

**UTILIZAÇÃO DE MISTURA ASFÁLTICA COM BORRACHA  
PELO PROCESSO DA VIA-SECA  
EXECUÇÃO DE UM TRECHO EXPERIMENTAL URBANO  
EM PORTOALEGRE-RS**

**Márcia Rodrigues Dias**

Porto Alegre  
Setembro 2005

**MÁRCIA RODRIGUES DIAS**

**UTILIZAÇÃO DE MISTURA ASFÁLTICA COM BORRACHA  
PELO PROCESSO DA VIA-SECA  
EXECUÇÃO DE UM TRECHO EXPERIMENTAL URBANO  
EM PORTO ALEGRA-RS**

Dissertação 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 Mestre em  
Engenharia na modalidade Profissional

Porto Alegre  
Setembro 2005

DIAS, Márcia Rodrigues

Utilização de Mistura Asfáltica com Borracha pelo  
Processo da Via-Seca - Execução de um Trecho  
Experimental Urbano em Porto Alegre - RS -  
Márcia Rodrigues Dias – Porto Alegre:  
PPGEC/UFRGS, 2005.

n p. 135

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

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

**MÁRCIA RODRIGUES DIAS**

**UTILIZAÇÃO DE MISTURA ASFÁLTICA COM BORRACHA  
PELO PROCESSO DA VIA-SECA  
EXECUÇÃO DE UM TRECHO EXPERIMENTAL URBANO  
EM PORTOALEGRE-RS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE 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, 02 de setembro de 2005

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti  
D. Sc. pela COPPE  
Orientador

Prof. Fernando Schnaid  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. João Fortini Albano (UFRGS)**  
D.Sc. pela UFRGS

**Prof. Luciano Pivoto Specht (UNIJUD)**  
D.Sc. pela UFRGS

**Prof. Washington Peres Núñez(UFRGS)**  
D.Sc. pela UFRGS

Dedico este trabalho ao meu marido Celso Antônio, aos meus filhos Amanda, Andressa e Matheus pela compreensão durante o período de seu desenvolvimento.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, Pai da Vida, o início de tudo e por ter me abençoado de ter colocados pessoas tão especiais na minha vida, meus pais Vera e Élbio (que não está mais aqui, mas está presente no meu coração) que sempre me apoiaram e devo tudo a eles, sempre me ensinaram a seguir em frente.

Agradeço, além de dedicar meu trabalho ao meu marido, amigo e companheiro Celso Antônio pelo carinho, compreensão sempre me apoiando, me incentivando e acreditando no meu esforço para a realização deste trabalho.

Aos meus filhos Amanda, Andressa e Matheus pela compreensão neste período, em que me fiz ausente em alguns momentos, mas que são a razão da minha vida.

Ao Prof. Jorge Augusto Ceratti pela orientação, apoio e, principalmente, pela competência na condução desta pesquisa.

Aos meus tios Jorge e Terezinha, pessoas muito especiais em minha vida pelo carinho e incentivo.

Ao meu irmão Marcelo, cunhada Fabiana e sobrinhos Artur e Bernardo que souberam compreender minha ausência durante este período.

A minha amiga Lucimari pelo apoio, pela amizade, força incentivo que me acompanhou durante todo o curso e desenvolvimento do trabalho.

A todos os colegas da SMOV que de uma forma ou de outra contribuíram ao longo deste longo percurso, em especial as minhas colegas e amigas pelo apoio, amizade e incentivo Dayse Fensterseifer, Elaine Quesada, Gilmara Muller e Gisele Porto.

Ao colega Eng. Irajá Fleith pelo seu profissionalismo e competência que acompanhou a execução da pista experimental, pela colaboração, incentivo e amizade durante a realização desta pesquisa.

Aos colegas do Laboratório de Solos e da Usina de Asfalto da SMOV, aos Engs. Antônio Matos, Luciano Varela e Ricardo Gisler pelo apoio e colaboração.

À Secretaria Municipal de Porto Alegre da Prefeitura Municipal de Porto Alegre, pelo apoio financeiro e pela possibilidade de realização desta pesquisa.

Ao técnico do LAPAV Vinícius da Silva Alves e o bolsista Diego Treichel pela dedicação e paciência.

Agradeço a todos os professores do Mestrado em Geotecnia, que ao longo do curso tiveram a importante tarefa de nos passar muitos conhecimentos, especialmente ao Prof. Washington Peres Núñez.

Aos meus amigos e todos que de alguma maneira participaram no desenvolvimento desta dissertação e no meu crescimento profissional, com amizade e carinho.

Ao Prof. Luciano Spetch pela atenção quando precisei de ajuda e esclarecimentos em algumas ocasiões durante esta pesquisa.

Nem tudo que se enfrenta pode ser modificado,  
mas nada pode ser modificado  
até que seja enfrentado.  
*James Baldwin*

## RESUMO

DIAS, M.R. **Utilização de Mistura Asfáltica com Borracha pelo Processo da Via Seca - Execução de um Trecho Experimental em Via Urbana em Porto Alegre-RS.** 2005. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Este trabalho apresenta estudo sobre a viabilidade técnica para execução da pavimentação de uma pista experimental em via urbana a fim de comprovar o potencial da incorporação de borracha reciclada de pneus ao concreto asfáltico, pelo processo Via Seca, visando contribuir para a compreensão e otimização do desempenho dos pavimentos. O objetivo da presente pesquisa foi avaliar as etapas principais de projeto, produção e do processo executivo de estruturas de pavimentos submetidas à aplicação das cargas de tráfego em escala real; e o uso e manuseio dos materiais que constituem borracha-agregado, de maneira a obter benefícios e o incremento da durabilidade e redução da manutenção. Para tal foi construída uma pista experimental com revestimentos constituídos por um trecho em concreto asfáltico convencional e outro trecho com incorporação de borracha reciclada de pneus. Para a análise do comportamento, as misturas asfálticas foram caracterizadas segundo ensaios tradicionais, avaliando as diversas variáveis de projetos tais como: granulometria da borracha e do agregado, teor de ligante, 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 e deformação permanente (creep dinâmico). Ficou evidente a viabilidade técnica para execução de revestimentos com a utilização de borracha reciclada de pneus adicionada ao concreto asfáltico com o emprego do processo Via Seca, verificando durante a execução aspectos relevantes tais como: dosagem do silo com borracha; homogeneidade da massa; controle de temperatura; utilização e aplicabilidade das técnicas e equipamentos tradicionais para execução do concreto asfáltico, com a finalidade de prolongar a vida útil dos pavimentos e reduzir seu custo de manutenção.

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

## **ABSTRACT**

**DIAS, M.R. Use of Hot Mix Asphalt Added With Tire Crumb Rubber Through Dry Process - Execution of an Experimental Urban Lane in Porto Alegre - RS. 2005.**

Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – 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 to it through dry process. The research main goal is to evaluate the design, production and construction phases of the pavement when it is submitted to full-scale loading. In addition to that, the use of tire crumb rubber in the way to obtain the best benefits increases the durability and reduces the pavement maintenance were also issues considered in the research. To achieve the goal an experimental lane was paved, half with conventional asphalt concrete and the half with tire crumb rubber added to the mix. The rubber-aggregate mixes through dry process are prepared and tested, varying the main factors that interfere on the performance like rubber and aggregate size, asphalt content, time of rubber digestion and rubber percentage. And to characterize and verify the laboratorial mixes performance the following tests: Marshall Method tests, tensile strength, resilient modulus, fatigue (controlled stress mode), and permanent deformation (dynamic creep). The execution of flexible pavements with tire crumb rubber and using the dry process is technically feasible. Despite of that, some features as temperature (of mixture) control, rubber measure, mix homogeneity, use of the right techniques and traditional equipments have to be consider during its construction because they are directly related to field performance.

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

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>16</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>17</b>
<b>LISTA DE EQUAÇÕES.....</b>	<b>18</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....</b>	<b>19</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>22</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	22
<b>1.2 OBJETIVOS.....</b>	<b>24</b>
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	24
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>26</b>
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	26
2.2 PAVIMENTOS.....	26
2.3 ASFALTOS.....	28
2.4 PRINCIPAIS DEGRADAÇÕES SOFRIDAS PELOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	30
<b>2.4.1 Introdução.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.2 Deformação permanente.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.3 Fadiga.....</b>	<b>32</b>
2.5 RECICLAGEM DE PNEUS.....	33
<b>2.5.1 Introdução.....</b>	<b>33</b>
<b>2.5.2 Legislação.....</b>	<b>36</b>
<b>2.5.3 Possíveis aproveitamentos de pneus usados.....</b>	<b>38</b>
2.5.3.1 Recauchutagem ou fabricação de novos pneus.....	38
2.5.3.2 Muros de arrimo e obras de contenção.....	38
2.5.3.3 Pavimentação.....	38
2.5.3.4 Reprodução de animais marinhos.....	38
2.5.3.5 Estruturas de absorção de energia ou barreiras de inércia.....	39
2.5.3.6 Fontes energéticas.....	39
2.5.3.7 Agregados para placas de concreto.....	39
2.5.3.8 Diversos.....	39
<b>2.5.4 Utilização de borracha reciclada de pneus na pavimentação.....</b>	<b>40</b>
2.5.4.1 Histórico.....	40
2.5.4.2 Processo úmido.....	42

2.5.4.3 Processo seco.....	43
2.6 TIPOS DE USINAS DE ASFALTO.....	48
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>51</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	51
3.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.....	52
3.3 PROJETO DO EXPERIMENTO.....	54
<b>3.3.1 Projetos: geométrico, de drenagem superficial, rede de água e de esgoto.....</b>	<b>54</b>
<b>3.3.2 Definição da estrutura do pavimento.....</b>	<b>54</b>
3.3.2.1 Estudo do tráfego e número equivalente.....	55
3.3.2.2 Caracterização do subleito.....	57
3.3.2.3 Estrutura do pavimento.....	59
<b>3.3.2 Materiais utilizados na pesquisa.....</b>	<b>60</b>
3.3.2.1 Substituição de solo e regularização.....	60
3.3.2.2 Base de brita graduada.....	61
3.3.2.3 Ligante asfáltico.....	61
3.3.2.4 Agregados.....	62
3.3.2.5 Borracha.....	63
<b>3.3.3 Projeto das misturas asfálticas.....</b>	<b>68</b>
3.3.3.1 Composição granulométrica das misturas asfálticas.....	69
3.3.3.2 Dosagem Marshall.....	71
3.4 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS E TEXTURA SUPERFICIAL DE REVESTIMENTO	75
<b>3.4.1 Ensaio de laboratório.....</b>	<b>75</b>
3.4.1.1 Dosagem Marshall.....	75
3.4.1.2 Resistência à tração por compressão diametral.....	76
3.4.1.3 Módulo de resiliência.....	76
3.4.1.4 Fadiga.....	77
3.4.1.5 Deformação permanente.....	78
<b>3.4.2 Ensaio de campo.....</b>	<b>80</b>
3.4.2.1 Microtextura.....	80
3.4.2.2 Macrotextura.....	81
3.4.2.3 Densímetro Eletrônico.....	82
3.4.2.4 Medidas Defletométricas.....	83
<b>4 EXECUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>84</b>
4.1 IMPLANTAÇÃO DA INFRAESTRUTURA.....	84

4.2 EXECUÇÃO DO REVESTIMENTO COM CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL.....	88
4.3 EXECUÇÃO DO REVESTIMENTO COM CONCRETO ASFÁLTICO COM IMPORPORAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS.....	92
<b>5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS.....</b>	<b>99</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	99
5.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	103
5.2.1 Propriedades volumétricas.....	103
5.2.2 Estabilidade e fluência.....	105
5.2.3 Módulo de resiliência e resistência à tração.....	107
5.2.4 Resistência à fadiga.....	110
5.2.5 Deformação.....	112
5.3 ENSAIOS DE CAMPO.....	113
5.3.1 Microtextura.....	113
5.3.2 Macrotextura.....	115
5.3.3 Densímetro eletrônico.....	116
5.3.4 Medidas Defletométricas.....	119
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>123</b>
6.1 CONCLUSÕES.....	123
6.2 SUGESTÕES.....	124
<b>7 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>126</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>131</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Deformação permanente.....	32
Figura 2: Exemplo de trincas por fadiga em uma rua de Porto Alegre.....	33
Figura 3: Pneus abandonados em terreno baldio.....	35
Figura 4: Ilustração de misturas com partículas sólidas de borracha.....	43
Figura 5: Esquema de uma usina gravimétrica.....	50
Figura 6: Esquema de uma usina volumétrica.....	50
Figura 7: Configuração do trecho experimental.....	51
Figura 8: Vista panorâmica da Rua Dr. Murtinho.....	52
Figura 9: Mapa do Município de Porto Alegre.....	53
Figura 10: Localização da Rua Dr. Murtinho.....	53
Figura 11: Croqui de localização dos furos de sondagem.....	58
Figura 12: Estrutura do pavimento.....	59
Figura 13: Mostra da borracha reciclada de pneu utilizada na pesquisa.....	64
Figura 14: Composição granulométrica 80/20 (%)(>#30).....	65
Figura 15: Imagens de MEV, aumento de 25, 50, 100 e 200x – Amostra VIPAL >30 mesh.....	67
Figura 16: Imagens de MEV, aumento de 20, 50, 100 e 200x – Amostra VIPAL Cisalhada.....	68
Figura 17: Composição granulométrica.....	70
Figura 18: Composição granulométrica.....	71
Figura 19: Corpos-de-prova moldados para a realização dos ensaios.....	72
Figura 20: Propriedades das mistura asfálticas convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus.....	72
Figura 21: Propriedades das misturas afálticas convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus.....	73
Figura 22: Propriedades das misturas asfálticas convencional e incorporada com borracha reciclada de pneus.....	74
Figura 23: Prensa Marshall.....	75
Figura 24: Estado de tensões gerado no ensaio brasileiro.....	76
Figura 25: Corte esquemático do equipamento de módulo de resiliência.....	77
Figura 26: Detalhe do corpo de prova para realização do ensaio de creep dinâmico.....	79
Figura 27: Equipamento do ensaio de creep dinâmico.....	79
Figura 28: Equipamento portátil de avaliação das condições de segurança em termos de resistência a derrapagem tipo Pêndulo Britânico.....	80

Figura 29: Materiais utilizados no ensaio mancha de areia.....	82
Figura 30: Procedimentos do ensaio de mancha de areia.....	82
Figura 31: Procedimentos do ensaio de mancha de areia.....	82
Figura 32: Equipamento Paviment Quality Indicator.....	83
Figura 33: Viga eletrônica utilizada nesta pesquisa.....	83
Figura 34: Execução de vala para assentamento das tubulações da drenagem superficial.....	84
Figura 35: Colocação dos tubos da drenagem superficial.....	85
Figura 36: Execução da terraplenagem.....	86
Figura 37: Execução da base de brita graduada.....	86
Figura 38: Compactação da base de brita graduada.....	87
Figura 39: Base imprimada.....	87
Figura 40: Uma vista do trecho com a base executada, imprimada e com os meios-fios.	88
Figura 41: Vista do controle da usina gravimétrica.....	89
Figura 42: Vista panorâmica dos silos carregados com agregados.....	89
Figura 43: Vista panorâmica da usina gravimétrica.....	90
Figura 44: Execução do trecho com concreto asfáltico convencional.....	90
Figura 45: Execução do trecho com concreto asfáltico convencional.....	91
Figura 46: Vista panorâmica dos silos carregados com agregados.....	93
Figura 47: Detalhe da usina volumétrica onde entra a borracha pelo anel de reciclagem localizado após o queimador.....	93
Figura 48: Vista do controle da usina volumétrica.....	94
Figura 49: Vista panorâmica da usina volumétrica.....	94
Figura 50: Vista da correia transportadora da borracha.....	95
Figura 51: Massa asfáltica com incorporação de borracha de pneus.....	95
Figura 52: Execução do trecho com concreto asfáltico com incorporação de borracha de pneus.....	96
Figura 53: Execução do trecho com concreto asfáltico com incorporação de borracha de pneus.....	96
Figura 54: Compactação da massa na pista com rolo pneumático.....	97
Figura 55: Compactação com rolo tandem, com cilindro em chapa de aço.....	97
Figura 56: Corpos-de-prova moldados no local.....	98
Figura 57: Corpos-de-prova moldados com concreto asfáltico convencional.....	101
Figura 58: Corpos-de-prova moldados no local com concreto asfáltico com incorporação de borracha reciclada de pneus.....	101
Figura 59: Extração de amostra para ensaios.....	102

Figura 60: Corpos-de-prova extraídos da pista.....	102
Figura 61: Gráfico de volume de vazios, vazios do agregado mineral e relação betume vazios do concreto asfáltico .....	105
Figura 62: Gráfico de estabilidade, fluência e relação estabilidade/fluência.....	106
Figura 63: Módulo de resiliência e relação de módulo de resiliência e resistência à tração.....	109
Figura 64: Resistência à tração (25°).....	110
Figura 65: Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões.....	111
Figura 66: Relação entre vida de fadiga e tensão de tração.....	111
Figura 67: Realização do ensaio com o aparelho do tipo Pêndulo Britânico.....	115
Figura 68: Realização do ensaio de mancha de areia.....	115
Figura 69: Densímetro Eletônico.....	117
Figura 70: Uma vista do monitor do Densímetro Eletrônico registrando a densidade aparente do revestimento asfáltico.....	117
Figura 71: Realização do ensaio com a viga eletrônica.....	119
Figura 72: Tela do computador com o registro das leituras das deflexões.....	120
Figura 73: Gráfico das deflexões medidas.....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química de pneus de automóveis e caminhões.....	35
Tabela 2: Terminologias dos processos de mistura da borracha .....	41
Tabela 3: Composição granulométrica dos agregados para misturas abertas e densas.....	44
Tabela 4: Especificações recomendadas segundo o volume diário de tráfego.....	45
Tabela 5: Análise granulométrica do subleito natural.....	58
Tabela 6: Granulométrica do saibro.....	60
Tabela 7: Análise granulométrica da brita graduada.....	61
Tabela 8: Distribuição granulométrica dos agregados.....	63
Tabela 9: Análises granulométricas das borrachas estudadas por Specht.....	65
Tabela 10: Análise granulométrica da borracha utilizada neste estudo.....	66
Tabela 11: Composição granulométrica da mistura convencional.....	69
Tabela 12: Granulometria da mistura convencional e faixa especificada.....	69
Tabela 13: Composição da mistura asfáltica com incorporação de borracha reciclada de pneus.....	70
Tabela 14: Especificação da mistura asfáltica com incorporação de borracha reciclada de pneus.....	71
Tabela 15: Propriedades de projeto das misturas asfálticas convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus.....	74
Tabela 16: Valores para classificação da textura dos pavimentos.....	81
Tabela 17: Valores limites de macrotextura pela IS 01.91/2002 - LTP/EPUSP.....	82
Tabela 18: Propriedades dos concretos asfálticos convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus.....	104
Tabela 19: Valores de estabilidade, fluência e relação estabilidade/fluência dos concretos asfálticos convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus.....	106
Tabela 20: Módulos de Rresiliência, Resistência à Tração e Relação Módulo de Resiliência e Rresistência à Tração dos CPs moldados e extraídos.....	109
Tabela 21: Valores de deformação plástica em ensaio de creep dinâmico.....	113
Tabela 22: Medidas de microtextura, resultante dos ensaios com Pêndulo Britânico.....	114
Tabela 23: Resultados do ensaio de mancha de areia.....	116
Tabela 24: Valores da densidade aparente obtidos com o Densímetro Eletrônico.....	118
Tabela 25: Grau de compactação obtido através do Densímetro Eletrônico.....	119
Tabela 26: Leituras defletométricas.....	121

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Trechos executados com asfalto borracha pelo processo via úmida.....	47
Quadro 2: Composição do tráfego.....	56
Quadro 3: Cálculo do fator de carga - FC.....	56
Quadro 4: Classificação e característica do subleito.....	58
Quadro 5: Resultados dos ensaios de índices físicos.....	59
Quadro 6: Características do saibro.....	60
Quadro 7: Característica da brita graduada da base.....	61
Quadro 8: Característica do ligante utilizado.....	62
Quadro 9: Características dos agregados utilizados.....	63
Quadro 10: Propriedades das borrachas utilizadas.....	67
Quadro 11: Informações relacionadas à execução do trecho com concreto asfáltico convencional.....	91
Quadro 12: Informações relacionadas à execução do trecho com concreto asfáltico com incorporação de borracha reciclada de pneus.....	98

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	55
Equação 2.....	57
Equação 3.....	99
Equação 4.....	100
Equação 5.....	100

## ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABEDA: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

AI: *Asphalt Institute*

ANIP: Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos

ASTM: *American Society of Testing and Materials*

ATR: Afundamento de Trilha de Roda

BPN: *British Number Pendulum*

CALTRANS: *Califórnia Department of Transportation*

CBR: *Califórnia Bearing Ratio*

CAM: Cimento Asfáltico Modificado

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado à Quente

CEMPRE: Compromisso Empresarial para Reciclagem

CP: Corpo-de-Prova

CRM: *Crumb Rubber Modified*

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

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

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DCVU: Divisão de Conservação de Vias Urbanas

DEP: Departamento de Esgotos Pluviais

DMAE: Departamento Municipal de Água e Esgoto

ECA: Efeito do Calor e do Ar

EPUSP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

EUA: Estados Unidos da América

EVA: Copolímero Etileno – Acetato de Vinila

FHWA: *Federal Highway Administration*

GC: Grau de Compactação

HRB: *Highway Research Board*

HVS: *Heavy Vehicle Simulator*

IG: Índice de Grupo

IP: Índice de Plasticidade

IS: Instrução de Serviço

ISC: Índice de Suporte Califórnia

ISTEA: *Intermodal Surface Transportation Efficiency Act*

LPAV: Laboratório de Pavimentação

LL: Limite de Liquidez

LP: Limite de Plasticidade

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

Mr: Módulo de Resiliência

N: Número de repetições de carga

NBR: Norma Brasileira

NESP: Não produziu espuma

PETROBRÁS: Petróleo Brasileiro S.A.

PMPA: Prefeitura Municipal de Porto Alegre

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

RBV: Relação Betume-Vazios

RPA: *Rubber Pavement Association*

RRL: *Road Research Laboratory*

Rt: Resistência à tração por compressão diâmetral

RUMAC: *Rubber Modified Asphalt Concrete*

s: segundo

SBS: Copolímero Estireno-Butadieno-Estireno

SMOV: Secretaria Municipal de Obras Viárias

SUPERPAVE: *Superior Performance Asphalt Pavements*

t: tempo

T: Temperatura

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNIJUÍ: Universidade do Noroeste do Estado Rio Grande do Sul

USP: Universidade de São Paulo

UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro

VAM: Vazios de Agregado Mineral

VRD: Valor de Resistência à Derrapagem

Vv: Volume de Vazios

$Y_D$ : peso específico aparente seco máximo

Wot: Umidade ótima

# peneira: Malha da peneira

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E JUSTIFICATIVAS

As cidades brasileiras passam por um processo de concentração urbana de suas populações, devido ao fenômeno de êxodo rural, isto ocasionou um crescimento do sistema viário dos municípios e a necessidade de pavimentá-los. Os pavimentos representam parcela significativa da infra-estrutura de transportes. Afinal é preciso entender que a pavimentação de vias públicas é um assunto que está diretamente ligado ao direito de cidadania, ao direito de se locomover, contribuindo para a melhoria das condições de saneamento, possibilitando aos cidadãos o acesso aos bens e serviços fundamentais a uma vida decente e digna.

