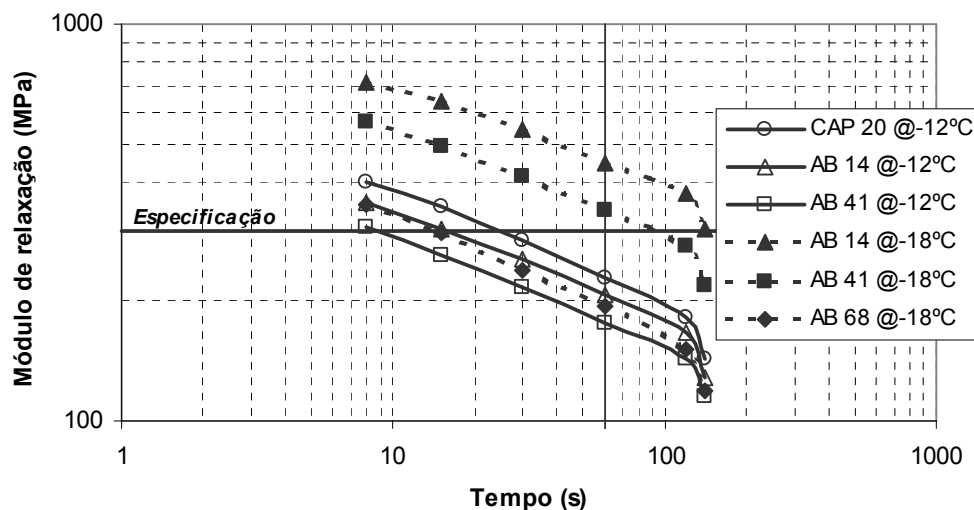


Figura 5.24 – Relação tempo/rigidez em BBR

### 5.11 GRAU DE DESEMPENHO SUPERPAVE™

O grau de desempenho (PG – *Performance Grade*) SUPERPAVE™ é uma maneira de classificar ligantes asfálticos baseado em seu desempenho em serviço, que é simulado em laboratório, através de ensaios reométricos e de envelhecimento.

Para a seleção e aceitação de um ligante para determinada obra de engenharia é necessário o conhecimento das temperaturas da região que este pavimento será inserido; a partir daí se estimam as máximas e mínimas temperaturas que o pavimento será submetido. Um ligante PG 64 - 22 significa um desempenho adequado entre 64 e -22°C, sob condições normais de tráfego. Segundo Leite e Tonial (1994) para o Estado do Rio Grande do Sul, um ligante PG 64 - 16 seria adequado para tráfego inferior a  $3.10^6$  com velocidades normais.

A especificação SUPERPAVE™ para dosagem de misturas asfálticas recomenda que se aumente em um grau o PG de alta temperatura para tráfego transiente com velocidade entre 20 e 70km/h e dois graus para velocidade inferiores a 20km/h. Com relação ao tráfego, deve-se aumentar o PG de alta temperatura em um grau quando o tráfego exceder  $3.10^6$  número de repetições do eixo padrão (AASHTO) (FHWA, 2001).

Núñez *et. al* (2003) realizaram medidas de temperatura em pavimentos asfálticos na região metropolitana de Porto Alegre e verificaram a ocorrência de temperaturas de até 57°C; este quadro ressalta a incapacidade, segundo os critérios do SHRP, do ligante CAP 20, que é comercializado no estado, de ser utilizado em condições severas de tráfego (alto volume e baixa velocidade).

A partir da análise reológica em DSR e BBR foi possível determinar o PG dos quatro ligantes testados nesses equipamentos, conforme Figura 5.24; nota-se que a partir da adição de borracha, existe a possibilidade da utilização dos ligantes AB em uma amplitude maior de temperaturas, tanto em alta quanto em baixa.

Apesar da melhoria ser gradual com o aumento do teor de borracha, em algumas situações de incremento de PB não há alteração do PG, isso se explica pela escala de temperaturas da especificação que é de 6°C.

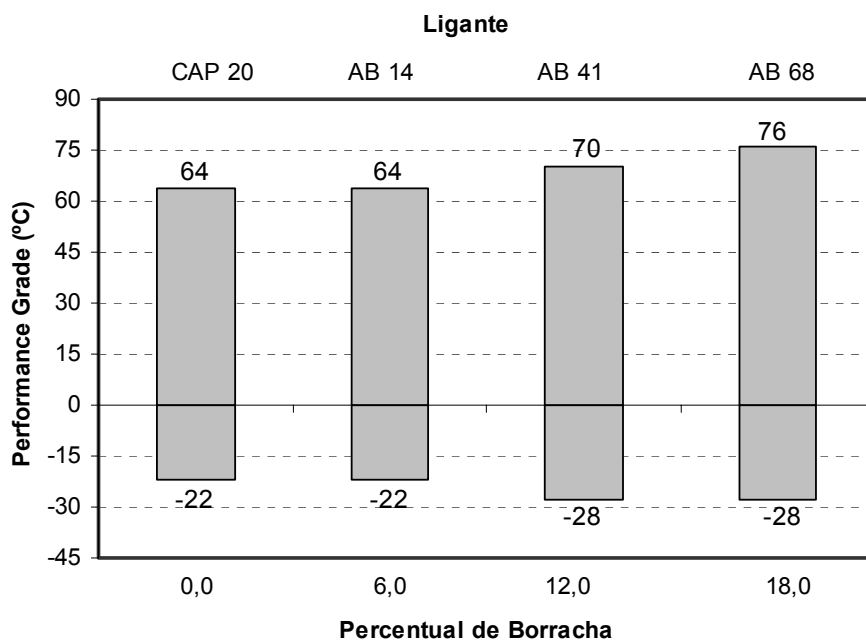


Figura 5.24 – Grau de desempenho PG dos ligantes estudados

## 5.12 VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO ROTOR

Dada a importância do assunto (Leite, 1999 e Oda, 2000), e conforme o planejamento apresentado no Capítulo 4 (item 4.2.1), foi realizado para a mistura AB 41 (12% de borracha criogênica #30, 180°C e 45 minutos) um teste de preparação de ligante com três velocidades distintas de rotação do rotor cisalhante (ver item 4.41): 2000, 4000 e 6000rpm. O Quadro 5.2 apresenta as características dos ligantes preparados.

Quadro 5.1 – Propriedades dos ligantes preparados a 2000, 4000 e 6000rpm

<i>Ensaio</i>	<i>Unid</i>	<i>Velocidade de rotação do rotor (rpm)</i>		
		<i>2000</i>	<i>4000</i>	<i>6000</i>
<i>Ponto de Amolecimento</i>	°C	52,5	62,0	50,5
<i>Penetração a 25°C, 100g, 5 seg</i>	<i>dmm</i>	44	61	46
<i>Viscosidade Aparente a 135°C</i>	<i>Pa.s</i>	1,282	1,375	1,456
<i>Viscosidade Aparente a 155°C</i>	<i>Pa.s</i>	0,538	0,563	0,613
<i>Viscosidade Aparente a 175°C</i>	<i>Pa.s</i>	0,372	0,328	0,375
<i>Viscosidade Aparente a 195°C</i>	<i>Pa.s</i>	0,538	0,363	0,434
<i>IC – Índice de Compatibilidade</i>	°C	6	11	9
<i>Ponto de Fulgor</i>	°C	320	315	326
<i>Massa Específica</i>	<i>g/cm<sup>3</sup></i>	1,031	1,031	1,028

A partir dos ensaios de Penetração, Ponto de Amolecimento, Índice de Compatibilidade e Ponto de Fulgor, não é possível estabelecer, devido a variabilidade de medidas inerente a cada método e a natureza empírica dos ensaios, uma tendência de comportamento relacionada da velocidade de rotação utilizada na preparação das amostras.

As variações observadas nas medidas de massa específica são bastante pequenas (0,003); o erro aceito pela norma DNER 193/96, para a mesma amostra, é de 0,002.

A Figura 5.25 apresenta a viscosidade aparente versus temperatura dos ligantes preparados com diferentes velocidades de rotação. Notam-se valores bastante similares para as três amostras e a falta de tendência indicando que, para as condições testadas (velocidades, temperaturas, tipo de equipamento, teor de borracha, etc.), a variável independente, rotação do cisalhador trará alguma mudança considerável nas propriedades do ligante.

O fato de haver um aumento de viscosidade medida a 195°C em comparação com as medidas a 175°C indica que existe, ainda, interação entre o ligante e a borracha.



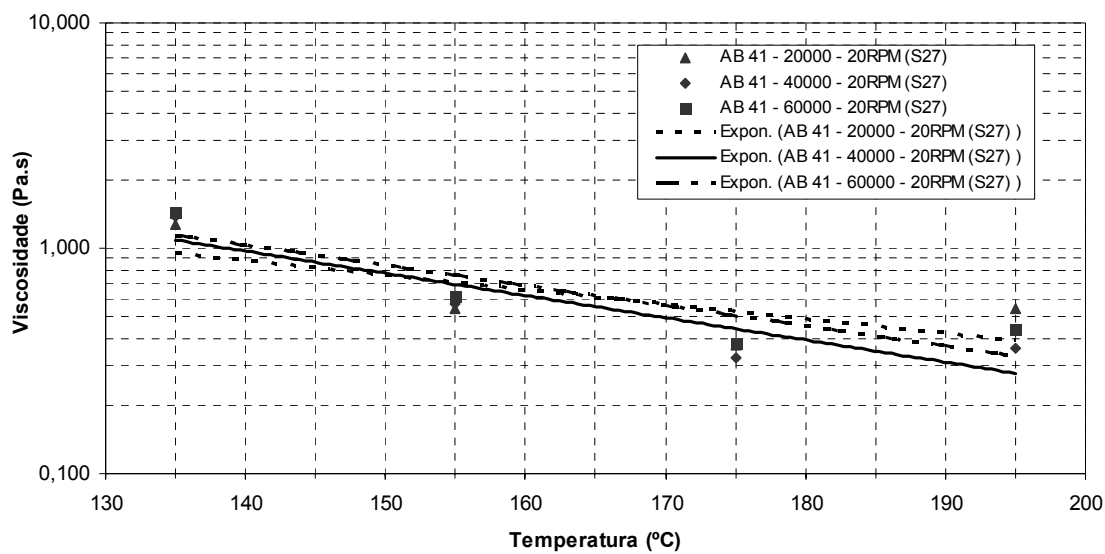


Figura 5.25 – Viscosidade aparente dos ligantes preparados com 2000, 4000 e 6000rpm

### 5.13 RESUMO

Dada a quantidade de informações apresentadas no Capítulo 5, julgou-se necessário a montagem de um quadro-resumo a respeito do efeito do uso de borracha reciclada nas propriedades do cimento asfáltico utilizado, materializado no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Quadro-resumo dos resultados encontrados nos ensaios em ligantes

<i>Variável de resposta</i>	<i>Fatores importantes/comentários</i>
PN – Penetração	PB é o fator mais importante e reduz o PN Os efeitos quadráticos de TP e TM também reduzem PC
PA – Ponto de Amolecimento	Quanto maior a tamanho da borracha maior o PA O PB aumenta o valor de PA (efeito secundário)
PF – Ponto de Fulgor	TP.TP é o fator principal (reduz PF) PB é o fator secundário (reduz PF)
ME – Massa Específica	PB é o fator principal PB.TP também influencia o valor de ME
IC – Índice de Compatibilidade	SE.TM é o efeito principal reduzindo o IC TM também exerce influência
Ductilidade	A borracha reduz a ductilidade medida
Retorno Elástico	Há um aumento expressivo nos valores de retorno elástico quando borracha é adicionada
Perda de massa	A borracha aumente sensivelmente a perda de massa em RTFOT
G* – Módulo de Cisalhamento Dinâmico (DSR)	A adição de borracha aumenta o G*
$\delta$ – Ângulo de Fase (DSR)	A adição de borracha reduz o $\delta$
Módulo de Relaxação (BBR)	A borracha reduz a rigidez em baixas temperaturas
m – value (BBR)	A presença da borracha reduz o <i>m – value</i>
PG – Performance Grade	Há um incremento no grau de alta e baixa temperatura quando a borracha é adicionada

## 6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM CONCRETO ASFÁLTICO

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliar comparativamente o comportamento e o desempenho de misturas asfálticas convencionais (misturas de referência) e preparadas segundo os processos seco e úmido de incorporação de borracha de pneus.

Primeiramente as misturas foram dosadas, segundo a metodologia Marshall, e posteriormente preparadas amostras para a realização de ensaios de verificação de propriedade e qualificação de desempenho, de modo a tentar abranger o maior número possível de mecanismos de degradação.

A organização do capítulo se deu em função das diversas variáveis de resposta investigadas: propriedades volumétricas das misturas, estabilidade e fluência, resistência à tração, deformabilidade elástica, resistência à fadiga, resistência ao acúmulo de deformações permanentes, resistência ao desgaste e efeito deletério da água.

### 6.1 PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS DAS MISTURAS

Os métodos empíricos de dosagem de misturas asfálticas em uso foram desenvolvidos tendo-se em mente certos modelos de degradação; os mais comuns são o trincamento por fadiga e a afundamento plástico em trilhas de roda. Outros modos de degradação, que podem variar em diferentes partes do mundo, incluem trincamento de origem térmica, envelhecimento e efeito deletério da água (Harvey, 1992).

As variáveis de mistura, geralmente determinadas através de metodologia de dosagem, são dependentes da origem do agregado e de sua graduação, do ligante e do volume de vazios. Cada um desses componentes pode afetar, significativamente, as propriedades da mistura e seu desempenho em campo. A proposta da dosagem é alcançar um balanço nas propriedades da mistura para uma aplicação específica (Monismith *et.al*, 1989).

O conhecimento das propriedades volumétricas são de fundamental importância, pois condicionam o desempenho de uma mistura em pista (Harvey, 1992; AI, 1998; FHWA,

2001). Serão apresentados nos itens subseqüentes a influência da adição de borracha nas propriedades volumétricas do concreto asfáltico.

### 6.1.1 Misturas asfálticas preparadas com ligante asfalto-borracha

A Tabela 6.1 apresenta as propriedades volumétricas de amostras em concreto asfáltico preparadas com ligante modificado com borracha, em comparação a amostras preparadas com ligante convencional CAP 20. Os ligantes AB foram preparados com borracha de pneus proveniente de processo de criogênico denominada #30, numa temperatura de 180°C durante 45 minutos; os teores de borracha foram de 6, 12 e 18%. A caracterização da borracha está no capítulo 4 e dos ligantes no capítulo 5.

Tabela 6.1 – Propriedades das misturas preparadas com ligante convencional e modificado com borracha

<i>Variável</i>	<i>Especificação</i>	<i>Ligante Utilizado</i>			
		<i>CAP 20</i>	<i>AB 14</i>	<i>AB 41</i>	<i>AB 68</i>
<i>Teor de Borracha no Ligante (%)<sup>1</sup></i>	--	0,00	6,00	12,00	18,00
<i>Teor de Ligante (%)</i>	--	4,75	5,15	5,75	6,25
<i>Volume de Vazios (%)</i>	<i>3 a 5<sup>2</sup></i>	4,00	4,00	4,00	4,00
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	<i>75 a 82<sup>2</sup></i>	75,00	75,00	78,00	78,00
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	<i>&gt;14<sup>2</sup></i>	15,80	16,50	18,00	19,00
<i>Massa Específica Máxima Teórica (kN/m<sup>3</sup>)</i>	--	2,63	2,62	2,59	2,57
<i>Massa Específica Aparente (kN/m<sup>3</sup>)</i>	--	2,53	2,50	2,49	2,47
<i>Índice de Lamelaridade (DAER 108/01)</i>	<i>&lt; 50<sup>2</sup></i>	34	34	34	34
<i>Passante #200</i>	<i>4 a 10<sup>2</sup></i>	5,97	5,97	5,97	5,97
<i>Relação #200/Betume (%)</i>	<i>0,8 a 1,6<sup>3</sup></i>	1,26	1,16	1,04	0,95

Nota: <sup>1</sup>o teor de borracha é calculado em relação à massa da mistura AB; os ligantes foram preparados à 180°C durante 45 minutos com a borracha #30; <sup>2</sup>DAER ES 16/98; <sup>3</sup>SUPERPAVE™.

O Volume de Vazios (VV) é a propriedade volumétrica mais importante do concreto asfáltico; sempre são necessários vazios de ar dentro da mistura compactada para permitir a expansão térmica dos ligantes e suportar a leve compactação causada pelo tráfego. Volumes de vazios muito baixos (<3%) comprometem o desempenho das misturas quanto ao ATR (Afundamento em Trilha de Rodas) e muito altos (<8%) comprometem a durabilidade (AI, 1998).

O teor de ligante de projeto foi determinado em função do volume de vazios de 4%, desde que respeitando os outros critérios da especificação. O cálculo foi em função do ligante total presente na mistura (em massa) e não do teor efetivo de ligante, o qual considera a absorção de parte do ligante pelo agregado.

O teor de ligante de projeto aumenta 1,73% para cada 1% de borracha adicionada no ligante, conforme é apresentado na Figura 6.1. Este aumento é devido a maior viscosidade dos ligantes AB em relação ao CAP 20, 16 vezes no caso do AB 68, e benéfica, visto que se aumenta a espessura do filme de ligante que recobre os agregados, melhorando a durabilidade da mistura. Ressalta-se que o incremento no filme de ligante ocasiona também a perda de atrito entre os grãos, levando a redução na deformabilidade elástica e aumento das deformações plásticas. Entretanto como o ligante AB possui melhores propriedades elásticas e é mais consistente, estas propriedades devem ser avaliadas.

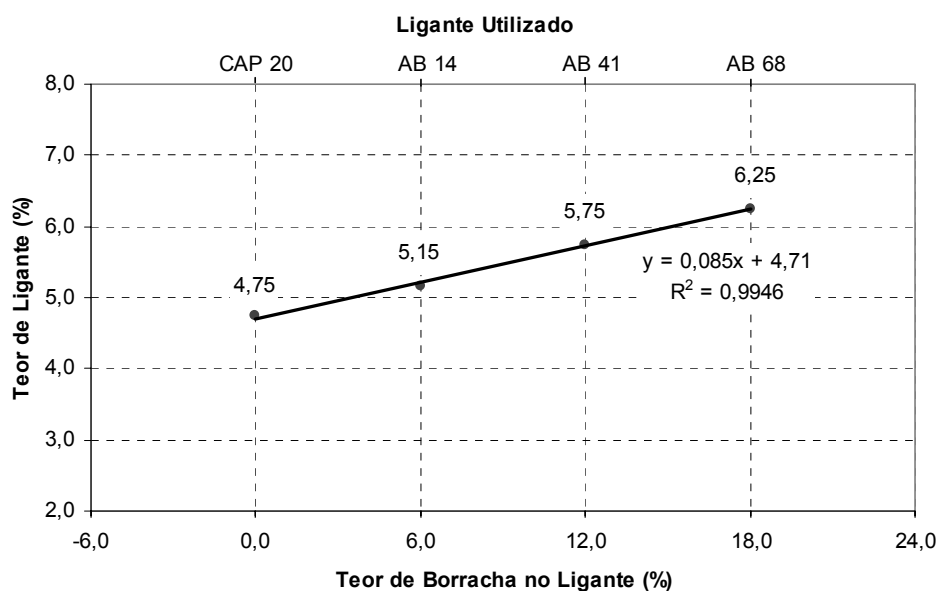


Figura 6.1 – Teor de ligante de projeto (VV = 4,0%) versus teor de borracha adicionada ao ligante

O VAM (Vazios de Agregado Mineral) representa o espaço intergranular do esqueleto mineral; valores muito reduzidos de VAM levam a teores muito baixos de ligante, o que pode comprometer o desempenho à fadiga e a durabilidade das misturas (filme de ligante delgado recobrimdo os agregados). Valores excessivamente altos de VAM podem levar a perda de intertravamento do esqueleto mineral e redução da resistência ao cisalhamento.

Foi observado que o emprego de borracha incorporada ao ligante leva a um aumento do valor de VAM, passando de 16% para mistura com ligante convencional para 19% quando 18% de borracha é incorporada ao ligante (considerando VV=4%), conforme Figura 6.2.

Ainda na Figura 6.2 pode-se verificar que os valores de Relação Betume Vazios (RBV) também apresentam pequeno incremento de 75 para 78%. O RBV é a percentagem de vazios intergranulares preenchidos por asfalto e serve para garantir uma quantidade razoável de ligante preenchendo os vazios do agregado mineral; valores muito baixos comprometem a durabilidade da mistura e muito elevados a estabilidade.

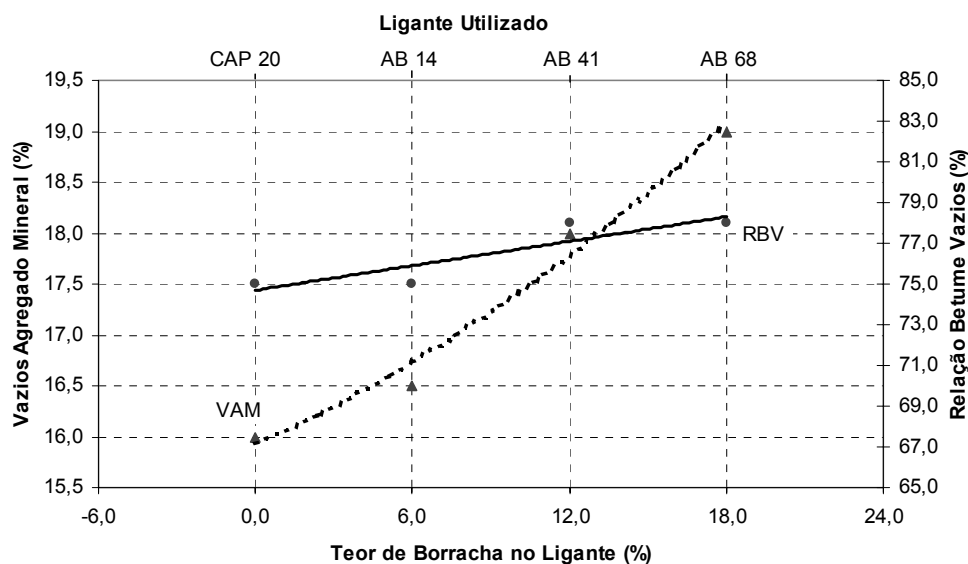


Figura 6.2 – Relação entre o teor de borracha adicionada ao ligante e VAM/RBV

Com relação a densidade aparente, foi observada a redução sensível desta variável quando ligantes modificados são utilizados, isto se deve ao aumento do teor de ligante. A relação fíler /ligante, também, apresenta redução; esta redução indica que existe mais ligante livre na mistura para atuar na cicatrização de microfissuras.

### 6.1.2 Avaliação do teor de borracha em misturas borracha-agregado

As Tabelas 6.2 e 6.3 apresentam as propriedades das misturas densas (faixa IVB do IA ou B do DAER RS) e descontínuas (sugerida por Takallou e Hicks, 1998). O tamanho máximo dos granulares é de 19 mm e a borracha utilizada foi uma mistura de 20% da criogênica >#30 e 80% da moída mecanicamente em temperatura ambiente; ambas são provenientes do resíduo da produção de bandas de recapagem.

Para as misturas densas o volume de vazios considerado para a determinação do teor de ligante de projeto foi de 4% e para as misturas descontínuas 5%.

Tabela 6.2 – Propriedades das misturas densas preparadas com diferentes teores de borracha

Variável	Especificação	Percentagem de borracha adicionada <sup>1</sup>				
		0,0	0,2	0,6	1,0	3,0
Teor de Ligante (%)	--	4,75	6,00	6,25	6,60	9,00
Volume de Vazios (%)	3 a 5 <sup>2</sup>	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82 <sup>2</sup>	75,00	77,00	78,50	80,00	72,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	>14 <sup>2</sup>	15,80	18,00	18,50	19,00	25,00
Massa Específica Máxima Teórica (kN/m <sup>3</sup> )	--	2,63	2,58	2,57	2,57	2,59
Massa Específica Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	--	2,53	2,48	2,47	2,47	2,33
Índice de Lamelaridade (DAER 108/01)	< 50 <sup>2</sup>	34	34	34	34	34
Passante #200	4 a 10 <sup>2</sup>	5,97	6,86	6,85	6,83	6,81
Relação #200/Betume (%)	0,8 a 1,6 <sup>3</sup>	1,26	1,15	1,10	1,03	0,76

Nota: <sup>1</sup> o teor de borracha é calculado em relação à massa de agregado; <sup>2</sup>DAER ES 16/98; <sup>3</sup> SUPERPAVE™.

Tabela 6.3 – Propriedades das misturas descontínuas preparadas com diferentes teores de borracha

Variável	Especificação	Percentagem de borracha adicionada <sup>1</sup>				
		0,0	0,2	0,6	1,0	3,0
Teor de Ligante (%)	--	5,40	6,10	6,70	6,75	9,00
Volume de Vazios (%)	3 a 5 <sup>2</sup>	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82 <sup>2</sup>	73,00	75,00	75,00	75,00	70,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	>14 <sup>2</sup>	18,00	19,00	19,00	21,00	26,00
Massa Específica Máxima Teórica (kN/m <sup>3</sup> )	--	2,62	2,6	2,59	2,59	2,61
Massa Específica Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	--	2,5	2,46	2,46	2,45	2,33
Índice de Lamelaridade (DAER 108/01)	< 50 <sup>2</sup>	35	34	34	35	34
Passante #200	4 a 10 <sup>2</sup>	8,58	8,00	7,99	8,75	7,96
Relação #200/Betume (%)	0,6 a 1,6 <sup>3</sup>	1,26	1,31	1,19	1,29	0,89

Nota: <sup>1</sup> o teor de borracha é calculado em relação à massa de agregado; <sup>2</sup>DAER ES 16/98; <sup>3</sup> SUPERPAVE™.

Pode ser observado na Figura 6.3 e nas Tabelas 6.2 e 6.3 a relação entre teor de borracha adicionada e teor de ligante de projeto; notam-se as mesmas tendências dos valores destas variáveis com adição de borracha para ambas as misturas (densa e descontínuas).

É observada a tendência de incremento do teor de ligante com adição de borracha. Este aumento se deve, possivelmente, à absorção das frações leves do asfalto. Esta constatação indicaria que o teor de ligante efetivo das misturas borracha-agregado é menor que o apresentado.

As misturas preparadas com 3% de borracha indicaram valores elevado no teor de ligante; a análise visual das amostras indicam sinais de exudação e excesso de ligante. Outras pesquisas já haviam indicado que a adição de borracha eleva os teores de ligante da mistura (Takallou e Hicks, 1998 e Bertollo, 2002).

Outra constatação é que as misturas descontínuas consomem mais ligante; este aumento é bastante expressivo e deve-se ter mente a necessidade de utilização de ligantes especiais levando em conta as necessidades dos projetos.

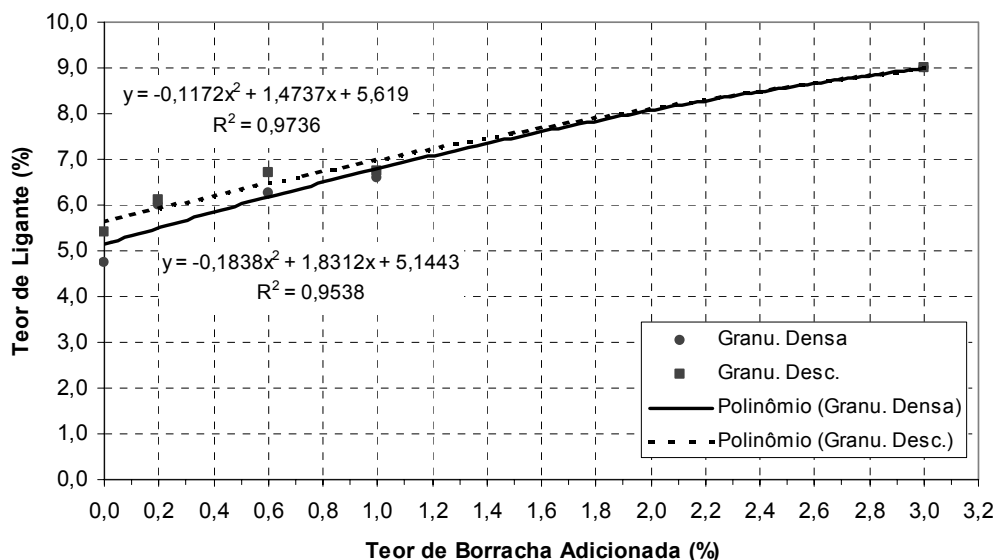


Figura 6.3 – Relação entre teor de ligante e percentual de borracha adicionada em composições granulométricas densas e descontínuas

A Figura 6.4 apresenta o teor de borracha adicionada versus VAM e RBV, respectivamente. Nota-se a mesma tendência dos valores para misturas densas e descontínuas. O aumento expressivo do VAM (taxa maior que o teor de ligante) leva a uma redução do RBV para altos teores de borracha.



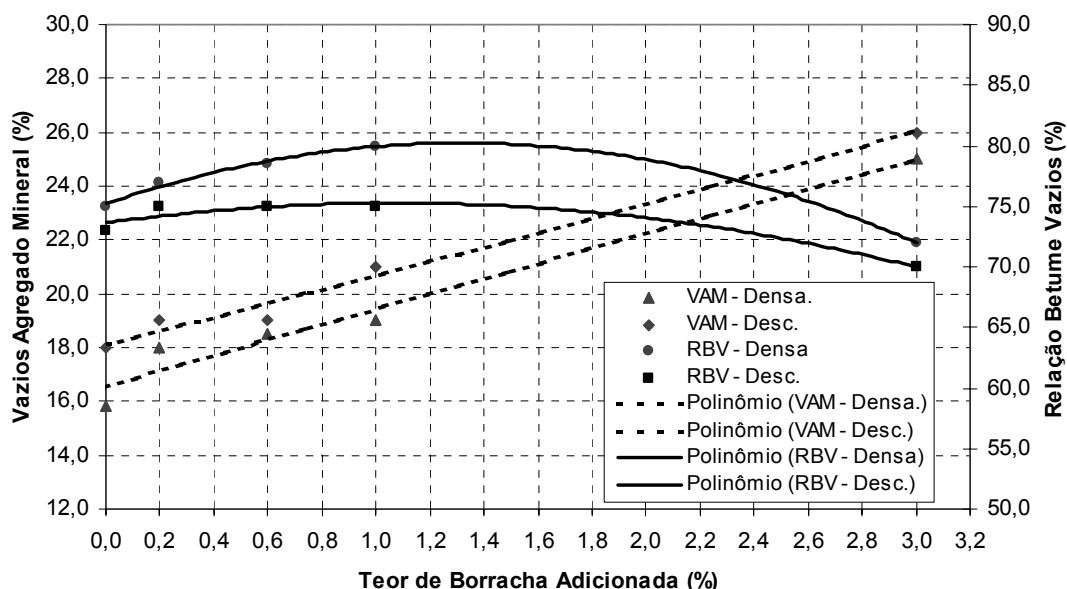


Figura 6.4 – Relação entre VAM e RBV e percentual de borracha adicionada em composições granulométricas densas e descontínuas

### 6.1.3 Avaliação do tempo de digestão em misturas borracha-agregado

Um fator que tem sido comentado como de grande influência nas características das misturas borracha-agregado é o tempo de digestão, ou tempo de descanso entre a mistura e a compactação da massa (Gallego *et al.*, 2000; Visser e Verhaeghe, 2000; Bertollo, 2002). Esse tempo, nas condições reais de execução, é representado pelo tempo de transporte da massa desde a usina até o local de aplicação.

Nesta pesquisa foram testadas misturas com tempos de digestão de 0, 1 e 2 horas, todas com 1% de borracha. A massa era mantida aquecida em cuba térmica fechada; o controle de temperatura era automático. A Tabela 6.4 apresenta as propriedades volumétricas das misturas. Nota-se que os valores são absolutamente iguais, ou seja, as propriedades volumétricas das misturas não são afetadas pelo tempo de digestão. A Figura 6.5 apresenta a relação entre teor de ligante e volume de vazios para as misturas com os três tempos de digestão e para a mistura de referência.

O fato de haver mudança nas propriedades volumétricas das misturas, com relação ao tempo de digestão, não significa que a borracha e o asfalto não estejam interagindo, mas apenas que esta interação não produz alterações nas propriedades das misturas.

Tabela 6.4 – Propriedades das misturas densas preparadas com diferentes tempos de digestão

Variável	Especificação	Mistura Referência	Tempo de digestão (horas)		
			0	1	2
Teor de Ligante (%)	--	4,75	6,60	6,60	6,60
Volume de Vazios (%)	3 a 5 <sup>1</sup>	4,00	4,00	4,00	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82 <sup>1</sup>	75,00	80,00	80,00	80,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	>14 <sup>1</sup>	16,00	19,00	19,00	19,00
Massa Específica Máxima Teórica (kN/m <sup>3</sup> )	--	2,63	2,57	2,57	2,57
Massa Específica Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	--	2,53	2,47	2,47	2,47
Índice de Lamelalidade (DAER 108/01)	< 50 <sup>1</sup>	34	34	34	34
Passante #200	4 a 10 <sup>1</sup>	5,97	6,83	6,83	6,83
Relação #200/Betume (%)	0,8 a 1,6 <sup>2</sup>	1,26	1,03	1,03	1,03

Nota: <sup>1</sup>DAER ES 16/98; <sup>2</sup>SUPERPAVE™.

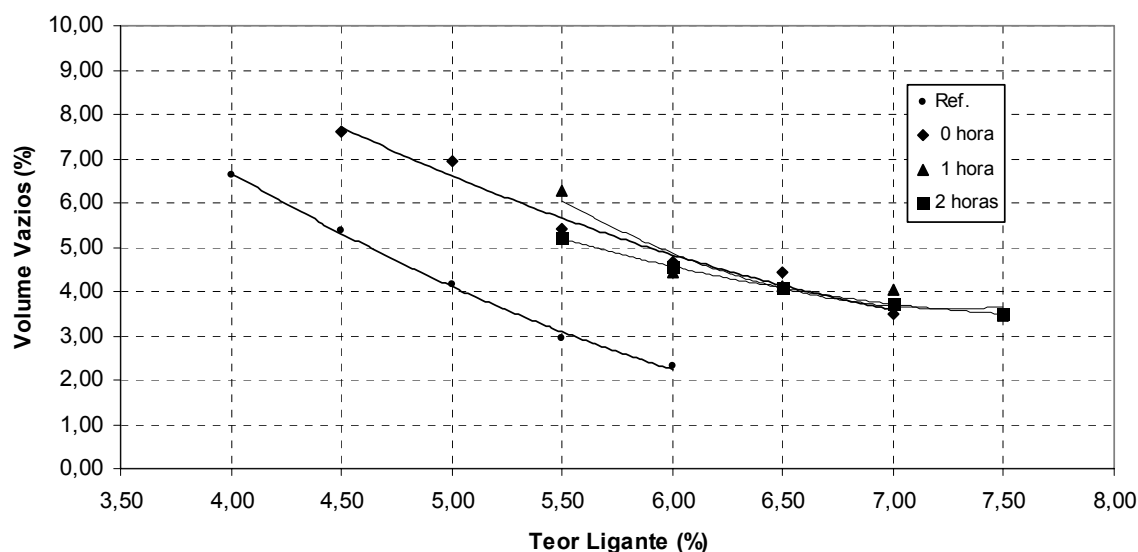


Figura 6.5 – Relação entre teor de ligante e volume de vazios para misturas com 1% de borracha com diferentes tempos de digestão

#### 6.1.4 Avaliação da granulometria da borracha em misturas borracha-agregado

O tamanho das partículas de borracha utilizado para composição de misturas borracha-agregado influencia o comportamento da mistura. Para estudar a influência desta variável foram preparadas misturas com 4 diferentes granulometrias de borracha de pneus: uma proveniente de moagem mecânica e posterior moagem criogênica (>#30) e outra apenas moída mecanicamente (Cis – Cisalhada mecanicamente). A terceira foi uma mistura de 20%

da >#30 e 80% da Cis e a quarta foi a borracha denominada Raspa, que é escória do processo de recapagem de pneumáticos.

A Tabela 6.5 apresenta as propriedades das misturas asfálticas densas preparadas com 1% de borracha, com 1 hora de digestão e 4 borrachas diferentes.

Tabela 6.5 – Propriedades das misturas densas preparadas com diferentes tipos de borracha

Variável	Especificação	Mistura Referência	Borracha Utilizada			
			>#30	80/20 <sup>1</sup>	Cis.	Raspa
Superfície Específica da borracha (m <sup>2</sup> /MN)		0,0	78,8	23,6	9,8	42,6
Teor de Ligante (%)	--	4,75	6,50	6,60	6,50	6,50
Volume de Vazios (%)	3 a 5 <sup>2</sup>	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82 <sup>2</sup>	75,00	83,00	79,00	78,00	79,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	>14 <sup>2</sup>	16,00	18,00	19,00	19,00	19,00
Massa Específica Máxima Teórica (kN/m <sup>3</sup> )	--	2,63	2,58	2,58	2,58	2,58
Massa Específica Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	--	2,53	2,48	2,47	2,47	2,48
Índice de Lamelaridade (DAER 108/01)	< 50 <sup>2</sup>	34	33	34	34	34
Passante #200	4 a 10 <sup>2</sup>	5,97	7,39	6,83	7,66	7,40
Relação #200/Betume (%)	0,8 a 1,6 <sup>3</sup>	1,26	1,14	1,03	1,18	1,14

Nota: <sup>1</sup> 80/20 significa a composição 80% da borracha cisalhada mecanicamente e 20% da borracha criogenia >#30; <sup>2</sup>DAER ES 16/98; <sup>3</sup> SUPERPAVE™.

Para quantificar a característica granulometria foi calculada para cada borracha sua superfície específica. A Figura 6.6 apresenta a relação entre a superfície específica da borracha e teor de ligante de projeto. Os valores de teor de ligante de projeto (VV=4%) não são influenciados de maneira marcante pelo tipo da borracha, mas sim, pela sua presença na mistura.

