Fernanda Pilati

**Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do
resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades
mecânicas de misturas asfálticas densas**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri

São Carlos
2008

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Pilati, Fernanda

P637a Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas / Fernanda Pilati ; orientador Glauco Túlio Pessa Fabbri. — São Carlos, 2008.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Planejamento e Operações de Sistemas de Transportes) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2008.

1. Alfalto-borracha. 2. Resíduo de óleo de xisto. 3. Processo úmido. 4. Experimentos com misturas. 5. Misturas asfálticas densas. 6. Propriedades mecânicas. I. Título.

Dedico este trabalho à minha família, Laurindo,
Deonila, Emerson, Rubiane, meu cunhado Fabiano,
e especialmente, à Thereza Roza.

***“Superação é ter a humildade de aprender
com o passado, não se conformar com o
presente e desafiar o futuro”
(Hugo Bethlem)***

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua infinita bondade, amor, incentivo, força e motivação para a realização desse trabalho.

Especialmente à minha família. Meus pais, Deonila e Laurindo, por todo ensinamento, amor, dedicação e apoio durante todos os acontecimentos da minha vida, e, apesar da distância, foram incansáveis e inigualáveis no apoio e compreensão. Aos meus irmãos, Emerson e Rubiane, por todo incentivo, paciência e amizade sincera.

Ao meu namorado Vinicius pelo seu amor, apoio, companheirismo, dedicação, compreensão, e principalmente, paciência durante todo esse período.

Agradeço ao professor Dr. Glauco pelo seu apoio, dedicação, competência e sua indispensável e valorosa orientação.

A Adalberto Leandro Faxina por toda dedicação, paciência e ajuda para realização deste trabalho.

Aos meus amigos, Wyvianne Rech, Paula Pulga, Eduardo Spigiorin, Patrícia Santos, Lidiane Francine, Débora Soares, Jandiana Lucof, Alexandra Urnau, Aleksandro Rocha, Taciana Rysma, Mário Neto, Priscila Oliveira, Derby Neto, Michele Fragoso, Rodolfo Sanches, Antônio Carlos de Souza, Marcus Alexandre, João Uchoa, Wellington Andrade, Régis Pamponet, Liris Campelo, Carolina Mello, Jaqueline Feitoza que mesmo distante me apoiaram e incentivaram durante essa fase. Agradeço de coração todo companheirismo e amizade dedicados a mim.

Aos amigos conquistados durante esse período, Josiele Patias, Paulo Hanke, Leonardo Carnielle, Mara Carvalho, pela amizade, apoio, ajuda, e principalmente pelos bons momentos vividos durante essa época.

Aos técnicos de laboratório, Paulo Toyama, em especial, Antônio Carlos Gigante e João Pereira pela disponibilidade, dedicação e ajuda durante toda pesquisa.

Aos engenheiros do DER/PR Gilberto Borborema e Léo Albuquerque por todos os ensinamentos e incentivo para a realização do mestrado.

Aos professores do Departamento de Transportes da EESC-USP pelos ensinamentos e apoio constante.

Aos funcionários do Departamento de Transportes da EESC-USP, em especial, à Antonia Magali M. César por todo apoio e amizade durante esse período.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo auxílio à pesquisa (processo nº 04/09761-5), coordenado pelo Prof. Dr. Manoel Henrique Alba Sória, que proporcionou a instalação de alguns equipamentos de laboratório utilizados nesta pesquisa.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado.

PILATI, Fernanda (2008). Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas. 210p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

No Brasil, desde o início da década de 1990, vêm sendo desenvolvidas pesquisas sobre aplicação do asfalto-borracha visando tanto a diminuição dos problemas ambientais gerados pelo descarte de pneus inservíveis, como a melhoria das características dos ligantes produzidos. Esta pesquisa teve por objetivo avaliar o desempenho mecânico de oito misturas asfálticas do tipo concreto asfáltico usinado a quente, produzidas com asfaltos convencional e convencional modificado com borracha de pneu e resíduo de óleo de xisto. Quanto ao ligante, foram utilizados 8 tipos, a saber: CAP 30/45 (referência); dois ligantes empregando teores diferentes de borracha moída de pneu; outros dois com teores distintos de resíduo de óleo de xisto e, por fim, mais três com combinações de teores de borracha e de resíduo de óleo de xisto. Os corpos-de-prova empregados nos ensaios foram moldados em cinco teores diferentes de ligantes asfálticos (4,5; 5,0; 5,5; 6,0 e 6,5%). Foram realizados ensaios Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e umidade induzida. Com base nos resultados dos ensaios realizados, observou-se que tanto a borracha quanto o óleo reduzem a resistência à tração e o módulo de resiliência das misturas, no entanto, na recuperação retardada, os efeitos da borracha e do óleo são antagônicos, diminuindo e aumentando, respectivamente. Quanto à suscetibilidade à ação da água, as misturas com adição de óleo apresentaram menor suscetibilidade que as misturas com adição de borracha. Todas as misturas estudadas, exceto aquelas com altas concentrações de óleo e de borracha, conseguiram atender os requisitos estabelecidos pelas especificações, para as propriedades analisadas. Todavia, em alguns casos, considerando os efeitos antagônicos do óleo e da borracha, algumas combinações entre ambos podem ser realizadas, com a finalidade de alcançar os níveis desejados para as propriedades do ligante asfalto-borracha e das misturas asfálticas.

Palavras-chave: asfalto-borracha, óleo de xisto, processo úmido, experimentos com misturas, misturas asfálticas densas, propriedade mecânicas.

PILATI, Fernanda (2008). Analysis of the effects of crumb rubber and shale-oil residue on mechanical properties of asphalt mixtures. 210p. Master thesis (Mastering) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

In Brazil, since the beginning of the 90's, have been developed researches on the application of asphalt-rubber seeking the reduction of environmental problems created by the used tires, and the improvement of the characteristics of the produced binder. The purpose of this research is to evaluate the mechanical performance of eight hot mix asphalt concretes, produced with conventional asphalt and modified asphalt with crumb rubber and shale-oil residue. Eight types of binders were used: CAP 30/45 (reference); two binders using different crumb rubber contents, two with different shale-oil residue contents, and finally three more with the combination of crumb rubber and shale-oil residue contents. The specimens used in the laboratorial tests were compacted in five different binders contents (4.5; 5.0, 5.5; 6.0 e 6.5%). The tests performed are: Marshall test, indirect tension, resilient modulus and moisture induced. The results showed that the rubber and the shale oil reduce the indirect tension and resilience module of the mixtures, however, on the delayed recover, the effects of the rubber and of the shale oil are opposed, decreasing and increasing it, respectively. For the moisture susceptibility, the mixtures with shale-oil residue exhibited less susceptibility to water than those with crumb rubber. All the studied mixtures, except those with high shale-oil residue and rubber concentrations, they got to attend the established requirements for the specifications, for the analyzed properties. Although, in some cases, considering the opposed effects of the shale oil and of the crumb rubber, some combinations between both can be accomplished, with the purpose of reach the levels wanted for the properties of the asphalt-rubber binder and the asphalt mixtures.

Key words: crumb-rubber, shale-oil residue, wet process, experiments with mixtures, hot mix asphalt, mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Ensaio de tração indireta em amostra cilíndrica.	31
Figura 2.2. Curva de deformação x tempo, para um ciclo de carregamento.	34
Figura 2.3. Curva de deformação para um ciclo de carregamento (NCHRP).	35
Figura 3.1: Simplex formado pelos três componentes e espaço amostral com restrições.	41
Figura 3.2. Espaço amostral com restrições e misturas escolhidas.	42
Figura 3.3. Faixa C do DER/SP (DER/SP, 1991) e curva granulométrica da mistura obtida.	45
Figura 3.4. Curva granulométrica da borracha moída.	49
Figura 3.5. Viscosidade x temperatura para o ligante 100-0-0.	58
Figura 3.6. Viscosidade x temperatura para o ligante 93-0-7.	59
Figura 3.7. Viscosidade x temperatura para o ligante 86-0-14.	59
Figura 3.8. Equipamento adaptado para o procedimento de mistura.	62
Figura 3.9. Equipamento utilizado para ensaio de módulo de resiliência.	65
Figura 3.10. Montagem do corpo-de-prova no suporte.	65
Figura 3.11. Prensa utilizada nos ensaios de estabilidade Marshall e resistência à tração.	67
Figura 3.12. Textura superficial do topo do corpo-de-prova (a) não condicionado e (b) condicionado.	68
Figura 3.13. Textura superficial do corpo-de-prova (a) não condicionado e (b) condicionado.	68
Figura 4.1: Estabilidade das misturas asfálticas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha.	73
Figura 4.2: Estabilidade das misturas asfálticas com adição de óleo e borracha.	74
Figura 4.3: Fluência das misturas asfálticas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha.	75
Figura 4.4: Fluência das misturas asfálticas com adição de óleo e borracha.	76
Figura 4.5 Módulo de resiliência total das misturas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha.	77
Figura 4.6 Módulo de resiliência total das misturas com adição de óleo e borracha.	78
Figura 4.7 Resistência à tração das misturas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha.	79
Figura 4.8 Resistência à tração das misturas com adição de óleo e borracha.	80
Figura 4.9 Relação MR/RT das misturas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha.	81
Figura 4.10 Relação MR/RT das misturas: com adição de óleo e borracha.	82
Figura 4.11 Recuperação retardada das misturas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha.	83

Figura 4.12 Recuperação retardada das misturas com adição de óleo e borracha	84
Figura 4.13 MRt das misturas condicionadas e não-condicionadas: (a) adição de óleo e.....	85
(b) adição de borracha.....	85
Figura 4.14 MRt das misturas condicionadas e não-condicionadas com adição de óleo e borracha.....	86
Figura 4.15 Relação de módulo de resiliência (RMR) das misturas estudadas	87
Figura 4.16 Resistência à tração das misturas condicionadas e não condicionadas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha	88
Figura 4.17 Resistência à tração das misturas condicionadas e não condicionadas com adição de óleo e borracha	89
Figura 4.18 Relação de resistência à tração (RRT) das misturas asfálticas estudadas	89
Figura 4.19 Recuperação retardada das misturas condicionadas e não condicionadas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha.....	90
Figura 4.20 Recuperação retardada das misturas condicionadas e não condicionadas com adição de óleo e borracha.....	91
Figura 4.21: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para densidade aparente	95
Figura 4.22: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para o volume de vazios	96
Figura 4.23: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para o VAM	97
Figura 4.24: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para RBV	97
Figura 4.25: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para fluência.....	98
Figura 4.26: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para estabilidade.....	99
Figura 4.27: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para MRt NCHRP ...	100
Figura 4.28: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para RT.....	101
Figura 4.29: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para MRt/RT	102
Figura 4.30: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para RR	103
Figura 4.31: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para MRt NCHRP condicionado	104
Figura 4.32: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para RT condicionada	105
Figura 4.33: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para MRt/RT condicionada	106

Figura 4.34: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para RR condicionada	107
Figura 4.35: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para relação RMR.....	107
Figura 4.36: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para relação RMR....	108
Figura A1: Parâmetros Marshall para mistura 100-0-0	129
Figura A2: Parâmetros Marshall para mistura 93-0-7	132
Figura A3: Parâmetros Marshall para mistura 86-0-14	135
Figura A4: Parâmetros Marshall para mistura 91-9-0	138
Figura A5: Parâmetros Marshall para mistura 77-9-14	141
Figura A6: Parâmetros Marshall para mistura 82-18-0	144
Figura A7: Parâmetros Marshall para mistura 75-18-7	147
Figura A8: Parâmetros Marshall para mistura 68-18-14	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Exigências da norma ES-P 28/05 do DER/PR para asfalto-borracha em camadas de rolamento.....	23
Tabela 2.2: Diferenças apresentadas pelas especificações de asfalto-borracha.....	24
Tabela 3.1. Proporções dos componentes das misturas selecionadas.....	42
Tabela 3.2. Propriedades físicas, temperaturas e métodos de ensaio, para os ligantes asfálticos avaliados no experimento.	43
Tabela 3.3. Propriedades mecânicas das misturas asfálticas avaliadas no experimento.....	44
Tabela 3.4. Limites da faixa “C” do DER/SP e composição granulométrica da mistura final	44
Tabela 3.5. Ensaio de caracterização física dos agregados minerais.	48
Tabela 3.6. Distribuição granulométrica da borracha moída.	49
Tabela 3.7. Caracterização do agente rejuvenescedor de xisto AR-5.....	50
Tabela 3.8. Resultados de caracterização física do CAP 30/45.....	51
Tabela 3.9. Resultados de caracterização física do Ligante 2 (93-0-7).	52
Tabela 3.10. Resultados de caracterização física do Ligante 3 (86-0-14)	52
Tabela 3.11. Resultados de caracterização física do Ligante 4 (91-9-0).	53
Tabela 3.12. Resultados de caracterização física do Ligante 5 (77-9-14).	53
Tabela 3.13. Resultados de caracterização física do Ligante 6 (82-18-0).	54
Tabela 3.14. Resultados de caracterização física do Ligante 7 (75-18-7).	54
Tabela 3.15. Resultados de caracterização física do Ligante 8 (68-18-14).	55
Tabela 3.16. Temperaturas de usinagem e de compactação.	60
Tabela 3.17. Densidades efetivas dos agregados e densidades dos ligantes asfálticos.....	62
Tabela 3.18. Quantidade de corpos-de-prova ensaiados por mistura estudada	64
Tabela 4.1 Volume de Vazios.....	69
Tabela 4.2 Vazios do agregado mineral.....	70
Tabela 4.3 Relação Betume-vazios (%).....	71
Tabela 4.4 Densidade aparente das misturas	72
Tabela 4.5: Modelos de regressão referente às propriedades monitoradas.....	99
Tabela 4.6: Modelos de regressão referente às propriedades monitoradas.....	103
Tabela 4.7 Modelos de regressão referentes às propriedades das misturas condicionadas ...	109

Tabela A1: Parâmetros Marshall para mistura 100-0-0.....	127
Tabela A2: Parâmetros Marshall para mistura 93-0-7.....	130
Tabela A3: Parâmetros Marshall para mistura 86-0-14.....	133
Tabela A4: Parâmetros Marshall para mistura 91-9-0.....	136
Tabela A5: Parâmetros Marshall para mistura 77-9-14.....	139
Tabela A6: Parâmetros Marshall para mistura 82-18-0.....	142
Tabela A7: Parâmetros Marshall para mistura 75-18-7.....	145
Tabela A8: Parâmetros Marshall para mistura 68-18-14.....	148
Tabela B1: Estabilidade e Fluência Marshall para mistura	152
Tabela C1: Módulo de Resiliência das misturas no teor de 4,5%.....	155
Tabela C2: Módulo de Resiliência das misturas no teor de 5,0%.....	157
Tabela C3: Módulo de Resiliência das misturas no teor de 5,5%.....	159
Tabela C4: Módulo de Resiliência das misturas no teor de 6,0%.....	161
Tabela C5: Módulo de Resiliência das misturas no teor de 6,5%.....	163
Tabela D1: Resistência à tração das misturas estudadas.....	166
Tabela E1: MR/RT das misturas estudadas.....	169
Tabela F1: Recuperação Retardada das misturas estudadas	175
Tabela G1: Módulo de Resiliência condicionados das misturas estudadas.....	181
Tabela G2: Relação dos módulos de resiliência das misturas estudadas	183
Tabela G3: Resistência à tração condicionada das misturas estudadas.....	186
Tabela G3: Relação da resistência à tração condicionada das misturas estudadas	189

LISTA DE ABREVIATURA, SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADOT	<i>Arizona Department of Transportation</i>
ANIP	Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos
AR-5	Classificação do agente rejuvenescedor (segundo ASTM D4552/86)
ARTESP	Agência de Transportes do Estado de São Paulo
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i>
BMP	Borracha moída de pneu
BRP	Borracha reciclada de pneu
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CENPES	Centro de pesquisa da Petrobras
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DEINFRA	Departamento Estadual de Infra-estrutura de Santa Catarina
DER-PR	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER-ME	Método de ensaio do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EVA	<i>ethylene vinyl acetate</i> (polímero)
LVDT	<i>linear variable differential transformer</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
SBR	<i>styrene-butadiene-rubber</i> (polímero)
SBS	<i>styrene-butadiene-styrene</i> (polímero)
SIX	Superintendência da Industrialização do Xisto – Petrobras
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
PAV	<i>Pressure aging vessel</i>
PG	<i>Performance grade</i>
VGC	<i>Viscosity-gravity constant</i>
CPA	Camada porosa de atrito

CP	Corpo-de-prova
RT	Resistência à tração
σ_t	Tensão de tração
σ_{adm}	Tensão de tração admissível
h	Altura do corpo-de-prova
d	Diâmetro do corpo-de-prova
MR	Módulo de resiliência
MR _t	Módulo de resiliência total
MR _i	Módulo de resiliência instantâneo
F	Carga aplicada
Δ	deslocamento
Δ_t	Deslocamento total
Δ_i	Deslocamento instantâneo
μ	Coeficiente de poisson
RR	Recuperação retardada
ε_t	Deformação total
ε_i	Deformação instantânea
RRT	Relação da resistência à tração
RT ₁	Resistência à tração média do grupo condicionado
RT ₂	Resistência à tração média do grupo de controle
An	Abrasão Los Angeles
V	Viscosidade Saybol-Furol
DMM	Densidade máxima teórica
Pb	Teor de asfalto
ρ_{ef}	Densidade efetiva do agregado
ρ_{ap}	Densidade aparente do agregado
ρ_{ag}	Densidade da porção pétrea da mistura
Abs _{asf}	Absorção de asfalto
E	estabilidade
F	Fluência
D _{ap}	Densidade aparente da mistura
Vv	Volume de vazios
RBV	Relação betume-vazios
VAM	Vazios do agregado mineral

SUMÁRIO

RESUMO	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURA, SIGLAS E SÍMBOLOS	xii
Capítulo 1 INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2 REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1 Ligantes Asfálticos	5
2.1.1 Constituição química do asfalto	7
2.2 Asfaltos Modificados	9
2.3 Asfalto-Borracha	11
2.3.1 Introdução	11
2.3.2 Histórico.....	12
2.3.3 Método de Obtenção do Asfalto-Borracha	16
2.3.4 Interação Asfalto-Borracha	19
2.3.5 Óleo extensor de borracha.....	24
2.4 Misturas Asfálticas	25
2.4.1 Misturas asfálticas com asfalto-borracha	27
2.4.1.2 Propriedades das misturas com asfalto-borracha	28
2.5 Ensaios de Propriedades Mecânicas	30
2.5.1 Ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral.....	31
2.5.2 Módulo de Resiliência por compressão diametral dinâmica	32
2.5.3 Dano por Umidade Induzida	36
Capítulo 3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1. Planejamento do experimento	39

3.2 Materiais Utilizados.....	44
3.2.1 Materiais granulares	44
3.2.1.1 Determinação das propriedades dos agregados	45
3.2.2 Borracha	48
3.2.3 Óleo Extensor	49
3.2.4 Cimento Asfáltico.....	50
3.2.5 Ligantes Modificados	51
3.3 Procedimentos e Equipamentos de Laboratório.....	55
3.3.1 Ligantes Asfálticos	55
3.3.2 Misturas Asfálticas	58
3.3.2.1 Temperaturas de usinagem e de compactação.....	58
3.3.2.2 Determinação da Densidade Máxima Teórica de Misturas Asfálticas (Método Rice) – ASTM D 2041/00.....	60
3.3.2.3 Procedimento de moldagem dos corpos-de-prova	62
3.3.2.4 Parâmetros volumétricos	63
3.3.3 Ensaio de propriedades mecânicas.....	64
3.3.3.1 Módulo de Resiliência	64
3.3.3.2 Estabilidade e Fluência Marshall.....	66
3.3.3.3 Resistência à tração	66
3.3.3.4 Dano por umidade induzida.....	67
Capítulo 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	69
4.1 Parâmetros Marshall.....	69
4.1.1 Volume de Vazios	69
4.1.2 Vazios do Agregado Mineral.....	70
4.1.3 Relação Betume-vazios	71
4.1.4 Densidade Aparente.....	72
4.1.5 Estabilidade e Fluência	73
4.2 Ensaio das Propriedades Mecânicas	76
4.2.1 Módulo de Resiliência	76
4.2.3 Resistência à Tração por compressão diametral.....	79
4.2.4 Relação MR/RT	81
4.2.5 Recuperação Retardada	83

4.3 Propriedades das misturas pós-condicionamento.....	85
4.3.1 Módulo de Resiliência pós-condicionamento	85
4.3.2 Resistência à Tração pós-condicionamento	87
4.3.3 Recuperação retardada	90
4.4 Análise Estatística dos Resultados.....	91
4.4.1 Procedimento de Análise	92
4.5 Análise estatística das propriedades das misturas asfálticas não condicionadas... 94	
4.5.1 Superfície de Resposta e Efeito de componentes.....	95
4.5.1.1 Parâmetros volumétricos, estabilidade e fluência	95
4.5.1.2 Módulo de Resiliência não-condicionado.....	100
4.5.1.3 Resistência à tração não-condicionada	101
4.5.1.3 MRt/RT não condicionado.....	101
4.5.1.4 Recuperação retardada	102
4.6 Análise estatística das propriedades das misturas asfálticas condicionadas	104
4.6.1.1 Módulo de Resiliência condicionado	104
4.6.1.2 Resistência à tração condicionada.....	105
4.6.1.3 MRt/RT condicionada.....	106
4.6.1.4 Recuperação retardada condicionada.....	106
4.6.1.5 Relação RMR.....	107
4.6.1.6 Relação RRT	108
4.7 Comentários Finais	109
Capítulo 5 CONCLUSÕES.....	111
5.1 Parâmetros Marshall	111
5.2 Propriedades Mecânicas (misturas não condicionadas).....	112
5.3 Propriedades pós-condicionamento.....	113
5.4 Conclusões obtidas da análise de superfícies de resposta.....	113
5.5 Conclusões obtidas da análise de efeito dos componentes.....	114
5.5.1 Borracha moída	114
5.5.2 Resíduo de óleo de xisto	116
5.6 Considerações Finais.....	117

<i>Capítulo 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	<i>119</i>
<i>APÊNDICE A</i>	<i>126</i>
<i>APÊNDICE B</i>	<i>151</i>
<i>APÊNDICE C</i>	<i>154</i>
<i>APÊNDICE D</i>	<i>165</i>
<i>APÊNDICE E</i>	<i>168</i>
<i>APÊNDICE F</i>	<i>174</i>
<i>APÊNDICE G</i>	<i>180</i>

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário é, sem dúvida, vital para o bem-estar econômico e social da população, possuindo papel fundamental tanto no transporte de passageiros, como no transporte de cargas. O principal meio de transporte brasileiro é o rodoviário, sendo a maior parte das rodovias pavimentadas compostas de pavimentos flexíveis com revestimento asfáltico. No entanto, a maior parte das rodovias brasileiras se encontra em péssimo estado de conservação, sendo dessa maneira, muitas vezes, incapazes de oferecer segurança e conforto adequados aos usuários. A ampliação e conservação das rodovias proporcionam um aumento de segurança e de maior economia nos transportes, além de ser uma das principais condições para o desenvolvimento do País.

A análise sistêmica de estudos realizados pela CNT (2007) aponta um quadro geral deficiente para rodovias brasileiras, isto pode ser atribuído a diversos fatores além do revestimento asfáltico em si, como a falta de manutenção, sobrecarga de caminhões, falta de drenagem adequada, materiais sem a qualidade desejada, geometria, má sinalização e execução, entre outros. Vale ressaltar que todo pavimento é projetado para uma determinada vida útil e é natural que durante e após este período sejam realizadas intervenções, buscando-se aumentar a durabilidade do revestimento e do pavimento.

O crescimento da frota circulante de veículos com maior capacidade de carga, maior tração e maior pressão de inflação dos pneus, aliado ao excesso de carga e ao maior espaçamento entre as intervenções de conservação e restauração, contribuem para a deterioração das estradas do País. Todos estes fatos preocupam os técnicos rodoviários, tendo em vista os efeitos das tensões transmitidas aos pavimentos e o número crescente de solicitações, o que tem levado alguns pavimentos a um fracasso precoce.

O aumento das cargas aplicadas nas rodovias e a heterogeneidade dos ligantes asfálticos induzem a refletir sobre como melhorar o comportamento mecânico das misturas asfálticas produzidas no País. Essa análise deve levar em conta os danos causados pelo envelhecimento do ligante, pelas cargas solicitantes e pelas ações do meio ambiente. Atualmente, tem-se buscado materiais com melhores características para possibilitar essa melhoria.

Os ligantes asfálticos com adição de modificadores apresentam propriedades físicas, mecânicas e químicas melhoradas em relação aos cimentos asfálticos convencionais, proporcionando o aumento da durabilidade e da resistência ao aparecimento de defeitos. São adicionados aos cimentos asfálticos produtos como agentes melhoradores de adesividade, agentes rejuvenescedores, polímeros (SBR, SBS, EVA, etc), e também borracha de pneu moída.

O pneu possui papel fundamental e insubstituível tanto no transporte de passageiros quanto no de cargas. No entanto, quando se tornam inservíveis, acarretam uma série de problemas sanitários e ambientais. Uma das maneiras de minimizar este problema é a adição de sua borracha triturada em misturas asfálticas, a qual melhora o desempenho dos pavimentos, retardando o aparecimento de trincas e diminuindo os custos operacionais (DANTAS NETO, 2004).

Para os mais de 56 milhões de pneus vendidos no Brasil em 2005, somente 27 milhões foram reaproveitados, conforme dados da Associação Nacional de Indústria dos Pneumáticos (ANIP) (LOIOLA, 2006). Devido às crescentes preocupações ambientais, tem-se questionado a respeito da destinação ou deposição final de pneus inservíveis. O reaproveitamento destes pneus se constitui, em todo o mundo, em um desafio muito difícil dado as suas peculiaridades de durabilidade (aproximadamente 600 anos), quantidade, volume e peso e, principalmente, grande dificuldade de propiciar a eles uma nova destinação ecológica e economicamente viável (MORILHA JR. e GRECA, 2003).

O asfalto-borracha é visto como uma alternativa econômica e ecologicamente viável para o estado precário das nossas estradas. A incorporação de borracha no ligante asfáltico é vista como uma excelente alternativa para proporcionar um destino útil às montanhas de pneus inservíveis dispostas em locais inadequados. No Brasil, são colocados no mercado aproximadamente 61 milhões de pneus por ano, sendo que, pelo menos, 50% dos pneus

produzidos anualmente estão sendo descartados e dispostos em locais inadequados. Estima-se que o passivo ambiental seja superior a 100 milhões de pneus (ANIP, 2007).

No sentido de amenizar os impactos ambientais foi aprovada em 26 de agosto de 1999 a Resolução nº 256 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), que determina que produtores e fabricantes sejam responsáveis pelo destino dos pneus descartados. Portanto, produtores e importadores de pneus deverão coletá-los e colocá-los em locais ambientalmente adequados. Pode-se considerar que o destino mais adequado em termos ecológico e ambientalmente correto é aquele que possa gerar um produto comercializável e útil para a sociedade. Uma das alternativas para os resíduos provenientes da borracha de pneu é a sua incorporação ao asfalto convencional, criando um novo tipo de asfalto para pavimentação. Portanto, essa alternativa motiva o estudo e o interesse no desenvolvimento de pesquisas visando à reutilização de borracha de pneus em obras de engenharia.

No intuito de melhorar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas, bem como reduzir o passivo ambiental causado pela crescente deposição inadequada de pneumáticos na natureza, muitos países vêm desenvolvendo tecnologia para a incorporação de borracha moída de pneu, BMP, em revestimentos asfálticos. Segundo ODA (2000), as primeiras experiências da incorporação da borracha moída às misturas asfálticas foram feitas nos Estados Unidos, na década de 1960, e desde então, vários estudos foram desenvolvidos naquele país e em outras partes do mundo. No Brasil, algumas universidades e centros de pesquisas começaram seus estudos na década de 1990 (FAXINA, 2002).

Os diversos estudos sobre essa adição vêm apontando inúmeros benefícios à mistura, dentre os quais podem ser citados a redução do envelhecimento, maior flexibilidade, maior resistência às deformações e trincas, redução do ruído, e maior resistência às variações de temperatura, além de redução dos custos com atividades de manutenção e reabilitação. Apresenta também melhores resultados referentes à resistência à fadiga e ao envelhecimento quando comparado aos asfaltos convencionais (SOUSA et al, 2000).

Para Campos et al. (2000), a utilização do asfalto-borracha é uma alternativa altamente competitiva em termos técnicos e econômicos, possibilitando que o país realize uma verdadeira política ambiental devido à reciclagem dos pneus usados, com sua reutilização na

pavimentação e restauração de estradas, e ao mesmo tempo, reduzindo a utilização de recursos minerais tais como agregados empregados na pavimentação de estradas.

A reação entre a borracha e o cimento asfáltico acontece mediante a absorção de óleos aromáticos do cimento asfáltico à cadeia polimérica da borracha natural ou sintética. Um dos elementos que podem ser empregados na produção do asfalto-borracha é o óleo extensor, produto rico em óleos aromáticos, que tem como função facilitar a incorporação da borracha moída ao cimento asfáltico, proporcionando um ligante asfalto-borracha de melhor qualidade. A adição do óleo extensor pode corrigir a composição química do cimento asfalto-borracha, proporcionando ao ligante uma viscosidade aceitável para uso na pavimentação. (FAXINA, 2002).

O presente trabalho tem como objetivo analisar o efeito da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas em misturas asfálticas densas. Para atingir o objetivo proposto, foi elaborado um estudo que compreende a modificação de um ligante asfáltico de referência (CAP 30/45) com diversos teores de borracha moída de pneu e resíduo de óleo de xisto. Como objetivo específico, tem-se a avaliação das propriedades dessas misturas, por meio de uma investigação laboratorial, através da produção de corpos-de-prova segundo o Método Marshall e de ensaios para a determinação dos valores de Módulo de Resiliência, Resistência à tração por compressão diametral, assim como verificar a resistência dessas misturas à ação da água.

O trabalho está dividido em seis capítulos. O Capítulo 1 relata as considerações iniciais, referentes à importância da pesquisa, assim como os objetivos do trabalho. O Capítulo 2 se destina à apresentação da revisão bibliográfica sobre o tema, abordando as características dos ligantes e das misturas asfálticas, com enfoque no ligante asfalto-borracha, interação asfalto-borracha, e finalmente os aspectos gerais das propriedades mecânicas, que serão avaliadas, das misturas asfálticas. O Capítulo 3 é destinado ao detalhamento do planejamento do experimento, assim como apresentados a descrição dos materiais e os procedimentos de laboratório realizados. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios juntamente com as análises realizadas. O Capítulo 5 é reservado para as conclusões. Ao término, é apresentado o capítulo 6, de referências bibliográficas.

Capítulo 2

REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo destina-se a apresentar informações relevantes ao tema da pesquisa, permitindo a consolidação de uma base teórica que possa auxiliar tanto na análise dos resultados, como nas conclusões finais do presente trabalho. São considerados, dessa forma, assuntos relacionados a ligantes e misturas asfálticas, asfaltos modificados, asfalto borracha e seu uso em pavimentação asfáltica, seguido de algumas propriedades mecânicas dessas misturas com esse ligante, tais como: ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e dano por umidade induzida.

2.1 Ligantes Asfálticos

O asfalto é um dos mais antigos materiais de construção encontrados na natureza, sendo utilizado há mais de 8000 anos. Na antiguidade, ele era muito usado como argamassa nas edificações e blocos de pavimento, calafetagem de navios e em aplicações como impermeabilizantes. No entanto, a primeira utilização do asfalto na pavimentação ocorreu em Lyon, na França, no ano de 1829, com a utilização de um mastique asfáltico para melhorar as condições de rodagem (MANUAL DO ASFALTO, 1989).

Os asfaltos são materiais aglutinantes de cor escura, constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular. Podem ser encontrados em jazidas naturais, na forma de bolsões de asfaltos, originados da evaporação natural das frações mais leves (mais voláteis) de jazidas de petróleo localizadas na superfície terrestre, como lagos de asfaltos. Os asfaltos também podem ser obtidos por destilação do petróleo em unidades industriais, refinarias, e são chamados de cimentos asfálticos de petróleo (CAP). Em pavimentação, os asfaltos podem ser denominados ligantes asfálticos, cimentos asfálticos ou materiais asfálticos.

Os cimentos asfálticos de petróleo, produtos derivados da destilação do petróleo, são produzidos para apresentarem características próprias para uso direto nas misturas asfálticas. Oferecem propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, também apresentam flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação da maioria de produtos inorgânicos.

As propriedades físicas dos ligantes asfálticos são normalmente expressas por meio da penetração, ponto de amolecimento, susceptibilidade térmica, viscosidade e ductilidade. Para Fox et al. (2006) uma das principais propriedades físicas dos materiais asfálticos é a viscosidade, devido ao fato dessa propriedade estar relacionada diretamente à capacidade de bombeamento, facilidade de mistura e aplicação destes materiais. A viscosidade é uma medida de consistência, definida como a resistência que um determinado material oferece ao escoamento, quando submetido a tensões de cisalhamento.

O ligante asfáltico também apresenta como característica fundamental a suscetibilidade térmica, sendo a temperatura fator preponderante no seu comportamento, alterando seus estado físico e consistência. O tempo de aplicação de carga também pode modificar o comportamento da mistura, pois um ligante submetido a um mesmo nível de carregamento, porém com diferentes tempos de aplicação apresentará comportamentos distintos. Portanto, nos ensaios para a caracterização dos ligantes asfálticos, devem-se levar em consideração os valores especificados de temperatura, tempo e magnitude de aplicação de carregamentos.

O asfalto pode ser considerado como um material visco-elástico apresentando, assim, comportamento elástico, viscoso e visco-elástico, dependendo da temperatura e do tempo de aplicação da carga. Para temperaturas baixas e tempos curtos de carregamento, o comportamento é essencialmente elástico, enquanto que para temperaturas altas e tempos longos de aplicação de carga, o comportamento torna-se viscoso (TAIRA, 2001).

Quando utilizados em serviços de pavimentação, os ligantes asfálticos devem tornar-se suficientemente líquidos para facilitar a mistura com os agregados e posterior lançamento na pista. Após o lançamento e compactação da pista, devem ficar suficientemente sólidos de modo que as camadas asfálticas do pavimento resistam às ações das cargas do tráfego, mesmo quando submetidas a altas temperaturas, sem sofrer deformações permanentes, e quando expostos a baixas temperaturas devem apresentar flexibilidade suficiente para impedir o aparecimento de trincas na camada asfáltica do pavimento.

Ao serem utilizados em misturas asfálticas a quente o ligante asfáltico é aquecido e sofre um envelhecimento já na mistura com os agregados pétreos, que também se encontram aquecidos. Em geral, esse envelhecimento tem como efeito o enrijecimento da mistura, que pode ser favorável quanto à distribuição de carga e deformações permanentes, porém pode favorecer o aparecimento de trincas de fadiga e até mesmo, eventualmente, a desintegração da camada asfáltica.

Quanto à sua classificação, até 2005, os asfaltos eram classificados de duas maneiras: pela viscosidade (a 60°C) resultando em três classes CAP-7, CAP-20 e CAP-40 e/ou pela penetração (25°C), CAP 30-45, CAP 50-60, CAP 85-100 e CAP 150-200 (ABNT MB-827). Atualmente, através da norma ABNT NBR 6576, os asfaltos são classificados pela penetração como: CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100 e CAP 150-200.

O desempenho das rodovias está atrelado ao comportamento do ligante asfáltico, que necessita suportar os carregamentos oriundos do tráfego em diferentes condições climáticas, e transferi-los para as camadas inferiores. Portanto, ele precisa ser flexível em temperaturas baixas para prevenir as trincas térmicas no pavimento, do mesmo modo que suficientemente rígido em temperaturas altas para prevenir as deformações permanentes. No entanto, as misturas asfálticas convencionais, nem sempre, apresentam propriedades adequadas, ou seja, têm um desempenho desejável. Diante deste contexto, umas das tentativas para melhorar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas, bem como reduzir o passivo ambiental causado pela crescente deposição inadequada de pneumáticos na natureza, é o estudo que muitos países vêm desenvolvendo para a incorporação de borracha moída de pneu, BMP, em revestimentos asfálticos.

2.1.1 Constituição química do asfalto

O asfalto, sendo uma mistura de grandes cadeias de hidrocarbonetos, possui como principais elementos na sua constituição o Carbono e o Hidrogênio correspondendo a, aproximadamente, 93 a 99% da sua constituição, dependendo do petróleo do qual é originado. Elementos como: Enxofre, Nitrogênio e Oxigênio, chamados de heteroátomos, depois do carbono e hidrogênio, são os mais presentes no asfalto. O desequilíbrio de cargas (polaridade)

e a presença de grupos funcionais (funcionalidade) causados pelos heteroátomos têm grande contribuição nas características dos asfaltos (PINHEIRO, 2004).

Segundo Tissot e Welte (1984)¹ *apud* Antunes (2001), a composição dos asfaltos pode ser definida de forma aproximada como:

- Hidrocarbonetos saturados: que é constituído de *alcanos* (parafínicos) que apresentam cadeias abertas normais e ramificadas, só apresentam simples ligações entre os átomos de carbono. Sua nomenclatura é caracterizada pela terminação ano (metano, etano, propano) e representam a maior parte da constituição do gás natural e do petróleo; e *cicloalcanos* (naftênicos), que são caracterizados por cadeias cíclicas de ligações simples, são insolúveis em água.
- Hidrocarbonetos aromáticos: são definidos como sendo os hidrocarbonetos que possuem um ou mais anéis benzênicos, ou seja, anéis contendo seis átomos de carbono, incluindo aromáticos puros, moléculas de cicloalcanos aromáticos (naftênico-aromáticos), e benzotiofenos (compostos cíclicos contendo átomos de enxofre). Os aromáticos são considerados os mais tóxicos dos hidrocarbonetos e são bastante solúveis em água, o que representa maior perigo aos organismos vivos.
- Resinas e asfaltenos: são constituídos por frações policíclicas dos constituintes do óleo cru, de alto peso molecular, com átomos de Nitrogênio e Enxofre na sua maioria. Os asfaltenos são insolúveis em alcanos leves (precipitam com n-hexano).
- Hidrocarbonetos insaturados (Alquenos): são caracterizados pela presença de átomos de carbono unidos por ligações covalentes duplas. Alquenos contendo de dois a quatro átomos de carbono são gases à temperatura ambiente, enquanto os que contém mais de cinco átomos são, geralmente, líquidos. Apesar de não existirem no óleo bruto, os alquenos são formados em larga escala quando o óleo é craqueado. São mais tóxicos que os alcanos, porém menos que os aromáticos.

¹ TISSOT B.P., WELTRED.H. (1984). *Petroleum formation and ooccurence*, Springer Verlag, Berlin.

O fracionamento químico separa o CAP em compostos saturados, nafteno-aromáticos, polar-aromáticos e asfaltenos (insolúveis em n-heptano). Os asfaltenos separam-se primeiro, por precipitação, com a adição de n-heptano. Os outros constituintes, denominados maltenos, solúveis em n-heptano, são separados por cromatografia de adsorção. Os asfaltenos são aglomerados de compostos polares e polarizáveis, formados em consequência de associações intermoleculares. São considerados responsáveis pelo comportamento reológico dos CAP e constituídos de hidrocarbonetos naftênicos condensados e de cadeias curtas de saturados. (LEITE e BITTENCOURT, 2004).

2.2 Asfaltos Modificados

Para ampliar sua resistência, os ligantes asfálticos de petróleo podem ser modificados através da adição de asfaltos naturais como gilsonita (EUA), asphaltita (Argentina), e asfalto de Trinidad ou ainda por adição de fileres (cal, cimento, sílica, etc), fibras (fibra de vidro, fibras de celulose e fibras poliméricas) (MAGALHÃES, 2004). A modificação mais empregada atualmente é através do uso de polímeros (SBR, SBS, EVA, etc) e borracha de pneu (LEITE, 1999).

Segundo Taira (2001), um asfalto modificado deve possuir algumas propriedades diferenciadas em relação ao asfalto convencional, tais como:

- aumento da coesão;
- aumento da adesão;
- diminuição da susceptibilidade térmica;
- aumento da resistência ao envelhecimento;
- aumento da elasticidade;
- melhoria das propriedades reológicas.