As diversas camadas do pavimento, especialmente as de revestimento incluem componentes de alto custo e merecem atenção especial. São estruturas complexas, que tem seu desempenho condicionado pelas cargas do tráfego, solicitações ambientais, técnicas construtivas, práticas de manutenção e reabilitação, tipo e qualidade de materiais, etc.

O Município de Porto Alegre tem 470 quilômetros quadrados de extensão territorial e 2.580 quilômetros de extensão viária cadastrada, cujos revestimentos são assim distribuídos em extensão: 42% com revestimento asfáltico, 17% com revestimento de paralelepípedos de pedra, 13% com revestimento de pedras irregulares, 3% com revestimento de concreto de cimento portland e 22% não são pavimentadas, conforme Cadastro Viário da Divisão de Conservação de Vias Urbanas (DCVU) / Secretaria Municipal de Obras e Viação (SMOV) / Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA) (2004).

Nossa malha viária caracteriza-se fundamentalmente por possuir pavimentos revestidos em concreto asfáltico, e as principais degradações sofridas são as deformações permanentes excessivas e trincas de fadiga.

Com o aumento do custo dos materiais de construção, entre eles os derivados de petróleo, a redução da disponibilidade de materiais naturais, aliado às novas exigências/limitações

ambientais impostas na construção e manutenção de pavimentos, é imprescindível que os pesquisadores procurem materiais que possam apresentar bom desempenho com custo relativamente baixo.

Com o objetivo de contribuir para o estudo de novas tecnologias na área de pavimentação, a Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA), através da Secretaria Municipal de Obras e Viação (SMOV), proporcionou através de seus recursos (materiais, mão-de-obra, equipamentos e transporte), o desenvolvimento deste experimento, a fim de contribuir para a pesquisa de novas técnicas e materiais, apoiando as pesquisas de instituições de ensino, cujos resultados obtidos certamente irão colaborar na busca da qualidade e redução de custos de pavimentação em prol do benefício da sociedade. Outro fator considerado foi a possibilidade de reutilização, em grande escala, de um resíduo considerado poluente, os pneus descartados, que geram um alto custo social (custos diretos como estocagem e indiretos como gastos em saúde pública).

Neste contexto várias pesquisas têm verificado os benefícios da incorporação de pedaços de borracha proveniente da reciclagem de pneus em ligantes asfálticos ou diretamente no concreto asfáltico (Way, 2000; Oda, 2000; Bertolo, 2002; Specht, 2004; Clerman, 2004).

Na busca de solução para o problema da grande quantidade de resíduos sólidos gerado pela indústria de borracha e do descarte de pneus, vários estudos estão sendo desenvolvidos sobre a reutilização e reciclagem deste material, principalmente, pelo grande volume gerado e seu longo período de degradação (400 a 800 anos).

A principal finalidade da inclusão de pó de pneus em concretos asfálticos ou misturas modificadas é a melhoria das propriedades dos materiais de pavimentação, apesar da utilização de borracha reciclada de pneus inservíveis em pavimentos ser uma possível solução para o problema da deposição deste resíduo.

Dentre as informações necessárias à avaliação da adição da borracha de pneus em materiais asfálticos destaca-se o método de incorporação da borracha ao concreto asfáltico como agregado (processo seco). O estudo da incorporação de borracha como parte do processo via seca vem evoluindo nos últimos anos, mas é um estudo mais recente se comparado com o processo via úmida, onde o ligante é modificado, e já se apresenta como uma alternativa interessante de uso. No Brasil, inclusive no Rio Grande do Sul, este tipo de procedimento (via

úmida) já possui vários trechos experimentais executados. No entanto, há pouca experiência quanto ao uso de borracha de pneu como agregado (via seca) em trechos experimentais.

## 1.2 OBJETIVOS

Na presente pesquisa pretende-se acompanhar as etapas principais de projeto e do processo executivo da pavimentação de um trecho experimental comparativo, com revestimentos em concreto asfáltico convencional e concreto asfáltico com incorporação de borracha reciclada de pneus, analisando a viabilidade técnica da incorporação de borracha reciclada de pneus na pavimentação asfáltica pelo processo via da seca, incorporando-se a borracha como agregado.

O objetivo principal é verificar durante a execução aspectos relevantes tais como: dosagem do silo com borracha; homogeneidade da massa; controle de temperatura; utilização e aplicabilidade das técnicas e equipamentos tradicionais para execução do concreto asfáltico.

Algumas questões orientam o desenvolvimento desta pesquisa:

- Comprovar a viabilidade da execução de uma via urbana com concreto asfáltico com incorporação de borracha pelo processo via da seca.
- Contribuir através do monitoramento ao longo do tempo para o estudo do comportamento e desempenho deste pavimento.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 1 é apresentada a introdução, o tema da pesquisa, seus objetivos, abrangências e importância.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, abrange vários temas de interesse para a dissertação, tais como, conceito de pavimento e constituição, conceito de asfalto, histórico sobre asfalto borracha, reciclagem de borracha de pneus e técnicas construtivas, entre outros.

O capítulo 3 apresenta o planejamento do experimento, a configuração geométrica, dados do projeto, caracterização do subleito, dimensionamento estrutural, caracterização dos materiais utilizados, projeto da mistura, procedimentos e descrições de ensaios.

O capítulo 4 apresenta a descrição das principais etapas do processo executivo da pista experimental.

O capítulo 5 apresenta os resultados e análise dos ensaios realizados para avaliar as características de projeto e propriedades mecânicas do concreto asfáltico.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o objetivo de proporcionar melhores condições de tráfego em uma via, faz-se necessária a construção de uma estrutura sobre o leito viário. Esta estrutura chama-se pavimento, que é um conjunto de camadas, responsável por resistir, transmitir e distribuir as pressões resultantes da ação do tráfego.

### 2.2 PAVIMENTOS

Segundo NBR-7207 (1982) da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) o pavimento é definido como: “... estrutura constituída após terraplenagem e destinada, economicamente e simultaneamente, em seu conjunto:

- a) a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos dos veículos;
- b) a melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- c) a resistir aos esforços horizontais que nela atuam tornando mais durável a superfície de rolamento.”

Pinto e Preussler (2001) definem: “o pavimento é uma estrutura constituída por uma ou mais camadas, com características para receber as cargas aplicadas na superfície e distribuí-las, de modo que as tensões resultantes fiquem abaixo das tensões admissíveis dos materiais que constituem a estrutura”. Os pavimentos são classificados em rígido, flexível e semi-rígido.

- a) rígido é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.

- b) flexível é aquele em que todas as camadas sofrem uma deformação elástica significativa sob carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.
- c) semi-rígido se caracteriza por uma base cimentada quimicamente, como por exemplo, por uma camada de solo-cimento revestida por uma camada asfáltica.

As camadas que fazem parte do pavimento são definidas pela NBR-7207 (1982) da ABNT como:

- a) “subleito: terreno de fundação do pavimento ou do revestimento;
- b) sub-base: camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplenagem;
- c) base: camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos sobre o qual se constrói um revestimento;
- d) revestimento: camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a economicamente e simultaneamente: melhorar as condições do rolamento quanto a comodidade e segurança e resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.”

Nos pavimentos flexíveis, o revestimento é resultante da mistura a quente, em usina, de agregado mineral graúdo, material de enchimento (filler) e material betuminoso, espalhado e comprimido a quente, podendo ainda conter aditivos.

Uma mistura asfáltica deve apresentar estabilidade e fluência compatíveis com o funcionamento elástico da estrutura. O desempenho de uma mistura, como por exemplo, o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), depende tanto das propriedades de seus componentes individuais quanto da relação entre ligante e agregado.

Neste contexto, o sucesso e bom acabamento, desempenho impecável e durabilidade adequada de uma obra de pavimentação, além de depender da qualidade dos projetos básicos e executivos, resulta, principalmente, dos controles de materiais, da execução, propriamente

dita, da geometria realizada ao longo do empreendimento para assegurar que todo o processo construtivo atenda integralmente as condicionantes e diretrizes projetadas, e respeite as especificações pertinentes (ABEDA, 2001).

## 2.3 ASFALTO

Os asfaltos, materiais aglutinantes de cor escura, são derivados do petróleo, sendo que o elemento predominante é o betume (99,5%). Betume, muitas vezes usado como sinônimo de asfalto é uma substância aglutinante escura composta principalmente por hidrocarbonetos de alto peso molecular, totalmente solúvel em dissulfeto de carbono. Podem ser utilizados em várias aplicações, como por exemplo, em impermeabilizações de construções civis e, principalmente, em obras de pavimentação (Robert et al., 1998).

Os asfaltos podem ser encontrados em jazidas naturais, na forma de bolsões de asfaltos, originados da evaporação das frações mais leves (mais voláteis) do petróleo e aflorados à superfície em épocas remotas. São exemplos sempre citados os asfaltos naturais de Trinidad e do Lago Bermudez. Atualmente, quase toda a produção de asfalto resulta da destilação de petróleo em unidades industriais (refinarias). Em obras de pavimentação, os asfaltos podem ser denominados ligantes asfálticos, cimentos asfálticos ou materiais asfálticos. Aos asfaltos podem ser adicionados produtos que visam melhorar suas propriedades de engenharia (modificadores).

Ligantes betuminosos também podem ser obtidos a partir do carvão e são denominados alcatrões para pavimentação. Em função das altas concentrações de compostos aromáticos polinucleares emitidos durante a aplicação do alcatrão, houve restrição ao seu uso na Europa e nos EUA. No Brasil, o alcatrão também não tem sido usado há décadas. Outro asfalto natural é a asphaltita, encontrado nos EUA e Argentina, denominado respectivamente, gilsonita e rafaelita (Leite, 1999).

Os tipos de asfalto existentes no mercado são denominados:

- a) cimentos asfálticos de petróleo;
- b) asfaltos diluídos;

- c) asfaltos emulsionados;
- d) asfaltos oxidados ou soprados;
- e) asfaltos modificados por agentes rejuvenescedores.

Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é um líquido muito viscoso, semi-sólido à temperatura ambiente, que apresenta comportamento termoplástico, torna-se líquido se aquecido e retorna ao estado original após resfriamento.

No Brasil, a partir da Resolução Nº. 19, de 11 de julho de 2005, os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) são classificados segundo o ensaio de penetração em: CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100 e CAP 150-200. A classificação por penetração é baseada, principalmente, na consistência do cimento asfáltico a uma temperatura de 25°C, considerada a temperatura média do pavimento em serviço, além de outros ensaios complementares.

As propriedades importantes dos materiais betuminosos dizem respeito a sua aglutinação, impermeabilização, durabilidade e versatilidade de utilização. São materiais de comportamento tensão-deformação dependentes do tempo de aplicação da carga e fundamentalmente termoplásticos, isto é, sua consistência varia com a temperatura. Assim, os efeitos da temperatura, tempo de aplicação da carga e seu valor são condicionantes importantes a serem considerados no projeto de pavimentos asfálticos. A durabilidade é sua capacidade de resistir às mudanças de suas propriedades devido ao intemperismo nas pistas e também devido ao aquecimento. É normalmente caracterizada pela manutenção das qualidades coesivas, plásticas, e pela resistência ao endurecimento com o tempo.

Os principais fatores que contribuem para o endurecimento do material betuminoso com o tempo são; oxidação (reação do oxigênio do ar com o ligante), volatilização (evaporação dos constituintes voláteis em função da temperatura), polimerização (formação de uma grande molécula por combinação de moléculas pequenas) e tixotropia (explica porque há um maior aumento de consistência do CAP em locais onde ocorrem as solicitações do pavimento pelo tráfego).

O endurecimento do ligante pelos fenômenos anteriormente citados, é uma das causas de ocorrência de trincas prematuras na superfície dos pavimentos, daí a importância de um controle de qualidade adequado para o recebimento e aplicação do material betuminoso. Esses

fenômenos estão sempre associados às temperaturas de refino, de recebimento, de aplicação e à susceptibilidade térmica do ligante betuminoso produzido.

## 2.4 PRINCIPAIS DEGRADAÇÕES SOFRIDAS PELOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

### 2.4.1 Introdução

Um pavimento flexível está sujeito a degradação ao longo do seu período de vida que reduzem a capacidade estrutural e a aptidão funcional para que foi projetado. As trincas por fadigas das misturas betuminosas e as deformações permanentes, do ponto de vista estrutural são as principais degradações que contribuem para a redução da qualidade do pavimento.

### 2.4.2 Deformação permanente

Segundo Balbo (1997) na terminologia brasileira de classificação de defeitos, o afundamento é considerado como sendo uma ocorrência de deformação permanente na superfície do pavimento. Dois casos são tratados de maneira distinta: quando não há ocorrência simultânea de elevação lateral ao afundamento, o afundamento é dito de consolidação. Até 6,0 m de comprimento são considerados locais: quando sua extensão é maior e ao longo das trilhas de roda, o afundamento é dito de consolidação da trilha. Quando ocorrem elevações, os afundamentos são ditos plásticos, sendo analogamente, até 6,0 m denominados locais, ou em extensão maior e ao longo das trilhas de roda, afundamento plástico da trilha de roda.

As gêneses possíveis do afundamento local de consolidação:

- a) deformação acentuada de camada de solo e granulares inferiores com diminuição de volume;
- b) início de um processo de solapamento motivado por ruptura de tubulações enterradas;

- c) perda de resistência e ruptura de camadas inferiores motivada por saturação de materiais.

As gêneses possíveis do afundamento em trilha de consolidação:

- a) camadas inferiores isoladamente ou conjuntamente sofrem processo de deformação permanente com alteração de volume, com eventual contribuição de revestimento asfáltico no processo.

As gêneses possíveis do afundamento plástico em trilha de roda:

- a) fluência excessiva da mistura asfáltica do revestimento combinado à ação do tráfego e de temperaturas elevadas;
- b) ação intensa do tráfego sobre mesmas posições em faixas estreitas com fluxo canalizado;
- c) combinação de deformações plásticas de várias camadas do pavimento.

O afundamento da trilha de roda, conforme mostra a figura 1, é resultante do somatório das deformações permanentes que ocorrem a cada passagem de um veículo, sendo acumulativo, podendo-se ter dois tipos de afundamento da trilha de roda nos pavimentos com revestimentos de misturas asfálticas: um resultante da contribuição de todas as camadas e subleito, e outro resultante de deformação exclusiva (ou preponderante) da própria mistura asfáltica; então, além das condições de tráfego e ambientais, também as propriedades da própria mistura asfáltica são de suma importância no entendimento do fenômeno e conseqüentemente no controle de sua ocorrência. A revisão dos métodos de dosagem das misturas asfálticas, bem como a adição de modificadores aos ligantes asfálticos, são algumas tentativas para melhorar o desempenho dos revestimentos asfálticos (Motta et al., 1996).



Figura 1: Deformação permanente

(fonte: Pinto, 2001)

### 2.4.3 Fadiga

Segundo Balbo (1997), na terminologia brasileira de classificação de defeitos, fissuras e trincas são definidas dentro de um grupo geral de defeitos chamados fendas. Uma fissura é portanto uma fenda perceptível a olho nu a partir de distâncias inferiores a 1,5m; trincas são as fendas maiores que as fissuras considerado o critério adotado para definir fissuras.

As trincas são classificadas como transversais (se aproximadamente perpendiculares ao eixo estradal) e longitudinais (se aproximadamente paralelas ao eixo estradal), sendo que quando de extensão inferior a 1,0 m são curtas, e, contrariamente a este caso, longas.

Existem ainda as trincas ditas interligadas, que são divididas em duas categorias: trincas couro de jacaré (também designada vulgarmente por pele de crocodilo), como mostra a figura 2, com contornos erráticos, e trincas em bloco, com lados bem definidos apresentando blocos.

As gêneses possíveis para as trincas tipo couro de jacaré são:

- a) processo de fadiga do revestimento asfáltico, prematuro ou não, que deve ser considerado no caso de extensas áreas afetadas; caso ocorra prematuramente, se não motivado por razões de natureza resiliente, emprego de asfalto queimado na elaboração da mistura poderá ser causa a avaliar;

- b) processo de ruptura multi-pontos no caso de associação com deformação plásticas localizadas, em geral motivadas por perda de resistência e/ou deformabilidade local excessiva do subleito e/ou outras camadas do pavimento;
- c) reflexão acelerada de trincas de idêntica natureza preexistentes em uma superfície asfáltica que recebeu o reforço.



Figura 2: Exemplo de trincas por fadiga em uma rua de Porto Alegre

O aparecimento de trincas à superfície do pavimento, responsável pela progressiva degradação das camadas betuminosas do pavimento, é um fenômeno que deve ser retardado de modo a assegurar um bom funcionamento de toda a estrutura. As trincas permitem a entrada de água para as camadas granulares e solo de fundação, provocando uma diminuição da capacidade de suporte do pavimento, contribuindo ainda para o aumento do desconforto e redução da segurança durante a circulação de veículos. As trincas são ainda responsáveis pela concentração de tensões nas camadas do pavimento, acelerando a ruína de toda a estrutura (Pais, 1999).

## 2.5 RECICLAGEM DE PNEUS

### 2.5.1 Introdução

O desenvolvimento da indústria automobilística no século XX provocou um consumo em números estratosféricos de pneus. O Brasil produziu em 2002, 41 milhões de unidades de

pneus e em 2003 chegou a 45 milhões. Nos Estados Unidos, que geram 275 milhões de pneus velhos por ano, têm em estoque 3 bilhões de carcaças. Estima-se que 57% das 260 mil toneladas de pneus inservíveis que são descartados por ano foram destinados a fornos de cimento no Brasil. Nos Estados Unidos, o percentual gira em torno de 73%, ou seja, 685 mil das 940 toneladas de carcaças jogadas fora por ano. Não há dados no Brasil sobre taxas referentes às demais formas de reciclagem de pneu. Contudo, os remoldadores (que reformam pneus velhos) também dizem ter recolhido em 2002 quase 3,8 milhões de carcaças, que foram prioritariamente enviadas para a Usina de produção de gás da Petrobrás no Paraná (CEMPRE, 2005).

O pneu possui papel fundamental e insubstituível em nosso cotidiano, tanto no transporte de passageiros quanto no de cargas, mas quando se tornam inservíveis, geram graves problemas, pois são volumosos, e precisam ser armazenados em condições apropriadas para evitar riscos de incêndio e proliferação de mosquitos. A sua disposição em aterros sanitários, torna-se inviável, pois apresentam baixa compressibilidade e degradação muito lenta (Bertollo et al., 2000).

Considerando a dificuldade para a disposição das carcaças de pneus em aterros sanitários e a falta de uma fiscalização da legislação para controle da destinação adequada desses resíduos, tem havido uma tendência da população em abandonar os pneus em cursos de água, terrenos baldios e beiras de estradas, que agravam ainda mais o problema. Todo o pneu, em algum momento, se transformará em um resíduo potencialmente danoso à saúde pública e ao meio ambiente. Para acabar com isso, uma solução adequada à sua destinação final deve ser adotada. Pesquisas vêm sendo realizadas, particularmente no exterior, em busca do desenvolvimento de novas tecnologias de reutilização, seja na forma inteira, como borracha reciclada, ou como combustível, na geração de energia (Bertollo et al., 2000).

No Brasil, ainda não existe nenhuma monitoração do Governo, nem do setor privado, sobre as formas de disposição final dos pneus inservíveis, nem há levantamento dos depósitos de pneus abandonados em todo o país, como mostra a figura 3.



Figura.3: Pneus abandonados em terreno baldio

(fonte: Alves, [www.ttverde.com](http://www.ttverde.com))

Os pneus são compostos aproximadamente por 30% (em peso) de aço, 20 a 26% de borracha sintética e 21 a 33% de borracha natural. Um pneu pesa em torno de 9 kg e fornece de 4,5 a 5,5 kg de borracha (Ruth et al., 1997). A tabela 1 apresenta os componentes químicos de pneus de automóveis a caminhões.

Tabela 1: Composição química de pneus de automóveis e caminhões

Componentes (%)	Banda de rodagem		Pneus inteiros	
	Automóvel	Caminhão	Automóvel	Caminhão
Negro de fumo	32,0	30,0	31,0	28,5
Borracha sintética	37,0	23,0	26,0	21,0
Borracha natural	5,0	27,0	20,0	33,0
Solúvel em acetona	21,0	16,0	19,0	12,5
Sílica	5,0	4,0	5,0	5,0

(fonte: Heitzman, 1992b)

O desmonte de pneus pode ser feito de várias maneiras, pelo cisalhamento mecânico da borracha a temperatura ambiente, criogênico pelo congelamento do material e posterior cisalhamento e pelo processo de extrusão com uso de aditivos (Bahia e Davies, 1995). A borracha granulada também pode ser obtida pelo reaproveitamento da raspas para recauchutagem dos pneus.

Sob a ótica dos benefícios pelo aspecto ecológico e social adicionado as melhorias que o pó gerado na recauchutagem e os restos de pneus moídos ao ser adicionado no concreto asfáltico proporcionando uma maior elasticidade e durabilidade podemos citar: um novo mercado de

trabalho com empresas especializadas na reciclagem de pneus; benefícios diretos no setor público com a criação de novas fontes de tributos; criação de novos empregos diretos nas empresas recicladoras e indiretos ligados a todo o processo de utilização de pneus; redução de poluição visual, ocasionado pela disposição em lugares inadequados; inibição de um dos maiores focos de criação de insetos prejudiciais à saúde, etc.

### **2.5.2 Legislação**

Em 26 de agosto de 1999, foi aprovada a Resolução Nº 258 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) (MMA, 2005), que regulamenta a responsabilidade das empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional.

Esta Resolução determinou os seguintes prazos e quantidades de destino final:

A partir de 1º de janeiro de 2002: para cada quatro pneus novos fabricados no País ou importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destino final a um pneu inservível;

A partir de 1º de janeiro de 2003: para cada dois pneus novos fabricados no País ou importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destino final a um pneu inservível;

A partir de 1º de janeiro de 2004:

- a) Para cada um pneu novo fabricado no País ou importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destino final a um pneu inservível;
- b) Para cada quatro pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destino final a cinco pneus inservíveis;

A partir de 1º de janeiro de 2005:

- a) Para cada quatro pneus novos fabricados no País ou importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destino final a cinco pneus inservíveis;
- b) Para cada três pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destino final a quatro pneus inservíveis.

O IBAMA é órgão que responsável pela aplicação da resolução, podendo punir os infratores com base na Lei de Crimes Ambientais.

Muitos países legislaram para direcionar seus departamentos de transporte a pesquisar a possibilidade de utilização de materiais recicláveis em obras de pavimentação. Em especial, o governo americano, tem dado incentivo 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).

Atualmente, vários estados americanos cobram dos fabricantes de pneus uma taxa, em torno de cinco dólares, para ser utilizado em projetos que utilizem reciclagem dos pneus usados, tais como: usinas de desmonte e de produção de CRM (Crumb Rubber Modified) (Specht, 2004).