A Figura 6.7 traz a relação entre superfície específica da borracha adicionada *versus* VAM e RBV. Para os valores de VAM, a adição de 1% de borracha é mais importante que a diferença entre as borrachas utilizadas. A partir dos valores de RBV uma constatação importante pode ser feita; o valor de RBV de 83% e VAM 18% para a borracha >#30 indicam o maior inchamento desta borracha; há nesta mistura mais vazios preenchidos por betume (borracha/ligante).

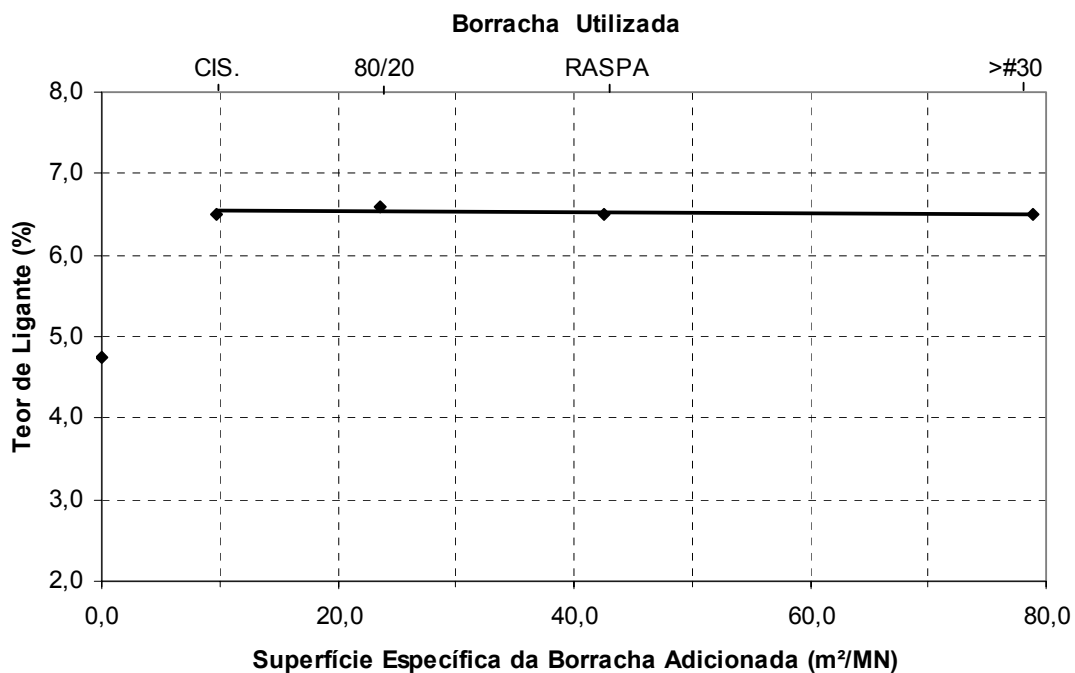


Figura 6.6 – Relação entre superfície específica da borracha adicionada e teor de ligante para misturas com 1% de borracha com diferentes granulometrias

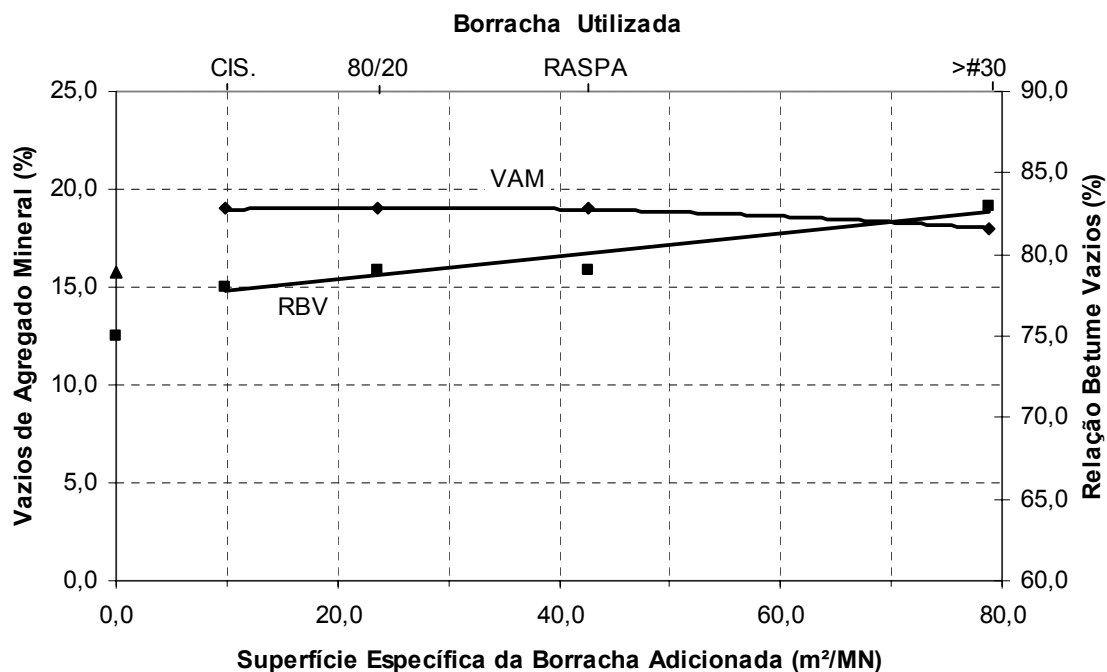


Figura 6.7 – Relação entre superfície específica da borracha adicionada e VAM/RBV para misturas com 1% de borracha com diferentes granulometrias

## 6.2 ESTABILIDADE E FLUÊNCIA

A cada vez mais a Metodologia Marshall vem sendo substituída ou complementada com outros ensaios, entretanto, devido a grande experiência acumulada e a não disponibilidade de equipamentos para a dosagem, segundo técnicas mais modernas, no Brasil, ainda é prática sua utilização.

A maior crítica ao ensaio Marshall é o estado de tensões não definido, bem como sua inaplicabilidade direta ao dimensionamento de pavimentos. Na Europa é comum ao invés da utilização de valores de estabilidade e fluência a utilização de sua relação. O valor de estabilidade mede, de maneira indireta, a resistência ao cisalhamento, o intertravamento, atrito e coesão entre as partículas; já a fluência mede, indiretamente, a elasticidade da mistura.

Ogurtsova *et al.* (1999) concluiu em seu trabalho que, embora não sendo grandezas oriundas de um ensaio científico, o binômio estabilidade-fluência pode traduzir condições de desempenho para camadas betuminosas. Desta maneira, valores altos de estabilidade (acima de 5 kN), associados com valores de fluência inferiores a 5 mm, correspondem a misturas com capacidade de suportar tráfego médio, sem apresentar deformações apreciáveis.

Em pesquisa apresentada por Kandhall e Koehler (1985), nos EUA, os valores de estabilidade e fluência de Marshall variam de estado para estado e, uma média para 38 estados resultou um valor mínimo de 5,2 kN para estabilidade e uma faixa de aceitação dos valores de fluência entre 2 até 4,0 - 4,6 mm.

### 6.2.1 Misturas asfálticas preparadas com ligante asfalto-borracha

A Tabela 6.6 e a Figura 6.8 apresentam os valores de estabilidade e fluência para as misturas preparadas com ligante asfáltico convencional e ligante modificado com borracha de pneus. Os valores foram determinados a partir das equações de regressão obtidas da tendência observada em quinze medidas.

Os valores de estabilidade apresentam uma leve redução com o aumento de teor de borracha enquanto que os valores de fluência aumentaram de maneira pouco significativa, entretanto todas as misturas estão em acordo com as especificações.

Tabela 6.6 – Valores de estabilidade e fluência da mistura com ligante convencional e com ligantes modificados com borracha

Variável	Especificação <sup>1</sup>	Ligante Utilizado			
		CAP 20	AB 14	AB 41	AB 68
Teor de Borracha no Ligante (%) <sup>2</sup>	--	0,00	6,00	12,00	18,00
Estabilidade (kN)	> 8,0	12,5	14,3	10,5	10,4
Fluência (mm)	2,0 a 4,6	2,28	2,54	2,79	2,54
Relação Est/Fluência (MN/m)	--	5,48	5,62	3,76	4,09

Nota: <sup>1</sup>DAER ES 16/98; <sup>2</sup> o teor de borracha é calculado em relação à massa da mistura AB; os ligantes foram preparados à 180°C durante 45 minutos com a borracha #30.

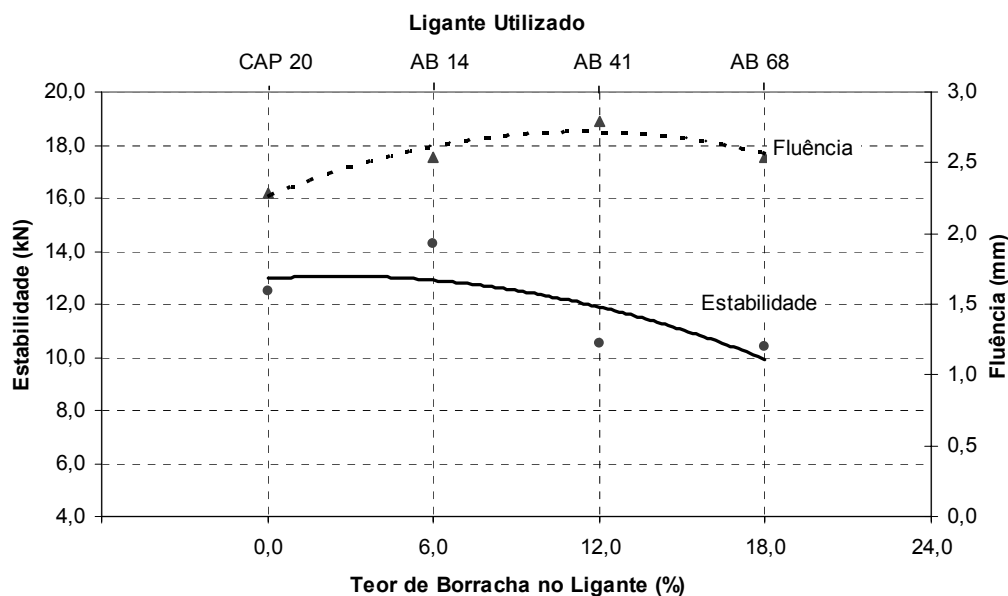


Figura 6.8 – Relação entre teor de borracha no ligante e estabilidade/fluência

## 6.2.2 Avaliação do teor de borracha em misturas borracha-agregado

As Tabelas 6.7 e 6.8 apresentam os valores de estabilidade e fluência das misturas densas e descontínuas com teores crescentes de borracha.

Tabela 6.7 – Valores de estabilidade e fluência das misturas densas com diferentes teores de borracha

Variável	Especificação <sup>1</sup>	Porcentagem de borracha adicionada <sup>2</sup>				
		0,0	0,2	0,6	1,0	3,0
Estabilidade (kN)	> 8,0	12,5	10,0	11,8	9,8	4,0
Fluência (mm)	2,0 a 4,6	2,3	3,5	3,5	4,6	5,8
Relação Est/Fluência (MN/m)	--	5,43	2,85	3,37	2,13	0,68

Nota: <sup>1</sup>DAER ES 16/98; <sup>2</sup> o teor de borracha é calculado em relação à massa de agregado.

Tabela 6.8 – Valores de estabilidade e fluência das misturas descontínuas com diferentes teores de borracha

Variável	Especificação <sup>1</sup>	Porcentagem de borracha adicionada <sup>2</sup>				
		0,0	0,2	0,6	1,0	3,0
Estabilidade (kN)	> 8,0	10,0	8,0	6,2	6,2	5,0
Fluência (mm)	2,0 a 4,6	2,8	4,6	5,6	6,8	8,3
Relação Est/Fluência (MN/m)	--	3,57	1,73	1,11	0,91	0,60

Nota: <sup>1</sup>DAER ES 16/98; <sup>2</sup>o teor de borracha é calculado em relação à massa de agregado.

A Figura 6.9 apresenta a relação teor de borracha *versus* estabilidade e fluência para as misturas densas e descontínuas. Nota-se que, com o aumento do teor de borracha, há uma redução expressiva de estabilidade e um aumento de fluência, para ambas as misturas.

As misturas densas apresentaram melhores resultados (com base na especificação) em relação às misturas descontínuas. Tendo em mente os valores mínimos de estabilidade e o intervalo de valores aceitos para fluência é possível afirmar que para as misturas densas seria aceitável, uma adição de até 1% em massa para as misturas densas, enquanto que para as misturas descontínuas, o valor aceitável seria de 0,2%.

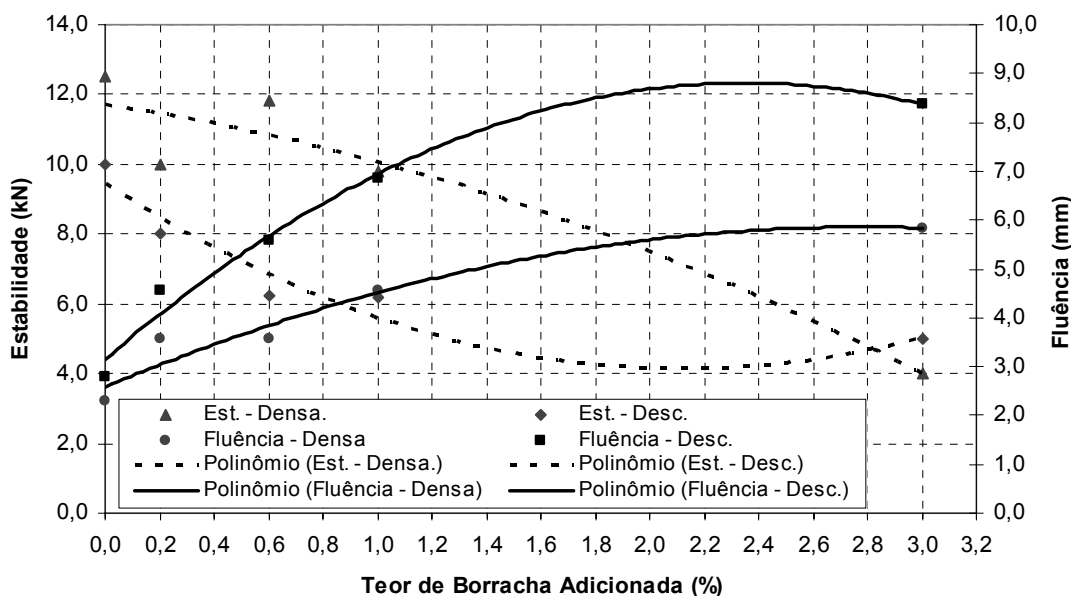


Figura 6.9 – Relação entre teor de borracha adicionada e estabilidade/fluência para as misturas densas e descontínuas

### 6.2.3 Avaliação do tempo de digestão em misturas borracha-agregado

O tempo de digestão de 1 e 2 horas não alteram os valores de estabilidade e fluência Marshall, em relação à mistura sem tempo de digestão, conforme pode ser observado na Tabela 6.9 e na Figura 6.10. Estas misturas foram preparadas com 1% da composição 80/20 de borracha.

Tabela 6.9 – Valores de estabilidade e fluência de misturas densas com diferentes tempos de digestão

Variável	Especificação <sup>1</sup>	Mistura Referência	Tempo de digestão (horas)		
			0	1	2
Estabilidade (kN)	> 8,0	12,5	9,8	8,7	9,2
Fluência (mm)	2,0 a 4,6	2,3	4,6	4,6	4,3
Relação Est/Fluência (MN/m)	--	5,43	2,13	1,89	2,14

Nota: <sup>1</sup>DAER ES 16/98.

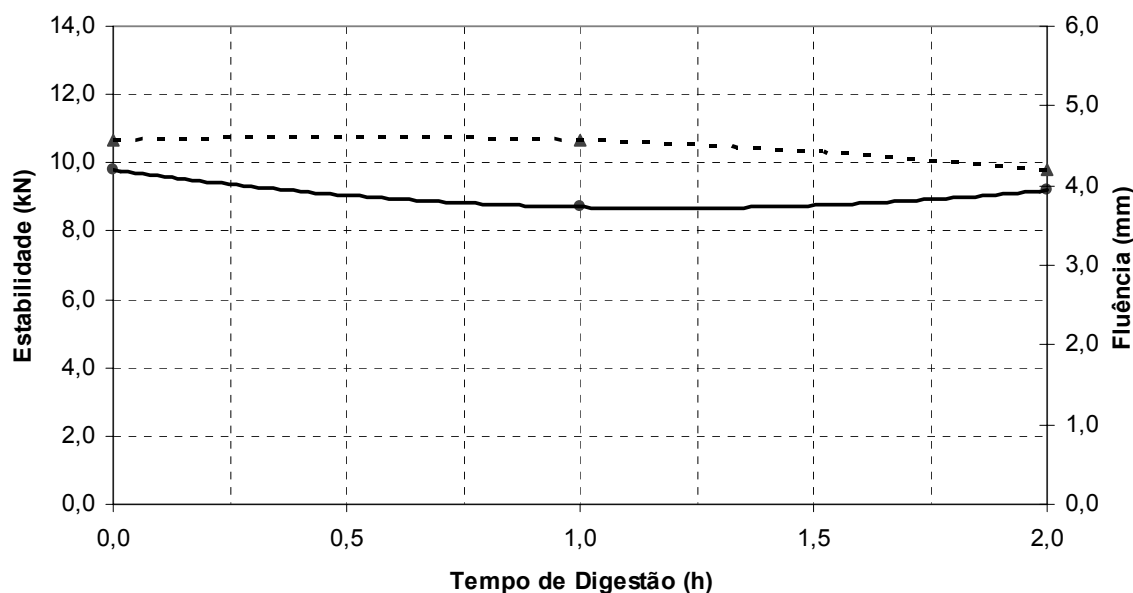


Figura 6.10 – Relação entre tempo de digestão e estabilidade/fluência

### 6.2.4 Avaliação da granulometria da borracha em misturas borracha-agregado

A Tabela 6.10 e a Figura 6.11 apresentam os valores de estabilidade e fluência para misturas preparadas com 1% de borracha e 1 hora de tempo de digestão. A pequena variação nas medidas de estabilidade e fluência não permite estabelecer uma relação confiável entre a granulometria da borracha e estas variáveis de resposta.



Tabela 6.10 – Valores de estabilidade e fluência de misturas densas com diferentes tipos de borracha

Variável	Especificação <sup>1</sup>	Mistura Referência	Borracha Utilizada			
			>#30	80/20 <sup>2</sup>	Cis.	Raspa
Estabilidade (kN)	> 8,0	12,5	10,0	8,7	9,5	10,0
Fluência (mm)	2,0 a 4,6	2,3	5,1	4,6	4,8	4,6
Relação Est/Fluência (MN/m)	--	5,43	1,96	1,89	1,98	2,17

Nota: <sup>1</sup>DAER ES 16/98; <sup>2</sup> 80/20 significa a composição 80% da borracha cisalhada mecanicamente e 20% da borracha criogenia >#30.

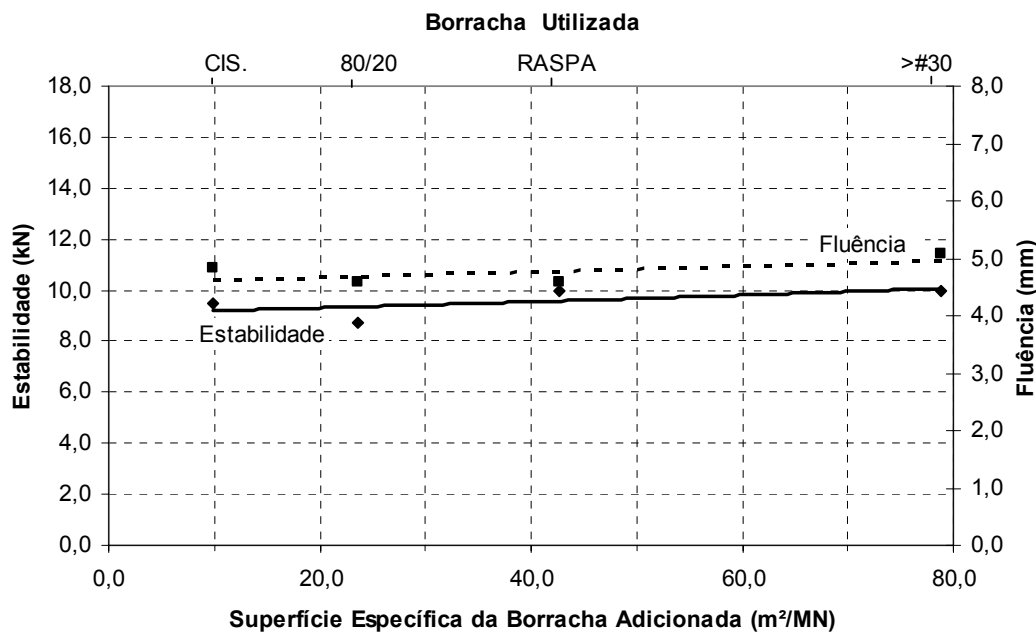


Figura 6.11 – Relação entre superfície específica da borracha adicionada e estabilidade/fluência

### 6.3 DEFORMABILIDADE ELÁSTICA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O entendimento do pavimento segundo a teoria das camadas elásticas e da mecânica dos pavimentos nos remete a necessidade de conhecermos as propriedades de deformabilidade e de resistência dos materiais. A deformabilidade que uma camada de revestimento apresenta, conjugada a sua espessura, irá determinar a distribuição de tensões nas camadas subjacentes.

Os principais defeitos que um pavimento apresenta, dentre eles trincamento por fadiga, trincamento térmico e afundamento plástico excessivo em trilhas de roda, estão relacionados ao módulo elástico (ou deformabilidade elástica) do concreto asfáltico (Guoqiang *et al.* 1999).

Existem inúmeras maneiras de se determinar a deformabilidade elástica do concreto asfáltico, desde correlações com as propriedades do ligante e da mistura, através de ensaios de laboratório ou através de retroanálise e medições indiretas *in situ*. Em se tratando de ensaio de laboratório, sem dúvida no Brasil, a metodologia mais empregada é o ensaio de tração por compressão diametral dinâmico. Esse ensaio tem sido estudado e utilizado em diversas partes do mundo, principalmente pela sua simplicidade, baixo custo e adequada representação do estado de tensões que acontece em campo (Read e Collop, 1997; Brow e Foo, 1989; Tangela *et al.* 1990).

Nesta pesquisa foi utilizado tal ensaio para determinação do módulo de resiliência e o ensaio de tração por compressão diametral estático (com carregamento monotônico) para a determinação da resistência à tração das amostras.

### 6.3.1 Misturas asfálticas preparadas com ligante asfalto-borracha

A tabela 6.11 apresenta os valores de módulo de resiliência e resistência à tração à 25°C das amostras preparadas com ligantes modificados com diferentes teores de borracha, em comparação com as propriedades da mistura preparada com ligante convencional CAP 20.

Tabela 6.11 – Valores de módulo de resiliência e resistência à tração da mistura com ligante convencional e com ligantes modificados com borracha (T = 25°C)

<i>Variável</i>	<i>Ligante Utilizado</i>			
	<i>CAP 20</i>	<i>AB 14</i>	<i>AB 41</i>	<i>AB 68</i>
<i>Teor de Borracha no Ligante (%)<sup>1</sup></i>	0,0	6,0	12,0	18,0
<i>Módulo de Resiliência (MPa)</i>	6510	5220 (80 <sup>2</sup> )	4480 (69 <sup>2</sup> )	4810 (74 <sup>2</sup> )
<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	1,27	1,44 (113 <sup>2</sup> )	1,42 (112 <sup>2</sup> )	1,39(109 <sup>2</sup> )
<i>Relação Mr/Rt</i>	5126	3625	3155	3460
<i>Relação Rt/Mr x10<sup>-3</sup></i>	0,20	0,28	0,32	0,29

Nota: <sup>1</sup> o teor de borracha é calculado em relação à massa da mistura AB; os ligantes foram preparados à 180°C durante 45 minutos com a borracha #30; <sup>2</sup> percentual dos valores de Mr e Rt mantidos, em relação à mistura de referência.

Os valores de módulo de resiliência apresentaram redução significativa com a inclusão de borracha no ligante. Esta redução é mais pronunciada para os teores maiores de borracha; nota-se também que para o ligante AB 41 a redução de módulo foi maior que para o ligante

AB 68. Isto está relacionado ao espaço intergranular decorrente da presença do ligante e a maior rigidez do ligante.

A análise dos valores de módulo de resiliência é bastante complexa, visto que, dependendo da estrutura de pavimento que este material estará inserido, valores maiores ou menores serão tolerados. É necessária sim, uma compatibilização de rigidez entre as camadas que constituem o sistema.

Pode-se afirmar que concretos asfálticos com altos valores de módulo de resiliência, como apresentado pelo CBUQ preparado com ligante convencional, são menos compatíveis com bases granulares do que os concretos asfálticos preparados com ligante asfalto-borracha.

A Figura 6.12 apresenta a variação do módulo de resiliência em relação ao volume de vazios. Nota-se que para toda faixa de índices de vazios estudado os valores de  $M_r$  são menores e com menor taxa de variação quando comparado a mistura convencional.

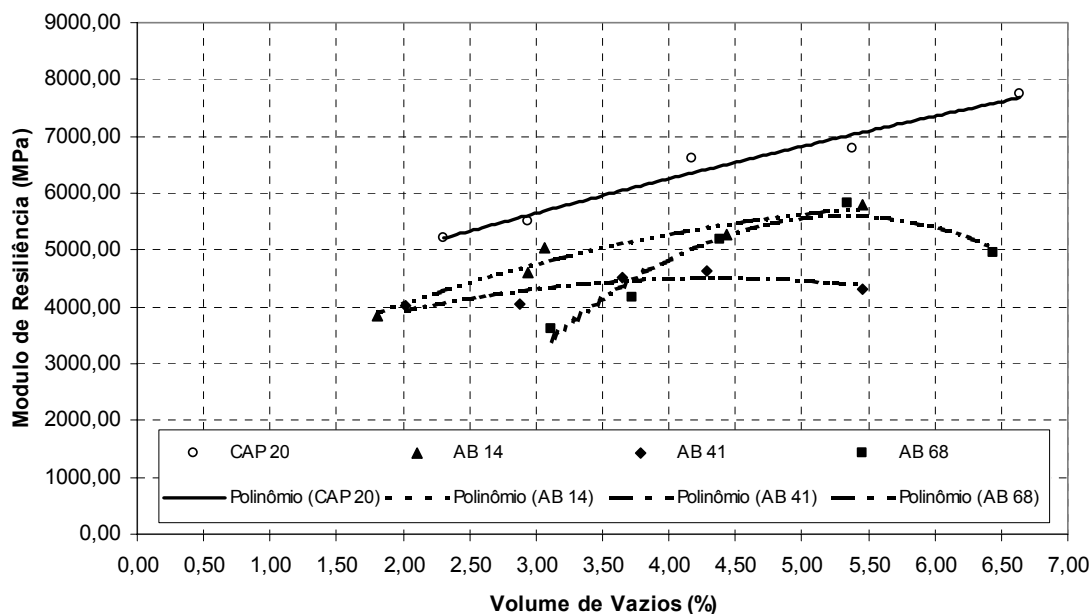


Figura 6.12 – Relação entre volume de vazios e módulo de resiliência ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ) de misturas preparadas com ligante convencional e ligantes modificados com borracha

Com relação aos valores de resistência à tração, é verdadeiro afirmar que, quanto maior melhor (considerando a mesma rigidez); as misturas com borracha apresentaram acréscimo de resistência, em média de 12% (considerando  $VV=4\%$ ), o que conjugado a redução de, aproximadamente 25% nos valores de módulo de resiliência, nos remete a misturas com

maior capacidade de distribuição de tensões e maior resistência, quando comparada a mistura com ligante convencional.

A relação  $M_r/R_t$  ou  $R_t/M_r$  nos dá uma idéia da compatibilidade entre rigidez e resistência da mistura; misturas muito rígidas necessitam de uma alta resistência à tração devido a concentração de esforços em seu interior. Os valores calculados destas relações estão apresentados na Tabela 6.11 e demonstram que as misturas preparadas com ligante AB são materiais com maior tenacidade e/ou capacidade de absorção de energia de deformação.

A Figura 6.13 apresenta a relação entre volume de vazios e resistência à tração; nota-se que para a grande maioria dos valores de índice de vazios o valor de  $R_t$  das misturas com AB é superior ao da mistura de referência, denotando o maior poder cimentante do ligante modificado.

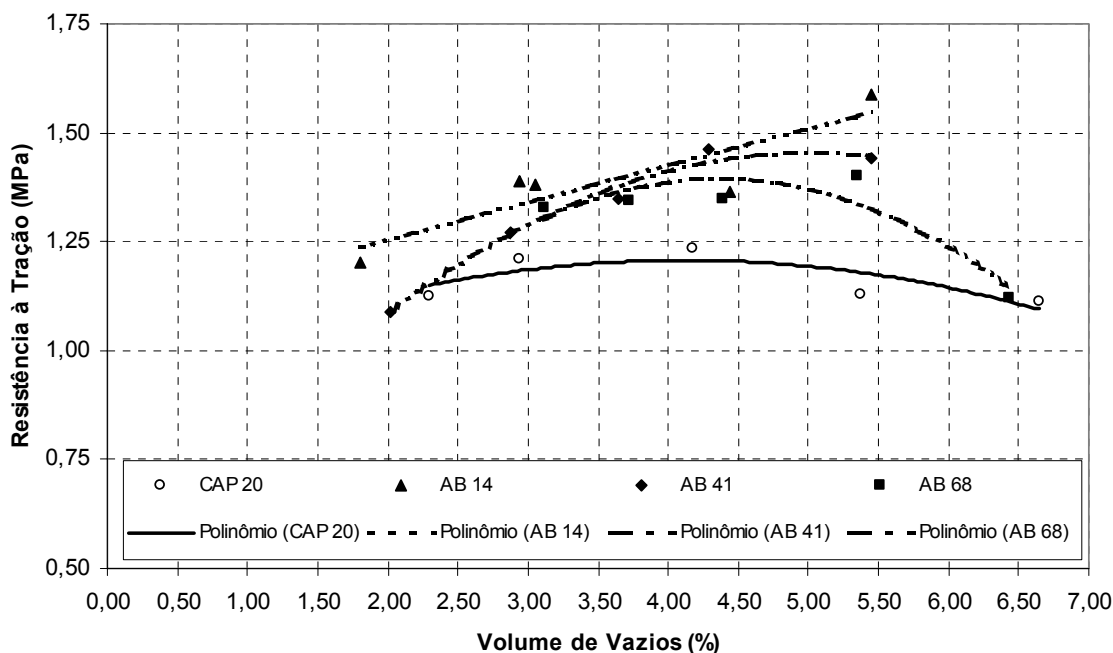


Figura 6.13 – Relação entre volume de vazios e resistência à tração ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ) de misturas preparadas com ligante convencional e ligantes modificados com borracha

### 6.3.2 Avaliação do teor de borracha em misturas borracha-agregado

As Tabelas 6.12 e 6.13 apresentam os valores de módulo de resiliência e resistência à tração medidas à  $25^{\circ}\text{C}$  para as misturas densas e descontínuas, com crescentes teores de borracha.

Ao lado de cada valor aparece o percentual mantido de Mr e Rt em relação à mistura de referência. Nota-se que existe uma redução nos valores de Rt quando borracha é adicionada, o que em princípio não é positivo, entretanto uma redução mais pronunciada nos valores de rigidez pode indicar um material com maior capacidade de deformar-se sem romper.

Tabela 6.12 – Valores de módulo de resiliência e resistência à tração das misturas densas com diferentes teores de borracha (T = 25°C)

<i>Variável</i>	<i>Porcentagem de borracha adicionada<sup>1</sup></i>				
	<i>0,0</i>	<i>0,2</i>	<i>0,6</i>	<i>1,0</i>	<i>3,0</i>
<i>Módulo de Resiliência (MPa)</i>	6510	4750 (73 <sup>2</sup> )	4250 (65 <sup>2</sup> )	3120 (48 <sup>2</sup> )	1900 (29 <sup>2</sup> )
<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	1,27	1,20 (94 <sup>2</sup> )	1,10 (87 <sup>2</sup> )	0,75 (59 <sup>2</sup> )	0,55 (43 <sup>2</sup> )
<i>Relação Mr/Rt</i>	5126	3958	3950	4000	1636
<i>Relação Rt/Mr x10<sup>-3</sup></i>	0,20	0,25	0,26	0,24	0,29

Nota: <sup>1</sup> o teor de borracha é calculado em relação à massa de agregado; <sup>2</sup> percentual dos valores de Mr e Rt mantidos, em relação à mistura de referência.

Tabela 6.13 – Valores de módulo de resiliência e resistência à tração das misturas descontínuas com diferentes teores de borracha (T = 25°C)

<i>Variável</i>	<i>Porcentagem de borracha adicionada<sup>1</sup></i>				
	<i>0,0</i>	<i>0,2</i>	<i>0,6</i>	<i>1,0</i>	<i>3,0</i>
<i>Módulo de Resiliência (MPa)</i>	4650	2500 (54 <sup>2</sup> )	2200 (47 <sup>2</sup> )	2100 (45 <sup>2</sup> )	1000 (22 <sup>2</sup> )
<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	0,90	0,78 (87 <sup>2</sup> )	0,65 (72 <sup>2</sup> )	0,62 (69 <sup>2</sup> )	0,40 (44 <sup>2</sup> )
<i>Relação Mr/Rt</i>	5100	3200	3380	3387	3050
<i>Relação Rt/Mr x10<sup>-3</sup></i>	0,20	0,31	0,30	0,30	0,33

Nota: <sup>1</sup> o teor de borracha é calculado em relação à massa de agregado. <sup>2</sup> percentual dos valores de Mr e Rt mantidos, em relação à mistura de referência.

A Figura 6.14 apresenta o percentual de borracha adicionado *versus* Mr e Rt. Nota-se a maior sensibilidade da variável Mr à adição de borracha e menores valores de Mr e Rt para as misturas descontínuas. Para a variável Mr é marcante a grande diferença de valores entre 0 e 0,2% de adição.

Com relação ao par de valores Mr e Rt pode-se afirmar que a adição de 3% de borracha acarretaria uma queda muito significativa nestes valores, indicando misturas com maior possibilidade de ocorrência de afundamento plástico excessivo em trilhas de roda. Isto é observado principalmente para a mistura de granulometria descontínua.

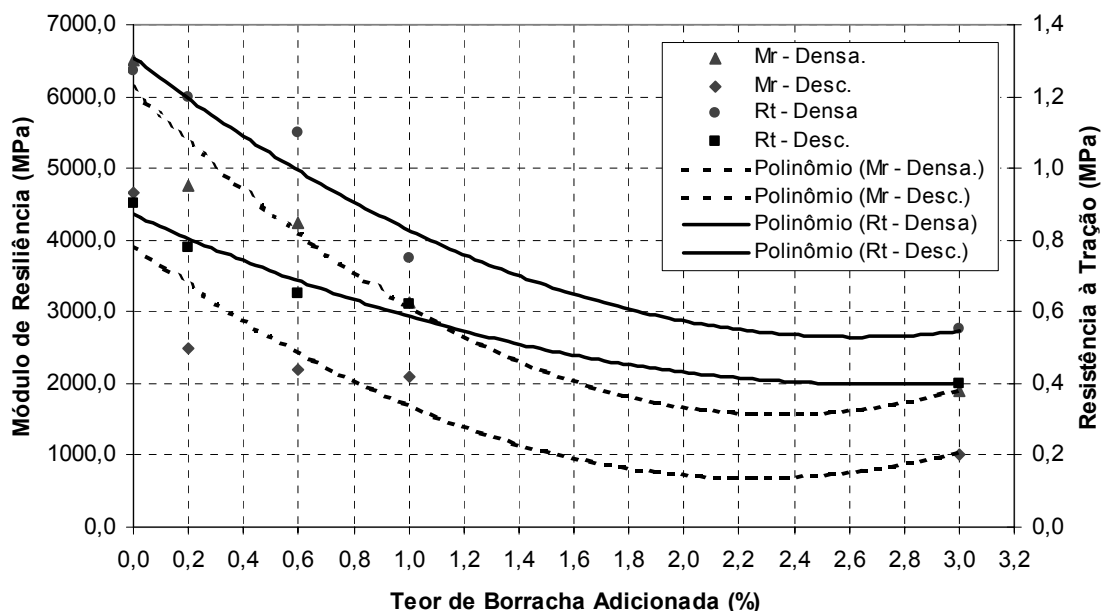


Figura 6.14 – Relação entre teor de borracha adicionada e Mr e Rt ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ )

### 6.3.3 Avaliação do tempo de digestão em misturas borracha-agregado

O tempo de digestão foi apontado em diversas pesquisas como fator importante no desempenho das misturas borracha-agregado (Visser e Verhaeghe, 2000; Gallego *et al.* 2000; Bertollo, 2002). Conforme foi apresentado nos itens 6.1.3 e 6.2.3 o tempo de digestão não influencia as propriedades volumétricas das misturas nem altera os valores medidos de estabilidade e fluência.

Em contraponto, a rigidez e a resistência são bastantes sensíveis ao tempo de digestão e apresentam tendências claras de comportamento. A Tabela 6.14 apresenta os valores de módulo de resiliência e resistência à tração medidos à  $25^{\circ}\text{C}$  para as misturas com 1% de borracha (composição 80/20) e diferentes tempos de digestão.

Tabela 6.14 – Valores de módulo de resiliência e resistência à tração das misturas densas com diferentes tempos de digestão ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ )

Variável	Mistura Referência	Tempo de digestão (horas)		
		0	1	2
Módulo de Resiliência (MPa)	6510	3120 (48 <sup>1</sup> )	4420 (68 <sup>1</sup> )	4660 (72 <sup>1</sup> )
Resistência à Tração (MPa)	1,27	0,75 (59 <sup>1</sup> )	1,00 (79 <sup>1</sup> )	1,12 (88 <sup>1</sup> )
Relação Mr/Rt	5126	4160	4420	4161
Relação Rt/Mr $\times 10^{-3}$	0,20	0,24	0,23	0,24

Nota: <sup>1</sup> percentual dos valores de Mr e Rt mantidos, em relação à mistura de referência.