Um ligante modificado ideal deve apresentar baixa susceptibilidade térmica na faixa de temperaturas a que estará sujeito em serviço. A resistência à deformação permanente (em altas temperaturas), a resistência às trincas térmicas (em baixas temperaturas) e as características de fadiga devem ser altas. Ao mesmo tempo deve, no mínimo, manter as mesmas qualidades de adesão dos ligantes tradicionais (BRÛLÉ, 1996).

O uso de ligantes asfálticos modificados com borracha na confecção de misturas asfálticas a quente iniciou-se na década de 40. A incorporação da borracha reciclada e granulada aos ligantes asfálticos teve como objetivo melhorar o comportamento mecânico das misturas asfálticas e diminuir o nível de poluição ambiental (MOHAMMAD et al., 2000). Em congruência com esse pensamento está a abordagem de Leite (1999), afirmando que devido à junção de razões econômicas, o alto custo dos polímeros e o problema real de eliminação dos pneus inservíveis, levaram à tentativa de modificar as propriedades do asfalto com borracha moída de pneu.

Leite (1999), em sua tese de doutorado, analisou o preparo e a caracterização de asfaltos modificados por diversos tipos de polímeros, e observou que a borracha de pneus é a matéria prima mais barata, dentre os diversos tipos de polímeros testados.

As misturas asfálticas devem possuir flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego e resistência à tração adequada para evitar rupturas precoces. A vida de fadiga deve ser a maior possível, daí o emprego de asfalto modificado por polímero, que tem a função de aumentar a vida de fadiga da mistura devido à melhora na recuperação elástica imprimida ao ligante pelo polímero (MOURÃO, 2003).

Nos estudos de Amaral (2000) foram avaliadas as vantagens e desvantagens da utilização de asfalto modificado com polímero SBS em misturas densas com seixo rolado como agregado graúdo. Para a avaliação foram realizados ensaios Marshall, de fluência por compressão uniaxial estática a 40°C, de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica e de resistência à tração por compressão diametral à 25°C. As misturas com asfalto modificado apresentaram melhor desempenho nos ensaios Marshall e de resistência à tração; da mesma maneira, apresentaram melhores relações entre o módulo de resiliência e a resistência à tração. Porém, os resultados do ensaio de fluência por compressão uniaxial estática nem sempre indicaram as misturas com asfalto modificado como as de melhor comportamento quanto à deformação permanente.

Taira (2001) avaliou o desempenho de misturas asfálticas densas utilizando ligante convencional (CAP 20) e ligante modificado com polímero SBS, por meio de ensaios Marshall, de fluência por compressão uniaxial estática e dinâmica, de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de resiliência por compressão diametral dinâmica. O efeito

da adição de polímeros não foi claramente distinguido na misturas asfálticas quando avaliados os resultados dos ensaios de fluência por compressão uniaxial estática e módulo de resiliência, porém os resultados dos ensaios de fluência dinâmica e estabilidade Marshall identificaram melhor comportamento das misturas com asfaltos modificados.

O estudo realizado por Santos (2005) avaliou o comportamento à fadiga de algumas misturas asfálticas compostas com diferentes asfaltos, um modificado com polímero SBS, um com borracha moída de pneu e um convencional. Os resultados indicaram que, na maioria dos casos, as misturas com CAP 20 + SBS apresentaram melhor desempenho (maior vida de fadiga), seguida da mistura com adição de 20% de borracha e, por último, a mistura de referência (asfalto convencional).

Apesar de modificar significativamente as propriedades do betume, a utilização de elastômeros vulcanizados, inclusive pó de borracha proveniente de reciclagem de pneumáticos é de difícil dispersão, requerendo altas temperaturas e tempo de digestão. Os resultados que se tem obtido são misturas heterogêneas e a borracha agindo mais como um filer flexível (GALVÃO, 2001).

2.3 Asfalto-Borracha

2.3.1 Introdução

Problemas ambientais são preocupações tanto do governo quanto de empresas privadas e, dentre essas preocupações, como uma das principais pode-se destacar o reaproveitamento de produtos descartáveis. Para os pneus inservíveis existem diversas formas de reaproveitamento, uma delas, o emprego na pavimentação asfálticas. No Brasil, pesquisas sobre o emprego de borracha de pneus descartados em pavimentação asfálticas iniciaram-se nos anos 90 (FAXINA, 2002).

Segundo Oda (2000) além da aplicação em pavimentação, os pneus descartados também podem ter outras aplicações em engenharia civil, como em obras de contenções, na construção

de quebra-mares, na construção de parques infantis, no controle de erosões, na drenagem de gases em aterros sanitários, entre outros.

A borracha de pneu também pode ser empregada, em associação com outros materiais, na produção de tapetes para automóveis e banheiros, pisos antiderrapantes, adesivos, cestos de lixos, etc. Do mesmo modo, os pneus descartados podem ser aproveitados, em conjunto com xisto betuminoso, na produção de óleo e gás, por meio do processo desenvolvido pela Petrobrás de São Mateus do Sul, PR, que também produz o óleo extensor AR-5, resíduo do óleo de xisto, estudado no presente trabalho (FAXINA, 2002).

As misturas compostas com asfalto modificado e borracha granulada reciclada de pneus usados, além de apresentarem excepcionais propriedades físicas, químicas, físico-químicas e reológicas, ainda contribuem para minimizar os problemas referentes ao meio ambiente devido o consumo dos pneus usados, materiais extremamente agressivos ao meio ambiente e com durações de vida expectáveis ordem de mil anos (SOUSA et al, 2000).

Apesar de possuir custos iniciais superiores em relação às misturas convencionais, as misturas com asfalto-borracha podem ter menores espessuras da camada de revestimento, assim como prolongar a vida útil do pavimento (GRECO, 2004).

2.3.2 Histórico

Durante muitos anos, engenheiros e químicos trabalharam misturando borracha natural (látex) e borracha sintética (polímeros) em ligantes asfálticos na tentativa de melhorar as suas propriedades elásticas. Mas é só na década de 40 que se iniciou a história da adição de borracha de pneus reciclada em materiais para pavimentação asfáltica com a Companhia de Reciclagem de Borracha, U.S. Rubber Reclaiming Company, que introduziu no mercado um produto composto de material asfáltico e borracha desvulcanizada reciclada, denominado Ramflex (ODA, 2000).

A fabricação de asfalto modificado com a incorporação de borracha granulada reciclada de pneu teve origem em 1960 no Estado do Arizona/EUA com estudos e experiências realizadas

pelo Engº Charles H. McDonald. Dentre suas principais aplicações podem ser citadas a conservação corretiva periódica mas selagem de fissuras e juntas, os tratamentos superficiais e os concretos asfálticos usinados a quente (CAMPO et al., 2000). Em 1963, este procedimento foi oficialmente reconhecido como “Técnica de Reparação de Remendos” pelo Departamento de Transportes do Arizona, ADOT – *Arizona Department of Transportation*, que foi incorporado às especificações de serviço.

O ligante asfalto-borracha utilizado para aplicação na selagem de trincas era inicialmente aplicado manualmente. Somente a partir de 1970 é que se obteve sucesso com a distribuição do ligante modificado com borracha de forma mecânica. A partir daí, deu-se início então à execução de alguns tipos de tratamento superficiais simples e duplos utilizando como ligante o asfalto-borracha. Em 1975, pela primeira vez, foram empregados os ligantes asfálticos modificados com borracha na fabricação de misturas asfálticas usinadas a quente, tendo-se executado misturas de graduação densa, de graduação descontínua e de graduação aberta.

Atualmente, devido ao pleno conhecimento e domínio total das técnicas de formulação, usinagem e execução, a preferência nos EUA para constituição das camadas de desgaste tem recaído nas misturas de graduação aberta; já o Departamento de Transportes da Califórnia tem aplicado tanto misturas de graduação densa como também descontínua e abertas (Campos et al., 2000).

Em 1991, a Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície nos EUA estabeleceu quantidades mínimas para utilização de asfalto modificado com borracha de pneu. A exigência de utilização mínima de pavimento asfáltico contendo borracha reciclada como uma porcentagem do material asfáltico tinha como finalidade tentar diminuir o problema ambiental provocado pelos pneus descartados (HANSON et al, 1994).

Na Europa, as pesquisas referentes à incorporação de borracha ao cimento asfáltico também começaram na década de 1960. Na França, a incorporação de borracha ao cimento asfáltico iniciou-se em 1981, pela empresa Beugnet. No processo desenvolvido por esta empresa, a borracha moída de pneu era adicionada ao cimento asfáltico à temperatura de 200º C, empregando óleo extensor. A proporção de borracha utilizada variava de 10 a 30% e a de óleo entre 3 a 15% em relação ao peso do cimento asfáltico (FAXINA, 2002).

Uma das principais utilizações do asfalto-borracha consiste na recuperação de revestimentos degradados com aplicação de misturas densas ou de graduações descontínuas em trechos entregues às concessionárias privadas nos estados de São Paulo, Rio Grande do Sul e Paraná. (Severo et al., 2003).

O CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), segundo a resolução de nº258/99, de 26 de agosto de 1999, determina os prazos para que as indústrias de pneumáticos e importadores façam a coleta e dêem destino final dos pneus descartados de forma ambientalmente adequada. Dessa forma, essa regulamentação proporcionou incentivos para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas a novos estudos da reciclagem de pneus tanto para pavimentação quanto para outros fins.

Outra iniciativa do Poder Legislativo que cabe ressaltar é o projeto de lei nº 133 /2004, da Deputada Estadual do estado do Paraná Cida Borghetti, referente à destinação de pneumáticos inservíveis para a produção de misturas asfálticas, prevendo em seu artigo segundo...

“Art. 2º Os pneumáticos recolhidos deverão ser destinados à pavimentação asfáltica, em processo úmido ou em processo seco, na proporção mínima de 80% (oitenta por cento) do total de pneumáticos recolhidos, observadas as quantidades e os prazos fixados pela Resolução do CONAMA nº 258/1999.”

Cimino (2004) analisou, em seu estudo, os procedimentos e as tecnologias que vêm sendo adotadas para gerenciar os pneumáticos inservíveis no território nacional, após a instituição da Resolução CONAMA nº 258/99. Os dados e as informações coletadas mostraram que as metas vêm sendo atingidas tanto no setor produtivo quanto pelo setor de importação de pneumáticos. Para o tratamento e a disposição final desses resíduos, foram identificadas soluções que visam à geração de energia por meio de co-processamento e pirólise de pneus inservíveis triturados.

No Brasil, o estudo sobre o asfalto-borracha foi iniciada nas pesquisas de LEITE (1999) e ODA (2000). Além das pesquisas realizadas no CENPES/Petrobrás, pode-se citar trabalhos considerados importantes para o desenvolvimento da tecnologia que vem sendo empregada na modificação dos ligantes asfálticos convencionais com borracha moída de pneu, como, por

exemplo, Momm & Salini (2000), Severo et al. (2003), Leite et al. (2003), Specht & Ceratti (2003), Barros & Vasconcelos (2003), Pinheiro & Soares (2003), Dantas Neto (2004), etc. O quadro 01 apresenta uma relação de alguns trechos executados com ligantes asfálticos modificados com borracha no Brasil.

Quadro 01: Relação de alguns serviços executados com asfalto borracha no Brasil

Ano da realização da obra	Extensão (m)	Concessionárias	Localização
2001	725	Univias/RS	BR/116-RS, entre Guaíba e Camaquã
2001	7.321	Rodonorte/PR	PR/090, entre Piraí do Sul e Ventania
2002	5.405	Rodonorte/PR	BR/376-PR, entre Califórnia e Apucarana
2002	1.200	Intervias/SP	SP/330, Via Anhanguera em Araras
2002	1.180	Rodonorte/PR	BR/277-PR, travessia de Campo Largo
2002	700	Ecovias/SP	SP/150, Via Anchieta
2002	970	Viapar/PR	BR/376-PR, entre Maringá e Paranavaí
2002	1.500	Rod. das Cataratas/PR	BR/277-PR, trevo em Capitão L. Marques
2002	500	Pref. de Curitiba/PR	Rua David Tows – Xaxim
2002	650	Viapar/PR	BR/376-PR, entre Mandaguari e Marialva
2002	5.000	Ecovia /PR	BR/277-PR, entre Curitiba e Paranaguá
2003	5.000	Univias/RS	BR/386-RS, entre Pouso Novo e Soledade
2003	9.000	SP/Vias/SP	SP/255, entre Avaré e Taquarituba
2003	2.457	Coviplan /RS	BR/386-RS, entre Soledade e Jarazinho
2003	6.000	Univias/RS	BR/386-RS, entre Pouso Novo e Soledade
2003	1.000	Vioeste/SP	SP/280 Pista Leste (Km 69/70)
2003	2.800	Caminhos do Paraná/PR	BR/373 e BR/277
2003	26.000	SP/Vias SP	SP 280 Castelo Branco
2003	186.000	Rodonorte/PR	Vários
2003	11.800	Econorte/PR	PR/323 entre Sertaneja e Divisa de SP/PR
2005	28.000	DER/PR	PR 092 – entre Wenceslau Braz e Quatiguá
2005	32.000	DER/PR	PR 092 Quatiguá a BR 153 Sto A.da Platina
2005	16.000	DEINFRA/SC	BR 470 – entre Campos Novos e Celso Ramos
2006	11.500	DER/PR	PR 170 – entre Porecatu e Porto Capem
Total	362.708		

Quadro adaptado de CORDEIRO (2006). As demais informações são oriundas de sites da internet e informações obtidas por telefone com empresas e órgãos responsáveis pelas rodovias.

Os primeiros trechos experimentais foram construídos em rodovias concessionadas como a BR-116 no Rio Grande do Sul. Atualmente, acredita-se que o Brasil possui mais de 1000 km de rodovias, entre federais e estaduais, ruas e avenidas municipais pavimentadas com a utilização de borracha reciclada de pneus (CORDEIRO, 2006). No Estado de São Paulo, acompanhadas pelas áreas técnicas da ARTESP, foram iniciados os serviços com asfalto borracha em abril de 2002, aplicado inicialmente na SP-330 Via Anhangüera, trecho concedido à Intervias. (SILVA JR, 2005).

2.3.3 Método de Obtenção do Asfalto-Borracha

Borrachas são polímeros termorrígidos. A borracha natural, no seu estado primário, consiste de cadeias de poliisopreno, com alto peso molecular. As borrachas ou elastômeros são classificados em duas grandes famílias: borracha natural, de nome químico poliisopreno, obtida a partir da coagulação do látex da árvore *Hévea Brasiliensis* e as borrachas sintéticas, que são obtidas a partir do petróleo ou hulha (CORDEIRO, 2006).

A composição da borracha utilizada em pneu varia bastante, mas consiste essencialmente de borracha natural, borracha estireno-butadieno e negro de fumo. Para o reaproveitamento da borracha de pneu há antes do processo de moagem a necessidade de se retirar o aço e as fibras. A moagem pode ser mecânica, à temperatura ambiente, ou criogênica, à temperatura abaixo da temperatura de transição vítrea dos elastômeros presentes nos pneus (LEITE, 1999).

Existem quatro métodos para trituração da borracha de pneu descartado. O processo “*crackermill*” realizado em temperatura ambiente, gera partículas irregulares com grande área superficial, com tamanho variando de 4,8 a 0,42mm. O processo “*granulator*” executado a temperatura ambiente, fornece partículas de forma cúbica e uniforme com pequena área superficial, com tamanhos variando de 9,5 a 2,0mm. O processo “*micromill*” também realizado em temperatura ambiente, gera partículas finas, com tamanho variando de 0,42 a 0,075mm. O processo “*cryogenic*” baseia-se na imersão da borracha em nitrogênio líquido (-90 a -200°C), sendo que abaixo de temperaturas de -60°C a borracha se torna um material frágil de fácil trituração (FAXINA, 2002).

O componente negro de fumo atua melhorando as propriedades mecânicas da borracha empregada na fabricação dos pneus, além de ser uma espécie de agente antioxidante na presença da irradiação ultravioleta. (DANTAS NETO, 2004). A proporção entre os diferentes componentes no pneu pode variar de um fabricante para o outro em função das características do pneu e/ou das exigências do mercado automotivo.

Segundo Bertollo (2002) os negros-de-fumo (responsáveis pela cor dos pneus) ocupam um lugar preponderante na fabricação dos pneus, pois conferem às misturas de borracha propriedades mecânicas que permitem tornar 10 vezes maior sua resistência mecânica ao desgaste.

São dois os elementos básicos para produção do ligante asfalto-borracha, a saber: o cimento asfáltico e a borracha moída do pneu, podendo-se utilizar um óleo extensor com o objetivo de melhorar a compatibilidade entre esses dois componentes. A qualidade do ligante asfalto-borracha está atrelada principalmente ao tipo, tamanho e teor das partículas de borracha.

O bom desempenho da borracha como melhorador das propriedades do CAP depende da compatibilidade entre eles. O tipo e a quantidade de óleos aromáticos presentes no ligante desempenha um papel significativo na determinação desta compatibilidade. Para melhorar a compatibilidade entre o ligante e a borracha pode ser utilizado um óleo extensor de borracha, que ainda serve para diminuir a viscosidade do ligante asfalto-borracha. No entanto, deve-se ter um cuidado especial com a temperatura de reação, pois temperaturas elevadas podem provocar o envelhecimento precoce do CAP, mudando suas características (PINHEIRO et al. , 2003).

A borracha de pneu moída pode ser utilizada tanto como modificador do asfalto, quanto como agregado em misturas asfálticas. A incorporação da borracha de pneu moída às misturas asfálticas pode ser realizada de três formas: mediante processo úmido, processo seco e uma variação do processo úmido denominada de “Terminal Blend” (TAKALLOU & TAKALLOU, 2003). No “processo seco” as partículas de borracha são primeiramente adicionadas ao agregado mineral antes da adição do ligante betuminoso. No “processo úmido” as partículas de borracha moídas são misturadas ou incorporadas ao ligante asfáltico antes da adição do agregado mineral.

O asfalto-borracha produzido pela via úmida é resultado da combinação de um cimento asfáltico convencional, borracha granulada reciclada e outros aditivos, caso seja necessário. A borracha granulada de pneus deve ser misturada ao cimento asfáltico convencional suficientemente aquecido de forma a haver o amolecimento das partículas de borracha antes do uso. Os aditivos são normalmente óleos extensores, que visam melhorar a trabalhabilidade dos asfaltos-borracha ou melhorar a compatibilidade entre o ligante convencional e a borracha granulada.

Cabe ressaltar, que o processo de mistura do asfalto-borracha com os agregados minerais e a aplicação do concreto asfáltico são similares aos procedimentos adotados em misturas com ligantes convencionais, salvo em relação às temperaturas. Nos concretos asfálticos preparados com asfalto-borracha temperaturas de mistura e de compactação normalmente são mais elevadas em virtude da maior viscosidade do asfalto-borracha (ROSENO, 2005).

No processo úmido, o ligante asfáltico é aquecido a temperaturas ordem de 190°C, em um tanque de superaquecimento em condições herméticas, sendo em seguida, levado para um tanque de mistura apropriado. Nesse tanque ocorre adição da borracha moída ao ligante convencional, com período de mistura de 1 a 4 horas a uma determinada temperatura (VISSER & VERHAEGHE, 2000). O equipamento misturador deve possuir um sistema para controlar a temperatura e o tempo de reação de maneira constante e mais uniforme possível, além de um sistema de agitação que evite a segregação das partículas de borracha. A quantidade de borracha incorporada ao cimento asfáltico pelo processo úmido varia de 5 a 25% em peso em relação ao cimento asfáltico, geralmente com partículas inferiores a 2 mm (FAXINA, 2002).

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 (SPETCH, 2004).

A interação entre o ligante asfáltico e a borracha moída, no processo úmido, é classificada como uma reação. O grau de modificação do ligante depende de vários fatores, incluindo a granulometria, textura da borracha, proporção de ligante asfáltico e borracha, tempo e

temperatura de reação, compatibilidade com a borracha, a energia mecânica durante a mistura e reação, e o uso de aditivos (ODA, 2000).

Para Monm e Salini (2000), a borracha não é inerte e passa por mudanças durante o tempo em que permanece em contato com o cimento asfáltico. Este processo de modificação ocorre naturalmente durante o tempo em que a mistura é transportada (no caminhão) para o local da obra e até que a temperatura seja reduzida à temperatura ambiente. No laboratório é possível simular o feito do tempo pela colocação da mistura em uma estufa com 10°C abaixo da temperatura de mistura.

No processo seco, o agregado é aquecido a temperaturas de aproximadamente 200°C, quando então, a borracha é adicionada e processa-se a mistura por um tempo próximo de 15 segundos, ou até a formação de uma mistura homogênea agregado-borracha. Posteriormente é adicionado o ligante betuminoso a esta composição final por meio de processos convencionais de usinagem (VISSER & VERHAEGHE, 2000). Nesse processo se adiciona de 3 a 5% de borracha em relação à massa total de agregados minerais, com partículas de 1,6 a 6,4mm. A quantidade de borracha consumida nesse processo chega a ser 2 a 4 vezes maior que pelo processo úmido (FAXINA, 2002).

Segundo Mohammad et al. (2000), no processo seco as dimensões das partículas de borracha são superiores aquelas utilizadas no processo úmido. Do mesmo modo, a borracha granulada substitui uma parcela da mistura dos agregados minerais, funcionando como um material inerte. Segundo Faxina (2002), o processo seco é limitado à aplicação em revestimento asfáltico, enquanto que o processo úmido pode ser empregado em selagem de trincas, tratamentos superficiais, camadas de ligação e concreto asfáltico. Os produtos finais obtidos pelos dois processos são denominados de agregado-borracha quando obtido pelo processo seco e asfalto-borracha pelo processo úmido.

2.3.4 Interação Asfalto-Borracha

Ao se incorporar borracha moída ao ligante asfáltico de base, é produzido um ligante asfáltico modificado que apresenta propriedades diferentes daquelas do ligante asfáltico inicial. Durante o processamento do asfalto-borracha ocorrem alterações das propriedades do ligante

asfáltico em virtude das mudanças químicas e/ou físicas, em um processo denominado interação asfalto-borracha. O entendimento do fenômeno de interação entre o asfalto a borracha permite aos produtores do ligante asfalto-borracha ter maior controle sobre a qualidade do produto final (FAXINA, 2006).

Segundo Patriota (2004), os elastômeros ou borrachas são polímeros lineares amorfos que, quando submetidos ao processo de vulcanização, adquirem uma estrutura parcialmente reticulada que lhes confere propriedades elásticas. A vulcanização tem como resultado a transformação de um produto plástico, como é a borracha virgem, em outro elástico, como é a borracha vulcanizada.

O resultado da junção do asfalto e a borracha é um produto com partículas sólidas ou semi-sólidas dispersas na matriz asfáltica, entretanto, na maioria das vezes, os dois materiais não são quimicamente compatíveis. A borracha, por ser vulcanizada, durante a mistura como asfalto, não se funde, e desta maneira não se incorpora à sua estrutura polimérica. Portanto, não adquire estabilidade semelhante aos outros asfaltos modificados com polímeros virgens, resultando em um produto sujeito à separação (FAXINA, 2006).

Para Abdelrahman & Carpenter (1999), os dois principais mecanismos de interação que afetam as propriedades do asfalto-borracha durante sua produção são o inchamento das partículas e a degradação, que ocorre na forma de desvulcanização e despolimerização. Esses mecanismos ocorrem quando o asfalto-borracha é submetido a diferentes combinações de temperatura e tempo de interação.

Segundo Faxina (2006), o inchamento é um processo de difusão, e não um processo químico, que resulta do movimento do líquido para dentro da matriz do polímero. O solvente penetra nas partículas de borracha, proporcionando um aumento nas suas dimensões, até que a concentração de solvente seja uniforme e se estabilize. Para Billiter (1997), a desvulcanização é a quebra das ligações cruzadas enxofre-enxofre ou carbono-enxofre, que são formadas durante o processo de vulcanização na produção do pneu e a despolimerização corresponde à quebra das cadeias poliméricas (ligação carbono-carbono).

A despolimerização ocorre devido à completa digestão das partículas menores de borracha, enquanto que a desvulcanização produz o amolecimento das partículas de borracha de

maiores dimensões imersas no ligante e posterior inchamento. O processo de interação entre as partículas de borracha e o ligante asfáltico acompanha atividades de despolimerização e inchamento das partículas de borracha durante a mistura. Temperaturas elevadas induzem os processos de despolimerização e inchamento das partículas de borracha, enquanto que baixas temperaturas apenas contribuem para o processo de inchamento (LEITE et al, 2000).

Holleran & Reed (2000) descrevem um possível modelo para explicar o processo de interação entre as partículas de borracha e o ligante convencional. Segundo esses autores, os asfaltenos e as frações leves (óleos maltenos, resinas, etc) dos ligantes asfálticos convencionais interagem com as partículas de borracha formando uma película de gel sobre estas partículas, produzindo um inchamento. Segundo Dantes (2004), a absorção das frações leves do ligante convencional pelas partículas de borracha progride com o tempo sob elevadas temperaturas, causando um aumento da viscosidade do asfalto-borracha.

Segundo Leite (1999), na interação asfalto-borracha, a borracha incha devido à absorção de óleo formando um gel viscoso que resulta da redução da distância entre as partículas da borracha, aumentando a viscosidade. Para Stroup-Gardiner et al. (1993), a alteração do tamanho das partículas, reduzindo a distância entre elas, e o espessamento da fase líquida proporcionam o aumento da viscosidade do asfalto-borracha. Um ligante modificado com 15% de borracha pode ter sua viscosidade original, a altas temperaturas, aumentada em 10 vezes ou mais.

Para temperatura bastante elevada, tempo de processamento muito longo e nível de cisalhamento muito alto, o inchamento continuará até o ponto de degradação da borracha, que ficará dispersa no ligante asfáltico, podendo dessa maneira ocorrer uma redução da viscosidade. (ABDELRAHMAN & CARPENTER, 1999).

Para os mesmos autores, a despolimerização e a desvulcanização reduzem as moléculas do ligante asfáltico a moléculas de menor peso molecular e esse processo ocorre no início da interação, para temperaturas altas de processamento, e continuam se desenvolvendo até a destruição total das moléculas poliméricas, caso o ligante seja exposto a temperaturas altas por um tempo longo. Para Billiter et al (1997), a despolimerização e a desvulcanização provocam uma redução parcial da elasticidade da borracha, permitindo a digestão do polímero

pelo ligante asfáltico, produzindo um produto mais homogêneo e que apresenta melhores propriedades de compactação e menor tendência de separação.

O tipo de borracha utilizada (sintética ou natural) afeta as propriedades do asfalto-borracha. Em relação à recuperação elástica do asfalto-borracha, a borracha natural é melhor que a borracha sintética, porém a borracha sintética se mostra menos sensível em relação aos efeitos de tempo e temperatura de processamento.

É desejável que o ligante asfáltico empregado no processo úmido contenha uma concentração relativamente alta de frações leves, que pode ser obtida pela adição de óleos extensores ou pela seleção de ligantes menos consistentes (FAXINA, 2006). A utilização de óleos extensores para compensar o aumento da viscosidade que é provocada pelas altas concentrações de borracha é bem sucedida. Os óleos extensores têm por finalidade compensar o acréscimo de viscosidade e fornecer componentes aromáticos em quantidade suficiente para a incorporação efetiva da borracha ao ligante asfáltico (STROUP-DARDINER et al., 1993).

Atualmente ainda não existe no Brasil uma especificação técnica na área federal para produção e emprego do asfalto borracha. Algumas empresas brasileiras possuem normas próprias ou seguem normas internacionais. O Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR), em 09 de maio de 2005, publicou a primeira especificação de serviço de pavimentação com asfalto-borracha no Brasil (ES-P 28/05). No mesmo ano, o Departamento Estadual de Infra-Estrutura do Estado de Santa Catarina (DEINFRA-SC) publicou sua especificação (ES-P 05B/05); do mesmo modo, em fevereiro de 2007 foi divulgada a especificação técnica (ET-DE-P00/030) do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP).

As especificações prescrevem as exigências que o asfalto borracha deverá apresentar para ser empregado na pavimentação. A Tabela 01 mostra as características a serem obedecidas e os limites exigidos para os cimentos asfálticos e as misturas asfálticas modificadas com asfalto-borracha em camadas de rolamento segundo a especificação do DER/PR.

Tabela 2.1: Exigências da norma ES-P 28/05 do DER/PR para asfalto-borracha em camadas de rolamento.

Cimento Asfáltico e misturas asfálticas modificados com adição de borracha de pneumáticos			
Ensaio	Característica	Exigência	
		Mínima	Máxima
DNER-ME 003/94	Penetração, 100g, 5s, 25°C, 0,1mm	25	75
DNER-ME 148/94	Ponto de Fulgor, °C	235	-
DNER-ME 193/96	Densidade Relativa, 25°C	1,00	1,05
ABNT-NBR 6560/00	Ponto de amolecimento, °C	55	-
NLT 329/91	Recuperação elástica por torção, %	50	-
ABNT-NBR 14736/01	Efeito do calor do ar:		
	variação de massa, %	-	1
	percentagem de penetração original	50	-
ASTM- 2196/99	Viscosidade Brookfield à 175°C, cP	800	2500
DNER-ME 043/95	Percentagens de vazios, %	3	5
DNER-ME 043/96	Relação betume/vazios, %	70	82
DNER-ME 043/97	Estabilidade, mínima	850 kgf	-
DNER-ME 043/98	Fluência, mm	2,0	4,1
DNER-ME 138/94	Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C, MPa	0,65 (min)	

As três especificações citadas anteriormente, no que se refere às características do ligante asfáltico, exibem valores próximos, exceto, no que diz respeito às normas para realização dos ensaios, pois o DER/SP indica a utilização de normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), enquanto as outras duas referenciam as normas do DNER. Como exemplo pode-se citar as normas utilizadas pelo DER/SP:

- Penetração (NBR 6576);
- Ponto de fulgor (NBR 11341);
- Densidade relativa (NBR 6296);
- Viscosidade Brookfield (NBR 15235);
- Estabilidade (NBR 12891); e
- Fluência (NBR 12892).

Dentro desse mesmo contexto, pode-se citar uma variação entre as exigências indicadas pelas especificações quando se referem às características dos ligantes asfálticos, a viscosidade Brookfield, que apresenta uma pequena variação na especificação do DER/SP, que apresenta

valores entre 800 – 2000. Quanto às misturas asfálticas, os valores distintos de cada especificação estão apresentados na Tabela 02.

Tabela 2.2: Diferenças apresentadas pelas especificações de asfalto-borracha.

	DER/PR	DEINFRA/SC	DER/SP
Características	Camada de rolamento	Camada de rolamento	Camada de rolamento
Porcentagem de vazios (%)	3 – 5	3 – 5	4
Relação betume/vazios (%)	70-82	70-82	65-80
Estabilidade, mínima (Kgf)	850 Kgf	800 Kgf	800 Kgf
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C (MPa)	0,65 (mín)	1,10 (máx)	0,8 (mín)

2.3.5 Óleo extensor de borracha

O óleo extensor de borracha AR-5 é um produto desenvolvido pela Petrobras S. A., em São Mateus do Sul, PR. Corresponde a uma fração pesada do óleo de xisto, obtida industrialmente através do fracionamento a vácuo do óleo bruto de xisto. É rico em maltenos e com baixo teor de asfaltenos e, devido à ocorrência de até 36% em peso de óleos aromáticos, presta-se bem, segundo o produtor, como óleo extensor de borracha.

O papel de um óleo extensor é facilitar a incorporação da borracha moída ao cimento asfáltico, resultando um ligante asfalto-borracha de melhor qualidade. A reação entre a borracha e o cimento asfáltico acontece mediante a absorção de óleos aromáticos do cimento asfáltico à cadeia polimérica da borracha natural ou sintética. O óleo extensor, produto rico em óleos aromáticos, tem como função facilitar a incorporação da borracha moída ao cimento asfáltico, propiciando um ligante asfalto-borracha de melhor qualidade. A adição do óleo extensor pode recompor a composição química do cimento asfáltico, proporcionando ao ligante asfáltico uma viscosidade aceitável para uso na pavimentação. (FAXINA, 2002).

A utilização de óleos extensores para compensar o aumento da viscosidade que é provocada pelas altas concentrações de borracha é bem sucedida. Os óleos extensores têm por finalidade compensar o acréscimo de viscosidade e fornecer componentes aromáticos em quantidade

suficiente para a incorporação efetiva da borracha ao ligante asfáltico (STROUP-DARDINER et al., 1993).

A adição do resíduo de óleo de xisto no ligante asfalto-borracha proporciona, nas temperaturas de usinagem e compactação, uma redução da viscosidade do ligante, refletindo numa melhor trabalhabilidade das misturas asfálticas. Esse mesmo modificador apresenta efeito positivo sobre algumas propriedades e parâmetros relacionados com a resistência à formação de trincas por fadiga devido ao tráfego, e também nas que indicam resistência à formação de trincas térmicas; entretanto, o resíduo de óleo de xisto apresenta efeito negativo sobre todas as propriedades e parâmetros que indicam resistência à deformação permanente da misturas asfálticas (FAXINA, 2006).

O mesmo autor destaca que embora algumas propriedades sejam melhoradas com a adição do resíduo do óleo de xisto, e outras não, o ganho na trabalhabilidade da mistura asfáltica contribui para a indicação do resíduo do óleo de xisto como óleo extensor, em comparação com a possível perda de desempenho nas misturas asfálticas, sinalizada por algumas propriedades e parâmetros avaliados dos ligantes asfálticos.

Os efeitos da borracha e do óleo, em alguns casos, são opostos, o que sugere que combinações adequadas dos dois modificadores podem ser produzidas, com a finalidade de alcançar os níveis desejados para as propriedades do ligante asfalto-borracha, pois, nas situações em que o efeito do óleo extensor é negativo, a borracha pode atuar no sentido de contrabalançar esse efeito, como por exemplo, nas propriedades e parâmetros relacionados com a deformação permanente.

2.4 Misturas Asfálticas

As misturas asfálticas têm como principal exigência atender características como: estabilidade, flexibilidade, durabilidade e resistência à derrapagem. A estabilidade é a característica na qual a mistura resiste à formação de deformações permanentes quando submetida à ação de cargas e pode ser influenciada por fatores como o teor e tipo de cimento asfáltico, forma e textura dos agregados, entre outros. A propriedade de flexibilidade

proporciona à mistura resistência à fadiga, sendo influenciada pela quantidade e tipo do ligante asfáltico e temperatura. Já a durabilidade permite que a mistura resista à desintegração provocada pela ação do tráfego e das intempéries, podendo ser afetada pela qualidade dos agregados minerais, volume de vazios da mistura, afinidade asfalto / agregado, etc. E por fim, a resistência à derrapagem confere resistência ao deslizamento dos pneus dos veículos, sendo que, para se ter um bom atrito superficial é importante o cuidado com a distribuição granulométrica do agregado e teor de ligante.

Uma mistura asfáltica pode ser definida como uma mistura de materiais granulares, material de enchimento e ligante asfáltico em proporções pré-estabelecidas. Segundo Patriota (2004), na mistura asfáltica o ligante atua como agente aglutinante, desenvolvendo uma ligação entre os agregados, permitindo que o pavimento resista à ação mecânica de desagregação ocasionada pelas cargas geradas pelo tráfego e, como impermeabilizante, garantindo resistência à ação da água.

A mistura asfáltica é um sistema formado por três fases: agregado, asfalto e ar. As propriedades apresentadas pelas misturas asfálticas dependem de sua consideração como um todo, porém sofrem a influência direta das propriedades individuais dos materiais. Os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) são adesivos termoplásticos, que podem ser manuseados a quente para aplicação em pavimentos e que assumem um comportamento visco-elástico a temperaturas próximas às de serviço (FURLAN, 2006).

De acordo com Lima (2003), a durabilidade de uma mistura asfáltica pode ser definida como a sua habilidade em manter as propriedades reológicas, coesão e adesão, ao longo do tempo de serviço. Entre os principais fatores que afetam a durabilidade de um revestimento asfáltico, encontram-se os endurecimentos oxidativo, evaporativo e exsudativo.

A qualidade das misturas asfálticas pode ser melhorada com a adição de modificadores de ligante, visto que, o comportamento visco-elástico do ligante é, em grande parte, o controlador do desempenho de uma via, influenciando diretamente no surgimento de trincas por fadiga e deformação permanente, que são os principais defeitos dos pavimentos brasileiros (PINHEIRO, 2004).

2.4.1 Misturas asfálticas com asfalto-borracha

Segundo a especificação do DER/PR (2005), o concreto asfáltico usinado a quente com asfalto borracha é a mistura executada a quente em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado mineral graduado, material de enchimento (filer) e ligante asfáltico modificado com adição de pó de borracha de pneumático, usinada, espalhada e compactada a quente, sobre superfície previamente preparada.

Para Salini (1998), o reaproveitamento da borracha de pneus, com o objetivo de incorporá-la ao pavimento asfáltico possui, na Infra-Estrutura Viária, uma posição de destaque. Dentre as vantagens da reciclagem da borracha de pneus destacam-se:

- A solução do problema ambiental dos pneus descartados (poluição);
- A facilidade de transporte do resíduo (carcaça);
- A ausência de risco de manuseio para aos operadores;
- O custo resume-se ao transporte dos locais onde foram gerados ao ponto de utilização;
- As dimensões geométricas padronizadas, o que facilita o desenvolvimento equipamentos de desmonte e trituração, entre outros.

No entanto, para Oda (2000), os objetivos da adição da borracha de pneu usando ligantes asfálticos e misturas asfálticas então relacionados com a minimização do problema de disposição de pneus usados, pois em aterros sanitários ocupam muito espaço e também podem causar problemas ambiental e de saúde pública. Outro fator é a melhora no desempenho dos pavimentos mediante aumento de rigidez a elevadas temperaturas (reduzindo a deformação permanente nas trilhas de rodas); aumento na flexibilidade (retardando o aparecimento de trincas) e aumento da impermeabilidade proporcionada pelos revestimentos asfálticos.

Campos et al. (2000) citam o fato de as misturas asfálticas confeccionadas com asfalto-borracha apresentarem uma maior resistência à derrapagem do que as misturas com ligantes convencionais. De acordo com esses autores isso ocorre porque a borracha reciclada de pneus tem cerca de 35 % de “negro de fumo”, que é responsável por proporcionar uma microtextura mais áspera.

Para Galvão (2001), nos últimos anos, excelentes resultados têm sido obtidos na aplicação, em larga escala, de sistemas poliméricos que apresentam elevadas recuperação elástica e resistência mecânica à tração. Isto não é de surpreender, visto que estas propriedades são essenciais para determinados materiais, como os pneus dos veículos que permanecem resistentes e flexíveis em toda a gama de tensões e temperaturas a que o pavimento é submetido.

2.4.1.2 Propriedades das misturas com asfalto-borracha

Em relação à estabilidade e fluência, estudos mostram que misturas com asfalto-borracha apresentam diminuição da estabilidade em relação às misturas de referência, sendo que a redução pode chegar a 60% dos valores obtidos nas misturas convencionais. Nota-se que o valor da fluência aumenta, assim como ocorre o aumento do volume de vazios, vazios do agregado mineral, entretanto, não encontra-se variação nos valores da densidade máxima da mistura (HANSON et al., 2004). Esses autores também afirmam que a distribuição granulométrica da borracha influencia os valores de estabilidade e fluência das misturas, sendo que, misturas com partículas grossas de borracha apresentam valores de estabilidade Marshall 49% menores e valores de fluência Marshall 50% maiores que os obtidos para uma mistura com a adição de partículas finas de borracha.

Quanto ao módulo de resiliência, estudos realizados por Leite et al. (2000) mostraram uma redução de aproximadamente 50% nos valores dos módulos de misturas empregando asfalto-borracha, em relação a misturas convencionais (com CAP 20).

Faxina (2002), mediante estudos com a utilização de asfalto convencional e combinação de asfalto modificado (asfalto + borracha + óleo extensor), mostra que a resistência à tração na temperatura de 25°C diminui significativamente para as misturas modificadas (aproximadamente 50%) em relação às convencionais. Em relação ao módulo de resiliência, a mistura convencional atingiu valores até 3 vezes maiores que as com asfaltos modificados, indicando dessa maneira, que a adição de borracha e de óleo extensor produzem misturas mais flexíveis.