## **2.5.3 Possíveis aproveitamentos de pneus usados**

### **2.5.3.1 Recauchutagem ou fabricação de novos pneus**

A recauchutagem dos pneus é vastamente utilizada no Brasil atingindo 70% da frota de transporte de carga e passageiros (CEMPRE, 2004). O pneu pode ser recauchutado, aproximadamente, três vezes, dependendo do estado de conservação da carcaça. O processo de recauchutagem das bandas de rodagem gera um pó de borracha denominado de Raspa. Estas Raspas podem ser utilizadas como insumo para produção de pavimentos asfálticos.

### **2.5.3.2 Muros de arrimo e obras de contenção**

Em diversos países já é uma realidade a construção de estruturas de contenção utilizando pneus velhos. Os pneus são amarrados lado a lado com arame galvanizado ou corda e preenchidos com solo local ou material pétreo, são estruturas semelhantes aos gabiões (Specht, 2004).

### **2.5.3.3 Pavimentação**

Atualmente, a pavimentação é uma das áreas mais estudadas e com maior potencial de utilização, pois utiliza um grande volume de borracha de pneumáticos usados e melhora as características dos ligantes asfálticos e do concreto asfáltico, com a adição de farelo de borracha de pneu.

### **2.5.3.4 Reprodução de animais marinhos**

No Brasil é utilizado como estruturas de recifes artificiais no mar para criar ambiente adequado para reprodução de animais marinhos.

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

Utilizado em autódromos e pistas de corrida que necessitem de uma limitação de território a percorrer. Os pneus servem para amortecer em caso de acidente, quando montados em estruturas tipo muro nas laterais das rodovias.

#### 2.5.3.6 Fonte energética

Utilizados nas termoelétricas como fonte de energia calorífica, sendo necessário a instalação de sistemas para amenizar o problema da emissão de resíduos para a atmosfera. No Brasil, empresas como a Pirelli e a Mercedes Benz, por exemplo, já estão economizando 50% no descarte de seus resíduos, e os fabricantes de cimento em combustível. As indústrias de papel e celulose, as fábricas de cal e cimento, são os principais usuários de pneus em caldeiras, utilizam a carcaça inteira e aproveitam alguns óxidos contidos nos metais dos pneus radiais (Tunes, 1998).

#### 2.5.3.7 Agregado para placas de concreto

Na cidade gaúcha de Santa Cruz, foi desenvolvida uma tecnologia própria, utilizando rasps de pneu como agregado na confecção de placas de concreto para construção de habitações populares.

#### 2.5.3.8 Diversos

A trituração da borracha de pneus para uso na regeneração da borracha, mediante a adição de óleos aromáticos e produtos químicos desvulcanizantes resulta em uma pasta, a qual pode ser usada para produção de pisos industriais, sola de sapato, tapetes de automóveis, tapetes para banheiros, borracha de vedação, protetores para playground dentre outros. Uma outra forma de reaproveitamento dos pneus é utilizar a borracha cortada em pedaços de 5cm para aeração de composto orgânico (suporte estrutura). Essas partículas devem ser retiradas do adubo antes da sua comercialização.

## 2.5.4 Utilização de borracha reciclada de pneus na pavimentação

### 2.5.4.1 Histórico

As primeiras inclusões de polímeros em alcatrões datam de 1823, segundo Zanzotto e Kennephol (1996), quando T. Hancock patenteou um produto para impermeabilização de madeira a prova d'água em cascos de navios. A primeira patente que utilizou borracha natural com betume na pavimentação foi de E.E. Cassel em 1844. Em Cannes na França, em 1901, começaram as primeiras aplicações práticas de asfalto modificado (Specht, 2004).

Em 1898, na Inglaterra, também foi patenteado um produto que modificava as propriedades dos betumes com borracha chamado “*rubber-bitumen*”. Em 1930, na Holanda, depois na Inglaterra, começaram a utilizar borracha para modificar o asfalto.

Por volta de 1960, 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 pneus com asfalto para selar trincas no teto do seu veículo. Ele observou que com o passar do tempo a mistura com borracha, não oxidava, ao contrário daquelas com asfalto convencional (Carlson e Zhu, 1999). McDonald continuou suas experiências, depois de aposentado na cidade de Phenix, no Arizona, com a utilização em “tapa-buracos”, a sua mistura de pó de pneu e asfalto quente, que reagia por 45 minutos à uma hora, para que o material com novas propriedades se formasse, o “*asphalt-rubber*” (Carlson e Zhu, 1999).

Foram publicados no HRB (Highway Research Board), em 1963, os primeiros artigos científicos atestando a qualidade do novo material que surgia. Schnormeler publicou pesquisa e constatações, muito bem sucedidas, da aplicação de asfalto-borracha em ruas de baixo volume de tráfego na cidade de Phoenix (Schnormeler, 1975).

Em 1968, o Departamento de Transporte 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 bons resultados. Posteriormente, outros estados como Califórnia, Texas e Flórida também começaram a pesquisar.

No ano de 1992, a patente que havia inibido a aplicação desta tecnologia expirou, tornando então a tecnologia do asfalto-borracha como domínio público.

Os estados da 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 recapeamentos, selagem de trincas e camadas novas com ligante modificado com borracha reciclada. Segundo Carlson e Zhu (1999) os três estados americanos consumiram em 1998, aproximadamente 8,3 milhões de unidades de carcaças de pneus inservíveis em serviços de pavimentação.

Uma das pesquisas mais relevantes que envolve asfalto borracha está sendo desenvolvida pelo Caltrans (Departamento de Transporte da Califórnia) e pela Universidade da Califórnia utilizando o HVS (Heavy Vehicle Simulator) para acelerar a degradação do pavimento contendo borracha (Harvey, 2000).

Segundo Way (2003) somente no estado do Arizona mais de 28000 km de pavimento foram construídos ou restaurados utilizando ligantes modificados com borracha.

Países como Portugal tem investido nesta tecnologia, construindo vários trechos de rodovias usando usando ligante modificado, juntamente com as empresas Consulpav e Recipav. Na Coreia, empresas produtoras de cimentos asfálticos têm se interessado por esta nova tecnologia (Specht, 2004).

Na tabela 2 podemos observar as terminologias usadas nos processos de mistura com borracha.

Tabela 2: Terminologias dos processos de mistura da borracha

Material	Processo	Tecnologia	Produto
CRM	Via Úmida	McDonald	Ligante Modificado (Asfalto Borracha)
		Contínuos Blending	
	Via Seca	Plus Ride	Borracha Agregado (concreto asfáltico modificado por borracha)
		Genérico	
		Chunk Rubber	

(fonte:Heitzman, 1992)

#### 2.5.4.2 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 do 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 ultravioletas e antioxidantes, produzindo assim, um material mais resistente ao envelhecimento e com maior resistência a fissuração, contribuindo para uma maior durabilidade do pavimento (Specht, 2004).

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 (Specht, 2004).

As técnicas de execução e manutenção de pavimentos utilizando o asfalto-borracha pela via úmida 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) (Specht, 2004).

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 asfalto-borracha 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 asfalto-borracha, afirma que o produto deve ser feito e utilizado o mais rápido possível.

#### 2.5.4.3 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 (figura 4). 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).

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).

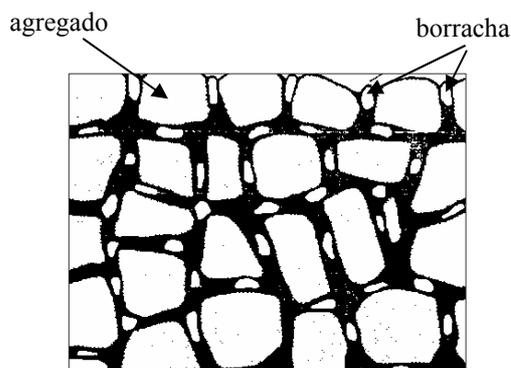


Figura 4: Ilustração de misturas com partículas sólidas de borracha

Fonte: Takallou e Hicks (1988)

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, são necessárias temperaturas maiores para mistura (160-188°C) e para compactação (148-160°C). Nas tabelas 3 e 4 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, comparada ao processo úmido, razão pela qual recebe esta denominação. Os inibidores de raios ultravioletas 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.

Tabela 3: Composição granulométrica dos agregados para misturas abertas e densas

Peneira	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

( fonte: Liang e Lee, 1996)

Tabela 4: Especificações recomendadas segundo o volume diário de tráfego

Característica	Especificação		
	A – Plus Ride 9	B – Plus Ride 12	C – Plus Ride 16
Tráfego médio diário	103	103 - 105	105
Espessura mínima (cm)	2,50	3,80	4,45
Peneira (% agr. passante)			
3/4"			100
5/8"		100	
1/2"			
3/8"	100	60 – 80	50 – 62
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
1/4" - peneira 10	---	12 máx.	12 máx.
Critérios preliminares de mistura			
% 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: 1 - em relação à massa total da mistura

(fonte: Takallou e Hicks, 1998)

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.

A produção de misturas com incorporação de borracha 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.

Com relação às vantagens da metodologia a seco, pode-se afirmar que os benefícios são menores, entretanto o custo inicial de aplicação do produto é menor não requerendo modificações nas usinas de asfalto. Suas vantagens mais marcantes são a redução acentuada do nível de ruído (utilizado com frequência na Europa para atenuar o problema do ruído - reduções no nível de ruído entre 50 a 80% são comuns), contribuição na resistência à fadiga e na redução do trincamento térmico.

No processo seco (misturas asfálticas com incorporação de borracha), os grãos da borracha representam de 0,5 a 3,0 % da massa do agregado, enquanto que no processo úmido (ligante modificado), 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 (Specht, 2004).

Para Airey et al. (2003), a produção da mistura asfáltica do processo via seca é logisticamente mais simples que a o processo via úmida, além de poder atingir um mercado maior. O processo via seca tem o potencial de consumir maiores quantidades de borracha de pneus comparado com o processo via úmida, resultando em um maior benefício ambiental.

Segundo Houssain et al (1995), usualmente utiliza-se de 2 a 3 % de borracha em relação ao peso de agregado, o que resulta em um consumo maior de borracha que o processo via úmida.

Ainda existem poucos estudos com respeito ao desenvolvimento de uso de borracha como parte do agregado, processo da via seca, principalmente quando comparado ao processo via úmida, que já possui vários quilômetros executados no Brasil, sendo ainda necessário desenvolver e adaptar a experiência internacional para a realidade de nosso país.

No estado do Rio Grande do Sul, uma parceria entre LAPAV e SMOV, construiu o primeiro trecho experimental, pelo processo via seca, no ano de 2002, junto à usina de asfalto da SMOV, em Porto Alegre. No estado de São Paulo, na cidade de Santos, uma parceria entre a Administração Municipal e o Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, foram construídos vários trechos experimentais, pelo processo via seca, onde

foram considerados diferentes espessuras de revestimento asfáltico, teores de borracha e granulometrias de borracha. O quadro 1 mostra alguns trechos executados pelo processo via úmida, mais recentes no Brasil.

Quadro 1: Trechos executados com asfalto borracha pelo processo via úmida

Relação dos serviços executados com asfalto borracha			
Data	Extensão(m)	Contratante	Localização
Janeiro/2003	5.000	Concessionária Univias-RS	BR/386-RS, entre Pouso Novo e Soledade
Março/2003	9.000	Concessionária SP/Vias-SP	SP/255, entre Avaré e Taquarituba
Mai/2003	2.457	Coviplan – Concessionária Rodoviária do Planalto-RS	BR/386-RS, entre Soledade e Carazinho
Mai/2003	1.000	Concessionária Viaoeste-SP	SP/280 – (km 69/70)
Mai/Dez/2003	5.000	Concessionária Univias-RS	BR/386-RS, entre Pouso Novo e Soledade
Jun/Dez/2003	186.000	Concessionária Rodonorte-PR	Vários segmentos
Jun/ Dez/2003	45.000	Concessionária Intervias-SP	Vários segmentos
Ago/Dez/2003	26.000	Concessionária SP/Vias-SP	SP/280 Castelo Branco
Nov/2003	2.800	Concessionária Caminhos do Paraná-PR	BR/373 e BR/277-PR
Nov/2003	400	Concessionária Ecovias-SP	SP/59, Viaduto da Alemoa em Santos
Nov/2003	500	Concessionária Ecovias-SP	SP/160, Imigrantes Pista leste (acesso a Ecovias)
Dez/2003	1.800	Conter Construções e Comércio S/A	SP/55, na cidade de Itanhaém
Nov/Dez/2003	11.800	Concessionária Econorte-PR	PR/323, entre Sertaneja e Div. PR/SP
2004	8.200	Concessionária Concepa -RS	BR 290 , Osório/ Gravataí
2005	2.800	Concessionária Concepa - RS	BR 290, Osório/Gravataí

(fonte: Grupo Greca Asfaltos, 2003 e CONCEPA, 2005)

## 2.6 TIPOS DE USINAS DE ASFALTO

Segundo Senço (1997), o concreto betuminoso usinado a quente ou concreto asfáltico, assim como as demais misturas betuminosas para as quais se exige um controle de dosagem e mistura bastante efetivo, são produzidos em usinas específicas, cujo desenvolvimento tecnológico vem apresentado melhorias substanciais, a cada ano que passa.

São dois tipos de usinas a considerar:

- a) usina gravimétricas: são descontínuas e a dosagem do agregado é feita em peso.
- b) usinas volumétricas: são contínuas, sendo a dosagem do agregado feita em volume.

São as seguintes as principais partes componentes de uma usina para preparação de misturas a quente, segundo Pinto (2000):

- a) Silos frios: são depósitos destinados a receber os diversos agregados a serem utilizados na preparação da mistura.
- b) Correia transportadora: é o mecanismo utilizado para o transporte dos agregados, desde os alimentadores dos silos frios até ao pé do elevador frio.
- c) Elevador frio: é um conjunto de caçambas cuja função é conduzir ao secador os agregados transportados pela correia.
- d) Secador de agregados: é um cilindro metálico dotado de movimento de rotação, tendo em uma de suas extremidades um maçarico. Sua função é eliminar a umidade dos agregados e aquece-los à temperatura especificada para a mistura.
- e) Coletor de pó: é constituído por um ciclone, cuja função é recuperar uma parte dos finos utilizados na mistura, evitando os inconvenientes do seu lançamento na atmosfera.

- f) Elevador quente: é um conjunto semelhante ao elevador frio, porém protegido para evitar perda de calor. Destina-se a transportar agregado do secador aos silos quentes.
- g) Peneiras: Antes de serem depositadas nos silos quentes, os agregados passam através de peneiras vibratórias que os separam geralmente em três frações.
- h) Silos quentes: destinam-se a receber os agregados aquecidos provenientes do secador, geralmente providos de termômetros ou pirômetros para indicação da temperatura.
- i) Balança: próprias das usinas gravimétricas, as balanças localizam-se sob os silos quentes.
- j) Injeção de filler: nas usinas gravimétricas, a pesagem do filler pode ser feita na balança. Nas usinas volumétricas, a quantidade de filler é controlada pela abertura do portão de um silo próprio e a introdução do mesmo é feita diretamente no misturador ou no elevador quente.
- k) Injeção de asfalto: a quantidade de asfalto é controlada em função da rotação da bomba e é introduzida diretamente no misturador.
- l) Misturador: é um dispositivo dotado de disco e palheta animados de movimento de rotação e destinado a promover a mistura íntima dos elementos ali introduzidos.

Tanto as usinas gravimétricas como as volumétricas necessitam ser calibradas antes de entrarem em operação normal. A calibragem das usinas volumétricas consiste em calcular a abertura dos alimentadores dos silos frios a fim de que se obtenha, na saída do misturador, a granulometria prevista nas especificações. Compreende também a regulagem da bomba de asfalto para obtenção da quantidade de ligante prevista. Nas usinas gravimétricas o estágio final de dosagem dos agregados é efetuado, sob a forma de pesadas cumulativas, em uma balança. Sobre esta, acham-se localizadas diretamente as comportas dos silos quentes. A figura 5 mostra o esquema das usinas gravimétricas e a figura 6 o esquema das usinas volumétricas.

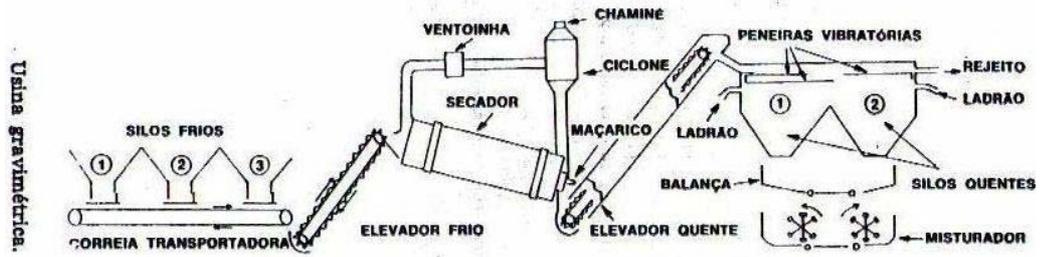


Figura 5: Esquema de uma usina gravimétrica

(fonte: Pinto, 2000)

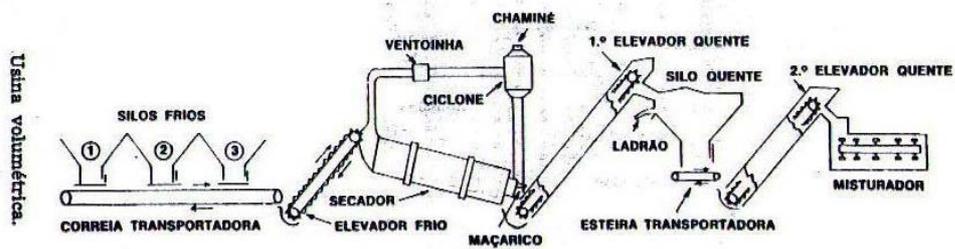


Figura 6: Esquema de uma usina volumétrica

(fonte: Pinto, 2000)

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para avaliação dos aspectos executivos de implantação de uma estrutura de um pavimento com revestimento em concreto asfáltico incorporado com borracha reciclada de pneus, submetido à aplicação das cargas do tráfego impostas em escala real, executou-se uma via urbana com dois trechos: um com revestimento em concreto asfáltico convencional e o outro com revestimento em concreto asfáltico com incorporação de borracha reciclada de pneus, conforme figura 7. A pesquisa enfocou o processo via da seca e avaliou as diversas variáveis de projetos, os processos executivos, as propriedades funcionais das camadas do pavimento, ensaios de laboratório e de campo em função da execução dos dois trechos experimentais.

Neste capítulo é apresentado o planejamento do experimento, a configuração geométrica, dados do projeto, caracterização do subleito da via, dimensionamento estrutural, ensaios, caracterização dos materiais utilizados e projeto da mistura.

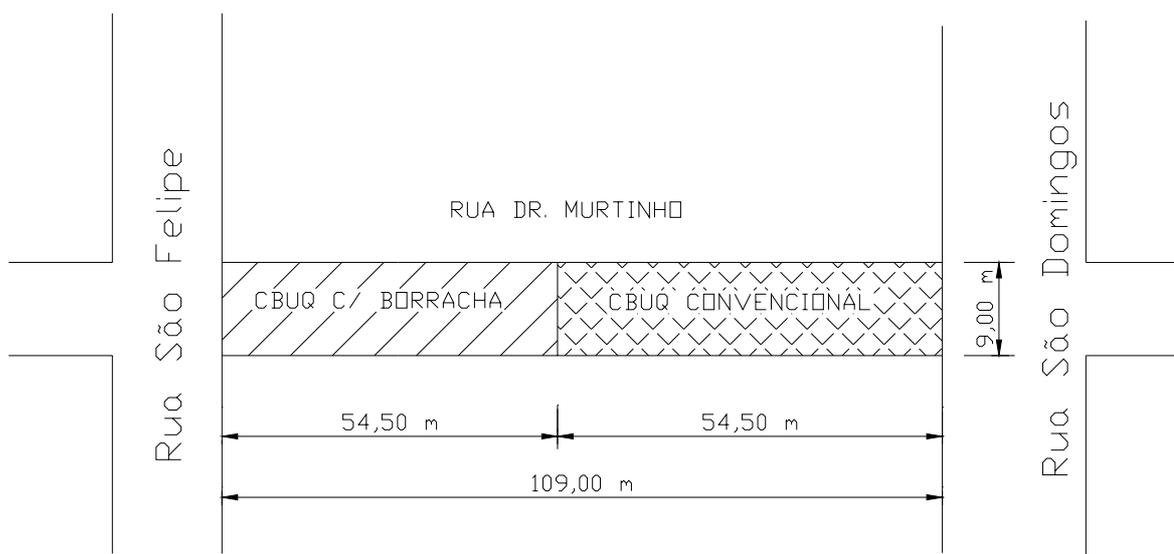


Figura 7: Configuração do trecho experimental

### 3.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

O experimento foi desenvolvido em uma via urbana, não pavimentada, como pode ser visto na figura 8, através da pavimentação de um trecho de 109m, da Rua Dr. Murтинho, trecho entre as Ruas São Felipe e São Domingos, localizada no Bairro Bom Jesus, Região Leste do Município de Porto Alegre/RS. Conforme pode ser observada na figura 9 a localização da Região Leste no mapa do Município de Porto Alegre e na figura 10 a localização deste trecho.



Figura 8: Vista panorâmica da Rua Dr. Murтинho



Figura 9: Mapa do Município de Porto Alegre  
(fonte: Guia das Ruas do Município de Porto Alegre, 2000)

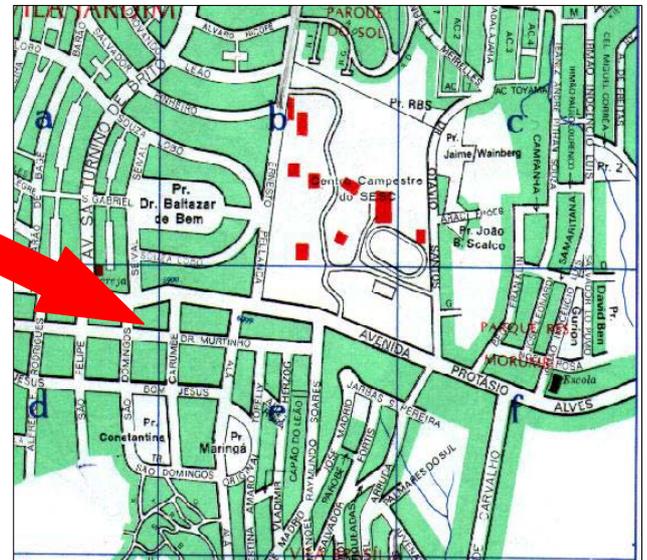


Figura 10: Localização da Rua Dr. Murтинho  
(fonte: Guia das Ruas do Município de Porto Alegre, 2000)

Para o desenvolvimento do estudo e análise do trecho experimental foram seguidas as seguintes etapas:

- a) projetos: geométrico, de drenagem superficial, de rede de água e de esgoto;
- b) contagem de tráfego;
- c) caracterização do subleito;
- d) definição da estrutura do pavimento;
- e) avaliação dos materiais disponíveis e caracterização dos mesmos;
- f) elaboração dos projeto da mistura asfáltica convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus;
- g) implantação da infraestrutura no local de rede de drenagem superficial, rede de água e esgoto;

- h) execução da terraplenagem, regularização do subleito, execução da base de brita graduada, colocação dos meios-fios, imprimação e ensaios de controle tecnológico;
- i) calibração das usinas: usina tipo gravimétrica para o concreto asfáltico convencional e usina tipo volumétrica para o concreto asfáltico com incorporação de borracha reciclada de pneus;
- j) execução dos revestimentos com concreto asfáltico convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus;
- k) ensaios de campo e de laboratório;
- l) análise dos resultados.