Nota-se claramente o aumento da rigidez e da resistência com o tempo de digestão. Existe uma razoável proporcionalidade entre a taxa de aumento de ambas as variáveis, conforme demonstrado pelas relações  $Mr/Rt$  ou  $Rt/Mr$ ; para qualquer tempo de digestão estas relações indicam materiais com maior capacidade de resistir a esforços sem se romper.

Quando a massa asfáltica é mantida aquecida por algum tempo acontece o amolecimento da borracha, tanto pelo efeito térmico quanto pela presença do asfalto; este amolecimento permite um maior contato intergranular o que eleva os valores de  $Mr$  e  $Rt$ .

Com o intuito de verificar a perda de voláteis e o envelhecimento em curto prazo foram ensaiadas também misturas sem borracha com diferentes tempos de digestão. A Figura 6.15 apresenta a variação de  $Mr$  e  $Rt$  ( $T = 25^\circ\text{C}$ ) das misturas com e sem borracha nos diversos tempos de cura testados. Neste caso os indícios de envelhecimento seriam o enrijecimento da mistura e queda de resistência, o que não aconteceu.

Desta maneira é possível afirmar que o acréscimo de rigidez das misturas borracha-agregado é causado não apenas pelo envelhecimento do ligante, mas sim pela interação borracha/ligante/agregado. Ressalta-se que as misturas foram mantidas em aquecimento dentro de cuba térmica fechada e não expostas diretamente ao ar aquecido.

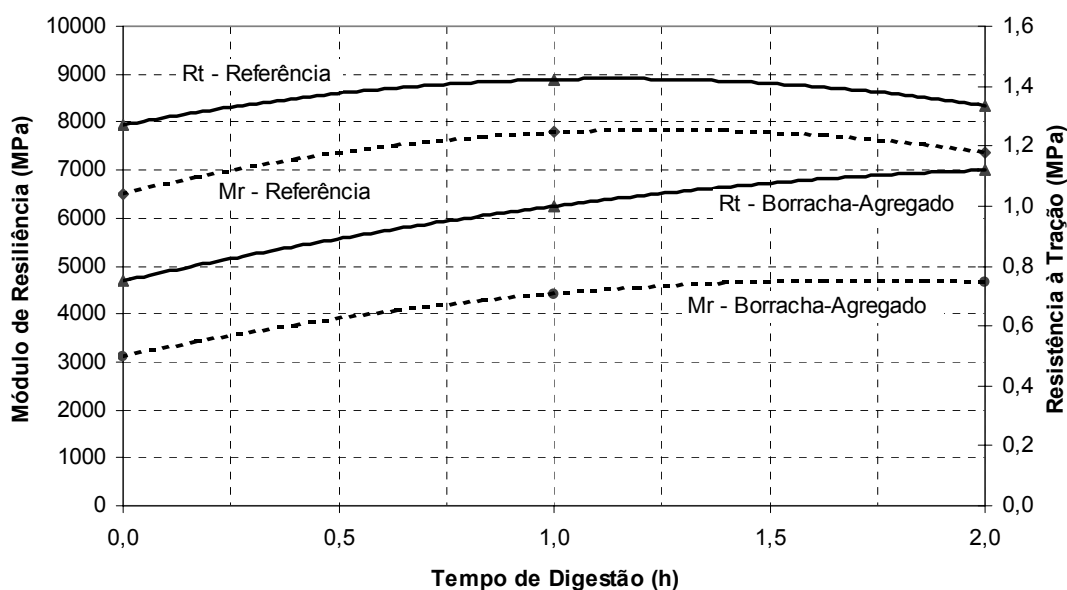


Figura 6.15 – Relação entre tempo de digestão *versus*  $Mr$  e  $Rt$  ( $T = 25^\circ\text{C}$ )

### 6.3.4 Avaliação da granulometria da borracha em misturas borracha-agregado

A influência do tamanho das partículas de borracha, nas variáveis de resposta módulo de resiliência e resistência à tração, está apresentada na Tabela 6.15. Notam-se quedas mais expressivas nos valores de Mr e Rt, quando partículas maiores são adicionadas. Novamente é possível observar que, em média, a redução de rigidez é mais acentuada que a redução de resistência.

A consideração de se utilizar partículas com tamanhos maiores ou menores está relacionado também a questões financeiras; borrachas finas (> 1mm, por exemplo) não são obtidas pelo processo de cisalhamento mecânico em temperatura ambiente e seu custo aumenta em função do processo de desmonte.

Tabela 6.15 – Valores de módulo de resiliência e resistência à tração de misturas densas com diferentes tipos de borracha (T = 25°C)

<i>Variável</i>	<i>Mistura Referência</i>	<i>Borracha Utilizada</i>			
		<i>&gt;#30</i>	<i>80/20<sup>2</sup></i>	<i>Cis.</i>	<i>Raspa</i>
<i>Módulo de Resiliência (MPa)</i>	6510	5935 (91 <sup>1</sup> )	4420 (68 <sup>1</sup> )	2740 (42 <sup>1</sup> )	4810 (74 <sup>1</sup> )
<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	1,27	1,10 (87 <sup>1</sup> )	1,00 (79 <sup>1</sup> )	0,80 (63 <sup>1</sup> )	0,87 (69 <sup>1</sup> )
<i>Relação Mr/Rt</i>	5126	5395	4420	3425	5529
<i>Relação Rt/Mr x10<sup>-3</sup></i>	0,20	0,19	0,23	0,29	0,18

Nota: <sup>1</sup> 80/20 significa a composição 80% da borracha cisalhada mecanicamente e 20% da borracha criogenia >#30.

### 6.3.5 Avaliação de Mr e Rt em diferentes temperaturas

A temperatura é um dos mais importantes fatores que afeta o projeto e o desempenho de um pavimento. A distribuição de tensões, em diferentes estações climáticas ou horários do dia, depende da sensibilidade das camadas asfálticas a variações de temperaturas.

A variação de temperatura afeta tanto as condições estruturais como funcionais. Baixas temperaturas podem acelerar os processos de trincamento (Epps, 1997) e altas temperaturas, por outro lado, aceleram os processos de distorção causando deformações plásticas (ATR e escorregamento de massa) e exudações.

Wahhab *et al.* (2001) complementam que os gradientes térmicos no interior do pavimento devem ser considerados em retroanálises. Os autores propuseram modelos estatísticos para



correções dos valores de módulo de resiliência, em função da temperatura do ar e da espessura da camada.

As relações entre deformabilidade elástica e resistência à tração e temperatura foram avaliada através da realização de ensaios de Mr e Rt em diferentes temperaturas para algumas das misturas estudadas (conforme Tabela 6.16 e Figuras 6.16 e 6.17). As temperaturas de 10°C e 45°C foram selecionadas para complementar os ensaios à 25°C. Ressalta-se que o coeficiente de Poisson, utilizado para o cálculo de Mr, seguiu sugestão da BSI, 1993.

Tabela 6.16 – Valores de módulo de resiliência e resistência à tração à diferentes temperaturas

<i>Mistura</i>	<i>Módulo de Resiliência (MPa)</i>			<i>Resistência à Tração (MPa)</i>		
	<i>T = 10°C</i>	<i>T = 25°C</i>	<i>T = 45°C</i>	<i>T = 10°C</i>	<i>T = 25°C</i>	<i>T = 45°C</i>
<i>Referência</i>	24370	6510	2427	2,70	1,27	0,36
<i>AB 14</i>	23736	5220	2782	3,12	1,44	0,35
<i>AB 41</i>	22585	4480	3448	3,13	1,42	0,34
<i>AB 68</i>	19916	4810	3839	2,85	1,39	0,42
<i>80/20<sup>1</sup> sem cura</i>	13572	3120	1023	2,40	0,75	0,14
<i>80/20<sup>1</sup> com 1 hora de digestão</i>	15067	4420	1657	2,55	1,00	0,31
<i>80/20<sup>1</sup> com 2 horas de digestão</i>	17600	4660	1641	2,42	1,12	0,30
<i>Raspa com 1 hora de digestão</i>	16423	4810	2457	2,38	0,87	0,35

Nota: <sup>1</sup> 80/20 significa a composição 80% da borracha cisalhada mecanicamente e 20% da borracha criogenia >#30.

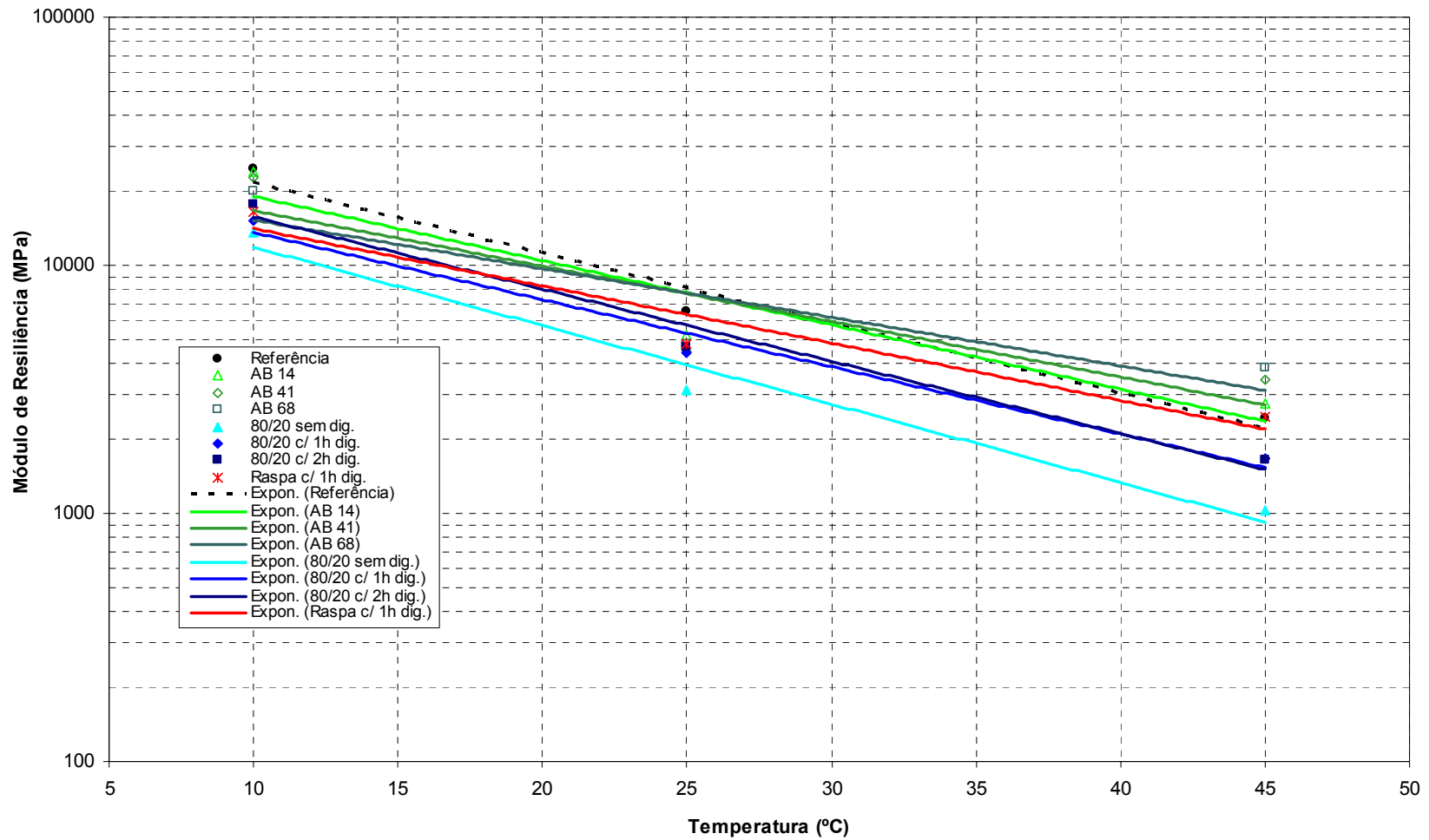


Figura 6.16 – Relação entre temperatura e módulo de resiliência

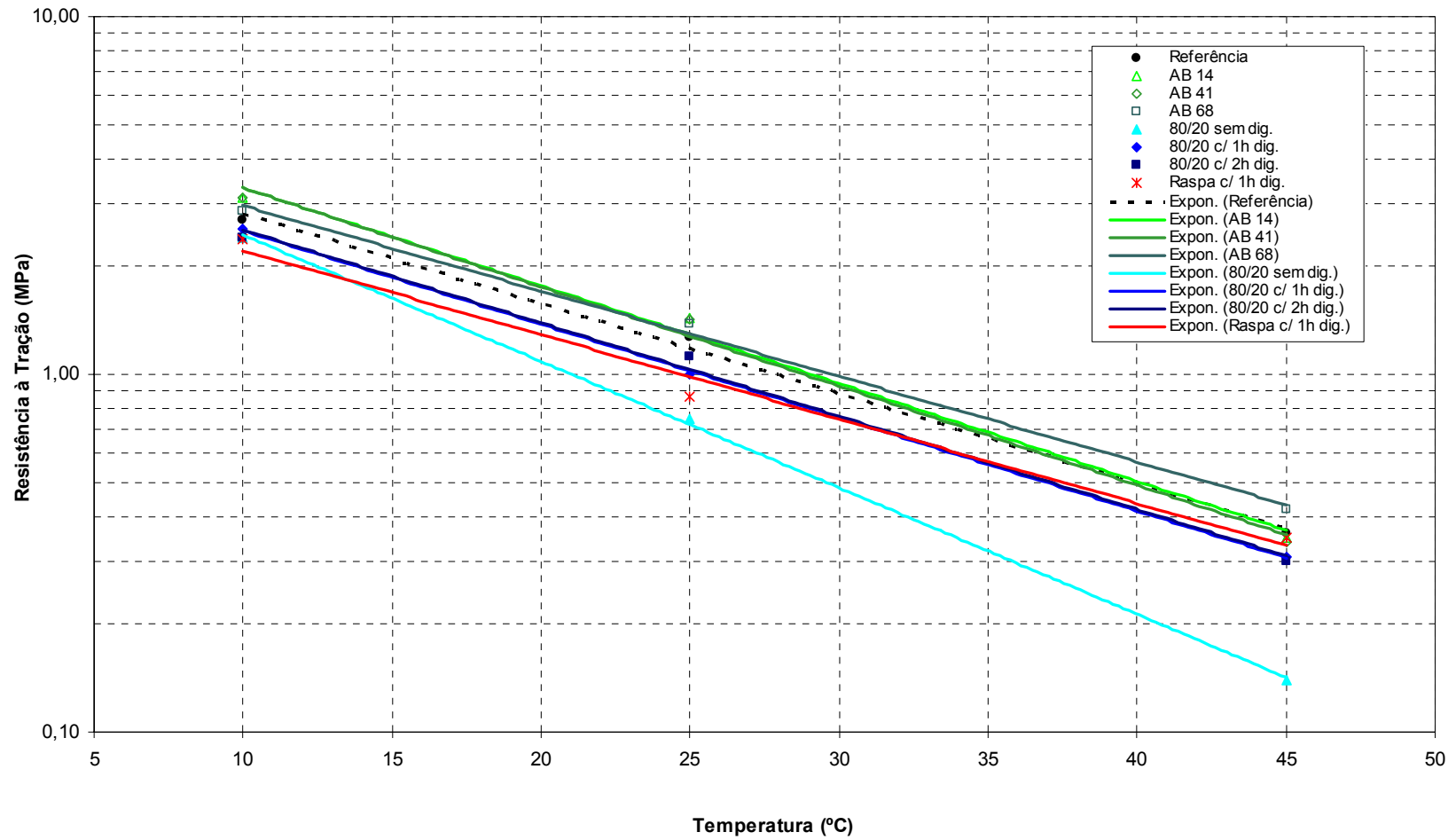


Figura 6.17 – Relação entre temperatura e resistência à tração

Para o ajuste dos dados foram gerados modelos do tipo exponencial, que correlacionam módulo de resiliência e resistência à tração com temperatura, conforme apresentado em 6.1 e 6.2, respectivamente. As constantes  $a$  e  $b$  dos modelos estão apresentadas na Tabela 6.17.

$$Mr = a \cdot b \cdot T \quad (6.1)$$

$$Rt = a \cdot b \cdot T \quad (6.2)$$

onde T = temperatura, em °C e  $a$  e  $b$  são constantes do modelo.

Tabela 6.17 – Constantes dos modelos de módulo de resiliência e resistência à tração em função da temperatura

Mistura	Módulo de Resiliência (MPa)			Resistência à Tração (MPa)		
	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
<b>Referência</b>	41186	0,065	0,97	5,02	0,057	0,99
<b>AB 14</b>	34397	0,060	0,90	6,23	0,063	0,99
<b>AB 41</b>	27798	0,052	0,79	6,29	0,064	0,99
<b>AB 68</b>	25853	0,045	0,79	5,13	0,055	0,99
<b>80/20<sup>1</sup> sem cura</b>	24528	0,073	0,97	5,53	0,081	0,99
<b>80/20<sup>1</sup> com 1 hora de digestão</b>	25271	0,062	0,97	4,59	0,060	0,99
<b>80/20<sup>1</sup> com 2 horas de digestão</b>	30546	0,067	0,97	4,62	0,060	0,99
<b>Raspa com 1 hora de digestão</b>	23894	0,058	0,94	3,82	0,054	0,98

Nota: <sup>1</sup> 80/20 significa a composição 80% da borracha cisalhada mecanicamente e 20% da borracha criogenia >#30.

A partir dos dados coletados e dos modelos calculados, algumas considerações podem ser traçadas: os modelos indicam que para baixas temperaturas, quaisquer misturas, (proveniente do processo seco ou úmido) apresentam valores menores de módulo de rigidez, em relação a mistura de referência, o que é positivo; as misturas preparadas com AB apresentaram a menor suscetibilidade térmica, notadamente a AB 68, produzida a partir da adição de 18% de borracha no ligante. Dentre as misturas produzidas, através do processo seco de incorporação, aquelas produzidas com uma hora de digestão (Raspa e 80/20) apresentaram os melhores resultados; a mistura 80/20 sem digestão apresentou a menor rigidez em todas as temperaturas e, mais marcantemente, à 45°C.

As misturas via seca apresentam uma importante redução de rigidez em baixas temperaturas, o que pode ser benéfico do ponto de vista de resistência à fratura (trincamento térmico e á

fadiga). Em contrapartida, as misturas úmidas são mais estáveis em altas temperaturas, beneficiando os aspectos relacionados à deformações plásticas.

Com relação à resistência à tração, dois comportamentos foram observados: para as misturas com AB houve um incremento nos valores de  $R_t$ , para qualquer temperatura de medida; as misturas borracha-agregado apresentaram uma queda de resistência, principalmente a mistura 80/20 sem cura.

## 6.4 RESISTÊNCIA À FADIGA

O trincamento por fadiga é uma das mais comuns manifestações de mau desempenho ou ruptura de um pavimento, manifesta-se através do aparecimento de trincas longitudinais nas trilhas de roda e propaga-se pela superfície do pavimento na forma de trincas interligadas tipo couro de jacaré. As trincas podem ter seu início, através de forças cisalhantes, na superfície do pavimento ou de tensões de tração, na fibra inferior da camada asfáltica.

As características à fadiga são comumente expressas em relação a tensão ou deformação inicial atuante e o número de repetições de carga até a ruptura. Tais correlações são determinados em ensaios de carregamento repetido, nas mais diversas configurações (Tayebali *et. al* 1993). Tangela *et al.* 1990, Pinto 1991 e Momm, 1998 apresentam os diversos tipos de equipamentos e ensaios de caracterização das propriedades à fadiga enquanto que Read e Collop (1997) se detém na utilização do ensaio de tração por compressão diametral na caracterização à fadiga de misturas asfálticas.

É extremamente importante a caracterização de uma mistura sob condições peculiares de tráfego, estrutura, condições ambientais e propriedades de envelhecimento a que cada material estará sujeito. Muitas destas variáveis são expressas por meio de fatores semi-empíricos.

Nesta pesquisa foram caracterizadas diversas misturas com o objetivo de comparar seu comportamento. Os ensaios foram realizados à tensão controlada, à 25°C, e em amostras não submetidas a envelhecimento; o critério de ruptura neste tipo de ensaio é o trincamento completo do material.

As Figuras 6.18, 6.19 e 6.20 apresentam as curvas de fadiga das misturas estudadas em função da solicitação: tensão de tração, diferença de tensões e deformação específica inicial. A curva

que representa a vida de fadiga de uma material em função das solicitações aplicadas (curva de Wöhler) é comumente representada pelo modelo:

$$N_f = a.S^b \quad (6.3)$$

onde  $N_f$  = vida de fadiga,  $S$  = solicitação e  $a$  e  $b$  são constantes do modelo. O mesmo modelo pode, também ser escrito da seguinte forma:

$$N_f = a.\left(\frac{1}{S}\right)^b \quad (6.4)$$

Tayebali *et. al* (1994) apresentam maiores detalhes sobre a modelagem matemática do fenômeno da fadiga em laboratório, bem como, modelos desenvolvidos pelo Instituto de Transportes da Universidade da Califórnia.

Na Tabela 6.18 estão apresentadas as constantes dos modelos gerados; foram gerados modelos em função das solicitações: tensão de tração, da diferença de tensões (tração e compressão) e da deformação específica inicial de tração.

Tabela 6.18 – Constantes dos modelos de fadiga (curva de Wöhler)

Mistura	Tensão de Tração (MPa)			Dif. de Tensões (MPa)			Defor. Tração (cm/cm)		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
<b>Referência</b>	28,22	-2,93	0,98	1640	-2,93	0,98	$5,55.10^{-6}$	-2,03	0,97
<b>AB 14</b>	52,91	-3,04	0,99	3565	-3,04	0,99	$4,15.10^{-5}$	-1,82	0,97
<b>AB 41</b>	87,78	-2,82	0,99	4378	-2,82	0,99	$7,32.10^{-6}$	-2,00	0,94
<b>AB 68</b>	94,00	-2,81	0,94	4610	-2,81	0,94	$2,79.10^{-6}$	-2,10	0,99
<b>80/20<sup>1</sup> sem cura</b>	21,16	-3,17	0,87	2381	-3,17	0,87	$6,91.10^{-8}$	-2,58	0,95
<b>80/20<sup>1</sup> c/ 1 hora de digestão</b>	33,60	-3,38	0,96	3632	-3,38	0,96	$3,02.10^{-7}$	-2,46	0,90
<b>80/20<sup>1</sup> c/ 2 horas de digestão</b>	48,93	-3,44	0,95	5785	-3,44	0,95	$7,97.10^{-7}$	-2,36	0,96
<b>Raspa c/ 1 hora de digestão</b>	137,12	-3,01	0,90	8855	-3,01	0,90	$1,72.10^{-8}$	-2,76	0,93

Nota: <sup>1</sup> 80/20 significa a composição 80% da borracha cisalhada mecanicamente e 20% da borracha criogenia >#30.

Nas Figuras 6.18, 6.19 e 6.20 podem ser observadas a diferenças entre as diversas curvas de fadiga, das misturas com borracha, em relação à mistura de referência; a análise direta dos modelos ou das curvas podem levar a conclusões equivocadas, visto que as misturas possuem diferentes módulos elásticos e, conseqüentemente distribuem tensões de maneira diferente. É verdadeiro afirmar, entretanto, que para o mesmo estado de tensões, qualquer uma das misturas com borracha testadas possui um desempenho superior ao da mistura de referência.

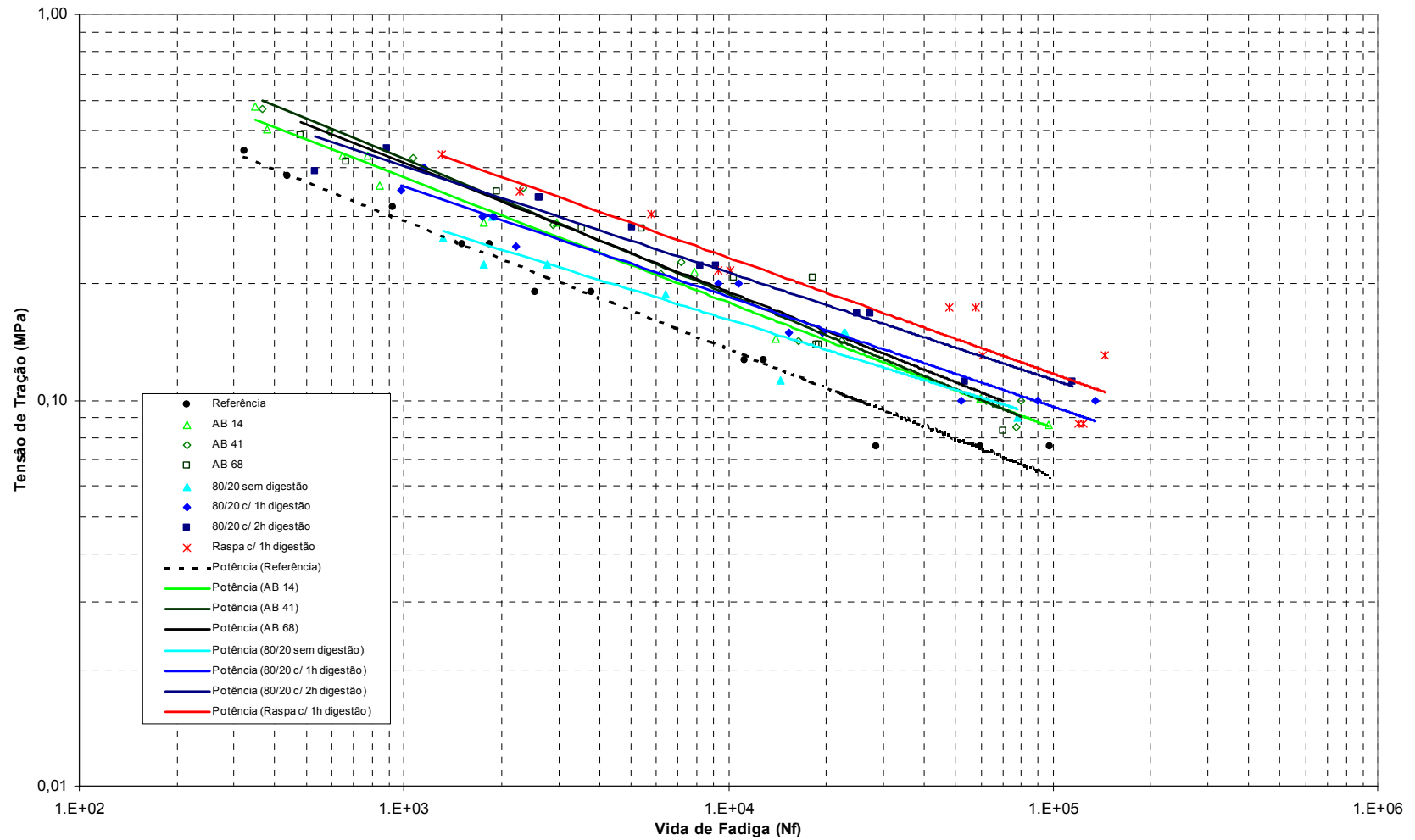


Figura 6.18 – Relação entre vida de fadiga e tensão de tração

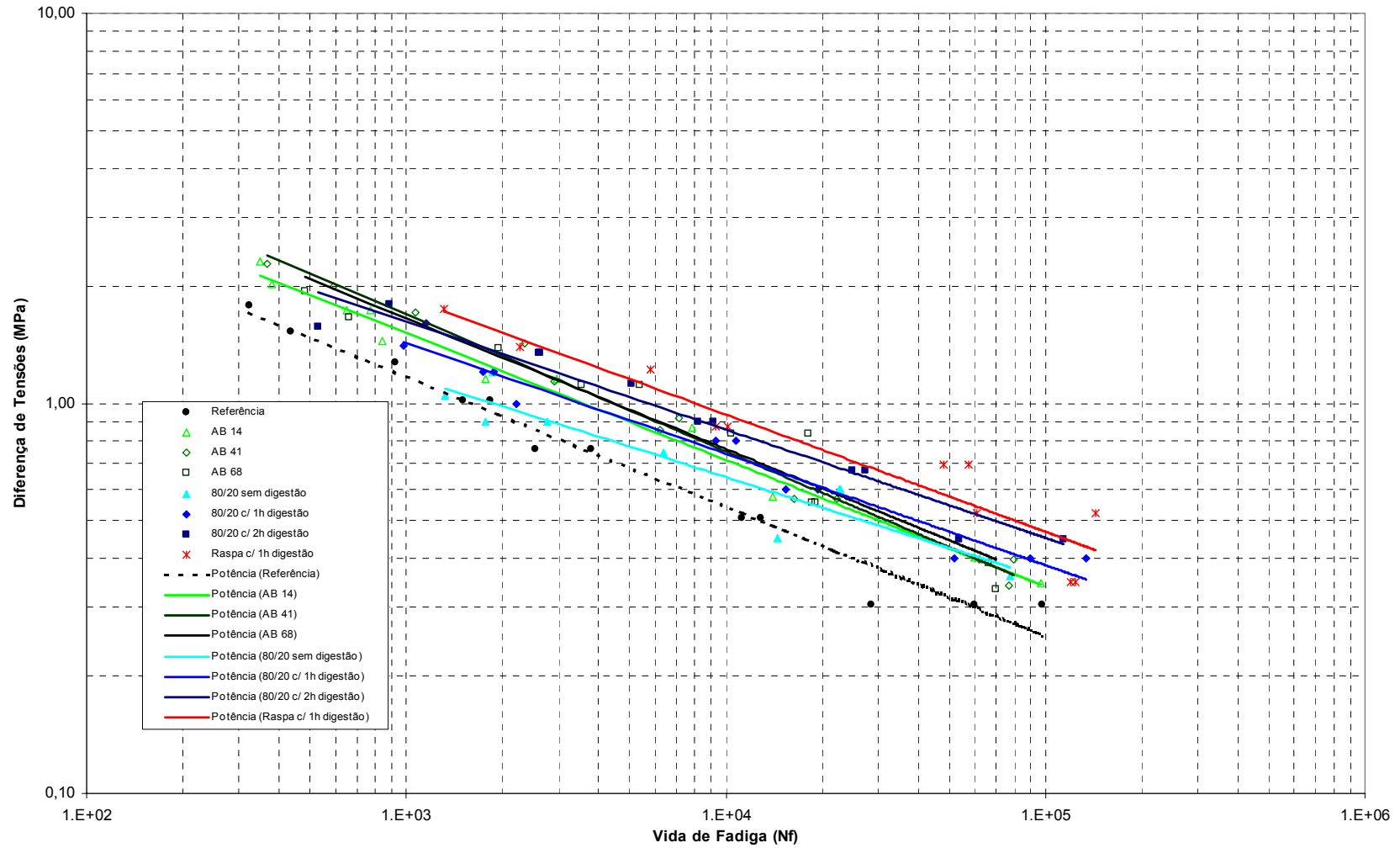


Figura 6.19 – Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões



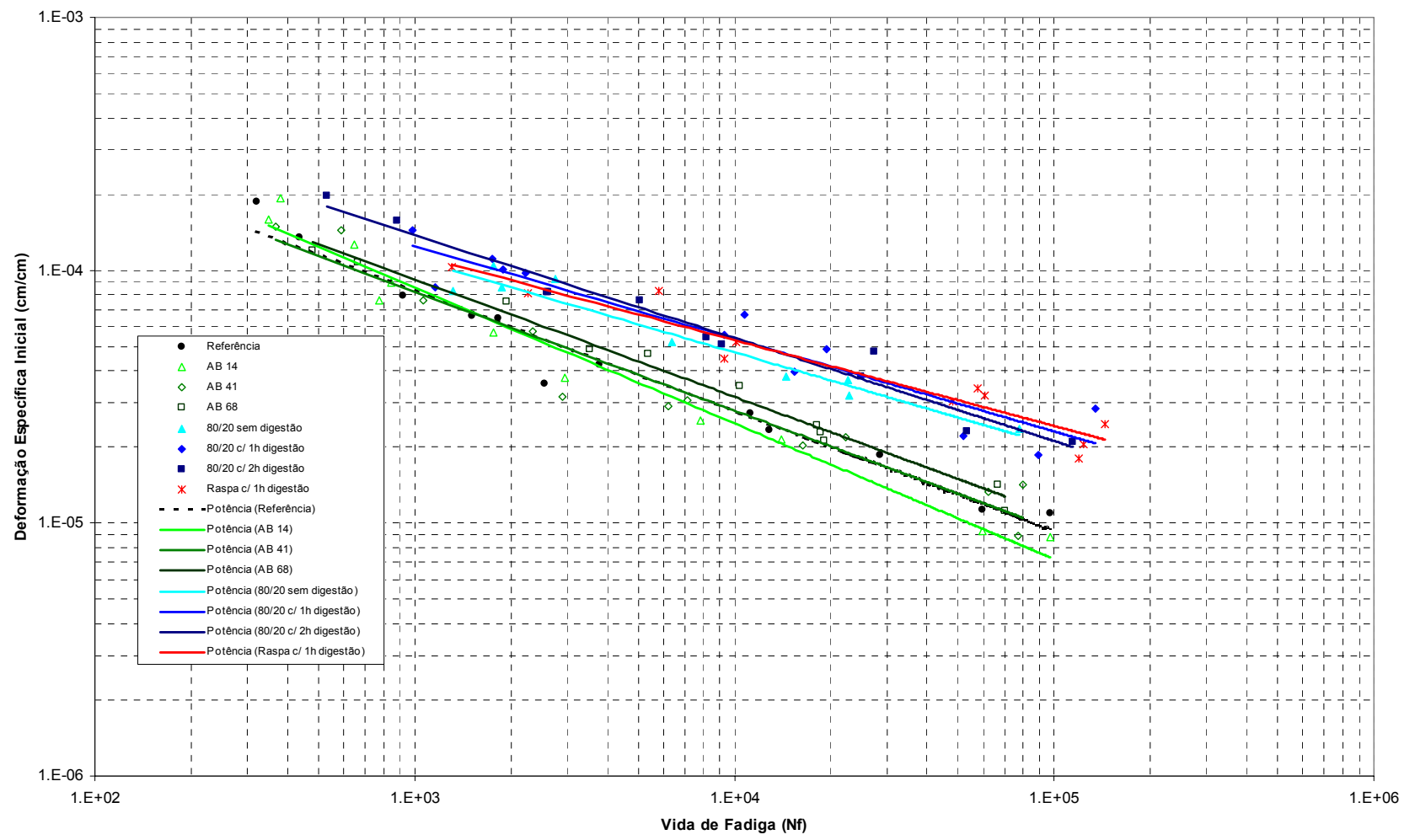


Figura 6.20 – Relação entre vida de fadiga e deformação específica inicial

Para julgamento conjunto das equações de fadiga e da rigidez das misturas foi realizada uma análise utilizando-se o software FLAPS – Finite Layer Analysis of Pavement Structures (versão 1.0). O programa utiliza o método dos elementos finitos no cálculo das tensões, deformações e deslocamentos. Neste caso foi utilizada a opção que considera as camadas de pavimento com comportamento elástico linear. Maiores considerações a respeito da teoria das camadas elásticas para o dimensionamento de pavimentos são feitas por Yoder (1959) e por Huang (1993).

A transposição de modelos determinados em laboratório para o dimensionamento de pavimentos remete a necessidade de aplicação de fatores de correlação laboratório/campo (*shift factor*) ou fator de calibração do modelo. Na realidade, não se trata apenas de um valor, mas de um conjunto de valores que tentam levar em consideração os seguintes fatores: envelhecimento, temperatura, frequência, velocidade, critério de ruptura, relação passagem cobertura, efeito dinâmico das cargas e as próprias deficiências teóricas do modelo. Nesta análise não foram adotados fatores de correlação laboratório/campo devido ao desconhecimento de tais valores para as misturas estudadas. O objetivo desta análise é qualificar e comparar as misturas com borracha com a mistura de referência.

A estrutura utilizada para análise está apresentada na Figura 6.21, bem como, espessura, módulos de resiliência e coeficientes de Poisson. O carregamento utilizado foi de um eixo simples de rodas duplas, com carga total de 82kN. Foram verificadas as tensões e as deformações de tração na fibra inferior do revestimento.

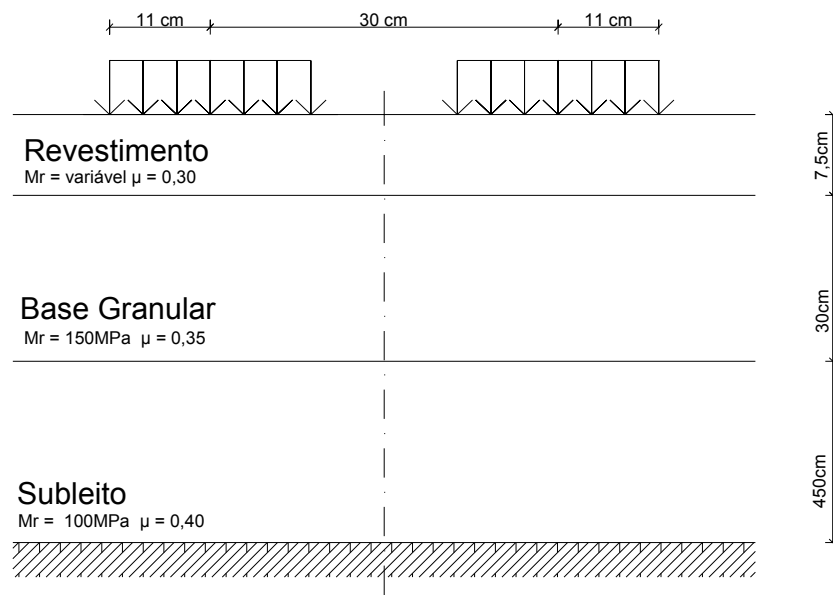


Figura 6.21 – Estrutura de pavimento analisada

A Tabela 6.19 apresenta os valores de tensão e deformação determinados no software e a vida de fadiga,  $N_f$ , a partir da aplicação do modelo gerado em laboratório (graficado na Figura 6.22). Nota-se que as misturas com borracha levam a um incremento significativo na vida de fadiga, em comparação à mistura de referência, se o critério de ruptura de tensão for utilizado. Se o critério de deformação específica inicial de tração for utilizado como critério de ruptura, apenas as misturas 80/20 com 1 e 2 horas de digestão e a AB 68 apresentam desempenho superior.