A redução significativa na resistência à tração encontrada por Pinheiro et al. (2003) nas misturas com asfalto-borracha também foi verificada por Faxina (2002), que aponta valores de RT de mistura asfalto-borracha 40% menores que o valor de referência. Outros estudos chegaram a conclusões semelhantes também para misturas feitas com asfalto-borracha pelo processo úmido (Momm e Salini, 2000; Specht et al., 2003).

Pinheiro et al.(2003) compararam, em sua pesquisa, alguns parâmetros mecânicos de misturas asfálticas com incorporação do ligante asfalto-borracha com 20% de borracha e 20% de óleo extensor em relação à mistura convencional (CAP 50/60). Os resultados mostraram que as misturas com borracha apresentam valores menores de resistência à tração e de módulo de resiliência e uma maior vida de fadiga para baixos níveis de tensão, quando comparados a uma mistura convencional. Os autores acreditam que a alta viscosidade e o elevado teor do ligante asfalto-borracha são os prováveis motivos da redução do intertravamento entre os agregados e conseqüente redução dos valores dos parâmetros analisados, enquanto que o melhor desempenho à fadiga para baixas tensões deve-se, provavelmente, à capacidade do ligante modificado por borracha em impedir a propagação de trincas.

Nos estudos de Lemes (2004) foi avaliado o desempenho mecânico de misturas asfálticas densas submetidas ao processo de envelhecimento em curto prazo. A avaliação foi realizada com três tipos de cimentos asfálticos: CAP 20 (puro), cimento asfáltico modificado com polímero SBS (*Styrene Butadiene Styren*) e cimento asfáltico modificado com borracha reciclada de pneu (BRP). Os resultados, referentes ao ensaio de fluência, mostraram que as misturas modificadas apresentaram deformação total menor que as convencionais, no entanto, não foi possível, através do ensaio de módulo de resiliência, avaliar a influência do processo de envelhecimento na misturas modificadas com borracha.

Santos (2005), em seu estudo, avaliou o comportamento à fadiga de algumas misturas asfálticas modificadas com polímero SBS e borracha moída de pneu. Os resultados indicaram que, na maioria dos casos, as misturas com CAP 20 + SBS apresentaram melhor desempenho (maior vida de fadiga), seguida da mistura com adição de 20% de borracha e, por último, da mistura de referência.

Segundo Oda et al. (2005), ao analisar o primeiro trecho experimental urbano com asfalto-borracha construído em dezembro de 2004 na cidade de Salvador, Bahia, utilizado em uma

mistura asfáltica tipo SMA (Stone Matrix Asphalt) sem fibras, mostram que o revestimento com asfalto-borracha conferiu ganhos de atrito e drenabilidade superficial, garantindo, além disso, boa visibilidade e redução da aquaplanagem em dias de chuva, tornando o pavimento mais seguro e confortável.

Além de defeitos na superfície do pavimento, o ruído também é um problema para os usuários das vias. Quando em excesso é um dos problemas ambientais que afetam o bem estar da comunidade e, por isso, têm-se estudado misturas especiais que proporcionem melhoras no desempenho acústico das rodovias. Tais misturas podem ser *stone matrix asphalt* (SMA), camada porosa de atrito (CPA) ou *gap-graded* (granulometria descontínua), feitas com ligantes asfálticos especiais, modificados por polímeros ou por borracha de pneu moído (NASCIMENTO, et al. 2005). O mesmo autor realizou estudos em trechos de rodovias de São Paulo e concluiu que a utilização de misturas asfálticas tipo *gap-graded* (descontínuas), com asfalto-borracha, tornaram os pavimentos mais silenciosos e seguros quando comparados a pavimentos revestidos com misturas asfálticas densas convencionais.

2.5 Ensaios de Propriedades Mecânicas

O objetivo dos ensaios de laboratório é proporcionar o entendimento do comportamento mecânico dos materiais em campo, considerando que ensaios “in situ”, muitas vezes, são de difícil realização. Os ensaios têm a finalidade de reproduzir, o mais próximo possível, as características e situações de campo, isto é, temperatura, grau de compactação, tempo de carregamento, níveis de tensões, entre outros. Porém essas condições, em campo, sofrem constantes mudanças, tornando, dessa maneira, as decisões referentes às condições de ensaio uma tarefa não trivial.

A caracterização mecânica das misturas asfálticas utilizadas no presente estudo foram realizadas segundo ensaios de Resistência à Tração por compressão diametral (DNER-ME 138/94), Módulo de Resiliência (DNER-ME 133/94 e ASTM D 4123, 1982) e resistência ao dano por umidade induzida (ASTM D 4867).

2.5.1 Ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral

O ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral (RT) foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro, em 1943, para avaliar misturas de cimento Portland e posteriormente passou a ser utilizado também para misturas asfálticas (MEDINA & MOTTA, 2005).

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral permite a determinação da resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas, e consiste na aplicação progressiva de uma carga quase estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas até a ruptura, por separação das duas metades do corpo-de-prova segundo o plano diametral vertical, conforme Figura 1.1.

Figura 2.1: Ensaio de tração indireta em amostra cilíndrica.

No ensaio de RT à compressão diametral, a força F aplicada nos corpos-de-prova se dá através de frisos metálicos, produzindo tensão de tração ao longo do diâmetro vertical solicitado (perpendicular a ele) até que ela se iguale a tensão de tração admissível ($\sigma_t = \sigma_{adm}$) provocando o rompimento do corpo-de-prova.

O método de ensaio ME 138/94 apresenta o procedimento para a realização deste ensaio. Em linhas gerais, deve ser realizado da seguinte maneira:

- Mede-se altura (H) e diâmetro do corpo-de-prova em três posições e utiliza-se a média das três leituras realizadas;

- Acomoda-se o corpo-de-prova em local apropriado para a obtenção da temperatura especificada para o ensaio;
- Monta-se o corpo de prova no dispositivo de ruptura, acomodando-o sobre e sob os frisos de aplicação de carga;
- Ajusta-se o prato da prensa até que seja obtida uma leve compressão, capaz de manter em posição o corpo-de-prova; e
- Aplica-se a carga progressivamente, com uma velocidade de deslocamento do prato de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que se dê a ruptura, por separação das duas metades do corpo-de-prova, segundo o plano diametral vertical; com o valor de carga de ruptura (F) obtido, calcula-se a resistência à tração do corpo-de-prova segundo a expressão 2.1:

$$RT = \frac{2F}{\pi dh} \quad (2.1)$$

onde:

RT: resistência à tração indireta, MPa;

F: carga de ruptura, N;

d: diâmetro do corpo-de-prova, cm;

h: altura do corpo-de-prova, cm.

2.5.2 Módulo de Resiliência por compressão diametral dinâmica

O ensaio para a determinação do módulo de resiliência (MR) visa simular o comportamento mecânico da mistura asfáltica, na zona onde ocorrem deformações de tração, responsáveis pela fadiga da camada (MOURÃO, 2003). Dentre as diversas maneiras de determinação do módulo de resiliência, a mais comum no Brasil para misturas asfálticas é aquela em que o corpo-de-prova é submetido à tração indireta por compressão diametral sob ação de cargas dinâmicas (ou repetidas).

De acordo com DNER (1994), o módulo de resiliência de misturas asfálticas é a relação entre a tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica e a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada, para uma dada temperatura. O ensaio é realizado por compressão diametral com frisos de carga, com

aplicação de carga durante 0,1 s e repouso de 0,9 s. A importância deste ensaio está atrelada ao fato do mesmo ser utilizado para o cálculo de tensões e deformações atuantes nos pavimentos e para seu dimensionamento. Entretanto, a norma brasileira não distingue deformação específica instantânea de deformação específica total, como a norma americana (ASTM D 4123, 1982).

O módulo de resiliência das misturas asfálticas foi obtida mediante ensaio de compressão diametral dinâmica, ou ensaio de tração indireta, realizado conforme a norma DNER-ME 133/94 (DNER, 1994), a qual determina o cálculo do módulo de resiliência de acordo com a fórmula 2.2:

$$Mr = \frac{F}{100\Delta h} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (2.2)$$

em que:

Mr = é o módulo de resiliência, em MPa;

F é a carga vertical repetida aplicada diametralmente ao corpo de prova, em N;

Δ é o deslocamento (correspondente ao deslocamento elástico ou resiliente sofrido pelo corpo de prova, em direção perpendicular à aplicada da carga), em mm;

h é a altura do corpo-de-prova, em mm;

μ é o coeficiente de Poisson (utilizado 0,35).

O DNER ME 133/94 normaliza a determinação do módulo de resiliência total, enquanto outras normas (ASTM D4123, ASSHTO TP-31, e a pesquisa 1-28 do NCHRP) mencionam dois módulos de resiliência, chamado total e instantâneo. O método da norma brasileira só considera as deformações totais e, por isso, só define o módulo total. Para a norma da AASHTO, o deslocamento total é obtido pela diferença entre o deslocamento máximo do ciclo de carregamento e o deslocamento registrado no final do ciclo, conforme mostra a Figura 2.2 .

Figura 2.2. Curva de deformação x tempo, para um ciclo de carregamento.
 FONTE: AASHTO (1994) - AASHTO TP31-94.

O módulo de resiliência total (MR_t) é calculado a partir da deformação resiliente total (Δ_{Total}), que é a junção da deformação que é recuperada instantaneamente e a deformação recuperada durante a fase do ciclo em que o corpo-de-prova não está sob carregamento, ou seja, em descanso. A deformação total é a diferença entre a deformação máxima do ciclo de carregamento e a deformação final, determinada pela média dos valores de deformação dos últimos 75% do ciclo.

O módulo de resiliência instantâneo é calculado com a deformação recuperada instantaneamente na fase de descarregamento do ciclo, não incluindo a deformação recuperada ao longo do tempo. Portanto, a deformação instantânea (MR_i) é a diferença entre a deformação máxima atingida pelo corpo-de-prova num ciclo e a deformação na base do trecho de descarregamento da curva de deformação. Essa deformação é determinada a partir do ajuste de duas regressões lineares, uma na porção de descarregamento (reta 1) e a outra na porção de repouso (reta 2).

A reta 1 baseia-se em todos os pontos localizados depois do pico da curva e antes da recuperação de 75% da deformação máxima sofrida. A outra reta tem como base os pontos correspondentes aos últimos 0,75s do ciclo. Estas duas retas de regressão se interceptam, e

partindo-se desse ponto com uma reta vertical em direção à curva obtém-se o ponto que delimita o deslocamento resiliente instantâneo.

Vale ressaltar que para o NCHRP, o deslocamento total é obtido pela diferença entre o deslocamento máximo do ciclo de carregamento e a média dos deslocamentos registrados no intervalo de 85 a 95% da porção de repouso do ciclo. Já a determinação do MRi é mais complexa devido à utilização de regressões hiperbólicas, conforme mostra a Figura 2.3, objetivando minimizar dispersões na determinação dos deslocamentos instantâneos, no entanto, apresenta princípio similar ao anterior.

Figura 2.3. Curva de deformação para um ciclo de carregamento (NCHRP).
FONTE: FURLAN (2006)

O cálculo do deslocamento resiliente instantâneo é feito pela diferença entre o deslocamento máximo e uma ponta na região da porção da curva, compreendida por uma hipérbole, que é definido pela intersecção entre a reta de regressão que reproduz o descarregamento e uma reta de regressão que tangencia uma hipérbole que assimila a porção final da recuperação no tempo $t=5s$.

Também é possível avaliar outros parâmetros por meio do ensaio de módulo de resiliência: recuperação retardada e atraso. A recuperação retardada (RR), definida por Furlan, (2006), corresponde à recuperação no período de repouso e é indiretamente relacionada com a viscoelasticidade do material. Através do valor do RR verifica-se alterações de comportamento das misturas asfálticas quanto à forma resiliente, da mesma maneira que pode-se constatar se um

aumento do valor do módulo de resiliência implicou em misturas asfálticas mais elásticas ou mais viscosas. Calcula-se esse parâmetro pela expressão 2.3 e 2.4.

$$RR = \frac{(MR_i - MR_t)}{MR_i} \times 100 \quad (2.3)$$

$$RR = \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_i}{\varepsilon_T} \times 100 \quad (2.4)$$

onde:

RR= recuperação retardada, em %;

MR_i = módulo instantâneo, em MPa;

MR_t = módulo total, em MPa;

σ = tensão aplicada;

ε_T = deformação total;

ε_i = deformação elástica instantânea.

2.5.3 Dano por Umidade Induzida

Geralmente o fator que mais contribui para originar problemas nas misturas asfálticas é a água, que atua de forma diferenciada, porém sempre danosa, e, portanto, na maioria dos métodos a água é vista como agente causador do dano à mistura, juntamente com as variações térmicas e/ou carregamentos cíclicos. Os danos por umidade induzida não se caracterizam como um modo de ruptura, mas sim como um processo condicionante, acelerado pela presença de água, que pode levar a mistura asfáltica à ruptura por facilitar o aparecimento de outros defeitos, como: afundamento em trilhas de roda, trincas por fadiga e/ ou desagregação (FURLAN, 2006).

Muitos fatores afetam o grau de danos provocados pela umidade em misturas de concreto asfáltico. Fatores como temperatura, ar, água, pode ter profundo efeito em sua durabilidade. Em regiões com climas amenos, onde a qualidade dos agregados e do cimento asfáltico é boa, a deterioração é oriunda, principalmente, da contribuição das cargas do tráfego e dos defeitos manifestados na forma de trincamento por fadiga e desgaste superficial (GALVÃO, 2001).

Esse mesmo autor comenta que o efeito adverso da água nas misturas asfálticas é devido à ocorrência do deslocamento da película de asfalto que recobre os agregados pela ação da água. As consequências desse efeito podem ser:

- Arrancamento de agregados da superfície do revestimento;
- Perda geral da estabilidade da mistura em decorrência da abertura de panelas localizadas e degradação da mistura;
- Trincamento por fadiga prematura, associada à perda de capacidade estrutural do revestimento asfáltico resultante da lavagem da película de asfalto dos agregados situados nas porções inferiores da camada asfáltica.

Os condicionamentos realizados nas misturas asfálticas têm como objetivo simular o meio ao qual elas estarão expostas ao longo do tempo e causar, com essas simulações, alterações nas suas propriedades, que, por sua vez, podem ser avaliadas por ensaios de propriedades mecânicas. Nos casos dos métodos tradicionais, a variação das propriedades mecânicas é avaliada, principalmente, por meio do ensaio de resistência à tração (FURLAN, 2006).

Para a avaliação do dano por umidade induzida as misturas asfálticas são submetidas a algum tipo de condicionamento e são comparadas com misturas que não passaram por esse processo, ou seja, misturas não-condicionadas. O condicionamento que vem sendo utilizado baseia-se na saturação parcial de corpos-de-prova, normalmente, mediante aplicação de vácuo para indução da entrada de água. Depois de atingida a saturação desejada, submete-se os corpos-de-prova a condicionamentos térmicos que simulem tensões e/ou temperaturas.

Um dos métodos de ensaio para avaliação da umidade induzida é baseado na norma AASHTO T283, que recomenda algumas condições para preparação dos corpos-de-prova, como o envelhecimento da mistura não compactada por um período de 16 h a 60°C; a compactação deve ser realizada de tal maneira que resulte em volume de vazios de $7\pm 1\%$ ou iguais ao do pavimento em serviço, além de, saturar parcialmente com água os vazios. Para a saturação é utilizada uma bomba de vácuo na pressão de 26" Hg, que proporciona a entrada de água. Depois de atingida a saturação desejada, que deve estar no intervalo de 55 a 80%, faz-se o condicionamento térmico, composto por um ciclo de congelamento, onde se coloca o corpo-de-prova a -18°C por 16 h, e um de descongelamento, com a imersão em água a 60°C por 24h.

Outro método de ensaio para a determinação da resistência de misturas asfálticas ao dano por umidade induzida é a norma D 4867, da ASTM, que estabelece que para a saturação parcial do corpo-de-prova compactado seja utilizada uma bomba de vácuo que produz vácuo de 26" Hg, para propiciar a entrada da água. Posteriormente à saturação desejada, que deve estar no intervalo de 55 a 80%, o condicionamento térmico é realizado, sendo composto por um ciclo de imersão, a 60°C, por 24h, e um de estabilização, que consiste da imersão em água a 25°C por 1 h.

Os resultados dos ensaios associam os danos por umidade induzida a uma idade do pavimento, sendo que o ensaio executado segundo a norma AASHTO T283 representa de 4 a 12 anos e segundo a ASTM D4867 de 0 a 4 anos, devido aos tipos de condicionamentos aos quais as misturas são submetidas e pode-se classificá-los como ensaio de dano por umidade induzida em longo prazo (AASHTO T283) e a curto prazo (ASTM D4867) (FURLAN, 2006).

A suscetibilidade à umidade induzida é então expressa pela relação entre os valores, em termos médios, das propriedades medidas para o conjunto de corpos-de-prova condicionado em relação ao conjunto não condicionado, ou de controle, conforme a expressão 2.5.

$$RRT = \frac{\overline{RT_1}}{\overline{RT_2}} \times 100 \quad (2.5)$$

onde:

RRT=relação de resistência à tração (%);

RT₁= resistência à tração média do grupo condicionado;

RT₂= resistência à tração média do grupo de controle.

O critério de definição da suscetibilidade de uma mistura asfáltica, referente à norma ASTM D4867, é de $RRT > 70\%$ (TUNNICLIFF e ROOT², 1995 *apud* FURLAN, 2006). Para a norma da AASHTO T283/89 o critério é de $RRT > 70\%$ e para AASHO T283/99 é de $RRT > 80\%$.

² TUNNICLIFF, D.G; ROOT, R.E (1995). NCHRP Report 373. Use of Antistripping Additives in Asphalt Concrete Mixtures – Field Evaluation *Transportation research Board*, National Research Council, Washington, D.C.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são descritos o planejamento estatístico do experimento, os conjuntos de ensaios selecionados para caracterização da borracha, do agregado mineral, dos ligantes e das misturas asfálticas. Da mesma maneira, serão apresentados os procedimentos para a coleta e caracterização dos materiais, dosagem das misturas asfálticas, moldagem e caracterização dos corpos-de-prova e a execução do ensaio de módulo de resiliência. Cabe ressaltar que os procedimentos referentes aos ligantes e o planejamento do experimento estão descritos em FAXINA (2006).

3.1. Planejamento do experimento

O experimento, que tem como finalidade analisar o comportamento de misturas asfálticas com adição de óleo de xisto e borracha moída de pneu, é composto pela moldagem de corpos-de-prova para realização de ensaios de laboratório. A escolha do conjunto de ensaios permitiu o acompanhamento das características físicas de amostras preparadas de acordo com o delineamento do experimento. Mediante os dados obtidos foi realizada uma análise estatística, com objetivo de obter conclusões referentes ao efeito do resíduo do óleo de xisto nas misturas asfálticas com asfalto-borracha dosadas nesse trabalho.

O processo de avaliação foi experimental e possuiu as seguintes etapas: 1- mediante a teoria de experimentos com misturas foram definidas e preparadas as amostras em laboratório; 2- foi realizado o monitoramento das propriedades físicas das amostras; 3- feita a modelagem estatística e; 4-análise de efeitos dos componentes e da superfície de resposta.

O experimento foi delineado com base na técnica estatística de “experimentos com misturas” (Cornell, 2002). A partir dos resultados obtidos foram ajustados modelos do tipo polinomial e, com base nos modelos adotados, foram efetuadas análises de efeitos do componentes (teor e tipo de asfalto – puro, com borracha, com óleo e com óleo e borracha) e de superfície de resposta nas propriedades monitoradas.

A técnica de planejamento de experimentos com misturas é uma técnica estatística utilizada em várias áreas, podendo ser aplicada em experimentos nos quais seja possível atribuir as modificações de propriedades das amostras a variações nas proporções dos seus componentes. No presente trabalho, as amostras são chamadas “misturas” e os fatores considerados na análise global do experimento são denominados “componentes”. Fatores associados ao processamento da mistura, com capacidade semelhante à dos componentes de promover alterações nas propriedades das amostras, são denominados “fatores de processo” ou “variáveis de processo”.

A abordagem de um problema experimental por meio da técnica de experimentos com misturas prevê que as variáveis ou fatores escolhidos para descrever o fenômeno em questão sejam proporções, o que cria a condição de dependência entre os níveis dos fatores. Dessa maneira, a técnica de planejamento fatorial teoricamente não se aplica a estudos da natureza do realizado nesta pesquisa, já que exige que as variáveis sejam independentes.

Para tentar conciliar os objetivos da pesquisa com as restrições de tempo, de equipamentos e de recursos financeiros, foi decidido fixar a maioria das variáveis intervenientes sobre as características do ligante asfalto-borracha e a variação apenas da concentração dos componentes. Optou-se pela utilização de apenas um tipo de ligante asfáltico, de borracha moída e de óleo aromático, visto que a avaliação do efeito de componentes com outras características aumentaria o número de novos componentes, deixando a pesquisa mais trabalhosa.

Assim, a pesquisa avaliou o efeito da presença ou não, de três componentes nas misturas, a saber: o ligante asfáltico, a borracha moída e o resíduo de óleo de xisto, que serão referenciados no trabalho como asfalto, borracha e óleo, respectivamente. A composição desses materiais pode originar três tipos de misturas: primárias, binárias e terciárias, ou seja, a presença de apenas um, dois ou três componentes, respectivamente. A quantidade de cada componente deve ser maior ou igual a zero e o somatório das proporções de todos eles deve ser igual à unidade.

Para esse estudo, as misturas possíveis são:

- primárias: asfalto;
- binárias: asfalto+borracha e asfalto+óleo;

- ternárias: asfalto+borracha+óleo.

As “restrições” do experimento são definidas com base na experiência do experimentador e/ou no seu conhecimento sobre o possível comportamento das misturas em estudo. Considerando as características do asfalto e da borracha em questão, foram escolhidas as seguintes restrições para os três componentes:

$$0,68 \leq x_1 \leq 1,00 \text{ (asfalto)}$$

$$0,00 \leq x_2 \leq 0,18 \text{ (borracha)}$$

$$0,00 \leq x_3 \leq 0,14 \text{ (óleo)}$$

A teoria de planejamento de experimentos com misturas também orientou a seleção das misturas que servem de base para a descrição do espaço amostral que resultaram das restrições impostas, visto que essa é a principal finalidade da técnica de delineamento de experimentos. No sistema de três componentes, uma região poligonal deve ser formada pelas restrições, e as misturas a serem avaliadas devem estar localizadas, por ordem de prioridade, nos vértices, nos pontos médios dos lados e no centro geométrico da figura.

Figura 3.1: Simplex formado pelos três componentes e espaço amostral com restrições.

(FONTE: FAXINA, 2006).

É necessário selecionar um número mínimo de misturas, sendo suficientes para um bom detalhamento do espaço amostral, e também para dar suporte ao modelo estatístico escolhido para descrever o fenômeno. As amostras são determinadas com base nas restrições de teores dos componentes e no grau do modelo a ser ajustado. O mais comum, em planejamento com mistura,

é utilizar modelos polinomiais de grau um, dois ou três (cúbico completo ou cúbico especial). Para esse trabalho, foi delimitado o espaço amostral conforme Figura 3.1 e foram selecionadas 8 misturas, como mostra a Figura 3.2 e Tabela 3.1. O modelo escolhido para descrever o espaço amostral foi o polinomial de terceiro grau do tipo cúbico especial.

Figura 3.2. Espaço amostral com restrições e misturas escolhidas.

(FONTE: FAXINA, 2006).

Tabela 3.1. Proporções dos componentes das misturas selecionadas.

Identificação da Mistura*	porcentagem dos componentes		
	asfalto	borracha	óleo de xisto
100-0-0	100	0	0
91-9-0	91	9	0
82-18-0	82	18	0
93-0-7	93	0	7
75-18-7	75	18	7
77-9-14	77	9	14
68-18-14	68	18	14

*A identificação das misturas foi feita com base na porcentagem dos componentes; assim, o primeiro número corresponde ao teor de asfalto, o segundo ao teor de borracha e o terceiro ao teor de óleo de xisto. A mistura 100-0-0 é o asfalto de base (CAP 30/45).

O agregado mineral, no delineamento do experimento, não é considerado um quarto componente, pois tornaria o experimento mais complexo e a seleção das amostras deveria ser realizada mediante outro procedimento. Devido à porcentagem de agregado no corpo-de-

prova não ser alterada (1200g) e à definição de cada modelo ser realizada para teores controlados de ligante asfáltico, assume-se que as porcentagens de agregado e de ligante asfáltico são constantes nas 8 misturas para cada teor de ligante asfáltico. Dessa maneira, é possível avaliar o efeito das variações dos teores de asfalto, de borracha e de resíduo de óleo de xisto na misturas asfálticas, admitindo que as interferências sobre os valores das propriedades avaliadas sejam devidas somente às variações nas porcentagens desses componentes.

Para caracterizar os ligantes asfálticos foram selecionados os ensaios descritos na Tabela 3.2. Foram realizados ensaios para monitoramento das propriedades reológicas empíricas, por serem as mais utilizadas no Brasil, e também as fundamentais, pois essas proporcionam uma caracterização racional dos materiais. Já para avaliar os efeitos dos componentes em ligantes asfálticos envelhecidos foi realizado envelhecimento a curto e longo prazo da especificação Superpave.

Tabela 3.2. Propriedades físicas, temperaturas e métodos de ensaio, para os ligantes asfálticos avaliados no experimento.

Propriedade	Temperatura (°C)	Método de ensaio
resiliência virgem	25	ASTM D 5329-96
ponto de amolecimento virgem, RTFOT e PAV	–	ASTM D 36-95
penetração virgem, RTFOT e PAV	25	ASTM D 5-05 ^a
viscosidade aparente (Brookfield) virgem	150	ASTM D 4402-02
balanço de massa	163	ASTM D 2872-97

A dosagem das misturas asfálticas foi realizada conforme método Marshall, considerando cinco teores de ligante asfáltico, sendo confeccionados sete corpos-de-prova por teor, que também foram usados nos ensaios para obtenção das propriedades mecânicas das misturas asfálticas. A composição granulométrica utilizada foi do tipo densa (centro da faixa C do DER-SP). A Tabela 3.3 indica os ensaios de caracterização mecânica das misturas asfálticas utilizados no experimento.

Tabela 3.3. Propriedades mecânicas das misturas asfálticas avaliadas no experimento.

Propriedade	Temperatura (°C)	Método de ensaio
Resistência à tração	25	DNER-ME 138/94
Módulo de resiliência	25	ASTM D 3497-79 (2003)
Dano induzido pela umidade*	25	ASTM D 4867-95

*avaliado mediante ensaios de resistência à tração e de módulo de resiliência.

3.2 Materiais Utilizados

3.2.1 Materiais granulares

Os materiais utilizados na pesquisa são o ligante asfáltico, a borracha moída, o resíduo de óleo de xisto e o agregado mineral. Os agregados minerais foram fornecidos pela Pedreira Said, de Ribeirão Preto, SP, obtidos mediante britagem de rocha basáltica. A Tabela 3.4 indica a faixa granulométrica escolhida para este estudo, que corresponde à faixa C do DER-SP, assim como as distribuições granulométricas dos materiais granulares e da composição final dos agregados. A Figura 3.3 apresenta a faixa granulométrica adotada e distribuição granulométrica da mistura de agregados.

Tabela 3.4. Limites da faixa “C” do DER/SP e composição granulométrica da mistura final

peneiras	faixa C - DER/SP (% passada)		
(mm)	limite	limite	centro da faixa
19,0	100	100	100,0
12,5	85	100	92,5
4,8	50	80	65,0
2,0	30	65	47,5
0,42	15	40	27,5
0,175	10	25	17,5
0,075	6	10	8,0

Figura 3.3. Faixa C do DER/SP (DER/SP, 1991) e curva granulométrica da mistura obtida.

3.2.1.1 Determinação das propriedades dos agregados

Para determinação das propriedades físicas dos agregados foram realizados os seguintes ensaios:

1. Abrasão Los Angeles (DER/SP M35/94);
2. Densidade aparente, real e absorção do agregado miúdo (ASTM C 128-93);
3. Densidade aparente, real e absorção do agregado graúdo (ASTM C 127-01).

Abrasão Los Angeles

Os agregados estão sujeitos a esforços adicionais de esmagamento e abrasão durante a fabricação, espalhamento e compactação das misturas asfálticas. Os agregados também estão sujeitos à abrasão sob ação das cargas do tráfego. Espera-se então que o agregado tenha capacidade de resistir a esmagamento, degradação e desintegração.

Abrasão “Los Angeles” do agregado é o desgaste sofrido pelo agregado (pedra britada, pedrisco e pedregulho), quando colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva, submetido a um determinado número de revoluções desta máquina à velocidade de 30 rpm a 33 rpm. O desgaste é convencionalmente expresso pela porcentagem, em peso, do material que passa, após o ensaio, pela peneira de malhas quadradas de 1,7 mm.

A abrasão “Los Angeles” do agregado é calculada através da expressão:

$$A_N = \frac{(m_n - m'_n)}{m_n} * 100 \quad (3.1)$$

onde:

A_n = abrasão “Los Angeles” da graduação n , com aproximação de 1%;

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio;

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina;

m'_n = massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retido na peneira de 1,7 mm).

Densidades aparente, real e absorção do agregado miúdo

Esses ensaios foram realizados através da norma ASTM C128-93, que considera como agregado miúdo o material com partículas menores que 4,75mm.

Para determinação das densidades e da absorção foi lavado, inicialmente, 1000 g do material (passado na peneira de malha 2,36mm e retido na peneira de malha 0,075mm). Posteriormente o material ficou imerso em água por 24 horas e, em seguida, foi colocado em uma superfície plana e exposto a uma corrente de ar quente para iniciar o processo de secagem. Após observar mudança de cor do agregado, uma amostra é colocada dentro do cone metálico para compactação com 25 golpes. Depois da compactação retira-se o cone lentamente para verificar a condição do agregado. A condição saturada seca superficialmente se dá quando parte ou todo o cone desmorona. Esse procedimento é realizado até que essa condição seja alcançada.

Depois de atingida a condição saturada seca superficialmente retira-se da amostra aproximadamente 500g, a qual é colocada em um kitassato para verificação da massa do conjunto (amostra + recipiente). Em seguida, adiciona-se água (destilada) ao conjunto até atingir um nível de água um pouco superior ao da superfície do agregado, então é aplicado um vácuo por 20 minutos com a finalidade de retirar as bolhas de ar. Feito isso, completa-se o conjunto com água e verifica-se a temperatura, para posterior pesagem do conjunto

(amostra+recipiente+água). Finalmente o material é retirado e colocado na estufa a 100°C, para determinação da massa da amostra seca.

As densidades e a absorção são determinadas pelas expressões que seguem:

$$\text{Densidade aparente} = \rho_{ap} = \frac{S}{B + S - C} \quad (3.2)$$

$$\text{Densidade real} = \rho_r = \frac{A}{B + A - C} \quad (3.3)$$

$$\text{Absorção} = A(\%) = \frac{B - S}{S} * 100 \quad (3.4)$$

em que:

S = massa da amostra (g);

C= massa do kitassato + amostra+água(g);

B= massa do kitassato cheio de água, obtida através da curva de calibração (g);e

A= massa da amostra seca (g).

Densidades aparente, real e absorção do agregado graúdo

Este ensaio é realizado segundo a norma ASTM 127-01. Para a sua execução pesa-se 2 kg de material retido na peneira de malha 4,75mm após ser lavado e seco em estufa. Depois de ficar imerso por 24 horas em água, o material é retirado e secado até a condição de saturação com secagem superficial, com posterior pesagem. Em seguida, é obtido o peso imerso do material; e por fim o material é colocado na estufa até o peso estabilizar para se obter o valor do peso seco.

Neste caso as densidades são obtidas através das seguintes expressões:

$$\text{Densidade aparente} = \rho_{ap} = \frac{A}{B - C} \quad (3.5)$$

$$\text{Densidade real} = \rho_r = \frac{A}{A - C} \quad (3.6)$$

$$\text{Absorção} = A(\%) = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (3.7)$$

em que:

A= massa da amostra seca em estufa, determinada ao ar(g);

B= massa da amostra seca superficialmente, determinada ao ar (g);

C= massa da amostra seca superficialmente, determinada quando imersa na água (g).

Os valores obtidos dos ensaios relatados anteriormente estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Ensaios de caracterização física dos agregados minerais.

Ensaio	Método	Resultado
Abrasão Los Angeles, %	DER/SP M35/64	11
Densidade aparente do agregado miúdo		2,904
Densidade real do agregado miúdo	ASTM C 128-93	2,933
Absorção de água do agregado miúdo (%)		0,32
Densidade aparente do agregado graúdo		2,850
Densidade real do agregado graúdo	ASTM C 127-01	2,965
Absorção de água do agregado graúdo (%)		1,030

3.2.2 Borracha

A borracha moída foi fornecida pela empresa Artgoma do Brasil Ltda., de São Paulo, SP, sendo resultado do processo de trituração de rebarbas de recapagem de pneus de veículos pesados (caminhões e tratores). A análise granulométrica da borracha é apresentada na Tabela 3.6 e a curva granulométrica na Figura 3.4. O teor de umidade do material é 3%. O ensaio de termo-gravimetria indicou a presença de 64,3% de material orgânico, 31,4% de negro de fumo e 4,3 % de material inorgânico na composição química da borracha.

Tabela 3.6. Distribuição granulométrica da borracha moída.

Abertura da peneira (mm)	% passada
1,19	100,00
0,59	99,24
0,42	59,74
0,297	44,99
0,175	15,84
0,150	11,31
0,074	2,46
Fundo	0,00

Figura 3.4. Curva granulométrica da borracha moída.

3.2.3 Óleo Extensor

O óleo extensor (AR-5), utilizado nesse estudo, obtido a vácuo do resíduo de óleo de xisto, foi fornecido pela Unidade de Negócios da Industrialização do Xisto (SIX - Petrobras), de São Mateus do Sul, PR. A Tabela 3.7 indica as características do AR-5.

Tabela 3.7. Caracterização do agente rejuvenescedor de xisto AR-5
(Fonte: SIX-Petrobras)

Características	Método de ensaio	Valores
Ponto de anilina ¹ , °C	ASTM D 611	31,5
Viscosidade absoluta, cSt	ASTM D 2171	37,8°C (100°F) 2.232
		40°C (104°F) 1.756
Densidade	-	0,9969
VGC ²	ASTM D 2501	0,2076
Viscosidade Saybolt Furol, sSF	MB-517	15,32
Asfaltenos, % em peso	ASTM D 2007	4,5
Ponto de fluidez ³ , °C	ASTM D 97	+12
Ponto de fulgor, °C	MB-50	232
Carbono aromático, NMR ⁴ %	-	36,9

¹Indica a capacidade de um óleo de dissolver certos materiais com os quais entra em contato. Corresponde à menor temperatura na qual o óleo é completamente miscível com igual volume de anilina. Produtos com alto ponto de anilina são ricos em hidrocarbonetos parafínicos e pobres em naftênicos e aromáticos.

²“Viscosity-gravity constant” (VGC): é uma estimativa da composição de hidrocarbonetos de um óleo. É obtida, segundo ASTM D 2501, pela seguinte equação: $VGC \text{ a } 37,8^{\circ}\text{C} (100^{\circ}\text{F}) = (10G - 1,0752\log(V-38))/10 - \log(V-38)$, onde: G = densidade a 15,6°C (60°F), e V = viscosidade Saybolt-Furol a 37,8°C (100°F). Valores de VGC próximos de 0,80 indicam óleo de características parafínicas e valores próximos de 1,00 indicam óleos com preponderância de hidrocarbonetos aromáticos.

³É a temperatura em que um óleo submetido a um processo de resfriamento pára de fluir. É um indicativo da sua capacidade de ser bombeado.

⁴ “Nuclear magnetic resonance” – ressonância magnética nuclear.

3.2.4 Cimento Asfáltico

O cimento asfáltico empregado como base foi o CAP 30/45, com classificação PG 70-10 na especificação Superpave, tendo sido fornecido pela Refinaria Duque de Caxias (Reduc-

Petrobrás). A Tabela 3.8 apresenta os resultados referentes à caracterização física do cimento asfáltico utilizado.

Tabela 3.8. Resultados de caracterização física do CAP 30/45.

Característica	Método	Valores
Ligante asfáltico virgem		
Viscosidade aparente (mPa.s)	135°C	5168
	150°C	244,7
	175°C	94,6
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05 ^a	32
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	54,1
Resiliência, 25°C, %	ASTM D5329-96	5,00
Índice de suscetibilidade térmica IST*	-	-1,19
Estabilidade à estocagem, °C	ASTM D 7173-06	0
Resíduo do envelhecimento a curto prazo (RTFOT), ASTM D 2872-97		
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05 ^a	23
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	57,9
Índice de suscetibilidade térmica IST*	-	-1,01
Balanço de massa, %	ASTM D2872-97	0,076
Resíduo do envelhecimento a longo prazo (PAV), ASTM D 6521-03a		
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	62,6
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05 ^a	16
Índice de suscetibilidade térmica IST*	-	-0,79

*IST = $\frac{500\log\text{PEN} + 20\text{PA} - 1951}{120 - 50\log\text{PEN} + \text{PA}}$, sendo PEN a penetração, em 0,1 mm, e PA o ponto de amolecimento, em

°C.

3.2.5 Ligantes Modificados

Os ensaios de caracterização física também foram realizados para os sete tipos de ligantes modificados estudados no presente trabalho. Os resultados dessas caracterizações estão apresentados nas Tabelas 3.9 a 3.15.

Tabela 3.9. Resultados de caracterização física do Ligante 2 (93-0-7).

Característica	Método	Valores
Ligante asfáltico virgem		
Viscosidade aparente (mPa.s)	120°C	812,8
	135°C	352,0
	150°C	172,8
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05 ^a	65
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	46,2
Resiliência, 25°C, %	ASTM D5329-96	3,00
Estabilidade a estocagem, °C	ASTM D 7173-06	0
Resíduo do envelhecimento a curto prazo (RTFOT), ASTM D 2872-97		
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05 ^a	37
Ponto de amolecimento, °C, anel e bola	ASTM D36-95	51,9
Balanco de massa, %	ASTM D2872-97	-0,370
Resíduo do envelhecimento a longo prazo (PAV), ASTM D 6521-03		
Ponto de amolecimento, °C, anel e bola	ASTM D36-95	55,8
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05 ^a	21

Tabela 3.10. Resultados de caracterização física do Ligante 3 (86-0-14)

Característica	Método	Valores
Ligante asfáltico virgem		
Viscosidade aparente (mPa.s)	120°C	554,7
	135°C	240,3
	150°C	124,1
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05a	114
Ponto de amolecimento, °C, anel e bola	ASTM D36-95	41,3
Resiliência, 25°C, %	ASTM D5329-96	0,75
Estabilidade a estocagem, °C	ASTM D 7173-06	0
Resíduo do envelhecimento a curto prazo(RTFOT), ASTM D 2872-97		
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05a	54
Ponto de amolecimento, °C, anel e bola	ASTM D36-95	48,8
Balanco de massa, %	ASTM D2872-97	-0,831
Resíduo do envelhecimento a longo prazo (PAV),ASTM D 6521-03		
ponto de amolecimento, °C, anel e	ASTM D36-95	52,1
penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05a	26

Tabela 3.11. Resultados de caracterização física do Ligante 4 (91-9-0).

Característica	Método	Valores
Ligante asfáltico virgem		
Viscosidade aparente (mPa.s)	120°C	-
	135°C	-
	150°C	3839,7
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05a	30
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	56,4
Resiliência, 25°C, %	ASTM D5329-96	21,00
Estabilidade a estocagem, °C	ASTM D 7173-06	6,9
Resíduo do envelhecimento a curto prazo (RTFOT), ASTM D 2872-97		
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05a	26
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	62,3
Balanço de massa, %	ASTM D2872-97	-0,177
Resíduo do envelhecimento a longo prazo (PAV), ASTM D 6521-03		
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	67,4
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05a	17

Tabela 3.12. Resultados de caracterização física do Ligante 5 (77-9-14).