### 3.3 PROJETO DO EXPERIMENTO

#### **3.3.1 Projetos: geométrico, de drenagem superficial, de rede de água e de esgoto**

Foram utilizados os projetos que haviam sido elaborados por empresa contratada pela SMOV/PMPA em 1997, e utilizado para pavimentação de outro trecho da via, que não era pavimentada. Estes projetos também contemplavam este trecho do experimento.

#### **3.3.2 Definição da estrutura do pavimento**

O pavimento foi dimensionado pelo método do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), método adotado Prefeitura Municipal de Porto Alegre para as vias com revestimento de pavimento flexível. O método de dimensionamento proposto pelo Eng. Murillo Lopes de Souza, baseia-se no ensaio CBR (*California Bearing Ratio*), no índice de grupo, no tráfego e nos coeficientes de equivalência estrutural.

### 3.3.2.1 Estudo do tráfego e número equivalente (N)

O pavimento é dimensionado em função do número equivalente (N) de operações de um eixo tomado como padrão durante o período de projeto escolhido e obtido a partir dos estudos de tráfego, conforme a equação 1, do Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis de 1996 do ex-DNER (Pinto, 2001).

$$N = 365 \cdot P \cdot V_m \cdot FE \cdot FC \cdot FR \quad (\text{equação 1})$$

Sendo:

N = parâmetro representativo do efeito destrutivo do tráfego, correspondente ao número equivalente de repetições do eixo de 8,2tf;

P = período de projeto, em anos;

V<sub>m</sub> = volume médio diário de tráfego, durante o período de projeto na faixa de projeto;

FE = fator de eixos, que é a média ponderada das quantidades percentuais dos diversos tipos de eixos que atuam no pavimento;

FC = fator de equivalência de carga dos eixos da frota para o eixo padrão 8,2tf;

FR = fator climático regional.

A contagem de tráfego classificatória realizada no trecho está apresentada no quadro 2, mostra a frequência, a média de passagem e a carga por eixo dos veículos e no quadro 3 o fator de carga do veículo. As pesquisas de volume e classificação do tráfego foram conduzidas de forma manual. A técnica manual é aquela caracterizada por observações feitas em campo por equipes de pesquisa. É aplicada quando se necessita apenas de uma amostra dos dados coletados. Utilizadas quando não há a possibilidade do uso de equipamentos. Possui custo baixo e maior precisão na classificação dos veículos. As pesquisas foram executadas em 2 períodos de 2 horas cada (07h30min às 09h30min e 17h30min às 19h30min). Após a coleta dos dados são usados fatores de correções.

A contagem de tráfego foi realizada em 13/05/2004 pela Gerência de Pavimentos da Divisão de Conservação de Vias Urbanas da SMOV/PMPA.

No método, o Número Equivalente “N”, necessário ao dimensionamento do pavimento de uma rodovia, é definido pelo número de repetições equivalentes de um eixo-padrão de 8,2t (18.000 lb ou 80kN), durante o período de vida útil do projeto. Na determinação no número “N” são considerados fatores relacionados com a composição do tráfego e referidos a cada categoria de veículos, definida em função da carga transportada e do número de eixos dos veículos (Pinto, 2001).

Quadro 2: Composição do tráfego

Veículo	Frequência			Média passagem	Carga por eixo (tf)	
	Mensal	Semanal	Diária		Dianteiro	Traseiro
Caminhão de lixo		3		3	8	12
Ônibus					8	8
Caminhão do gás		3		3	5	8
Veículo leve			480	3360	5	5
Veículo médio			22	154	5	8
Veículo pesado			16	112	6	17
Média passagens diárias V1	518,86					

Quadro 3: Cálculo do fator de carga - FC

Eixo Simples (tf)	Nº de eixos semanal	%	Fator de equivalência	Equivalência operações
5	6877	94,67	0,1	0,0947
6	112	1,54	0,3	0,0046
8	160	2,20	1,0	0,0220
10				
12	3	0,04	9,0	0,0037
17	112	1,54	9,0	0,1388
Total	7264	100,00		0,26
1037,71 eixos ao dia			FC = 0,26	

Considerando-se um período de projeto P de 10 anos, e uma taxa de crescimento anual linear t de 5% ao ano, fator de eixos de veículos FE= 2, fator climático regional FR= 1 e média de passagens por dia V1= 518,86 cabe definir o número acumulado de passagem de carga padrão pela equação 1. A equação 2 fornece o volume médio diário.

$$Vm = V1[2 + (P - 1)t/100]/2 \quad (\text{equação 2})$$

Sendo:

Vm = volume médio diário de tráfego

V1 = volume médio diário de tráfego no ano de abertura

P = período de projeto, em anos;

t = taxa de crescimento anual do tráfego.

Resolvendo as equações 1 e 2, obtém-se:

$$Vm = 635,60 \text{ veíc/dia}$$

$$N = 1,21 \times 10^6$$

### 3.3.2.2 Caracterização do subleito

Foram realizados sondagens no solo, mediante o emprego de trado, identificando e coletando os materiais constituintes das camadas subjacentes ao pavimento, e por meio dos ensaios foi definido a capacidade suporte do subleito, os ensaios foram realizadas no Laboratório de Solos da SMOV.

Para a definição da capacidade de suporte do subleito foram utilizados os resultados de CBR de 3 furos de sondagem, conforme croqui da figura 11, adotando-se os valores que se referem aos horizontes do subleito, desprezando-se aqueles cujo CBR for menor que 2% ou ainda que apresente expansão maior que 2%. No presente estudo não ocorreu a situação em que fosse

necessário desprezar qualquer valor. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 5 e no quadro 4. No quadro 5 apresentam-se os resultados dos ensaios de índices físicos.

Em exame da distribuição dos valores de CBR ao longo do trecho de 109 m, há certa homogeneidade. Utilizando-se o conjunto de valores na determinação do índice suporte, adotou-se Índice de Suporte de Projeto (ISP) =14%.

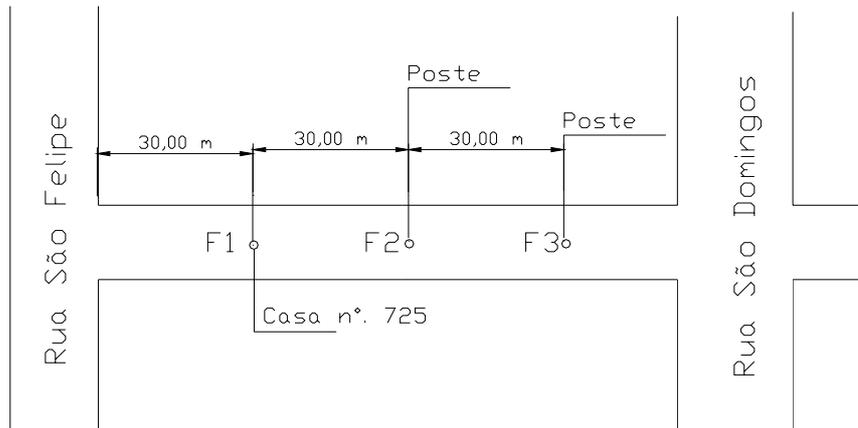


Figura 11: Croqui de localização dos furos de sondagem

Tabela 5: Análise granulométrica do subleito natural

Furo	Prof.(cm)	Granulometria (% acumulada que passa)			
		# 4	# 10	# 40	# 200
1	0,34 a 1,05	100	69,8	41,1	38,3
2	0,36 a 1,15	100	70,6	52,7	51,3
3	0,32 a 1,12	100	63,7	42,7	41,3

Quadro 4: Classificação e característica do subleito

Furo	Classificação		I.S.C.				Tipo de solo
	IG	HRB	$\gamma_D$ (kN/m <sup>3</sup> )	Wot (%)	Expansão (%)	ISC (%)	Classificação visual
1	1	A-4	19,02	10,2	0,21	14,80	Argila silto-arenosa cinza
2	3	A-4	19,00	10,4	0,33	9,20	Argila silto-arenosa c/ pedregulho marrom
3	1	A-4	20,00	10,1	0,19	14,00	Argila silto-arenosa c/ pedregulho marrom

Quadro 5: Resultados dos ensaios de índices físicos

Furos	Índices físicos		
	LL (%)	LP (%)	IP (%)
1	Nulo	Nulo	Nulo
2	23,7	15	8,7
3	Nulo	Nulo	Nulo

### 3.3.2.3 Estrutura do pavimento

Dispondo do N e ISP, obtêm-se no ábaco de dimensionamento, as espessuras das camadas que irão compor o pavimento. Ficando constituído conforme apresentado na figura 12.

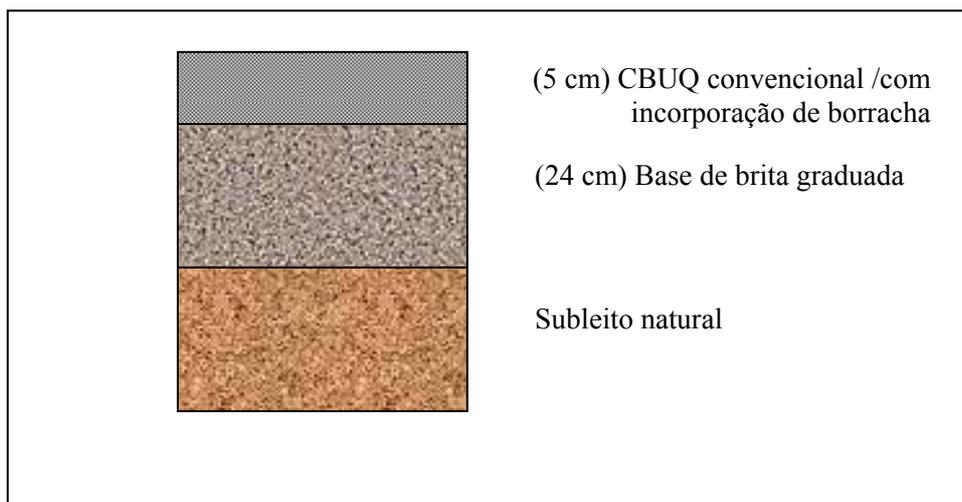


Figura 12: Estrutura do pavimento

### 3.3.2 Materiais utilizados na pesquisa

#### 3.3.2.1 Substituição de solo e regularização

Devido à substituição de solo em áreas onde verificou-se solo com baixa capacidade de suporte com resíduos de lixo não detectado na sondagem, utilizou-se areia para substituição de solos, de procedência da Empresa Comercial de Areia Vencedora Ltda, Bairro Humaitá, em Porto Alegre, às margens do Rio Guaíba. Nas áreas em que foi necessária a substituição do solo, removeu-se 50 cm de solo e foi preenchido com areia de granulometria média.

Devido às irregularidades do greide de terraplenagem, provocado pela substituição de solos em alguns lugares, executou-se uma camada de espessura variável de 5 cm de saibro com a finalidade de regularização do greide de terraplenagem atendendo a geometria projetada. A tabela 6 mostra a granulometria e o quadro 6 apresenta as características do saibro utilizado de procedência da Saibreira COMMEPP, localizada na Est. João de Oliveira Remião/Viamão.

Tabela 6: Granulometria do saibro

Abertura da peneira	% acumulado que passa em peso
Nº 4	100
Nº 10	50,6
Nº 40	25,0
Nº 200	8,3

Quadro 6: Características do saibro

Propriedades do saibro	Valor
Teor de umidade ótimo, %	8,3
Peso específico kN/m <sup>3</sup>	19,83
% que passa na peneira 200	8,3
Expansão %	0,14
ISC %	30,1

### 3.3.2.2 Base de brita graduada

A brita graduada utilizada na pista experimental era procedente da Pedreira Pedraccon Mineração Ltda, localizada na Lomba do Pinheiro, em Porto Alegre, proveniente de rocha granítica. A tabela 7 apresenta a análise granulométrica e o quadro 7 as características da base de brita graduada.

Tabela 7: Análise granulométrica da brita graduada

Abertura da peneira	% acumulado que passa em peso
1 1/2"	100
3/4"	60,1
3/8"	57,3
Nº 4	50,3
Nº 40	7,6
Nº 200	1,2

Quadro 7: Característica da brita graduada da base

Propriedades da brita	Valor
CBR %	90,8
Teor de umidade ótimo, %	6,2
Peso específico kN/m <sup>3</sup>	21,28
% que passa na peneira 200	1,2%

### 3.3.2.3 Ligante asfáltico

O cimento asfáltico utilizado foi o CAP 50/60, proveniente da Refinaria Alberto Pasqualini em Canoas/RS, comercializado pela BR Distribuidora S.A. No quadro 8 estão as propriedades do ligante utilizado com as especificações vigentes, conforme Certificado de Ensaio fornecido pela PETROBRÁS. A partir da Resolução Nº. 19, de 11 de julho de 2005, os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) são classificados somente por penetração.

Quadro 8: Característica do ligante utilizado

Ensaio	Unidades	Método	Especificação	CAP 50/60
Penetração(100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	ASTM D5	50 a 60	54
Ductilidade a 25° C	cm	ASTM D113	60 min.	>147
ECA - % da Penetração Original	%	ASTM D5	50 min.	67
Variação em Massa	%	ASTM D1754	1,0 max.	-0,12
Índice de Suscebibilidade Térmica		ABNT (1)	-1,5 a 1,0	0,3
Ponto de Fulgor	°C	ASTM D92	235 min.	>236
Solubilidade em Tricloroetileno	% massa	ASTM D2042	99,5 min.	99,76
Viscosidade Saybolt Furol a 135 °C	s	ASTM E102	110 min.	241,2
Aquecimento a 175°C		ASTM D5	NESP	NESP

#### 3.3.2.4 Agregados

Os agregados utilizados neste trabalho foram adquiridos da Empresa Mineração Vera Cruz Ltda, RS 118, Santa Tecla/Gravataí. A brita 3/4, 3/8, e pó de pedra e areia fina são provenientes de rocha basáltica.

A tabela 8 apresenta a granulometria dos agregados utilizados nesta pesquisa. No quadro 9 estão apresentadas algumas características dos agregados. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação /UFRGS.

Tabela 8: Distribuição granulométria dos agregados

Peneira		Percentagem passante em massa (%)			
n°	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra	Areia fina
3/4"	19,10	99,7	100,0	100,0	100,00
1/2"	12,70	54,5	100,0	100,0	100,00
3/8"	9,50	22,6	99,4	100,0	100,00
n 4	4,76	2,7	30,8	99,5	97,62
n 10	2,00	1,7	4,5	75,7	80,65
n 40	0,42	1,3	2,7	37,9	20,71
n 100	0,149	1,1	2,2	22,5	2,63
n 200	0,074	0,9	1,7	13,6	0,76

Quadro 9: Características dos agregados utilizados

Propriedade	Método	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra	Areia
Absorção	DNER 081/98	0,694%	--	--	--
Massa Específica (kN/m <sup>3</sup> )	--	27,62			
Índice de Lamelaridade	DAER 108/01	16%	30%	--	--

### 3.3.2.5 Borracha

Nesta pesquisa foi utilizada uma borracha proveniente da produção de bandas para recapagem e borracha proveniente da raspagem de pneumáticos na preparação para o processo de recauchutagem (Raspa) como mostra a figura 13, estudado por Specht (2004), onde testou os efeitos do percentual e granulometria de borracha em misturas asfálticas.

A borracha foi doada pela empresa Vipal Borrachas S.A. de Nova Prata.



Figura 13: Mostra da borracha reciclada de pneu utilizada na pesquisa

A borracha a ser adicionada nestas misturas é uma composição entre dois grupos de borrachas. Foram utilizados 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 (Specht, 2004).

A tabela 9 e a figura 14 apresentam a análise granulométrica das borrachas estudadas por Specht (2004). A tabela 10 apresenta a análise granulométrica da borracha utilizada na pesquisa.

Tabela 9: Análises granulométricas das borrachas estudadas por Specht

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

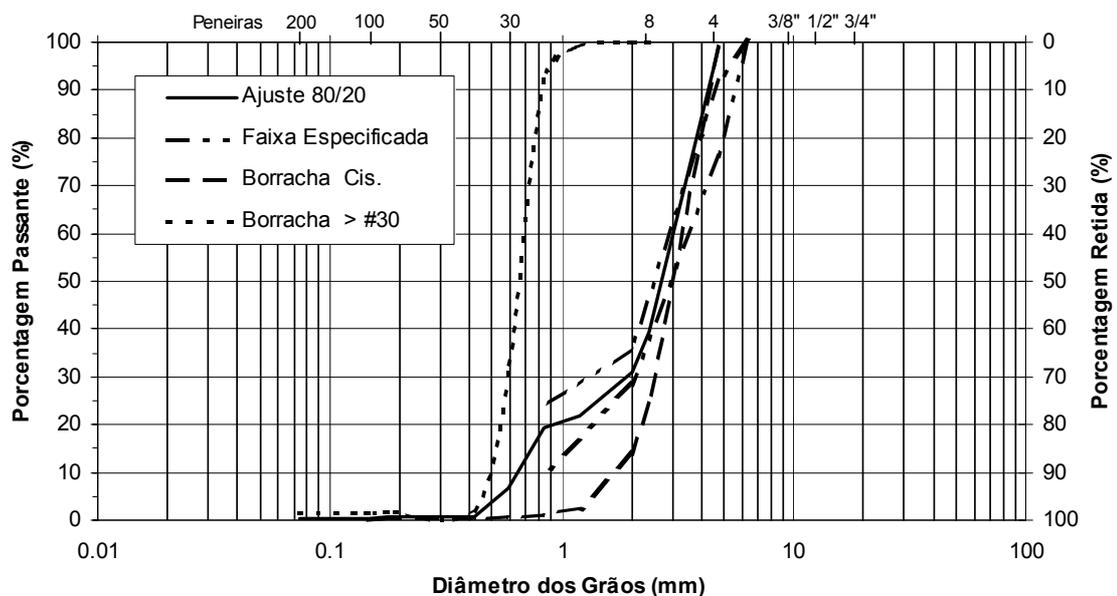


Figura 14: Composição granulométrica 80/20 (%) / (&gt;#30)

(fonte: Specht,2004)

Tabela 10: Análise granulométrica da borracha utilizada neste estudo

Peneira	Porcentagem passante em massa (%)	
n°	mm	Borracha
3/4"	19,10	100,00
1/2"	12,70	100,00
3/8"	9,50	100,00
n 4	4,76	99,50
n 10	2,00	48,00
n 40	0,42	5,10
n 100	0,149	0,10
n 200	0,074	0,10

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 uma fração de borracha.

No quadro 10 estão apresentadas as características médias das amostras de borracha. A metodologia adotada para determinação da massa específica real das borrachas, 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 297-93. O valor característico de massa específica e recomendado pela ASTM D 6114-97, para utilização da borracha como modificador de ligantes asfálticos, é de  $11,5 \text{ kN/m}^3 \pm 0,05$  (Specht, 2004).

Quadro 10: Propriedades das borrachas utilizadas

Propriedade	>#30	Cis
Massa específica real (kN/m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	11,47	11,38
Massa específica real (kN/m <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>	11,00	11,40
Massa específica aparente (kN/m <sup>3</sup> )	4,20	4,80
Superfície específica (m <sup>2</sup> /kN)	78808	9798
% Negro de fumo <sup>3</sup>	32,21	33,61
% Resíduo <sup>3</sup>	1,07	2,41
Tinicial de decomposição (°C) <sup>3-4</sup>	175	175
Tfinal de decomposição (°C) <sup>3-4</sup>	484	492

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.

(fonte: Specht, 2004)

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 -MEV, apresentados nas figuras 15 e 16 (Specht, 2004).

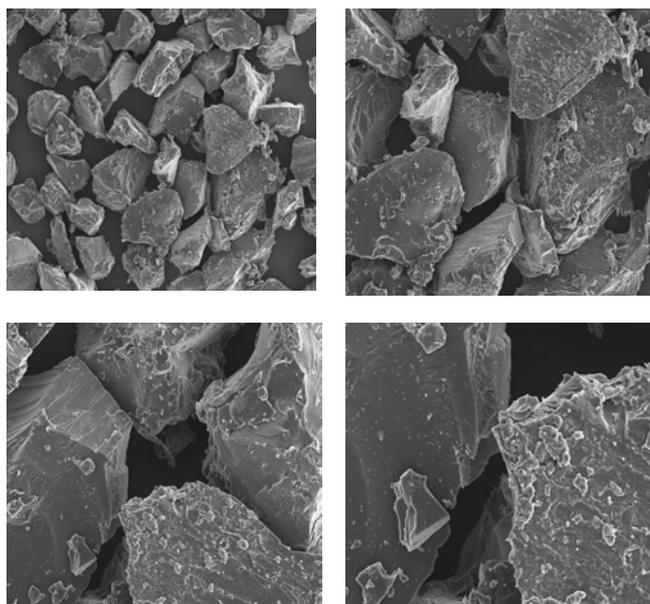


Figura 15: Imagens de MEV, aumento de 25, 50, 100 e 200x – Amostra VIPAL >30 mesh

(fonte: Specht, 2004)

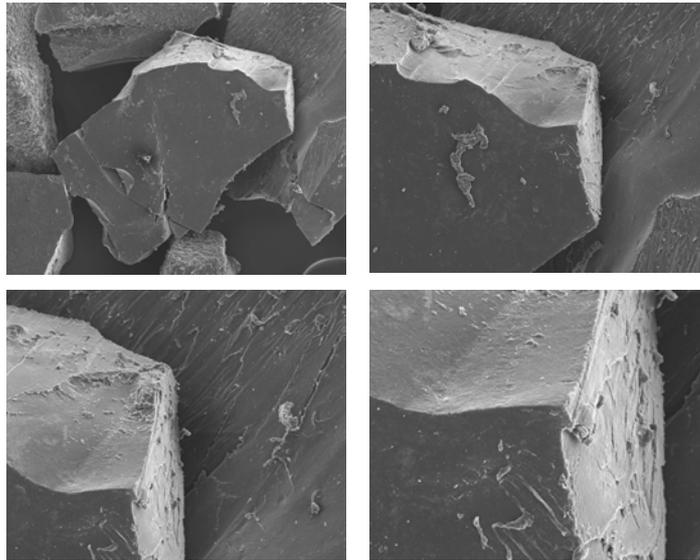


Figura 16: Imagens de MEV, aumento de 20, 50, 100 e 200x – Amostra VIPAL Cisalhada  
(fonte: Specht, 2004)

### 3.3.3 Projeto das misturas asfálticas

A graduação utilizada para as misturas foi a Faixa II do Caderno de Encargos do Município de Porto Alegre, Volume 2 (1996). O projeto das misturas asfálticas convencional e com incorporação de borracha de pneu foram definidos e analisados seguindo a Metodologia Marshall.