O ordenamento, em escala de desempenho, segundo os dois critérios de ruptura adotados não são similares, conforme pode ser observado pelos valores de  $N_f/N_i$  (normalização de  $N_f$  em função da vida de fadiga,  $N_i$ , da mistura de referência). É possível afirmar que a consideração da deformação específica inicial como critério de falha, é a mais severa.

Ressalta-se que esta análise pode ser facilmente modificada, caso sejam adotados novos valores de módulo de resiliência ou novas espessuras. Cada pavimento deverá ser dimensionado levando em conta suas condições particulares de clima, tráfego e disponibilidade de materiais.

Tabela 6.19 – Valores de tensão, deformação e vida de fadiga calculados

Mistura	Tensão de Tração			Deformação de Tração		
	tensão (MPa)	$N_f$	$N_f/N_i$	def (cm/cm)	$N_f$	$N_f/N_i$
Referência	0,017	$4,32 \cdot 10^6$	1,0	0,00017	247	1,0
AB 14	0,015	$1,85 \cdot 10^7$	4,2	0,00019	199	0,8
AB 41	0,014	$1,48 \cdot 10^7$	3,4	0,00021	149	0,6
AB 68	0,015	$1,25 \cdot 10^7$	2,9	0,00020	251	1,0
80/20 <sup>1</sup> sem cura	0,012	$2,60 \cdot 10^7$	6,0	0,00025	219	0,9
80/20 <sup>1</sup> com 1 hora de digestão	0,014	$6,20 \cdot 10^7$	14,4	0,00021	381	1,5
80/20 <sup>1</sup> com 2 horas de digestão	0,014	$1,17 \cdot 10^8$	27,0	0,00020	262	1,1
Raspa com 1 hora de digestão	0,015	$4,24 \cdot 10^7$	9,8	0,00020	222	0,9

Nota: <sup>1</sup> 80/20 significa a composição 80% da borracha cisalhada mecanicamente e 20% da borracha criogenia >#30.

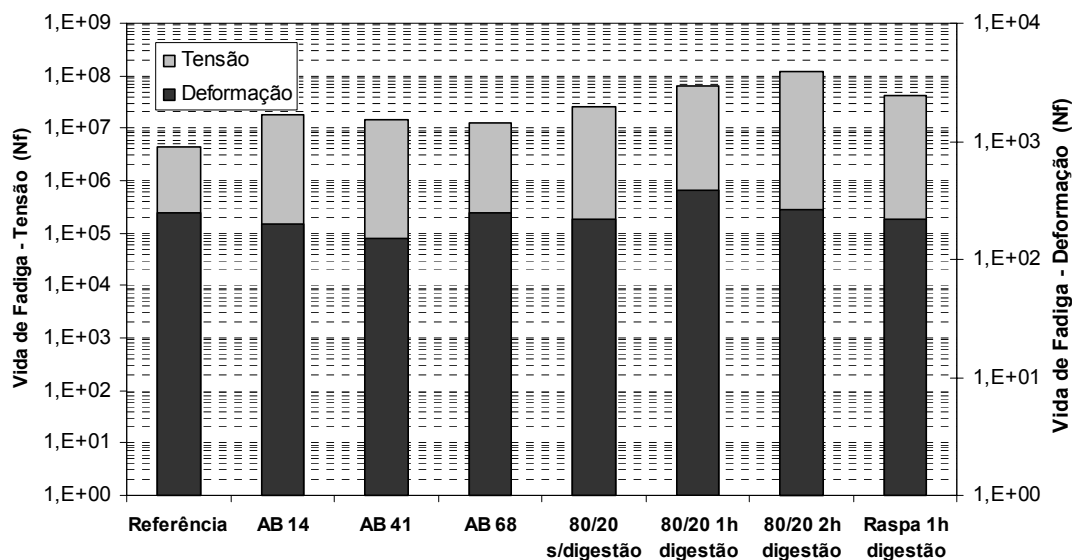


Figura 6.22 – Vida de fadiga das estruturas analisadas

A análise reológica realizada no CAP 20 e nos ligantes preparados com borracha, apresentada no Capítulo 5 (item 5.9), não qualifica da mesma maneira os ligantes e as misturas. Os valores de  $G^* \sin \delta$  são proporcionais ao teor de borracha adicionada, enquanto que a análise do CBUQ isso não se confirma. Ressalta-se que os ensaios de cisalhamento dinâmico foram realizados em amostras envelhecidas em laboratório enquanto que os ensaios em amostras de concreto asfáltico foram preparadas com ligante sem envelhecimento.

A partir dos dados coletados (91 casos) é possível, também, determinar o modelo 6.7, aplicável a todas as misturas estudadas (modelo), o qual explica 61,89% da variância dos dados coletados.

$$N_f = 361,80.(1/\varepsilon_0)^{1,72} .(1/Mr_0)^{1,61}$$

(6.7) onde  $N_f$  = vida de fadiga,  $\varepsilon_0$  = deformação específica inicial (cm/cm) e  $Mr_0$  = módulo de resiliência inicial (MPa).

A Figura 6.23 apresenta os valores previstos pelo modelo, comparados com os valores medidos em laboratório. Nota-se uma alta dispersão de dados para uma faixa de medidas, o que restringe a aplicabilidade do modelo.

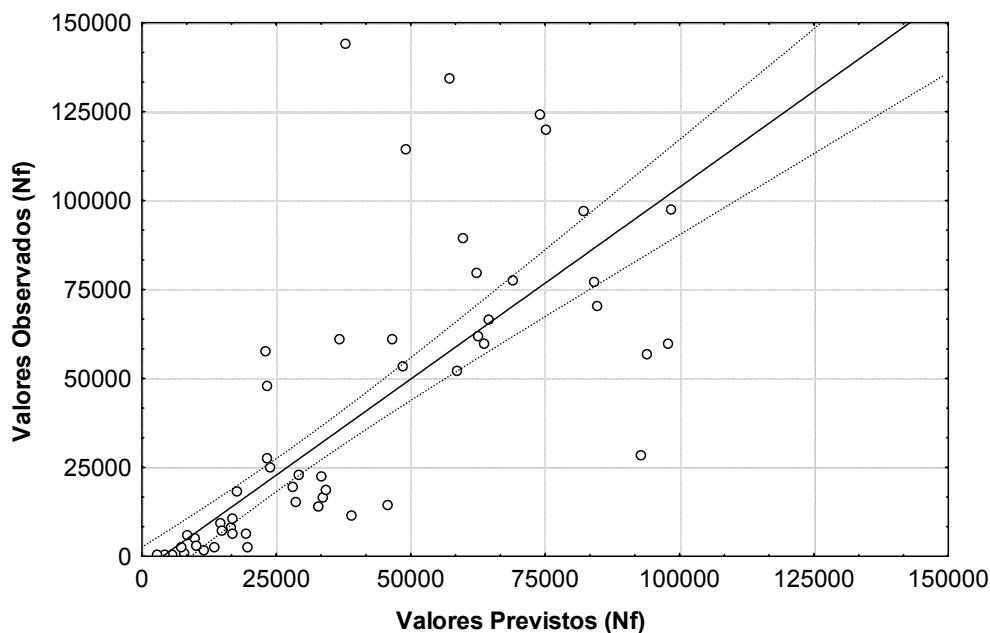


Figura 6.23 –Valores previstos pelo modelo e medidos de vida de fadiga

## 6.5 RESISTÊNCIA AO ACÚMULO DE DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS

As deformações plásticas em trilhas de roda causado pelo tráfego pesado, especialmente lento e canalizado, conjugado a altas temperaturas, representam uma patologia comum nas rodovias brasileiras. Afundamentos acentuados indicam a ruptura do pavimento, bem com, acentuam os fenômenos de hidroplanagem e *spray*.

O ATR é causado pela combinação da densificação (redução de volume) e da distorção cisalhante dos materiais, o que acontecer em uma ou mais camadas do pavimento (Sousa *et al.* 1991). Os mesmos autores apresentam um estudo bastante abrangente sobre o tema.

Brown e Cross (1991) realizaram amplo estudo a respeito do ATR, em rodovias norte-americanas, e apresentam indicativos importantes para dosagem das misturas bem como modelos de previsão de ATR *in situ*. Os autores ressaltam a importância do volume de vazios estar acima de 3% (mesmo após densificação pelo tráfego) e da utilização de agregados com faces britadas.

Diversas pesquisas avaliaram a resistência das misturas asfálticas através de ensaios de laboratório, dentre eles Brown e Bell (1979), Brown e Gibb (1996), Merighi (1999), Brown *et al.* (2001), Viana *et al.* (2003).

A quantificação da deformação permanente dos materiais de pavimentação depende fortemente do método de ensaio e da maneira de preparação das amostras. Estas variações, conjugadas com as incertezas do tráfego e das condições ambientais, tornam a previsão do ATR extremamente difícil (Huang, 1993).

Nesta pesquisa, duas técnicas foram selecionadas para avaliar a resistência das misturas asfálticas ao acúmulo de deformações plásticas: ensaio de *creep* dinâmico com amostra confinada e o ensaio em simulador de tráfego tipo LCPC.

A Tabela 6.20 e a Figura 6.24 apresentam os valores de deformação plástica resultante dos ensaios de *creep* dinâmico. Como valor de referência, Brown *et al.* (2001), mencionam 13% de deformação como critério de aceitação para misturas ensaiadas à 60°C.

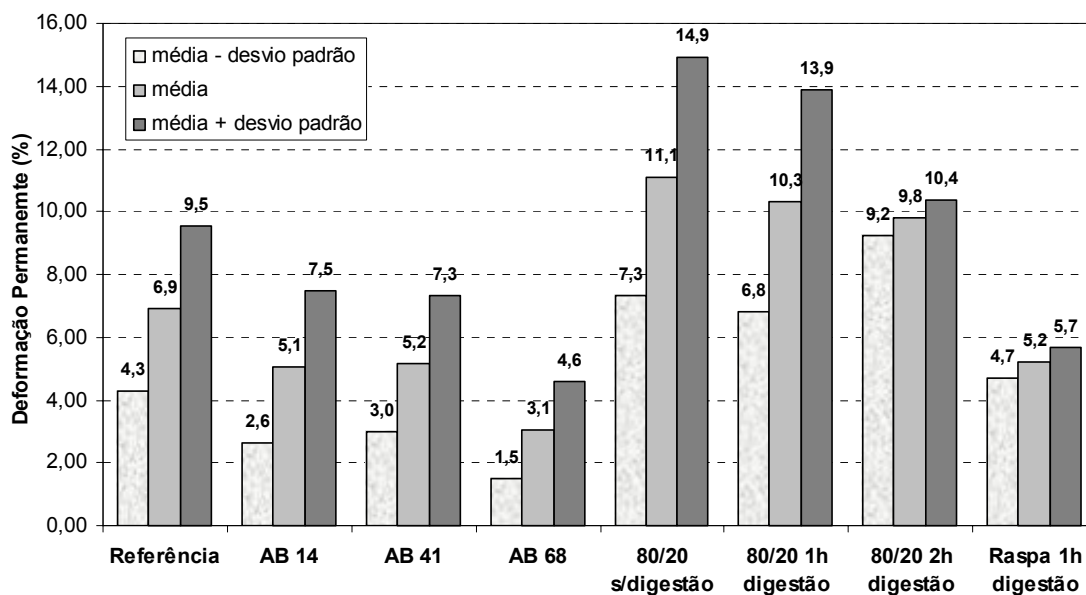
Nota-se a grande dispersão dos dados obtidos, ressaltados pelos altos valores de desvio padrão, no entanto, algumas conclusões podem ser traçadas: as misturas borracha-agregado, preparadas com a borracha 80/20 apresentam valores mais elevados de deformação plástica em relação à mistura de referência, enquanto que as misturas preparadas com a borracha Raspa apresentam uma pequena redução nos valores de deformação plástica medidos. O tempo de digestão parece reduzir a deformação plástica.

As misturas preparadas com ligante modificado com borracha apresentam os menores valores de deformação plástica, notadamente, aquela preparada com o ligante AB 68 (com 18% de borracha). Este fato confirma os valores de  $G^*$  medidos na análise reológica dos ligantes.

Tabela 6.20 – Valores de deformação plástica em ensaio de *creep* dinâmico com amostra confinada (T = 45°C)

Mistura	Deformação Plástica (%)				
	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Média	Desvio Padrão
Referência	9,81	4,65	6,25	6,90	2,64
AB 14	4,57	2,92	7,69	5,06	2,42
AB 41	7,01	5,71	2,78	5,17	2,17
AB 68	2,21	4,83	2,13	3,06	1,54
80/20 <sup>1</sup> sem cura	14,49	11,81	7,00	11,10	3,80
80/20 <sup>1</sup> com 1 hora de digestão	7,25	14,23	9,56	10,35	3,56
80/20 <sup>1</sup> com 2 horas de digestão	9,64	10,45	9,35	9,81	0,57
Raspa com 1 hora de digestão	4,68	5,63	5,29	5,20	0,48

Nota: <sup>1</sup> 80/20 significa a composição 80% da borracha cisalhada mecanicamente e 20% da borracha criogenia >#30.

Figura 6.24 – Deformação plástica em ensaio de *creep* dinâmico (T = 45°C)

A Figura 6.25 apresenta os resultados de ATR *versus* n° de ciclos, medidos em simulador de tráfego tipo LCPC. Modelos do tipo potência (6.8) foram gerados para cada uma das três misturas ensaiadas (Referência, 80/20 com 1 hora de digestão – Processo Seco, e Mistura com ligante AB 41).

$$ATR = a.N^b$$

(6.8) onde ATR = afundamento em trilha de roda (%), N = número de ciclos e *a* e *b* são constantes do modelo, apresentadas na Tabela 6.21.

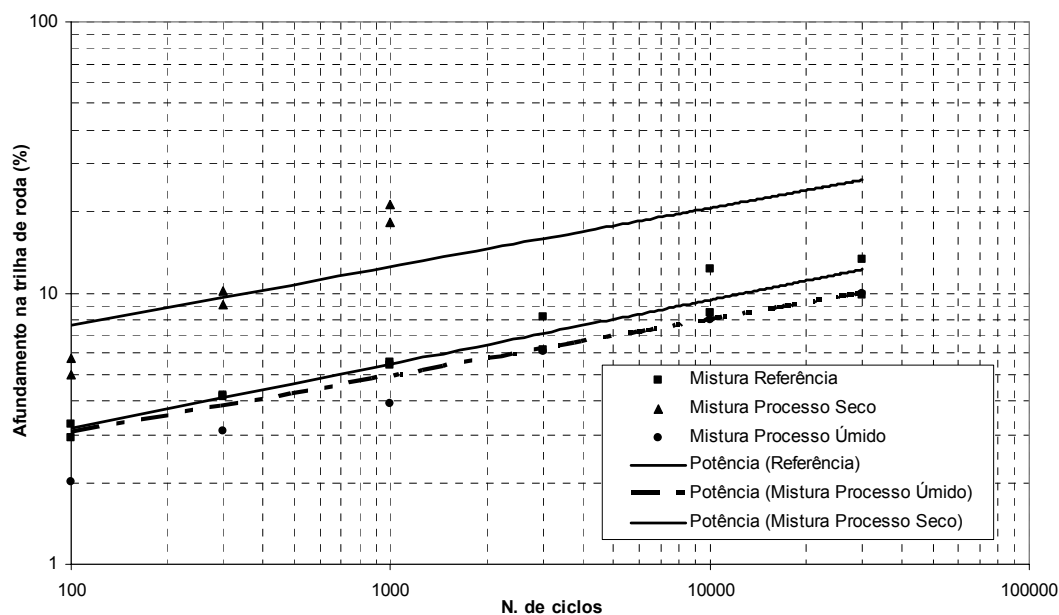


Figura 6.25 – Afundamento em trilha de roda em simulador de tráfego tipo LCPC (T = 60°C)

Tabela 6.21 – Constantes dos modelos de afundamento em trilha de roda

Mistura	Afundamento plástico em trilha de roda (%)		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
Referência	0,60	0,32	0,71
AB 41	1,07	0,24	0,93
80/20 <sup>1</sup> com 1 hora de digestão	0,39	0,57	0,98

Nota: <sup>1</sup> 80/20 significa a composição 80% da borracha cisalhada mecanicamente e 20% da borracha criogenia >#30.

Hunter (1994) cita como critério de aceitação o valor de 10% de afundamento (em relação à espessura da placa) medido em 30000 ciclos<sup>11</sup>. Nota-se que, segundo este critério, a mistura convencional (referência) não estaria qualificada a ser empregada em rodovias francesas. A mistura de borracha-agregado com 1% de borracha 80/20 e 1 hora de digestão apresentou um desempenho bastante inferior ao da mistura de referência, enquanto que a mistura com ligante AB (AB 41 - 12% de borracha #30, 180°C, 45 minutos) apresentou o melhor resultado e a menor taxa de evolução das deformações plásticas ao longo do ensaio.

Ambos os ensaios realizados qualificam de maneira semelhante às misturas estudadas: as misturas com melhor desempenho são as preparadas com ligante asfalto-borracha, seguida da mistura convencional e das misturas tipo borracha-agregado.

<sup>11</sup> Em algumas situações específicas as especificações francesas exigem o valor máximo de 5%.



## 6.6 RESISTÊNCIA AO DESGASTE

Epps *et al.* (2000) indicaram, em seu trabalho, as novas tendências de pesquisa e exigências para misturas asfáltica, além dos condicionantes estruturais os requisitos de durabilidade devem ser incorporadas ao projeto. Nesta pesquisa duas técnicas laboratoriais foram selecionadas: o ensaio Lottman Modificado, que mede o efeito deletério da água nas misturas asfálticas e o ensaio de perda de massa Cantabro, que mede a resistência ao desgaste.

O ensaio Cantabro foi, originalmente, concebido para avaliação de misturas abertas, todavia outras pesquisas já utilizaram esta técnica para avaliação de misturas asfálticas densas (Moura, 2001; Bertolo, 2002; Homem, 2002). Trata-se de uma tentativa de avaliar indiretamente a influência da adição de borracha nas propriedades de coesão e adesão das misturas.

O ensaio foi realizado em amostras à 25°C e volume de vazios de 4%. Foram ensaiadas amostras sem nenhum tipo de condicionamento prévio.

A Tabela 6.22 traz os resultados obtidos no ensaio de perda de massa. Na Figura 6.26 estão plotados as médias dos resultados obtidos para cada uma das misturas ensaiadas. Para uma análise conjunta da variabilidade dos ensaios, foi plotado, também, os valores de média menos desvio padrão e média mais desvio padrão. Nota-se que o desvio padrão aumenta à medida que aumenta a perda de massa das amostras.

Tabela 6.22 – Resultados dos ensaios de perda de massa Cantabro (T = 25°C)

<i>Mistura</i>	<i>Perda de Massa (%)</i>				
	<i>Leitura 1</i>	<i>Leitura 2</i>	<i>Leitura 3</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
<i>Referência</i>	5,01	5,70	7,01	5,91	1,01
<i>AB 14</i>	5,50	3,60	3,50	4,20	1,13
<i>AB 41</i>	2,70	6,30	5,80	4,93	1,95
<i>AB 68</i>	2,20	3,00	1,80	2,33	0,61
<i>80/20<sup>1</sup> sem cura</i>	3,66	2,79	2,16	2,87	0,75
<i>80/20<sup>1</sup> com 1 hora de digestão</i>	3,41	2,12	1,94	2,49	0,80
<i>80/20<sup>1</sup> com 2 horas de digestão</i>	2,22	2,84	2,84	2,63	0,36
<i>Raspa com 1 hora de digestão</i>	2,31	3,41	2,86	2,86	0,55

Nota: <sup>1</sup> 80/20 significa a composição 80% da borracha cisalhada mecanicamente e 20% da borracha criogenia >#30.

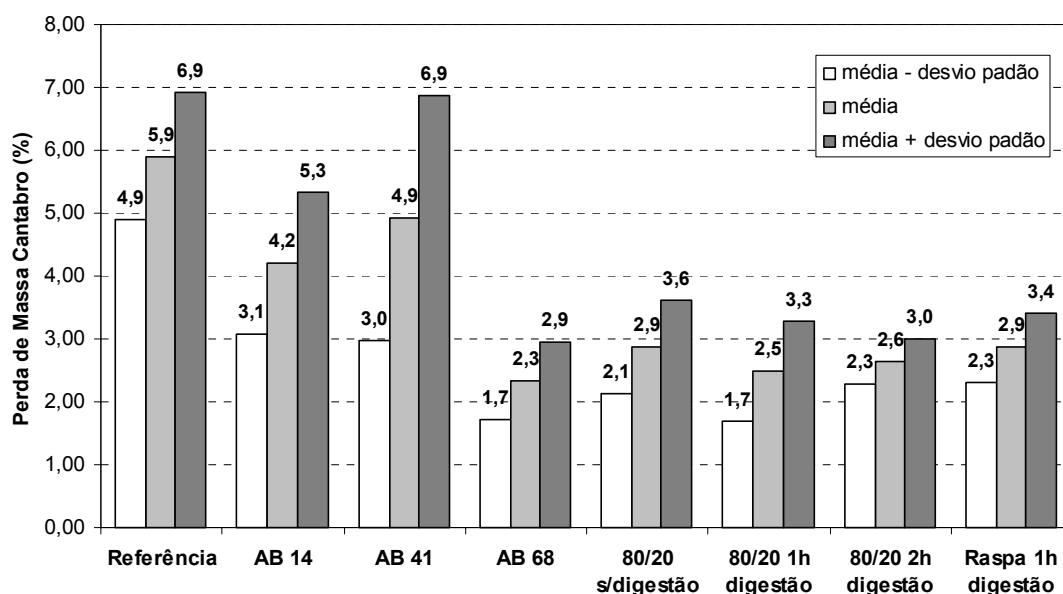


Figura 6.26 – Perda de massa Cantabro

Pode ser observado que qualquer mistura com borracha, tanto processo seco quanto úmido, apresenta menor desgaste que a mistura de referência, no entanto, a norma DNER – ES 386/99 para misturas de pré-misturado à quente com asfalto polímero limita como valor máximo aceitável de perda de massa, 25%, muito além do encontrado.

As misturas borracha-agregado apresentam as menores perdas de massa. As preparadas sem tempo de digestão (80/20) e com a borracha Raspa apresentam as maiores perdas; a raspa possui tamanhos elevados entretanto sua borracha tem formato alongado o que pode contrapor a tendência de desgaste.

Já às misturas com borracha incorporada ao ligante (via úmida) apresentam valores intermediários de desgaste, entre as misturas borracha agregado e a de referência, no entanto, a mistura AB 68 (com 18% de borracha no ligante) apresentou a menor perda de massa.

Outro fato que deve ser levado em conta na análise é que nas misturas com borracha (todas) o teor de ligante é superior ao da mistura de referência, o que, sem dúvida, melhora os aspectos de resistência ao desgaste.

## 6.7 RESISTÊNCIA AO EFEITO DELETÉRIO DA ÁGUA

O ensaio Lottman Modificado (AASHTO T 283-89) avalia a propriedade de adesividade em misturas asfálticas, considerando o efeito deletério da água em amostras cilíndricas, preparadas através da Metodologia Marshall, com volume de vazios de aproximadamente 7% ( $\pm 1\%$ ). A análise é feita pela relação entre a resistência à tração de corpos-de-prova com e sem condicionamento prévio.

O valor obtido desta relação, pode ser utilizado para prever o desempenho de misturas asfálticas, face a adesividade ligante/agregado e, também para verificar o efeito da adição de aditivos químicos ou pulverulentos na adesividade da mistura. No caso desta pesquisa pretende-se verificar a influência da adição de borracha nesta importante propriedade das misturas asfálticas.

A Tabela 6.23 apresenta as médias dos resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral das amostras sem e com condicionamento ( $Rt_1$  e  $Rt_2$ , respectivamente), bem como a RRT (Resistência Retida à Tração).

Tabela 6.23 – Resultados dos ensaios de efeito deletério da água (Lottman Modificado)

<i>Mistura</i>	<i>RT<sub>1</sub> (MPa)</i>	<i>RT<sub>2</sub> (MPa)</i>	<i>RRT (%)<sup>2</sup></i>
<i>Referência</i>	0,63	0,47	75
<i>AB 14</i>	0,78	0,58	74
<i>AB 41</i>	0,73	0,66	90
<i>AB 68</i>	0,78	0,65	83
<i>80/20<sup>1</sup> sem cura</i>	0,60	0,40	67
<i>80/20<sup>1</sup> com 1 hora de digestão</i>	0,73	0,55	75
<i>80/20<sup>1</sup> com 2 horas de digestão</i>	0,61	0,44	72
<i>Raspa com 1 hora de digestão</i>	0,73	0,41	56

Nota: <sup>1</sup> 80/20 significa a composição 80% da borracha cisalhada mecanicamente e 20% da borracha criogenia >#30; <sup>2</sup> RRT=100.( $Rt_2/Rt_1$ ).

O volume de vazios é um dos fatores que condicionam a durabilidade das misturas asfálticas em serviço. Volumes de vazios baixos (3-5%)<sup>1</sup> conduzem a misturas impermeáveis, enquanto que volume de vazios altos (> 14%)<sup>12</sup> conduzem a misturas permeáveis. A faixa de volume de vazios intermediária é indesejável, devido a possibilidade da água entrar, por gravidade, no interior da mistura, e não conseguir sair. Hicks (1991) e Kandhal (1992) definem tal faixa de VV como “pessimum air voids”.

<sup>12</sup> A fixação de valores de VV é arbitrária visto que a permeabilidade das misturas asfálticas é influenciada por diversos fatores.

A Figura 6.27 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova, sem e com condicionamento. Nota-se, que nesta condição de VV ( $7\pm 1\%$  de VV), para RT<sub>1</sub> e RT<sub>2</sub>, as misturas produzidas com ligantes modificados com borracha conduzem a maiores valores de resistência.

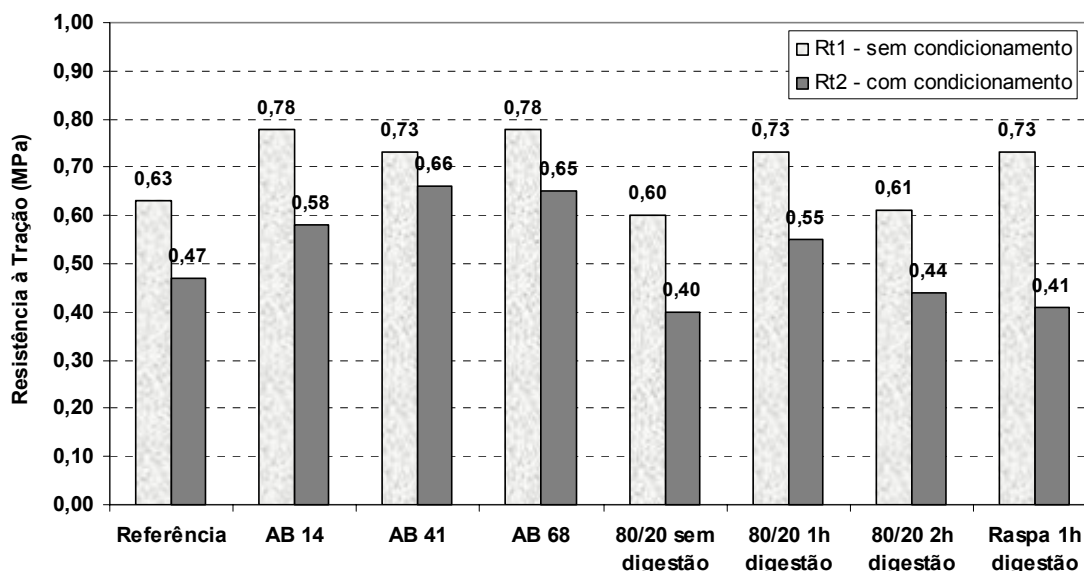


Figura 6.27 – Resultado de ensaios de resistência à tração (Ensaio Lottman Modificado)

Em relação à RRT, a Figura 6.28 apresenta tais valores. Como valor de referência, para aceitação de uma mistura segundo este método, a metodologia SUPERPAVE™ (AI, 1995b) preconiza valores acima de 80%, enquanto que Hicks (1991) afirma que a maioria dos departamentos estaduais de transportes norte americanos utilizam valores de 70/75%.

As três misturas preparadas com borracha 80/20 apresentam diferenças importantes em função do tempo de digestão, sendo a de maior valor a mistura com 1 hora de cura. Tendência semelhante foi observada nos ensaios Cantabro em que, misturas com maior tempo de digestão apresentaram menor perda de massa.

A mistura com borracha Raspa apresentou apenas 56% de resistência retida à tração. Esta redução de RRT, em relação à mistura de referência, indica a importância de se considerar esta variável em projetos deste tipo de mistura.

As misturas preparadas com ligantes modificados com borracha apresentaram desempenho semelhante ou superior ao da mistura de referência; a mistura com ligante AB 41 (com 12% de borracha) apresentou o maior índice, com resultado de 90%.

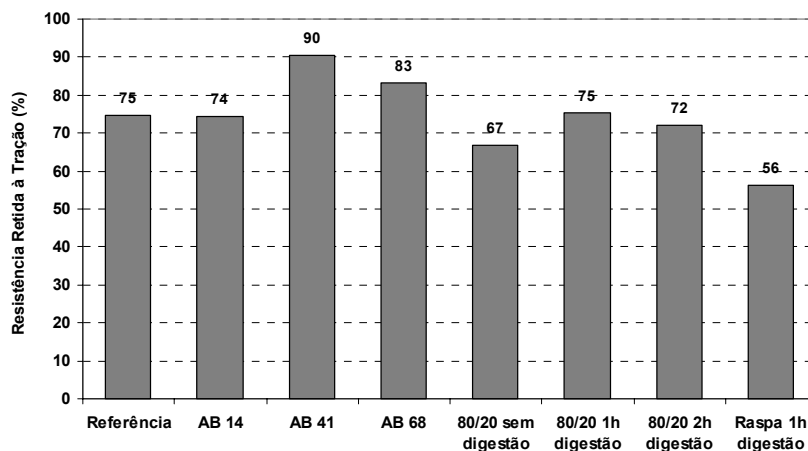


Figura 6.28 – Resultado do ensaio de resistência ao efeito deletério da água (Ensaio Lottman Modificado)

## 6.8 RESUMO

Dada a quantidade de informações apresentadas neste, julgou-se necessário a montagem de um quadro-resumo a respeito do efeito do uso de borracha nas propriedades do concreto asfáltico, materializado no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Quadro-resumo do efeito de borracha no concreto asfáltico

<i>Propriedade</i>	<i>Efeito / comentários</i>	
	<i>Processo Úmido</i>	<i>Processo Seco</i>
Consumo de Ligante	Aumento	Aumento
Massa Específica	Redução sensível	Redução
Estabilidade	Redução sensível	Redução importante
Fluência	Aumento sensível	Aumento importante
Resistência à Tração	Aumento	Redução sensível
Módulo de Resiliência	Redução	Redução importante
Suscetibilidade Térmica	Melhoria, notadamente em altas temperaturas	Melhoria, notadamente em baixas temperaturas
Resistência à Fadiga	Aumento	Aumento
Resistência ao Acúmulo de Deformação Plásticas	Aumento	Redução
Resistência ao Desgaste	Aumento	Aumento
Resistência ao Efeito Deletério da Água	Aumento	Redução sensível

## 7. CONSTRUÇÃO E MONITORAMENTO DO TRECHO BORRACHA-AGREGADO

Neste capítulo é apresentada a experiência acumulada com a execução de um trecho experimental com revestimento em concreto asfáltico modificado com borracha. São apresentados os projetos das misturas, aspectos executivos e os levantamentos de superfície realizado posteriormente a construção.

### 7.1 MATERIAIS UTILIZADOS E DOSAGEM DAS MISTURAS

As técnicas utilizadas para caracterização dos materiais e dosagem das misturas seguiu as mesmas técnicas utilizadas nas outras etapas da pesquisa.

A borracha utilizada foi a mistura 80/20, ou seja, 80% da borracha cisalhada mecanicamente e 20% da borracha criogênica >#30 (a caracterização da borracha está apresentada no Capítulo 4 e no Anexo 1).

O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 20. A massa específica do CAP foi de 1,011g/cm<sup>3</sup>. A relação entre viscosidade *versus* temperatura, está apresentada na Figura 7.1. As temperaturas de mistura e compactação para as misturas sem borracha foram de 151-157°C e 138-143°C respectivamente. Para as misturas borracha-agregado foi adotado 10°C acima.

O agregado mineral utilizado foi o seguinte: areia de várzea com grãos arredondados, agregado com tamanho máximo nominal  $\frac{3}{4}$ " e pó-de-pedra proveniente de rocha basáltica e agregado com tamanho máximo nominal  $\frac{3}{8}$ ", proveniente de rocha granítica. Todos os agregados são de uso corrente para produção de concreto asfáltico e comuns na região metropolitana de Porto Alegre.

A granulometria dos agregados, feita com lavagem, está apresentada na Figura 7.1. O índice de lamelaridade (DAER108/01) do agregado  $\frac{3}{4}$ " foi de 19% e do agregado  $\frac{3}{8}$ " foi de 48%.

A graduação utilizada para as misturas foi a Faixa II da SMOV, os ajustes estão apresentados na Figura 7.3. A composição da mistura borracha-agregado foi realizada substituindo o agregado, em volume, por borracha.

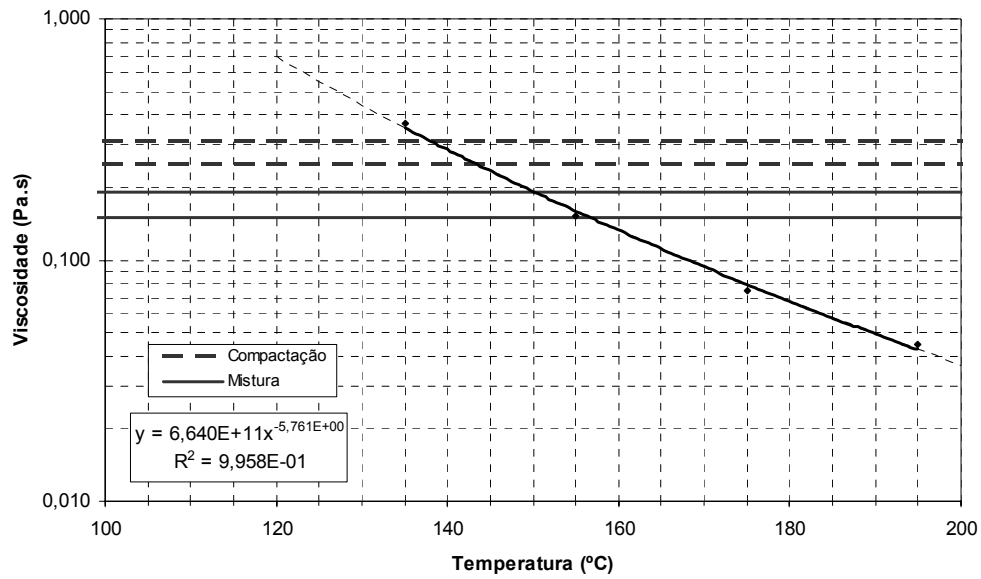


Figura 7.1 – Relação temperatura *versus* viscosidade rotacional

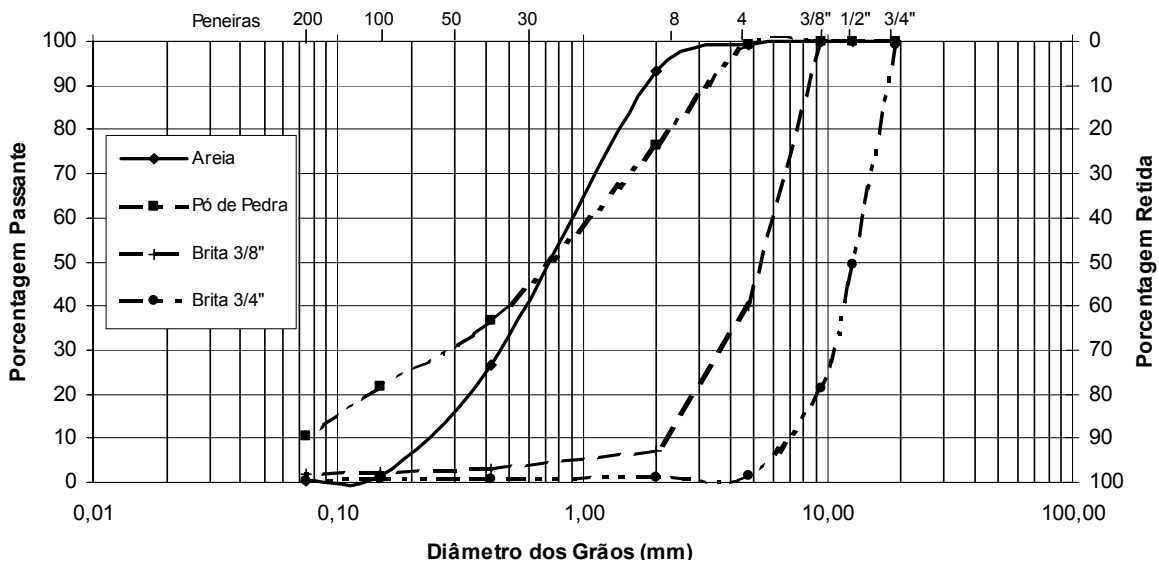


Figura 7.2 – Granulometria dos agregados minerais

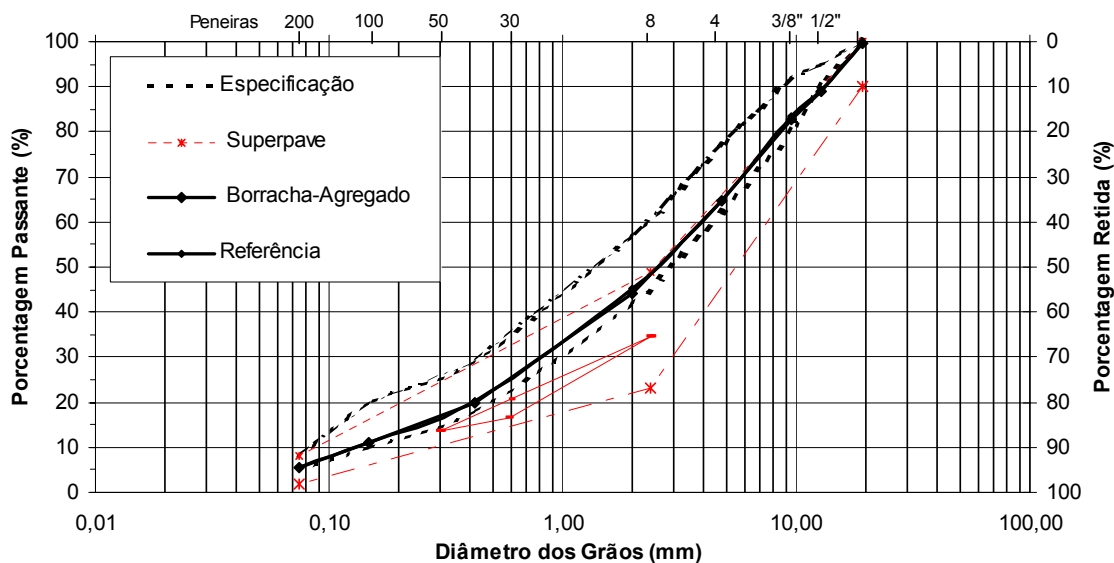


Figura 7.3 – Ajuste granulométrico das misturas de referência e borracha-agregado

Foram, então, preparadas amostras cilíndricas (5 para cada teor), para determinação do teor de ligante e realização de ensaios mecânicos. As misturas borracha-agregado foram mantidas aquecidas por 1 hora, após a mistura e antes da compactação. A dosagem Marshall das misturas, resultou nas características apresentadas nas Figuras 7.4, 7.5 e 7.6. A Tabela 7.1 traz as propriedades finais de cada uma das misturas.