Característica	Método	Valores
Ligante asfáltico virgem		
Viscosidade aparente (mPa.s)	120°C	-
	135°C	-
	150°C	2423,5
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05a	94
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	46,2
Resiliência, 25°C, %	ASTM D5329-96	10,67
Estabilidade a estocagem, °C	ASTM D 7173-06	8,3
Resíduo do envelhecimento a curto prazo (RTFOT), ASTM D 2872-97		
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05a	48
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	54,3
Balanço de massa, %	ASTM D2872-97	-0,921
Resíduo do envelhecimento a longo prazo (PAV), ASTM D 6521-03		
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	59,7
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05a	33

Tabela 3.13. Resultados de caracterização física do Ligante 6 (82-18-0).

Característica	Método	Valores
Ligante asfáltico virgem		
Viscosidade aparente (mPa.s)	120°C	-
	135°C	-
	150°C	5191,1
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05 ^a	30
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	67,5
Resiliência, 25°C, %	ASTM D5329-96	46,67
Estabilidade a estocagem, °C	ASTM D 7173-06	9,5
Resíduo do envelhecimento a curto prazo (RTFOT), ASTM D 2872-97		
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05 ^a	24
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	70,3
Balanço de massa, %	ASTM D2872-97	-0,024
Resíduo do envelhecimento a longo prazo (PAV), ASTM D 6521-03		
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	71,3
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05 ^a	26

Tabela 3.14. Resultados de caracterização física do Ligante 7 (75-18-7).

Característica	Método	Valores
Ligante asfáltico virgem		
Viscosidade aparente (mPa.s)	120°C	-
	135°C	-
	150°C	4577,8
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05 ^a	45
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	60,1
Estabilidade a estocagem, °C	ASTM D 7173-06	2,9
Resiliência, 25°C, %	ASTM D5329-96	34,67
Resíduo do envelhecimento a curto prazo (RTFOT), ASTM D 2872-97		
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05 ^a	37
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	64,5
Balanço de massa, %	ASTM D2872-97	-0,556
Resíduo do envelhecimento a longo prazo (PAV), ASTM D 6521-03a		
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	63,9
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05 ^a	37

Tabela 3.15. Resultados de caracterização física do Ligante 8 (68-18-14).

Característica	Método	Valores
Ligante asfáltico virgem		
Viscosidade aparente (mPa.s)	120°C 135°C 150°C	- - 3608,9
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05a	70
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	56,3
Estabilidade a estocagem, °C	ASTM D 7173-06	1,1
Resiliência, 25°C, %	ASTM D5329-96	25,00
Resíduo do envelhecimento a curto prazo (RTFOT), ASTM D 2872-97		
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05a	51
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	55,3
Balanço de massa, %	ASTM D2872-97	-1,387
Resíduo do envelhecimento a longo prazo (PAV), ASTM D 6521-03		
Ponto de amolecimento, °C,	ASTM D36-95	64,4
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	ASTM D5-05a	48

3.3 Procedimentos e Equipamentos de Laboratório

3.3.1 Ligantes Asfálticos

Para produção das misturas asfalto-borracha e asfalto-borracha-óleo, foi utilizado misturador de alto cisalhamento da marca Silverson, modelo L4RT, sob rotação de 4.000 rpm, na temperatura de 170°C, durante 90 min. Na preparação das misturas asfalto-óleo, utilizou-se misturador de baixo cisalhamento marca Fisatom, modelo 722D, sob rotação de 400 rpm, temperatura de 135°C e tempo de 20 min. Uma manta aquecedora marca Fisatom, modelo 647, foi empregada para o condicionamento térmico das misturas durante o processamento. A temperatura foi controlada por meio de um controlador de temperatura externo, ao qual foi conectado um sensor que permanecia imerso na mistura e fixado a uma haste de apoio. Foram preparadas bateladas de 3,0 l.

A teoria sobre misturas indica que a ordem de adição dos componentes pode alterar a qualidade do produto final. Portanto, adotou-se a mesma seqüência de adição dos

componentes, nas quantidades estabelecidas na Tabela 3.1. No caso das misturas asfalto-borracha-óleo, a adição dos materiais foi feita na seguinte ordem:

- Primeiramente, o ligante asfáltico de base era aquecido e a quantidade corresponde à mistura a ser preparada era colocada no recipiente de mistura (bequer);
- Em seguida, o resíduo de óleo de xisto era vertido no bequer na quantidade desejada;
- Posteriormente, o béquer era colocado na manta de aquecimento, a temperatura da manta e a rotação do misturador de alto cisalhamento eram ajustadas e só então a borracha, previamente pesada, era adicionada em pequenas quantidades. O tempo de processamento começava a ser cronometrado após a conclusão da adição da borracha e a estabilização da temperatura.

Para as misturas asfalto-borracha, o ligante asfáltico de base era aquecido, pesado e vertido no béquer e levado diretamente para o misturador de alto cisalhamento, sendo, então, ajustadas à temperatura da manta e a rotação do agitador. Depois de adicionada à borracha e estabilizada a temperatura, o tempo de processamento começava a ser cronometrado.

No caso das misturas asfalto-óleo, empregando misturador de baixo cisalhamento, o CAP era aquecido, pesado e vertido no béquer, sendo adicionada, na seqüência, a quantidade de óleo prevista. O béquer era, então, ajustado à manta e quando a temperatura de 135°C era alcançada, a rotação do agitador era fixada (400 rpm) e o tempo de processamento, de 20 min, passava a ser cronometrado.

O envelhecimento das misturas a curto prazo foi efetuado por meio de estufas de filme fino rotativo (RTFOT), conforme método ASTM D 2872-97. Foram empregadas duas estufas, uma da marca Despatch, modelo RTFOT, e outra da marca James Cox e Sons, modelo CS 325-A. Paralelamente ao envelhecimento, foi realizado o ensaio de balanço de massa, segundo essa norma, empregando balança analítica com precisão de décimo de milésimo de grama. O envelhecimento a longo prazo do resíduo envelhecido no RTFOT, conforme especificação ASTM 6521-03a, foi efetuado em estufa de vaso pressurizado (PAV) da marca Prentex, modelo 9300.

A viscosidade aparente (ASTM 4402-02) foi medida em um viscosímetro Brookfield modelo DV III Ultra Programmable Rheometer, dotado de dispositivo Thermosel, empregando

“spindles” 18, 21 e 34. O procedimento adotado foi descrito a seguir, que permitiu a obtenção de valores de viscosidade adequados para o propósito de modelagem:

- a viscosidade do CAP foi medida com “spindle” 21 e as das amostras asfalto-óleo foram medidas com “spindle” 18, sem substituição de amostras e com taxas de cisalhamento arbitrárias. Uma vez que esses são asfaltos newtonianos, o ensaio foi realizado nas temperaturas de 120, 135 e 150°C, com três determinações da viscosidade espaçadas de 1 min;
- a viscosidade das amostras asfalto-borracha-óleo foi obtida com “spindle” 18 e das amostras asfalto-borracha foi medida com “spindle” 34, apenas na temperatura de 150°C. A taxa de cisalhamento empregada foi de 6,8 s⁻¹, com três determinações da viscosidade espaçadas de 1 min.

Os ensaios de ponto de amolecimento (ASTM D36-95) foram realizados em dois equipamentos: um da marca ISL, modelo RB 36, e outro da marca Herzog, modelo HRB 754. Os ensaios de penetração (ASTM D5-97) e de resiliência (ASTM D 5329-96) foram executados em equipamento marca Humboldt, modelo H1240. O ensaio de resiliência emprega o mesmo equipamento do ensaio de penetração. Nesse caso, a agulha de penetração deve ser substituída pela haste de penetração, sendo o peso total da esfera mais a haste de penetração igual a $75 \pm 0,01$ g.

Como não se dispõe de um critério de especificação para a estabilidade à estocagem do asfalto-borracha, empregou-se o ensaio ASTM D 7173-06 (“Standard practice for determining the separation tendency of polymer from polymer modified asphalt”) aplicado na avaliação da estabilidade à estocagem entre polímero e ligante asfáltico durante estocagem sob temperaturas de manuseio e transporte. A separação do polímero do ligante asfáltico, durante a estocagem sob temperaturas altas, é avaliada por meio da comparação de valores de ponto de amolecimento, medido em amostras do ligante asfáltico modificado, obtidas das partes superior e inferior de um tubo preenchido com amostra, após ser submetida ao condicionamento que simula a estocagem. O condicionamento consiste em colocar um tubo padronizado preenchido de ligante asfáltico modificado e lacrado na posição vertical em estufa na temperatura de 163 ± 5 °C durante o período de 48 ± 1 h.

3.3.2 Misturas Asfálticas

Nesta seção são apresentados os procedimentos experimentais e os materiais empregados no estudo do asfalto-borracha e das misturas modificadas. Do mesmo modo, são descritos a preparação dos corpos-de-prova; assim como os procedimentos para determinação das temperaturas de usinagem e de compactação das misturas. Posteriormente, é detalhada a determinação dos parâmetros volumétricos (densidade, volume de vazios, relação betume-vazios e vazios do agregado mineral) e, para finalizar, os procedimentos de ensaio de propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

3.3.2.1 Temperaturas de usinagem e de compactação

Para determinação das temperaturas de usinagem e de compactação foram utilizados dois processos diferentes. O primeiro deles usado para ligantes que não contêm borracha na composição e o segundo para ligantes que contêm borracha. Para os ligantes sem o componente borracha foi empregado o método tradicional utilizados para os ligantes asfálticos newtonianos. A viscosidade Brookfield foi monitorada em três temperaturas distintas, para cada ligante asfáltico, visando o levantamento da curva viscosidade versus temperatura. As Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 representam as curvas traçadas para determinação das referidas temperaturas. As temperaturas de mistura dos materiais foram estimadas para uma viscosidade de 0,17 Pa.s e as temperaturas de compactação foram estimadas para uma viscosidade de 0,28 Pa.s.

Figura 3.5. Viscosidade x temperatura para o ligante 100-0-0

Figura 3.6. Viscosidade x temperatura para o ligante 93-0-7

Figura 3.7. Viscosidade x temperatura para o ligante 86-0-14

Devido às dificuldades encontradas para monitorar a viscosidade aparente do ligante asfalto-borracha em ambas as temperaturas, optou-se por arbitrar as temperaturas de mistura e de compactação considerando a consistência destes ligantes e procurando não ultrapassar o limite de 180°C. Na Tabela 3.16 estão às temperaturas de usinagem e de compactação.

Tabela 3.16. Temperaturas de usinagem e de compactação.

Misturas	Temperaturas (°C)	
	Usinagem	Compactação
100-0-0	158	148
91-9-0	165	155
82-18-0	180	170
93-0-7	150	140
86-0-14	143	132
75-18-7	175	165
77-9-14	155	145
68-18-14	165	155

3.3.2.2 Determinação da Densidade Máxima Teórica de Misturas Asfálticas (Método Rice) – ASTM D 2041/00

A densidade máxima teórica (DMM) é um parâmetro necessário para o cálculo da densidade efetiva do agregado, da absorção de asfalto pelo agregado, do teor de asfalto efetivo da mistura asfáltica e do volume de vazios (V_v) numa dosagem de misturas asfálticas. A partir da densidade aparente dos agregados, da densidade aparente do corpo-de-prova compactado e da DMM determinam-se as características volumétricas de uma mistura asfáltica e, em vários métodos, sua dosagem quanto ao teor de ligante a ser empregado. São propriedades fundamentais cujos valores são influenciados pela composição da mistura em relação ao tipo e quantidade de materiais agregados e betuminosos.

O ensaio se resume em colocar uma amostra de mistura asfáltica, quantidade esta que depende do tamanho nominal máximo do agregado, em condição fofa em um recipiente que se conhece a tara. Em seguida, o recipiente é preenchido com água a 25°C até que toda a mistura fique coberta. É então aplicado gradualmente vácuo por um período de 15 minutos, a fim de expulsar os vazios existentes entre os filmes de ligante. Ao fim deste tempo, o vácuo é gradualmente solto. O volume da amostra da mistura asfáltica é obtido completando o nível do recipiente com água e pesando ao ar. Tanto a temperatura e a massa do conjunto são anotadas. A “DMM”, ou Gmm, conforme descrito na referida norma, é determinada por:

$$DMM = \frac{A}{A - (C - B)} \quad (3.8)$$

em que:

A: massa da amostra seca em ar (g),

B: massa do recipiente metálico imerso em água (g),

C: massa do recipiente + amostra imerso em água (g).

Através da DMM, do teor de asfalto (P_b) e da densidade aparente dos agregados (ρ_{ap}), calculou-se a densidade efetiva do agregado (ρ_{ef}), cujo valor é usado no cálculo da absorção de asfalto (Abs_{asf}). A densidade efetiva do agregado (ρ_{ef}) pode ser obtida através da expressão 3.9.

$$\rho_{ef} = \frac{1 - P_b}{\frac{1}{DMM} + \frac{P_b}{\rho_b}} \quad (3.9)$$

Então a absorção de asfalto pelo agregado pode ser determinada pela expressão 3.10:

$$ABS_{asf} = \frac{\rho_{ef} - \rho_{ap}}{\rho_{ef} * \rho_{ap}} * \rho_b * 100 \quad (3.10)$$

O ensaio foi realizado em misturas com os oito tipos de ligantes asfálticos, no teor de 5,5%. Segundo os ensaios constatou-se que esse agregado apresenta valores não significativos quanto à absorção de ligante asfáltico e, portanto, ela não foi considerada nos cálculos, resultando na utilização de um único valor de ρ_{ef} para cada mistura. A Tabela 3.17 apresenta os valores de ρ_{ef} e de ρ_{asf} dos ligantes asfálticos.

Tabela 3.17. Densidades efetivas dos agregados e densidades dos ligantes asfálticos

Ligante asfáltico	ρ_{ef}	ρ_{ast}
Ligante 1 (100-0-0)	2,869	1,004
Ligante 2 (93-0-7)	2,869	1,012
Ligante 3 (86-0-14)	2,869	1,020
Ligante 4 (91-9-0)	2,867	1,026
Ligante 5 (77-9-14)	2,867	1,038
Ligante 6 (82-18-0)	2,869	1,041
Ligante 7 (75-18-7)	2,867	1,048
Ligante 8 (68-18-14)	2,869	1,051

3.3.2.3 Procedimento de moldagem dos corpos-de-prova

O agregado mineral foi aquecido em uma misturadora de massa adaptada para esta finalidade (Figura 3.8) e, posteriormente, adicionou-se o ligante asfáltico para realizar a homogeneização do material. Em seguida, foram separadas porções de 1.200,00 g e armazenados em tigelas metálicas, que foram acondicionadas em estufa pelo período de 2 h na temperatura de compactação, visando simular o efeito do tempo médio de armazenamento na usina e transporte do material até a obra.

Figura 3.8. Equipamento adaptado para o procedimento de mistura

Foram empregados cinco teores de ligante asfáltico: 4,5; 5,0; 5,5; 6,0 e 6,5%, sendo compactados sete corpos-de-prova para cada teor. Todas as misturas asfálticas foram compactadas nestes teores, por se tratar de um requisito do planejamento do experimento. Os corpos-de-prova foram compactados nas temperaturas de compactação indicadas na Tabela 3.16. O número de golpes depende do tráfego de projeto, sendo que neste estudo foi analisado

o caso de tráfego pesado, representado por 75 golpes por face e o mais utilizado no Brasil, principalmente, em rodovias de médio a alto volume de tráfego. A desmoldagem dos corpos-de-prova foi efetuada após resfriamento até a temperatura ambiente, por um período de 2 horas aproximadamente.

3.3.2.4 Parâmetros volumétricos

Depois de confeccionados e desmoldados os corpos-de-prova, foram realizadas as medidas de diâmetro e altura e, posteriormente, eles foram submetidos à determinação de massas ao ar, sob imersão e sob saturação com superfície seca. Os parâmetros determinados mediante o ensaio Marshall foram: estabilidade (E), fluência (F); densidade aparente (D_{ap}), volume de vazios (V_v), relação betume-vazios (RBV), e vazios do agregado mineral (VAM). Os cálculos das propriedades volumétricas foram feitos conforme o roteiro apresentado a seguir:

Densidade aparente:

$$D_{ap} = \frac{\text{massa ao ar}}{\text{massa ao ar} - \text{massa imersa}} \quad (3.11)$$

$$\text{Volume de vazios: } V_v = \left(1 - \frac{D_{ap}}{DMM} \right) \cdot 100 \quad (3.12)$$

$$\text{Vazios do agregado mineral: } VAM = \left(1 - \frac{D_{ap}(1 - \%asf)}{\rho_{ag}} \right) \cdot 100 \quad (3.13)$$

em que ρ_{ag} é a densidade da porção pétrea da mistura, obtida através da ponderação entre as densidades do agregado miúdo, obtida pelo método ASTM C128-93, e do agregado graúdo, obtida pelo método ASTM C127-91, conforme exposto no item 3.2.1.1.

$$\text{Relação betume-vazios: } RBV = \frac{VAM - V_v}{VAM} \cdot 100 \quad (3.14)$$

Os resultados do ensaio Marshall proporcionam curvas de densidade, volume de vazios, relação betume-vazios, fluência e estabilidade em função dos teores de cimento asfáltico. Os cálculos e as curvas referentes a esses parâmetros estão no Apêndice A.

3.3.3 Ensaios de propriedades mecânicas

Durante a pesquisa foram moldados 280 corpos-de-prova, divididos em 8 misturas asfálticas, com 5 teores de ligante asfáltico por mistura e 7 réplicas por teor de ligante. A Tabela 3.18 apresenta a destinação dos corpos-de-prova para cada mistura.

Tabela 3.18. Quantidade de corpos-de-prova ensaiados por mistura estudada

Teores	Ensaios			
	Estabilidade e Fluência	Resistência à Tração	Umidade Induzida	Módulo de Resiliência*
4,5 %	2	2	3	7
5,0 %	2	2	3	7
5,5 %	2	2	3	7
6,0 %	2	2	3	7
6,5%	2	2	3	7
Total de corpo-de-prova				35

*O ensaio de Módulo de Resiliência e das propriedades volumétricas foram realizados em todos os corpos de prova.

3.3.3.1 Módulo de Resiliência

Este ensaio foi realizado segundo o procedimento da norma DNER-ME 133/94. A temperatura empregada foi a de 25°C. O equipamento utilizado nesse ensaio está ilustrado na Figura 3.9 apresentada a seguir. Trata-se de uma prensa dotada de sistema pneumático de aplicação de carga, feita por um pistão, acionado por um programa computacional, também responsável pelo registro das leituras de carga e deslocamento, obtidos por uma célula de carga e um conjunto de LVDTs.

Figura 3.9. Equipamento utilizado para ensaio de módulo de resiliência

Para realização do ensaio, o corpo-de-prova foi posicionado em um suporte; em seguida foi fixado o medidor de deslocamento do tipo LVDT. O conjunto foi levado à prensa, faz-se com que o LVDT ficasse centralizado em relação à altura do corpo-de-prova com a finalidade de medir o deslocamento médio, conforme demonstrado na Figura 3.10.

Figura 3.10. Montagem do corpo-de-prova no suporte

O procedimento de ensaio consistiu em aplicar 100 ciclos de carregamento de magnitude fixa, com duração de 1,0 s, sendo 0,1 s de aplicação de carga e 0,9 s de recuperação. Como os ensaios de resistência à tração foram realizados posteriormente aos ensaios de módulo de resiliência, optou-se pelo controle do deslocamento vertical da amostra e não pelo controle da tensão aplicada (uma fração da sua resistência à tração). Assim, a carga foi ajustada de forma a obter deslocamentos da ordem de 0,0020 a 0,0030 mm.

Para o cálculo do módulo de resiliência foram utilizados aproximadamente 30 a 40 ciclos de carregamento, com o objetivo de reduzir o desvio padrão a valores inferiores a 5% para misturas convencionais e 10% para misturas modificadas.

3.3.3.2 Estabilidade e Fluência Marshall

Segundo a norma DNER-ME 043/95, a estabilidade é a resistência máxima à compressão radial apresentada pelo corpo-de-prova, em N (Kgf), enquanto a fluência é a deformação total apresentada pelo corpo-de-prova, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima, expressa em décimos de milímetros.

No presente trabalho, o ensaio foi realizado através da norma DNER-ME 043/95, que consiste em colocar os corpos-de-prova submersos em água a 60°C, num período de 30 a 40 minutos. Em seguida, o CP é colocado no molde de compressão, levado até a prensa e submetido à compressão, até que se dê a ruptura, medindo-se nesse instante a carga máxima que a produziu (estabilidade). Tanto a adição da carga quanto a leitura da carga máxima e a fluência que, nesse trabalho, foram registrados por um programa computacional.

3.3.3.3 Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração foi realizado conforme a norma DNER ME-138/94, descrito no item 2.5.1. O ensaio foi realizado na mesma prensa utilizada para os ensaios de estabilidade e fluência, conforme mostra a Figura 3.11, porém com alteração nos dispositivos de aplicação de carga, e na temperatura de 25°C.

Figura 3.11. Prensa utilizada nos ensaios de estabilidade Marshall e resistência à tração

3.3.3.4 Dano por umidade induzida

A avaliação dos danos por umidade induzida foi feita a partir da relação entre a resistência à tração média de 3 corpos de prova submetidos previamente a condicionamentos e a resistência à tração média de 2 corpos de prova sem condicionamento. O valor desta relação pode ser utilizado para prever o desempenho de misturas asfálticas com relação à adesividade ligante/agregado e avaliar o benefício da adição de melhoradores de adesividade à mistura. A relação entre a resistência à tração dos corpos-de-prova submetidos ao condicionamento e não condicionados é chamada de Resistência à Tração Retida ou Razão de Resistência à Tração por compressão diametral (RRT).

Esse ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D 4867, conforme exposto no item 2.5.3. Para a sua realização foram utilizados 3 corpos-de-prova por teor, para cada condição de condicionamento e para cada mistura estudada, totalizando em 120 corpos-de-prova. Depois de realizado o condicionamento dos corpos-de-prova, eles foram submetidos aos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração.

O condicionamento não foi possível de ser realizado em todos os corpos-de-prova selecionados, sendo que 44 corpos-de-prova permaneceram sem condicionamento. Os corpos-de-prova com teores de 4,5 e 5,0% apresentaram mais facilidade para serem condicionados, porém para a maioria dos corpos-de-prova com 5,5, 6,0, 6,5% o condicionamento não foi possível. A dificuldade em se obter a saturação especificada por norma pode estar relacionada

aos altos teores de asfalto e, conseqüentemente, a baixos volume de vazios, ou pela baixa conectividade entre os vazios. Outro fator a ser considerado é a textura superficial dos corpos-de-prova que, em alguns casos, se apresenta bem compacta e lisa, conforme mostram a Figura 3.12 e a Figura 3.13, o que pode ter dificultado a entrada de água.

Figura 3.12. Textura superficial do topo do corpo-de-prova (a) não condicionado e (b) condicionado.

Figura 3.13. Textura superficial do corpo-de-prova (a) não condicionado e (b) condicionado.

Devido a não saturação dos corpos-de-prova com teores de 5,5, 6,0 e 6,5%, as propriedades referentes às amostras condicionadas não puderam ser analisadas, porém foram avaliadas para os teores de 4,5 e 5,0%.

Capítulo 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliar comparativamente o comportamento e o desempenho de misturas asfálticas elaboradas com asfalto convencional (misturas de referência) e com asfaltos com a incorporação de borracha de pneus (processo úmido) e do resíduo de óleo de xisto.

A organização do capítulo se deu em função das diversas variáveis de resposta investigadas: propriedades volumétricas das misturas, estabilidade e fluência, módulo de resiliência, resistência à tração e efeito deletério da água.

4.1 Parâmetros Marshall

4.1.1 Volume de Vazios

O volume de vazios (V_v) é o volume de ar existente entre as partículas do agregado envoltas pelo filme de asfalto, expresso como uma porcentagem do volume total da mistura compactada. A Tabela 4.1 apresenta os valores referentes ao volume de vazios para as oito misturas estudadas em função do teor de asfalto de moldagem.

Ligantes	Tabela 4.1 Volume de Vazios				
	Teor de ligante asfáltico (%)				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
100-0-0	7,9	6,3	4,2	2,7	1,0
93-0-7	6,1	4,7	3,4	1,9	1,1
86-0-14	9,0	6,3	3,3	2,1	0,9
91-9-0	9,0	6,4	5,7	2,6	3,5
82-18-0	7,9	6,7	4,5	3,0	2,9
77-9-14	7,0	5,2	4,2	2,4	2,2
75-18-7	7,2	5,1	4,7	2,9	2,8
68-18-14	10,4	9,2	7,3	6,3	5,0

Conforme mostra a Tabela 4.1, o efeito do resíduo de óleo e da borracha são opostos, pois o óleo proporciona redução nos valores do Vv enquanto a borracha aumenta esse parâmetro. Observa-se que na mistura com adição de 7% de óleo ocorre uma redução no Vv, com exceção no teor de 6,5%. Nota-se o mesmo comportamento para a mistura com adição de 14% de óleo, com exceção do teor de 4,5%.

A adição de borracha na mistura apresenta um aumento no valor do Vv, exceto na mistura com adição de 9% do componente no teor de 6,0%. A mistura com adição de valores altos de óleo e intermediários de borracha (77-9-14) apresenta menores valores de Vv em relação à mistura de referência. Para a mistura com valores intermediários de óleo e altos de borracha (75-18-7) observa-se um aumento no parâmetro, exceto nos teores de 4,5% e 5,0%. A mistura com adição alta dos modificadores (68-18-14) apresenta um aumento no volume de vazios. Da mesma maneira, pode-se constatar como já esperado, a redução do volume de vazios com o aumento do teor de ligante asfáltico na mistura.

4.1.2 Vazios do Agregado Mineral

Vazios do agregado mineral (VAM) é a soma do volume de vazios (Vv) e do volume de asfalto efetivo, ou seja, volume de asfalto efetivo. Os valores obtidos nas misturas estudadas referentes ao VAM estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Vazios do agregado mineral

Ligantes	Teor de ligante asfáltico (%)				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
100-0-0	18,9	18,5	17,8	17,7	17,4
93-0-7	17,2	17,0	17,0	16,9	17,3
86-0-14	19,6	18,4	16,9	16,5	17,0
91-9-0	19,7	18,4	19,0	17,4	19,2
82-18-0	19,3	18,5	17,7	17,5	18,5
77-9-14	17,8	17,2	17,5	17,1	18,0
75-18-7	17,9	17,1	17,8	17,4	18,4
68-18-14	20,6	20,6	20,0	20,2	20,1

Quanto aos vazios do agregado mineral, observa-se na Tabela 4.2 que, tanto a adição de óleo quanto da borracha na mistura, proporcionam a diminuição do VAM, com exceção da adição

de borracha nos teores de 4,5% e 6,5% de ligante. As misturas com a adição de concentrações altas dos dois modificadores (18% e 14%) apresentaram maiores valores de VAM. Pode-se imaginar que com teores mais elevados de asfalto, a espessura da película de asfalto que envolve as partículas também é mais espessa, o que pode contribuir para o acúmulo de borracha/óleo em torno das partículas do agregado promovendo o afastamento gradativo entre elas em função dos teores de borracha/óleo adicionados, fazendo com que o valor do VAM aumente.

4.1.3 Relação Betume-vazios

A relação betume-vazios representa o grau de preenchimento do VAM por asfalto. A Tabela 4.3 apresenta os valores de RBV encontrados na pesquisa.

Tabela 4.3 Relação Betume-vazios (%)					
Ligantes	Teor de ligante asfáltico (%)				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
100-0-0	57,9	66,2	76,6	85,0	94,5
93-0-7	64,5	72,6	80,3	88,8	93,9
86-0-14	54,3	65,6	76,9	87,4	95,4
91-9-0	54,2	65,6	69,8	85,2	82,0
82-18-0	57,3	63,9	74,9	83,0	84,4
77-9-14	60,6	70,1	76,0	86,0	87,7
75-18-7	59,5	70,0	73,8	83,5	85,0
68-18-14	49,6	55,3	63,6	68,7	75,3

Da tabela apresentada anteriormente nota-se que na mistura com adição de 7% de óleo ocorre um aumento na RBV, com exceção no teor de 6,5%. Nota-se o mesmo comportamento para a mistura com adição de 14% de óleo, com exceção dos teores de 4,5% e 5,0%.

A adição de borracha na mistura reduz o valor do parâmetro, exceto na mistura com adição de 9% do componente para o teor de 6,0% de ligante. A mistura com adição de valores altos de óleo e intermediários de borracha (77-9-14) apresenta maiores valores de RBV em relação à mistura de referência, com exceção dos teores de 5,5 e 6,5%. Para a mistura com valores intermediário de óleo e alto de borracha (75-18-7) observa-se uma redução no parâmetro,

exceto nos teores de 4,5% e 5,0%. A mistura com adição alta dos modificadores (68-18-14) apresentam os menores valores de RBV. Pode-se observar também o aumento do parâmetro com o aumento do teor de ligante asfáltico. Nota-se que o efeito do resíduo de óleo de xisto e da borracha são antagônicos, pois o óleo proporciona um aumento nos valores do RBV enquanto a borracha diminui esse parâmetro.

4.1.4 Densidade Aparente

A Tabela 4.4 apresenta os resultados referentes à densidade aparente das misturas estudadas.

Ligantes	Teor de ligante asfáltico (%)				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
100-0-0	2,437	2,461	2,494	2,513	2,535
93-0-7	2,489	2,505	2,518	2,535	2,536
86-0-14	2,415	2,464	2,523	2,548	2,547
91-9-0	2,414	2,463	2,460	2,521	2,478
82-18-0	2,423	2,460	2,499	2,518	2,500
77-9-14	2,471	2,499	2,504	2,531	2,516
75-18-7	2,467	2,502	2,494	2,522	2,505
68-18-14	2,385	2,397	2,429	2,434	2,450

Observa-se da Tabela 4.4 que a adição de óleo proporciona o aumento da densidade das misturas em relação à mistura de referência. Exceção a esse efeito ocorre apenas na adição de teor alto de óleo (14%) na mistura com teor de 4,5%, onde há redução da densidade em 1%, aproximadamente. Com a adição de borracha a densidade aparente aumentou, com exceção dos teores de 4,5% e 6,5%, para as duas quantidades adicionadas.

Já na adição de valores intermediários de óleo e de borracha tem-se um aumento na densidade aparente; talvez esse fato possa ser explicado porque ao adicionar quantidades intermediárias desses dois componentes (teores baixos) as partículas de borracha envoltas em óleo e em asfalto preencheriam os espaços entre as partículas maiores dos agregados tornando a mistura mais densa. No entanto, quando são adicionadas grandes quantidades dos modificadores, eles acabam não só preenchendo os espaços entre as partículas como passam a provocar um

afastamento entre elas devido a um provável acúmulo de material, e dessa maneira deixando a mistura menos densa, ou seja, diminuindo a densidade aparente e, como visto anteriormente, aumentando o VAM. Os demais dados referentes aos parâmetros volumétricos estão apresentados no Apêndice A.

4.1.5 Estabilidade e Fluência

A estabilidade é a resistência máxima apresentada pelo corpo-de-prova; os valores referentes a essa propriedade estão representados nas figuras apresentadas a seguir. Para melhor entendimento, optou-se por mostrar os resultados em três grupos, com misturas somente com adição de óleo, misturas somente com adição de borracha e misturas com adição dos dois modificadores. A Figura 4.1 mostra a estabilidade para as misturas com adição apenas de óleo (a) e apenas de borracha (b). Os dados detalhados estão apresentados no Apêndice B.

Figura 4.1: Estabilidade das misturas asfálticas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha

Através da Figura 4.1 (a) pode-se observar que a adição do óleo proporciona uma diminuição no valor da estabilidade em relação à mistura de referência. O mesmo se observa ao aumentar o teor de óleo de 7% para 14%. A maior redução ocorre na mistura 86-0-14 no teor de 4,5% onde o valor da estabilidade é reduzido em 32%. No entanto, não é possível notar uma tendência definida ao se aumentar o teor de ligante asfáltico na mistura.

As misturas com adição de borracha apresentam comportamento oposto daquelas com adição de óleo, como mostra a Figura 4.1 (b). A borracha proporciona um aumento da estabilidade das misturas em relação à de referência. Apenas a mistura com adição de 9% de borracha nos teores de 4,5% e 5,5%, não apresentaram esse comportamento.

Da mesma maneira, pode-se observar que o aumento da adição de borracha, de 9% para 18%, também provoca um aumento no valor da estabilidade, sendo que, o maior aumento, de 46%, foi encontrado para a mistura com adição de 18% de borracha no teor de ligante asfáltico de 5,5%. Para as misturas com adição de 9% de borracha, o aumento do teor de ligante asfáltico propicia maiores valores de estabilidade para teores até 5,5% e uma diminuição para teores de 6,0% e 6,5%. A mistura de referência, assim como as com adição de 18% de borracha, não apresenta uma tendência definida com o aumento do teor de ligantes asfáltico.

Figura 4.2: Estabilidade das misturas asfálticas com adição de óleo e borracha.

Da Figura 4.2 nota-se que a mistura com adição de 9% de borracha e 14% de óleo proporcionaram um aumento no valor da estabilidade, com exceção dos teores de ligante asfáltico de 5,5% e 6,0% que diminuíram a estabilidade em 16% e 0,8% respectivamente. A mistura com adição de 18% de borracha e 7% de óleo apresentou aumento dos valores de estabilidade, entretanto, a mistura com 18% de borracha e 14% de óleo (teores altos) proporcionou a diminuição da estabilidade. O aumento do teor de ligante asfáltico na mistura 77-9-14 aponta uma diminuição da propriedade analisada, com exceção do teor de 6,5%.

Em resumo, pode-se destacar que o óleo provoca uma diminuição da estabilidade das misturas, enquanto a borracha produz um efeito contrário, proporcionando o seu aumento.

A deformação total dos corpos-de-prova quando da ruptura no ensaio Marshall é representada através da fluência, cujos valores estão apresentados nos gráficos abaixo. A Figura 4.3 indica os valores de fluência das misturas com adição somente de óleo e borracha.

Figura 4.3: Fluência das misturas asfálticas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha

Pode-se observar na Figura 4.3 (a) que as misturas com adição de óleo apresentaram menores valores de fluência do que a mistura de referência, com exceção, apenas, para o teor de ligante asfáltico de 6,0%, que apresenta valores superiores. Com a adição de 7% de óleo observa-se uma redução da fluência, com diminuição de 20% na mistura com teor de 4,5%. Já a mistura com adição de 14% de óleo apresentou os menores valores de fluência, proporcionando redução de até 23%, para o teor de ligante asfáltico de 5,0%. Para as misturas não modificadas, o aumento do teor de ligante causou um aumento na fluência, contudo as misturas com adição somente de óleo não apresentaram um comportamento definido.

A adição de borracha na mistura asfáltica, conforme mostra a Figura 4.3 (b), reduz a fluência das misturas asfálticas. A mistura com adição de 9% de borracha, com exceção do teor de 4,5%, proporcionou maior redução da fluência do que a adição de 18%, em relação à mistura de referência. De maneira geral, o aumento do teor de ligante asfáltico propicia o aumento do valor da fluência, tanto para a mistura não modificada quanto para as com adição de borracha.

Figura 4.4: Fluência das misturas asfálticas com adição de óleo e borracha.

Observa-se da Figura 4.4 que a mistura com adição de 9% de borracha e 14% de óleo apresenta valores de fluência menores do que a mistura de referência, com exceção do teor de 4,5% de ligante, que apresentou um aumento de 4% na fluência. O mesmo comportamento é observado para a mistura com adição de 18% de borracha e 7% de óleo; no entanto, essa mistura apresentou maiores valores de fluência nos teores de 5,0% e 6,5%, com aumentos de 1% e 27%, respectivamente. Da mesma maneira que as misturas anteriores, a que possui 18% de borracha e 14% de óleo apresenta redução nos valores de fluência, sendo que para o teor de 6,5% houve a menor redução (17%).

Em relação à fluência pode-se dizer que o óleo e a borracha apresentam mesmo comportamento, diminuindo o valor da propriedade. Somente as misturas com adição de borracha apresentaram tendência definida em relação ao aumento do teor de ligante asfáltico, diminuindo o valor da fluência.

4.2 Ensaios das Propriedades Mecânicas

4.2.1 Módulo de Resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência das misturas de referência e experimentais deste estudo foram realizados a 25°C, conforme procedimento de ensaio indicado no item 2.5.2 do capítulo 2. Na Figura 4.5 são mostrados os resultados comparativos dos módulos de resiliência total

das misturas de referência e modificadas. Os demais resultados desses ensaios estão apresentados no Apêndice C.

Figura 4.5 Módulo de resiliência total das misturas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha

As misturas com adição de óleo apresentam menores valores de módulo de resiliência total em relação à mistura de referência, conforme mostra a Figura 4.5 (a). O aumento de 7% para 14% de óleo proporciona uma redução significativa no valor da propriedade. A maior redução ocorreu na mistura 86-0-14 para o teor asfáltico de 6,0%, com diminuição de 75% do módulo total em relação ao obtido na mistura de referência. A mistura com adição de 7% de óleo apresenta uma redução nos valores de módulo de resiliência quando se aumenta o teor de ligante asfáltico, porém o mesmo comportamento não é observado para a mistura com adição de 14% de óleo.

Da mesma maneira que o óleo, a adição de borracha também proporciona uma diminuição no valor do módulo de resiliência total das misturas; no entanto, com menor intensidade, conforme é mostrado na Figura 4.5 (b). Para a mistura com adição de 9% de borracha, a maior redução do valor do módulo de resiliência está no teor de asfalto de 4,5%, com diminuição de 26% em relação ao da mistura de referência. A mesma mistura não apresentou uma tendência definida com relação ao aumento do teor de ligante asfáltico. O mesmo comportamento é observado na mistura com adição de 18% de borracha. O aumento na adição de borracha, de 9% para 18%, também apresentou uma diminuição no valor do módulo, com exceção no teor de 4,5% de ligante, onde ocorreu um aumento de 19% no valor do módulo.

Apesar dos dois modificadores reduzirem o valor do módulo de resiliência, constata-se que o efeito do óleo é mais intenso que o da borracha, pois o mesmo proporcionou reduções maiores nos valores de módulo em comparação aos da mistura de referência.

Figura 4.6 Módulo de resiliência total das misturas com adição de óleo e borracha

A Figura 4.6 mostra o comportamento das misturas com adição dos dois componentes, borracha e óleo. Pode-se observar que todas as misturas apresentaram valores inferiores de módulo de resiliência em relação aos da mistura de referência. A mistura 82-18-14, no teor de 5,0%, apresentou o menor valor de módulo, com redução de 75% do valor em relação ao de referência. A única mistura que apresentou tendência de redução do valor do módulo à medida que se aumenta o teor de ligante asfáltico foi aquela com adição de 9% de borracha e 18% de óleo; as outras não apresentaram um comportamento definido.

Com base nos resultados apresentados e analisados anteriormente, verifica-se que ocorre uma queda razoavelmente grande do valor do módulo de resiliência das misturas com adição de óleo e borracha. A adição do óleo proporciona uma mistura menos viscosa e a incorporação da borracha torna a mistura asfáltica mais elástica, o que justificaria essa diminuição. As misturas com adição de teores altos dos dois modificadores apresentaram os menores valores de módulo, apontando que à medida que aumentam os teores de borracha e óleo ocorre diminuição no valor dessa propriedade. Cabe ressaltar que o comportamento dos valores do módulo instantâneo das misturas estudadas é similar ao do módulo total aqui apresentado.

4.2.3 Resistência à Tração por compressão diametral

A Figura 4.7 mostra os valores obtidos dos ensaios de resistência à tração das misturas com adição somente de óleo ou borracha. Os demais dados deste ensaio estão apresentados no Apêndice D.

Figura 4.7 Resistência à tração das misturas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha

Assim como no módulo de resiliência, o óleo causa o mesmo comportamento quando analisada a propriedade de resistência à tração, como mostra a Figura 4.7 (a). Nela nota-se que da adição de 7% para a de 14% de óleo há uma diminuição mais intensa dos valores de resistência à tração. A maior redução é apresentada pela mistura com adição de 14% de óleo, nos teores de 6,0% e 6,5%, onde o valor dessa propriedade é reduzido em 57%, aproximadamente, em relação ao valor da mistura de referência. Essa mesma mistura (14% de óleo), com o aumento no teor de ligante asfáltico, apresenta um aumento da resistência à tração até o teor de 5,5% e uma redução para os teores mais altos. No entanto, a outra mistura (7% de óleo) não mostra uma tendência definida.