As características e comportamento das misturas foram avaliados:

- a) estabilidade e fluência Marshall;
- b) densidade da mistura asfáltica;
- c) volume de vazios;
- d) relação betume-vazios;
- e) módulo de resiliência;
- f) resistência à tração na compressão diametral.

## 3.3.3.1 Composição granulométrica das misturas asfálticas

A tabela 11, 12 e a figura 17 mostram a composição granulométrica e especificação da mistura asfáltica convencional.

Tabela 11: Composição granulométrica da mistura convencional

Composição da mistura						
% mistura		22%	30%	40%	8,0%	
Peneira	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra	Areia fina	
3/4"	19,10	21,9	30,0	40,0	8,0	
1/2"	12,70	12,0	30,0	40,0	8,0	
3/8"	9,50	5,0	29,8	40,0	8,0	
n 4	4,76	0,6	9,2	39,8	7,8	
n 10	2,00	0,4	1,4	30,3	6,5	
n 40	0,42	0,3	0,8	15,1	1,7	
n 100	0,149	0,2	0,7	9,0	0,2	
n 200	0,074	0,2	0,5	5,4	0,1	
Frações	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra	Areia fina	0	Total
%	22%	30%	40%	8%	0,0%	100%

Tabela 12: Granulometria da mistura asfáltica convencional e faixa especificada

Especificação e mistura						
Peneira	mm	Limite%	Centro faixa%	Faixa de Trabalho%		Mistura%
3/4"	19,10	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9
1/2"	12,70	90 - 100	95,0	90,0	95,0	90,0
3/8"	9,50	80 - 92	86,0	80,0	92,0	82,8
n 4	4,76	62 - 77	69,5	62,0	77,0	57,4
n 10	2,00	42 - 57	49,5	42,0	57,0	38,5
n 40	0,42	18 - 29	23,5	18,0	29,0	17,9
n 100	0,149	10 - 20	15,0	10,0	20,0	10,1
n 200	0,074	5 - 8	6,5	5,0	8,0	6,2

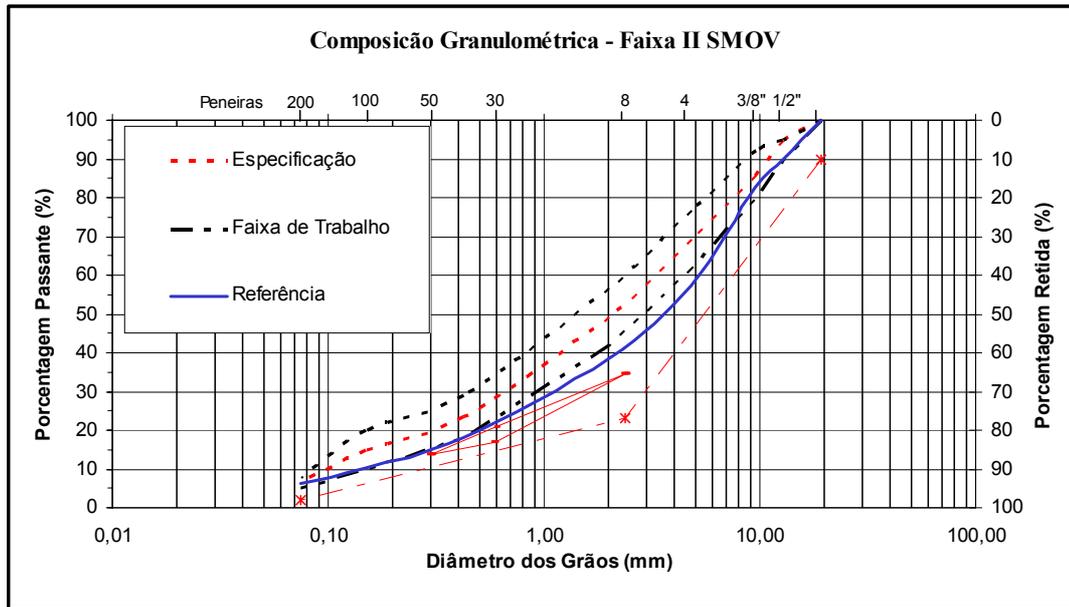


Figura 17: Composição granulométrica

A tabela 13, 14 e a figura 18 mostra a composição granulométrica e especificação da mistura asfáltica com incorporação de borracha reciclada de pneus.

Tabela 13: Composição da mistura asfáltica com incorporação de borracha reciclada de pneus

Composição da mistura						
% mistura		22%	22%	47%	6,0%	3,0%
Peneira	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra	Areia fina	Borracha
3/4"	19,10	21,9	22,0	47,0	6,0	3,0
1/2"	12,70	12,0	22,0	47,0	6,0	3,0
3/8"	9,50	5,0	21,9	47,0	6,0	3,0
n 4	4,76	0,6	6,8	46,7	5,9	3,0
n 10	2,00	0,4	1,0	35,6	4,8	1,4
n 40	0,42	0,3	0,6	17,8	1,2	0,2
n 100	0,149	0,2	0,5	10,6	0,2	0,0
n 200	0,074	0,2	0,4	6,4	0,0	0,0
Frações	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra	Areia fina	Borracha	Total
%	22%	22%	47%	6%	3,0%	100%

Tabela 14: Especificação da mistura asfáltica com incorporação de borracha de pneus

Especificação e mistura						
Peneira	mm	Limite%	Centro faixa%	Faixa de Trabalho%		Mistura%
3/4"	19,10	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9
1/2"	12,70	90 - 100	95,0	90,0	95,0	90,0
3/8"	9,50	80 - 92	86,0	80,0	92,0	82,8
n 4	4,76	62 - 77	69,5	62,0	77,0	62,9
n 10	2,00	42 - 57	49,5	42,0	57,0	43,2
n 40	0,42	18 - 29	23,5	18,0	29,0	20,1
n 100	0,149	10 - 20	15,0	10,0	20,0	11,4
n 200	0,074	5 - 8	6,5	5,0	8,0	7,0

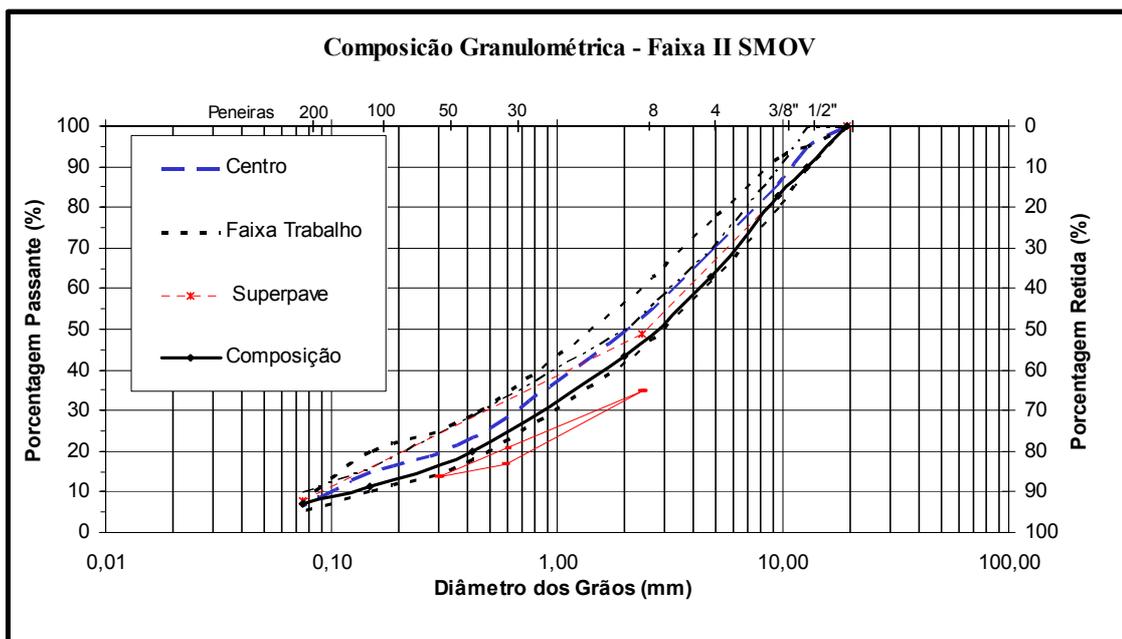


Figura 18: Composição granulométrica

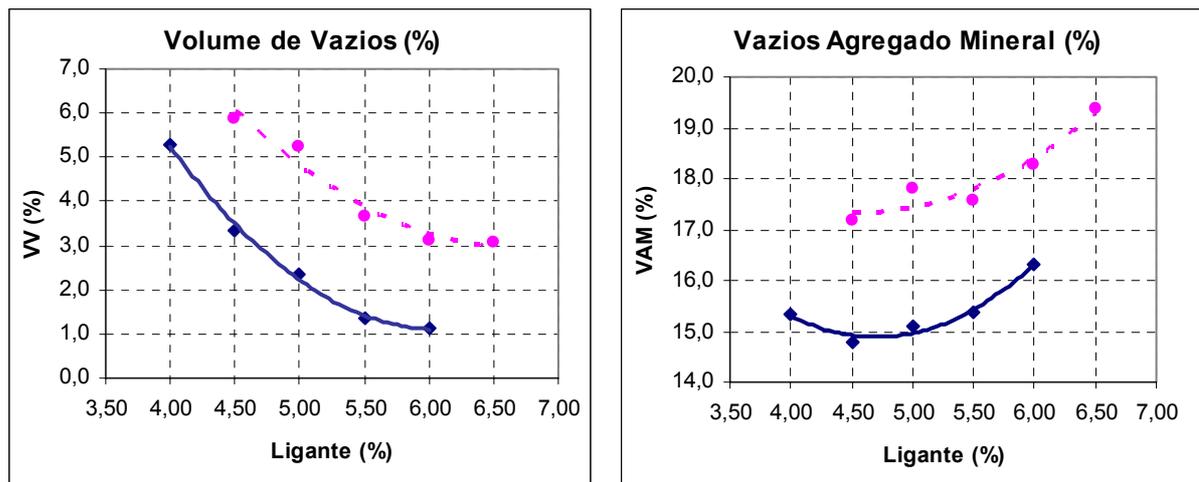
### 3.3.3.2 Dosagem Marshall

Foram moldadas 25 amostras cilíndricas (5 para cada teor de betume), para determinação do teor de ligante e realização de ensaios mecânicos, sendo 25 corpos-de-prova para a mistura asfáltica convencional e 25 corpos-de-prova para mistura asfáltica com incorporação de

borracha reciclada de pneus, conforme mostra a figura 19. As misturas com incorporação de borracha de pneus foram mantidas aquecidas por 1 hora, após a mistura e antes da compactação. A dosagem Marshall das misturas resultou nas características apresentadas nas figuras 20, 21 e 22. A tabela 15 mostra as propriedades finais das misturas.

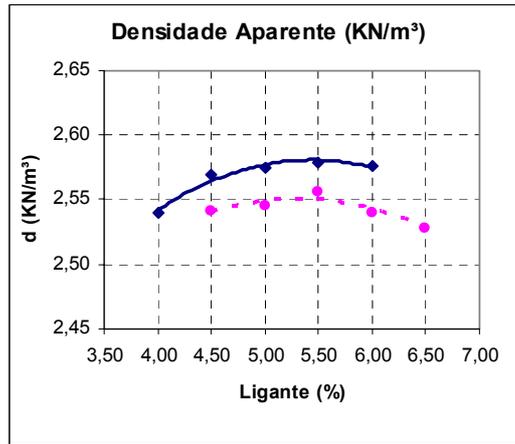
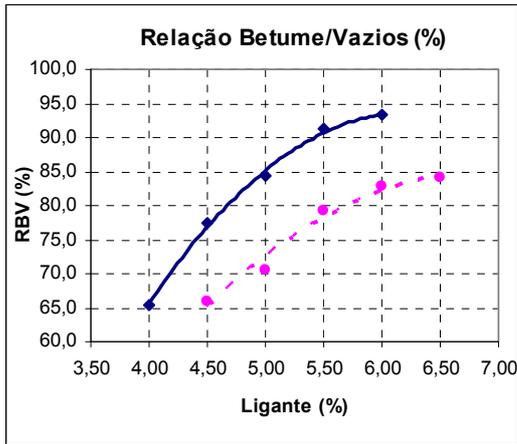


Figura 19: Corpos-de-prova moldados para a realização dos ensaios

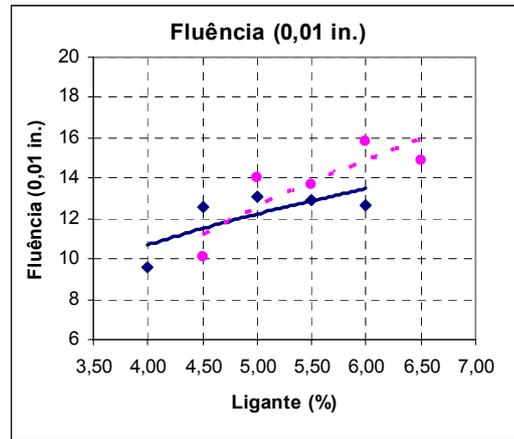
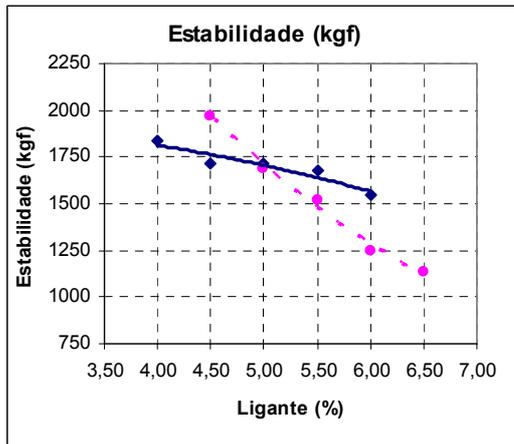


— Mistura asfáltica convencional      - - - - - Mistura asfáltica com borracha

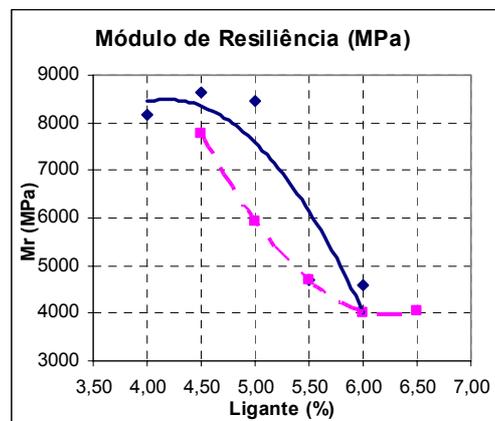
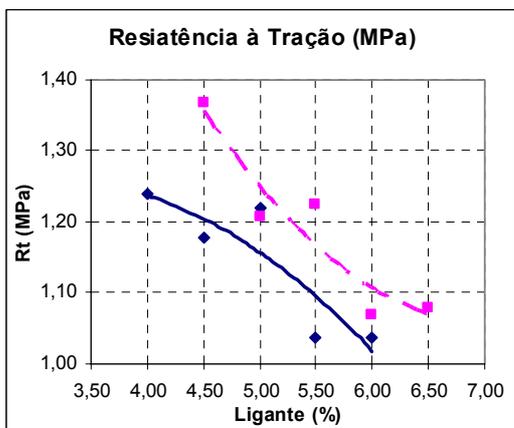
Figura 20: Propriedades das misturas asfálticas convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus



— Mistura asfáltica convencional      - - - Mistura asfáltica com borracha

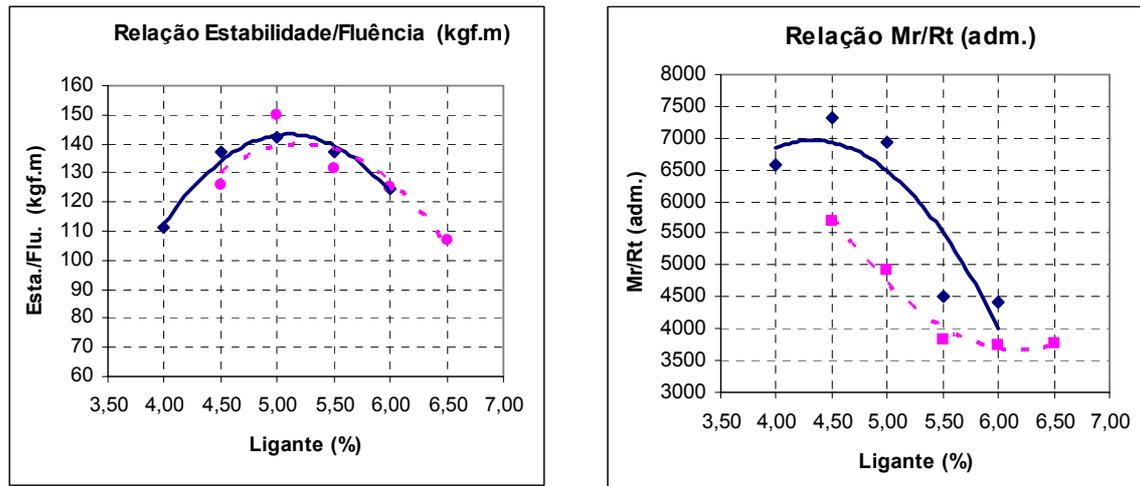


— Mistura asfáltica convencional      - - - Mistura asfáltica com borracha



— Mistura asfáltica convencional      - - - Mistura asfáltica com borracha

Figura 21: Propriedades das misturas asfálticas convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus



— Mistura asfáltica convencional

- - - Mistura asfáltica com borracha

Figuras 22: Propriedades das misturas asfálticas convencional e incorporada com borracha reciclada de pneus

Tabela 15: Propriedades de projeto das misturas asfálticas convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus

Propriedades finais das misturas			
Propriedade	ESP 16/98 DAER	Convencional	Com borracha
Teor de Betume (%)	--	4,35	5,45
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,00	4,00
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	74,00	78,00
Vazios do Agregado Mineral (%)	>16	15,00	17,70
Densidade Máxima Teórica (kN/m <sup>3</sup> )	--	2,67	2,67
Densidade Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	97% (mínimo)	2,56	2,55
Estabilidade (kgf)	> 800	1750	1500
Fluência (1/100in)	8 a 16	11	14
Resistência à Tração (MPa)	--	1,22	1,16
Módulo de Resiliência (MPa)	--	8400	4700
Relação Mr/Rt (adm.)	--	6885	4052
Relação Est/Fluência (kgf.m)	--	122	133
Relação Filler/Betume (%)	0,6 a 1,6 (Superpave)	1,42	1,28

## 3.4 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS E TEXTURA SUPERFICIAL DE REVESTIMENTO

### 3.4.1 Ensaios de laboratório

#### 3.4.1.1 Dosagem Marshall

Este método foi idealizado para a determinação da quantidade de ligante que deveria ser usada na composição de misturas betuminosas, destinadas a serviços de pavimentação rodoviária. Foi desenvolvido na década de 30 por Bruce G. Marshall, do Departamento de Transporte do Estado do Mississippi, nos Estados Unidos. É um método que dimensiona uma mistura asfáltica através da análise de estabilidade/fluência e densidade/vazios.

A partir da Metodologia Marshall obtém-se além da estabilidade e fluência, o volume de vazios, a massa específica aparente, a relação betume-vazios e os vazios de agregado mineral dos corpos-de-prova ensaiados. A figura 23 mostra a Prensa Marshall do Laboratório de Pavimentação da UFRGS utilizada nesta pesquisa.



Figura 23: Prensa Marshall

### 3.4.1.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral ou tração por compressão diametral foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo B. Carneiro da COPPE/UFRJ, para determinação da resistência à tração de corpos-de-prova de argamassa, sendo conhecido no exterior como “ensaio brasileiro”, posteriormente o investigador Schmidt da Chevron, Califórnia, introduziu esse ensaio para misturas betuminosas sob carregamento repetido (Pinto, 2001). A figura 24 mostra o estado de tensões no ensaio brasileiro.

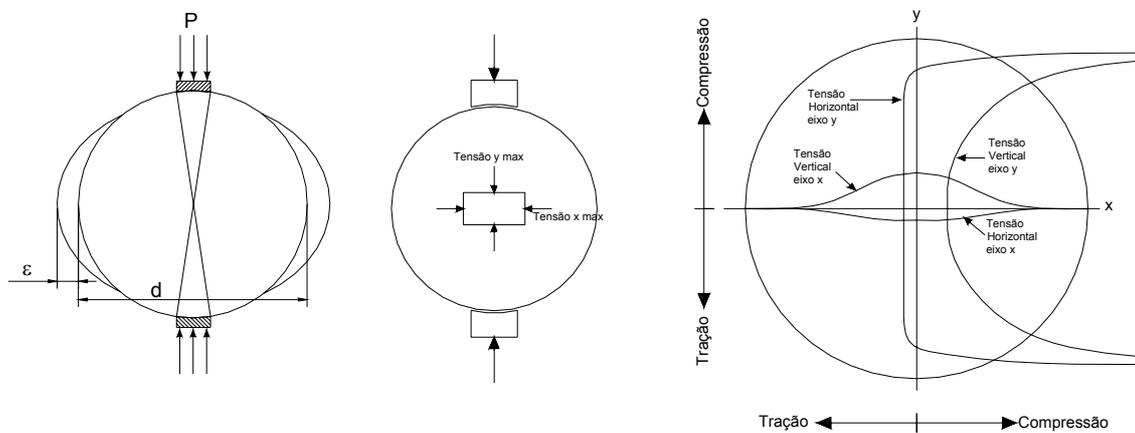


Figura 24: Estado de tensões gerado no ensaio brasileiro

(fonte: Specht,2004)

### 3.4.1.3 Módulo de resiliência

Nesta pesquisa os módulos de resiliência das amostras de concreto asfáltico foram determinados através das prescrições do DNER-ME 133/94.

Define-se módulo de resiliência ( $M_r$ ) de mistura betuminosa com a relação entre a tensão de tração ( $T_r$ ) aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável ( $\xi_t$ ) correspondente à tensão aplicada numa dada temperatura ( $T$ ) (Senço, 2001).

Para estes ensaios, utilizam-se corpos-de-prova de 101,6mm de diâmetro e 63,5mm de altura. O equipamento utilizado 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, conforme figura 25. O equipamento funciona dentro de um câmara com temperatura controlada, o que permite ensaios em diversas temperaturas.