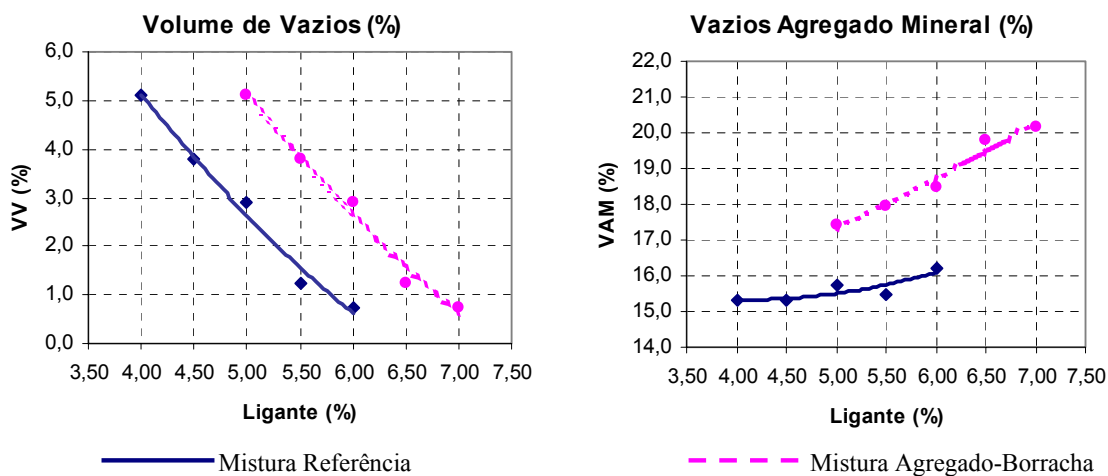


Figura 7.4 – Propriedades das misturas de referência e borracha-agregado



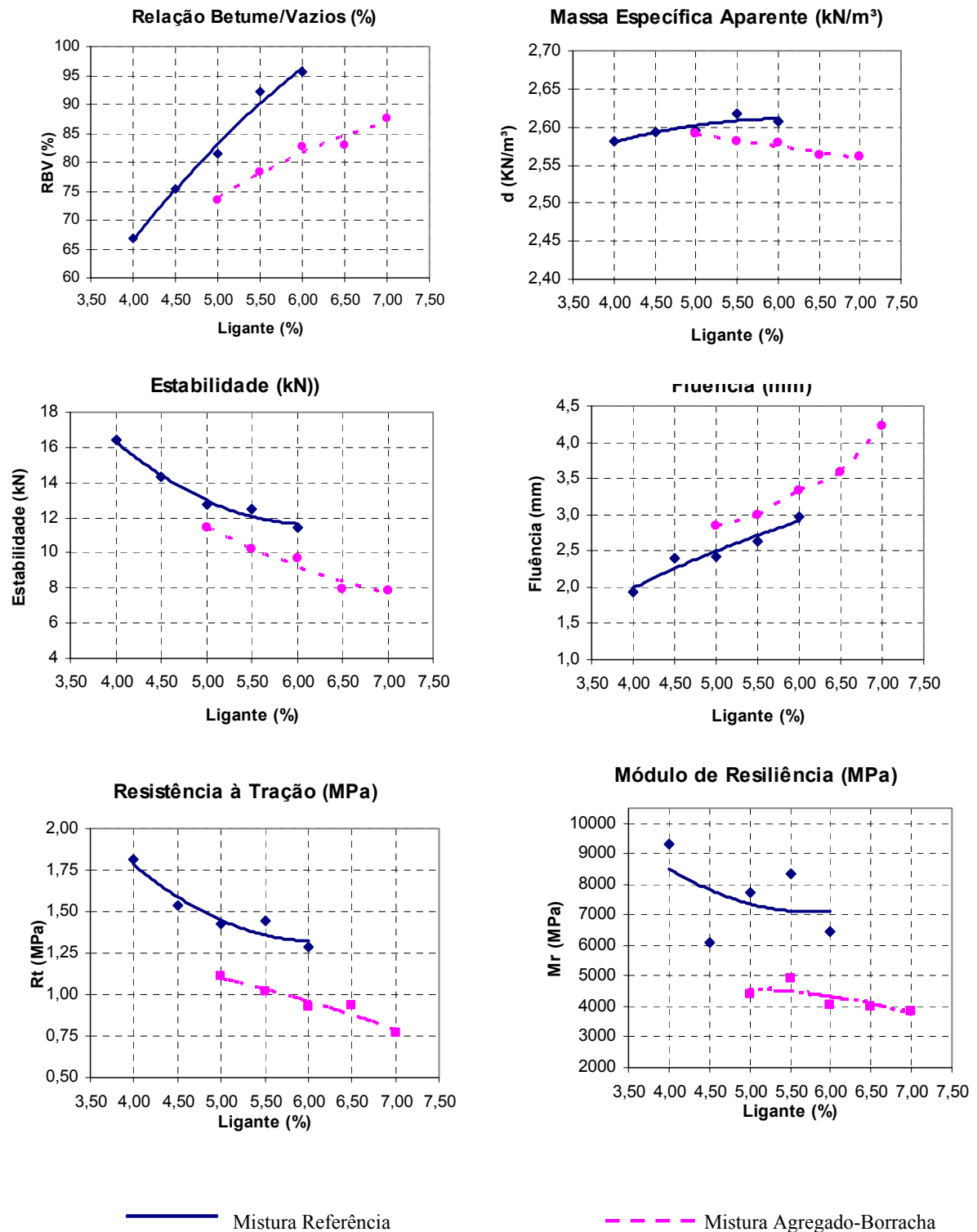


Figura 7.5 – Propriedades das misturas de referência e borracha-agregado

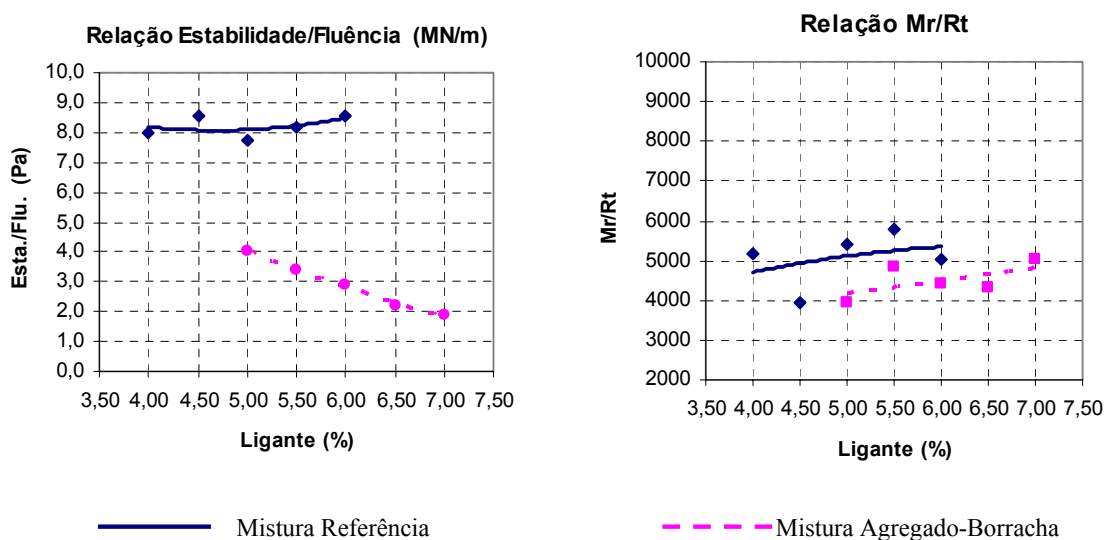


Figura 7.6 – Propriedades das misturas de referência e borracha-agregado

Tabela 7.1 – Propriedades de projeto da mistura de referência e da mistura borracha-agregado

Propriedade	Especificação	Referência	Borracha-Agregado
Teor de Betume (%)	--	4,45	5,45
Volume de Vazios (%)	3 a 5 <sup>1</sup>	4,00	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82 <sup>1</sup>	74,00	78,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	>14 <sup>1</sup>	15,50	18,00
Densidade Máxima Teórica (kN/m <sup>3</sup> )	--	2,71	2,68
Densidade Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	--	2,59	2,58
Estabilidade (kN)	> 8 <sup>1</sup>	14,8	10,0
Fluência (mm)	2,0 a 4,6 <sup>1</sup>	2,3	3,0
Resistência à Tração (MPa)	--	1,60	1,05
Módulo de Resiliência (MPa)	--	8000	4500
Relação Mr/Rt	--	5000	4286
Relação Est/Fluência (MN/m)	--	6,43	3,33
Relação #200/Betume (%)	0,6 a 1,6 <sup>2</sup>	1,22	0,99

Nota: <sup>1</sup>DAER ES 16/98; <sup>2</sup>SUPERPAVE<sup>TM</sup>.

Nota-se que a diferença nas propriedades volumétricas e mecânicas seguiu o mesmo padrão das misturas apresentadas no Capítulo 6.

## 7.2 CONSTRUÇÃO DO TRECHO

A partir da determinação da composição granulométrica, do teor de ligante e das temperaturas de mistura e compactação partiu-se, então, para a calibração da usina e execução do trecho. A usina utilizada é do tipo volumétrica de fluxo paralelo, e capacidade de produção de até 100 toneladas/hora.

Os agregados minerais foram colocados em 4 silos separados e calibrados individualmente (Figura 7.7). A borracha foi entregue misturada (80% cisalhada e 20% >#30) em sacos plásticos impermeáveis de, aproximadamente, 30kg (Figura 7.8). Para entrada da borracha foi utilizado o silo de material reciclado e o anel de reciclagem, localizado após o queimador da usina. A Figura 7.9 apresenta um vista panorâmica da usina onde pode ser observado a correia com agregado mineral e com borracha.

Foram produzidas, aproximadamente, 30 toneladas de massa asfáltica com borracha. A temperatura de saída da massa da usina foi de 170°C (Figura 7.10).

A massa era mantida por 50 minutos dentro da caçamba do caminhão antes de ser aplicada em pista. A caçamba do caminhão era imprimada com óleo de mamona antes de receber a massa. Não foi observado nenhum tipo de segregação ou heterogeneidade da massa asfáltica produzida.

A preparação de superfície foi a tradicionalmente utilizada pela equipe da SMOV, com varredura mecânica e pintura com emulsão asfáltica (Figura 7.11). A temperatura do ar era de 24°C e a temperatura da superfície do pavimento de 25°C no momento que recebeu a mistura borracha-agregado.

Uma vibroacabadora convencional de pneus foi utilizada para aplicação do concreto asfáltico em pista, conforme Figura 7.12 e 7.13. A compactação se deu imediatamente após o espalhamento da massa, primeiramente com rolo do tipo pneumático, mostrado na Figura 6.14, com pressão de inflação de 90 libras, seguido de mesmo rolo com pressão de inflação de 120 libras e acabamento com rolo tandem, com cilindro em chapa de aço. Os rolos eram, constantemente molhados com óleo de mamona para não aderirem a massa. A compactação se deu um pouco além do tempo normal, a fim de evitar eventuais inchamentos da borracha e desagregação da massa.



Figura 7.7 – Vista panorâmica dos silos carregados com agregados



Figura 7.8 – Sacos com aproximadamente trinta quilogramas de borrachas



Figura 7.9 – Vista panorâmica da usina



Figura 7.10 – Controle de temperatura da massa na caçamba do caminhão



Figura 7.11 – Vista da área pintada pronta para receber novo revestimento



Figura 7.12 – Aplicação da massa em pista



Figura 7.13 – Aplicação da massa em pista



Figura 7.14 – Compactação da massa em pista com rolo pneumático

Após a construção do novo revestimento a estrutura do pavimento (apresentada na Figura 7.15) ficou caracterizada por três camadas de concreto asfáltico sobre camadas de aterro granular.

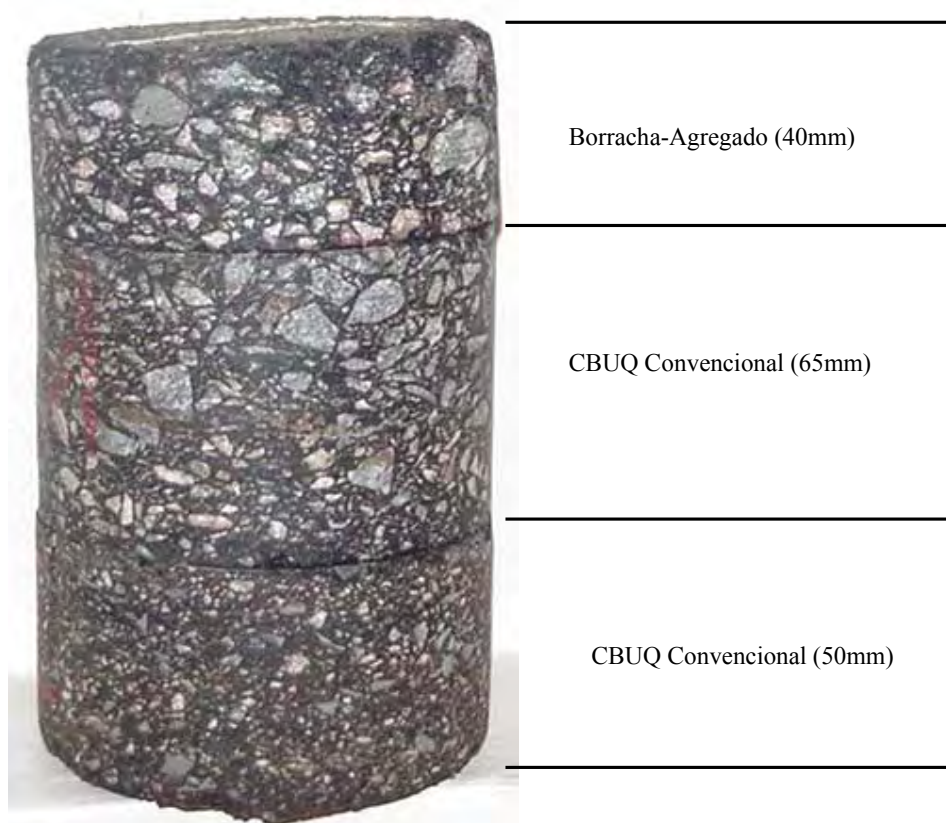


Figura 7.15 – Camada executada sobre camadas de CBUQ convencional

### 7.3 LEVANTAMENTO DE SUPERFÍCIE

Os ensaios para medida de micro e macrotextura foram realizadas em duas oportunidades, em junho e dezembro de 2003. Desde sua construção, em novembro de 2002, o trecho foi submetido ao tráfego de caminhões, tanto os que entregavam materiais (agregados e ligantes), quanto os que saíam com materiais para execução de pavimentos novos e restaurações no município de Porto Alegre.



### 7.3.1 Microtextura

A microtextura pode ser definida como as asperezas superficiais, com comprimento de onda de 0 a 0,5mm e amplitude de 0 a 0,2mm. A microtextura de pavimentos está relacionado à textura superficial dos agregados e é de extrema importância no atrito pneu/pavimento a baixas velocidades. Hunter (1994) e Momm (1998) trazem maiores informações acerca deste assunto.

As medidas de microtextura, realizadas através de medições com o Pêndulo Britânico (ASTM D303), estão apresentadas na Tabela 7.1. As medidas realizadas não demonstram que a presença de borracha tenha influência significativa na microtextura.

Tabela 7.2 – Medidas de microtextura, resultante dos ensaios com Pêndulo Britânico realizados nos trechos de referência e borracha-agregado

<i>Atributo</i>	<i>Trecho Referência</i>	<i>Trecho Borracha-Agregado</i>
<i>Medida 1</i> <sup>1</sup>	83,0	84,7
<i>Medida 2</i> <sup>1</sup>	89,0	84,7
<i>Medida 3</i> <sup>1</sup>	89,0	84,3
<i>Média (mm)</i> <sup>1</sup>	<b>87,0</b>	<b>84,6</b>
<i>Desvio Padrão (mm)</i> <sup>1</sup>	3,5	0,2
<i>Medida 1</i> <sup>2</sup>	92,3	96,7
<i>Medida 2</i> <sup>2</sup>	94,0	101,3
<i>Medida 3</i> <sup>2</sup>	94,7	99,7
<i>Média (mm)</i> <sup>2</sup>	<b>93,7</b>	<b>99,2</b>
<i>Desvio Padrão (mm)</i> <sup>2</sup>	1,2	2,4

Nota: <sup>1</sup>referente a medições realizadas em 06 de junho de 2003; <sup>2</sup>referente a medições realizadas em 18 de dezembro de 2003

As medidas de microtextura são influenciadas pelas asperezas superficiais dos agregados (bem como grau de polimento, quando sujeito a ação do tráfego). Em camadas asfálticas novas, onde não existe a exposição dos agregados na superfície, estes valores podem ser mascarados pela presença de um filme de ligante asfáltico que recobre toda superfície do pavimento.

### 7.3.2 Macrotextura

Macrotextura são asperezas superficiais com comprimento de onda de 0 a 0,5mm e amplitude de 0 a 0,2mm. É relacionada ao atrito em altas velocidades; a capacidade do pavimento drenar

a água superficial evitando o fenômeno da hidroplanagem; a formação de *spray*; a formação do espelho noturno; o consumo de combustível; o desgaste dos pneumáticos e ao ruído.

A Tabela 7.3 apresenta os valores de altura de areia, medidos através do ensaio de mancha de areia (ASTM E965). Este ensaio é reconhecidamente uma das melhores maneiras de se medir a macrotextura, podendo-se ainda inferir em parâmetros como atrito superficial em altas velocidades e ruído.

Os resultados apresentados para a camada com borracha-agregado (0,61 em junho e 0,56 em dezembro) são maiores que os medidos para o trecho de referência (0,46 em junho e 0,35 em dezembro). Valores de altura de areia entre 0,22 e 0,39mm caracterizam pavimento com macrotextura fina e, entre 0,40 e 0,79mm, macrotextura média. A partir desta pequena experiência é possível uma indicação de melhoria das propriedades funcionais do revestimento executado com borracha.

Tabela 7.3 – Alturas de areia, em mm, resultante dos ensaios de mancha de areia realizados nos trechos de referência e borracha-agregado

<i>Atributo</i>	<i>Trecho Referência</i>	<i>Trecho Borracha-Agregado</i>
<i>Medida 1</i> <sup>1</sup>	0,37	0,50
<i>Medida 2</i> <sup>1</sup>	0,38	0,50
<i>Medida 3</i> <sup>1</sup>	0,38	0,52
<i>Média (mm)</i> <sup>1</sup>	<b>0,38</b>	<b>0,50</b>
<i>Desvio Padrão (mm)</i> <sup>1</sup>	0,00	0,11
<i>Medida 1</i> <sup>2</sup>	0,27	0,50
<i>Medida 2</i> <sup>2</sup>	0,36	0,53
<i>Medida 3</i> <sup>2</sup>	0,25	0,35
<i>Média (mm)</i> <sup>2</sup>	<b>0,29</b>	<b>0,46</b>
<i>Desvio Padrão (mm)</i> <sup>2</sup>	0,06	0,09

Nota: <sup>1</sup> referente a medições realizadas em 06 de junho de 2003; <sup>2</sup> referente a medições realizadas em 18 de dezembro de 2003

Os resultados dos ensaios de drenabilidade podem ser expressos em função do fluxo ou do tempo de escoamento. A Tabela 7.4 apresenta os tempos de escoamento para os trechos de referência e borracha-agregado. Apesar da grande variabilidade dos dados coletados existe, como era de se esperar, uma concordância com os valores de altura de areia. O trecho executado com borracha-agregado permite uma drenagem superficial mais rápida, o que favorece a aderência pneu-pavimento em dias de chuva.

Tabela 7.4 – Tempos de escoamento da água, em segundos, resultante dos ensaios de drenabilidade realizados nos trechos de referência e borracha-agregado

<i>Atributo</i>	<i>Trecho Referência</i>	<i>Trecho Borracha-Agregado</i>
<i>Medida 1</i> <sup>1</sup>	57	34
<i>Medida 2</i> <sup>1</sup>	31	7
<i>Medida 3</i> <sup>1</sup>	38	15
<i>Medida 4</i> <sup>1</sup>	10	17
<i>Média (mm)</i> <sup>1</sup>	<b>34</b>	<b>18</b>
<i>Desvio Padrão (mm)</i> <sup>1</sup>	19	11
<i>Medida 1</i> <sup>2</sup>	70	15
<i>Medida 2</i> <sup>2</sup>	21	29
<i>Medida 3</i> <sup>2</sup>	27	40
<i>Medida 4</i> <sup>2</sup>	43	12
<i>Média (mm)</i> <sup>2</sup>	<b>40</b>	<b>24</b>
<i>Desvio Padrão (mm)</i> <sup>2</sup>	22	13

Nota: <sup>1</sup>referente a medições realizadas em 06 de junho de 2003; <sup>2</sup>referente a medições realizadas em 18 de dezembro de 2003

As Figuras 7.16 e 7.17 apresentam fotos da superfície do pavimento com borracha-agregado imediatamente após a construção e 10 meses após. A Figura 7.18 apresenta foto da superfície do pavimento executado com a mistura convencional. Foi observado, principalmente nos primeiros meses, que alguns grãos de borracha que se encontrava na superfície soltaram-se pelo efeito abrasivo do tráfego.

Até a presente data não foram observadas patologias na superfície dos pavimentos do trecho de referência, nem do trecho com borracha-agregado.



Figura 7.16 – Textura superficial imediatamente após a construção (outubro/2002)



Figura 7.17 – Textura superficial em agosto de 2003



Figura 7.18 – Textura superficial do trecho de referência em agosto de 2003

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho de doutorado e as perspectivas de continuidade da pesquisa.

### 8.1 CONCLUSÕES

Esta pesquisa estudou, experimentalmente, a utilização de borracha reciclada de pneus, proveniente da produção de bandas de rodagem, como aditivo em misturas asfálticas. Dois processos foram testados: processo úmido e processo seco. No processo úmido foram preparados trinta traços diferentes de ligantes contendo borracha moída, caracterizados e, posteriormente, preparadas amostras em concreto asfáltico para avaliação laboratorial. O estudo envolvendo o processo seco investigou diversas variáveis em laboratório e culminou com a execução de um trecho experimental para avaliação dos processos executivos e das propriedades funcionais de camada.

A revisão bibliográfica indicou a importância do tema em nível mundial e balizou o projeto experimental. As pesquisas envolvendo a utilização de borracha reciclada como material de pavimentação, estão presentes nos cinco continentes. Apesar dos relevantes aspectos ambientais que envolvem o tema, a justificativa principal da incorporação de borracha em misturas asfálticas está ligada a melhorias das propriedades mecânicas e funcionais dos materiais de pavimentação.

O estudo da utilização do pó de pneus como modificador de ligantes asfálticos permitiu as seguintes conclusões:

- a) As respostas medidas através de ensaios tradicionais (PN, PA, PF, ME) indicaram como fator mais importante, dentre os analisados, o percentual de borracha seguido da temperatura e tempo de mistura.
- b) Os ensaios utilizados para avaliar a possibilidade de estocagem do ligante asfalto-borracha (ASTM D 5892) realizados nesta pesquisa, demonstraram a importância desta propriedade nos ligantes modificados. O tamanho dos grãos de borracha e a temperatura de mistura influenciam de maneira marcante esta propriedade.

c) Os ensaios de retorno elástico parecem bastante apropriados para qualificação dos ligantes AB, enquanto que os ensaios de ductilidade apresentam resultados opostos aos apresentados pela análise reológica.

d) As medições de viscosidade aparente denotaram a maior dificuldade de se trabalhar com os ligantes AB, dada a necessidade de maiores temperaturas. A adição de borracha eleva bastante a viscosidade dos ligantes e conferem-lhe características de fluido não-newtoniano.

e) A análise reológica realizada com ligantes virgens, envelhecidos a curto e longo prazo indicaram a melhoria das propriedades do ligante como proporcional aos teores de borracha adicionados. Pode-se afirmar que os ligantes modificados com borracha possuem maior resistência ao trincamento e ao acúmulo de deformações plásticas excessivas.

f) Os ensaios reométricos em baixa temperatura, indicaram a maior elasticidade dos ligantes modificados nesta situação. Esta resistência ao trincamento térmico é, também, proporcional a adição de borracha.

g) O PG (grau de desempenho SUPERPAVE™) aumenta tanto em alta quanto em baixa temperaturas passando de PG 64-22 do ligante convencional para PG 76-28 quando 18% de borracha é adicionado.

h) A dosagem de misturas em concreto asfáltico, com emprego dos ligantes asfalto-borracha, apresentaram um consumo de ligante superior ao da mistura convencional e proporcional ao teor de borracha adicionado.

h) Os concretos asfálticos preparados a partir dos ligantes modificados apresentaram melhores propriedades mecânicas (fadiga e deformação permanente) e de durabilidade (abrasão e desagregação) do que o preparado com ligante convencional. Notou-se uma melhoria mais pronunciada quando teores de 12 e 18% de borracha foram utilizados.

i) A mensuração da deformabilidade elástica e da resistência das misturas em diversas temperaturas permite afirmar que as misturas com ligante AB são menos sensíveis a variações de temperatura, tal benefício aparece, mais pronunciadamente, em altas temperaturas.

A investigação envolvendo o processo seco de incorporação de borracha permitiu traçar as seguintes considerações:

- a) A dosagem Marshall de misturas asfálticas indicou que incorporação de borracha causa aumento no consumo de ligante, redução na massa específica, redução na estabilidade e aumento da fluência.
- b) As misturas pétreas com graduação densa, apresentam melhores resultados quando comparadas às misturas descontínuas para serem utilizadas na incorporação de borracha via seca.
- c) O tempo digestão deve ser considerado ao projeto de misturas tipo borracha-agregado, dada a influência deste fator em diversas propriedades mecânicas e de durabilidade das misturas.
- d) A deformabilidade elástica das misturas com incorporação de borracha é menos sensível a variação de temperatura. Nota-se um marcante benefício em situações de baixa temperatura.
- e) Os ensaios de fadiga das misturas borracha-agregado, demonstraram a maior resistência à fratura, quando comparadas à mistura convencional.
- f) Dois aspectos merecem atenção especial na dosagem de misturas e no projeto de pavimentos contendo camadas de borracha-agregado: deformação plástica e desagregação. Tais fatores não se constituem em barreiras para aplicação, mas fatores a serem avaliados em cada situação particular.
- g) A utilização de raspa de pneu como aditivo de concreto asfáltico é bastante atraente do ponto de vista estrutural, entretanto, aspectos referentes à desagregação devem ser avaliados e considerados no projeto.

A respeito da execução do trecho experimental, pode-se afirmar que apesar de ser uma pequena experiência, obteve êxito. A avaliação conjunta com técnicos da SMOV demonstrou que não existem dificuldades adicionais quando se executa revestimento com borracha-agregado. Os levantamentos de superfície mostram claramente o potencial destas camadas na melhoria das propriedades funcionais dos revestimentos asfálticos.

Ficou clara, a existência de viabilidade técnica para execução de revestimentos ou camadas intermediárias, com a utilização de borracha reciclada, tanto com o emprego do processo seco como do processo úmido. Do ponto de vista de desempenho mecânico e de durabilidade pode-se afirmar que o concreto asfáltico preparado com ligante modificado (*just in time*) apresentou os melhores resultados.



Vale ressaltar que o emprego do ligante modificado com borracha, em obras de engenharia, conforme metodologia empregada nesta pesquisa, requer a utilização de um misturador ainda não disponível em nosso país. Sob tal aspecto a incorporação via seca torna-se atrativa, visto que, não são necessários investimentos em equipamentos.

Apesar das comparações, úteis para o entendimento e compreensão, os materiais produzidos a partir do processo úmido e seco de incorporação de borracha não são concorrentes. Cada material possui seu campo de aplicação, que deve ser avaliado em conjunto com o projeto do pavimento e assim, levar em consideração os aspectos de comportamento discutidos na presente pesquisa.

Dada a disponibilidade de comercialização de borracha granulada de pneus no mercado brasileiro, de diferentes tipos e com as mais diversas granulometrias, é imediata a possibilidade da utilização das técnicas e resultados apresentados nesta pesquisa para a transferência de conhecimento para a prática de engenharia. De fato, isto já vem ocorrendo, a utilização do asfalto-borracha no Brasil, apesar de recente, já contabiliza aproximadamente seiscentos quilômetros.

## 8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para continuidade da pesquisa, pode-se indicar:

- a) Ampliação da matriz experimental do asfalto-borracha. Estudo de outras fontes de ligantes e borrachas, bem como novas técnicas de mistura.
- b) Avaliação de ligantes AB, através de técnicas como microscopia eletrônica de varredura e microscopia ótica.
- c) Estudo das propriedades reológicas do ligante e mecânica das misturas considerando o tempo de estocagem do ligante.
- d) Estudo comparativo sobre a influência do processo de desmonte do pneu nas propriedades do ligante.

- e) Estudo reológico mais amplo, utilizando o DSR, para as variáveis estudadas nesta pesquisa. Geração de curvas mestras (tempo  $\times$  temperatura) para os ligantes modificados. Estudo do efeito da viscosidade do ligante nos processos de mistura e compactação do CBUQ.
- f) Preparação de ligantes modificados com borracha considerando a utilização de diluentes e emulsificantes.
- g) Utilização do AB para produção de misturas descontínuas e de misturas especiais tipo SMA e CPA.
- h) Utilização do processo misto de modificação de misturas asfálticas, ou seja, substituir uma parcela do agregado por borracha e utilizar um ligante modificado (AB, SBS e SBR).
- i) Ampliação da matriz experimental para as misturas tipo borracha-agregado. Caracterização à fadiga e deformação permanente de misturas com borrachas de diferentes granulometrias. Estudo aprofundando a respeito do ATR, em misturas agregado-borracha: efeito do volume de vazios, efeito da utilização de fillers enriquecedores do ligante, efeito da estrutura mineral, etc.
- j) Estudo a respeito da utilização de cal, cimento e dope, como aditivo melhorador da adesividade das misturas agregado-borracha.
- k) Utilização do simulador linear de tráfego DAER/UFRGS para avaliação de concretos asfálticos (convencionais e modificados – processo seco e úmido) quanto à deformação permanente e reflexão de trincas.
- l) Estudo do envelhecimento de ligantes e misturas convencionais e modificadas com borracha.
- m) Estudo das propriedades mecânicas e de durabilidade de misturas convencionais e modificadas com diferentes volumes de vazios.
- n) Estabelecimento de modelos de fadiga e deformação permanente, para as misturas com ligantes convencionais e asfalto-borracha, baseando-se em outras técnicas laboratoriais e na análise reológica e no envelhecimento.
- o) Construção de pequenos trechos em concreto asfáltico (diferentes tipos) em locais sem tráfego, para extração de amostras e execução de ensaios de fadiga em diferentes temperaturas

e com diferentes idades. Isto possibilitaria a determinação dos fatores laboratório/campo de envelhecimento e temperatura das misturas ao longo do tempo.

p) Construção de trechos experimentais em rodovias com contagem de tráfego, para avaliação estrutural de pavimentos com misturas preparadas com ligante asfalto-borracha e agregado-borracha.

q) Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho para análise do custo de cada alternativa no ciclo de vida do pavimento.

r) Construção de trechos experimentais utilizando o ligante asfalto-borracha em SAM e SAMI.

s) Avaliação técnica e econômica da utilização do ligante asfalto-borracha como selante de trincas e como selante de juntas, em pavimentos rígidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage.** In: AASHTO. T 283-89. 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Geologia de Engenharia.** Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. p.13-38. 1998.

ADAMS, L. Comunicação pessoal a respeito do emprego de borracha reciclada em pavimentação no estado norte-americano de New Jersey. (via e-mail) Fevereiro 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).** D 2872-97. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 5p. 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures.** D 4867-96. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 5p. 1996

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV).** D652-00. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 5p. 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard specification for asphalt-rubber binder.** D 6114-97. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, p.659-661, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard specification for joint sealants, hot applied, elastomeric type, for Portland cement concrete pavements.** D 3405-95. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, p.317-319, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard specification for joint sealants, hot applied, for concrete and asphalt pavements.** D 3405-97. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, p.320-322, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard specification for polymer-modified asphalt cement for use in pavement construction .** D 5892-97. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 3p. 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR).** D6648-01. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 14p. 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique.** D965-96. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 3p. 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for measuring surface frictional properties using the british pendulum tester.** D303-93. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 5p. 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test methods for rubber property – effect of liquids.** D 471-98. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 9.01, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test methods for rubber products – chemical analysis.** D 297-93. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 9.01, p.1-35, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperature using rotational viscometer.** D4402-02. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 3p. 2002.

ASPHALT INSTITUTE. **HMA construction.** Lexington, Manual Series N°22 (MS-22). 1998.

ASPHALT INSTITUTE. **Manual do asfalto.** Lexington, Manual Series N°4 (MS-4), Traduzido pela Petrobras. 1989. 599p.

ASPHALT INSTITUTE. **Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types.** Lexington, Manual Series N°2 (MS-2), 6 ed. 1995a.141p.

ASPHALT INSTITUTE. **Superpave level 1 mix design.** Lexington, Superpave Series N°2 (SP-2). 1995b.141p.

ASPHALT INSTITUTE. **Superpave – performance grade asphalt – binder specification and testing.** Lexington, Superpave Series N°2 (SP-1). 1994. 69p.

ASPHALT INSTITUTE. **Superpave protocols for modified asphalt binders.** Lexington, NCHRP 9-10 (Preliminary Draft). 2000. 183p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da Ductilidade de Materiais Betuminosos:** ABNT/P-MB-167/NBR 6293. Rio de Janeiro, 1971.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da Viscosidade Saybolt de Materiais Betuminosos a Alta Temperatura:** ABNT/P-MB-517. Rio de Janeiro, 1971.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação do Ponto de Amolecimento de Materiais Betuminosos - Método do Anel e Bola:** ABNT/MB-164/NBR 6560. Rio de Janeiro, 1972.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais Betuminosos - Determinação da Penetração:** ABNT/NBR 6576. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Produtos de Petróleo - Determinação do Ponto de Fulgor e de Combustão em Vaso Aberto de Cleveland:** ABNT/NBR 11341. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos: ABNT/NBR 10004**. Rio de Janeiro, 1997.

BAHIA, H. U.; DAVIES R. Factors controlling the effect of crumb rubber on critical properties of asphalt binders. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologies**, Portland, v.65, p.130-163. 1995.

BALADI, G. Y.; HARICHANDRAN R. S. Asphalt mix design and the indirect test: a new horizon. **Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches**. Philadelphia: William Garter Jr., Ed., ASTM STP 1041. p.86-105. 1989.

BALBO, J. T. **Pavimentos asfálticos – patologias e manutenção**. São Paulo: Editora Plêiade, 1997. 103p.

BELL, C. **Summary report on aging of asphalt-aggregate systems**. SHRP. SR-OSU-A-003A-89-2.121p. Corvallis, 1989.

BELL, C.; WAHAB, Y. A.; CRISTI, M. E.; SOSNOVSKE, D. **Selection of laboratory aging of asphalt-aggregate mixtures**. SHRP. A383. 92p. Corvallis, 1994.

BERTOLO, S. A. M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. São Carlos, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 197p.