Os efeitos do óleo e da borracha são semelhantes na resistência à tração; ambos proporcionam a redução no valor dessa propriedade. O comportamento da borracha é apresentado na Figura 4.7 (b). No gráfico observa-se que para mistura com adição de 9% de borracha, o menor valor de resistência à tração é de 1,86 MPa, no teor de 4,5% de ligante asfáltico. A redução da propriedade, neste caso, foi de 28% em relação ao valor obtido para a mistura de referência.

No entanto, para misturas com teor de 6,0% de ligante, o valor de resistência à tração não teve alteração significativa, apresentando, apenas, uma redução de 2%.

Na adição de 18% de borracha, a mistura que apresentou o menor valor de resistência à tração foi a que tem teor de ligante asfáltico igual a 6,5%, com um valor igual a 2,13MPa, 26% inferior ao de referência. O aumento na proporção de borracha adicionada à mistura, com exceção dos teores de 4,5% e 5,5%, causou uma maior redução no valor da resistência à tração; entretanto, não há tendência definida quanto ao aumento no teor de ligante na resistência à tração. De maneira geral, pode-se verificar que a adição de óleo tem efeito mais intenso na redução da resistência à tração do que a adição de borracha.

Figura 4.8 Resistência à tração das misturas com adição de óleo e borracha

A Figura 4.8 mostra os valores de resistência à tração para as misturas com adição dos dois modificadores. Conclui-se que as misturas com altas concentrações de óleo apresentaram os menores valores de resistência à tração em relação à mistura de referência. Apesar da mistura com adição de 18% de borracha e 7% de óleo apresentar menores valores de resistência à tração em relação aos da de referência, estas foram as menores reduções quando comparadas às das outras misturas modificadas.

No entanto, para a mistura com adição de altas concentrações de óleo e borracha (18% e 14%), no teor de ligante asfáltico de 4,5%, houve redução no valor da resistência à tração de 60%. Cabe ressaltar que os valores de resistência à tração da mistura 77-9-14 não apresentaram grandes variações com o aumento do teor de ligante asfáltico. Da mesma forma,

as demais misturas não apresentaram uma tendência definida de comportamento da resistência à tração com o aumento do teor de ligante asfáltico.

A redução significativa da RT encontrada nas misturas estudadas também foi verificada por Faxina (2002) em misturas similares, que apontaram valores de RT para misturas com asfalto-borracha-óleo até 40% menores que os valores de referência. A diminuição dos valores de MR e RT encontrados no presente trabalho também foram obtidos em outros estudos que, assim, corroboraram os resultados da presente pesquisa (PINHEIRO, 2004; MOMM e SALINI, 2000; e GALLEGO et al., 2000).

4.2.4 Relação MR/RT

A relação MR/RT foi utilizada, por muito tempo, para a visualização da compatibilidade entre rigidez e resistência à tração da mistura asfáltica; misturas muito rígidas necessitam de uma alta resistência à tração devido a concentração de esforços em seu interior. A Figura 4.9 apresenta a relação MR/RT para as misturas com adição somente de óleo ou de borracha. Os dados referentes a esse ensaio estão detalhados no Apêndice E.

Figura 4.9 Relação MR/RT das misturas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha

A adição de óleo nas misturas proporcionou a diminuição da relação MR/RT, conforme apresenta a Figura 4.9 (a). Cabe ressaltar que em comparação aos demais teores, o teor de 6,5%, apresentou a menor diferença absoluta na relação MR/RT (aproximadamente 4%)

quando aumentada a proporção de 7% para 14% de óleo na mistura. De maneira similar às demais propriedades analisadas anteriormente, não há uma tendência definida quanto ao comportamento da relação MR/RT com o aumento do teor de ligante asfáltico.

A Figura 4.9 (b) mostra os dados referentes à relação MR/RT das misturas com adição de borracha. Pode-se observar que em alguns teores de asfalto, 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,5%, as misturas com adição de 9% de borracha apresentaram valores superiores da relação MR/RT em relação aos valores da de referência. Apenas no teor de 6,0% essa mistura apresentou redução dessa relação (9% de redução). Na mistura com adição de 18% de borracha nota-se a redução da relação MR/RT para os teores de 5,0% e 6,0%, com diminuição de 22% e 14%, respectivamente. No teor de 4,5% observa-se um aumento de 9% no valor da relação, enquanto que nos teores de 5,5% e 6,5% não ocorreu uma mudança nos valores quando comparados aos da mistura de referência. Com o aumento da proporção de 9% para 18% de borracha na mistura, somente no teor de 4,5% nota-se um aumento da relação MR/RT; nos demais teores observa-se redução nos valores.

Figura 4.10 Relação MR/RT das misturas: com adição de óleo e borracha

Os dados referentes à relação MR/RT das misturas com a adição dos dois componentes (óleo e borracha) estão apresentados na Figura 4.10. A adição dos dois modificadores nas misturas proporciona menores valores na relação MR/RT quando comparados aos da mistura de referência. Quando comparada às outras misturas modificadas, a mistura 77-9-14 apresentou as menores reduções dessa relação, com exceção dos teores de 6,0% e 6,5%. A mistura com adição de altas concentrações de óleo e de borracha apresentou os menores valores dessa

relação somente nos teores de 4,5% e 5,0%, proporcionando com reduções de 19% e 40%, respectivamente.

Para a relação MR/RT pode-se mencionar que a adição de óleo faz com que essa relação diminua. Já para a incorporação de borracha o efeito, em geral, é contrário, aumentando essa relação. As misturas com adição dos dois componentes apresentaram redução da relação MR/RT em todos os casos. Cabe ressaltar que os valores encontrados para a relação MR/RT, em todas as misturas, são superiores a 3000.

4.2.5 Recuperação Retardada

A recuperação retardada (RR) representa a porção da recuperação do ciclo de repouso, no qual se encontra mobilizada a recuperação visco-elástica, conforme definido por Furlan (2006). Na Figura 4.11 são mostradas as RR das misturas com adição de óleo ou borracha. Maiores detalhes desse parâmetro estão expostos no Apêndice F.

Figura 4.11 Recuperação retardada das misturas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha

Observa-se através da Figura 4.11 (a) que a adição de óleo nas misturas proporciona um aumento na recuperação retardada. Esse parâmetro apresentou uma variação de 6% (na mistura com adição de 7% de óleo, no teor de 4,5% de ligante) a 18% (na mistura com adição de 14% de óleo, nos teores de 4,5% e 5,0% de ligante). Nota-se o aumento da recuperação retardada quando se aumenta a proporção de 7% para 14% de óleo. A adição de óleo

proporciona uma redução da parcela elástica da mistura, portanto, apresenta uma deformação elástica instantânea menor, o que justifica o aumento da recuperação retardada.

Os dados referentes às misturas com adição de borracha são mostrados na Figura 4.11 (b). Nela pode-se notar que a adição de borracha na mistura propicia uma diminuição da recuperação retardada, com exceção da mistura com adição de 9% de borracha nos teores de 4,5%, 5,0% e 6,0%. O valor desse parâmetro variou de 1% (na mistura com adição de 9% de borracha, no teor de 5,5%) a 18% (na mistura com adição de 18% de borracha, no teor de 5,5%). Uma possível explicação para esse comportamento contrário ao da adição do óleo pode se basear no fato que a adição da borracha na mistura asfáltica a torna mais elástica, proporcionando um aumento no valor da deformação elástica instantânea e, conseqüentemente, uma diminuição no valor da recuperação retardada.

Figura 4.12 Recuperação retardada das misturas com adição de óleo e borracha

Pode-se observar da Figura 4.12 que a adição dos dois modificadores propicia um aumento da recuperação retardada. Nota-se que no teor de 4,5% apenas a mistura com adição de altas concentrações dos modificadores teve um aumento significativo do parâmetro, apresentando uma variação de 11%. As misturas com adição de altas concentrações de modificadores apresentaram os maiores valores da RR, seguidas pela mistura com adição de valores intermediário de borracha e alto de óleo, e pelas mistura com concentrações alta de borracha e intermediária de óleo. Cabe ressaltar que a adição somente de óleo apresenta os maiores valores de recuperação retardada quando comparados com os das demais misturas analisadas.

Ao analisar o parâmetro da recuperação retardada pode-se concluir que borracha e óleo proporcionam efeitos contrários, sendo que a adição de óleo proporciona o aumento da RR enquanto a adição da borracha propicia a sua diminuição, quando comparados aos valores da mistura de referência.

4.3 Propriedades das misturas pós-condicionamento

A apresentação dos resultados será de maneira similar à utilizada no item 4.2. Para melhor compreensão serão comparados dados das misturas pré-condicionadas e pós-condicionadas. A apresentação, de forma geral, será realizada através do gráfico de relação de resistência à tração (RRT), que representa a taxa de retenção dessa propriedade depois de realizado o condicionamento, e do gráfico que apresenta a relação de módulo de resiliência (RMR) que, da mesma maneira que a RRT, representa a retenção dessa propriedade após o condicionamento. Os demais dados referentes a esses ensaios estão apresentados no Apêndice G.

4.3.1 Módulo de Resiliência pós-condicionamento

A Figura 4.13 mostra os dados referentes ao módulo de resiliência das misturas condicionadas e não condicionadas. Os demais dados então apresentados na Tabela G1 no apêndice G.

Figura 4.13 MRt das misturas condicionadas e não-condicionadas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha

Considerando os dados apresentados na Figura 4.13 (a), observa-se que o módulo de resiliência das misturas com adição de óleo diminuiu após o condicionamento, com exceção de três misturas, a saber: mistura de referência, no teor de 5,5%, que apresentou um aumento de 14% na propriedade, mistura com adição de 7% de óleo, no teor de 5,0%, com aumento de 5% nessa propriedade e na mistura com adição de 14% de óleo, no teor de 5,0%, com variação de 2% na propriedade. Nota-se maior redução do módulo de resiliência na mistura com adição de 14% de óleo, que proporcionou uma redução de 37% nessa propriedade.

Na Figura 4.13 (b) são apresentados os dados referentes ao módulo de resiliência das misturas com adição de borracha. Percebe-se que as misturas com adição de borracha tiveram uma diminuição no valor do módulo depois de realizado o condicionamento. As reduções nos valores dessa propriedade variaram de 27% (redução encontrada nas misturas com adições de 9% e 14%, nos teores de 5,5% e 5,0%, respectivamente) a 48% na mistura com adição de 9% de borracha no teor de ligante asfáltico de 4,5%.

Figura 4.14 MRt das misturas condicionadas e não-condicionadas com adição de óleo e borracha

Os dados apresentados na Figura 4.14 concordam com os anteriores. Observa-se que as misturas com adição dos modificadores exibem perda de propriedade em todos os casos. A maior perda é observada na mistura com adição de altas concentrações dos dois componentes, 14% de óleo e 18% de borracha, com diminuição de 52% no valor da propriedade. No entanto, a mistura de referência no teor de 5,5% apresentou ganho de rigidez após o condicionamento.

Para melhor visualizar o comportamento das misturas estudadas, na Figura 4.15, são apresentadas as relações de módulo de resiliência (RMR). Os detalhes desses dados estão apresentados na Tabela G2 no apêndice G. Foi utilizado um valor de RMR=70% para definir uma linha hipotética de suscetibilidade, como já utilizado por Furlan (2006). Essa linha é adicionada ao gráfico para visualizar as misturas suscetíveis e não suscetíveis aos danos por umidade.

Figura 4.15 Relação de módulo de resiliência (RMR) das misturas estudadas

Da Figura 4.15 pode-se observar que o efeito do condicionamento nas misturas asfálticas propiciou, na maioria dos casos, uma diminuição da sua rigidez, expressa na diminuição dos valores de módulo de resiliência. No entanto, observa-se o comportamento contrário de algumas misturas, como por exemplo, com adição de 7% de óleo que apresentou aumento do módulo após o condicionamento.

4.3.2 Resistência à Tração pós-condicionamento

A Figura 4.16 apresenta uma comparação entre os valores de resistência à tração das misturas pré-condicionamento e pós-condicionamento.

Figura 4.16 Resistência à tração das misturas condicionadas e não condicionadas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha

Como pode ser observado, na Figura 4.16 (a), ocorre uma queda dessa propriedade após o condicionamento. Nota-se que nos teores de 5,5%, 6,0% e 6,5% a mistura de referência apresentou maior resistência depois de condicionada. Esse mesmo comportamento é observado para a mistura com adição de 7% de óleo, no teor de 4,5%, com aumento de 3% na resistência. No entanto, a mistura com adição de 14% de óleo, no teor de 4,5%, apresentou o menor valor de resistência, com redução de 16% nessa propriedade.

Na Figura 4.16 (b) é possível observar que todas as misturas com adição de borracha tiveram os valores de resistência à tração reduzidos depois do condicionamento. A mistura com adição de 9% de borracha, no teor de 4,5%, apresentou o menor valor de resistência à tração (1,12MPa), com redução de 40% no valor da propriedade após o condicionamento. Pode-se destacar que o efeito da borracha é mais intenso que o do óleo, pois as misturas com adição de borracha apresentaram valores de resistência menores.

Figura 4.17 Resistência à tração das misturas condicionadas e não condicionadas com adição de óleo e borracha

Considerando que os efeitos do óleo e da borracha são similares, reduzindo a resistência à tração após o condicionamento, é razoável afirmar que os valores da resistência das misturas com adição dos dois modificadores sejam menores depois de realizado o condicionamento, conforme mostra a Figura 4.17. Apenas a mistura com adição de altas concentrações dos modificadores, no teor de ligante asfáltico de 6,5%, não sofreu alteração no valor da resistência.

Para visualizar os comportamentos das misturas estudadas, na Figura 4.18 são mostradas as relações de resistência à tração (RRT) e a linha de suscetibilidade em RRT=70%, como realizado anteriormente para a RMR.

Figura 4.18 Relação de resistência à tração (RRT) das misturas asfálticas estudadas

Através da Figura 4.18 pode-se observar o comportamento de cada mistura asfáltica em consequência do condicionamento. Quanto ao dano por umidade induzida pode-se dizer que as misturas com adição de óleo foram menos suscetíveis ao condicionamento. As misturas com adição de borracha foram pouco suscetíveis ao condicionamento, com exceção da mistura com teor de ligante asfáltico de 4,5%. Para as misturas com adição dos dois modificadores apenas a mistura com proporções altas de óleo e borracha, nos teores de 4,5% a 5,5%, foi mais suscetível ao dano por umidade.

Se fosse considerada a taxa mínima de retenção de resistência à tração de 70%, as misturas estudadas que seriam consideradas suscetíveis ao dano por umidade seriam:

- Mistura com adição de 9% de borracha no teor de ligante asfáltico de 4,5%;
- Mistura com adição de 18% de borracha e 7% de óleo, no teor de 5,5%; e
- Mistura com adição de altas concentrações dos dois componentes (18% e 14%), nos teores de 4,5%, 5,0% e 5,5%. Cabe ressaltar que as misturas no teor de 5,0% e 5,5% apresentam as maiores perdas da propriedade

4.3.3 Recuperação retardada

Os dados referentes à recuperação retardada das misturas depois de condicionadas estão apresentados na Figura 4.19.

Figura 4.19 Recuperação retardada das misturas condicionadas e não condicionadas: (a) adição de óleo e (b) adição de borracha

Observa-se da Figura 4.19 (a) que depois do condicionamento das misturas com adição de óleo apresentaram, de maneira geral, aumento no valor da recuperação retardada, com exceção das misturas com teor de 5,0 % de ligante asfáltico. Para as misturas com adição de borracha, conforme mostra a Figura 4.19 (b) nota-se que ocorre aumento da recuperação retardada em todas as misturas.

Figura 4.20 Recuperação retardada das misturas condicionadas e não condicionadas com adição de óleo e borracha

A Figura 4.20 mostra os resultados referentes à recuperação retardada das misturas com adição dos dois componentes. Pode-se notar que com exceção da mistura com concentrações altas de borracha e óleo (68-18-14), as demais apresentaram maiores valores de recuperação retardada para todos os teores de ligantes estudados.

4.4 Análise Estatística dos Resultados

O objetivo item e dos subsequentes é apresentar os procedimentos adotados para a análise estatística dos resultados ensaiados. A análise foi baseada no estudo de modelos estatísticos lineares polinomiais, do tipo cúbico especial, efetuado mediante o pacote estatístico Minitab versão 15.1. Com base nos modelos obtidos foram gerados gráficos de superfície de resposta e efeito de componentes pelo pacote estatístico, os quais são analisados.

4.4.1 Procedimento de Análise

O delineamento do experimento e a análise estatística pressupõem que o agregado mineral é um material inerte e que a variabilidade das propriedades obtidas das misturas asfálticas está, exclusivamente, atrelada às variações nas proporções dos componentes dos ligantes asfálticos. Os resultados obtidos são empregados no ajuste de modelos polinomiais voltados para a modelagem de problemas com misturas, os quais descrevem a variabilidade de uma propriedade em função das variações nas proporções dos componentes das misturas.

A avaliação das propriedades é realizada através dos gráficos de efeito de componentes e de superfícies de resposta. São delimitadas áreas do espaço amostral, baseadas em especificações de ligantes asfálticos não-modificados, que determinem amostras de misturas asfalto-borracha-óleo que atendem aos requisitos dessas especificações. A opção por modelos lineares do tipo polinomial foi escolhida pois o estudo em questão é típico de experimentos com misturas, que são normalmente modelados por polinômios (CORNELL, 2002). Um modelo polinomial do tipo cúbico especial é composto de sete termos que descrevem as interações entre os componentes, permitindo uma descrição detalhada dos efeitos das variações desses componentes.

O modelo empregado na regressão, denominado modelo cúbico especial, com o formato geral é indicado na equação 4.1.

$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i^0 x_i + \sum_{i < j}^q \beta_{ij}^0 x_i x_j + \beta_{ijk}^0 x_i x_j x_k \quad (4.1)$$

com $i, j, k = 1, 2, \dots, q$, sendo q o número de componentes da mistura, β_i , β_{ij} e β_{ijk} as estimativas dos coeficientes dos termos x_i , x_{ij} e x_{ijk} , respectivamente, x_i , x_j e x_k correspondentes aos teores de CAP, de borracha e de óleo, respectivamente.

Como citado anteriormente, os resultados da análise estatística são avaliados através dos gráficos das superfícies de resposta e de efeito dos componentes. Os gráficos de superfície de resposta mostram a relação entre a resposta e os componentes da mistura. A superfície de resposta denota um plano bidimensional, no qual os pontos que apresentam o mesmo nível resposta estão conectados formando curvas de nível. Esse tipo de gráfico é uma ferramenta

que possibilita determinar as regiões em que o resíduo de óleo de xisto pode ser empregado juntamente com a borracha, funcionando como óleo extensor.

O efeito que cada componente, isoladamente, tem sobre a resposta é representado pelo gráfico de efeito dos componentes. Esse tipo de gráfico mostra o efeito da variação da proporção de um dado componente, mantendo a relação entre os demais constantes, ou seja, ao avaliar o efeito da variação do óleo, as proporções de asfalto e borracha na mistura também variam, porém, a relação entre eles se mantém constante. Cada linha no gráfico indica o efeito de mudar o componente correspondente em uma linha imaginária (direção) conectando a mistura de referência (normalmente o centróide da região experimental) ao vértice da região experimental e a mistura de referência ao lado oposto ao vértice.

Cabe ressaltar que a análise realizada nos gráficos de efeito de componentes é apenas uma dentre as muitas possibilidades de análise (direções). No presente trabalho, foi escolhida a direção correspondente à reta ligando o vértice ao lado oposto da região experimental, passando pelo centróide da região delimitada. Esse gráfico permite identificar o componente que mais influencia a resposta. A faixa de variação da proporção dos componentes é indicada pela amplitude horizontal. A intensidade do efeito da variação da proporção do componente na mistura sobre a propriedade analisada é indicada pela amplitude vertical. Uma forma rápida de análise poderia ser através da análise da porcentagem de cada componente aumentando da direita para a esquerda, dentro da sua faixa de variação.

É preciso entender que a análise de efeitos de componentes exposta por este tipo de gráfico é apenas uma dentre muitas possibilidades de análise (várias direções). A direção escolhida, nesta análise, corresponde à reta ligando o vértice ao lado oposto da região experimental, passando pela mistura de referência, que, neste caso, é o centróide das regiões delimitadas nas Figuras 3.1 e 3.2. Esse tipo de gráfico pode ser empregado para identificar o componente que influencia mais a resposta. A amplitude horizontal indica a faixa de variação da proporção dos componentes, nos limites indicados no delineamento do experimento, partindo da mistura de referência para +50% da faixa de variação e para -50% desta faixa. A amplitude vertical indica a intensidade do efeito da variação da proporção do componente na mistura sobre a propriedade. Uma maneira mais rápida de analisar os efeitos é ver a porcentagem de cada

componente aumentando da direita para a esquerda, dentro da sua respectiva faixa de variação.

Para interpretação do gráfico de efeito de componentes é importante ressaltar que:

- os componentes são interpretados em relação à mistura de referência;
- os componentes que apresentarem curvas com maior inclinação são os que apresentam maior efeito na resposta;
- os componentes que apresentam faixas amplas de ocorrência (limite superior –limite inferior) apresentarão curvas mais extensas, porém os que apresentarem faixas mais restritas apresentarão curvas mais curtas;
- o efeito total de um componente depende da sua faixa de ocorrência e da inclinação da curva correspondente;
- os componentes que apresentam curvas horizontais não causam nenhum efeito sobre a resposta;
- os componentes com curvas semelhantes causam efeitos semelhantes sobre a resposta.

É importante destacar que os modelos apresentados são limitados ao tipo de ligante asfáltico, de borracha moída e de resíduo de óleo de xisto empregados, assim como às condições experimentais adotadas neste estudo.

4.5 Análise estatística das propriedades das misturas asfálticas não condicionadas

Esta subseção tem por finalidade apresentar os resultados referentes à análise estatística dos dados obtidos no monitoramento das propriedades mecânicas das misturas. Serão apresentados os gráficos de efeito de componentes e de superfície de resposta juntamente com os modelos de regressão. Cabe ressaltar que, devido à quantidade de gráficos realizados para todos os cinco teores, optou-se por apresentar, nesta seção, apenas os referentes ao teor de ligante asfáltico de 5,5%, sendo que, a maioria das misturas apresentou, neste teor, volume de vazios próximos a 4%.

4.5.1 Superfície de Resposta e Efeito de componentes

4.5.1.1 Parâmetros volumétricos, estabilidade e fluência

A Figura 4.21 mostra os gráficos de superfície de resposta e efeito de componentes para a densidade aparente.

Figura 4.21: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para densidade aparente

Pode-se observar da Figura 21 (a) que os valores mais altos de densidades são obtidos quando empregados ligantes asfálticos com teores baixos de borracha e intermediários a altos de óleo. Quanto ao efeito dos componentes nota-se, através da Figura 21 (b), que o asfalto tem efeito parabólico sobre esse parâmetro, tendo seu ponto de máximo aproximadamente em 87%. O efeito da borracha, por sua vez, reduz a densidade aparente de forma linear, e o óleo apresenta efeito parabólico com ponto de máximo em torno de 8%. Para a condição particular em que estes gráficos são gerados, é possível obter aumento da densidade aparente aumentando a concentração de óleo na composição, até teores de 8%. No caso do efeito da borracha, o aumento da porcentagem de borracha reduz a densidade aparente.

Os gráficos referentes ao volume de vazios estão apresentados na Figura 4.20, a seguir.

Figura 4.22: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para o volume de vazios

A superfície de resposta, conforme mostra a Figura 4.22 (a), indica que as composições de dentro da região experimental com concentrações de valores baixos e intermediários de borracha e óleo proporcionam misturas asfálticas que atendem o requisito de volume de vazios (3% a 5%), da especificação DNIT 031/2006. Através da Figura 4.22 (b) nota-se que o asfalto reduz esse parâmetro dependendo da proporção utilizada. A borracha tende a aumentar o volume de vazios à medida que se adiciona o componente na mistura, enquanto o óleo tem efeito parabólico, apresentando ponto de mínimo em torno de 11%.

As análises referentes ao VAM estão baseadas nos gráficos mostrados na Figura 4.23. A Figura 4.23(a) indica que todas as composições de dentro da região experimental propiciam misturas asfálticas que atendem o requisito de VAM mínimo de 16%, da especificação de serviço DNIT 031/2006. O gráfico de efeito de componente, Figura 4.23 (b), mostra que o asfalto proporciona efeito parabólico, apresentando ponto de mínimo em aproximadamente 88%, enquanto a borracha apresenta comportamento linear, proporcionando o aumento desse parâmetro e o óleo tem efeito parabólico, diminuindo o VAM para concentrações entre 0 e 7% e o aumentando a partir desta concentração.

Figura 4.23: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para o VAM

A Figura 4.24 mostra os gráficos de superfície de resposta e efeito de componentes para a relação betume-vazios no teor de 5,5% de ligante.

Figura 4.24: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para RBV

Conforme ilustra a Figura 4.24 (a), a superfície de resposta mostra que todas as composições de misturas, exceto as com altas concentrações dos dois componentes, produzem misturas que atendem o requisito de relação betume-vazios (75 a 82%), DNIT 031/2006. Quanto ao efeito dos componentes, pode-se observar através da Figura 4.24 (b) que o asfalto tem efeito parabólico, apresentando ponto de máximo em torno de 90%. A borracha tende a reduzir a

relação betume-vazios, enquanto que o óleo produz efeito parabólico com ponto de máximo aproximadamente em 7%.

Apesar de não apresentarem bons ajustes, em parte por causa do número reduzido de amostras, foi realizada a análise dos gráficos referente aos valores de fluência, conforme mostra a Figura 4.25.

Figura 4.25: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para fluência

Nota-se da Figura 4.25 (a) que todas as composições apresentam misturas que atendem o requisito da especificação do ES-P 28/05 DER/PR para asfalto-borracha, com intervalo de 2,0 a 4,1 mm. Observa-se também que a borracha proporciona um efeito pouco efetivo sobre a fluência, enquanto o efeito do óleo é mais intenso. Quanto ao efeito de cada componente, a Figura 4.25 (b) mostra que todos apresentam efeito linear, no entanto, asfalto e óleo apresentam comportamento contrário, aumentando e diminuindo a fluência, respectivamente. Contudo, a borracha não apresentou um efeito significativo.

Os resultados em relação à estabilidade das misturas asfálticas estão apresentados nos gráficos da Figura 4.26.

Figura 4.26: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para estabilidade

A superfície de resposta, conforme a Figura 4.26 (a), mostra que todas as composição internas à região experimental atendem o requisito da especificação DNIT 031/2006 para a estabilidade Marshall (estabilidade mínima de 5,0 kN). Misturas com proporções altas de óleo e independente de borracha apresentam os menores valores de estabilidade. O gráfico 4.26 (b) aponta o efeito dos componentes, no qual, o asfalto apresentou efeito parabólico com ponto de máximo em torno de 85%. A borracha e o óleo mostram efeito linear, porém, distintos. A primeira aumenta e o segundo diminui a propriedade com o aumento da concentração dos componentes na mistura.

Os modelos de regressão para cada um dos parâmetros analisados estatisticamente estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Modelos de regressão referente às propriedades monitoradas

propriedade	Modelo de regressão	R ² (%)	n
D _{ap} 5,5%	$= 2,48x_1 + 2,54x_2 - 0,57x_3 + 3,97x_1x_3$	71,66	54
V _v 5,5% (%)	$= 4x_1 - 105x_2 - 3x_3 + 138x_1x_2 + 1465x_2x_3 - 1753x_1x_2x_3$	89,73	55
VAM 5,5% (%)	$= 18,5x_1 + 16,2x_2 + 119,4x_3 - 131,5x_1x_3$	71,57	54
RBV 5,5% (%)	$= 74,2x_1 + 69,8x_2 - 399,3x_3 + 759,9x_1x_3 + 612,2x_1x_3$	78,35	54
F 5,5% (mm)	$= 3,88x_1 + 3,56x_2 + 0,45x_3$	39,22	16
E 5,5% (kN)	$= 13,88x_1 + 61,06x_2 - 285,458x_3 + 338,167x_1x_3$	27,38	16

x_1 : porcentagem de CAP; x_2 : porcentagem de borracha; x_3 : porcentagem de óleo

4.5.1.2 Módulo de Resiliência não-condicionado

A análise da variação do módulo de resiliência também é realizada com o auxílio dos gráficos de superfície de resposta e de efeito de componentes, como mostra a Figura 4.27, para os módulos totais calculados pelo método NCHRP, na temperatura de 25°C.

Figura 4.27: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para MRt NCHRP

A Figura 4.27 (a) indica que os valores mais altos de módulo são obtidos para concentrações baixas a intermediárias de borracha e baixas de óleo (parte superior da região experimental), enquanto os valores baixos de módulos estão localizados na região que figuram misturas com teores altos de borracha e de óleo. Observa-se também que para pequenas concentrações de borracha não ocorre mudanças significativas nos valores dos módulos.

Pode-se perceber da Figura 4.27 (b) que o óleo propicia efeito contrário ao do asfalto, diminuindo de forma aproximadamente linear essa propriedade. A borracha apresenta um comportamento parabólico, com ponto de máximo em torno de 8%. Cabe ressaltar que o comportamento dos componentes sobre o módulo de resiliência instantâneo é o mesmo, porém os valores são maiores.

4.5.1.3 Resistência à tração não-condicionada

A Figura 4.28 apresenta os gráficos para a resistência à tração não condicionada. A Figura 4.28 (a) mostra a superfície de resposta para a resistência à tração sem condicionamento. Segundo a especificação do DNIT 031/2006, o valor para RT deve ser no mínimo de 0,65 MPa, sendo assim, pode-se observar que todas as composições dentro da região experimental atendem esse requisito, pois apresentam valores superiores ao estabelecido pela especificação. O gráfico que representa o efeito dos componentes é apresentado na Figura 4.28 (b), onde observa-se que o asfalto tende a aumentar a resistência à tração, enquanto a borracha e o óleo proporcionam uma diminuição nessa propriedade, sendo que, o efeito do óleo é mais intenso que o da borracha na redução da resistência à tração.

(a)

(b)

Figura 4.28: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para RT

4.5.1.3 MRt/RT não condicionado

Os gráficos de superfície de resposta e efeito de componentes referentes à relação do módulo de resiliência e resistência à tração são representados na Figura 4.29 (a) e (b), respectivamente.

Figura 4.29: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para MRt/RT

A literatura indica que misturas asfálticas compostas com ligantes não-modificados apresentam boas propriedades mecânicas quando possuem valores próximos de 3000 para a relação MRt/RT (Pinheiro et al, 2003), porém, observa-se que os valores das misturas de dentro da região experimental apresentam valores superiores a 3000. Em relação ao efeito dos componentes é possível notar, através da Figura 4.29 (b), que o asfalto apresenta um efeito parabólico tendo ponto de máximo em torno de 93%. A tendência do óleo é de reduzir linearmente a relação MRt/RT, enquanto o efeito da proporção de borracha é parabólico, com ponto de máximo em torno de 9%.

4.5.1.4 Recuperação retardada

A Figura 4.30 mostra os gráficos de superfície de resposta (a) e efeito de componentes (b) para o parâmetro recuperação retardada das misturas estudadas.

Figura 4.30: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para RR

Pode-se observar da Figura 4.30 (a) que os maiores valores de recuperação retardada estão localizadas na região em que figuram misturas com quaisquer concentrações de borracha e concentrações baixas de óleo, enquanto os menores valores se encontram na combinação de qualquer quantidade de borracha e altas concentrações de óleo. O gráfico de efeito dos componentes 4.30 (b) mostra que o aumento da concentração de asfalto tende a diminuir a recuperação retardada. A tendência do óleo é aumentar esse parâmetro com efeito aproximadamente linear e pequeno nos teores altos, enquanto a borracha proporciona uma diminuição.

Os modelos de regressão referentes às propriedades mecânicas das misturas estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Modelos de regressão referente às propriedades monitoradas

propriedade	modelo de regressão	R ² (%)	n
M _t NCHRP 5,5% (MPa)	$= 16029x_1 - 137346x_2 + 150763x_3 + 169688x_1x_2 - 228335x_1x_3$	91,5	55
RT 5,5% (MPa)	$= 2,865x_1 - 0,311x_2 - 4,153x_3$	82,2	16
MRt/RT 5,5%	$= 5.450x_1 - 120.991x_2 - 6.732x_3 - 153.242x_1x_2 + 442.419x_1x_3 - 369.475x_1x_2x_3$	71,6	54
RR 5,5%	$= 0,253x_1 + 0,079x_2 - 1,709x_3 + 2,491x_1x_3 + 3,497x_2x_3$	77,6	56

x_1 : porcentagem de CAP; x_2 : porcentagem de borracha; x_3 : porcentagem de óleo

4.6 Análise estatística das propriedades das misturas asfálticas condicionadas

Em função da não saturação de uma parte dos corpos-de-prova nos teores de ligantes asfáltico de 5,5, 6,0 e 6,5%, como já mencionado no capítulo anterior, as propriedades e relações dependentes das amostras condicionadas não puderam ser modeladas. Portanto, as propriedades referentes à umidade induzida são apresentadas no teor de 5,0%.

4.6.1.1 Módulo de Resiliência condicionado

As Figuras 4.31 (a) e (b) mostram as superfícies de repostas e efeito de componentes para o módulo de resiliência total para o teor de 5,0%. No gráfico de superfície de resposta, Figura 4.31 (a) observa-se que a variação do módulo, alterando as proporções dos componentes, é linear. Módulos mais baixos são encontrados na região em que figuram composições com proporções altas tanto de borracha quanto de óleo; no entanto, os módulos mais altos são observados na região em que figuram composições com proporções baixas tanto de borracha quanto de óleo.

Figura 4.31: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para MRt NCHRP condicionado

Quanto ao efeito de componentes, a Figura 4.31 (b) mostra que a tendência do asfalto é aumentar o valor do módulo pós condicionamento, enquanto a borracha e o óleo possuem efeitos similares, proporcionando redução linear do módulo e com mesma intensidade.

4.6.1.2 Resistência à tração condicionada

Os gráficos de superfície de resposta e efeito de componentes estão apresentados na Figura 4.32 (a) e (b). Do gráfico de superfície de resposta nota-se que a variação da resistência à tração é linear. Resistências mais baixas são encontradas na região em que figuram composições com proporções altas tanto de borracha quanto de óleo, porém as altas resistências são observadas na região com composição com proporções baixas tanto de borracha quanto de óleo. Cabe ressaltar que todas as composições que estão dentro da região experimental atendem o requisito estabelecido pela especificação DNIT 031/2006 de apresentarem valores de resistência à tração acima de 0,65MPa. O gráfico de efeito dos componentes, Figura 4.32 (b), mostra que a borracha e o óleo têm efeitos similares, reduzindo a resistência à tração linearmente. Nota-se que o efeito da borracha é ligeiramente maior que a do óleo.

Figura 4.32: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para RT condicionada

4.6.1.3 MRt/RT condicionada

A Figura 4.33 apresenta os gráficos de superfície de resposta e efeito de componentes para a relação MR/RT após o condicionamento.

Figura 4.33: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para MRt/RT condicionada

Observa-se que as misturas contidas na região experimental apresentam valores da relação MRt/RT superiores a 3000, sendo que os valores mais próximos a 3000 estão localizados na região em que figuram composições com concentrações baixas de borracha e de óleo. Quanto ao efeito dos componentes, nota-se que a tendência tanto da borracha quanto a do óleo é de reduzir a relação MRt/RT, sendo o efeito do óleo mais intenso do que o da borracha.

4.6.1.4 Recuperação retardada condicionada

Os gráficos referentes à recuperação retardada após condicionamento dos corpos-de-prova são apresentados na Figura 4.34 (a) e (b). O gráfico da superfície de resposta mostra que os menores valores de recuperação retardada estão na região com concentrações baixas e intermediárias tanto de borracha quanto de óleo. Nota-se também que não ocorre muita variação no valor da RR na região experimental. Na Figura 4.34 (b) observa-se que a tendência do óleo é aumentar o valor da recuperação retardada, enquanto a borracha apresenta

um comportamento parabólico com aumento dessa relação entre 0 e 8% e redução entre 8 e 18% de concentração de borracha.

Figura 4.34: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para RR condicionada

4.6.1.5 Relação RMR

Os gráficos referentes à superfície de resposta e efeito dos componentes da relação RMR estão apresentados na Figura 4.35.

Figura 4.35: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para relação RMR

A superfície de resposta para esta relação indica que as composições que proporcionam maiores valores de RMR são caracterizadas por concentrações baixas de borracha e intermediárias de óleo. Observa-se através do gráfico de efeito de componentes que a borracha reduz esta relação para concentração entre 0 e 13% e a aumenta para teores entre 13 e 18%. O aumento da concentração de borracha prejudica a resistência ao efeito da água em termos de variação de módulo de resiliência. O óleo também apresenta efeito parabólico, porém contrário ao da borracha, com ponto de máximo em torno de 7%. O aumento da concentração de óleo aumenta a resistência ao efeito da água, em termos da retenção do módulo de resiliência.

4.6.1.6 Relação RRT

A Figura 4.36 (a) apresenta a superfície de resposta da relação RRT. Nela percebe-se que as composições que proporcionam maiores valores da relação RRT estão localizadas na região com baixas concentrações de borracha e intermediárias a altas de óleo. Considerando o limite mínimo da RRT de 70%, seriam admissíveis as misturas com composição contendo quaisquer proporções de borracha, para concentrações intermediárias a baixas de óleo, ou concentrações de intermediárias e altas de borracha e óleo.

Figura 4.36: Superfície de resposta (a) e efeitos dos componentes (b) para relação RMR

A Figura 4.36(b) apresenta o efeito dos componentes sobre esta relação. Observa-se que a tendência da borracha é reduzir essa relação, enquanto o óleo apresenta um efeito parabólico com ponto de máximo em torno de 8%, ou seja, o aumento da concentração de óleo de 0 a 8% proporciona um aumento da relação e, para concentrações de 8 a 14% a reduz.

Os modelos de regressão das propriedades das misturas condicionadas estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 4.7 Modelos de regressão referentes às propriedades das misturas condicionadas

propriedade	modelo de regressão	R ² (%)	n
M _t NCHRP 5,0% (MPa)	$=13.836x_1 - 20.564x_2 - 23.751x_3$	90,7	23
RT 5,0% (MPa)	$=2.499x_1 - 2.822x_2 - 2.247x_3$	82,7	23
MRt/RT 5,0%	$=5.802x_1 + 139x_2 - 3.921x_3$	78,9	23
RR 5,0%	$=0,257x_1 - 0,141x_2 + 0,421x_3 + 0,524x_1x_2$	62,0	23
RMR 5,0%	$=76x_1 + 1,464x_2 - 2.614x_3 - 1.760x_1x_2 + 3.304x_1x_3$	85,7	23
RRT 5,0%	$=87,8x_1 - 7,8x_2 - 542,9x_3 + 815,7x_1x_3$	95,6	22

x_1 : porcentagem de CAP; x_2 : porcentagem de borracha; x_3 : porcentagem de óleo

4.7 Comentários Finais

Em suma, pode-se observar que o efeito da borracha é pouco efetivo na fluência, no entanto, ocorre aumento na estabilidade. A borracha tende a reduzir o módulo de resiliência, desde que sejam empregados teores de intermediários a altos. Nas misturas condicionadas observa-se a redução do módulo de resiliência com a adição de borracha. Na temperatura de 25°C, nas misturas condicionadas e não-condicionadas, a adição de borracha também reduz a resistência à tração. Já a recuperação retardada, para concentrações até 8%, reduz com adição da borracha.

Constatou-se que, a adição de óleo proporciona a redução da fluência e da estabilidade das misturas. Da mesma maneira, o efeito do óleo, nas misturas condicionadas e não condicionadas, é reduzir o módulo de resiliência, a resistência à tração, entretanto, a adição de óleo proporciona o aumento da recuperação retardada.