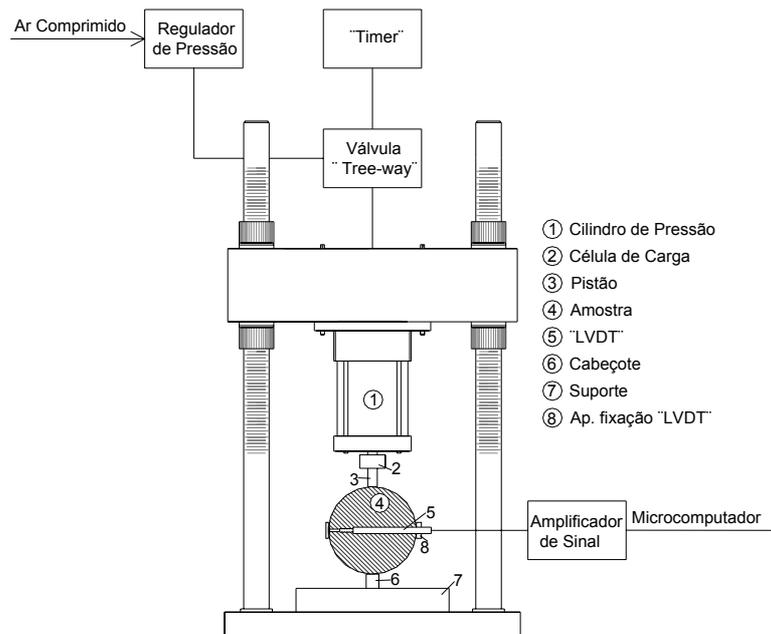


Figura 25: Corte esquemático do equipamento de módulo de resiliência

(fonte: Specht,2004)

#### 3.4.1.4 Fadiga

Para estimativa da vida de fadiga de misturas asfálticas, dispõe-se de ensaios laboratoriais que procuram simular as condições de solicitação de uma rodovia.

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.

Para determinação da vida de fadiga dos concretos asfálticos, nesta pesquisa foi utilizado, o mesmo sistema de carregamento do ensaio de módulo de resiliência, 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.

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 da pista, é barato, comercialmente viável e experimentalmente sensível.

#### 3.4.1.5 Deformação permanente

Nesta pesquisa foi realizado o ensaio de *creep* dinâmico para caracterização das amostras quanto à deformação permanente. Este ensaio consiste em aplicarem-se cargas a um corpo de prova, a uma determinada frequência, tempo de aplicação de carga, intervalo entre aplicações de carga, e temperatura especificada, nesta pesquisa o ensaio foi realizados à 45°C. Os corpos-de-prova são colocados em uma câmara de ensaio com temperatura controlada por um determinado período. Primeiramente se faz um período de pré-condicionamento de 500 segundos, dos quais 200 com aplicação de carga de ensaio e 300 de recuperação. Durante o ensaio os corpos-de-prova são submetidos à aplicação de cargas durante uma hora (3600s) com 3600 ciclos de carga, ou seja, um ciclo por segundo. Foram utilizadas tensões de 0,1 e 0,7 MPa. Após retira-se a carga do corpo de prova e há um ciclo de recuperação de 900 segundos. As medidas das deformações recuperáveis e permanentes ocorridas nos corpos-de-prova durante o ensaio são feitas através de transdutores (LVDT e célula de carga) e são ligados a um microcomputador para aquisição automática de dados. A figura 26 mostra o detalhe do corpo de prova e a figura 27 uma vista do equipamento para realização do ensaio.



Figura 26: Detalhe do corpo de prova para realização do ensaio de *creep* dinâmico

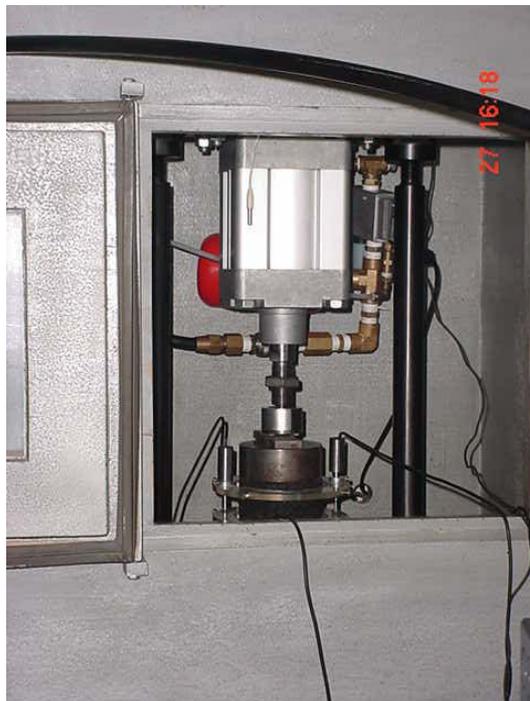


Figura 27: Equipamento do ensaio de *creep* dinâmico

### 3.4.2 Ensaio de campo

#### 3.4.2.1 Microtextura

O Pêndulo Britânico é um equipamento portátil utilizado para estimar a microtextura superficial dos pavimentos, seguindo as prescrições da ASTM E303-93. O ensaio consiste em friccionar, sob movimento pendular, uma sapata padronizada de borracha na superfície do pavimento molhado com água, com o objetivo de simular a resistência de superfícies úmidas à derrapagem pneu-pavimento. A leitura é dada pelo deslocamento do pêndulo após o contato com o pavimento e os resultados são dados em BPN (British Number Pendulum). O equipamento utilizado é da marca Mastrad, modelo S885, do Laboratório de Pavimentação da UFRGS, conforme figura 28. A tabela 16 mostra os valores padrões para avaliação das condições de segurança de resistência a derrapagem.



Figura 28: Equipamento portátil de avaliação das condições de segurança em termos de resistência a derrapagem tipo Pêndulo Britânico

Tabela 16: Valores para classificação da textura dos pavimentos

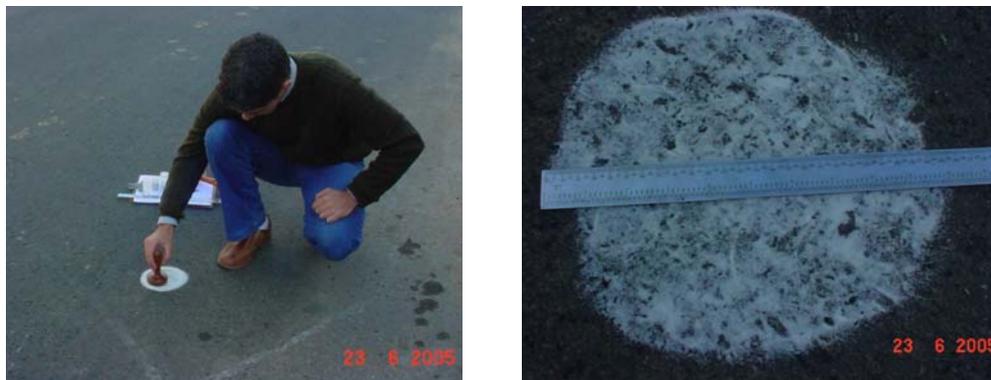
Classe	Valor de resistência à derrapagem (VRD)
1. Perigosa	< 25
2. Muita lisa	25 - 31
3. Lisa	32 - 39
4. Insuficientemente rugosa	40 - 46
5. Medianamente rugosa	47 - 54
6. Rugosa	55 - 75
7. Muito Rugosa	> 75

#### 3.4.2.2 Macrotextura

O processo de mensuração da macrotextura, pelo método da altura de areia (ASTM E965 - 96), 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 de areia que pela norma determina a textura da superfície. Pela IS 01.01/2002 - LTP (Laboratório de Tecnologia de Pavimentos) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo os valores limites de macrotextura são verificados direto pelo diâmetro da mancha de areia em cm. O ensaio de Mancha de Areia tem como objetivo avaliar a macrotextura dos agregados, parâmetros que influem diretamente na aderência entre pneu e pavimento. No momento do ensaio o pavimento deve estar perfeitamente limpo e seco. O material utilizado no ensaio está apresentado na figura 29. As figuras 30 e 31 ilustram o procedimento do ensaio. A tabela 17 apresenta os valores padrões da macrotextura da superfície.



Figura 29: Materiais utilizados no ensaio mancha de areia



Figuras 30 e 31: Procedimentos do ensaio de mancha de areia

Tabela 17: Valores limites de macrotextura pela IS 01.91/2002 - LTP/EPUSP

Mancha de Areia	Limites diâmetro (cm)	
	Mínimo	Máximo
Muito Grossa	8,0	16,3
Grossa	16,4	20,0
Média	20,1	28,3
Fina	28,4	37,9
Muito Fina	39,0	45,9

#### 3.4.2.3 Densímetro Eletrônico

Este ensaio foi realizado com o equipamento Pavement Quality Indicator, Modelo 301, TransTech Systems, do Laboratório de Pavimentação da UFRGS, conforme figura 32. Este aparelho usa ondas elétricas para medir a constante dielétrica utilizando uma inovação, campo

toroidal elétrico sensível estabelecido por um prato sensor. A densidade do revestimento de asfalto é diretamente proporcional à medida da constante dielétrica do material. A eletrônica no TransTech converte os sinais do campo para a leitura da densidade do material e mostra os resultados. Uma vez calibrado, a leitura da densidade pode ser diretamente obtida. Este aparelho é recomendado principalmente para uso em camadas novas de pavimento asfáltico para levantamento de espessuras abrangendo de 1 a 6 polegadas.



Figura 32: Equipamento Pavement Quality Indicator

#### 3.4.2.4 Medidas Defletométricas

As vigas de deflexão medem resposta do pavimento submetido a um carregamento estático ou a aplicação de uma carga em movimento lento. Os equipamentos mais utilizados são a viga Benkelman e as vigas de deflexão automatizadas (Pinto, 2001).

Utilizou-se uma viga eletrônica para o levantamento das deflexões no pavimento, como mostra a figura 33.



Figura 33: Viga eletrônica utilizada nesta pesquisa

## 4 EXECUÇÃO DA PISTA EXPERIMENTAL

### 4.1 IMPLANTAÇÃO DA INFRAESTRUTURA

A marcação da obra iniciou em 02/12/2004, pela equipe de topografia da SMOV/PMPA de acordo com o projeto geométrico. Após a marcação da obra iniciou as obras de drenagem superficial, executados pelo Departamento de Esgotos Pluviais, DEP/PMPA. Foram lançadas as redes pluviais e executadas as bocas de lobo para captação de águas superficiais, conforme figuras 34 e 35. A rede coletora de esgoto já estava implantada sob o subleito da via, foram refeitas pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto, DMAE/PMPA duas ligações domiciliares. Estas ligações foram envelopadas em concreto.



Figura 34: Execução de vala para assentamento das tubulações da drenagem superficial



Figura 35: Colocação dos tubos da drenagem superficial

Após a conclusão das obras de drenagem superficial e rede de esgoto, iniciou-se a terraplenagem (figura 36). Foi detectado áreas com baixa capacidade de suporte com resíduos de lixo não detectado na sondagem. Nas áreas em que foi necessária a substituição do solo, removeu-se 50 cm de solo e foi preenchido com areia de granulometria média.

Devido às irregularidades do greide de terraplenagem, provocado pela substituição de solos em alguns lugares, executou-se uma camada de espessura de 5 cm de saibro com a finalidade de regularização do greide de terraplenagem atendendo a geometria projetada.

O ensaio de compactação na energia do Proctor Normal conduziu a um peso específico aparente máximo de  $19,44 \text{ kN/m}^3$ , correspondente a um teor ótimo de umidade de 9,2 % e grau de compactação de 108,3% e I.S.C. máximo de 31,4%



Figura 36: Execução da terraplenagem

Com o serviço de terraplenagem concluído, começou a execução da base de brita graduada com espessura de 25 cm, conforme a definição da estrutura do pavimento. A figura 37 mostra o espalhamento e a figura 38 mostra a compactação da base de brita graduada.

O ensaio de compactação na energia do Proctor Modificado conduziu a um peso específico aparente máximo de  $21,28 \text{ kN/m}^3$ , correspondente a um teor ótimo de umidade de 6,2 % e grau de compactação de 105,6%.



Figura 37: Execução da base de brita graduada



Figura 38: Compactação da base de brita graduada

Sobre a superfície da base de brita graduada concluída foi executada a imprimação asfáltica com o produto CM-30, com taxa de aplicação de  $1,0 \text{ l/m}^2$ , como mostra a figura 39. Após foi executada a colocação dos meios-fios. A figura 40 mostra uma vista do trecho com a base concluída, imprimada e com os meios-fios colocados.



Figura 39: Base imprimada



Figura 40: Uma vista do trecho com a base executada, imprimada e com os meios-fios

## 4.2 EXECUÇÃO DO REVESTIMENTO COM CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL

O concreto asfáltico foi produzido na Usina da SMOV, da Prefeitura de Porto Alegre, no Bairro Sarandi, localizada na Avenida João Elustondo Filho n°. 500, na Zona Norte da cidade de Porto Alegre.

Com a determinação da composição granulométrica, do teor de ligante e das temperaturas de misturas e compactação, a usina foi calibrada. A figura 41 mostra a mesa de controle da usina gravimétrica, onde foi produzido concreto asfáltico convencional. Os agregados estavam dispostos em 5 silos, conforme mostra figura 42.

Pela manhã do dia 03/05/2005, foi executado o trecho com concreto asfáltico convencional. A figura 43 mostra o caminhão sendo carregado pelo concreto asfáltico na usina.

Após o caminhão ser carregado, era pesado e medida a temperatura da massa. Para aplicação do concreto asfáltico na pista foi utilizada uma vibroacabadora de pneus convencional, conforme figura 44. A compactação iniciou imediatamente após o espalhamento da massa, com rolo do tipo pneumático, mostrado na figura 45, seguido do rolo tandem, com cilindro de

chapa de aço para acabamento. O quadro 11 mostra as informações relacionadas à execução do trecho.



Figura 41: Vista do controle da usina gravimétrica



Figura 42: Vista panorâmica dos silos carregados com agregados



Figura 43: Vista panorâmica da usina gravimétrica



Figura 44: Execução do trecho com concreto asfáltico convencional



Figura 45: Execução do trecho com concreto asfáltico convencional

Quadro 11: Informações relacionadas à execução do trecho com concreto asfáltico convencional

Horário do início de execução	10:00 h
Temperatura às 10:00 e 11:00 h	17,9 e 20,3° C
Umidade do ar às 10:00 e 11:00 h	73 e 63%
Temperatura da massa no caminhão	160° C
Temperatura de aplicação	155° C
Rolo pneumático liso 18 tf	18 passadas
Rolo liso 10 tf sem vibração	10 passadas
Temperatura de compactação	153° C
Densidade aparente	2,63 kN/m <sup>3</sup>
Grau de Compactação	102,67 %

### 4.3 EXECUÇÃO DO REVESTIMENTO COM CONCRETO ASFÁLTICO COM INCORPORAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS

Na parte da tarde do dia 03/05/2005, foi executado o trecho com concreto asfáltico com incorporação de borracha reciclada de pneus. A usina volumétrica de fluxo paralelo produziu o concreto asfáltico com incorporação de borracha reciclada de pneus.

Os agregados minerais dispostos em 4 silos separados como mostra a figura 46 foram calibrados individualmente. Para a entrada da borracha foi utilizado o silo de material reciclado e o anel de reciclagem, localizado após o queimador da usina conforme figura 47. A calibração da usina volumétrica foi de acordo com o projeto da mistura, mencionado no Capítulo III, a figura 48 mostra uma vista da mesa de controle da usina volumétrica, a figura 49 mostra uma vista panorâmica da usina volumétrica e na figura 50 podemos ver a borracha na correia transportadora. A figura 51 mostra o aspecto da massa do concreto asfáltico com borracha.

A massa era mantida aproximadamente uma hora dentro da caçamba do caminhão, antes de ser espalhada na pista para fazer a digestão da borracha.

Para aplicação do concreto asfáltico com incorporação de borracha de pneu na pista foi utilizada a mesma vibroacabadora convencional de pneus mencionada anteriormente, conforme figuras 52 e 53. A compactação se deu imediatamente após o espalhamento da massa, com rolo pneumático, mostrado na figura 54. No acabamento foi utilizado o rolo tandem com cilindro em chapa de aço, conforme figura 55. Os rolos eram constantemente molhados com óleo de mamona para não aderirem na massa. A figura 56 mostra os corpos-de-prova que foram moldados no local, quando do espalhamento da massa na pista, porque a massa asfáltica ficou uma hora aguardando para ser aplicada.

O quadro 12 apresenta as informações relacionadas a execução do trecho.



Figura 46: Vista panorâmica dos silos carregados com agregados



Figura 47: Detalhe da usina volumétrica onde entra a borracha pelo anel de reciclagem localizado após o queimador



Figura 48: Vista do controle da usina volumétrica



Figura 49: Vista panorâmica da usina volumétrica



Figura 50: Vista da correia transportadora da borracha



Figura 51: Massa asfáltica com incorporação de borracha de pneus



Figura 52: Execução do trecho com concreto asfáltico com incorporação de borracha de pneus



Figura 53: Execução do trecho com concreto asfáltico com incorporação de borracha de pneus.



Figura 54: Compactação da massa na pista com rolo pneumático



Figura 55: Compactação com rolo tandem, com cilindro em chapa de aço



Figura 56: Corpo-de- prova moldados no local

Quadro 12: Informações relacionadas à execução do trecho com concreto asfáltico com incorporação de borracha de pneus

Horário da usinagem	15:11 h
Horário do início de execução	16:10 h
Temperatura às 16:00 e 17:00 h	25 e 24,2°C
Umidade do ar às 16:00 e 17:00 h	56 e 54%
Temperatura da massa no caminhão	170° C
Temperatura de aplicação	165° C
Rolo pneumático liso 18 tf	26 passadas
Rolo liso 10 tf sem vibração	19 passadas
Temperatura de compactação	163° C
Densidade aparente	2,52 kN/m <sup>3</sup>
Grau de Compactação	98,85 %

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Durante a execução da pista experimental foram coletadas amostras, e moldados corpos-de-prova (CPs) das misturas asfálticas, segundo a metodologia Marshall, para verificação das características de projeto e propriedades mecânicas. Também foram determinados estabilidade e fluência, módulo de resiliência, resistência à tração, fadiga e *creep* dinâmico. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação da UFRGS. Foram realizados, ainda, ensaios de microtextura, macrotextura, verificação da densidade da pista experimental com Densímetro Eletrônico e medidas deflectométricas com viga eletrônica.

Para análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliação das propriedades mecânicas das amostras de misturas asfálticas, utilizaram-se técnicas de estatísticas e probabilidade detalhado no trabalho de Nanni e Ribeiro (1987). Foi determinado a média dos valores das amostras que se constitui na medida de tendência central mais usada em problemas de engenharia e desvio padrão dos valores das amostras, equações 3 e 4.

$$\bar{X} = \sum Xi / n \quad (\text{equação 3})$$

Sendo:

$\bar{X}$  = Média dos valores

$Xi$  = Valores das amostras

$n$  = Número de amostras

$$s = \sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 / (n - 1)} \quad (\text{equação 4})$$

Sendo:

$s$  = Desvio padrão

A percentagem de variação de uma amostra pode ser representada pelo coeficiente de variação, definido pela equação 5.

$$CV = 100(s / \bar{X}) \quad (\text{equação 5})$$

Sendo:

$CV$  = Coeficiente de variação

Este valor é útil quando se quer comparar a variabilidade de diversas amostras com médias diferentes. Nesta pesquisa foi utilizado  $CV=25\%$  que é tido como limite de probabilidade de ocorrência. Definiu-se como o intervalo de valores a ser considerado os limites  $\bar{X} - 0,68s$ ;  $\bar{X} + 0,68s$ .

A figura 57 mostra os corpos-de-prova moldados com o concreto asfáltico convencional, cuja amostra foi retirada dos caminhões logo após a usinagem, e foram moldados no Laboratório da Usina de Asfalto da SMOV. A figura 58 mostra os corpos-de-prova moldados no local com o concreto asfáltico com incorporação de borracha de pneu, porque a massa ficou na caçamba aproximadamente uma hora para fazer a digestão. Foram coletadas as amostras para moldar os corpos-de-prova imediatamente após o espalhamento da massa na pista.



Figura 57: Corpos-de-prova moldados com concreto asfáltico convencional



Figuras 58: Corpos-de-prova moldados no local com concreto asfáltico com incorporação de borracha reciclada de pneus

No dia 16 de junho de 2005 foram extraídas amostras da pista para realização de ensaios. A figura 59 mostra a máquina extratora extraindo os corpos-de-prova da pista experimental e a figura 60 mostra os corpos-de-prova extraídos.



Figura 59: Extração de amostra para ensaios



Figura 60: Corpos-de-prova extraídos da pista

O projeto das misturas asfálticas convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus, deu-se a partir dos parâmetros Marshall, determinando o teor de ligante, atendendo aos critérios de maior estabilidade, máxima densidade aparente e intervalo de volume de vazios.

## 5.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

### 5.2.1 Propriedades volumétricas

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, ainda é a mais utilizada no Brasil.

O Volume de Vazios (Vv) é a propriedade volumétrica mais importante do concreto asfáltico, pois são necessários vazios de ar dentro da mistura compactada para permitir a expansão térmica dos ligantes, suportar a leve compactação causada pelo tráfego e responder à deformação recuperável. 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 VAM (Vazios do 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 recobrando os agregados). Valores excessivamente altos de VAM podem levar a perda de intertravamento do esqueleto mineral e redução da resistência ao cisalhamento.

Na tabela 18, pode-se verificar os valores das propriedades das misturas asfálticas dos corpos-de-prova moldados no dia da execução da pista e extraídos da pista 44 dias após a execução da mesma. Nota-se que o teor de betume do concreto asfáltico convencional excedeu o limite tolerável  $\pm 0,3\%$ . Provavelmente, isto tenha ocorrido devido a um problema de calibragem da usina gravimétrica.

O volume de vazios (Vv) do concreto asfáltico convencional dos CPs moldados diminuiu em relação ao projeto ficando fora da faixa da especificação do DAER. O volume de vazios dos CPs extraídos aumentou, e ficou dentro da especificação do DAER, considerando que os CPs extraídos é que representam a realidade da pista. O volume de vazios do concreto asfáltico com borracha aumentou, ficando além do limite da especificação.

O concreto asfáltico com borracha apresenta vazios de agregado mineral (VAM) mais alto, atendendo a especificação, o convencional não atendeu a especificação.

A relação betume vazios (RBV) não atendeu a especificação. No concreto asfáltico com borracha ficou abaixo o que pode prejudicar a sua durabilidade. 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.

O grau de compactação atendeu a especificação, será comparado mais adiante com os valores medidos com o Densímetro Eletrônico.

Na figura 61, podemos observar o gráfico com a variação dos valores constante na tabela 18.