BERTOLO, S. A. M.; FERNANDES, J. L.; VILLAVERDE, R. B.; MIGOTTO, D. F. Pavimentação Asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados. **Revista Limpeza Pública**, Associação Brasileira de Limpeza Pública – ABPL. São Paulo, n.54 p.23-58. 2000.

BONEMAZZI, F.; BRAGA, V.; CORRIERI, C.; GIAVARINI, C.; SARTORI, F. Characteristics of polymer and polymer-modified binders. **Transportation Research Record**. Washington, n.1535, p.36-47. 1996.

BINGFU, L. Reducing or eliminating reflection crack by rubberized asphalt membrane. In: REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENTS – ASSESSMENT AND CONTROL (RILEM), Liege. **Proceedings...** 1989. p.273-280.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous mixtures**. DD213. London, 1993. 16p.

BROWN, E. R.; FOO, K. I. **Evaluation of variability in resilient modulus test**. NCAT - National Center for Asphalt Technology. Auburn, report n.91-6. 44p. 1989.

BROWN, E. R.; KANDHAL, P. S.; ZHANG J. **Performance testing for hot mix asphalt**. NCAT - National Center for Asphalt Technology. Auburn, report n.2001-5. 2001.

BROWN, S. F.; BELL, C. A. The prediction of permanent deformation in asphalt pavement. **Journal of Association of Asphalt Pavement Technologists**. v.65, p. 438-476. 1979.

BROWN, E. R.; CROSS, S. A. A national study in hot mix asphalt (HMA) pavements. **Journal of Association of Asphalt Pavement Technologists**. v.62, p. 535-582. 1992.

BROWN, S. F.; GIBB, J. M. Validation experiments for permanent deformation testing of bituminous mixtures. **Journal of Association of Asphalt Pavement Technologists**. Mariland, v.48, p. 255-299. 1996.

BROWN, D. R.; JARED, D.; JONES C., WATSON, D. Georgia's experience with crumb rubber in hot mix asphalt. **Transportation Research Record**, Washington, n.1583, p.45-51. 1997.

BRULÉ B.; DRUON, M. La microscopie de fluorescence appliquée à l'observation de bitumes thermoplastiques. **Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées**. Paris, LCPC. p.11-14. 1975.

CALTRANS. **Asphalt rubber usage guide**. Sacramento: State of California Department of Transpotation 2003. 45p.

CARLSON, D. D.; ZHU, H. An anchor to crumb rubber markets. In: INTERNATIONAL RUBBER FORUM, San Diego. **Proceedings...** v.1. 1999.

CLAYTON, C. R. I.; MILITITSKY, J.; WOODS, R. I. **Earth pressure and earth retaining structures**. Blackie academic and professional. 2 ed. 1993. 398p.

CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS. **Propuesta de norma de ensayo – determinacion de la perdida por desgaste de mezclas bituminosas mediante el empleo de la maquina de Los Angeles ( Ensayo Cantabro)**. NLT – 325/86. Madri, 1986. 3p.

CERATTI, J. A.; RUWER, P. M.; OLIVEIRA, J. A. Estudo do comportamento mecânico de concreto asfáltico com ligante modificado com polímeros. In: 13º ENCONTRO DE ASFALTO DO INSTITUO BRASILEIRO DO PETRÓLEO. Rio de Janeiro. **Anais...** p. 290-303. 1996.

CHARLES, R. Asphalt concrete mix design in Caribbean. **Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches**. Philadelphia: William Garter Jr., Ed., ASTM STP 1041. p.115-136. 1989.

COLOMBIER, G. Fissuration des chaussées – nature et origine des fissures moyens pour maitriser leur remontee. In: REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENTS – ASSESSMENT AND CONTROL (RILEM), Liege. **Proceedings...** 1989. p. 3-22.

CORBETT L.W. Composition of asphalt based on generic fractionation using solvent deasphalting, elution – absorpction chronathography and densimetric characterization. **An. Chem.**, Vol. 41, p.576-579, 1969.

DALY, W. H.; NEGULESCU, I. I. Characterization of asphalt cements modified with crumb rubber from discarded tires. **Transportation Research Record**. Washington, n.1583, p.37-44. 1997.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Concreto asfáltico**. DAER/RS – ES – P 16/98. Porto Alegre, 1998, 21p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Determinação do índice de lamelaridade**. DAER/RS – EL 108/01. Porto Alegre, 2001, 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Adesividade de agregado à ligante betuminoso.** DNER – ME 79/94. Rio de Janeiro, 1994, 2p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso.** DNER – ME 78/94. Rio de Janeiro, 1994, 2p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.** DNER – ME 81/98. Rio de Janeiro, 1998, 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Densidade aparente do corpo de prova de mistura betuminosa.** DNER – ME 77/63. Rio de Janeiro, 1963, 2p.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Determinação da massa específica real, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo.** DAER/RS – EL 105/01. Porto Alegre, 2001.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Determinação da perda por desgaste de misturas betuminosas de graduação aberta (Ensaio Cantabro).** DAER/RS – EL 215/01. Porto Alegre, 2001, 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos modificados por polímero, pelo método do ductilômetro.** DNER – ME 382/99. Rio de Janeiro, 1999, 7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cantabro.** DNER – ME 383/99. Rio de Janeiro, 1999, 2p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de pavimentação:** DNER. Rio de Janeiro, 2 ed., 1996, 320p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos:** DNER. Rio de Janeiro, 1998b, 242p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Materiais betuminosos líquidos e semi sólidos - determinação da densidade e da massa específica:** DNER – ME 193/96. Rio de Janeiro 1996, 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas à quente – ensaio Marshall:** DNER – ME 043/95. Rio de Janeiro 1995, 11p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência:** DNER – ME 133/94. Rio de Janeiro 1994, 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral.** DNER – ME 138/94. Rio de Janeiro, 1994, 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Pavimentação – Pré misturado à quente com asfalto polímero - Camada porosa de atrito .** DNER – ME 386/99. Rio de Janeiro, 1999, 15p.



DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Pesquisa de asfaltos modificados por polímeros**: DNER – ME. Rio de Janeiro, Tomos I, II e III. 1998a.

EPPS, A. L.; HARVEY, J. T.; KIM, R. Y.; ROQUE, R. Structural requirement of bituminous paving mixtures. Transportation in the new millennium – state of the art and future direction. **Transportation Research Board**, Washington, 2000. 6p.

EPPS, A. L. **Thermal Behavior of crumb-rubber modified asphalt concrete mixtures**. Berkeley, 1997. Dissertation (Doctor of Philosophy) – ITS/UCB. 391p.

EPPS, J. A. Uses of recycled rubber tires in highways. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 198, **Transportation Research Board**, Washington, 1994. 161p.

EARTHSHIP GLOBAL WEBSITE. <http://www.earthship.org>. (site consultado em maio de 2003).

ESTAKHRI, C. K.; BUTTON, J. W. FERNANDO, E. G. Use, availability, and cost effectiveness of asphalt rubber in Texas. **Transportation Research Record**. Washington, n.1339, p.30-37. 1992.

FAGER, G. A. Asphalt-rubber overlay on rubblized concrete pavement on I-135. **Transportation Research Record**. Washington, n.1543, p.71-78. 1996.

FAGER, G. A. Use of rubber in asphalt pavement: Kansas experience. **Transportation Research Record**. Washington, n.1436, p.88-97. 1994.

FOLHA DO MEIO AMBIENTE. **Uso de pneu na construção civil**. Brasília, 118 ed., agosto 2001

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Superpave binder specification**. FHWA. Washington, 2002, 115p. [www.tfhrc.gov/](http://www.tfhrc.gov/). (artigo consultado em Junho de 2002).

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION / U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Crumb Rubber Modifiers (CRM) in asphalt pavements**. FHWA-SA-95-056. Washington, 1995, 152p.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION / U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Superpave mixture design guide**. Washington, 2001, 18p.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION / U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **User guidelines for waste and byproduct materials**. FHWA-RD-97-148 . Washington, 1997, 152p. [www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/begin.htm](http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/begin.htm). (artigo consultado em Abril de 2002).

FEDROFF, D.; AHMAD, S.; SAVAS, B. Z. Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber. **Transportation Research Record**. Washington, n.1532, p.86-72. 1996.

FIORI, J. Petrobrás tira óleo de pneu usado cooperando com o combate da dengue. **Revista Limpeza Pública**, Associação Brasileira de Limpeza Pública – ABPL. São Paulo, n.47 p.2-5. 1998.

GALLEGO, J.; DEL VAL, M. A.; TOMÁS R. A Spanish experience with asphalt pavements modified with tire rubber. In: ASPHALT RUBBER 2000, Vilamoura. **Proceedings...** 2000. p.673-687.

GOETZ W. H. The evaluation of asphalt concrete mix design. **Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches**. Philadelphia: William Garter Jr., Ed., ASTM STP 1041. p.5-14. 1989.

GONÇALVES, F. J. P. **Estudo experimental do desempenho de pavimentos flexíveis à partir de instrumentação e ensaios acelerados**. Porto Alegre, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 359p.

GONÇALVES, F. P.; CERATTI, J. A.; SOMACAL, L; Investigação do desempenho de misturas asfálticas convencionais e modificadas com polímeros: proposição de um estudo envolvendo ensaios acelerados de pavimentos com um simulador linear de tráfego. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE MANUTENÇÃO E RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS E CONTROLE TECNOLÓGICO. São Paulo. **Anais...** 2000.

GOOSWILLIGEN, G. e VONK, W.C. – Shell Chemicals papers, TPE 6.3.2. 1994.

GOWDA, G. V.; HALL, K. D.; ELLLIOT, R. P. Arkansas experience with crumb rubber modified mixes using Marshall and Strategic Highway Research Program – Level I design methods. **Transportation Research Record**. Washington, n.1530, p.25-33. 1996.

GRIPPI, S. **Lixo, reciclagem e sua história: guia para prefeituras brasileiras**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001. 134p.

GUOQUIANG, L.; YONGQI, L.; METCALF, J. B; PANG, S. Elastic modulus prediction of asphalt concrete. **Journal of materials in civil engineering**. Washington, ASCE, v 11, n.3, p.236-241. 1999.

HARVEY, J. T. **Mix design compaction procedures for hot-mix asphalt concrete and rubber-modified asphalt concrete mixtures**. Berkeley, 1992. Dissertation (Doctor of Philosophy) – University of California at Berkeley. 450p.

HARVEY, J. T; BEJARANO, M; FANTANO A; HEATH, A.; SHIN, H. **Performance of Caltrans asphalt concrete and asphalt-rubber hot mix overlays at moderate temperatures – accelerated pavement testing evaluation**. <http://www.ksu.edu/pavements/trb/a2b9/index.htm>. 2000 (Site consultado em março de 2003).

HEITZMAN, M. Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. **Transportation Research Record**. Washington, n.1339, p.1-8. 1992.

HEYSTRAETEN, G, V.; MORAUX C. Ten year's experience of porous asphalt in Belgium. **Transportation Research Record**. Washington, n.1265, p.34-40. 1990.

HICKS, R. G. Moisture damage in asphalt concrete. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175, **Transportation Research Board**, Washington, 1991. 91p.

HICKS, R. G.; EPPS, J. A. **Life cycle cost analysis of asphalt-rubber paving materials**. Final report to Rubber Pavements Association. 1999.

HOLLANDA, E. Herança Indigesta. **Istoé**. Cajamar: Domingo Alzugaray, Ed., n.1763, p.74-75. 2003.

HOMEM, T. R. **Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras**. Porto Alegre, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 111p.

HUANG, B.; MOHAMMAD, L. N.; GRAVES, P. S.; ABADIE, C. Louisiana experience with crumb modified hot-mix asphalt pavement. **Transportation Research Record**. Washington, n.1789, p.1-13. 2002.

HUANG, H. Y. **Pavement Analysis and Design**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. 805p.

HUNTER R. N. **Bituminous mixtures in road construction**. London: Thomas Telford. 1994. 441p.

JACOBS, M. M. J.; HOPMAN, P. C.; MOLENAAR, A. A. Characterization of fracture in asphaltic mixes based on a molecular approach. **Transportation Research Record**. Washington, n.1535, p.22-28. 1996.

KANDHAL, P. S.; KOEHLER, W. S. Marshall mix design method: current practice. **Journal of Association of Asphalt Pavement Technologists**. v.54, p. 284-303. 1985.

KANDHAL, P. S. **Moisture susceptibility of HMA mixes: identification of the problem and recommended solution**. NCAT - National Center for Asphalt Technology. Auburn, report n.92-6. 1992.

KANDHAL, P. S. **Waste materials in hot mix asphalt – an overview**. NCAT - National Center for Asphalt Technology. Auburn, report n.92-6. 1992.

KRIZEK, R. J.; SOBHAN, K.; BAKER, W. H. Waste fiber in cement-stabilized aggregate base course material. **Transportation Research Record**. Washington, n.1486, p.97-106. 1995.

LARSEN, P. E. Eight-year performance evaluation of an asphalt rubber hot mix pavement. In: NATIONAL SEMINAR ON ASPHALT RUBBER, Kansas City. **Proceedings...** 1989.

LEITE, L. F. M. **Estudo de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. Rio de Janeiro, 1999. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.

LEITE, L. F. M.; MOTTA, L. M. G.; BERNUCCI L. B; SOARES, J. B. Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboratory. In: ASPHALT RUBBER 2000, Vilamoura. **Proceedings...** 2000. p.309-318.

LEITE, L. F. M.; TONIAL, I. A. Qualidade dos cimentos asfálticos brasileiros segundo as especificações SHRP. In: 12º ENCONTRO DE ASFALTO DO INSTITUTO BRASILEIRO DO PETRÓLEO, Rio de Janeiro. **Anais...** 1994.

LIANG, R. Y.; LEE, S. Short-term and long-term aging behavior of rubber modified asphalt paving mixtures. **Transportation Research Record**. Washington, n.1530, p.10-17. 1996.

LUND, H. **The McGraw Hill recycling handbook**. New York: Mc Graw Hill. 1993.

MADAPATI, R. R.; LEE, K. W.; MANNING, F. J.; FRANCO, C. A. Feasibility of crumb rubber use for asphalt pavement construction. **Transportation Research Record**. Washington, n.1530, p.64-71. 1996.

MAHBOUB, C. K.; MASSIE, P. R. Use of scrap tires chips in asphaltic Membrane. **Transportation Research Record**. Washington, n.1530, p.59-63. 1996.

MAUPIN JR., G. W. Hot mix asphalt rubber applications in Virginia. **Transportation Research Record**. Washington, n.1530, p.18-24. 1996.

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

METCALF, J. B. Application of full-scale accelerated pavement testing. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 235, **Transportation Research Board**, Washington, 1996. 110p.

MERIGHI, J. V. **Estudo da deformação permanente de misturas asfálticas em ensaios de laboratório**. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Politécnica, Universidade de São Paulo. 275p.

MINISTÉRIO DA SAÚDE – MS. <http://www.saude.gov.br>. Brasília, 2002. (Site consultado em março de 2002).

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. <http://www.mma.gov.br/conama>. Brasília, 2003. (Site consultado em setembro de 2003).

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. São Paulo, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Politécnica, Universidade de São Paulo. 258p.

MONISMITH, C. L.; FINN F. N.; VALLERGA B. A. A comprehensive asphalt concrete design system. **Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches**. Philadelphia: William Garter Jr., Ed, ASTM STP 1041. p.39-71. 1989.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 2ed. New York: John Wiley and Sons. 1984.

MOURA, E. **Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas**. São Paulo, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola politécnica, Universidade de São Paulo. 122p.

NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de experimentos**. Porto Alegre, (Caderno de Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987.

NEWCOMB, D. E.; STROUP-GARDINER, M.; KIM J. R.; ALLEN, B.; WATTENHOFFER-SPRY, J. **Polymerized crumb rubber modified mixtures in Minnesota**. Department of Civil and Mineral Engineering – University of Minnesota and Minnesota DOT . Maplewood, MN/RC 94/08. 1994. 181p.

NORME FRANÇAISE NF P 98-253-1 – Déformation Permanente des mélanges hydrocarbonés. Paris, 1991, 10p.

NÚÑEZ, W. P. **Análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basaltos alterados**. Porto Alegre, 1997. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 294p.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A.; BRITO, L. A.; VIVIAN, J. Modelos de estimativa de temperaturas de pavimentos: contribuição ao estudo de afundamentos nas trilhas de roda em corredores de ônibus de Porto Alegre. In: 12ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA. Aracaju. **Anais...** 2003.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. São Carlos, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 251p.

ODA, S.; FERNANDES JUNIOR, J. L. Resultados da avaliação de asfalto-borracha através de ensaios tradicionais e de ensaios da especificação Superpave. In: XIV CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. Gramado. **Anais...** p.577-589. 2000.

OGURTSOVA, J.; BIRMAN S.; COELHO V. **Concreto Asfáltico**. DER Paraná, Curitiba, 2 ed. 1999, 151p.

PAGE, G. C.; RUTH, B. E.; WEST, R. C. Florida's approach using tire rubber in asphalt concrete mixtures. **Transportation Research Record**. Washington, n.1339, p.16-22. 1992.

PALMA, S. L.; VIERA, C. S.; CERATTI, J. A.; NÚÑEZ, W. P. Aplicação de geotêxteis para restauração de pavimentos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE MANUTENÇÃO E RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS E CONTROLE TECNOLÓGICO. São Paulo. **Anais...** 2000.

PARK, T.; COREE, B. J.; LOVELL C. W. Evaluation of pyrolyzed carbon black from scrap tires as additive in hot mix asphalt. **Transportation Research Record**. Washington, n.1530, p.43-50. 1996.

PARK, A. A.; LEE, K.; SALGADO, R.; COREE, B. J. Use of pyrolyzed carbon black as additive in hot mix asphalt. **Journal of Transportation Engineering**. New York, ASCE, v.123, n.6, p.489-494. 1997.

PEARCE, D.; MAEKANDYA A.; BARBIER, E. B. **Blueprint for green economy**. London: Earthscan Publications, 5v. 1989.

PINTO, S. **Estudo de comportamento a fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Rio de Janeiro, 1991. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ. 477p.

PONNIAH, E. J.; KENNEPOHL, G. J. Crack sealing in flexible pavements: a life-cycle cost analysis. **Transportation Research Record**. Washington, n.1529, p.86-94. 1996.

PREUSSLER, E. S. **A consideração da resiliência dos solos em projeto de pavimentos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 8, Porto Alegre. **Anais...** p. 70-82. 1986.

RAAD, L.; SABOUNDJIAN, S.; CORCORAN J. Remaining fatigue life analysis: a comparison between conventional dense-graded asphalt concrete and gap-gaped asphalt rubber hot mix. **Transportation Research Record**. Washington, n.1388, 1993.

READ, J. M.; COLLOP A. C. Practical fatigue characterization of bituminous paving mixtures. **Journal of the Association of Asphalt Paving**. v.66. p. 74-101. St. Paul, 1997.

RIBEIRO R. B. **Asfalto ecológico é usado no RS**. Correio do Povo. Porto Alegre, 20 de agosto de 2001.

RIBEIRO R. B. **Unidade de Xisto recicla 1 milhão de pneus**. Correio do Povo. Porto Alegre, 24 de fevereiro de 2002.

RIPOLI, F.; KHOLER, R.; WYPYSZYNSKI, F. **Estudo comparativo entre traços de argamassa com agregados alternativos para execução de blocos com garrafa PET**. In: V SEMINÁRIO – DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. São Paulo. **Anais...** p. 91-100. 2002.

ROAD RESRESEARCH LABORATORY – RRL . **Bituminous materials in road construction**. Department of scientific and industrial research. London, 1962.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN E. R.; DUNNING, R. L. Investigation and evaluation of ground tire rubber in hot mix asphalt. **National Center for Asphalt Technology**. Auburn, n.89-3. 1989. 172p.

RODRIGUES, R. M. **Estudo do trincamento dos pavimentos**. Rio de Janeiro, 1991. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ. 176p.

ROSTLER, F. S.; WHITE, R. M. **Fraction components of asphalts**. 1959.

RUBBER PAVEMENT ASSOCIATION – RPA. **Asphalt-rubber / Rubberized asphalt – there is the difference**. Phoenix, 1999. 2p. <http://www.rubberpavements.org/library/> (artigo consultado em Maio de 2000).

RUBBER PAVEMENT ASSOCIATION – RPA. **Noise reduction with asphalt-rubber**. Phoenix, 2000. 4p. <http://www.rubberpavements.org/library/> (artigo consultado em Maio de 2000).

RUTH, B. E.; TIA M.; BADU-TWENEBOAH K. The role of asphalt in rational mix design and pavement performance. **Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches**. Philadelphia: William Garter Jr., Ed., ASTM STP 1041. p.72-85. 1989.

SABOUNDJIAN, S.; RAAD, L. Performance of rubberized asphalt mix in Alaska. **Transportation Research Record**. Washington, n.1583, p. 52-62. 1997.

SACRAMENTO COUNTY. **Report on the status of rubberized asphalt traffic noise reduction in Sacramento County**. Department of Environmental Review and Assessment. Sacramento. 1999. <http://www.rubberpavements.org/library/> (artigo consultado em Maio de 2000).

SAINTON, A. Advantages of asphalt rubber binder of porous asphalt concrete. **Transportation Research Record**. Washington, n.1265, p.69-86. 1990.

SATO, S. Fabricante e importadores de pneus terão de destruir produto usado. **O Estado de São Paulo**, São Paulo. p.18, 27 ago., 1998.

SCHNORMELER, R. H. Use of asphalt rubber on low cost, low volume streets. **Transportation Research Record**. Special report: Low volume roads: Washington, n.160, p.180-185. 1975.

SHIN, E. E.; BHURKE, E. S.; ROSVELD, S.; LAWRENCE, T. D. Microstructure, morphology, and failure modes of polymer-modified asphalts. **Transportation Research Record**. Washington, n.1535, p.61-73. 1996.

SIDDIQUI, Z, M.; TRETHERY, M. W.; ANDERSON, D. A. Variables affecting Marshall test results. **Transportation Research Record**. Washington, n.1171, p.139-171. 1988.

SILVA, L. S. **Preparação e caracterização de ligantes asfálticos modificados com polímeros**. Porto Alegre, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 107p.

SILVA L. S.; FORTE M. C.; SPECHT L. P.; CERATTI J. A. P. Polímeros modificadores asfálticos. **Transportes**. Rio de Janeiro, v.10, n.1, 2002. p. 84-106.

SILVA L. S.; SPECHT L. P.; CERATTI J. A. P.; FORTE M. C.; ROSSINI, G. Utilização do ensaio de inchamento na seleção de polímeros como modificadores asfálticos. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS / IX INTERNATIONAL MACROMOLECULAR COLLOQUIUM. **Anais...** 2001. p. 979- 981.

SILVA, P. D. **Estudo do reforço de concreto de cimento Portland (whitetopping) na pista circular experimental do Instituto de Pesquisas Rodoviárias**. Rio de Janeiro, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ. 358 p.

SOUZA, J. B.; CRAUS, J.; MONISMITH C. L. **Summary report on permanent deformation in asphalt concrete**. SHRP. SR-A/IR-91-104. 125p. Whasington, 1991.

SOUSA, J. B.; FONSECA, P.; FREIRE, A.; PAIS, J. Comparação da vida à fadiga e deformação permanente entre misturas com betume modificado com borracha reciclada de pneus convencionais. Relatório Consulpav EST 99-07. Portugal, 1999.

SPECHT, L. P. **Utilização de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas**. Porto Alegre, 2002. Exame de Qualificação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 30p.

SPECHT L. P.; CERATTI J. A. P.; PALUDO I. Estudo laboratorial das adesividade e do desgaste de misturas asfálticas com borracha. In: XVI CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. **Anais...** v.1. 2002. p. 195- 206.

STROUP-GARDINER, M.; CHADBOURN, B.; NEWCOMB, D. E. Babbitt, Minnesota: Case study of pretreated crumb rubber modified asphalt concrete. **Transportation Research Record**. Washington, n.1530, p.34-42. 1996.

TAKALLOU, B. H.; BAHIA, H. U.; PERDOMO, D., SCHWARTZ, R. Use of Superpave technology for design and construction of rubberized asphalt mixtures. **Transportation Research Record**. Washington, n.1583, p.71-81. 1997.

TAKALLOU, B. H.; HICKS, R. G. Development of improvement mix and construction guidelines for rubber-modified asphalt pavements. **Transportation Research Record**. Washington, n.1171, p.113-120. 1988.

TAKALLOU, B. H.; SAINTON A. Advances in technology of asphalt paving material containing used tired rubber. **Transportation Research Record**. Washington, n.1339, p.23-29. 1992

TANGELLA, S. C. S. R.; CRAUS J.; DEACOM, J. A.; MONISMITH, C. L. **Summary report on fatigue response of asphalt mixtures**. SHRP. TM-UCB-A-003A-89-3. Berkeley, 1990. 158p.

TAYEBALI, A. A.; DEACOM, J. A.; COPLANTZ, J. S.; FINN, F. N.; MONISMITH, C. L. Fatigue responses of asphalt-aggregate mixes. **Strategic Highway Research Program**. A-404. 1994. 309p.

TAYEBALI, A. A.; DEACOM, J. A.; COPLANTZ, J. S.; MONISMITH, C. L. Modeling fatigue responses of asphalt aggregate mixtures. **Journal of Association of Asphalt Pavement Technologists**. v.62, p. 385-421. 1993.

TROY, K.; SEBAALY, P. E.; EPPS, J. A. Evaluation systems for crumb rubber modified binders and mixtures. **Transportation Research Record**. Washington, n.1530, p.3-10. 1996.

ULLIDTZ, P. **Pavement Analysis**. New York: Elsevier Science Publishing Company Inc., 1987. 318p.

VAN DER ZWAN, J. T.; GOEMAN, H. J. A. J. G.; SWART, J. H.; OLDENBURGER R. H. Porous asphalt wearing courses in the Netherlands: state of the art review. **Transportation Research Record**. Washington, n.1265, p.95-110. 1990.

VIANA, A.; MOTTA, L. M. G.; DOMINGUES R. G. Ensaio de compressão axial em CBUQ – uma nova técnica de medição de deformações In: XVII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. **Anais...** v.1. 2003. p. 30- 40.

VISSER, A. T. VERHAEGHE, B. Bitumen-rubber: lessons learned in South Africa. In: ASPHALT RUBBER 2000, Vilamoura. **Proceedings...** 2000. p33-51.

VILCHES, G. E. M. **Estudo de sistemas anti-reflexão de trincas na restauração de pavimentos asfálticos**. São José dos Campos, 1996. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – ITA.



- VON QUINTUS, H. L.; SCHEROCMAM J.; HUGES C. Asphalt-aggregate mixtures analysis system: philosophy of the concept. **Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches**. Philadelphia: William Garter Jr., Ed., ASTM STP 1041. p.15-38. 1989.
- WAHHAB, H. A.; ASI, M. I.; RAMANDHAN, R.H. Modeling resilient modulus and temperature correction for Saudi roads. **Journal of Materials in Civil Engineering**. p. 298-305. 2001.
- WAY, G. B. **Flagstaff I-40 asphalt rubber overlay project, nine years of success**. Transportation Research Record, 78<sup>th</sup> Annual Meeting. Washington, 2000.
- WAY, G. B. OGFC meets CRM: Where the rubber meets the rubber: 12 years of durable success. In: ASPHALT RUBBER 2000, Vilamoura. **Proceedings...** 2000b. p.15-32.
- WAY, G. B. OGFC meets CRM: Where the rubber meets the rubber: 15 years of durable success. In: ASPHALT RUBBER 2003, Brasilia. **Proceedings...** 2003. p.49-63.
- WEGAN, V.; BRULÉ B. Comparison entre la microstruture des bitumes polymers tells quells et dans les enrobes spéciaux. **Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées**. Paris, LCPC. p.3-16. 1999.
- WITHE, T. D. Marshall procedure for design and quality control of asphalt mixtures. **Journal of Association of Asphalt Pavement Technologists**. v.54, p. 265-284. 1985.
- YODER, E. J. **Principles of Pavement Design**. London: John Wiley & Sons Inc., 1959. 569p.
- YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design**. New York: John Wiley & Sons Inc., ed. 2, 1975. 711p.
- YONDELL, O. Y.; SMITH, R. B. Toward maximum performance mix design for each situation. **Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches**. Philadelphia: William Garter Jr., Ed., ASTM STP 1041. p.106-114. 1989.
- YOUSEFI, A. A.; AIT-KADI, A.; ROY, C. Effect of used-tired-derived pyrolytic oil residue on the properties of polymer-modified asphalts. **Fuel**. Amsterdam, Elsevier, n.79. p.975-986. 2000.
- ZAMAN, A. A.; FRICKE, A. L.; BEATTY, C. L. Rheological properties of rubber-modified asphalt. **Journal of Transportation Engineering**. New York, ASCE, v.121, n.6, p.461-467. 1995.
- ZANZOTTO, L.; KENNEPOHL, G. J. Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt. **Transportation Research Record**. Washington, n.1530, p.51-58. 1996.
- ZHU, H.; CARLSON, D. D. A spray based crumb rubber technology in highway noise reduction application. Tempe, 1999. 12p. <http://www.rubberpavements.org/library/> (artigo consultado em Maio de 2000).

## **ANEXO I – CARACTERIZAÇÃO DAS BORRACHAS**

## **ANEXO I – CARACTERIZAÇÃO DAS BORRACHAS**

Neste Anexo está apresentada a caracterização das borrachas utilizadas e de outras provenientes do desmonte de pneus convencionais usados.

Buscou-se três tipos de borracha provenientes de pneumáticos. O primeiro grupo (duas amostras com tamanhos diferentes) é proveniente de pneus velhos e foi doado pela empresa Industrial Batistela Artefatos de Borracha LTDA. No processo da obtenção do pó, os pneus são previamente cortados e passam por processo criogênico, para ficarem no tamanho em que são apresentados. O segundo grupo é proveniente da indústria de produção de bandas de rodagem e foi doado pela empresa Vipal Borrachas S.A. (quatro amostras com distintas granulometrias e processos de obtenção). O terceiro grupo consta de raspa de pneu, proveniente da preparação de pneus para o processo de recauchutagem (apenas uma amostra).

## 1. CARACTERIZAÇÃO DAS BORRACHAS

### 1.1 ASPECTOS MORFOLÓGICOS

A forma de obtenção e a composição de cada amostra de borracha levam a características morfológicas distintas. A textura e forma das partículas influenciam nas misturas, tanto no cimento asfáltico quanto no concreto betuminoso. O objetivo é identificar características peculiares de cada amostra e tentar verificar, através de meios óticos, um padrão morfológico relacionado ao método de obtenção da amostra, sua fonte ou composição.

Em uma primeira tentativa foram analisadas, visualmente, as 07 amostras disponíveis, cujas fotos encontram-se nas Figuras 1.1 a 1.3. Nota-se claramente a diferença de tamanho de partícula de cada grupo. As amostras denominadas Batistela (Figura 1.1) são proveniente de pneus de veículos comerciais e de passeio, moídos em moinho, através do processo criogênico, a diferença de ambas é apenas o tamanho. Nas amostras apresentadas na Figura 1.2 (Amostras Vipal) a matéria prima é a borracha de fabricação de bandas de rodagem para recauchutagem de pneumáticos, moídas em processo criogênico. Na Figura 1.3, são também, apresentadas amostras provenientes da empresa Vipal. A amostra (a) é proveniente do mesmo processo de produção de bandas, entretanto, é apenas moída ou cortada em moinho de facas. A amostra (b) da mesma Figura 1.3 é a Raspa de pneu, proveniente do processo de preparação da carcaça do pneu para receber nova banda.

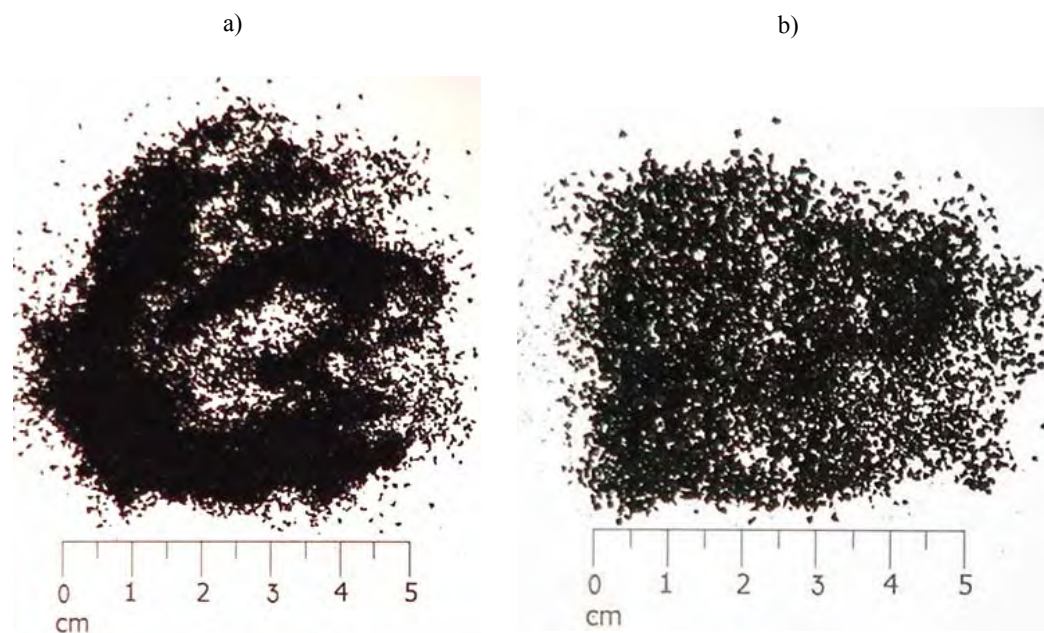


Figura 1.1 – Fotografia digital  
 a) Amostra Batistela 30 mesh  
 b) Amostra Batistela 0,6 - 2 mm

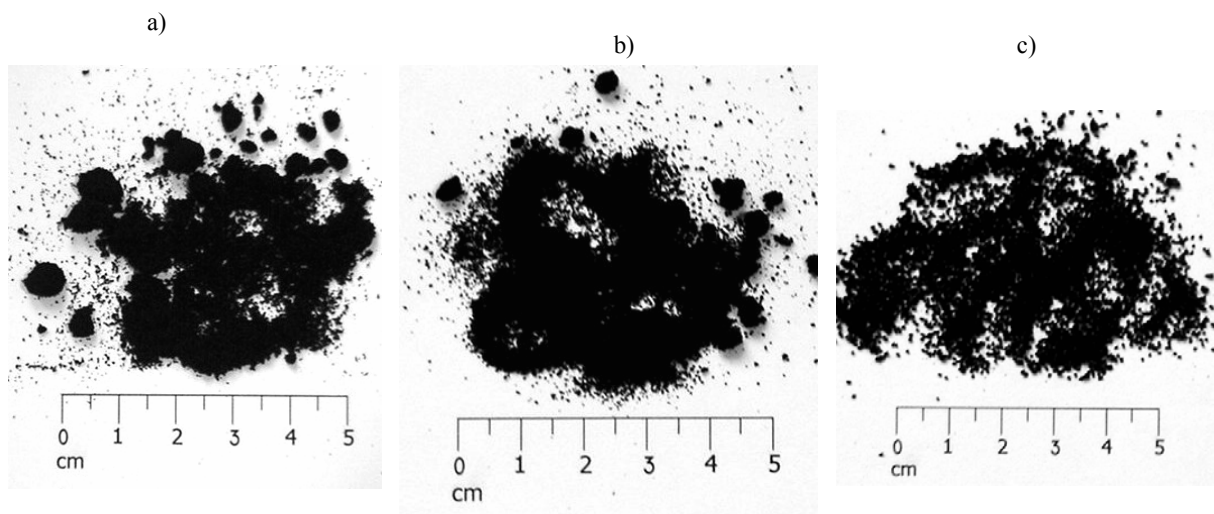


Figura 1.2 – Fotografia digital  
 a) Amostra Vipal 50 mesh  
 b) Amostra Vipal 30 mesh  
 c) Amostra Vipal > 30 mesh

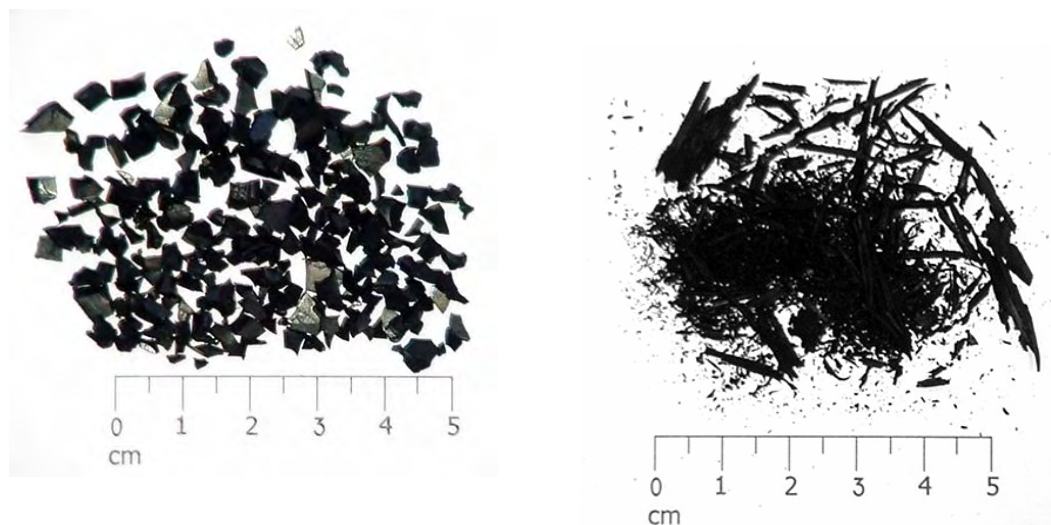


Figura 1.3 – Fotografia digital  
a) Amostra Vipal Cisalhada  
b) Amostra Vipal Raspa

### 1.1.2- Microscopia Ótica

Foi feita uma tentativa de se observar a morfologia das amostras de borracha, através de um microscópio ótico, entretanto, sua alta resolução, acima de 50 X, dificultou a visualização das partículas inteiras de borracha. A qualidade das imagens obtida eram muito inferiores àquelas obtidas na microscopia eletrônica de varredura e, por este motivo, este tipo de análise foi abandonado.