Através dos gráficos de superfície de resposta, observa-se que, as misturas dentro da região experimental atendem as especificações do DNIT 031/2006 ES e do ES-P 28/05 DER/PR, com exceção de misturas com altas concentrações dos dois modificados. Sendo assim, percebe-se a possibilidade de se estabelecer proporções adequadas de óleo e borracha visando melhorar as características das misturas, e atender, ao mesmo tempo, as especificações vigentes.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo analisar o efeito da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas em misturas asfálticas densas. O experimento englobou ensaios de laboratório com 8 misturas diferentes, a fim de coletar dados para a modelagem estatística de algumas propriedades mecânicas. Foram realizadas modelagens das propriedades mecânicas antes e após o ensaio de umidade induzida. Com base nos modelos de regressão, foram gerados gráficos de superfície de resposta e de efeito de componentes, empregados na avaliação dos efeitos principais e de interação entre os componentes.

5.1 Parâmetros Marshall

Em relação aos parâmetros Marshall, observou-se que a adição de óleo e de borracha nas misturas, de maneira geral, proporciona um aumento da densidade aparente. Quanto ao volume de vazios, nota-se um comportamento antagônico dos modificadores, sendo que o óleo propicia a sua redução, enquanto a adição de borracha tende a aumentá-lo. Cabe ressaltar que os maiores valores de volume de vazios são apresentados pelas misturas com altas concentrações de óleo e de borracha.

A adição tanto de óleo quanto de borracha proporciona uma redução nos vazios de agregado mineral (VAM), sendo que, os maiores valores são encontrados nas misturas com altas concentrações dos dois modificadores. Com respeito à relação betume-vazios (RBV), a adição do óleo e da borracha são antagônicos, ou seja, o óleo tende a aumentar esse parâmetro enquanto a borracha o diminui. Os menores valores desse parâmetro são apresentados pelas misturas com altas concentrações de óleo e borracha, ao passo que os maiores valores são verificados nas misturas com concentrações altas de óleo e intermediárias de borracha.

Os dois modificadores apresentam efeitos antagônicos em relação à estabilidade das misturas. Observa-se uma redução da estabilidade com adição de óleo e um aumento com adição da borracha. Contudo, óleo e borracha apresentam mesmo efeito na fluência, reduzindo o valor dessa propriedade.

5.2 Propriedades Mecânicas (misturas não condicionadas)

Quanto ao valor do módulo de resiliência, pode-se dizer que a adição tanto de óleo quanto de borracha tende a diminuí-lo. Entretanto, o efeito do óleo é mais intenso do que o da borracha, sendo que misturas com adição de 14% de óleo apresentam redução dessa propriedade em até 75%.

A adição dos dois modificadores proporciona a diminuição da resistência à tração das misturas asfálticas. Também no caso da resistência à tração, o efeito do óleo é mais intenso do que da borracha, pois misturas com adição de 14% de óleo chegam a apresentar redução de 57% na RT, enquanto a maior redução encontrada nas misturas com adição de borracha é de 28%.

De forma geral, o efeito do óleo e da borracha na relação MR/RT é antagônico. A adição de óleo tende a reduzir essa relação enquanto a borracha proporciona o seu aumento. Cabe ressaltar que as misturas com adição dos dois componentes apresentam redução na relação MR/RT.

O efeito do óleo e da borracha é antagônico quanto à recuperação retardada. Misturas com adição de óleo apresentam valores de RR menores que a mistura de referência, ao passo que nas com adição de borracha verifica-se maiores valores de RR. Para misturas com a combinação dos dois componentes observam-se maiores valores de RR em relação à mistura de referência.

5.3 Propriedades pós-condicionamento

Depois de condicionadas, de forma geral, as misturas com adição tanto de óleo quanto de borracha apresentaram menores valores de módulo de resiliência, expressando perda de rigidez. Observa-se, de forma similar ao módulo, a redução da resistência à tração quando adicionados os modificados às misturas. Destaca-se que quando considerado o limite mínimo de RRT de 70%, nota-se que as misturas com adição de óleo são menos suscetíveis ao condicionamento. Observa-se que o condicionamento provocou aumento na recuperação retardada de todas as misturas modificadas, exceto para as misturas com altas concentrações de óleo e de borracha.

5.4 Conclusões obtidas da análise de superfícies de resposta

As principais conclusões obtidas da análise de superfície de resposta, em relação ao óleo de xisto e da borracha moída de pneu, para as propriedades com limites estabelecidos pelas especificações do DNIT 31/2006 e ES-P 28/05 DER/PR estão comentadas a seguir:

Parâmetros volumétricos: volumes de vazios de 3 a 5% são encontrados para todas as composições dentro da região experimental, exceto para misturas com altas concentrações de óleo e borracha, as quais apresentam valores superiores aos indicados pela especificação. Em relação ao volume de vazios do agregado mineral, o requisito mínimo de 16% é atendido por todas as misturas da região experimental. Quanto à relação betume-vazios, somente as misturas com altas concentrações de óleo e borracha não atenderam o limite de 70 a 82% da especificação DNIT 31/2006.

Estabilidade e Fluência: a estabilidade e a fluência atendem em todas as composições os limites especificados, de 5,0kN (especificação do DNIT 31/2006) e 2.0 a 4.0mm (ES-P 28/05 DER/PR), respectivamente.

Módulo de resiliência: Os valores maiores de módulos de resiliência na condição não-condicionado são encontrados nas composições com teores mais baixos de óleo e borracha, enquanto os valores mais baixos são obtidos para altas concentrações de óleo e borracha. Quando condicionados, os valores maiores de módulo são encontrados nas regiões com

baixas concentrações de óleo e borracha e valores baixos módulos são obtidos nas regiões com altas concentrações de óleo e borracha.

Resistência à tração: Em relação à resistência à tração, todas as composições dentro da região experimental apresentam valores superiores ao determinado pelas especificações do DNIT 31/2006 e ES-P 28/05 DER/PR, que é de 0,65 MPa.

Relação MR/RT: Todas as misturas da região experimental apresentaram valores dessa relação maiores que o valor de 3000, citado comumente pela literatura como desejável. O mesmo comportamento ocorre para relação MR/RT das misturas condicionadas; neste caso, valores próximos são encontrados na região com altas concentrações de óleo e borracha.

Recuperação retardada: Os maiores valores de recuperação retardada são verificados nas regiões com qualquer quantidade de borracha e até concentrações, aproximadamente, de 7% de óleo.

Relação RMR: Considerando, de maneira similar que a RRT de 70%, observa-se, com exceção de misturas com altas concentrações de óleo e borracha, que todas as misturas apresentam valores de RMR superiores a esse limite.

Relação RRT: Considerando o limite mínimo de RRT de 70%, seriam admissíveis todas as composições com exceção das com altas concentrações de óleo e borracha.

5.5 Conclusões obtidas da análise de efeito dos componentes

5.5.1 Borracha moída

Neste item serão apresentadas as principais conclusões da análise de efeito de componentes em relação à concentração de borracha moída:

Parâmetros volumétricos: em relação ao efeito de concentração de borracha moída pode-se dizer que o aumento da proporção de borracha, geralmente, implica na redução da densidade

aparente e da relação betume-vazios e no aumento do volume de vazios e dos vazios do agregado mineral.

Estabilidade e Fluência: A estabilidade e a fluência Marshall aumentam para as concentrações de 0 a 9% e reduzem para proporções de 9 a 18% de borracha.

Módulo de resiliência: Na temperatura de 25°C, a borracha tende a reduzir o valor do módulo de resiliência não-condicionado, desde que sejam empregados teores intermediários a altos, ou seja, concentrações acima de 8%. Após o condicionamento, a borracha mantém a tendência de reduzir o módulo de resiliência, porém linearmente.

Resistência à tração: A adição da borracha proporciona uma redução linear na resistência à tração não-condicionada; esta tendência se mantém após o condicionamento. Vale ressaltar que a análise após o condicionado foi realizada para o teor de ligante de 5,0%.

Relação MR/RT: A tendência global do efeito da proporção de borracha na relação MR/RT nas misturas antes do condicionamento é parabólica, com ponto de máximo em torno dos 9%, isto é, essa relação aumenta para proporções entre 0 a 9% e se reduz para proporções entre 9 a 18%. A tendência global do efeito da borracha sobre essa relação para as misturas após o condicionamento é similar à obtida para as misturas antes do condicionamento.

Recuperação retardada: A tendência da borracha é diminuir a recuperação retardada; no entanto, quando as misturas são condicionadas, o efeito da borracha é parabólico, com ponto de máximo em torno dos 8%, ou seja, a borracha proporciona um aumento da RR entre as concentrações de 0 a 8% e a diminuiu em concentrações superiores.

Relação RMR: O efeito da borracha sobre a relação de módulo de resiliência total (RMR) é parabólico, apresentando ponto de mínimo em torno de 14%, ou seja, proporciona a diminuição da relação até a concentração de 14% e o seu aumento para concentrações entre 14 a 18%.

Relação RRT: A adição de borracha reduz linearmente a relação da resistência à tração (RRT). Como a tendência da borracha é reduzir tanto a RT não-condicionada quanto a condicionada, a redução da relação RRT pode ser justificada pelo fato do efeito da borracha

ser mais intenso na redução da RT condicionada do que sobre a RT não-condicionada. O aumento da proporção da borracha prejudica a resistência ao efeito da água em relação à RT.

5.5.2 Resíduo de óleo de xisto

Neste item serão apresentadas as principais conclusões da análise de efeito de componentes em relação à concentração do resíduo do óleo de xisto:

Parâmetros volumétricos: Em linhas gerais, o óleo aumenta a densidade aparente para concentrações de 0 a 7% e a reduz para concentrações superiores. Em relação ao volume de vazios, o óleo apresenta efeito parabólico, ou seja, diminui o valor do V_v até a concentração de 10% e o aumenta para concentrações de 10 a 14%. A tendência do óleo é reduzir os vazios de agregado mineral. Quanto ao efeito sobre a relação betume-vazios, ele é parabólico, com ponto de máximo em torno dos 7%, isto é, aumenta a RBV até a concentração de 7% e a diminui para concentrações entre 7 a 14%.

Estabilidade e Fluência: A fluência é reduzida linearmente pelo efeito do óleo e este efeito é mais intenso do que o produzido pela borracha nesse parâmetro; essa mesma tendência é observada para a estabilidade.

Módulo de resiliência: A tendência do óleo é reduzir o módulo de resiliência das misturas não-condicionadas, com efeito, aproximadamente, linear. O mesmo comportamento é observado para os módulos de resiliência das misturas condicionadas.

Resistência à tração: O efeito do óleo sobre a resistência à tração é de reduzi-la linearmente e de forma mais intensa que a borracha; nota-se esse mesmo comportamento para a resistência à tração das misturas condicionadas.

Relação MR/RT: O óleo proporciona a redução da relação MR/RT das misturas não-condicionadas e condicionadas, como a tendência global do óleo é reduzir tanto o módulo de resiliência quanto a resistência à tração, a redução dessa relação pode ser justificada pelo fato

do efeito do óleo ser mais intenso sobre a redução do módulo de resiliência do que sobre a resistência à tração.

Recuperação retardada: A tendência do óleo é aumentar a recuperação retardada, apresentando pouco efeito em altas concentrações. Na recuperação retardada das misturas condicionadas observa-se o mesmo comportamento, porém com uma redução mais intensa dessa propriedade.

Relação RMR: A relação entre os módulos de resiliência das misturas condicionadas e não-condicionadas com adição de óleo tende a aumentar até a concentração de 10% e diminuir para concentrações maiores. A diminuição da relação RMR se justifica, pois em concentrações baixas e intermediárias de óleo seu efeito é mais intenso sobre o módulo de resiliência das misturas não-condicionadas do que sobre os das condicionadas.

Relação RRT: O efeito do óleo sobre a relação RRT é parabólico, tendo ponto de máximo em torno dos 8%, ou seja, aumenta o valor da relação nas concentrações entre 0 e 8% e o diminui nas concentrações de 8 a 14%. A tendência do efeito do óleo é reduzir a resistência à tração tanto das misturas não-condicionadas como das condicionadas, quando se emprega concentrações até 8%, com maior reflexo na resistência à tração das misturas não-condicionadas que nas condicionadas. O aumento da concentração de óleo contribui com o aumento da resistência à ação da água quando empregado proporções de até 8% e é prejudicial em concentrações superiores.

5.6 Considerações Finais

A análise de efeitos dos componentes mostra que, em alguns casos, os efeitos da borracha e do óleo são antagônicos, o que indica que combinações adequadas dos dois modificadores podem ser realizadas, almejando alcançar os níveis desejados para as propriedades do ligante asfalto-borracha e das misturas asfálticas.

No caso do VAM, estabilidade, fluência e resistência à tração todas as misturas conseguiram atender os requisitos estabelecidos pelas especificações. No entanto, para os valores de

volume de vazios, RBV, relação de módulo de resiliência (RMR) e relação da resistência à tração (RRT) apenas as misturas próximas a região experimental com alta concentração de óleo e de borracha não conseguiram se enquadrar em todos os requisitos das especificações.

Quanto às propriedades mecânicas das misturas asfálticas, tanto a borracha quanto o óleo são críticos em relação à resistência à tração, porém os valores obtidos são maiores que os estabelecidos pelas especificações do DNIT 031/2006 e ES-P 28/05 DER/PR. Em relação à resistência ao dano provocado pela água, o efeito da borracha é prejudicial, no entanto, o efeito do óleo é benéfico. Cabe ressaltar que, embora algumas propriedades melhorem com a adição do óleo e outras não, o ganho na trabalhabilidade da mistura asfáltica é considerável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELRAHMAN, M.A; CARPENTER, S.H (1999). Mechanism of interaction of asphalt cement with crumb rubber modifier. **Transportation Research Record**, Washington, n.1661, p.106-113.

ANTUNES, A. **Estudo por ressonância paramagnética eletrônica da fotodegradação de petróleo brasileiro sob luz solar**. 2001. Dissertação (Mestrado em Física). Universidade Estadual de Londrina – UEL/PR, 2001.

AMARAL, S.C. **Estudos de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)**. 2000. 147p. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4867** – Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures, Philadelphia, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 128 –93** Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of fine aggregate, Philadelphia, 2004

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 127 –01** Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of fine aggregate, Philadelphia, 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12891** – Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE INDÚSTRIA DOS PNEUMÁTICOS - **ANIP**. Disponível em: www.anip.com.br acessado em 01/03/2007.

BARROS, R.V & VASCONCELLOS, F.S. Pioneer experience with the application of gap graded asphalt rubber mixes in São Paulo, Brazil. **Asphalt Rubber 2003** – Proceedings, Brazilia, Brazil, p. 655-667, 2003.

BERTOLLO, S.A.M. **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas Densas Modificadas com borracha Reciclada de Pneus**. 2002. Tese (Doutorado em Transportes) Escola de Engenharia de São Carlos-EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos.

BILLITER, T.C et al. Production of asphalt-rubber binders by high-cure conditions. **Transportation Research Record**, Washington, n.1586, p.50-56, 1997.

BRÛLÉ, B. Polymer-Modified asphalt cements used in the road construction industry: basic principles. **Transportation Research Record**, Washington, n.1535, p.48-53, (1996).

CAMPOS, B.A.L. et al. *Asfalto-borracha – uma novidade com 40 anos de existência!* In: **REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, 32., Brasília. 2000. Anais. Brasília, Associação Brasileira de Pavimentação. V1, p. 212-221, 2000.

CIMINO, M. A. **Gerenciamento de pneumáticos inservíveis: análise crítica de procedimentos operacionais e tecnologias para minimização, adotadas no território nacional**. 2004. 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR, São Carlos.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES (CNT). **Pesquisa Rodoviária 2007**. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/> acessado em 20/12/2007.

CORDEIRO, W. R. **Comportamento de Concretos Asfálticos Projetados com Cimento Asfáltico Modificado por Borracha de Pneus**. 2006. 256p. Rio de Janeiro, Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia de Transportes) Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

CORNELL, J.A. **Experiments with mixtures: design, models, and the analysis of mixture data**. 3rd.ed. New York: John Wiley, 2002.

DANTAS NETO, S. A. **Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados**. 2004. 265p. Teses (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO PARANÁ. **DER/PR ES-P 28/05**. Pavimentação: Concreto Asfáltico Usinado a Quente com Asfalto Borracha. Curitiba, Paraná, 2005.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRA-ESTRUTURA DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **DEINFRA/SC ES-P 05B/05**. Camadas de Misturas Asfálticas Usinadas a Quente com Asfalto Borracha. Santa Catarina, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DER/SP ET-DE-P00/030**. Concreto Asfáltico com Asfalto-Borracha (Processo úmido). São Paulo, 2007.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Estradas e Rodagem. Manual de reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Divisão de Capacitação Tecnológica – IPR. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER/ME 043/95**. Misturas Betuminosas a quente – Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER/ME 138/94**. Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM - **DNER/ME 133/94**. Misturas Betuminosas – Agregado – Determinação do Módulo de Resiliência. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (1994) **DNER/ME 078/94**. Agregado graúdo – adesividade a ligante asfálticos. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE - **DNIT 031/2006 - ES** Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico -Especificação de serviço. Rio de Janeiro.

FAXINA, A. L. **Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante do tipo asfalto-borracha**. 2002. 338p. Dissertação (Mestrado em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos-EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos.

FAXINA, A.L. **Estudo da viabilidade técnica do uso de resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligante asfalto-borracha**. 2006. 308p+apêndices. Tese (Doutorado em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos-EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos.

FOX, R.. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Editora LTC-Livros Técnicos e Científicos S.A. Rio de Janeiro. RJ. Brasil. 2006.

FURLAN, A. P. **Considerações acerca da adesão e da suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas**. 2006. 127p+apêndices. Tese (Doutorado em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos-EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos.

GALLEGU, J.; M. A. DEL VAL; E R. TOMÁS (2000) A Spanish Experience with Asphalt Pavements Modified with Tire Rubber. *Asphalt Rubber 2000*, Vilamoura, Portugal, p. 673-687.

GALVÃO, M. S **Estudo da adição de PVB em misturas asfálticas para pavimentação**. 2001. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica na área de Infra-Estrutura de Transportes). Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA. São José dos Campos, SP, Brasil, 2001.

GRECO, J. A. S. **Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos**. 2004. 367p. Tese (Doutorado em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos.

HANSON, D.I. et al. Evaluation and characterization of a rubber-modified hot mix asphalt pavement. **Transportation Research Record**. 1436, p. 98-107, 1994.

HOLLERAN, G. & REED, J.R. Emulsification of asphalt rubber blends. **ASPHALT RUBBER 2000 CONFERENCE**– Proceedings, Vilamoura, Portugal, p.383-410, 2000.

SILVA JR, A. Avanço Tecnológico em Pavimentação na malha rodoviária do estado de São Paulo. **ARTESP**. 2005

Disponível em: http://www.artesp.sp.gov.br/ativa/cartilha_ativa_29a.asp# acessado em 03/04/2007.

LEITE, L.M.F. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. 1999. 303p Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 303p

LEITE, L.F.M. et al. (2000). Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboratory. In: **ASPHALT RUBBER 2000 CONFERENCE**, Vilamoura, 2000. Proceedings. Braga, Barbosa & Xavier. p.309-318.

LEITE, L.M.F., et al. Mechanical behavior of asphalt rubber mixtures prepared in laboratory. In: **ASPHALT RUBBER 2000 CONFERENCE** – Proceedings, Vilamoura, Portugal, 2000, p. 309-318, 2000.

LEITE, L.M.F., et al. Asphalt Rubber in Brazil: Pavement performance and laboratory study. In: **ASPHALT RUBBER 2003 CONFERENCE** – Proceedings, Brazilian, Brazil, 2003, p. 229-246, 2003.

LEMES, P. C. L. (2004) **Estudo do envelhecimento a curto prazo de misturas asfálticas densas com cimento asfáltico modificado**. 2004. São Carlos, Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LEITE, L.F.M, BITTENCOURT, C.P (2004). **Caracterização reológico de cimentos asfálticos de petróleo e asfaltos modificados**. II Encontro Brasileiro de reologia. Julio 7-9 2004. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LIMA, A. T. **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará.

LOIOLA, Conrado (2006). Descarte inadequado de pneus gera prejuízos à sociedade. http://www.akatu.net/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?tpl=view_tipo2&sid=88&infoid=1569
Acessado em:27/02/2007.

MAGALHÃES, S.T. **Misturas Asfálticas de Módulos Elevado para Pavimentos de Alto Desempenho**. 2004. 201p. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 184p

MANUAL DE ASFALTO. **Instituto de Asfalto**. Série do Manual N° 4 (MS-4), 1989.
MEDINA, J; & MOTTA, L. M. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 2005.

MOHAMMAD, L.N et al. Accelerated loading performance and laboratory characterization of crumb rubber asphalt pavements. In: **ASPHALT RUBBER 2000 CONFERENCE**– Proceedings, Vilamoura, Portugal, p. 189-220, 2000.

MOMM, L. & SALINI, R. Study of recycled in asphalt concrete mixtures. In: **ASPHALT RUBBER 2000 CONFERENCE**– Proceedings, Vilamoura, Portugal, p. 341-357, 2000.

MORILHA. Jr; GRECA, M.R. (2003) Considerações Relacionadas ao Asfalto Ecológico-Ecoflex. IEP. **Apostila sobre Asfalto Borracha, Instituto de Engenharia do Paraná**, 12p, 2003. Disponível em: <http://www.iep.org.br/index.php?itemid=29&catid=14> Acesso em: 28/02/2007.

MOURÃO, F. A. L. **Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Tipo SMA**. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil). 2003. 131 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ.

NASCIMENTO, L. A. H; FIGUEIREDO, L. M; LÁO, V. L. E. S; JESUS, G. F Pavimentos Silenciosos. **REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, 36. – Curitiba/PR – Brasil- 24 a 26 de agosto de 2005.

ODA, Sandra. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. 2000. 251p. Tese (Doutorado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

_____. Reutilização de pneus como alternativa para aumento de vida útil de aterro. Universidade Estadual de Maringá. **Anais**, 2000.

_____. Laboratórios Baianos desenvolvem tecnologia de asfalto-borracha. Reportagens Especiais. **FAPESB**, 2007. Disponível em: <http://www.fapesb.ba.gov.br/> Acessado em: 01/03/2007.

ODA, Sandra; EDEL, G.; FERNANDES JR, J. L. Primeiro Trecho Experimental Urbano de SMA com Asfalto-Borracha sem Fibras: Projeto, Construção e Avaliação. **Revista Minerva - Pesquisa e Tecnologia**, São Carlos-SP, v. 2, n. 2, p. 203-216, 2005.

PATRIOTA, M.B. de. **Análise laboratorial de concreto betuminoso usado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus – processo seco**. 2004.6 149p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia Civil, Recife, PE.

PINHEIRO, JH.M. & SOARES, JB. The effect of crumb rubber gradation and binder-rubber interaction time on the mechanical properties of asphalt- rubber mixtures (dry process). In: **ASPHALT RUBBER 2003 CONFERENCE**– Proceedings, Brazilian, Brazil, p. 707-718, 2003.

PINHEIRO, J.H.M. **Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco)**. 2004. 166p. Dissertação (Mestrado em Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

PINHEIRO, Jorge Henrique Magalhães; SOARES, Jorge Barbosa; LEITE, Leni Mathias. Caracterização de Misturas Asfálticas com Borracha Produzidas pelos Processos Úmido e Seco. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO DE TRANSPORTES, 17. 2003. Rio de Janeiro. **Anais**. ANPET.

ROSENO, J. L. (2005). **Avaliação de uma Mistura Asfáltica Porosa com Agregados Calcários e Asfalto-borracha**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) 2005. – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SANTOS, C. R. G **Avaliação das influências do tipo de ligante e volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. 2005. Mestrado (Dissertação em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

SALINI, R. B; MARCON, A. F. Utilização de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas. IN: Encontro Ibero-Americano de Unidades Ambientais do Setor de Transportes, 3. Florianópolis – Santa Catarina, 1998.

SEVERO, L., et al. Performance of asphalt-rubber hot mix overlays at brazilian highway. In: **ASPHALT RUBBER 2003 CONFERENCE** – Proceedings, Brazilian, Brazil: 633-643, 2003.

SOUSA, J.M.D. et al. Caracterização laboratorial preliminar de misturas asfálticas modifica com borracha reciclada de pneus e convencional para projetos de recuperação de rodovias do DER/DF. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32. Brasília. 2000. **Anais**. Brasília, Associação Brasileira de Pavimentação. V1, p. 224-234, 2000.

SPECHT, L.P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. (2004) – Tese (doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. UFRGS.Porto Alegre: PPGE/UFRGS, 2004.

SPECHT, L.P; CERATTI, JA.P. & PALUDO, I. Laboratorial evaluation of tire rubber use as hot mix aggregate. In: **ASPHALT RUBBER 2003 CONFERENCE** – Proceedings, Brazilian, Brazil, 2003, p 603-614, 2003.

STROUP-GARDINER, M. et al. Asphalt-rubber interactions. **Transportation Research Record**. Washington, n.1417, p.99-108, 1993.

TAIRA, Cláudio **Avaliação do desempenho em laboratório de misturas asfálticas densas utilizando asfalto convencional (CAP-20) e asfalto modificado com polímero SBS**. 2001. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

TAKALLOU, H.B & TAKALLOU, M. B. Effects of mixing time and temperature on the visco-elastic properties of asphalt rubber binder. In: **ASPHALT RUBBER 2003 CONFERENCE** – Proceedings, Brazilian, Brazil, 2003, p 589-602, 2003.

VISSER, A.T. & VERHAEGHE, B. (2000). Bitum em rubber: lessons in South África. In: **ASPHALT RUBBER 2000 CONFERENCE**– Proceedings, Brazilian. Brazil, p 49-63, 2000.

Disponível em:

http://www.estado.rs.gov.br/index.php?inc=noticias/noticias_view.php¬id=47502

APÊNDICE A

Planilha de dosagem Marshall - ligante asfáltico 1 (100-0-0)

dens. efetiva do agregado 2,869

dens. ponderada dos agregados 2,869

dens. do ligante asfáltico 1,004

Tabela A1: Parâmetros Marshall para mistura 100-0-0

Nº do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	Diâmetro médio	Altura média	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
1-1A	4,5	0,045	95,5	1203,3	710,9	1206,9	492	10,160	6,210	0,73	2,426	2,649	8,4	19,2	56,3
2-1A	4,5	0,045	95,5	1199,7	708,4	1201,5	491	10,170	6,110	0,37	2,433	2,649	8,2	19,0	57,1
3-1A	4,5	0,045	95,5	1221,0	723,0	1223,2	498	10,180	6,220	0,44	2,441	2,649	7,8	18,7	58,1
4-1A	4,5	0,045	95,5	1219,1	720,7	1220,8	498	10,190	6,190	0,34	2,438	2,649	8,0	18,9	57,7
5-1A	4,5	0,045	95,5	1208,4	714,8	1210,2	494	10,180	6,180	0,36	2,439	2,649	7,9	18,8	57,9
6-1A	4,5	0,045	95,5	1213,1	717,9	1214,9	495	10,170	6,200	0,36	2,441	2,649	7,9	18,8	58,1
7-1A	4,5	0,045	95,5	1205,9	714,7	1208,3	491	10,180	6,180	0,49	2,443	2,649	7,8	18,7	58,4
médias	4,5	0,045	95,5	1210,1	715,8	1212,3	494	10,176	6,184	0,44	2,437	2,649	8,0	18,9	57,7
1-1B	5,0	0,05	95	1214,6	722,1	1216,2	493	10,150	6,170	0,32	2,458	2,626	6,4	18,6	65,6
2-1B	5,0	0,05	95	1201,4	716,4	1202,4	485	10,180	6,060	0,21	2,472	2,626	5,9	18,1	67,6
3-1B	5,0	0,05	95	1210,9	719,3	1212,4	492	10,170	6,130	0,30	2,456	2,626	6,5	18,7	65,2
4-1B	5,0	0,05	95	1208,4	717,9	1210,3	491	10,170	6,140	0,39	2,454	2,626	6,6	18,7	65,0
5-1B	5,0	0,05	95	1203,7	717,7	1204,9	486	10,160	6,090	0,25	2,471	2,626	5,9	18,2	67,4
6-1B	5,0	0,05	95	1203,4	715,5	1204,8	488	10,170	6,120	0,29	2,459	2,626	6,4	18,6	65,8
7-1B	5,0	0,05	95	1201,6	714,1	1203,5	488	10,160	6,100	0,39	2,455	2,626	6,5	18,7	65,2
médias	5,0	0,05	95	1206,3	717,6	1207,8	489	10,166	6,116	0,31	2,461	2,626	6,3	18,5	66,0

Nº do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	Diâmetro médio	Altura média	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
1-1C	5,5	0,055	94,5	1218,7	728,1	1219,4	491	10,170	6,140	0,14	2,481	2,604	4,7	18,3	74,0
2-1C	5,5	0,055	94,5	1205,0	722,5	1205,5	483	10,180	6,010	0,10	2,495	2,604	4,2	17,8	76,4
3-1C	5,5	0,055	94,5	1201,7	720,1	1203,1	482	10,170	6,020	0,29	2,488	2,604	4,5	18,0	75,3
4-1C	5,5	0,055	94,5	1209,9	726,7	1210,6	483	10,160	6,040	0,14	2,500	2,604	4,0	17,6	77,4
5-1C	5,5	0,055	94,5	1198,0	719,4	1199,8	479	10,170	6,050	0,37	2,494	2,604	4,2	17,9	76,2
6-1C	5,5	0,055	94,5	1197,7	720,3	1198,8	477	10,180	5,980	0,23	2,503	2,604	3,9	17,6	77,9
7-1C	5,5	0,055	94,5	1204,1	725,2	1206,8	479	10,170	6,060	0,56	2,500	2,604	4,0	17,6	77,4
médias	5,5	0,055	94,5	1205,0	723,2	1206,3	482	10,160	6,020	0,26	2,494	2,604	4,2	17,8	76,4
1-1D	6,0	0,06	94	1203,4	722,8	1203,7	481	10,160	5,990	0,06	2,502	2,582	3,1	18,0	82,8
2-1D	6,0	0,06	94	1200,1	722,9	1200,5	477	10,150	5,970	0,08	2,513	2,582	2,7	17,7	84,7
3-1D	6,0	0,06	94	1211,5	730,9	1212,2	481	10,160	6,020	0,15	2,517	2,582	2,5	17,5	85,6
4-1D	6,0	0,06	94	1210,5	729,6	1211,3	481	10,160	6,010	0,17	2,513	2,582	2,7	17,7	84,8
5-1D	6,0	0,06	94	1225,8	738,1	1226,5	488	10,150	6,130	0,14	2,510	2,582	2,8	17,8	84,2
6-1D	6,0	0,06	94	1207,4	728,0	1208,3	479	10,160	6,110	0,19	2,514	2,582	2,7	17,6	84,9
7-1D	6,0	0,06	94	1204,8	727,9	1206,1	477	10,170	5,990	0,27	2,519	2,582	2,4	17,5	86,0
médias	6,0	0,06	94	1209,1	728,6	1209,8	480	10,159	6,031	0,15	2,513	2,582	2,7	17,7	84,7
1-1E	6,5	0,065	93,5	1208,4	731,8	1208,8	477	10,160	5,970	0,08	2,533	2,561	1,1	17,4	93,8
2-1E	6,5	0,065	93,5	1208,9	732,2	1209,1	477	10,150	5,970	0,04	2,535	2,561	1,0	17,4	94,1
3-1E	6,5	0,065	93,5	1211,2	733,5	1211,3	478	10,170	5,960	0,02	2,535	2,561	1,0	17,4	94,1
4-1E	6,5	0,065	93,5	1196,9	723,7	1197,1	473	10,160	5,930	0,04	2,528	2,561	1,3	17,6	92,7
5-1E	6,5	0,065	93,5	1209,8	733,9	1210,1	476	10,150	5,990	0,06	2,541	2,561	0,8	17,2	95,3
6-1E	6,5	0,065	93,5	1194,5	724,4	1194,7	470	10,160	5,870	0,04	2,540	2,561	0,8	17,2	95,2
7-1E	6,5	0,065	93,5	1210,4	733,9	1211,2	477	10,160	5,980	0,17	2,536	2,561	1,0	17,4	94,4
médias	6,5	0,065	93,5	1205,7	730,49	1206	475	10,159	5,953	0,07	2,535	2,561	1,0	17,4	94,2

Teor (%)	Dap (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV(%)
4,5	2,437	8,0	18,9	57,7
5,0	2,461	6,3	18,5	66,0
5,5	2,494	4,2	17,8	76,4
6,0	2,513	2,7	17,7	84,7
6,5	2,535	1,0	17,4	94,2

Ensaio Marshall - Mistura 1

Figura A1: Parâmetros Marshall para mistura 100-0-0

Planilha de dosagem Marshall - ligante asfáltico 2 (93-0-7)

dens. efetiva do agregado	2,869
dens. ponderada dos agregados	2,869
dens. do ligante asfáltico	1,012

Tabela A2: Parâmetros Marshall para mistura 93-0-7

número do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
1-2A	4,5	0,045	95,5	1206,1	722,7	1209,5	483	0,70	2,478	2,650	6,5	17,5	62,9
2-2A	4,5	0,045	95,5	1204,9	724,5	1208,2	480	0,68	2,491	2,650	6,0	17,1	64,8
3-2A	4,5	0,045	95,5	1204,0	724,2	1207,6	480	0,74	2,491	2,650	6,0	17,1	64,8
4-2A	4,5	0,045	95,5	1210,2	727,6	1214	483	0,78	2,488	2,650	6,1	17,2	64,4
5-2A	4,5	0,045	95,5	1214,7	730,7	1218,8	484	0,84	2,489	2,650	6,1	17,2	64,5
6-2A	4,5	0,045	95,5	1209,2	728,5	1213,8	481	0,95	2,492	2,650	6,0	17,1	64,9
7-2A	4,5	0,045	95,5	1208,0	727,3	1211,6	481	0,74	2,494	2,650	5,9	17,0	65,3
médias	4,5	0,045	95,5	1208,2	726,5	1211,9	481,657	0,776836	2,4889	2,6502	6,1	17,2	64,5
1-2B	5,0	0,05	95	1213,0	732,1	1215,1	481	0,43	2,511	2,628	4,4	16,8	73,7
2-2B	5,0	0,05	95	1202,3	725,7	1204,5	477	0,46	2,511	2,628	4,4	16,9	73,6
3-2B	5,0	0,05	95	1216,6	734,5	1218,9	482	0,47	2,512	2,628	4,4	16,8	73,7
4-2B	5,0	0,05	95	1218,7	736,3	1222,3	482	0,74	2,508	2,628	4,6	17,0	73,0
5-2B	5,0	0,05	95	1224,6	736,1	1227,9	489	0,67	2,490	2,628	5,2	17,5	70,1
6-2B	5,0	0,05	95	1206,5	727,6	1210,9	479	0,91	2,496	2,628	5,0	17,3	71,1
7-2B	5,0	0,05	95	1227,3	740,7	1229,9	487	0,53	2,509	2,628	4,5	16,9	73,2
médias	5,0	0,05	95	1215,6	733,29	1218,5	482,286	0,603245	2,5053	2,6279	4,7	17,0	72,6
número	%	%	%	massa	massa	massa	volume	absorção	D	DMM	Vv	VAM	RBV

do CP	ligante	ligante	agreg	ao ar	imersa	SSS	CP	de água	ap	média	(%)	(%)	(%)
2-2C	5,5	0,055	94,5	1217,4	734,7	1218,8	483	0,29	2,515	2,606	3,5	17,2	79,6
3-2C	5,5	0,055	94,5	1202,5	725,5	1203,1	477	0,13	2,518	2,606	3,4	17,1	80,2
4-2C	5,5	0,055	94,5	1211,9	732,8	1214,1	479	0,46	2,518	2,606	3,4	17,1	80,2
5-2C	5,5	0,055	94,5	1194,1	720,4	1196	474	0,40	2,511	2,606	3,7	17,3	78,9
6-2C	5,5	0,055	94,5	1212,1	736,5	1214,2	476	0,44	2,537	2,606	2,6	16,4	84,0
7-2C	5,5	0,055	94,5	1207,6	731,3	1209,8	476	0,46	2,524	2,606	3,2	16,9	81,3
médias	5,5	0,055	94,5	1207,3	729,63	1209	477,643	0,360624	2,5185	2,606	3,4	17,0	80,3
1-2D	6,0	0,06	94	1202,0	727,0	1203,1	475	0,23	2,525	2,584	2,3	17,3	86,6
2-2D	6,0	0,06	94	1204,2	731,0	1205,5	473	0,27	2,538	2,584	1,8	16,9	89,3
3-2D	6,0	0,06	94	1218,1	739,2	1219,5	479	0,29	2,536	2,584	1,9	16,9	88,9
4-2D	6,0	0,06	94	1205,5	732,1	1206,7	473	0,25	2,540	2,584	1,7	16,8	89,8
5-2D	6,0	0,06	94	1207,9	732,2	1209	476	0,23	2,533	2,584	2,0	17,0	88,4
6-2D	6,0	0,06	94	1201,1	729,0	1202,5	472	0,30	2,537	2,584	1,9	16,9	89,0
7-2D	6,0	0,06	94	1218,9	740,0	1220,2	479	0,27	2,538	2,584	1,8	16,8	89,4
médias	6,0	0,06	94	1208,2	732,93	1209,5	475,314	0,263777	2,5353	2,5845	1,9	16,9	88,8
1-2E	6,5	0,065	93,5	1205,3	730,8	1206,3	475	0,21	2,535	2,563	1,1	17,4	93,6
2-2E	6,5	0,065	93,5	1202,9	731,5	1203,7	471	0,17	2,547	2,563	0,6	17,0	96,4
3-2E	6,5	0,065	93,5	1198,0	728,4	1199,1	470	0,23	2,545	2,563	0,7	17,1	95,9
4-2E	6,5	0,065	93,5	1215,0	736,2	1216	479	0,21	2,532	2,563	1,2	17,5	93,1
5-2E	6,5	0,065	93,5	1208,1	731,9	1209,4	476	0,27	2,530	2,563	1,3	17,5	92,6
6-2E	6,5	0,065	93,5	1193,5	723,2	1194,2	470	0,15	2,534	2,563	1,1	17,4	93,4
7-2E	6,5	0,065	93,5	1197,4	725,7	1199	472	0,34	2,530	2,563	1,3	17,6	92,6
médias	6,5	0,065	93,5	1202,9	729,67	1204	473,214	0,225823	2,5362	2,5633	1,1	17,3	93,9

Teor (%)	Dap (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,5	2,489	6,1	17,2	64,5
5,0	2,505	4,7	17,0	72,6
5,5	2,518	3,4	17,0	80,3
6,0	2,535	1,9	16,9	88,8
6,5	2,536	1,1	17,3	93,9

Ensaio Marshall - 93-0-7

Figura A2: Parâmetros Marshall para mistura 93-0-7

Planilha de dosagem Marshall - ligante asfáltico 3 (86-0-14)

dens. efetiva do agregado	2,869
dens. ponderada dos agregados	2,869
dens. do ligante asfáltico	1,020