Tabela 18: Propriedades dos concretos asfálticos convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus

Variáveis		Dap (kN/m <sup>3</sup> )	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Teor de Bet (%)	GC (%)
Especificação <sup>1</sup>		-	3 a 5	>16	75 a 82	-	>97
Projeto	Convencional	2,56	4,00	15,00	74,00	4,35	-
	C/ Borracha	2,55	4,00	17,70	78,00	5,45	-
Convencional	Moldados	2,63	1,56	14,47	89,29	5,10	102,67
	Extraídos	2,54	4,85	17,43	72,71	5,10	99,24
C/ Borracha	Moldados	2,52	5,6	18,93	70,44	5,35	98,85
	Extraídos	2,47	7,35	20,20	63,62	5,35	97,01

Nota: IDAER ES 16/98

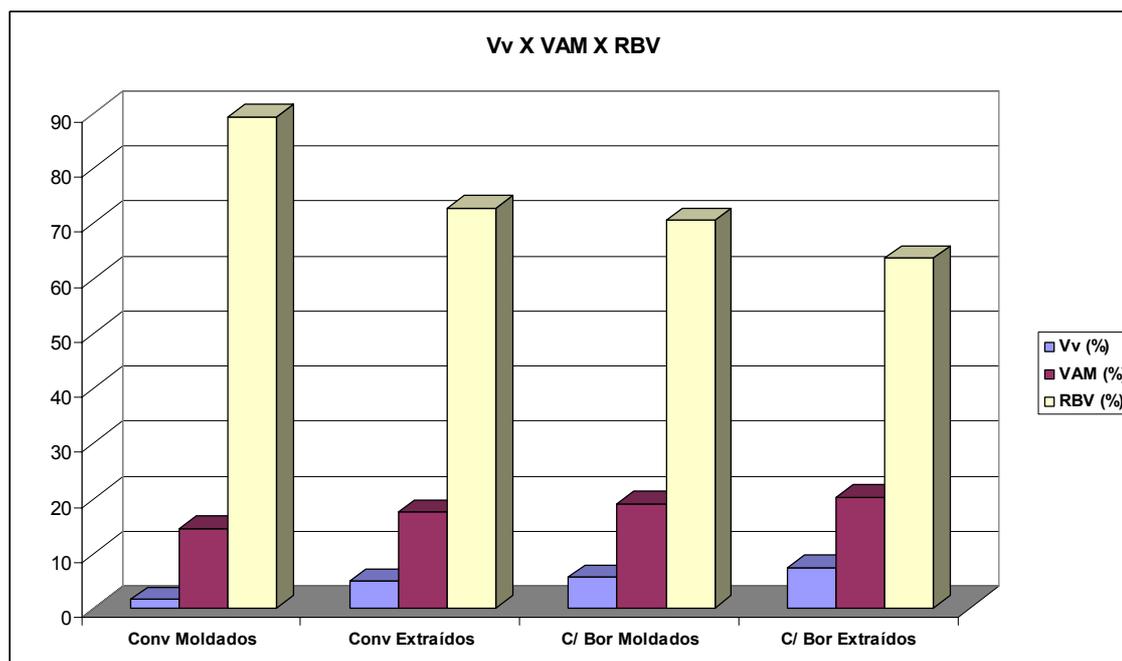


Figura 61: Gráfico de volume de vazios, vazios do agregado mineral e relação betume vazios do concreto asfáltico

### 5.2.2 Estabilidade e Fluência

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 (Specht, 2004).

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 Kandhal 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.

A tabela 19 apresenta os valores de estabilidade, fluência e sua relação do concreto asfáltico convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus dos CPs moldados com a mistura asfáltica no dia da execução da pista experimental, 3 de maio de 2005 e os CPs extraídos da pista após 44 dias. A figura 62 mostra o gráfico dos resultados.

Tabela 19: Valores de estabilidade, fluência e relação estabilidade/fluência dos concretos asfálticos convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus

Variáveis	Especificação <sup>1</sup>	CBUQ convencional		CBUQ c/ borracha	
		Moldado	Extraído	Moldado	Extraído
Estabilidade (KN)	> 8,0	16,66	4,57	8,68	4,94
Fluência (mm)	2,0 a 4,6	1,85	3,15	5,02	4,57
Rel Est/Fluência (MN/m)	--	9,01	1,45	1,73	1,08

Nota: IDAER ES 16/98

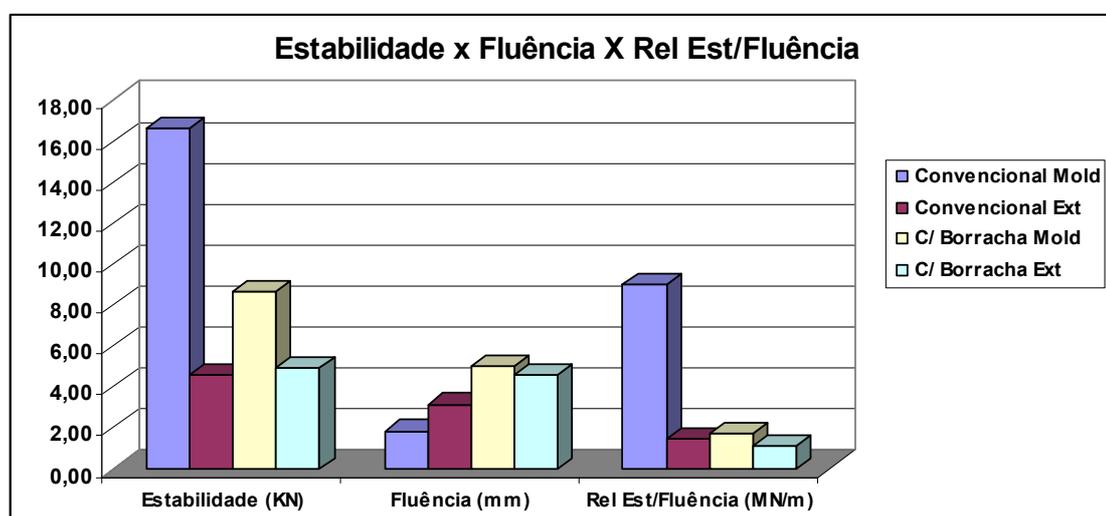


Figura 62: Gráfico de estabilidade, fluência e relação estabilidade/fluência

Nota-se que os valores de estabilidade dos CPs extraídos da pista apresentam uma redução em relação aos CPs moldados ficando fora do limite da especificação do DAER. O valor da fluência do concreto asfáltico com borracha é maior que o convencional, entretanto os valores dos CPs extraídos da pista ficaram de acordo com a especificação. Conforme estudos

anteriormente relatados, neste capítulo, podemos observar que estaríamos com valores razoáveis de aceitação, correspondente a misturas com capacidade de suportar tráfego médio, sem apresentar deformações apreciáveis.

Tanto o aumento nos valores de fluência como a queda dos valores de estabilidade, são comportamentos aguardados com o aumento de teor e magnitude das partículas de borracha. O acréscimo de borracha substitui parte dos agregados minerais diminuindo a resistência do esqueleto mineral.

Segundo Epps (1994) relata em suas pesquisas, os valores de estabilidade podem reduzir e os de fluência aumentar com a adição de borracha nas misturas asfálticas.

### 5.2.3 Módulo de resiliência e resistência à tração

O estudo das condições de deformabilidade dos pavimentos é fundamental à compreensão de seu comportamento, já que estas refletem e caracterizam as condições estruturais das diversas camadas e do próprio subleito. A ação das cargas de tráfego sobre pavimentos flexíveis provoca deformações dos tipos permanentes e recuperáveis. As deformações permanentes são aquelas que permanecem mesmo após cessar o efeito da atuação da carga, ou seja, têm caráter residual. São exemplos de deformações permanentes aquelas geradas nas trilhas de roda pela consolidação adicional do tráfego, bem como as rupturas de natureza plástica. As deformações ou deflexões recuperáveis representam um indicativo do comportamento elástico da estrutura, deixando de existir alguns momentos após a retirada da carga. As deflexões recuperáveis provocam o arqueamento das camadas do pavimento, e sua repetição é responsável pelo fenômeno de fadiga das camadas betuminosas (Pinto, 2001).

A tabela 21, apresenta os valores de Módulo de Resiliência ( $M_r$ ), Resistência à Tração ( $R_t$ ) à 25°C e a Relação do Módulo de Resiliência e Resistência à Tração ( $Rel\ M_r/R_t$ ) do concreto asfáltico convencional e com incorporação de borracha reciclada de pneus dos CPs moldados, no dia da execução da pista experimental e extraídos da pista após 44 dias da execução da mesma. A figura 63 mostra o gráfico de Módulo de Resiliência ( $M_r$ ) e a Relação de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração ( $Rel\ M_r/R_t$ ) e a figura 64 apresenta os valores da Resistência à Tração ( $R_t$ ).

Nota-se na tabela 20 que a adição da borracha no concreto asfáltico diminuiu o Mr, Rt e Rel Mr/Rt. O preenchimento do espaço intergranular com borracha contribui para o decréscimo do Mr. No concreto asfáltico convencional diminuiu significativamente o valor do Mr em relação ao projeto, que pode ser justificado pelo excesso do teor de ligante, tendo em vista que a estabilidade e a RBV não atendeu a especificação. A adição de borracha no concreto asfáltico reduz o Mr, entretanto em relação ao projeto não teve alteração significativa. Os valores de Rt reduziram em ambos. Os valores da Rel Mr/Rt diminuíram em relação ao projeto do concreto asfáltico convencional e aumentou no concreto asfáltico com incorporação de borracha.

Segundo Medina (1997), o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos acontece principalmente devido à deformação resiliente. Este parâmetro é importante, pois traduz a capacidade do pavimento em resistir à deformação. Esta capacidade do revestimento deve estar de acordo com a capacidade resiliente da base.

Entretanto, também se deve levar em conta o parâmetro resistência à tração. Portanto, deve-se observar a relação Mr/Rt. Busca-se por misturas com capacidade de absorver as tensões no pavimento e apresentar boa Rt. Preussler (1983) sugere uma boa relação um intervalo entre 2500 a 4000.

Valores menores de Mr representam materiais mais flexíveis, pois Mr muito altos identificam misturas frágeis, muito rígidas (Preussler, 1983)

A análise dos valores de Mr 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 (Specht, 2004).

Tabela 20: Módulos de Resiliência, Resistência à Tração e Relação Módulo de Resiliência e Resistência à Tração dos CPs moldados e extraídos

Variáveis	CBUQ convencional			CBUQ c/ borracha		
	Projeto	Moldado	Extraído	Projeto	Moldado	Extraído
Mr (MPa)	8400	4836	3951	4700	3433	4402
Rt (MPa)	1,22	1,37	0,84	1,16	0,75	0,79
Rel Mr/Rt (adm)	6885	3530	4704	4052	4577	5572

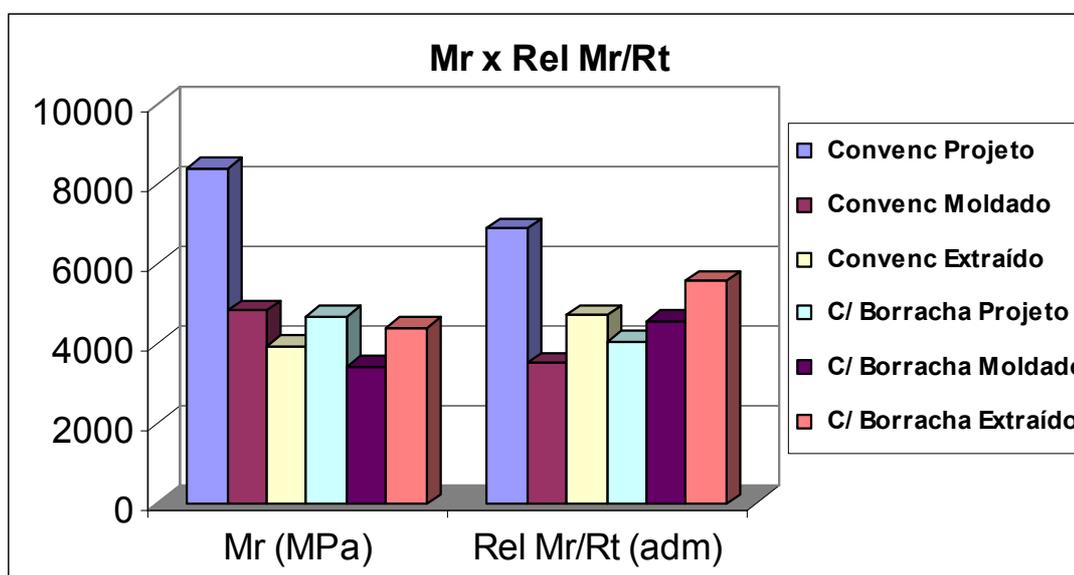


Figura 63: Módulo de resiliência e relação de módulo de resiliência e resistência à tração

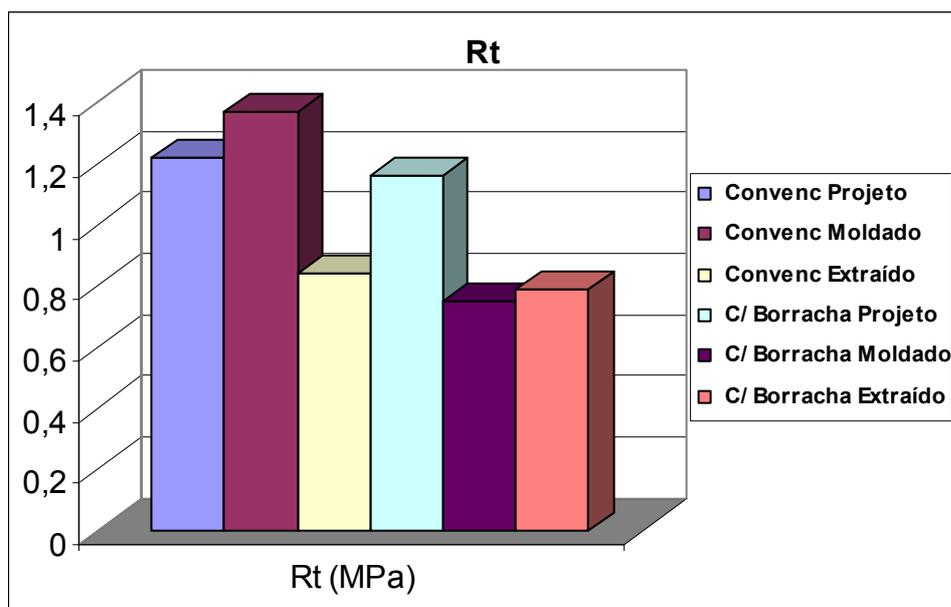


Figura 64: Resistência à tração (25°C)

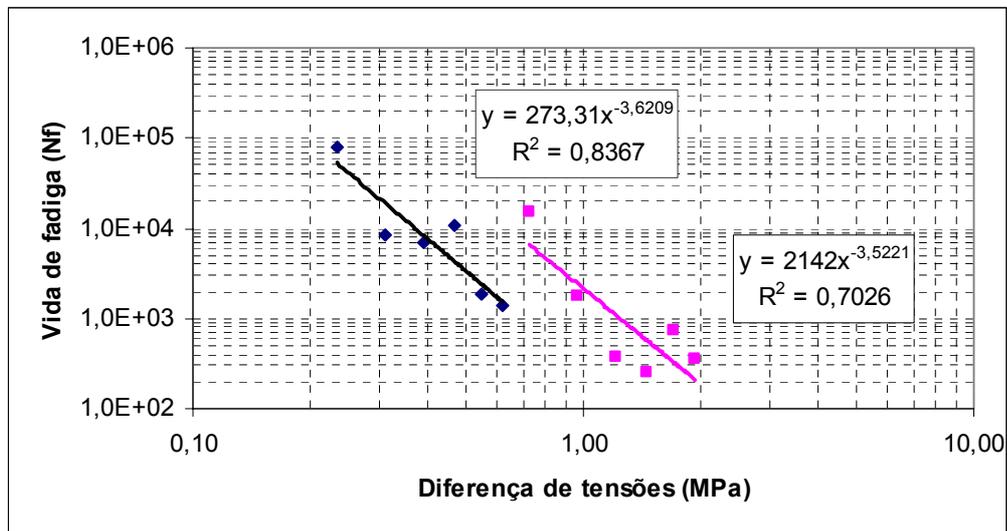
#### 5.2.4 Resistência à fadiga

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 (Specht, 2004).

As características à fadiga são comumente expressas em relação à tensão ou deformação inicial atuante e o número de repetições de carga até a ruptura. Para determinação da vida de fadiga dos concretos asfálticos foi utilizado o mesmo sistema de carregamento do ensaio de módulo de resiliência, 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.

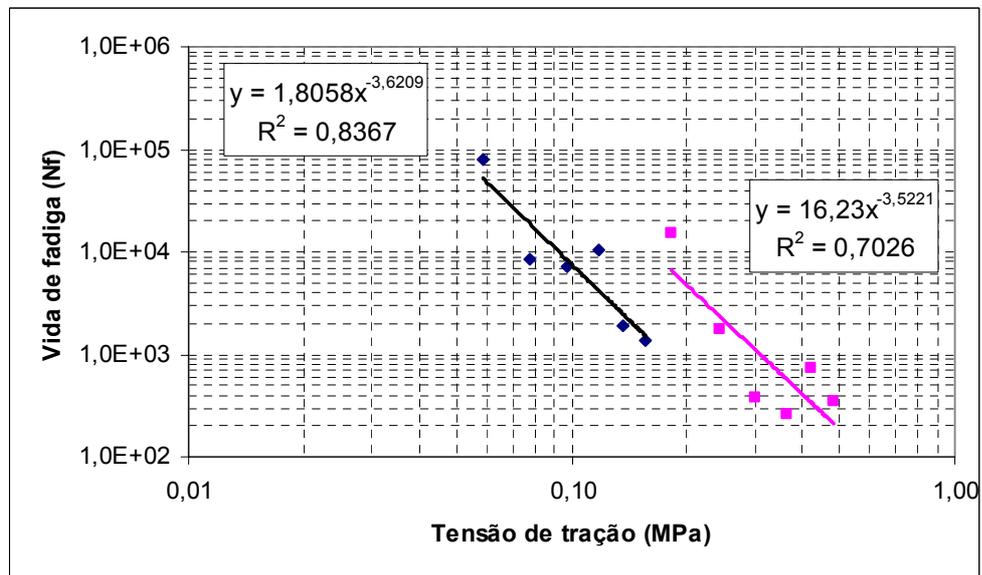
As figura 65 e 66 apresentam as curvas de fadiga do concreto asfáltico convencional e com borracha em função da sollicitação: tensão de tração e diferença de tensões. A curva que representa a vida de fadiga de um material em função das sollicitações aplicadas é a curva de Wöhler.

Podemos observar que o concreto asfáltico convencional apresentou um desempenho superior ao concreto asfáltico com borracha. O excesso do teor de ligante pode ter alterado o resultado do ensaio.



— Convencional                      — C/ Borracha

Figura 65: Relação entre vida de fadiga e diferença de tensões



— Convencional                      — C/ Borracha

Figura 66: Relação entre vida de fadiga e tensão de tração

### 5.2.5 Deformação

O Afundamento por Trilha de Roda (ATR) é causado pela combinação da densificação (redução de volume) e da distorção cisalhante dos materiais, e pode ocorrer deformações em uma ou mais camadas do pavimento (Sousa et al., 1991).

A deformação permanente de uma mistura asfáltica submetida a repetições de cargas é ocasionada pela diminuição de volume de vazios, fluência do material e deformação por cisalhamento (Coelho, 1996).

O uso de agregados ásperos e angulosos nas misturas asfálticas melhora o comportamento às deformações permanentes dos pavimentos (Motta, 1991). O ligante influencia a resistência do revestimento asfáltico às deformações permanentes devido as suas características viscosas.

Brown e Cross (1992) 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 estarem acima de 3% (mesmo após densificação pelo tráfego) e da utilização de agregados com faces britadas.

Nesta pesquisa, para avaliar a resistência das misturas asfálticas ao acúmulo de deformações plásticas foi utilizado o ensaio de *creep* dinâmico.

A tabela 21 mostra os valores de deformação plástica através do ensaio de creep dinâmico do concreto asfáltico convencional e com incorporação de borracha, de CPs moldados no dia da execução da pista. Foram inutilizados dois CPs do concreto asfáltico convencional durante o ensaio. Nota-se pelos valores que o concreto asfáltico convencional apresentou menor deformação, mas pode ser justificado pelo fato do acréscimo de teor de ligante do concreto asfáltico convencional em relação ao projeto da mistura. Também o valor do Vv do concreto asfáltico com borracha de 7,35% está mais alto que o concreto asfáltico convencional 4,85%.

Tabela 21: Valores de deformação plástica em ensaio de creep dinâmico

Corpos-de-prova	Deformação Plástica (mm)	
	Convencional	C/ Borracha
1	0,0438	0,3400
2	0,0443	0,2455
3	-	1,4400
4	-	1,6999
<b>Média</b>	<b>0.0434</b>	<b>0,9313</b>
Desvio Padrão	0,0006	0,7460

### 5.3 ENSAIOS DE CAMPO

#### 5.3.1 Microtextura

As medidas de microtextura, realizadas através de medições com o Pêndulo Britânico (ASTM E303-93), foram realizadas em 23 de junho de 2005, estão apresentadas na tabela 22. Observa-se que as medidas realizadas não demonstram que a presença da borracha tenha influência significativa na microtextura do pavimento, pois apresentaram textura rugosa (limites 55 - 75 VRD). A figura 67 mostra a realização do ensaio.

Tabela 22: Medidas de microtextura, resultante dos ensaios com Pêndulo Britânico

Atributo	CBUQ Convencional		Atributo	CBUQ c/ Borracha	
Ponto 1	BE	BD	Ponto 3	BE	BD
D1	66,0	57,0	D1	37,0	54,0
D2	72,0	68,0	D2	38,0	66,0
D3	72,0	68,0	D3	40,0	60,0
<b>Média (BPN)</b>	<b>70,0</b>	<b>64,3</b>	<b>Média (BPN)</b>	<b>38,3</b>	<b>60,0</b>
Desvio Padrão	3,5	6,4	Desvio Padrão	1,5	6,0
Ponto 2	BE	BD	Ponto 4	BE	BD
D1	70,0	66,0	D1	78,0	68,0
D2	78,0	73,0	D2	55,0	71,0
D3	78,0	70,0	D3	52,0	60,0
<b>Média (BPN)</b>	<b>75,3</b>	<b>69,7</b>	<b>Média (BPN)</b>	<b>61,7</b>	<b>66,3</b>
Desvio Padrão	4,6	3,5	Desvio Padrão	14,2	5,7
<b>Média Final</b>	<b>69,8 BPN</b>		<b>Média Final</b>	<b>56,6 BPN</b>	

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.



Figura 67: Realização do ensaio com o aparelho do tipo Pêndulo Britânico

### 5.3.2 Macrotextura

A figura 68 mostra a realização do ensaio. A tabela 23 apresenta os valores obtidos através do ensaio de mancha de areia (ASTM E965-96), realizado em 23 de junho de 2005. Os resultados apresentados não mostram influência da presença da borracha na macrotextura do pavimento. Valores de limites do diâmetro de areia entre 20,1 e 28,3 cm caracterizam pavimento com macrotextura média.