### 1.1.3- Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Para caracterização física, no que diz respeito, principalmente, ao formato e textura dos grãos, foram realizadas junto ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS a preparação das amostras (metalização com ouro em atmosfera de vácuo) e a realização de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura, apresentados nas Figuras 1.4 a 1.10.

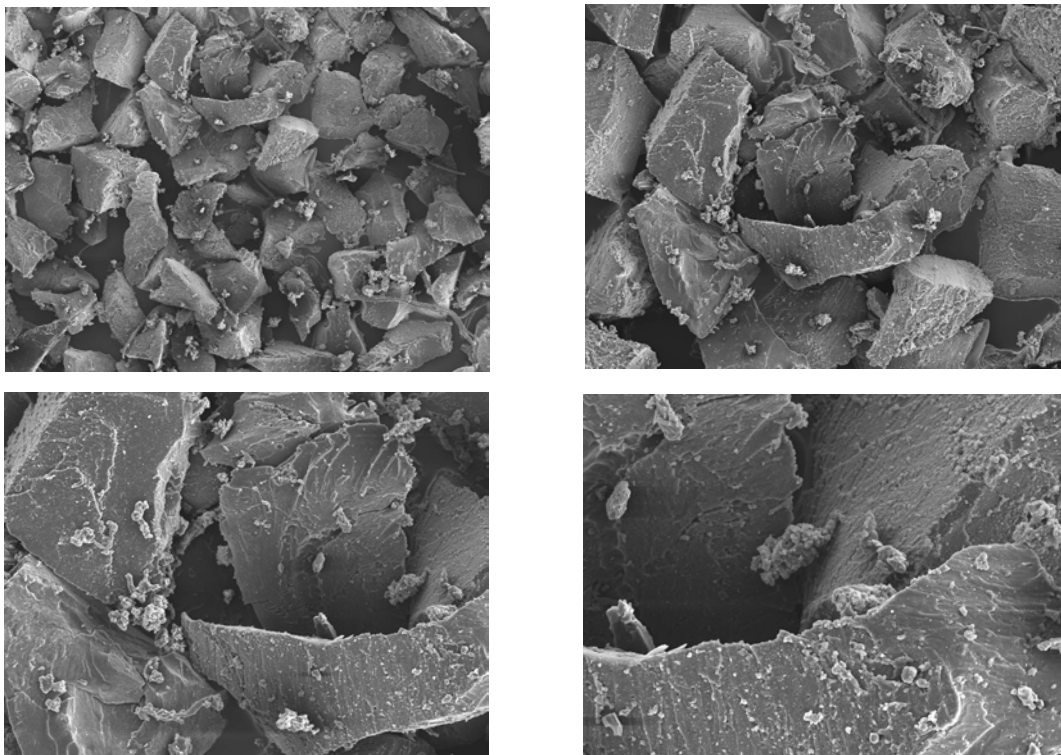


Figura 1.4 – Imagem de MEV, aumento de 25, 50, 100 e 200x – Amostra Batistela 30 mesh

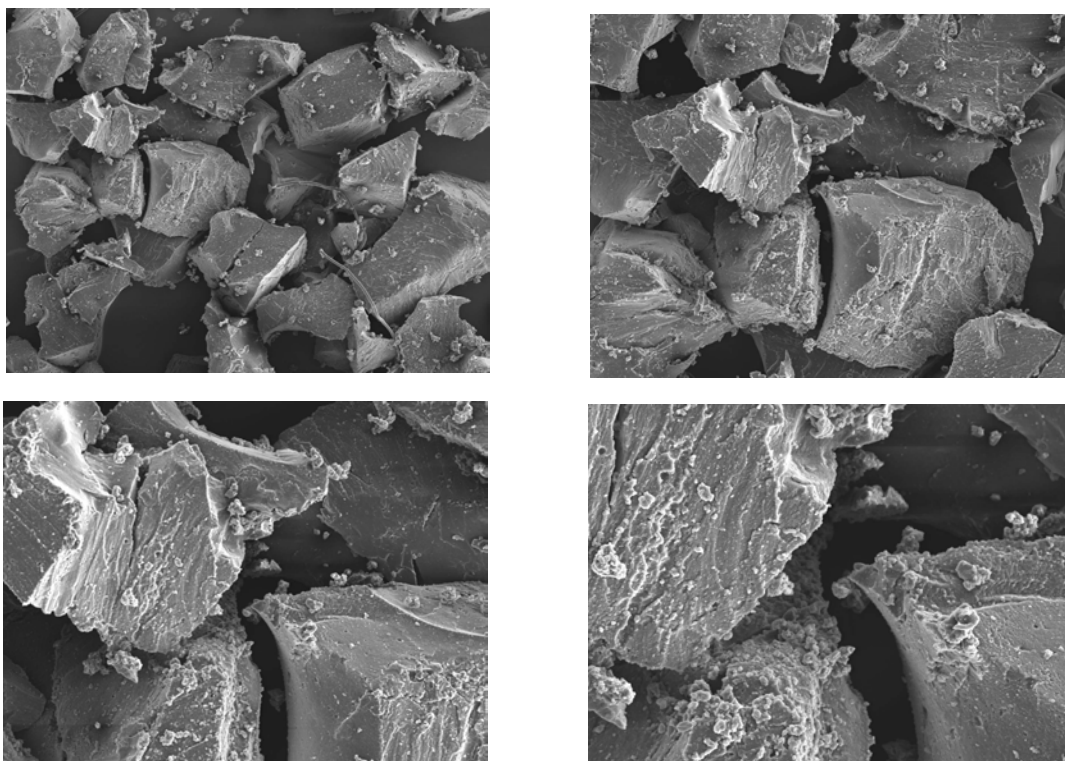


Figura 1.5 – Imagem de MEV, aumento de 25, 50, 100 e 200x – Amostra Batistela 0,6 - 2 mm

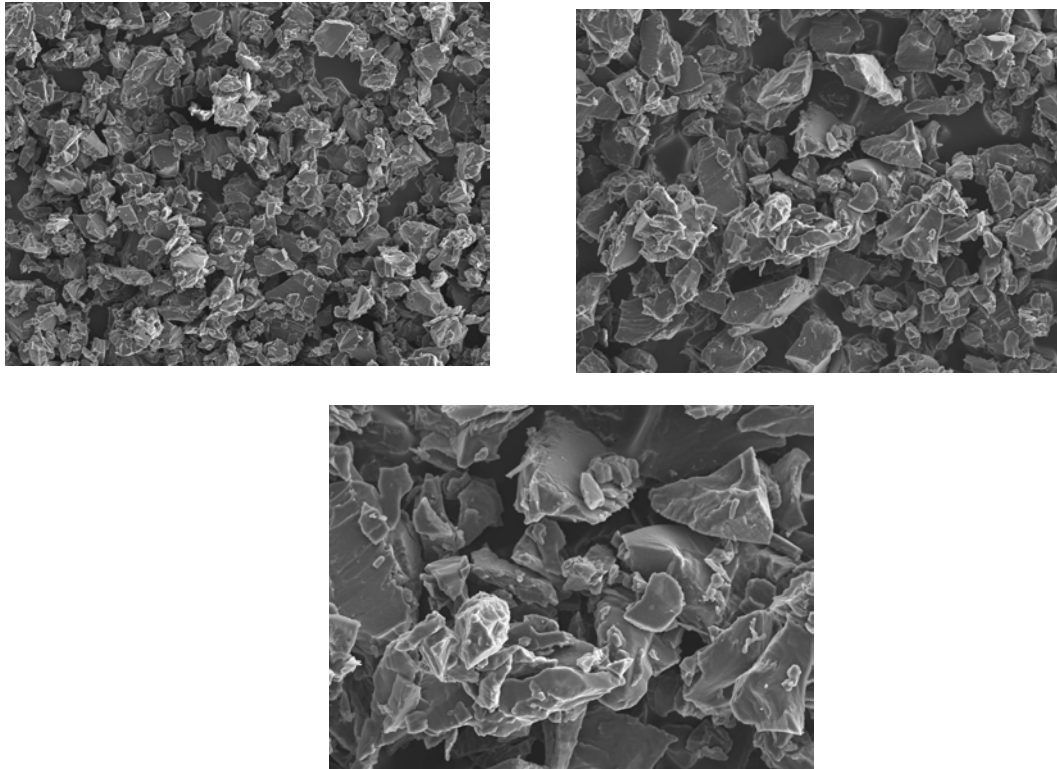


Figura 1.6 – Imagem de MEV, aumento de 50, 100 e 200x – Amostra VIPAL 50 mesh

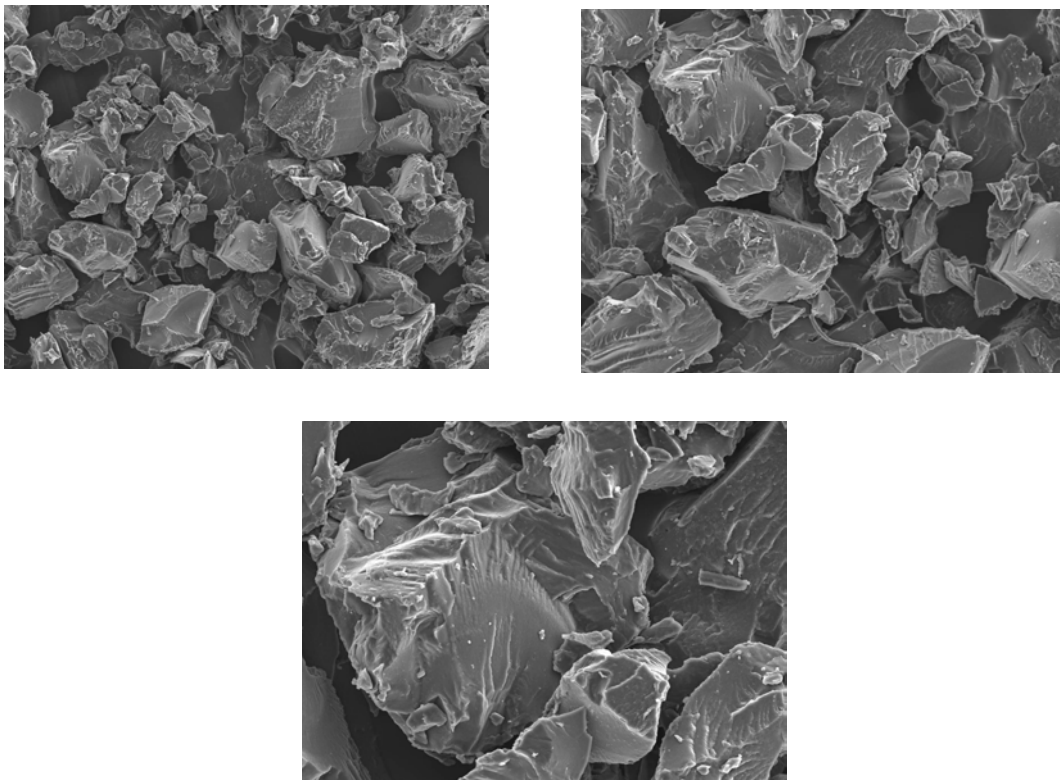


Figura 1.7 – Imagem de MEV, aumento de 50, 100 e 200x – Amostra VIPAL 30 mesh



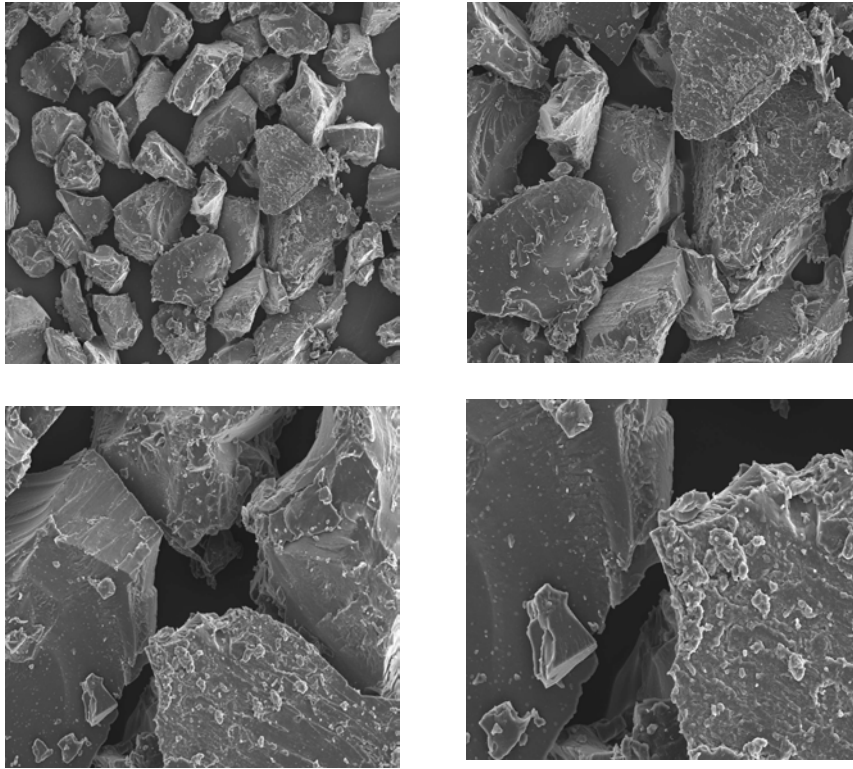


Figura 1.8 – Imagens de MEV, aumento de 25, 50, 100 e 200x – Amostra VIPAL >30 mesh

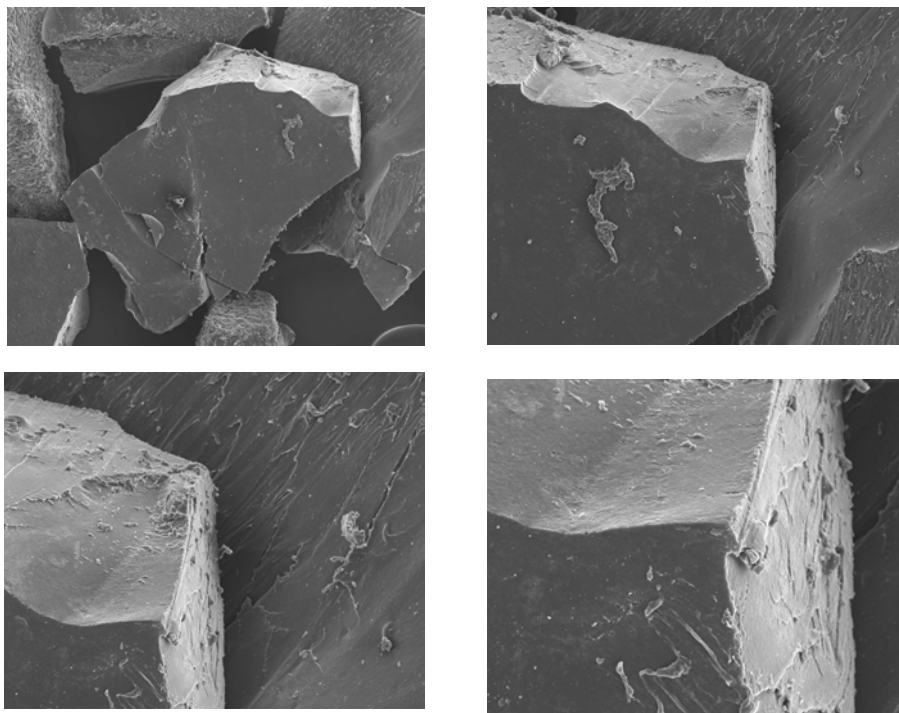


Figura 1.9 – Imagens de MEV, aumento de 20, 50, 100 e 200x – Amostra VIPAL Cisalhada

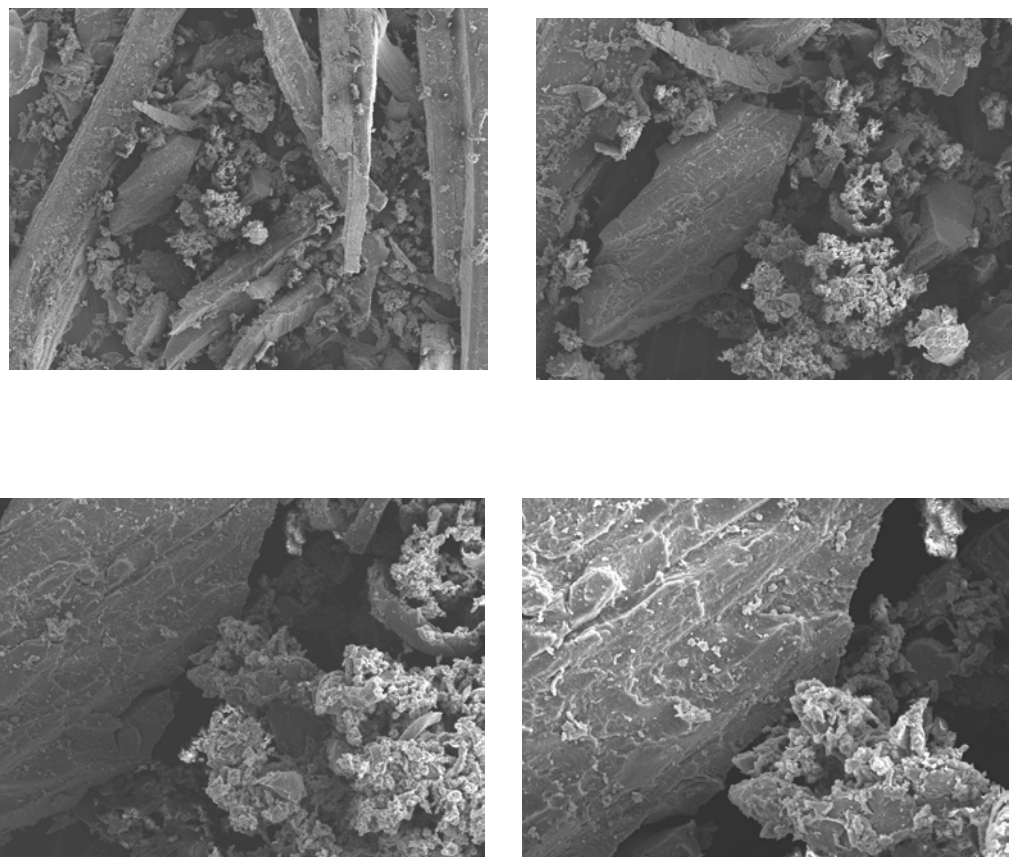


Figura 1.10 – Imagens de MEV, aumento de 20, 50, 100 e 200x – Amostra VIPAL Raspa

A análise das imagens permite traçar algumas conclusões:

- i) a textura da raspa é notavelmente mais porosa, diferente das demais amostras que possuem superfícies essencialmente vítreas (principalmente aquela que não foi submetida ao processo criogênico);
- ii) a expectativa de que as amostras, submetidas ao processo criogênico, teriam uma superfície vítrea (ou mais regulares do que as amostras cisalhadas) não se confirmou; pelo contrário, a amostra que foi submetida apenas ao processo de cisalhamento, em moinho de facas, apresentou uma superfície mais regular.
- iii) a formação de grumos na amostra VIPAL #50 é observada com clareza, podendo de alguma forma, interferir na eficiência da mistura. Podem ser tomadas medidas de forma a

evitar a formação destes grumos, por exemplo, a adição de pequenos percentuais de cal ou talco;

iv) os grupos de borrachas provenientes da Industrial Batistela, possuem textura e formato de grãos semelhantes, bem como com o grupo Vipal (50, 30 e >30 mesh). A diferença está apenas no tamanho.

## 1.2 TEOR DE UMIDADE

Logo após a obtenção das amostras foram determinadas suas umidades. Foi utilizada, para tanto, uma estufa a 60 °C e os resultados estão resumidos na tabela 1.1. De acordo com a ASTM D 6114 a borracha utilizada para modificação do ligante deve ter no máximo 0,75 % de umidade.

Tabela 1.1 – Resultado da determinação da umidade

<i>Material</i>	<i>Umidade (%)</i>		
	<i>h<sub>1</sub></i>	<i>h<sub>2</sub></i>	<i>h<sub>média</sub></i>
<i>Batistela 30mesh</i>	0,54	0,61	0,60
<i>Batistela 0,6-2,0mm</i>	0,73	0,75	0,74
<i>VIPAL 50mesh</i>	0,98	0,99	0,99
<i>VIPAL 30mesh</i>	1,63	1,64	1,64
<i>VIPAL &gt;30mesh</i>	1,06	1,06	1,06
<i>VIPAL Cisalhada</i>	0,93	0,92	0,93
<i>VIPAL Raspa</i>	0,66	0,66	0,66

Os valores de umidade encontrados, apesar de serem baixos (média global dos valores), denotam uma variação significativa entre as médias de cada grupo. Acredita-se que estes valores possam ser influenciados pelos mais diversos fatores como armazenamento das borrachas ou condições de umidade do ar durante o processo criogênico. Por estes motivos para a utilização das borrachas foi adotado como critério de padronização a remoção da umidade das amostras em estufa a 60 °C.

## 1.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Os ensaios de análise granulométrica foram realizados através de peneiramento; foram baseados nos procedimentos utilizados nos ensaios realizados em solos. A série de peneiras

utilizadas tentou representar de forma adequada à variação dos tamanhos das partículas. Devido à baixa densidade da borracha, notou-se uma certa dificuldade de se realizar o ensaio. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Composição granulométrica das borrachas estudadas

Peneira n <sup>o</sup> ou "	Abertura (mm)	% passante em massa						
		BAT. 30mesh	BAT. 0,6-2,0mm	VIPAL 50mesh	VIPAL 30mesh	VIPAL >30mesh	VIPAL Cis.	VIPAL Raspa
3/8"	9,50	---	---	---	---	---	---	100
1/4"	6,35	---	---	---	---	---	---	96
4	4,76	---	---	---	---	---	100	94
8	2,38	---	---	---	---	---	24	73
10	2,00	---	100	---	---	100	14	54
16	1,19	---	99	---	---	99	2	38
20	0,84	100	69	---	100	92	1	26
30	0,59	94	10	100	99	31	1	14
40	0,42	10	2	99	69	1	1	8
80	0,177	2	1	9	9	1	1	2
100	0,149	0	0	1	1	1	0	1
200	0,074	0	0	1	1	1	0	0

Houve certa dificuldade de realização do ensaio com a raspa de pneu, devido ao seu formato alongado. Com relação às especificações fornecidas pelas empresas que forneceram as matérias primas, nota-se para a mesma especificação (30 mesh), uma distribuição granulométrica diferente, sendo a da empresa Vipal possui tamanhos menores de partículas, como pode ser observado na Figura 1.11

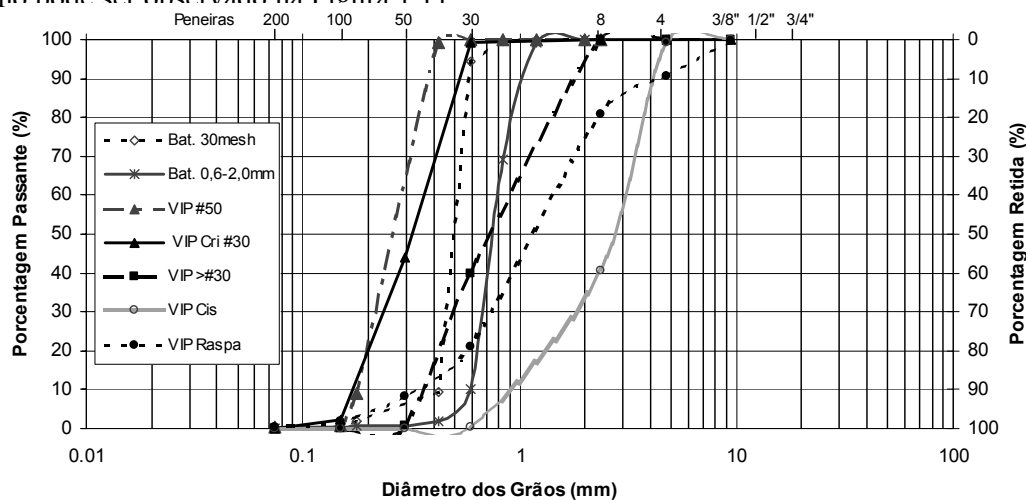


Figura 1.11 – Resultado das análises granulométricas das borrachas estudadas

Existem algumas características que descrevem a uniformidade ou não da curva granulométrica. Um destes parâmetros (utilizado em solos granulares) é o coeficiente de não uniformidade, definido pela relação:

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

onde  $D_{60}$  é o diâmetro abaixo do qual se situam 60 % em massa das partículas e analogamente  $D_{10}$  é o diâmetro que, na curva granulométrica, corresponde à porcentagem que passa igual a 10 %. Quanto maior o coeficiente de não uniformidade, mais bem graduada é o material. O  $D_{10}$  é também referido como diâmetro efetivo do solo.

Outro coeficiente, não tão empregado quanto o CNU, é o coeficiente de curvatura, definido como:

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

Se o coeficiente de não uniformidade indica a amplitude dos tamanhos de grãos, o coeficiente de curvatura detecta melhor o formato da curva granulométrica, permitindo identificar eventuais descontinuidades ou concentração elevada de grãos mais grossos no conjunto. Considera-se que o material é bem graduado quando CC está entre 1 e 3, quando menor que 1 o material é considerado mal graduado.

Tabela 1.3 – Características das borrachas estudadas

<i>Material</i>	<i>Parâmetro</i>				
	<i>D<sub>10-efetivo</sub></i>	<i>D<sub>30</sub></i>	<i>D<sub>60</sub></i>	<i>CNU</i>	<i>CC</i>
<i>Batistela 30mesh</i>	0,40	0,47	0,50	1,25	1.10
<i>Batistela 0,6-2,0mm</i>	0,60	0,67	0,80	1,33	0,94
<i>VIPAL 50mesh</i>	0,18	0,11	0,28	1,56	0,24
<i>VIPAL 30mesh</i>	0,18	0,13	0,35	1,94	0,27
<i>VIPAL &gt;30mesh</i>	0,50	0,60	0,80	1,60	0,90
<i>VIPAL Cisalhada</i>	3,20	2,50	1,80	0,56	1,09
<i>VIPAL Raspa</i>	0,50	0,90	2,10	4,20	0,77

## 1.4 MASSA ESPECÍFICA

### 1.4.1 Massa Específica Aparente

O massa específica do material solto foi determinado para que se obtivesse uma quantificação de valores, visto sua relação com a área superficial das partículas e a importância deste fator na composição das misturas com asfalto, em possível determinação de volumes de transporte e estocagem. A massa específica do material solto é a relação entre a massa total do material e o volume total. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 1.3.

Tabela 1.3 – Resultado dos ensaios de massa específica do material solto

<i>Material</i>	<i>Massa específica aparente (KN/m<sup>3</sup>)</i>			
	<i>d<sub>1</sub></i>	<i>d<sub>2</sub></i>	<i>d<sub>3</sub></i>	<i>d<sub>médio</sub></i>
<i>Batistela 30mesh</i>	3,9	3,8	3,9	3,8
<i>Batistela 0,6-2,0mm</i>	4,1	4,2	4,2	4,2
<i>VIPAL 50mesh</i>	3,2	3,1	3,2	3,2
<i>VIPAL 30mesh</i>	3,9	3,9	3,9	3,9
<i>VIPAL &gt;30mesh</i>	4,2	4,2	4,2	4,2
<i>VIPAL Cisalhada</i>	4,8	4,8	4,8	4,8
<i>VIPAL Raspa</i>	3,2	3,2	3,2	3,2

Nota-se, com clareza, que os materiais disponíveis em várias faixas granulométricas, a relação entre a densidade e o tamanho das partículas. Para a borracha fornecida pela VIPAL (criogenia) o aumento do tamanho das partículas eleva a massa específica de 3,2 kN/m<sup>3</sup> para 4,2 kN/m<sup>3</sup>. Outro fato que nos chamou atenção foi a baixa massa específica da raspa de pneu.

### 1.4.2 Massa Específica Real

A massa específica real de um material é a relação entre a massa e o volume, sem levar em conta os vazios existentes entre as partículas. A metodologia adotada para a determinação desta propriedade física foi a picnometria com álcool e a picnometria com hélio, aquela recomendada pelo Departamento de Transporte do Estado do Tennessee (EUA), e normalizada pela ASTM D 297.

O álcool utilizado para realização dos ensaios de Picnometria foi o neutro, com densidade a 25 °C de 0,805. A densidade do álcool foi fornecida pelo fabricante e medida em laboratório com um balão volumétrico calibrado com água destilada.

Os valores de massa específica encontrados pela picnometria com álcool estão tabulados na Tabela 1.3. O valor característico e recomendado pela ASTM D 6114, para utilização da borracha como modificador de ligantes asfálticos é de  $11,5 \text{ kN/m}^3 \pm 0,05$ . Pode-se notar uma boa concordância entre o valor referido de  $11,5 \text{ kN/m}^3$  e os valores encontrados.

Tabela 1.3 – Resultado dos ensaios de massa específica real do material – Picnometria Álcool

<i>Material</i>	<i>Massa específica real (kN/m<sup>3</sup>)</i>		
	<i>d<sub>1</sub></i>	<i>d<sub>2</sub></i>	<i>d<sub>médio</sub></i>
<i>Batistela 30 mesh</i>	11,61	11,60	11,60
<i>Batistela 0,6-2,0 mm</i>	11,54	11,60	11,57
<i>VIPAL 50 mesh</i>	11,33	11,35	11,34
<i>VIPAL 30 mesh</i>	11,65	11,64	11,46
<i>VIPAL &gt; 30 mesh</i>	11,50	11,45	11,47
<i>VIPAL Cisalhada</i>	11,32	11,44	11,38
<i>VIPAL Raspa</i>	11,14	11,35	11,24

Na técnica que utiliza hélio líquido, para realização da picnometria, é utilizado um equipamento especial para esta finalidade. Os ensaios foram realizados por técnicos do LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos da Escola de Engenharia da UFRGS. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.4.

Tabela 1.4 – Resultado dos ensaios de massa específica real do material – Picnometria Hélio

<i>Material</i>	<i>Massa específica real (kN/m<sup>3</sup>)</i>
<i>Batistela 30 mesh</i>	11,10
<i>Batistela 0,6-2,0 mm</i>	11,57
<i>VIPAL 50 mesh</i>	10,80
<i>VIPAL 30 mesh</i>	12,10
<i>VIPAL &gt; 30 mesh</i>	11,00
<i>VIPAL Cisalhada</i>	11,40
<i>VIPAL Raspa</i>	11,11

Analizando, comparativamente, os valores de massa específica encontrados pelas duas metodologias utilizadas, nota-se uma discrepância de valores entre os grupos, como está mostrado na Figura 1.12. Acredita-se que a diferença seja pelo fato de constituírem técnicas

diferentes e que possa haver alguma influência de amostragem, visto que os ensaios com hélio são feitos com, aproximadamente, 3g de material enquanto que a picnometria com álcool, com 150g. Recomendamos que, para caracterização das borrachas, seja utilizado a picnometria com álcool, pois apesar de ser um método barato e simples, conduz a resultados mais coerentes aos encontrados na literatura.

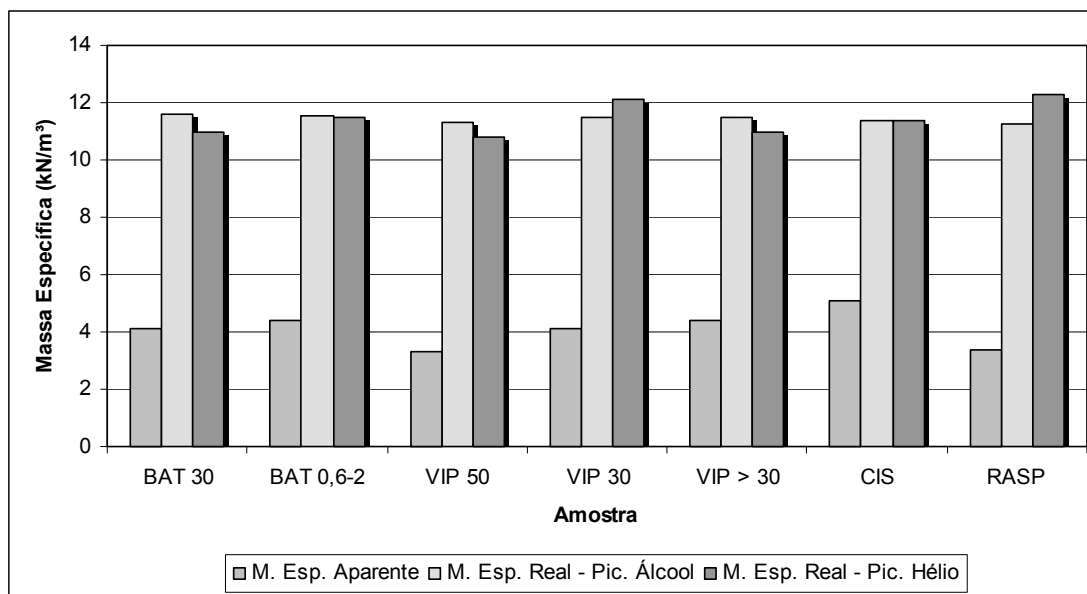


Figura 1.12 – Resultado dos ensaios de massa específica do material

### 1.5 EFEITO E ABSORÇÃO DE LÍQUIDO

Tomando como referência o trabalho de Bonemazzi *et. al* (1996) foram realizados ensaios para verificar, comparativamente, a capacidade das amostras de borracha em absorver óleo maltênico. Este óleo foi escolhido, principalmente, por ser o mesmo que se encontra no cimento asfáltico de petróleo. A normalização do ensaio é definida pela ASTM D 471- 98, que não fixa a temperatura nem o líquido a ser utilizado, apenas recomenda que o líquido seja selecionado em função da aplicação a ser dada à borracha.

Foi escolhido para os testes, o óleo de processo de base aromático *Flexibor 124*, fornecido pela empresa Ipiranga Química, cujas propriedades químicas e físicas estão tabuladas no Quadro 1.1. O óleo é composto por uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos e, principalmente, de hidrocarbonetos aromáticos. Contém hidrocarbonetos poliaromáticos em



alto percentual:

Hidrocarbonetos saturados = 5 % (massa)

Hidrocarbonetos aromáticos = 77 % (massa)

Enxofre = 3 % (máximo)

Hidrocarbonetos polares (nitrogenados, sulfurados) = 18 % (massa)

Quadro 1.1 – Propriedades médias do óleo utilizado

<i>Propriedade</i>	<i>Valor típico</i>
<i>Estado físico / Aparência / Odor</i>	Produto semi sólido a temperatura ambiente, de cor opaca e escura com odor aromático
<i>Ponto de fulgor (Vaso aberto)</i>	205 °C
<i>Ponto de auto-ignição</i>	> 300 °C
<i>Temperatura de decomposição</i>	> 107 °C
<i>Pressão de vapor</i>	< 5 mm Hg 25 °C
<i>Viscosidade</i>	31,8 cSt a 98,9 °C
<i>Voláteis</i>	< 0,01 % a 25 °C (massa)
<i>Taxa de evaporação (Acetato de butila =100)</i>	N.A.
<i>pH</i>	N.A.
<i>Densidade do líquido (água =1)</i>	1,015 a 15,6 °C
<i>Densidade dos vapores (Ar = 1)</i>	N.D.
<i>Solubilidade em água</i>	Insolúvel
<i>Solubilidade em solvente orgânico</i>	Solúvel

A metodologia de ensaio é bastante simples:

a) as amostras são preparadas prensando-se à quente uma determinada quantidade de borracha ( $\pm 20$  g), de forma a compor um filme com aproximadamente 2 mm de espessura. Foi utilizada uma prensa especial para esta finalidade e temperatura de 200 °C, bem como uma tensão de 1250 kN/m<sup>2</sup> para fabricação das amostras. Após a prensagem, as amostras são cortadas nas dimensões desejadas, sempre em triplicata;

b) as amostras são pesadas, imersas no líquido e levadas a estufa por determinado tempo. O esquema de imersão é mostrado na Figura 1.13. O controle de temperatura deve ser de  $\pm 2$  °C;

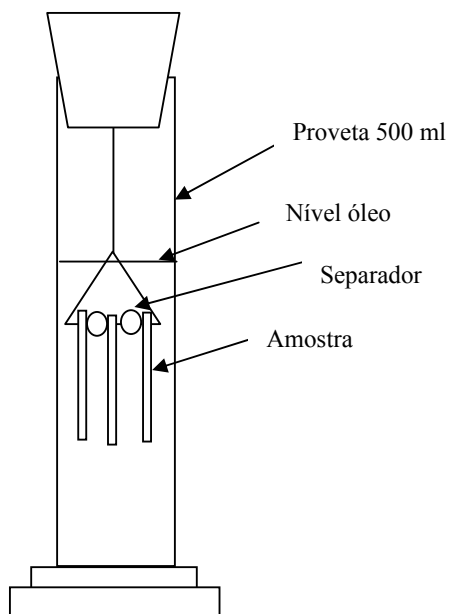
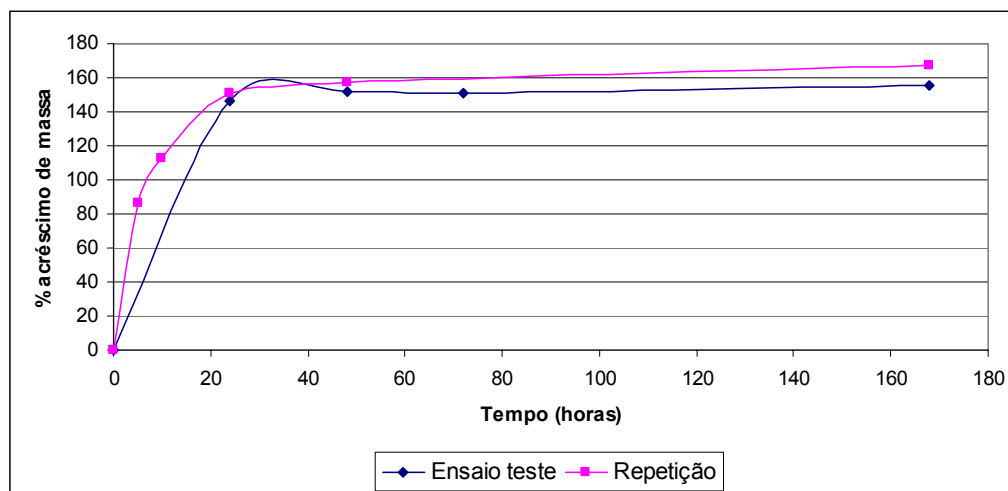


Figura 1.13 – Esquema de imersão das amostras em líquido

c) determinado o tempo ou intervalos, as amostras são penduradas por 30 minutos para que escorra o líquido; são lavadas com rápida imersão em acetona e secas com papel filtro. É determinada novamente a massa da amostra;

d) de posse dos valores das massas, antes e após a imersão, é calculado o percentual de acréscimo de massa ou a massa de óleo absorvida pelo corpo-de-prova.