Tabela A3: Parâmetros Marshall para mistura 86-0-14

número do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
1-3A	4,5	0,045	95,5	1203,4	712,0	1210,8	491	1,48	2,413	2,653	9,1	19,7	54,0
2-3A	4,5	0,045	95,5	1211,7	716,3	1219,0	495	1,45	2,410	2,653	9,1	19,8	53,8
3-3A	4,5	0,045	95,5	1214,4	719,2	1221,9	495	1,49	2,416	2,653	8,9	19,6	54,4
4-3A	4,5	0,045	95,5	1216,4	720,4	1223,5	496	1,41	2,418	2,653	8,9	19,5	54,6
5-3A	4,5	0,045	95,5	1215,2	720,0	1222,9	495	1,53	2,416	2,653	8,9	19,6	54,5
6-3A	4,5	0,045	95,5	1205,2	715,5	1212,4	490	1,45	2,425	2,653	8,6	19,3	55,5
7-3A	4,5	0,045	95,5	1210,0	715,3	1217,8	495	1,55	2,408	2,653	9,2	19,8	53,5
médias	4,5	0,045	95,5	1210,9	717,0	1218,3	494	1,48	2,415	2,653	9,0	19,6	54,3
1-3B	5,0	0,05	95	1208,7	722,0	1213,1	487	0,90	2,461	2,631	6,4	18,5	65,2
2-3B	5,0	0,05	95	1209,8	723,9	1214,4	486	0,94	2,466	2,631	6,2	18,3	65,9
3-3B	5,0	0,05	95	1211,3	724,0	1216,0	487	0,96	2,462	2,631	6,4	18,5	65,3
4-3B	5,0	0,05	95	1203,0	719,5	1208,5	484	1,12	2,460	2,631	6,5	18,5	65,0
5-3B	5,0	0,05	95	1206,7	723,7	1211,7	483	1,02	2,473	2,631	6,0	18,1	66,9
6-3B	5,0	0,05	95	1210,9	725,3	1216,1	486	1,06	2,467	2,631	6,2	18,3	66,1
7-3B	5,0	0,05	95	1208,1	721,4	1212,9	487	0,98	2,458	2,631	6,6	18,6	64,7
médias	5,0	0,05	95	1208,4	722,8	1213,2	486	1,00	2,464	2,631	6,3	18,4	65,6
1-3C	5,5	0,055	94,5	1208,7	731,4	1212,2	477	0,73	2,514	2,609	3,6	17,2	78,8
2-3C	5,5	0,055	94,5	1212,7	736,0	1215,9	477	0,67	2,527	2,609	3,1	16,8	81,2
3-3C	5,5	0,055	94,5	1211,8	735,9	1214,8	476	0,63	2,530	2,609	3,0	16,7	81,9
4-3C	5,5	0,055	94,5	1207,4	732,1	1211,4	475	0,83	2,519	2,609	3,4	17,0	79,8
5-3C	5,5	0,055	94,5	1206,4	732,5	1209,8	474	0,71	2,528	2,609	3,1	16,7	81,4

número do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
6-3C	5,5	0,055	94,5	1210,9	732,7	1214,7	478	0,79	2,512	2,609	3,7	17,3	78,5
7-3C	5,5	0,055	94,5	1195,4	726,4	1198,6	469	0,68	2,532	2,609	3,0	16,6	82,1
médias	5,5	0,055	94,5	1207,6	732,4	1211,1	475	0,72	2,523	2,609	3,3	16,9	80,5
1-3D	6,0	0,06	94	1193,7	726,6	1195,8	467	0,45	2,544	2,602	2,2	16,6	86,6
2-3D	6,0	0,06	94	1201,5	729,8	1203,3	472	0,38	2,537	2,602	2,5	16,9	85,3
3-3D	6,0	0,06	94	1202,4	731,8	1204,2	471	0,38	2,545	2,602	2,2	16,6	86,9
4-3D	6,0	0,06	94	1196,7	727,9	1198,4	469	0,36	2,543	2,602	2,2	16,7	86,5
5-3D	6,0	0,06	94	1213,5	741,1	1215,6	472	0,44	2,557	2,602	1,7	16,2	89,4
6-3D	6,0	0,06	94	1200,8	733,1	1202,8	468	0,43	2,557	2,602	1,7	16,2	89,2
7-3D	6,0	0,06	94	1203,9	733,4	1205,8	471	0,40	2,548	2,602	2,1	16,5	87,5
médias	6,0	0,06	94	1201,8	732,0	1203,7	470	0,41	2,548	2,602	2,1	16,5	87,4
1-3E	6,5	0,065	93,5	1211,0	736,7	1212,5	474	0,32	2,545	2,567	0,8	17,1	95,1
2-3E	6,5	0,065	93,5	1219,0	741,3	1220,8	478	0,38	2,542	2,567	1,0	17,1	94,4
3-3E	6,5	0,065	93,5	1217,4	741,9	1219,1	476	0,36	2,551	2,567	0,6	16,9	96,4
4-3E	6,5	0,065	93,5	1212,6	738,4	1214,2	474	0,34	2,549	2,567	0,7	16,9	95,8
5-3E	6,5	0,065	93,5	1205,1	734,6	1207,1	471	0,42	2,550	2,567	0,6	16,9	96,3
6-3E	6,5	0,065	93,5	1189,3	724,2	1190,8	465	0,32	2,549	2,567	0,7	16,9	95,9
7-3E	6,5	0,065	93,5	1202,6	731,3	1204,6	471	0,42	2,541	2,567	1,0	17,2	94,1
médias	6,5	0,065	93,5	1208,1	735,5	1209,9	473	0,36	2,547	2,567	0,8	17,0	95,4

Teor (%)	Dap (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,5	2,415	9,0	19,6	54,3
5,0	2,464	6,3	18,4	65,6
5,5	2,523	3,3	16,9	80,5
6,0	2,548	2,1	16,5	87,5
6,5	2,547	0,8	17,0	95,4

Figura A3: Parâmetros Marshall para mistura 86-0-14

Planilha de dosagem Marshall - ligante asfáltico 4 (91-9-0)

dens. efetiva do agregado	2,867
dens. ponderada dos agregados	2,869
dens. do ligante asfáltico	1,026

Tabela A4: Parâmetros Marshall para mistura 91-9-0

número do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
1-4A	4,5	0,045	95,5	1203,7	702,7	1205,1	501	0,28	2,396	2,652	9,7	20,2	52,3
2-4A	4,5	0,045	95,5	1201,6	704,5	1203,6	497	0,40	2,408	2,652	9,2	19,9	53,5
3-4A	4,5	0,045	95,5	1204,6	707,3	1206,6	497	0,40	2,413	2,652	9,0	19,7	54,1
4-4A	4,5	0,045	95,5	1212,9	711,7	1214,5	501	0,32	2,412	2,652	9,1	19,7	54,1
5-4A	4,5	0,045	95,5	1204,0	709,8	1206,1	494	0,42	2,426	2,652	8,5	19,2	55,7
6-4A	4,5	0,045	95,5	1206,9	713,4	1208,3	494	0,28	2,439	2,652	8,1	18,8	57,2
7-4A	4,5	0,045	95,5	1204,2	704,6	1205,9	500	0,34	2,402	2,652	9,4	20,0	52,9
médias	4,5	0,045	95,5	1205,4	707,7	1207,2	498	0,35	2,414	2,652	9,0	19,7	54,2
1-4B	5,0	0,05	95	1204,0	715,4	1205,2	489	0,24	2,458	2,630	6,6	18,6	64,8
2-4B	5,0	0,05	95	1207,8	714,8	1208,7	493	0,18	2,445	2,630	7,0	19,0	63,0
3-4B	5,0	0,05	95	1205,9	716,5	1206,7	489	0,16	2,460	2,630	6,5	18,5	65,0
4-4B	5,0	0,05	95	1211,0	718,7	1213,6	492	0,53	2,447	2,630	7,0	19,0	63,2
5-4B	5,0	0,05	95	1201,1	716,2	1202,9	485	0,37	2,468	2,630	6,2	18,3	66,2
6-4B	5,0	0,05	95	1202,9	720,1	1204,8	483	0,39	2,482	2,630	5,7	17,8	68,3
7-4B	5,0	0,05	95	1207,8	722,5	1208,9	485	0,23	2,483	2,630	5,6	17,8	68,5
médias	5,0	0,05	95	1205,8	717,7	1207,3	488	0,30	2,463	2,630	6,4	18,4	65,6
1-4C	5,5	0,055	94,5	1205,6	714,8	1206,9	491	0,26	2,450	2,609	6,1	19,3	68,4
2-4C	5,5	0,055	94,5	1198,0	713,0	1198,7	485	0,14	2,467	2,609	5,5	18,8	70,9
3-4C	5,5	0,055	94,5	1199,1	712,2	1200,1	487	0,20	2,458	2,609	5,8	19,0	69,6
4-4C	5,5	0,055	94,5	1204,8	716,8	1205,8	488	0,20	2,464	2,609	5,6	18,8	70,5
5-4C	5,5	0,055	94,5	1202,5	713,0	1203,5	490	0,20	2,452	2,609	6,0	19,2	68,7

número do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
6-4C	5,5	0,055	94,5	1210,6	720,7	1211,9	490	0,26	2,465	2,609	5,5	18,8	70,6
7-4C	5,5	0,055	94,5	1200,1	713,9	1201,2	486	0,23	2,463	2,609	5,6	18,9	70,3
médias	5,5	0,055	94,5	1203	714,9	1204	488	0,22	2,460	2,609	5,7	19,0	69,8
1-4D	6,0	0,06	94	1206,8	728,6	1207,4	478	0,13	2,520	2,588	2,6	17,4	85,1
2-4D	6,0	0,06	94	1211,8	733,2	1212,2	479	0,08	2,530	2,588	2,2	17,1	86,9
3-4D	6,0	0,06	94	1204,7	726,2	1205,1	479	0,08	2,516	2,588	2,8	17,6	84,1
4-4D	6,0	0,06	94	1203,5	724,9	1204,2	479	0,15	2,511	2,588	3,0	17,7	83,2
5-4D	6,0	0,06	94	1196,7	722,6	1197,3	474	0,13	2,521	2,588	2,6	17,4	85,1
6-4D	6,0	0,06	94	1203,5	727,6	1204,1	476	0,13	2,526	2,588	2,4	17,2	86,1
7-4D	6,0	0,06	94	1211,7	732,4	1212,5	479	0,17	2,524	2,588	2,5	17,3	85,7
médias	6,0	0,06	94	1205,5	727,9	1206,1	478	0,12	2,521	2,588	2,6	17,4	85,2
1-4E	6,5	0,065	93,5	1210,2	724,0	1211	486	0,16	2,485	2,567	3,2	19,0	83,2
2-4E	6,5	0,065	93,5	1203,5	717,4	1204	486	0,10	2,473	2,567	3,7	19,4	81,2
3-4E	6,5	0,065	93,5	1212,9	726,3	1213,9	487	0,21	2,487	2,567	3,1	18,9	83,6
4-4E	6,5	0,065	93,5	1201,6	717,6	1202,8	484	0,25	2,477	2,567	3,5	19,3	81,7
5-4E	6,5	0,065	93,5	1206,1	719,8	1207	486	0,18	2,476	2,567	3,6	19,3	81,6
6-4E	6,5	0,065	93,5	1205,2	718,8	1205,8	486	0,12	2,475	2,567	3,6	19,3	81,4
7-4E	6,5	0,065	93,5	1204,9	719,5	1206,1	485	0,25	2,476	2,567	3,5	19,3	81,7
médias	6,5	0,065	93,5	1206,3	720,5	1207,2	486	0,18	2,478	2,567	3,5	19,2	82,0

teor (%)	Dap (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,5	2,414	9,0	19,7	54,2
5,0	2,463	6,4	18,4	65,6
5,5	2,460	5,7	19,0	69,8
6,0	2,521	2,6	17,4	85,2
6,5	2,478	3,5	19,2	82,0

Ensaio Marshall - 91-9-0

Figura A4: Parâmetros Marshall para mistura 91-9-0

Planilha de dosagem Marshall - ligante asfáltico 5 (77-9-14)

dens. efetiva do agregado	2,867
dens. ponderada dos agregados	2,869
dens. do ligante asfáltico	1,038

Tabela A5: Parâmetros Marshall para mistura 77-9-14

número do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
1-5A	4,5	0,045	95,5	1206,4	719,7	1207,8	487	0,29	2,472	2,657	7,0	17,7	60,7
2-5A	4,5	0,045	95,5	1207,0	718,8	1208,0	488	0,20	2,467	2,657	7,1	17,9	60,1
3-5A	4,5	0,045	95,5	1210,6	722,8	1211,9	488	0,27	2,475	2,657	6,8	17,6	61,2
4-5A	4,5	0,045	95,5	1207,6	720,8	1208,7	487	0,23	2,475	2,657	6,8	17,6	61,2
5-5A	4,5	0,045	95,5	1210,3	723,9	1211,6	486	0,27	2,482	2,657	6,6	17,4	62,1
6-5A	4,5	0,045	95,5	1204,9	719,5	1207,5	485	0,53	2,469	2,657	7,1	17,8	60,3
7-5A	4,5	0,045	95,5	1227,0	730,2	1229,9	497	0,58	2,455	2,657	7,6	18,3	58,5
médias	4,5	0,045	95,5	1210,54	722,2	1212	488	0,34	2,471	2,657	7,0	17,8	60,6
1-5B	5,0	0,050	95,0	1211,6	726,6	1212,7	485	0,23	2,492	2,635	5,4	17,5	69,0
2-5B	5,0	0,050	95,0	1203,8	721,2	1205,0	483	0,25	2,488	2,635	5,6	17,6	68,3
3-5B	5,0	0,050	95,0	1215,0	730,4	1215,7	485	0,14	2,504	2,635	5,0	17,1	70,8
4-5B	5,0	0,050	95,0	1178,6	708,2	1180,0	470	0,30	2,498	2,635	5,2	17,3	69,9
5-5B	5,0	0,050	95,0	1208,6	727,5	1209,7	481	0,23	2,506	2,635	4,9	17,0	71,3
6-5B	5,0	0,050	95,0	1204,9	723,4	1205,8	482	0,19	2,498	2,635	5,2	17,3	69,8
7-5B	5,0	0,050	95,0	1206,2	726,2	1207,2	480	0,21	2,508	2,635	4,8	17,0	71,5
médias	5,0	0,050	95,0	1204,1	723,4	1205	481	0,22	2,499	2,635	5,2	17,2	70,1
1-5C	5,5	0,055	94,5	1216,9	731,4	1217,7	486	0,16	2,502	2,614	4,3	17,6	75,7

número do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
2-5C	5,5	0,055	94,5	1199,2	721,6	1199,8	478	0,13	2,508	2,614	4,1	17,4	76,6
3-5C	5,5	0,055	94,5	1206,4	723,2	1207,1	483	0,14	2,493	2,614	4,6	17,9	74,1
4-5C	5,5	0,055	94,5	1207,0	722,6	1203,0	484	-0,83	2,512	2,614	3,9	17,2	77,5
5-5C	5,5	0,055	94,5	1206,2	724,3	1208,0	482	0,37	2,494	2,614	4,6	17,9	74,2
6-5C	5,5	0,055	94,5	1206,3	727,1	1206,8	479	0,10	2,515	2,614	3,8	17,2	77,9
7-5C	5,5	0,055	94,5	1208,2	727,0	1209,7	481	0,31	2,503	2,614	4,2	17,6	75,8
médias	5,5	0,055	94,5	1207,17	725,3	1207	482	0,06	2,504	2,614	4,2	17,5	76,0
1-5D	6,0	0,060	94,0	1210,4	732,4	1211,0	478	0,13	2,529	2,593	2,5	17,1	85,5
2-5D	6,0	0,060	94,0	1204,5	729,7	1205,0	475	0,11	2,534	2,593	2,3	17,0	86,6
3-5D	6,0	0,060	94,0	1204,1	731,2	1204,6	473	0,11	2,544	2,593	1,9	16,7	88,5
4-5D	6,0	0,060	94,0	1205,4	728,7	1205,9	477	0,10	2,526	2,593	2,6	17,2	84,9
5-5D	6,0	0,060	94,0	1207,4	731,6	1208,1	476	0,15	2,534	2,593	2,3	17,0	86,5
6-5D	6,0	0,060	94,0	1208,4	731,2	1208,9	477	0,10	2,530	2,593	2,5	17,1	85,7
7-5D	6,0	0,060	94,0	1204,8	727,4	1205,1	477	0,06	2,522	2,593	2,7	17,4	84,2
médias	6,0	0,060	94,0	1206,43	730,3	1207	476	0,11	2,531	2,593	2,4	17,1	86,0
1-5E	6,5	0,065	93,5	1214,2	735,1	1214,6	479	0,08	2,532	2,573	1,6	17,5	91,0
2-5E	6,5	0,065	93,5	1202,5	724,8	1202,9	478	0,08	2,515	2,573	2,2	18,0	87,6
3-5E	6,5	0,065	93,5	1208,9	729,1	1209,6	480	0,15	2,516	2,573	2,2	18,0	87,7
4-5E	6,5	0,065	93,5	1200,7	722,7	1201,4	478	0,15	2,508	2,573	2,5	18,3	86,3
5-5E	6,5	0,065	93,5	1213,0	731,9	1214,7	481	0,35	2,512	2,573	2,3	18,1	87,1
6-5E	6,5	0,065	93,5	1202,5	725,4	1203,2	477	0,15	2,517	2,573	2,2	18,0	87,9
7-5E	6,5	0,065	93,5	1211,9	729,2	1212,4	483	0,10	2,508	2,573	2,5	18,3	86,2
médias	6,5	0,065	93,5	1207,67	728,3	1208	479	0,15	2,516	2,573	2,2	18,0	87,7

Teor (%)	Dap (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,5	2,471	7,0	17,8	60,6
5,0	2,499	5,2	17,2	70,1
5,5	2,504	4,2	17,5	76,0
6,0	2,531	2,4	17,1	86,0
6,5	2,516	2,2	18,0	87,7

Figura A5: Parâmetros Marshall para mistura 77-9-14

Planilha de dosagem Marshall - ligante asfáltico 6 (82-18-0)

dens. efetiva do agregado	2,869
dens. ponderada dos agregados	2,869
dens. do ligante asfáltico	1,041

Tabela A6: Parâmetros Marshall para mistura 82-18-0

número do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
1-6A	4,5	0,045	95,5	1206,4	714,3	1208,0	492	0,32	2,444	2,659	8,1	18,7	56,7
2-6A	4,5	0,045	95,5	1216,1	720,4	1217,5	496	0,28	2,446	2,659	8,0	18,6	57,0
3-6A	4,5	0,045	95,5	1215,9	727,5	1227,3	488	2,28	2,433	2,659	8,5	19,0	55,3
4-6A	4,5	0,045	95,5	1217,7	724,4	1219,8	493	0,42	2,458	2,659	7,5	18,2	58,5
5-6A	4,5	0,045	95,5	1232,1	731,8	1233,5	500	0,28	2,456	2,659	7,6	18,3	58,2
6-6A	4,5	0,045	95,5	1229,3	730,4	1231,3	499	0,40	2,454	2,659	7,7	18,3	58,0
7-6A	4,5	0,045	95,5	1220,4	724,2	1222,4	496	0,40	2,450	2,659	7,9	18,5	57,4
médias	4,5	0,045	95,5	1219,7	724,71	1222,8	495	0,63	2,449	2,659	7,9	18,5	57,3
1-6B	5,0	0,05	95	1222,2	729,4	1223,8	493	0,32	2,472	2,637	6,3	18,1	65,5
2-6B	5,0	0,05	95	1215,7	723,3	1216,9	492	0,24	2,463	2,637	6,6	18,4	64,2
3-6B	5,0	0,05	95	1207,4	717,0	1208,7	490	0,26	2,456	2,637	6,9	18,7	63,2
4-6B	5,0	0,05	95	1235,7	731,7	1238,1	504	0,47	2,440	2,637	7,5	19,2	61,1
5-6B	5,0	0,05	95	1228,8	731,2	1230,4	498	0,32	2,462	2,637	6,7	18,5	64,0
6-6B	5,0	0,05	95	1226,1	732,4	1227,4	494	0,26	2,477	2,637	6,1	18,0	66,2
7-6B	5,0	0,05	95	1220,8	724,3	1221,8	497	0,20	2,454	2,637	6,9	18,7	62,9
médias	5,0	0,05	95	1222,4	727,04	1223,9	495	0,30	2,460	2,637	6,7	18,5	63,9
1-6C	5,5	0,055	94,5	1236,9	739,9	1237,6	497	0,14	2,485	2,616	5,0	18,1	72,4

número do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
2-6C	5,5	0,055	94,5	1226,6	736,9	1227,9	490	0,26	2,498	2,616	4,5	17,7	74,6
3-6C	5,5	0,055	94,5	1217,4	733,7	1218,9	484	0,31	2,509	2,616	4,1	17,4	76,4
4-6C	5,5	0,055	94,5	1221,2	733,8	1222,6	487	0,29	2,498	2,616	4,5	17,7	74,6
6-6C	5,5	0,055	94,5	1239,0	737,3	1225,3	502	-2,81	2,539	2,616	2,9	16,4	82,0
7-6C	5,5	0,055	94,5	1224,4	741,6	1241,1	483	3,34	2,451	2,616	6,3	19,3	67,3
médias	5,5	0,055	94,5	1226,9	737,17	1228,1	490	0,25	2,499	2,616	4,5	17,7	74,9
1-6D	6,0	0,06	94	1229,2	741,5	1230,6	488	0,29	2,513	2,595	3,2	17,7	82,1
2-6D	6,0	0,06	94	1209,0	730,4	1209,6	479	0,13	2,523	2,595	2,8	17,3	83,9
3-6D	6,0	0,06	94	1221,9	740,0	1222,6	482	0,15	2,532	2,595	2,4	17,0	85,7
4-6D	6,0	0,06	94	1225,4	739,8	1226,2	486	0,16	2,519	2,595	2,9	17,5	83,2
5-6D	6,0	0,06	94	1220,5	739,1	1221,8	481	0,27	2,528	2,595	2,6	17,2	85,0
6-6D	6,0	0,06	94	1228,6	739,0	1232,0	490	0,69	2,492	2,595	4,0	18,3	78,3
7-6D	6,0	0,06	94	1225,7	739,2	1226,3	487	0,12	2,516	2,595	3,0	17,6	82,7
médias	6,0	0,06	94	1222,9	738,43	1224,2	484	0,26	2,518	2,595	3,0	17,5	83,0
1-6E	6,5	0,065	93,5	1216,7	728,6	1217,4	488	0,14	2,489	2,575	3,3	18,9	82,4
2-6E	6,5	0,065	93,5	1226,0	736,6	1226,6	489	0,12	2,502	2,575	2,8	18,5	84,7
3-6E	6,5	0,065	93,5	1227,6	737,2	1228,2	490	0,12	2,500	2,575	2,9	18,5	84,4
4-6E	6,5	0,065	93,5	1231,9	743,4	1232,5	489	0,12	2,519	2,575	2,2	17,9	87,8
5-6E	6,5	0,065	93,5	1221,5	733,8	1222,9	488	0,29	2,497	2,575	3,0	18,6	83,9
6-6E	6,5	0,065	93,5	1225,8	737,2	1226,8	489	0,20	2,504	2,575	2,8	18,4	85,0
7-6E	6,5	0,065	93,5	1218,3	730,4	1219,4	488	0,22	2,491	2,575	3,2	18,8	82,8
médias	6,5	0,065	93,5	1224	735,31	1224,8	489	0,18	2,500	2,575	2,9	18,5	84,4

Teor (%)	Dap (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,5	2,423	7,9	19,3	57,3
5,0	2,460	6,7	18,5	63,9
5,5	2,499	4,5	17,7	74,9
6,0	2,518	3,0	17,5	83,0
6,5	2,500	2,9	18,5	84,4

Ensaio Marshall - 82-18-0

Figura A6: Parâmetros Marshall para mistura 82-18-0

Planilha de dosagem Marshall - ligante asfáltico 7 (75-18-7)

dens. efetiva do agregado	2,867
dens. ponderada dos agregados	2,869
dens. do ligante asfáltico	1,048

Tabela A7: Parâmetros Marshall para mistura 75-18-7

número do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
1-7A	4,5	0,045	95,5	1232,3	735,2	1233,8	497	0,30	2,472	2,659	7,1	17,7	60,2
2-7A	4,5	0,045	95,5	1228,9	733,5	1231,7	495	0,56	2,467	2,659	7,2	17,9	59,6
3-7A	4,5	0,045	95,5	1222,4	731,3	1225,5	491	0,63	2,473	2,659	7,0	17,7	60,5
4-7A	4,5	0,045	95,5	1225,9	729,8	1228,8	496	0,58	2,457	2,659	7,6	18,2	58,2
5-7A	4,5	0,045	95,5	1232,4	736,2	1234,8	496	0,48	2,472	2,659	7,0	17,7	60,2
6-7A	4,5	0,045	95,5	1218,3	728,1	1221,5	490	0,65	2,469	2,659	7,1	17,8	59,9
7-7A	4,5	0,045	95,5	1226,0	730,6	1229,7	495	0,74	2,456	2,659	7,6	18,2	58,2
médias	4,5	0,045	95,5	1226,6	732,1	1229,4	495	0,56	2,467	2,659	7,2	17,9	59,5
1-7B	5,0	0,050	95	1221,9	735,5	1223,0	486	0,23	2,506	2,638	5,0	17,0	70,7
2-7B	5,0	0,050	95	1223,7	736,1	1224,6	488	0,18	2,505	2,638	5,0	17,1	70,5
3-7B	5,0	0,050	95	1221,2	736,4	1222,8	485	0,33	2,511	2,638	4,8	16,9	71,4
4-7B	5,0	0,050	95	1222,2	735,2	1223,6	487	0,29	2,502	2,638	5,1	17,1	70,0
5-7B	5,0	0,050	95	1218,4	733,3	1220,2	485	0,37	2,502	2,638	5,1	17,1	70,0
6-7B	5,0	0,050	95	1226,8	737,5	1229,2	489	0,49	2,495	2,638	5,4	17,4	68,8
7-7B	5,0	0,050	95	1229,7	738,9	1232,0	491	0,47	2,494	2,638	5,5	17,4	68,7
médias	5,0	0,050	95	1223,4	736,1	1225,1	487	0,34	2,502	2,638	5,1	17,1	70,0
1-7C	5,5	0,055	94,5	1225,0	734,7	1225,9	490	0,18	2,494	2,617	4,7	17,9	73,7
2-7C	5,5	0,055	94,5	1234,2	741,0	1235,4	493	0,24	2,496	2,617	4,6	17,8	74,1
3-7C	5,5	0,055	94,5	1228,1	735,3	1229,8	493	0,34	2,484	2,617	5,1	18,2	72,0

número do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
4-7C	5,5	0,055	94,5	1225,0	736,9	1225,9	488	0,18	2,505	2,617	4,3	17,5	75,5
5-7C	5,5	0,055	94,5	1224,5	734,5	1225,5	490	0,20	2,494	2,617	4,7	17,9	73,7
6-7C	5,5	0,055	94,5	1223,8	735,3	1225,3	489	0,31	2,498	2,617	4,6	17,7	74,3
7-7C	5,5	0,055	94,5	1226,6	735,8	1228,3	491	0,35	2,491	2,617	4,8	18,0	73,1
médias	5,5	0,055	94,5	1226,7	736,2	1228	491	0,26	2,494	2,617	4,7	17,8	73,8
1-7D	6,0	0,060	94	1221,2	736,3	1222,1	485	0,19	2,514	2,596	3,2	17,6	82,0
2-7D	6,0	0,060	94	1229,3	745,2	1230,3	484	0,21	2,534	2,596	2,4	17,0	85,9
3-7D	6,0	0,060	94	1213,0	734,6	1213,8	478	0,17	2,531	2,596	2,5	17,1	85,3
4-7D	6,0	0,060	94	1220,1	735,0	1221,0	485	0,19	2,510	2,596	3,3	17,7	81,3
5-7D	6,0	0,060	94	1226,1	742,7	1227,3	483	0,25	2,530	2,596	2,6	17,1	85,1
6-7D	6,0	0,060	94	1226,1	742,2	1227,3	484	0,25	2,528	2,596	2,7	17,2	84,6
7-7D	6,0	0,060	94	1226,5	739,1	1228,9	487	0,49	2,504	2,596	3,6	18,0	80,2
médias	6,0	0,060	94	1223,2	739,3	1224,4	484	0,25	2,522	2,596	2,9	17,4	83,5
1-7E	6,5	0,065	93,5	1229,6	741,6	1229,9	488	0,06	2,518	2,576	2,3	17,9	87,4
2-7E	6,5	0,065	93,5	1214,2	730,6	1214,7	484	0,10	2,508	2,576	2,6	18,3	85,5
3-7E	6,5	0,065	93,5	1218,5	733,6	1219,2	485	0,14	2,509	2,576	2,6	18,2	85,7
4-7E	6,5	0,065	93,5	1214,7	731,2	1215,4	484	0,14	2,509	2,576	2,6	18,2	85,6
5-7E	6,5	0,065	93,5	1215,4	729,7	1216,0	486	0,12	2,499	2,576	3,0	18,5	83,9
6-7E	6,5	0,065	93,5	1215,9	728,6	1216,7	487	0,16	2,491	2,576	3,3	18,8	82,4
7-7E	6,5	0,065	93,5	1214,4	729,7	1215,2	485	0,16	2,501	2,576	2,9	18,5	84,3
médias	6,5	0,065	93,5	1217,5	732,1	1218,2	485	0,13	2,505	2,576	2,8	18,4	85,0

Teor (%)	Dap (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,5	2,467	7,2	17,9	59,5
5,0	2,502	5,1	17,1	70,0
5,5	2,494	4,7	17,8	73,8
6,0	2,522	2,9	17,4	83,5
6,5	2,505	2,8	18,4	85,0

Ensaio Marshall - 75-18-7

Figura A7: Parâmetros Marshall para mistura 75-18-7

Planilha de dosagem Marshall - ligante asfáltico 8 (68-18-14)

dens. efetiva do agregado 2,869

dens. ponderada dos agregados 2,869

dens. do ligante asfáltico 1,051

Tabela A8: Parâmetros Marshall para mistura 68-18-14

número do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
1-8A	4,5	0,045	95,5	1204,3	699,4	1206,1	505	0,36	2,377	2,662	10,7	20,9	48,7
2-8A	4,5	0,045	95,5	1197,8	695,2	1199,6	503	0,36	2,375	2,662	10,8	21,0	48,5
3-8A	4,5	0,045	95,5	1202,5	701,0	1204,4	502	0,38	2,389	2,662	10,3	20,5	49,9
4-8A	4,5	0,045	95,5	1202,4	699,5	1205,8	503	0,67	2,375	2,662	10,8	20,9	48,6
5-8A	4,5	0,045	95,5	1207,9	708,2	1210,6	500	0,54	2,404	2,662	9,7	20,0	51,6
6-8A	4,5	0,045	95,5	1202,8	702,5	1206,2	500	0,68	2,388	2,662	10,3	20,5	49,9
7-8A	4,5	0,045	95,5	1209,2	705,2	1211,8	504	0,51	2,387	2,662	10,3	20,5	49,7
médias	4,5	0,045	95,5	1204	701,6	1206	502,3	0,50	2,385	2,662	10,4	20,6	49,6
1-8B	5,0	0,050	95	1204,1	703,5	1205,5	501	0,28	2,399	2,641	9,2	20,6	55,5
2-8B	5,0	0,050	95	1199,0	701,8	1200,9	497	0,38	2,402	2,641	9,0	20,5	55,9
3-8B	5,0	0,050	95	1213,3	710,8	1215,1	503	0,36	2,406	2,641	8,9	20,3	56,3
4-8B	5,0	0,050	95	1204,7	702,0	1206,5	503	0,36	2,388	2,641	9,6	20,9	54,3
5-8B	5,0	0,050	95	1203,5	701,1	1205,3	502	0,36	2,387	2,641	9,6	21,0	54,2
6-8B	5,0	0,050	95	1216,4	711,6	1218,3	505	0,37	2,401	2,641	9,1	20,5	55,7
7-8B	5,0	0,050	95	1209,2	707,2	1211,8	502	0,52	2,396	2,641	9,2	20,7	55,2
médias	5,0	0,050	95	1207	705,4	1209	501,7	0,37	2,397	2,641	9,2	20,6	55,3
1-8C	5,5	0,055	94,5	1201,8	711,0	1203,3	491	0,30	2,441	2,620	6,8	19,6	65,2
2-8C	5,5	0,055	94,5	1210,4	714,8	1212,5	496	0,42	2,432	2,620	7,2	19,9	64,0
3-8C	5,5	0,055	94,5	1202,0	711,2	1203,5	491	0,30	2,442	2,620	6,8	19,6	65,3

número do CP	% ligante	% ligante	% agreg	massa ao ar	massa imersa	massa SSS	volume CP	absorção de água	D ap	DMM média	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
4-8C	5,5	0,055	94,5	1196,7	707,5	1198,4	489	0,35	2,438	2,620	6,9	19,7	64,8
5-8C	5,5	0,055	94,5	1205,9	710,3	1208,4	496	0,50	2,421	2,620	7,6	20,3	62,6
6-8C	5,5	0,055	94,5	1205,2	707,8	1207,2	497	0,40	2,413	2,620	7,9	20,5	61,6
7-8C	5,5	0,055	94,5	1208,9	711,1	1211,1	498	0,44	2,418	2,620	7,7	20,4	62,1
médias	5,5	0,055	94,5	1204	710,5	1206	493,9	0,39	2,429	2,620	7,3	20,0	63,6
1-8D	6,0	0,060	94	1203,0	711,3	1204,7	492	0,34	2,438	2,599	6,2	20,1	69,2
2-8D	6,0	0,060	94	1196,8	709,5	1198,4	487	0,33	2,448	2,599	5,8	19,8	70,6
3-8D	6,0	0,060	94	1196,9	707,8	1198,6	489	0,35	2,439	2,599	6,2	20,1	69,3
4-8D	6,0	0,060	94	1198,7	704,4	1200,2	494	0,30	2,418	2,599	7,0	20,8	66,4
5-8D	6,0	0,060	94	1196,5	705,8	1197,8	491	0,26	2,432	2,599	6,4	20,3	68,3
6-8D	6,0	0,060	94	1205,3	713,0	1207,3	492	0,40	2,438	2,599	6,2	20,1	69,2
7-8D	6,0	0,060	94	1210,0	713,2	1211,9	497	0,38	2,426	2,599	6,7	20,5	67,6
médias	6,0	0,060	94	1201	709,3	1203	491,7	0,34	2,434	2,599	6,3	20,2	68,7
1-8E	6,5	0,065	93,5	1209,3	717,2	1210,9	492	0,32	2,449	2,579	5,0	20,2	75,1
2-8E	6,5	0,065	93,5	1211,7	721,8	1213,1	490	0,28	2,466	2,579	4,4	19,6	77,7
3-8E	6,5	0,065	93,5	1215,2	720,1	1216,8	495	0,32	2,447	2,579	5,1	20,3	74,7
4-8E	6,5	0,065	93,5	1209,1	718,2	1210,7	491	0,32	2,455	2,579	4,8	20,0	76,0
5-8E	6,5	0,065	93,5	1205,5	716,8	1207,1	489	0,33	2,459	2,579	4,7	19,9	76,5
6-8E	6,5	0,065	93,5	1199,0	710,4	1200,8	489	0,37	2,445	2,579	5,2	20,3	74,4
7-8E	6,5	0,065	93,5	1200,4	708,5	1202	492	0,32	2,432	2,579	5,7	20,7	72,6
médias	6,5	0,065	93,5	1207	716,1	1209	491	0,32	2,450	2,579	5,0	20,1	75,3

Teor (%)	Dap (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)
4,5	2,385	10,4	20,6	49,6
5,0	2,397	9,2	20,6	55,3
5,5	2,429	7,3	20,0	63,6
6,0	2,434	6,3	20,2	68,7
6,5	2,450	5,0	20,1	75,3

Ensaio Marshall - 68-18-14

Figura A8: Parâmetros Marshall para mistura 68-18-14

Tabela B1: Estabilidade e Fluência Marshall para mistura

Corpo-de-prova	E (Kg)	E (N)	Média E (N)	F (mm)	Média F (mm)
2-1A	1832	17972	17741	3,59	3,41
3-1A	1785	17511		3,22	
7-1B	1468	14401	14828	3,96	3,55
1-1B	1555	15255		3,13	
3-1C	1649	16177	15868	4,06	3,99
1-1C	1586	15559		3,92	
7-1D	1434	14068	14166	4,16	4,17
5-1D	1454	14264		4,17	
3-1E	1328	13028	11875	5,07	4,86
7-1E	1093	10722		4,64	
2-2A	1499	14705	14892	2,51	2,73
5-2A	1537	15078		2,95	
7-2B	1515	14862	13979	3,06	2,88
5-2B	1335	13096		2,70	
5-2C	1186	11635	13057	3,93	4,01
6-2C	1476	14480		4,09	
4-2D	1398	13714	13450	5,17	5,65
3-2D	1344	13185		6,12	
3-2E	1008	9888	10668	4,22	4,53
1-2E	1167	11448		4,84	
6-3A	1234	12106	12032	2,93	2,94
2-3A	1219	11958		2,94	
3-3B	1375	13489	13592	2,74	2,73
7-3B	1396	13695		2,71	
7-3C	1305	12802	13018	2,98	3,11
4-3C	1349	13234		3,24	
1-3D	1106	10850	10094	4,21	4,20
3-3D	952	9339		4,19	
3-3E	1092	10713	10570	4,18	4,34
6-3E	1063	10428		4,49	
5-4A	1524	14950	15338	3,35	3,37
6-4A	1603	15725		3,39	
6-4B	1811	17766	15735	3,44	3,47
1-4B	1397	13705		3,50	
4-4C	1668	16363	15740	3,45	3,44
7-4C	1541	15117		3,43	
7-4D	1506	14774	14847	3,97	4,11
5-4D	1521	14921		4,24	
4-4E	1503	14744	14676	4,07	3,79
7-4E	1489	14607		3,51	

Corpo-de-prova	E (Kg)	E (N)	Média E (N)	F (mm)	Média F (mm)
3-5A	2140	20993	18575	3,35	3,54
7-5A	1647	16157		3,72	
5-5B	1616	15853	15264	3,73	3,47
6-5B	1496	14676		3,21	
3-5C	1437	14097	14180	3,29	3,40
1-5C	1454	14264		3,51	
7-5D	1217	11939	12552	3,54	3,77
4-5D	1342	13165		3,99	
2-5E	1199	11762	12675	4,24	4,22
1-5E	1385	13587		4,20	
1-6A	1995	19571	19321	2,74	2,86
2-6A	1944	19071		2,98	
5-6B	1542	15127	18737	3,52	3,49
6-6B	2278	22347		3,45	
6-6C	2550	25016	23137	3,62	3,85
4-6C	2167	21258		4,07	
7-6D	1790	17560	19630	4,17	4,10
1-6D	2212	21700		4,02	
4-6E	1825	17903	16319	4,23	4,21
2-6E	1502	14735		4,19	
4-7A	2157	21160	19757	3,22	3,02
7-7A	1871	18355		2,82	
1-7B	2674	26232	26693	2,95	3,58
2-7B	2768	27154		4,20	
5-7C	2011	19728	20312	3,67	3,77
4-7C	2130	20895		3,87	
2-7D	2442	23956	21906	3,47	3,60
5-7D	2024	19855		3,72	
3-7E	1229	12056	12312	5,88	6,15
1-7E	1281	12567		6,42	
3-8A	1238	12145	11669	3,26	3,16
7-8A	1141	11193		3,06	
2-8B	1256	12321	11247	3,47	3,41
3-8B	1037	10173		3,34	
6-8C	1134	11125	11188	3,38	3,33
7-8C	1147	11252		3,27	
3-8D	1446	14185	13474	3,46	3,69
6-8D	1301	12763		3,91	
7-8E	1017	9977	10972	4,28	4,03
1-8E	1220	11968		3,77	

Tabela C1: Módulo de Resiliência das misturas no teor de 4,5%

* Valores de módulos em MPa.