Figura 68: Realização do ensaio de mancha de areia

Tabela 23: Resultados do ensaio de mancha de areia

Atributo	CBUQ Convencional		Atributo	CBUQ c/ Borracha	
Ponto 1	BE	BD	Ponto 3	BE	BD
D1	25,0	27,0	D1	25,3	28,5
D2	24,0	26,0	D2	24,3	27,0
D3	24,0	29,0	D3	25,3	25,0
<b>Média (cm)</b>	<b>24,3</b>	<b>27,3</b>	<b>Média (cm)</b>	<b>25,0</b>	<b>26,8</b>
Desvio Padrão	0,6	1,5	Desvio Padrão	0,6	1,8
Ponto 2	BE	BD	Ponto 4	BE	BD
D1	28,0	25,0	D1	26,5	29,0
D2	25,0	25,0	D2	26,2	28,0
D3	26,0	23,7	D3	28,0	27,9
<b>Média (cm)</b>	<b>26,3</b>	<b>24,6</b>	<b>Média (cm)</b>	<b>26,9</b>	<b>28,3</b>
Desvio Padrão	1,5	0,8	Desvio Padrão	1,0	0,6
<b>Média Final</b>	<b>25,6 cm</b>		<b>Média Final</b>	<b>26,8 cm</b>	

### 5.3.3 Densímetro Eletrônico

Este ensaio foi realizado com o equipamento *Pavement Quality Indicator*, Modelo 301, TransTech Systems, do Laboratório de Pavimentação da UFRGS. Uma vez calibrado, a leitura da densidade pode ser diretamente obtida. Este aparelho é recomendado principalmente para uso em camadas novas de pavimento de asfalto para levantamento de espessuras abrangendo de 1 a 6 polegadas. As figuras 69 e 70 mostram a realização do ensaio. A tabela 24 apresenta os valores obtidos através do Densímetro Eletrônico no dia 23 de junho de 2005.



Figura 69: Densímetro Eletônico



Figura 70: Uma vista do monitor do Densímetro Eletrônico registrando a densidade aparente do revestimento asfáltico

Tabela 24: Valores da densidade aparente obtidos com o Densímetro Eletrônico

Pista	Dap Convencional (KN/m <sup>3</sup> )	Dap Borracha (KN/m <sup>3</sup> )
LD	-	2,432
LE	2,401	2,592
LD	2,363	2,395
LE	2,204	2,563
LD	2,258	2,525
LE	2,391	2,641
LD	2,323	2,417
LE	2,410	2,651
LD	2,300	2,351
LE	2,570	2,321
LD	2,408	2,302
LE	2,556	2,397
LD	-	2,417
LE	-	2,230
<b>MEDIA</b>	<b>2,380</b>	<b>2,445</b>
DESVP	0,112	0,130

Nota: LD - Lado Direito da Pista; LE - Lado Esquerdo da Pista

Comparando estes valores obtidos através do Densímetro Eletrônico podemos observar que o grau de compactação não atingiu a especificação do DAER, conforme mostra a tabela 25.

Tabela 25: Grau de compactação obtido através do Densímetro Eletrônico

Pista	Dap (KN/m <sup>3</sup> )	GC (%)
CBUQ Convencional	2,380	92,97
CBUQ C/ Borracha	2,445	95,88

### 5.3.4 Medidas defletométricas

A deflexão de um pavimento caracteriza a resposta das camadas estruturais e do subleito à aplicação do carregamento. Quando uma carga é aplicada em um ponto (ou uma área) da superfície do pavimento, todas as camadas fletem devido às tensões e às deformações geradas pelo carregamento. O valor da deflexão em cada camada geralmente diminui com a profundidade e com o distanciamento do ponto de aplicação da carga e depende ainda do módulo de elasticidade das camadas. A partir de certas distâncias e profundidades as deflexões tornam-se muito pequenas. Assim sendo, pavimentos com deflexões mais baixas suportam maior número de solicitações de tráfego (Pinto, 2001).

O equipamento utilizado para medir as deflexões foi a viga eletrônica da marca Solotest da Gerência de Pavimentos da SMOV/PMPA, conforme figura 71. A figura 72 mostra o registro das leituras das deflexões na tela do computador.



Figura 71: Realização do ensaio com a viga eletrônica

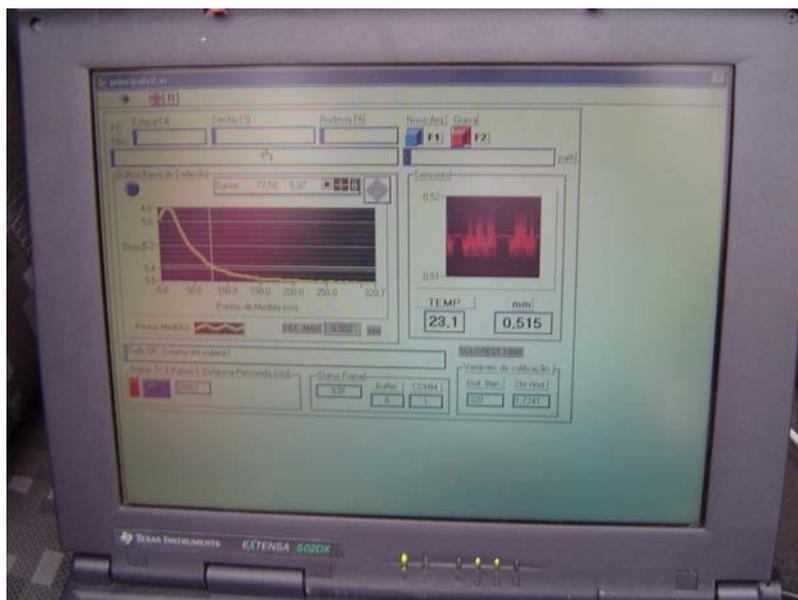


Figura 72: Tela do computador com o registro das leituras das deflexões

O carregamento imposto ao pavimento foi de 82 kN aplicada em eixo simples com pneu duplo com calibração de 80 psi (0,55 MPa) de pressão.

Foram realizadas 15 medidas de deflexões ao longo da pista, sendo 7 no trecho com concreto asfáltico convencional e 8 no trecho com concreto asfáltico com incorporação de borracha.

A tabela 26 apresenta o resultado das medidas das deflexões.

Tabela 26: Leituras defletométricas

Posição	Deflexão (mm)	Temperatura °C
C1	0,378	21,67
C2	0,725	22,89
C3	0,944	23,14
C4	1,284	23,14
C5	0,427	22,40
C6	0,366	22,40
C7	0,505	22,40
<b>MÉDIA</b>	<b>0,661</b>	<b>22,577</b>
DESVP	0,346	0,524
B1	0,615	24,11
B2	0,744	21,92
B3	1,240	22,40
B4	0,888	22,40
B5	0,817	22,40
B6	0,510	22,40
B7	0,578	22,16
B8	0,654	22,16
<b>MÉDIA</b>	<b>0,756</b>	<b>22,494</b>
DESVP	2,32	0,676

Nota: C - CBUQ Convencional; B - CBUQ com Borracha

A compensação da influência da temperatura foi considerada para a temperatura de 20°C, sendo que as medidas de campo foram muito próximas a esta temperatura, considerou-se que não iria causar modificação significativa nas medidas realizadas, adotando-se assim um fator de correção igual a 1.

A deflexão máxima admissível foi considerada tomando-se em função o N de projeto,  $N=1,21 \times 10^6$ , determinando-se o valor de 0,8 mm, conforme critério da AASHTO (1993).

Observa-se que cinco medidas estão acima da deflexão máxima admissível (figura 73). Estes registros de deflexões serão úteis como parâmetros para o monitoramento e avaliação futura do comportamento da pista experimental.

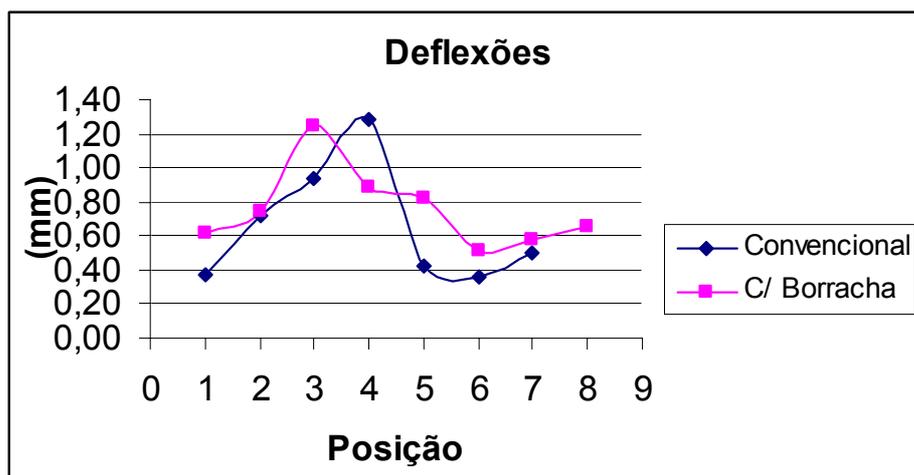


Figura 73: Gráfico das deflexões medidas

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa conclui-se que:

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. Os ensaios para verificação das características de projeto e propriedades mecânicas da execução do trecho experimental também verificou estes resultados.

Verificou-se também que apesar do projeto da mistura asfáltica com incorporação de borracha indicar um volume de vazios de 4%, obteve-se um acréscimo do volume de vazios, e um decréscimo na relação betume vazios o que pode comprometer a durabilidade do revestimento.

Os valores de módulo de resiliência e resistência à tração diminuíram com incorporação de borracha, pois a substituição de parte dos agregados minerais pela borracha faz com que a flexibilidade da mistura seja aumentada. Entretanto, deve-se observar a relação  $M_r/R_t$ . Busca-se por misturas com capacidade de absorver as tensões no pavimento e apresentar boa  $R_t$ . A análise dos valores de  $M_r$  é bastante complexa, visto que, depende da estrutura de pavimento que este material estará inserido, pois é necessária uma compatibilização de rigidez entre as camadas que constituem o sistema, cuja resposta do comportamento e desempenho do trecho experimental iremos obter com o monitoramento ao longo do tempo.

As propriedades de fadiga e deformação permanente do concreto asfáltico com incorporação de borracha indicam desempenho inferior ao concreto asfáltico convencional. O excesso de CAP no concreto asfáltico convencional pode ter induzido este comportamento.

Os ensaios de textura superficial de revestimento demonstram que os valores obtidos não apresentam influência significativa com incorporação de borracha ao concreto asfáltico, apresentando níveis considerados seguros ao tráfego.

As deflexões medidas com a Viga Benkelman após execução servirão de parâmetro para o monitoramento da pista experimental.

O tempo de digestão e o tamanho dos grãos de borracha devem ser considerados no projeto de misturas asfáltica com incorporação de borracha dada a influência destes fatores em diversas propriedades mecânicas e de durabilidade das misturas, conforme Specht (2004). Nesta pesquisa o tempo de digestão considerado foi de uma hora.

A execução do trecho experimental com concreto asfáltico com incorporação de borracha pelo processo da via seca, não apresentou dificuldades adicionais quando se executa revestimento convencionais. A produção da mistura asfáltica do processo via seca é operacionalmente mais simples que o processo via úmida e ainda tem o potencial de consumir maiores quantidades de borracha de pneus, comparado com o processo da via úmida, resultando em um maior benefício ambiental.

Tendo em vista os aspectos ambientais que envolvem o assunto, o objetivo principal da incorporação de borracha em misturas asfálticas está ligado a melhorias das propriedades mecânicas e funcionais dos materiais de pavimentação. Na revisão bibliográfica ficou evidente a importância do assunto envolvendo pesquisas na utilização de borracha reciclada como material de pavimentação, em nível mundial.

## 6.2 SUGESTÕES

Como sugestão para continuidade deste trabalho, pode-se indicar:

Monitorar a pista experimental executada para avaliação do comportamento e desempenho estrutural do pavimento.

Como os estudos quanto ao processo da via seca são mais recentes se comparado com o processo via úmida, onde o ligante é modificado, e já se apresenta como alternativa interessante de uso, se faz necessário mais estudos quanto a este processo com construções de pequenos trechos experimentais, variando tempo de digestão, granulometria da borracha, teor de ligante e temperatura, 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.

Utilizar o simulador linear de tráfego DAER/UFRGS para avaliação de concretos asfálticos (convencionais e com incorporação de borracha pelo processo da via seca) quanto à deformação permanente e reflexão de trincas.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Guide for design of pavement structures**. Washington. 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Terminologia e classificação de pavimentação: NBR 7207**. Rio de Janeiro. 1982.

AIREY, G.D.; RAHMAN, M. **Fundamental characterisation of dry process crumb rubber modified asphalt mixtures**. 2003.

ALVES, P. Pesquisa site: [http:// www.ttverde.com](http://www.ttverde.com).

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 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 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 measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique**. D965-96. In: ASTM ...Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 3p. 2000.

ASPHALT INSTITUTE. **HMA construction**. Lexington, Manual Series N°22 (MS-22). 1998.

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 Technologists**. v.65, p.130-163. 1995.

BALBO, J. T. **Pavimentos asfálticos – patologias e manutenção**. São Paulo: Editora Plêiade, 1997. 103p.

BERTOLLO, 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.

BERTOLLO, 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.2000.

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.

OBRAS VIÁRIAS. **Caderno de Encargo do Município de Porto Alegre**. Porto Alegre. v.2. 134p. 1996.

CALTRANS. **Asphalt rubber usage guide**. Sacramento: State of California Department of Transportation 2003. 45p.

CARLSON, D. D.; ZHU, H. An anchor to crumb rubber markets. In: INTERNATIONAL RUBBER FORUM, San Diego. **Proceedings...** v.1. 1999.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. Pesquisa site: [http://www.cempre.org.br/fichas\\_tecnicas\\_pneus.php](http://www.cempre.org.br/fichas_tecnicas_pneus.php). 2005.

CLERMAN. **Estudo laboratorial de misturas asfálticas a frio produzidas com incorporação de borracha de pneus**. Tese de Mestrado PPGEC/UFRGS.123p. 2004.

COELHO, V. **Contribuição ao estudo das deformações permanentes, nas condições do Brasil, em camadas de concreto asfáltico de pavimentação**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos. São Paulo. 281 p. 1996

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de pavimentação**: DNER. Rio de Janeiro, 2 ed., 1996, 320p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência**: DNER – ME 133/94. Rio de Janeiro 1994, 5p.

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, 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.

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.

GUIA DAS RUAS DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE. Livraria do Globo S.A. Porto Alegre. 275p. 2000.

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.

HEITZMAN, M. Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. **Transportation Research Record**. Washington. 1992.

HOUSSAIN, M.; SADEQ, M.; FUNK, L.; MAAG, R. A study of chunk rubber from recycled tires as a Road construction material. **Proceedings...** USA. 1985

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. 1992.

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.

LIANG, R. Y.; LEE, S. Short-term and long-term aging behavior of rubber modified asphalt paving mixtures. **Transportation Research Record**. Washington, p.10-17.1996.

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. p.64-71.1996.

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

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. <http://www.mma.gov.br/conama/legislação>. Brasília, 2005.

MORILHA A. J.; GRECA, M. R. **Asfalto borracha Ecoflex** - Greca Asfalto. 21p. 2003.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento da Pavimentos Flexíveis: Parâmetro de Confiabilidade e Ensaio de Cargas repetidas**. Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1991.

MOTTA, L. M. G.; SÁ, M. F.P.; OLIVEIRA, P. M. F.; SOUZA, A. M. O ensaio de creep estático e dinâmico na avaliação das misturas asfálticas. 30ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...** p.115-135. 1996.

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.

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.

OGURTSOVA, J.; BIRMAN S.; COELHO V. **Concreto Asfáltico**. DER Paraná, Curitiba, 2 ed. 1999, 151p.

PAIS, J. C. **Considerações da reflexão de fendas no dimensionamento de reforços de pavimento flexíveis**. Portugal. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. 262p. 1999.

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

PINTO, S. Polígrafo **Materiais Pétreos e Concreto Asfáltico**: Conceituação e dosagem. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 82p. 2000.

PREUSSLER, E.S. **Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço**. Tese de Doutorado. Universidade federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 252p. 1983.

READ, J. M.; COLLOP A. C. Practical fatigue characterization of bituminous paving mixtures. **Journal of the Association of Asphalt Paving**. St. Paul, 1997.

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.; LEE, D-Y; KENNEDY, T.W. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction**. NAPA Educational Foundation - Lanham, Maryland. 1998.

RUBBER PAVEMENT ASSOCIATION – RPA. **Asphalt-rubber / Rubberized asphalt – there is the difference**. Phoenix, 1999.

RUTH B.E.;TIA, M.; JONSSON, G.; SETZE, J.C. **Recycling of Asphalt Mixtures Containing Crumb Rubber**. University of Florida. Florida Department of Transportation. 221p. 1997.

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.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. v. 1 e 2. Ed. Pini. São Paulo. 2001.

SOUZA, J. B.; CRAUS, J.; MONISMITH C. L. **Summary report on permanent deformation in asphalt concrete**. 125p. Washington, 1991.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 279 p. Porto Alegre. 2004.

TAKALLOU, B. H.; HICKS, R. G. Development of improvement mix and construction guidelines for rubber-modified asphalt pavements. **Transportation Research Record**. Washington. 1988.

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. 158p. 1990.

TUNES. Um fim para o restos da Indústria. **Revista Globo Ciência**. Ano 8, nº 85, Agosto. 1998.

VISSER, A. T. VERHAEGHE, B. Bitumen-rubber: lessons learned in South Africa. In: ASPHALT RUBBER 2000, Vilamoura. **Proceedings...** 2000.

WAY, G. B. OGFC meets CRM: Where the rubber meets the rubber: 12 years of durable success. In: ASPHALT RUBBER 2000, Vilamoura. **Proceedings...** 2000. 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.

ZANZOTTO, L.; KENNEPOHL, G. J. Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt. **Transportation Research Record**. Washington. 1996.

## **ANEXOS**

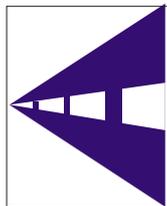


**LAPAV**  
**LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO**  
 ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS

Rua Osvaldo Aranha 99 / 3º andar  
 email: lapav@cpgec.ufrgs.br  
 fone: 0xx 51 3316 3590  
 fax: 0xx 51 3316 3999

<b>Mistura:</b> <u>CBUQ Convencional - SMOV e DUTRA - Dissertação Márcia</u>										
<b>Data:</b> <u>10.06.2005</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 (cm)	e (cm/cm)	Nº Ciclos
1	6,75	10,20	15%	0,18	0,73	197	1,20	0,00035940	0,0000352	15385
4	6,73	10,20	20%	0,24	0,97	261	1,64	0,00048230	0,0000473	1760
14	6,36	10,20	25%	0,30	1,21	309	1,97	0,00053590	0,0000525	376
21	5,70	10,20	30%	0,36	1,45	332	2,12	0,00069490	0,0000681	256
33	6,01	10,20	35%	0,42	1,70	409	2,64	0,00070650	0,0000693	743
34	6,21	10,20	40%	0,48	1,94	482	3,15	0,00087180	0,0000855	348

 <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>		<b>CBUQ Com Boracha - SMOV e DUTRA - Dissertação Márcia</b>								
<b>Data:</b>		<b>10.06.2005</b>								
<b>RT (MPa)=</b>		<b>0,39</b>								
<b>Nº CP</b>	<b>h (cm)</b>	<b>d (cm)</b>	<b>% RT</b>	<b>TT (MPa)</b>	<b>Dif. T (MPa)</b>	<b>Carga (Kgf)</b>	<b>Pressão</b>	<b>d inicial</b>	<b>e (%)</b>	<b>Nº Ciclos</b>
1S	5,97	10,2	15%	0,06	0,23	56	0,25	0,00000626	0,0000061	78650
4S	6,54	10,2	20%	0,08	0,31	82	0,42	0,00001735	0,00000170	8405
8S	6,65	10,2	25%	0,10	0,39	104	0,57	0,00002495	0,00000245	7109
14S	6,67	10,2	30%	0,12	0,47	125	0,72	0,00001338	0,00000131	10537
17S	6,73	10,2	35%	0,14	0,55	147	0,87	0,00002290	0,00000225	1873
3DB	6,55	10,2	40%	0,16	0,62	164	0,98	0,00001140	0,00000112	1368



**LAPPAV**  
**LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS**

ANÁLISE DE ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Procedência:	Projeto Márcia - SMOV
Data:	Julho/2005
Operador:	Diego S. Treichel

CP	Diâm. (cm)	Altura (cm)	Desloc. Recuperável (cm)	Desloc. Não Recuperável (cm)	Desloc. Total (cm)	Deformação			Inclinação da reta entre 1000s e 3600s
						Recup.	Não Recup.	Total	
3s	10,20	5,97	0,0322	0,0128	0,045	0,0086	0,0034	0,012	7,24E-06
9s	10,20	6,54	0,0048835	0,0092055	0,014089	0,001302267	0,0024548	0,0037571	2,02E-06
11s	10,20	6,65	0,017004	0,053999	0,071003	0,0045344	0,0143997	0,0189341	3,00E-06
12s	10,20	6,67	0,020409	0,063746	0,084155	0,0054424	0,0169988	0,0224412	1,00E-05
24c	10,20	5,91	0,011076	0,001643	0,012719	0,0029536	0,000438	0,0033916	7,00E-06
31c	10,20	6,10	0,011	0,0017	0,0127	0,00293973	0,00044347	0,0033832	1,00E-06



PETRÓLEO BRASILEIRO S. A.  
PETROBRAS

Número: 0939-05 G

## CERTIFICADO DE ENSAIO

CÓPIA

Produto: CIMENTO ASF. CAP 50/60	Código: 712
Local de amostragem: TQ 88696D	Laboratório: REFAP/DC/DP
Data/hora da amostragem: 13/03/05 13:30	Endereço: Av. Getúlio Vargas, 11001 92420-221 Canoas - RS
Data/hora do Recebimento: 13/03/05 15:17	Tel.: (51) 415-2000 Fax: (51) 415-2566

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRACAO	D 5	50 a 60	54	0,1 mm
DUTILIDADE A 25 GC	D 113	60 min.	>147	cm
ECA-% DA PENETRACAO ORIGINAL	X 021 (1)	50 min.	67	%
ECA-VARIACAO EM MASSA	D 1754	1,0 max.	-0,12	%
INDICE DE SUSCETIBILIDADE TERMICA	X 018	-1,5 a 1,0	0,3	
PONTO DE FULGOR	D 92	235 min.	>236	grau C
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	99,5 min.	99,76	% massa
VISCOSIDADE SAYBOLT FUROL A 135 GC	E 102	110 min.	241,2	s
DENSIDADE RELATIVA A 20/4 GC	D 70	Anotar (3)	1,011	
AQUECIMENTO A 175 GC	X 215	NESP (2)	NESP	

**Notas:**

- (1) X 021 = calculo da % da penetracao original determinada pelo metodo ASTM D 5.
- (2) NESP = Nao espuma
- (3) Ensaio nao faz parte da especificacao. Informacao para fins de faturamento.  
- ID N°440570 e LACRE N°0013476. Viscosidade SSF a 150°C =122.4s.

Recebido em 22.04.05  
c/ 24.190  
CAP 50/60 TH

Data de Emissão : 18/03/05 08:19	Página 1 de 1
Os resultados deste Certificado de Ensaio referem-se à amostra acima especificada. Este certificado só pode ser reproduzido integralmente e com a autorização do responsável pelo seu conteúdo.	

Original assinado por:
Responsável
Eng. Processamento Luiz Carlos Hoff CRQ:5ª Região 05301033