Para determinação dos tempos e temperaturas, foi realizado um ensaio preliminar a 90°C, durante 7 dias, pôde-se observar, como apresentado na Figura 1.14, que o principal ganho de massa se dava nas primeiras 24 horas e não havia degradação da amostra que chegasse a comprometer o ensaio. Foram, então, definidos os seguintes tempos de leitura de massa: 5, 10, 24, 48 e 168 horas, fixado a temperatura em 90°C.



Os resultados dos ensaios de efeito de líquido, em amostras de borracha, estão resumidos na Tabela 1.5 e plotados na Figura 1.15.

Tabela 1.5 – Resultado dos ensaios de absorção de líquido (valores médios)

<i>Material</i>	<i>acréscimo de massa (%)</i>					
	<i>0 h</i>	<i>5 h</i>	<i>10 h</i>	<i>24 h</i>	<i>48 h</i>	<i>168 h</i>
<i>Batistela 30mesh</i>	0,00	131,35	141,31	150,09	152,35	160,44
<i>Batistela 0,6-2,0 mm</i>	0,00	134,56	147,09	154,79	158,25	157,49
<i>VIPAL 50 mesh</i>	0,00	146,95	154,81	171,74	182,76	199,69
<i>VIPAL 30 mesh</i>	0,00	131,35	141,31	150,09	152,35	160,44
<i>VIPAL &gt; 30 mesh</i>	0,00	74,98	106,55	149,60	165,24	175,04
<i>VIPAL Cisalhada</i>	0,00	84,39	110,71	158,68	183,00	208,02
<i>VIPAL Raspa</i>	0,00	95,01	123,12	157,01	163,37	166,87

Foram realizados 3 repetições para cada uma das 7 amostras em cada um dos 6 tempos estabelecidos, totalizando 126 leituras de variação de massa. De posse de todos estes valores foi realizada uma análise estatística para verificar a significância dos fatores Material, Tempo e a interação Material x Tempo na variável de resposta Acréscimo de Massa.

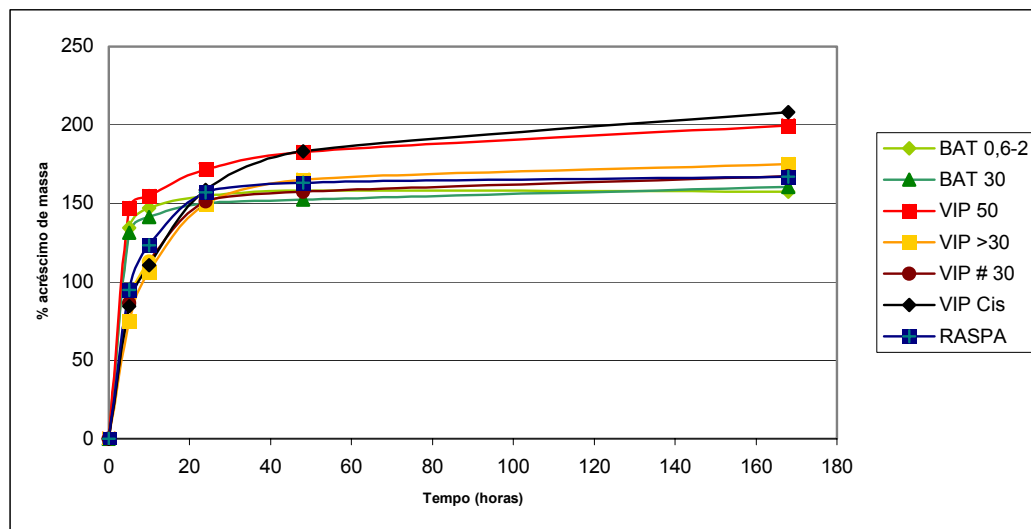


Figura 1.15 – Variação de massa em função do tempo de imersão

Apesar de ser observado na Figura 1.15 uma maior variação das amostras Vipal 50 mesh e Vipal Cisalhada o teste f (Quadro 1.2) acusou como fator significante apenas o tempo de imersão. Este resultado denota a semelhança de propriedades de todas as amostras ensaiadas.

Quadro 1.2 – Teste f dos ensaios de efeito de líquido

<i>Fonte Variação</i>	<i>Soma Quadrada</i>	<i>GDL</i>	<i>Médias</i>	<i>f<sub>calc</sub></i>	<i>f<sub>tab</sub></i>	
Material (A)	11746,78	6	1958	0,08701	2,21	NS
Tempo (B)	445077,42	5	89015	3,956086	2,33	S
A x B	20955,44	30	699	0,031044	1,61	NS
Erro	1890075,61	84	22501			
Total	2367855,27	125				

Nota: NS = Não Significativo; S = Significativo.

## 1.6 ANÁLISE TÉRMICA

A Análise Termogravimétrica (TGA) consiste na avaliação da perda ou ganho de massa de um material, submetido a um programa de temperatura. O equipamento é constituído de uma microbalança acoplada a um forno, as amostras são acondicionadas em um dos braços da balança que fica dentro do forno, promovendo um aumento da temperatura da amostra. Dependendo do material e da atmosfera na qual está submetido este material, podem ocorrer

os seguintes eventos:

i) Oxidação: A oxidação ocorre com ganho de massa, em atmosfera oxidante (geralmente ar), principalmente em materiais metálicos oxidáveis (forma-se óxido dos metais). Através desta técnica pode-se avaliar a formação de filmes passivantes ou não passivantes em metais, dependendo do perfil da curva obtida na análise.

ii) Degradação: A degradação ou decomposição ocorre, principalmente, em materiais orgânicos, mas pode ocorrer também em materiais inorgânicos. Se atmosfera, na qual a amostra está submetida, for inerte (geralmente N<sub>2</sub>), e a amostra tiver baixo ponto de ebulição, pode ocorrer perda de massa por ebulição, ou seja, a molécula se vaporiza e não ocorre decomposição, por outro lado, se o calor de vaporização for maior que a energia de ligação entre os átomos, ocorrerá a quebra das moléculas até moléculas menores que se vaporizam proporcionando perdas de massa. A temperatura de decomposição, bem como dados cinéticos sobre as reações de decomposição podem ser obtidos através de análise termogravimétrica. Quando a amostra é uma mistura de diversos materiais, pode-se determinar a composição da amostra, através das temperaturas de perda de massa, o que torna a análise termogravimétrica uma ferramenta bastante utilizada pela indústria.

Com o intuito de caracterizar as amostras de borracha disponíveis para utilização em pavimentação, foi realizado uma análise termogravimétrica (TGA – Thermogravimetry Analysis), onde uma amostra de cada material é submetida ao aumento de temperatura (neste caso foi utilizada uma rampa de 10 °C/mimuto) e verificada a perda de massa da amostra. Através deste ensaio é possível, comparativamente, ter uma idéia da degradação do material com o aumento da temperatura e com a mudança de atmosfera do ensaio, de ar para nitrogênio, é possível se determinar o percentual de negro de fumo, presente em cada borracha. Os ensaio foram realizados no LAPOL – Laboratório de Polímeros da Escola de Engenharia da UFRGS Os resultados encontrados são apresentados nas Figuras 1.16 a 1.21. Na Tabela 1.5 é apresentado um resumo dos valores de negro de fumo e do resíduo encontrados em cada amostra.

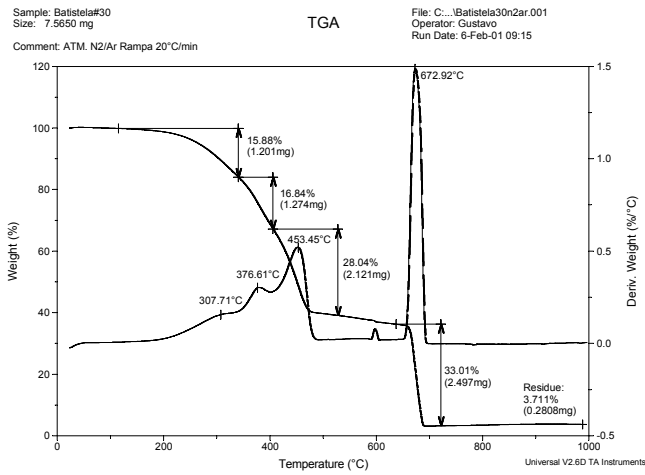


Figura 1.16 – Resultado do TGA – amostra Batistela 30 mesh

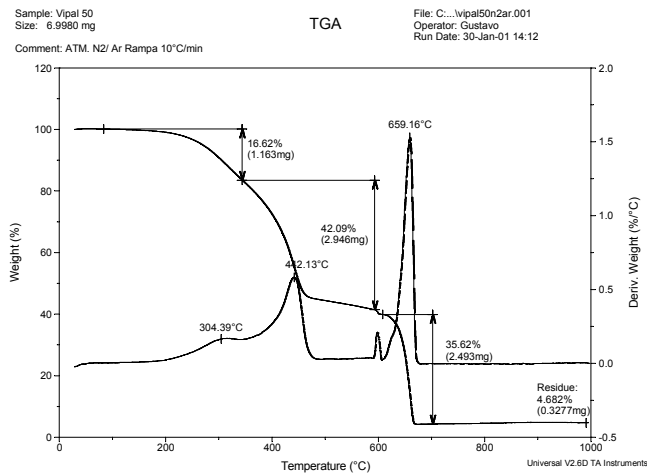


Figura 1.18 – Resultado do TGA – amostra Vipal 50 mesh

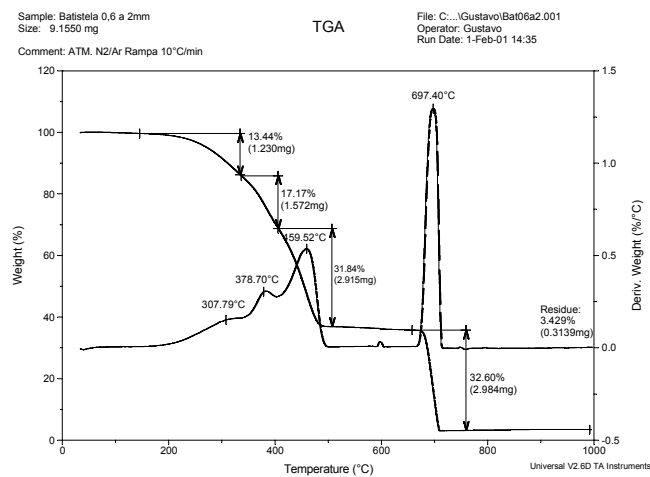


Figura 1.17 – Resultado do TGA – amostra Batistela 0,6 – 2 mm

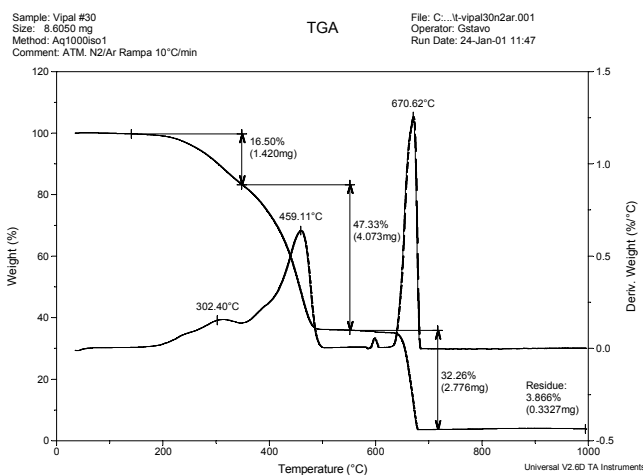


Figura 1.19 – Resultado do TGA – amostra Vipal 30 mesh

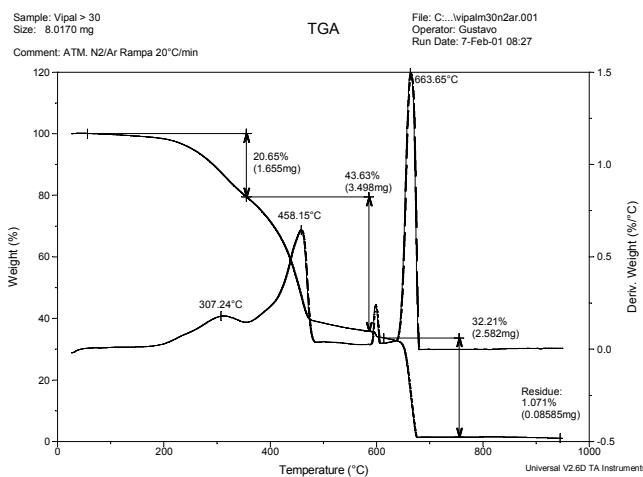


Figura 1.20 – Resultado do TGA – amostra Vipal > 30 mesh

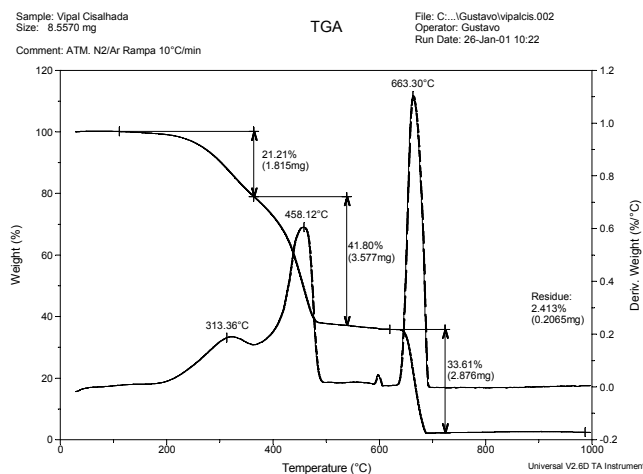


Figura 1.21 – Resultado do TGA – amostra Vipal Cisalhada

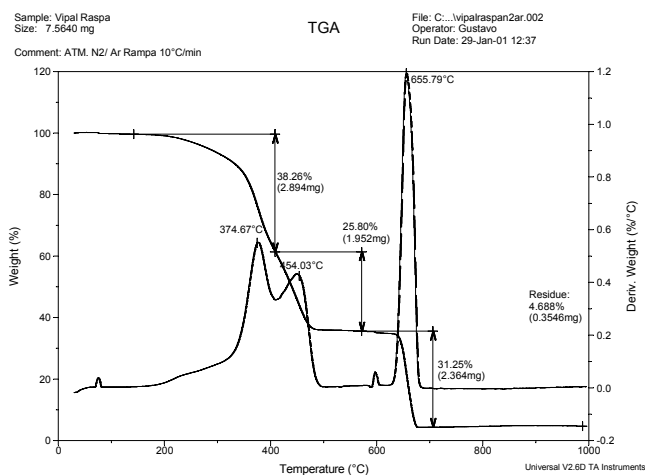


Figura 1.22 – Resultado do TGA – amostra Vipal Raspa

Tabela 1.5 – Valores de negro de fumo encontrados através do TGA

<i>Material</i>	<i>Negro de fumo (%)</i>	<i>Resíduo (%)</i>
<i>Batistela 30mesh</i>	33,01	3,71
<i>Batistela 0,6-2,0 mm</i>	32,60	3,43
<i>VIPAL 50 mesh</i>	35,62	4,68
<i>VIPAL 30 mesh</i>	32,26	3,86
<i>VIPAL &gt; 30 mesh</i>	32,21	1,07
<i>VIPAL Cisalhada</i>	33,61	2,41
<i>VIPAL Raspa</i>	31,25	4,68

Observando os valores tabulados na Tabela 1.5, não se observa uma tendência ou discrepância de valores principalmente nos valores de negro de fumo (média global = 32,94). Um fato que chama atenção é que o valor de negro de fumo encontrado para a Raspa é o menor e o resíduo o maior, isto pode dar uma indicação de que, realmente, esta é uma amostra com características um pouco diferentes das demais.

Para que se adquirisse sensibilidade quanto à variação dos valores de negro de fumo, foram testadas em duplicata as amostras Vipal 50 mesh e Vipal 30 mesh de diferentes lotes de produção. A primeira amostragem foi feita em setembro de 2000 e a segunda em fevereiro de 2001. O resultado das análises térmicas das amostras Vipal 50 mesh e Vipal 30 mesh da segunda amostragem estão apresentados nas Figuras 1.23 e 1.24, respectivamente.



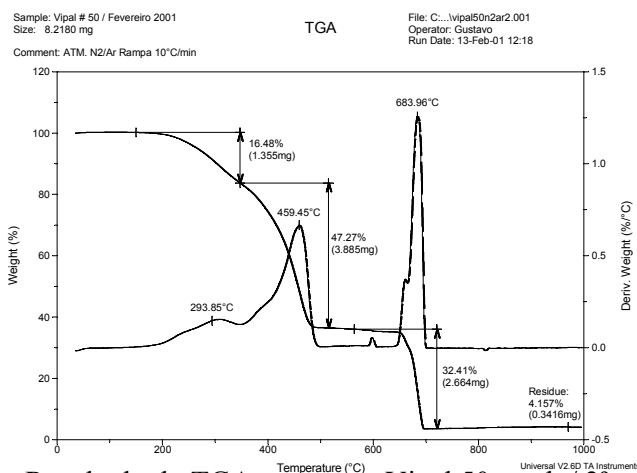


Figura 1.23 – Resultado do TGA – amostra Vipal 50 mesh / 2<sup>o</sup> amostragem

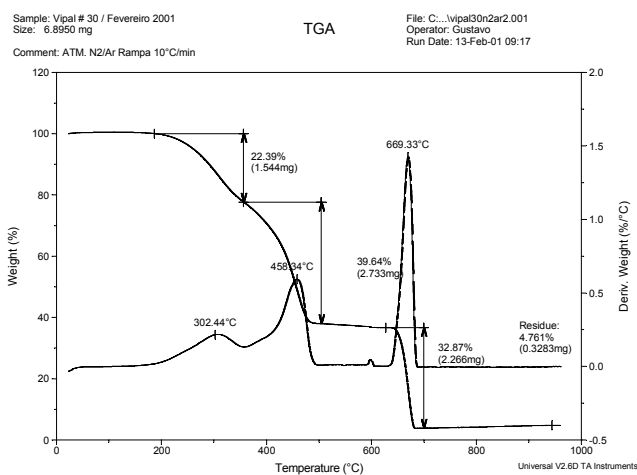


Figura 1.24 – Resultado do TGA – amostra Vipal 30 mesh / 2<sup>o</sup> amostragem

Nas Figuras 1.25 e 1.26 são apresentados, respectivamente, os ensaios realizados com as duas amostragens realizadas das amostras Vipal 50 mesh e Vipal 30 mesh. Pode ser observada uma boa concordância entre os resultados, denotando a pouca influência do lote de amostras coletadas junto à produção da BARRACHAS VIPAL S. A. Na Tabela 1.5 são tabelados os valores de negro de fumo e de resíduo de ambas as amostragens.

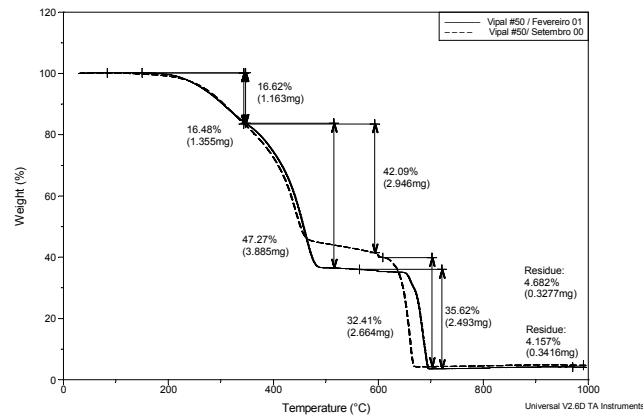


Figura 1.25 – Vipal 50 mesh - comparação entre amostragens

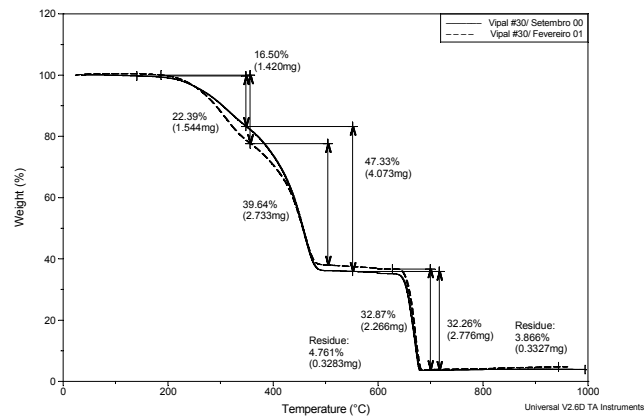


Figura 1.26 – Vipal 30 mesh - comparação entre amostragens

Tabela 1.5 – Comparação de valores de negro de fumo encontrados através do TGA

<i>Material</i>	<i>Negro de fumo (%)</i>	<i>Residuo (%)</i>
<i>VIPAL 50 mesh – amostragem setembro 2000</i>	35,62	4,68
<i>VIPAL 30 mesh – amostragem setembro 2000</i>	32,26	3,86
<i>VIPAL 50 mesh – amostragem fevereiro 2001</i>	32,41	4,13
<i>VIPAL 30 mesh – amostragem fevereiro 2001</i>	32,87	4,76

Outra verificação possível, através desta análise é a verificação da temperatura inicial e final de degradação do polímero em estudo, com este objetivo estão apresentados na tabela 1.6 dados referentes às temperaturas de degradação das borrachas em estudos.

Tabela 1.6 – Valores das temperaturas iniciais e finais de decomposição do polímero


<i>Material</i>	<i>T<sub>inicial de decomposição</sub> (°C)</i>	<i>Perda inicial de massa (%)</i>	<i>T<sub>final de decomposição</sub> (°C)</i>	<i>Perda final de massa (%)</i>
<i>Batistela 30mesh</i>	155,53	99,50	486,24	39,97
<i>Batistela 0,6-2,0 mm</i>	166,30	99,50	496,67	36,97
<i>VIPAL 50 mesh</i>	176,11	99,50	484,17	44,88
<i>VIPAL 30 mesh</i>	172,56	99,50	498,25	36,21
<i>VIPAL &gt; 30 mesh</i>	126,47	99,50	484,03	39,11
<i>VIPAL Cisalhada</i>	175,43	99,50	492,47	37,87
<i>VIPAL Raspa</i>	168,80	99,50	494,69	36,01
<i>VIPAL 50 mesh – amostra fevereiro 2001</i>	204,73	99,50	495,52	36,56
<i>VIPAL 30 mesh – amostra fevereiro 2001</i>	175,43	99,50	492,47	37,87


Nota: a temperatura e perda de massa final das amostras não levam em conta a perda referente ao negro de fumo.


Vários aspectos importantes podem foram observados, através da análise dos dados da Tabela 1.6, dos quais dois devem ser grifados:

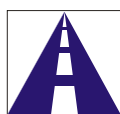
- i) a temperatura inicial de perda de massa de 169 °C dá uma indicação da temperatura de mistura com o asfalto, na mistura via úmida, sem levar em consideração o tempo de mistura;
- ii) observando a variação dos valores das temperaturas dos grupos de amostra Vipal 50, 30 e >30 mesh e, considerando que são quimicamente iguais (apenas diferenciado pelo tamanho das partículas), pode se afirmar que os valores encontrados para todas as amostras são muito parecidos;

## **ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FADIGA**

 <b>LAPAV</b> LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS		Rua Osvaldo Aranha 99 / 3º andar email: lapav@cpgec.ufrgs.br fone: 0xx 51 3316 3590 fax: 0xx 51 3316 3999								
<b>Mistura:</b> <u>Mistura Referência</u>										
<b>Data:</b> <u>16/6/2002</u>										
<b>RT (MPa)=</b> <u>1,21</u>										
Nº CP	h (cm)	d (cm)	% RT	TT (MPa)	Dif. T (MPa)	Carga (Kgf)	Pressão	d inicial	e (cm/cm)	Nº Ciclos
20	6,23	10,2	40%	0,48	1,94	483	2,36	0,00103514	0,00010148	986
6	6,13	10,2	35%	0,42	1,69	416	2,04	0,00084512	0,00008285	1312
7	6,22	10,2	30%	0,36	1,45	362	1,77	0,00070081	0,00006871	1831
8	6,11	10,2	10%	0,12	0,48	118	0,58	0,00015815	0,00001550	133233
9	6,29	10,2	15%	0,18	0,73	183	0,89	0,00027984	0,00002744	26494
10	6,13	10,2	20%	0,24	0,97	238	1,16	0,00035252	0,00003456	13186
11	6,27	10,2	25%	0,30	1,21	304	1,49	0,00050706	0,00004971	2789
12	6,19	10,2	10%	0,12	0,48	120	0,59	0,00013759	0,00001349	72613
13	6,22	10,2	20%	0,24	0,97	241	1,18	0,00030903	0,00003030	11206
14	6,22	10,2	30%	0,36	1,45	362	1,77	0,00073492	0,00007205	1821
15	6,15	10,2	15%	0,18	0,73	179	0,87	0,00027461	0,00002692	27732

 <b>LAPAV</b> LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS		Rua Osvaldo Aranha 99 / 3º andar email: lapav@cpgec.ufrgs.br fone: 0xx 51 3316 3590 fax: 0xx 51 3316 3999								
<b>Mistura:</b> <u>AB 14 - 6% borracha no liqante</u>										
<b>Data:</b> <u>10/12/2002</u>										
<b>RT (MPa)=</b> <u>1,44</u>										
Nº CP	h (cm)	d (cm)	% RT	TT (MPa)	Dif. T (MPa)	Carga (Kgf)	Pressão	d inicial	e (cm/cm)	Nº Ciclos
20	6,16	10,2	40%	0,58	2,30	568	2,78	0,00162013	0,00015884	349
6	6,25	10,2	35%	0,50	2,02	505	2,47	0,00197312	0,00019344	380
7	6,19	10,2	30%	0,43	1,73	428	2,10	0,00077855	0,00007633	773
8	6,18	10,2	10%	0,14	0,58	143	0,70	0,00021728	0,00002130	14043
9	6,16	10,2	15%	0,22	0,86	213	1,04	0,00026027	0,00002552	7863
10	6,26	10,2	20%	0,29	1,15	289	1,41	0,00038500	0,00003774	2949
11	6,34	10,2	25%	0,36	1,44	366	1,79	0,00091218	0,00008943	841
12	6,15	10,2	7%	0,10	0,40	99	0,48	0,00009469	0,00000928	59901
13	6,18	10,2	20%	0,29	1,15	285	1,39	0,00058147	0,00005701	1764
14	6,24	10,2	30%	0,43	1,73	432	2,11	0,00129093	0,00012656	648
15	6,19	10,2	6%	0,09	0,35	86	0,42	0,00009038	0,00000886	96945

 <b>LAPAV</b> LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS		Rua Osvaldo Aranha 99 / 3º andar email: lapav@cpgec.ufrgs.br fone: 0xx 51 3316 3590 fax: 0xx 51 3316 3999								
<b>Mistura:</b> <u>AR 41 - 12% borracha no ligante</u>										
<b>Data:</b> <u>14/12/2002</u>										
<b>RT (MPa)=</b> <u>1,42</u>										
Nº CP	h (cm)	d (cm)	% RT	TT (MPa)	Dif. T (MPa)	Carga (Kgf)	Pressão	d inicial	e (cm/cm)	Nº Ciclos
20	6,43	10,2	40%	0,57	2,27	585	2,86	0,00152083	0,00014910	367
6	6,33	10,2	35%	0,50	1,99	504	2,47	0,00146580	0,00014371	590
7	6,37	10,2	30%	0,43	1,70	435	2,13	0,00077560	0,00007604	1065
8	6,4	10,2	10%	0,14	0,57	146	0,71	0,00022383	0,00002194	22273
9	6,46	10,2	15%	0,21	0,85	220	1,08	0,00029447	0,00002887	6197
10	6,37	10,2	20%	0,28	1,14	290	1,42	0,00032138	0,00003151	2894
11	6,35	10,2	25%	0,36	1,42	361	1,77	0,00058440	0,00005729	2338
12	6,44	10,2	10%	0,14	0,57	147	0,72	0,00020645	0,00002024	16389
13	6,43	10,2	7%	0,10	0,40	102	0,50	0,00014505	0,00001422	79657
14	6,38	10,2	6%	0,09	0,34	87	0,42	0,00009098	0,00000892	76973
15	6,45	10,2	7%	0,10	0,40	103	0,50	0,00013618	0,00001335	62041
16	6,36	10,2	16%	0,23	0,91	233	1,14	0,00031313	0,00003070	7152

 <b>LAPAV</b> LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS		Rua Osvaldo Aranha 99 / 3º andar email: lapav@cpgec.ufrgs.br fone: 0xx 51 3316 3590 fax: 0xx 51 3316 3999								
<b>Mistura:</b> <u>AB 68 - 18% borracha no ligante</u>										
<b>Data:</b> <u>03/01/03</u>										
<b>RT (MPa)=</b> <u>1,39</u>										
Nº CP	h (cm)	d (cm)	% RT	TT (MPa)	Dif. T (MPa)	Carga (Kgf)	Pressão	d inicial	e (cm/cm)	Nº Ciclos
20	6,15	10,2	35%	0,49	1,95	479	2,35	0,00121689	0,00011930	481
6	6,07	10,2	30%	0,42	1,67	406	1,98	0,00110035	0,00010788	662
7	6,14	10,2	10%	0,14	0,56	137	0,67	0,00023415	0,00002296	18627
8	6,06	10,2	15%	0,21	0,83	202	0,99	0,00025002	0,00002451	18171
9	6,09	10,2	7%	0,10	0,39	95	0,46	0,00014536	0,00001425	66550
10	6,16	10,2	6%	0,08	0,33	82	0,40	0,00011425	0,00001120	70179
11	6,08	10,2	10%	0,14	0,56	135	0,66	0,00021675	0,00002125	19036
12	6,13	10,2	20%	0,28	1,11	273	1,34	0,00049891	0,00004891	3536
13	6,07	10,2	25%	0,35	1,39	338	1,65	0,00076962	0,00007545	1942
14	6,24	10,2	15%	0,21	0,83	208	1,02	0,00035487	0,00003479	10431
15	6,15	10,2	20%	0,28	1,11	274	1,34	0,00047386	0,00004646	5387



**LAPAV**  
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS

Rua Osvaldo Aranha 99 / 3º andar  
email: lapav@cpgec.ufrgs.br  
fone: 0xx 51 3316 3590  
fax: 0xx 51 3316 3999

Mistura: **80/20 - 1% borracha - sem cura**

Data: **10/07/02**

RT (MPa)= **0,75**

Nº CP	h (cm)	d (cm)	% RT	TT (MPa)	Dif. T (MPa)	Carga (Kgf)	Pressão	d inicial	e (%)	Nº Ciclos
20	6,03	10,2	40%	0,30	1,20	290	1,42	0,00087442	0,00008573	1868
1	5,98	10,2	35%	0,26	1,05	252	1,23	0,00084775	0,00008311	1319
5	6,03	10,2	30%	0,23	0,90	217	1,06	0,00094337	0,00009249	2753
6	6,04	10,2	12%	0,09	0,36	87	0,42	0,00024142	0,00002367	77516
7	6,10	10,2	15%	0,11	0,45	110	0,54	0,00038984	0,00003822	14520
9	6,02	10,2	25%	0,19	0,75	181	0,88	0,00052888	0,00005185	6387
11	6,08	10,2	20%	0,15	0,60	146	0,71	0,00032539	0,00003190	22882
12	6,13	10,2	30%	0,23	0,90	221	1,08	0,00105803	0,00010373	1763
14	5,96	10,2	20%	0,15	0,60	143	0,70	0,00037489	0,00003675	22618
15	6,00	10,2	15%	0,11	0,45	108	0,53	0,00032793	0,00003215	60875
16	6,14	10,2	10%	0,08	0,30	74	0,36	0,00020981	0,00002057	56995



**LAPAV**  
LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS


Rua Osvaldo Aranha 99 / 3º andar  
email: lapav@cpgec.ufrgs.br  
fone: 0xx 51 3316 3590  
fax: 0xx 51 3316 3999


Mistura: **80/20 - 1% borracha - 1h cura**

Data: **14/07/02**

RT (MPa)= **0,1**

Nº CP	h (cm)	d (cm)	% RT	TT (MPa)	Dif. T (MPa)	Carga (Kgf)	Pressão	d inicial	e (%)	Nº Ciclos
1	6,47	10,2	40%	0,40	1,60	415	2,03	0,00086990	0,00008528	1155
5	6,38	10,2	35%	0,35	1,40	358	1,75	0,00146705	0,00014383	984
6	6,50	10,2	30%	0,30	1,20	312	1,53	0,00113005	0,00011079	1744
7	6,44	10,2	10%	0,10	0,40	103	0,50	0,00022544	0,00002210	51931
8	6,41	10,2	15%	0,15	0,60	154	0,75	0,00049711	0,00004874	19477
9	6,41	10,2	20%	0,20	0,80	205	1,00	0,00068160	0,00006682	10738
10	6,63	10,2	25%	0,25	1,00	266	1,30	0,00099102	0,00009716	2214
12	6,39	10,2	20%	0,20	0,80	205	1,00	0,00056507	0,00005540	9295
13	6,42	10,2	30%	0,30	1,20	309	1,51	0,00102325	0,00010032	1885
14	6,41	10,2	15%	0,15	0,60	154	0,75	0,00040625	0,00003983	15416
15	6,40	10,2	10%	0,10	0,40	103	0,50	0,00028881	0,00002831	134396
16	6,46	10,2	10%	0,10	0,40	104	0,50	0,00019052	0,00001868	89392

 <b>LAPAV</b> LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS		Rua Osvaldo Aranha 99 / 3º andar email: lapav@cpgec.ufrgs.br fone: 0xx 51 3316 3590 fax: 0xx 51 3316 3999								
<b>Mistura:</b> <u>80/20 - 1% borracha - 2h cura</u>										
<b>Data:</b> <u>01/08/02</u>										
<b>RT (MPa)=</b> <u>1,12</u>										
Nº CP	h (cm)	d (cm)	% RT	TT (MPa)	Dif. T (MPa)	Carga (Kgf)	Pressão	d inicial	e (%)	Nº Ciclos
20	6,44	10,2	40%	0,45	1,79	462	2,26	0,00159533	0,00015640	883
1	6,40	10,2	35%	0,39	1,57	402	1,97	0,00200767	0,00019683	532
5	6,48	10,2	30%	0,34	1,34	349	1,71	0,00083960	0,00008231	2598
6	6,42	10,2	10%	0,11	0,45	115	0,56	0,00021417	0,00002100	114307
7	6,36	10,2	15%	0,17	0,67	171	0,84	0,00038681	0,00003792	24934
8	6,49	10,2	20%	0,22	0,90	233	1,14	0,00051933	0,00005091	9142
9	6,44	10,2	25%	0,28	1,12	289	1,41	0,00077467	0,00007595	5068
10	6,55	10,2	10%	0,11	0,45	118	0,57	0,00023602	0,00002314	53532
11	6,45	10,2	20%	0,22	0,90	231	1,13	0,00055469	0,00005438	8184
12	6,43	10,2	30%	0,34	1,34	346	1,69	0,00083700	0,00008206	2625
13	6,42	10,2	15%	0,17	0,67	173	0,84	0,00048650	0,00004770	27373

 <b>LAPAV</b> LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS		Rua Osvaldo Aranha 99 / 3º andar email: lapav@cpgec.ufrgs.br fone: 0xx 51 3316 3590 fax: 0xx 51 3316 3999								
<b>Mistura:</b> <u>RASPA - 1h cura - 1% borracha</u>										
<b>Data:</b> <u>8/8/2002</u>										
<b>RT (MPa)=</b> <u>0,87</u>										
Nº CP	h (cm)	d (cm)	% RT	TT (MPa)	Dif. T (MPa)	Carga (Kgf)	Pressão	d (cm)	e (cm/cm)	Nº Ciclos
20	6,46	10,2	40%	0,35	1,39	360	1,76	0,00082309	0,00008069	2270
1	6,38	10,2	50%	0,44	1,74	445	2,18	0,00105376	0,00010331	1308
6	6,43	10,2	35%	0,30	1,22	314	1,53	0,00084091	0,00008244	5797
8	6,48	10,2	10%	0,09	0,35	90	0,44	0,00018396	0,00001804	119960
9	6,48	10,2	15%	0,13	0,52	135	0,66	0,00032469	0,00003183	60957
10	6,42	10,2	20%	0,17	0,70	179	0,87	0,00031004	0,00003040	48079
11	6,44	10,2	25%	0,22	0,87	224	1,10	0,00053055	0,00005201	10171
12	6,68	10,2	10%	0,09	0,35	93	0,45	0,00020891	0,00002048	124054
13	6,35	10,2	15%	0,13	0,52	133	0,65	0,00025040	0,00002455	143943
14	6,44	10,2	20%	0,17	0,70	180	0,88	0,00034782	0,00003410	57613
15	6,57	10,2	25%	0,22	0,87	229	1,12	0,00045660	0,00004477	9319