Teor de 4,5%					
Ligante	Ensaio	Módulo Total – DNER*	Módulo Instantâneo – DNER*	Módulo Total – NCHRP*	Módulo Instantâneo* Real - NCHRP
100-0-0	1-1A	15394	23103	16506	22239
	2-1A	16111	21974	15906	21667
	3-1A	18649	24019	20022	24415
	4-1A	15377	21937	16198	21422
	5-1A	15292	21852	16675	21907
	6-1A	16462	22356	17178	22848
	7-1A	15695	24856	16806	22371
	Média	16140	22871	17042	22410
93-0-7	1-2A	11549	18555	12466	16934
	2-2A	12342	19810	13349	17914
	3-2A	12200	19906	12015	16825
	4-2A	11947	19516	13007	17371
	5-2A	14552	24816	15732	21260
	6-2A	11019	18179	11826	16097
	7-2A	10813	18450	11550	15703
	Média	12060	19890	12849	17443
86-0-14	1-3A	7172	14057	7668	10672
	2-3A	5984	11207	6053	8596
	3-3A	6661	13215	6950	9708
	4-3A	6534	11748	7000	9687
	5-3A	7150	12487	7654	10477
	6-3A	7543	14123	7897	11050
	7-3A	6432	11383	6664	9300
	Média	6782	12603	7127	9927
91-9-0	1-4A	11405	16498	11845	15944
	2-4A	12533	18488	13238	17724
	3-4A	11277	16755	11996	15967
	4-4A	10926	16500	11448	15474
	5-4A	12942	18956	13793	18265
	6-4A	13761	20716	14808	19855
	7-4A	10899	16464	11540	15545
	Média	11963	17768	12667	16968

Teor de 4,5%					
Ligante	Ensaio	Módulo Total – DNER*	Módulo Instantâneo – DNER*	Módulo Total – NCHRP*	Módulo Instantâneo Real – NCHRP*
82-18-0	1-6A	10997	16431	11738	15644
	2-6A	10281	15067	10871	14565
	3-6A1	12469	17275	13342	17432
	4-6A1	16482	21581	17156	21750
	5-6A1	18382	23511	19156	23973
	6-6A1	18001	22595	19046	23011
	7-6A1	17586	22995	18585	22799
	Média	14885	19922	15699	19882
77-9-14	1-5A1	11774	16617	12229	16161
	2-5A1	10025	15297	10836	14328
	3-5A	12537	17909	13257	17328
	4-5A1	11469	16775	12275	16210
	5-5A1	11210	16601	12134	15918
	6-5A1	11342	16017	11707	15316
	7-5A1	8909	13569	9469	12698
	Média	11038	16112	11701	15423
75-18-7	1-7A	10741	15465	11424	15056
	2-7A1	11516	16459	12172	15920
	3-7A1	12486	17394	13199	17277
	4-7A	9313	13958	9846	13134
	5-7A	11380	16177	12145	15894
	6-7A1	11874	16778	12538	16549
	7-7A	8916	13608	9371	12538
	Média	10889	15691	11528	15195
68-18-14	1-8A1	4955	7631	5079	6990
	2-8A	5029	7676	5150	7007
	3-8A	6128	9667	6275	8549
	4-8A	4924	7520	4975	6907
	5-8A1	5720	8914	6112	8187
	6-8A	5804	8906	6052	8133
	7-8A1	4810	7506	4887	6772
	Média	5339	8260	5504	7506

Tabela C2: Módulo de Resiliência das misturas no teor de 5,0%

Teor de 5,0%					
Ligante	Ensaio	Módulo Total – DNER*	Módulo Instantâneo – DNER*	Módulo Total – NCHRP*	Módulo Instantâneo Real – NCHRP*
100-0-0	1-1B	17266	24335	18096	23840
	2-1B	19431	24904	20471	26777
	3-1B	19022	26342	20191	26908
	4-1B	15881	24250	17570	23315
	5-1B	17515	24971	18758	24513
	6-1B	17360	25295	18357	24380
	7-1B	15596	22401	16293	21907
	Média	17439	24642	18534	24520
93-0-7	1-2B1	11796	18338	12723	17285
	2-2B	12308	20294	13232	18014
	3-2B	12099	19456	13092	17558
	4-2B	11959	19368	13014	17815
	5-2B	11066	17952	11637	15959
	6-2B1	11095	18749	11687	16118
	7-2B	10397	17428	11043	15078
	Média	11531	18798	12347	16832
86-0-14	1-3B	6940	13372	7115	10056
	2-3B	7205	14254	7519	10644
	3-3B	7711	13369	8089	11087
	4-3B	6651	13330	6886	9709
	5-3B	7135	14056	7388	10446
	6-3B	6785	12983	6978	9960
	7-3B	6246	10972	6537	9098
	Média	6953	13191	7216	10143
91-9-0	1-4B	16614	23625	17635	23548
	2-4B	15758	22544	16538	22331
	3-4B1	15577	23065	16484	22050
	4-4B1	14256	21355	15052	20356
	5-4B	15591	22715	16650	22339
	6-4B	16904	24296	17715	23246
	7-4B	15923	22371	16265	21937
	Média	15803	22853	16620	22258

Teor de 5,0%					
Ligante	Ensaio	Módulo Total – DNER*	Módulo Instantâneo – DNER*	Módulo Total – NCHRP*	Módulo Instantâneo Real – NCHRP*
82-18-0	1-6B1	10834	15965	11600	15197
	2-6B	9872	15091	10517	13865
	3-6B	9400	14379	9960	13154
	4-6B1	10421	15597	11221	14836
	5-6B	8986	13263	9514	12676
	6-6B	11746	16938	12406	16503
	7-6B1	10481	14797	10990	14477
	Média	10248	15147	10887	14387
77-9-14	1-5B	9881	15236	10433	14083
	2-5B1	8796	13557	9232	12507
	3-5B	9826	15239	10435	14012
	4-5B1	10004	15633	10706	14419
	5-5B1	11150	17380	11784	15965
	6-5B	8827	13999	9309	12537
	7-5B	9293	14859	10275	13838
	Média	9682	15129	10311	13909
75-18-7	1-7B	10217	14047	10810	13728
	2-7B	10103	13928	10622	13947
	3-7B	9021	12524	8882	12191
	4-7B	10071	14298	10429	13909
	5-7B1	9179	12963	9700	12831
	6-7B	8292	12294	8812	11683
	7-7B1	8735	12795	9433	12462
	Média	9374	13264	9813	12965
68-18-14	1-8B1	4603	6630	4613	6298
	2-8B	4849	7318	4873	6787
	3-8B1	4376	6814	4510	6132
	4-8B	4623	6899	4630	6473
	5-8B1	4667	6936	4637	6495
	6-8B1	4612	7185	4613	6400
	7-8B1	4624	7235	4770	6549
	Média	4622	7002	4664	6448

Tabela C3: Módulo de Resiliência das misturas no teor de 5,5%

Teor de 5,5%					
Ligante	Ensaio	Módulo Total – DNER*	Módulo Instantâneo – DNER*	Módulo Total – NCHRP*	Módulo Instantâneo Real – NCHRP*
100-0-0	1-1C	17222	24168	18305	23990
	2-1C	16126	23051	17226	22521
	3-1C	13551	21132	14406	19506
	4-1C	15140	23322	17076	22645
	5-1C	14801	23185	15778	21369
	6-1C	15071	23770	16384	22091
	7-1C	16716	24292	17549	23483
	Média	15518	23274	16675	22229
93-0-7	1-2C1	9736	17399	10497	14278
	2-2C	10697	18241	11555	15571
	3-2C	9344	15359	9908	13644
	4-2C	9695	15944	10391	14163
	5-2C	8038	15286	8628	12011
	6-2C	11452	22554	12103	17176
	7-2C	8800	15043	9420	12957
	Média	9680	17118	10357	14257
86-0-14	1-3C	6900	12755	7352	10234
	2-3C	6698	14673	6988	9936
	3-3C	6784	13802	7112	9957
	4-3C	6906	12950	7632	10326
	5-3C	6247	11279	6622	9099
	6-3C	6629	12653	6909	9844.8
	7-3C	6194	12179	6567	9156
	Média	6623	12899	7026	9785
91-9-0	1-4C	14010	19737	14770	19817
	2-4C1	14257	19716	14945	19998
	3-4C	13232	19337	14131	18933
	4-4C1	15720	21605	16645	21153
	5-4C1	14028	20177	14783	19777
	6-4C1	14263	20844	15046	20296
	7-4C1	13358	19578	14184	18804
	Média	14124	20142	14929	19825

Teor de 5,5%					
Ligante	Ensaio	Módulo Total – DNER*	Módulo Instantâneo – DNER*	Módulo Total – NCHRP*	Módulo Instantâneo Real – NCHRP*
82-18-0	1-6C1	14349	18097	14669	18352
	2-6C	14450	18358	15225	19097
	3-6C	14075	18272	14656	18512
	4-6C1	11786	16297	12984	16588
	5-6C1	13505	18019	15335	18700
	6-6C1	16009	20291	16915	21015
	7-6C	11501	16855	12585	16339
	Média	13668	18027	14624	18372
77-9-14	1-5C	7541	12484	7992	10875
	2-5C1	9887	15665	10314	14111
	3-5C	7989	13040	8387	11537
	4-5C1	9387	14790	9764	13447
	5-5C1	8915	14079	9194	12749
	6-5C1	9409	14938	9880	13544
	7-5C	9191	15062	9679	13190
	Média	8903	14294	9316	12779
75-18-7	1-7C1	8202	11848	8570	11609
	2-7C1	7597	11511	8016	10928
	3-7C	8013	11712	8309	11307
	4-7C1	8898	12777	9265	12487
	5-7C	10024	15268	10449	14356
	6-7C	7758	11340	8131	10944
	7-7C1	8721	13230	9125	12352
	Média	8459	12526	8838	11997
68-18-14	1-8C1	6080	9326	6368	8585
	2-8C1	5943	9137	6005	8402
	3-8C	6069	9191	6163	8590
	4-8C1	6281	9610	6460	8840
	5-8C	5402	8664	5518	7593
	6-8C1	4710	7383	4838	6622
	7-8C	4630	7633	4777	6545
	Média	5588	8706	5733	7882

Tabela C4: Módulo de Resiliência das misturas no teor de 6,0%

Teor de 6,0%					
Ligante	Ensaio	Módulo Total – DNER*	Módulo Instantâneo – DNER*	Módulo Total – NCHRP*	Módulo Instantâneo Real – NCHRP*
100-0-0	1-1D	15390	23022	16746	22239
	2-1D	15230	22608	16320	21728
	3-1D1	15930	23724	17287	23056
	4-1D	14761	22765	15931	21692
	5-1D1	13512	20346	14729	19513
	6-1D	14763	22130	16412	21711
	7-1D1	16244	24787	17879	23876
	Média	15119	22769	16472	21973
93-0-7	1-2D	8255	17760	8723	12340
	2-2D	7908	13738	8784	11802
	3-2D	10004	17639	11088	14864
	4-2D	5934	12128	6289	8770
	5-2D	7100	13849	7503	10537
	6-2D	8432	14775	8811	12245
	7-2D	7536	15253	7676	10927
	Média	7881	15020	8411	11641
86-0-14	1-3D	3557	6887	3634	5157
	2-3D	4376	8388	4466	6334
	3-3D	3651	7408	3734	5348
	4-3D	4000	7878	4165	5834
	5-3D	4302	8321	4453	6206
	6-3D	4187	7962	4309	6021
	7-3D	4321	8409	4422	6269
	Média	4056	7893	4169	5881
91-9-0	1-4D	14437	21111	15308	20593
	2-4D	12960	19065	13839	18378
	3-4D1	12877	18678	13553	18040
	4-4D	13023	19224	14010	18501
	5-4D	14481	21165	15378	20729
	6-4D	14023	20341	14885	19836
	7-4D	15263	23316	16032	21663
	Média	13866	20414	14715	19677

Teor de 6,0%					
Ligante	Ensaio	Módulo Total – DNER*	Módulo Instantâneo – DNER*	Módulo Total – NCHRP*	Módulo Instantâneo Real – NCHRP*
82-18-0	1-6D1	14941	19446	16367	19713
	2-6D	12071	16349	12829	16501
	3-6D1	12268	16463	12818	16482
	4-6D1	11155	15751	11984	15449
	5-6D	11628	16224	12342	16219
	6-6D	11391	16321	12083	15751
	7-6D	10512	15273	11004	14643
	Média	11995	16547	12775	16394
77-9-14	1-5D1	7350	12036	7867	10609
	2-5D1	7308	12033	7783	10528
	3-5D1	7116	11375	7492	10114
	4-5D	6522	11116	6871	9461
	5-5D1	6771	11302	7164	9722
	6-5D1	7076	11773	7446	10138
	7-5D1	6651	11248	6931	9586
	Média	6970	11555	7365	10023
75-18-7	1-7D	9626	13271	10188	13326
	2-7D	11463	16000	12088	15820
	3-7D	9017	12485	9461	12461
	4-7D	8788	12489	9305	12307
	5-7D	11054	16162	11692	15759
	6-7D1	9647	13969	10171	13649
	7-7D	8478	12932	8991	12011
	Média	9725	13901	10271	13619
68-18-14	1-8D	7614	11660	7867	10816
	2-8D	6718	9893	6881	9343
	3-8D	7678	11602	7967	10712
	4-8D1	5345	8015	5491	7450
	5-8D	6603	9873	6753	9236
	6-8D1	7539	11319	7570	10450
	7-8D1	6076	9307	6239	8535
	Média	6796	10239	6967	9506

Tabela C5: Módulo de Resiliência das misturas no teor de 6,5%

Teor de 6,5%					
Ligante	Ensaio	Módulo Total – DNER*	Módulo Instantâneo – DNER*	Módulo Total – NCHRP*	Módulo Instantâneo Real – NCHRP*
100-0-0	1-1E	12998	20493	13526	18846
	2-1E1	14861	23110	16226	22439
	3-1E1	15781	25027	16927	22795
	4-1E	12276	19315	13263	18044
	5-1E	12793	20395	13719	18628
	6-1E	11269	18091	12121	16262
	7-1E1	10429	16794	11064	15068
	Média	12915	20461	13835	18869
93-0-7	1-2E	10717	18986	11335	15718
	2-2E	7997	13753	8451	11602
	3-2E	8812	15771	9419	12909
	4-2E	6392	12627	6559	9325
	5-2E	7718	13514	8030	11198
	6-2E	6594	13202	6765	9606
	7-2E	5796	12001	6048	8499
	Média	7718	14265	8087	11265
86-0-14	1-3E	4601	8491	4830	6632
	2-3E	4897	9372	5051	7082
	3-3E	5021	9657	5311	7409
	4-3E	4396	9277	4658	6576
	5-3E	4970	10029	5290	7381
	6-3E	4236	7886	4411	6106
	7-3E	4461	8496	4572	6476
	Média	4655	9030	4875	6809
91-9-0	1-4E1	12351	17552	12987	17517
	2-4E1	12617	18561	13319	17751
	3-4E1	12346	17561	13447	17450
	4-4E1	11572	16870	12197	16033
	5-4E1	12365	18068	13204	17483
	6-4E	12665	17772	13348	17831
	7-4E1	12955	19069	13461	18062
	Média	12410	17922	13138	17447

Teor de 6,5%					
Ligante	Ensaio	Módulo Total – DNER*	Módulo Instantâneo – DNER*	Módulo Total – NCHRP*	Módulo Instantâneo Real – NCHRP*
82-18-0	1-6E1	9197	13918	9721	13009
	2-6E1	9145	13648	9678	12923
	3-6E	9736	14442	10520	13894
	4-6E1	10784	15387	11489	15089
	5-6E	9985	14760	10493	14175
	6-6E	9416	13694	10000	13341
	7-6E1	10022	15074	10545	14167
	Média	9755	14418	10350	13800
77-9-14	1-5E1	6677	11257	7034	9604
	2-5E1	5690	9352	5962	8118
	3-5E1	6093	9911	6464	8723
	4-5E	6205	10532	6509	8950
	5-5E	6176	10942	6377	8973
	6-5E1	6648	11284	6899	9515
	7-5E	6092	10277	6374	8776
	Média	6226	10508	6517	8951
75-18-7	1-7E	6068	9183	6274	8515
	2-7E1	5500	8461	5747	7793
	3-7E	6053	8922	6194	8486
	4-7E	6028	9428	6251	8578
	5-7E	5512	8691	5801	7839
	6-7E1	5347	8294	5506	7513
	7-7E	5891	9010	6049	8294
	Média	5771	8856	5974	8146
68-18-14	1-8E	5351	8442	5526	7524
	2-8E	4906	7928	5015	6927
	3-8E	4914	7637	4956	6852
	4-8E1	4854	7613	4927	6822
	5-8E	5155	8285	5170	7138
	6-8E	5466	9062	5483	7794
	7-8E1	4616	6994	4584	6374
	Média	5038	7994	5095	7061

Tabela D1: Resistência à tração das misturas estudadas

Ligante	Corpo-de-prova	Diâmetro	Altura	Carga (Kg)	Carga (N)	RT (Mpa)	Média RT
100-0-0	1-1A	10,16	6,21	2579	25300	2,55	2,58
	4-1A	10,19	6,19	2623	25732	2,60	
	5-1B	10,16	6,09	2790	27370	2,82	2,66
	6-1B	10,17	6,12	2494	24466	2,50	
	2-1C	10,18	6,01	2923	28675	2,99	3,04
	4-1C	10,16	6,04	3033	29754	3,09	
	1-1D	10,16	5,99	2999	29420	3,08	3,02
	2-1D	10,15	5,97	2878	28233	2,97	
	1-1E	10,16	5,97	2555	25065	2,63	2,66
	2-1E	10,15	5,97	2607	25575	2,69	
93-0-7	6-2A	10,16	6,06	2242	21994	2,28	2,21
	7-2A	10,2	5,96	2094	20542	2,15	
	1-2B	10,17	5,99	2485	24378	2,55	2,59
	2-2B	10,18	5,94	2541	24927	2,63	
	2-2C	10,18	5,99	2158	21170	2,21	2,26
	4-2C	10,17	5,96	2243	22004	2,31	
	1-2D	10,18	5,89	1745	17118	1,82	1,80
	7-2D	10,17	5,99	1743	17099	1,79	
	2-2E	10,16	5,92	1863	18276	1,94	1,96
	6-2E	10,17	5,87	1898	18619	1,99	
86-0-14	4-3A	10,18	6,15	1453	14254	1,45	1,48
	5-3A	10,19	6,16	1516	14872	1,51	
	1-3B	10,18	6,03	1642	16108	1,67	1,62
	6-3B	10,17	6,05	1550	15206	1,57	
	1-3C	10,15	5,96	1798	17638	1,86	1,90
	3-3C	10,18	5,90	1864	18286	1,94	
	5-3D	10,15	5,95	1230	12066	1,27	1,30
	6-3D	10,16	5,83	1257	12331	1,33	
	1-3E	10,17	5,89	1213	11900	1,27	1,23
	7-3E	10,16	5,87	1148	11262	1,20	
91-9-0	1-4A	10,19	6,23	2006	19679	1,97	1,86
	4-4A	10,17	6,28	1790	17560	1,75	
	4-4B	10,16	6,18	2184	21425	2,17	2,39
	7-4B	10,18	6,04	2563	25143	2,60	
	1-4C	10,17	6,11	2415	23691	2,43	2,30
	5-4C	10,19	6,14	2180	21386	2,18	
	1-4D	10,16	5,97	2840	27860	2,93	2,97
	6-4D	10,15	5,93	2899	28439	3,01	
	1-4E	10,17	6,07	2472	24250	2,50	2,45
	5-4E	10,17	6,07	2373	23279	2,40	

Ligante	Corpo-de-prova	Diâmetro	Altura	Carga (Kg)	Carga (N)	RT (Mpa)	Média RT
77-9-14	1-5A	10,18	6,11	1929	18923	1,94	1,93
	6-5A	10,17	6,07	1890	18541	1,91	
	2-5B	10,16	6,04	1832	17972	1,87	1,92
	4-5B	10,16	5,88	1891	18551	1,98	
	2-5C	10,17	5,93	1752	17187	1,82	1,83
	7-5C	10,16	6,03	1816	17815	1,85	
	1-5D	10,16	5,94	1761	17275	1,82	1,81
	2-5D	10,15	5,95	1743	17099	1,80	
	6-5E	10,17	5,94	1621	15902	1,68	1,65
	7-5E	10,16	6,00	1587	15568	1,63	
0							
82-0-18	3-6A	10,18	6,20	2029	19904	2,01	2,18
	4-6A	10,2	6,15	2359	23142	2,35	
	2-6B	10,17	6,14	2077	20375	2,08	2,01
	7-6B	10,18	6,20	1958	19208	1,94	
	3-6C	10,18	6,04	2852	27978	2,90	2,59
	7-6C	10,16	6,18	2289	22455	2,28	
	3-6D	10,17	6,02	2866	28115	2,93	2,72
	4-6D	10,16	6,08	2484	24368	2,51	
	3-6E	10,16	6,11	2193	21513	2,21	2,13
	5-6E	10,17	6,10	2037	19983	2,05	
75-18-7	1-7A	10,19	6,17	1890	18541	1,88	2,03
	6-7A	10,19	6,12	2186	21445	2,19	
	3-7B	10,17	6,02	2328	22838	2,38	2,28
	4-7B	10,18	6,05	2158	21170	2,19	
	2-7C	10,18	6,13	1892	18561	1,89	1,98
	6-7C	10,17	6,08	2047	20081	2,07	
	6-7D	10,16	6,05	2211	21690	2,25	2,15
	7-7D	10,15	6,12	2044	20052	2,06	
	5-7E	10,16	6,08	1547	15176	1,56	1,60
	7-7E	10,15	6,08	1609	15784	1,63	
68-18-14	1-8A	10,18	6,30	1036	10163	1,01	1,03
	2-8A	10,16	6,30	1071	10507	1,05	
	1-8B	10,18	6,24	1165	11429	1,15	1,12
	5-8B	10,18	6,26	1115	10938	1,09	
	2-8C	10,16	6,20	1278	12537	1,27	1,25
	5-8C	10,17	6,21	1242	12184	1,23	
	1-8D	10,17	6,14	1477	14489	1,48	1,42
	4-8D	10,17	6,16	1372	13459	1,37	
	5-8E	10,17	6,08	1279	12547	1,29	1,22
	6-8E	10,14	6,11	1145	11232	1,15	

Tabela E1: MR/RT das misturas estudas

100-0-0					93-0-7				
% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/RT	% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/ RT
4,5	1-1A	16506	2,58	6407	4,5	1-2A	12466	2,21	5641
	2-1A	15906	2,58	6174		2-2A	13349	2,21	6040
	3-1A	20022	2,58	7772		3-2A	12015	2,21	5437
	4-1A	16198	2,58	6288		4-2A	13007	2,21	5885
	5-1A	16675	2,58	6473		5-2A	15732	2,21	7119
	6-1A	17178	2,58	6668		6-2A	11826	2,21	5351
	7-1A	16806	2,58	6524		7-2A	11550	2,21	5226
Méd				6615	Méd				5814
5,0	1-1B	18096	2,66	6802	5,0	1-2B1	12723	2,59	4912
	2-1B	20471	2,66	7694		2-2B	13232	2,59	5109
	3-1B	20191	2,66	7589		3-2B	13092	2,59	5055
	4-1B	17570	2,66	6604		4-2B	13014	2,59	5025
	5-1B	18758	2,66	7050		5-2B	11637	2,59	4493
	6-1B	18357	2,66	6900		6-2B1	11687	2,59	4512
	7-1B	16293	2,66	6124		7-2B	11043	2,59	4264
Méd				6966	Méd				4767
5,5	1-1C	18305	3,04	6028	5,5	1-2C	10497	2,26	4645
	2-1C	17226	3,04	5673		2-2C	11555	2,26	5113
	3-1C	14406	3,04	4744		3-2C	9908	2,26	4384
	4-1C	17076	3,04	5623		4-2C1	10391	2,26	4598
	5-1C	15778	3,04	5196		5-2C	8628	2,26	3818
	6-1C	16384	3,04	5395		6-2C	12103	2,26	5355
	7-1C	17549	3,04	5779		7-2C	9420	2,26	4168
Méd				5491	Méd				4583
6,0	1-1D	16746	3,02	5539	6,0	1-2D	8723	1,80	4846
	2-1D	16320	3,02	5398		2-2D	8784	1,80	4880
	3-1D1	17287	3,02	5718		3-2D	11088	1,80	6160
	4-1D	15931	3,02	5269		4-2D	6289	1,80	3494
	5-1D1	14729	3,02	4872		5-2D	7503	1,80	4168
	6-1D1	16412	3,02	5428		6-2D1	8811	1,80	4895
	7-1D1	17879	3,02	5914		7-2D	7676	1,80	4264
Méd				5448	Méd				4673

100-0-0				
% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/RT
6,5	1-1E	13526	2,88	4694
	2-1E1	16226	2,88	5632
	3-1E1	16927	2,88	5875
	4-1E1	13263	2,88	4603
	5-1E	13719	2,88	4762
	6-1E	12121	2,88	4207
	7-1E1	11064	2,88	3840
Méd				4802

93-0-7				
% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/RT
6,5	1-2E	11335	1,96	5783
	2-2E	8451	1,96	4312
	3-2E	9419	1,96	4805
	4-2E	6559	1,96	3346
	5-2E	8030	1,96	4097
	6-2E	6765	1,96	3452
	7-2E	6048	1,96	3086
Méd				4126

86-0-14				
% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/RT
4,5	1-3A	7668	1,48	5181
	2-3A	6053	1,48	4090
	3-3A	6950	1,48	4696
	4-3A	7000	1,48	4730
	5-3A	7654	1,48	5171
	6-3A	7897	1,48	5336
	7-3A	6664	1,48	4503
Méd				4815

91-9-0				
% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/RT
4,5	1-4A	11845	1,86	6368
	2-4A	13238	1,86	7117
	3-4A	11996	1,86	6449
	4-4A	11448	1,86	6155
	5-4A	13793	1,86	7415
	6-4A	14808	1,86	7961
	7-4A	11540	1,86	6204
Média				6810

5,0	1-3B	7115	1,62	4392
	2-3B	7519	1,62	4641
	3-3B	8089	1,62	4993
	4-3B	6886	1,62	4251
	5-3B	7388	1,62	4561
	6-3B	6978	1,62	4307
	7-3B	6537	1,62	4035
Médi				4454

5,0	1-4B	17635	2,39	7379
	2-4B	16538	2,39	6920
	3-4B1	16484	2,39	6897
	4-4B1	15052	2,39	6298
	5-4B	16650	2,39	6966
	6-4B1	17715	2,39	7412
	7-4B1	16265	2,39	6805
Média				6954

5,5	1-3C	7352	1,90	3869
	2-3C	6988	1,90	3678
	3-3C	7112	1,90	3743
	4-3C	7632	1,90	4017
	5-3C	6622	1,90	3485

5,5	1-4C1	14770	2,30	6422
	2-4C	14945	2,30	6498
	3-4C	14131	2,30	6144
	4-4C1	16645	2,30	7237
	5-4C1	14783	2,30	6428

	6-3C	6909	1,90	3636
	7-3C	6567	1,90	3456

Média 3698

6,0	1-3D	3634	1,30	2795
	2-3D	4466	1,30	3436
	3-3D	3734	1,30	2872
	4-3D	4165	1,30	3204
	5-3D	4453	1,30	3425
	6-3D	4309	1,30	3315
	7-3D	4422	1,30	3402

Média 3207

6,5	1-3E	4830	1,23	3927
	2-3E	5051	1,23	4107
	3-3E	5311	1,23	4318
	4-3E	4658	1,23	3787
	5-3E	5290	1,23	4300
	6-3E	4411	1,23	3586
	7-3E	4572	1,23	3717

Média 3963

77-9-14

% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/RT
4,5	1-5A1	12229	1,93	6336
	2-5A1	10836	1,93	5615
	3-5A	13257	1,93	6869
	4-5A	12275	1,93	6360
	5-5A	12134	1,93	6287
	6-5A1	11707	1,93	6066
	7-5A1	9469	1,93	4906

Média 6063

5,0	1-5B	10433	1,92	5434
	2-5B	9232	1,92	4808
	3-5B	10435	1,92	5435
	4-5B1	10706	1,92	5576
	5-5B1	11784	1,92	6138
	6-5B1	9309	1,92	4849
	7-5B1	10275	1,92	5352

	6-4C1	15046	2,30	6542
	7-4C1	14184	2,30	6167

Média 6491

6,0	1-4D	15308	2,97	5154
	2-4D	13839	2,97	4660
	3-4D1	13553	2,97	4563
	4-4D	14010	2,97	4717
	5-4D	15378	2,97	5178
	6-4D	14885	2,97	5012
	7-4D	16032	2,97	5398

Média 4955

6,5	1-4E	12987	2,45	5301
	2-4E1	13319	2,45	5436
	3-4E1	13447	2,45	5488
	4-4E1	12197	2,45	4979
	5-4E1	13204	2,45	5390
	6-4E	13348	2,45	5448
	7-4E1	13461	2,45	5494

Média 5362

82-18-0

% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/RT
4,5	1-6A	11738	2,18	5384
	2-6A	10871	2,18	4987
	3-6A1	13342	2,18	6120
	4-6A	17156	2,18	7870
	5-6A1	19156	2,18	8787
	6-6A	19046	2,18	8737
	7-6A1	18585	2,18	8525

Média 7201

5,0	1-6B1	11600	2,01	5771
	2-6B	10517	2,01	5232
	3-6B	9960	2,01	4955
	4-6B1	11221	2,01	5582
	5-6B	9514	2,01	4733
	6-6B	12406	2,01	6172
	7-6B1	10990	2,01	5468

Média 5370				
77-9-14				
% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/RT
5,5	1-5C	7992	1,83	4367
	2-5C1	10314	1,83	5636
	3-5C	8387	1,83	4583
	4-5C	9764	1,83	5335
	5-5C1	9194	1,83	5024
	6-5C1	9880	1,83	5399
	7-5C1	9679	1,83	5289
Média 5091				
6,0	1-5D1	7867	1,81	4346
	2-5D1	7783	1,81	4300
	3-5D1	7492	1,81	4139
	4-5D	6871	1,81	3796
	5-5D	7164	1,81	3958
	6-5D1	7446	1,81	4114
	7-5D	6931	1,81	3829
Média 4069				
6,5	1-5E	7034	1,65	4263
	2-5E	5962	1,65	3613
	3-5E	6464	1,65	3918
	4-5E1	6509	1,65	3945
	5-5E1	6377	1,65	3865
	6-5E	6899	1,65	4181
	7-5E	6374	1,65	3863
Média 3950				
77-18-7				
% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/RT
4,5	1-7A1	11424	2,03	5628
	2-7A1	12172	2,03	5996
	3-7A1	13199	2,03	6502
	4-7A	9846	2,03	4850
	5-7A1	12145	2,03	5983
	6-7A1	12538	2,03	6177
	7-7A1	9371	2,03	4616

Média 5416				
82-18-0				
% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/RT
5,5	1-6C1	14669	2,59	5664
	2-6C	15225	2,59	5879
	3-6C1	14656	2,59	5659
	4-6C1	12984	2,59	5013
	5-6C	15335	2,59	5921
	6-6C1	16915	2,59	6531
	7-6C	12585	2,59	4859
Média 5646				
6,0	1-6D1	16367	2,72	6017
	2-6D1	12829	2,72	4717
	3-6D1	12818	2,72	4713
	4-6D1	11984	2,72	4406
	5-6D	12342	2,72	4537
	6-6D	12083	2,72	4442
	7-6D1	11004	2,72	4046
Média 4697				
6,5	1-6E1	9721	2,13	4564
	2-6E1	9678	2,13	4544
	3-6E	10520	2,13	4939
	4-6E1	11489	2,13	5394
	5-6E	10493	2,13	4926
	6-6E	10000	2,13	4695
	7-6E1	10545	2,13	4951
Média 4859				
68-18-14				
% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/RT
4,5	1-8A1	5079	1,03	4931
	2-8A	5150	1,03	5000
	3-8A	6275	1,03	6092
	4-8A	4975	1,03	4830
	5-8A	6112	1,03	5933
	6-8A	6052	1,03	5876
	7-8A	4887	1,03	4745

Média 5679				
77-18-7				
% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/RT
5,0	1-7B	10810	2,28	4741
	2-7B1	10622	2,28	4659
	3-7B	8882	2,28	3896
	4-7B	10429	2,28	4574
	5-7B	9700	2,28	4254
	6-7B	8812	2,28	3865
	7-7B1	9433	2,28	4137
Média 4304				
5,5	1-7C1	8570	1,98	4328
	2-7C1	8016	1,98	4048
	3-7C1	8309	1,98	4196
	4-7C1	9265	1,98	4679
	5-7C	10449	1,98	5277
	6-7C	8131	1,98	4107
	7-7C1	9125	1,98	4609
Média 4463				
6,0	1-7D1	10188	2,15	4739
	2-7D	12088	2,15	5622
	3-7D	9461	2,15	4400
	4-7D	9305	2,15	4328
	5-7D	11692	2,15	5438
	6-7D	10171	2,15	4731
	7-7D1	8991	2,15	4182
Média 4777				
6,5	1-7E	6274	1,60	3921
	2-7E1	5747	1,60	3592
	3-7E	6194	1,60	3871
	4-7E1	6251	1,60	3907
	5-7E	5801	1,60	3625
	6-7E	5506	1,60	3441
	7-7E	6049	1,60	3781
Média 3734				

Média 5344				
68-18-14				
% Ligante	Ensaio	Mód, Total NCHRP	RT	MR/RT
5,0	1-8B1	4613	1,12	4118
	2-8B	4873	1,12	4350
	3-8B1	4510	1,12	4027
	4-8B	4630	1,12	4134
	5-8B1	4637	1,12	4140
	6-8B1	4613	1,12	4118
	7-8B1	4770	1,12	4259
Média 4164				
5,5	1-8C1	6368	1,25	5094
	2-8C	6005	1,25	4804
	3-8C	6163	1,25	4930
	4-8C1	6460	1,25	5168
	5-8C1	5518	1,25	4414
	6-8C1	4838	1,25	3870
	7-8C	4777	1,25	3821
Média 4586				
6,0	1-8D	7867	1,42	5540
	2-8D1	6881	1,42	4846
	3-8D1	7967	1,42	5611
	4-8D1	5491	1,42	3867
	5-8D1	6753	1,42	4756
	6-8D	7570	1,42	5331
	7-8D1	6239	1,42	4394
Média 4906				
6,5	1-8E	5526	1,22	4530
	2-8E	5015	1,22	4111
	3-8E1	4956	1,22	4062
	4-8E1	4927	1,22	4039
	5-8E	5170	1,22	4238
	6-8E	5483	1,22	4494
	7-8E1	4584	1,22	3758
Média 4176				

Tabela F1: Recuperação Retardada das misturas estudadas

4,5%				5,0%			
Ligante	Ensaio	RR DNER	RR NCHRP	Ligante	Ensaio	RR DNER	RR NCHRP
100-0-0	1-1A	0,334	0,258	100-0-0	1-1B	0,291	0,241
	2-1A	0,267	0,266		2-1B	0,220	0,236
	3-1A	0,224	0,180		3-1B	0,278	0,250
	4-1A	0,299	0,244		4-1B	0,345	0,246
	5-1A	0,300	0,239		5-1B	0,299	0,235
	6-1A	0,264	0,248		6-1B	0,314	0,247
	7-1A	0,369	0,249		7-1B	0,304	0,256
	Média	0,294	0,240		Média	0,293	0,244
93-0-7	1-2A	0,378	0,264	93-0-7	1-2B1	0,357	0,264
	2-2A	0,377	0,255		2-2B	0,394	0,265
	3-2A	0,387	0,286		3-2B	0,378	0,254
	4-2A	0,388	0,251		4-2B	0,383	0,270
	5-2A	0,414	0,260		5-2B	0,384	0,271
	6-2A	0,394	0,265		6-2B1	0,408	0,275
	7-2A	0,414	0,265		7-2B	0,403	0,268
	Média	0,393	0,264		Média	0,387	0,267
86-0-14	1-3A	0,490	0,281	86-0-14	1-3B	0,481	0,292
	2-3A	0,466	0,296		2-3B	0,495	0,294
	3-3A	0,496	0,284		3-3B	0,423	0,270
	4-3A	0,444	0,277		4-3B	0,501	0,291
	5-3A	0,427	0,270		5-3B	0,492	0,293
	6-3A	0,466	0,285		6-3B	0,477	0,300
	7-3A	0,435	0,283		7-3B	0,431	0,282
	Média	0,456	0,283		Média	0,470	0,288
91-9-0	1-4A	0,309	0,257	91-9-0	1-4B	0,297	0,251
	2-4A	0,322	0,253		2-4B	0,301	0,259
	3-4A	0,327	0,249		3-4B1	0,325	0,252
	4-4A	0,338	0,260		4-4B1	0,332	0,261
	5-4A	0,317	0,245		5-4B	0,314	0,255
	6-4A	0,336	0,254		6-4B	0,304	0,238
	7-4A	0,338	0,258		7-4B	0,288	0,259
	Média	0,327	0,254		Média	0,309	0,254

4,5%			
Ligante	Ensaio	RR DNER	RR NCHRP
82-18-0	1-6A	0,331	0,250
	2-6A	0,318	0,254
	3-6A1	0,278	0,235
	4-6A1	0,236	0,211
	5-6A1	0,218	0,201
	6-6A1	0,203	0,172
	7-6A1	0,235	0,185
Média		0,260	0,215

77-9-14	1-5A1	0,292	0,243
	2-5A	0,342	0,245
	3-5A	0,300	0,235
	4-5A1	0,316	0,243
	5-5A1	0,325	0,238
	6-5A1	0,292	0,236
	7-5A1	0,343	0,254
Média		0,316	0,242

75-18-7	1-7A	0,306	0,241
	2-7A1	0,300	0,235
	3-7A1	0,282	0,236
	4-7A	0,333	0,250
	5-7A	0,297	0,236
	6-7A1	0,292	0,242
	7-7A	0,345	0,253
Média		0,308	0,242

68-18-14	1-8A1	0,351	0,273
	2-8A	0,345	0,265
	3-8A	0,366	0,266
	4-8A	0,345	0,280
	5-8A1	0,358	0,254
	6-8A	0,348	0,256
	7-8A1	0,359	0,278
Média		0,353	0,267

5,0%			
% Ligante	Ensaio	RR DNER	RR NCHRP
82-18-0	1-6B1	0,321	0,237
	2-6B	0,346	0,241
	3-6B	0,346	0,243
	4-6B1	0,332	0,244
	5-6B	0,323	0,250
	6-6B	0,307	0,248
	7-6B1	0,292	0,241
Média		0,324	0,243

77-9-14	1-5B1	0,347	0,267
	2-5B1	0,351	0,262
	3-5B	0,355	0,255
	4-5B1	0,360	0,258
	5-5B1	0,359	0,262
	6-5B	0,370	0,257
	7-5B	0,375	0,258
Média		0,359	0,260

75-18-7	1-7B	0,273	0,213
	2-7B	0,275	0,238
	3-7B	0,280	0,271
	4-7B	0,296	0,250
	5-7B1	0,292	0,244
	6-7B	0,326	0,246
	7-7B1	0,317	0,243
Média		0,294	0,244

68-18-14	1-8B1	0,306	0,268
	2-8B	0,338	0,282
	3-8B1	0,358	0,265
	4-8B	0,330	0,285
	5-8B1	0,327	0,286
	6-8B1	0,358	0,279
	7-8B1	0,361	0,272
Média		0,340	0,277

5,5%			
Ligante	Ensaio	RR DNER	RR NCHRP
100-0-0	1-1C	0,287	0,237
	2-1C	0,300	0,235
	3-1C	0,359	0,262
	4-1C	0,331	0,251
	5-1C	0,362	0,262
	6-1C	0,366	0,258
	7-1C	0,312	0,253
Média		0,331	0,251

93-0-7	1-2C	0,436	0,271
	2-2C	0,414	0,258
	3-2C	0,392	0,274
	4-2C	0,392	0,266
	5-2C	0,474	0,282
	6-2C	0,492	0,295
	7-2C	0,415	0,273
Média		0,431	0,274

86-0-14	1-3C	0,459	0,282
	2-3C	0,544	0,297
	3-3C	0,509	0,286
	4-3C	0,467	0,261
	5-3C	0,446	0,272
	6-3C	0,476	0,298
	7-3C	0,491	0,283
Média		0,489	0,283

91-9-0	1-4C	0,290	0,255
	2-4C1	0,277	0,253
	3-4C	0,316	0,254
	4-4C1	0,272	0,213
	5-4C1	0,305	0,253
	6-4C1	0,316	0,259
	7-4C1	0,318	0,246
Média		0,299	0,247

6,0%			
Ligante	Ensaio	RR DNER	RR NCHRP
100-0-0	1-1D	0,332	0,247
	2-1D	0,326	0,249
	3-1D1	0,329	0,250
	4-1D	0,352	0,266
	5-1D1	0,336	0,245
	6-1D	0,333	0,244
	7-1D1	0,345	0,251
Média		0,336	0,250

93-0-7	1-2D	0,535	0,293
	2-2D	0,424	0,256
	3-2D	0,433	0,254
	4-2D	0,511	0,283
	5-2D	0,487	0,288
	6-2D	0,429	0,280
	7-2D	0,506	0,298
Média		0,475	0,279

86-0-14	1-3D	0,483	0,295
	2-3D	0,478	0,295
	3-3D	0,507	0,302
	4-3D	0,492	0,286
	5-3D	0,483	0,283
	6-3D	0,474	0,284
	7-3D	0,486	0,295
Média		0,487	0,291

91-9-0	1-4D	0,316	0,257
	2-4D	0,320	0,247
	3-4D1	0,311	0,249
	4-4D	0,323	0,243
	5-4D	0,316	0,258
	6-4D	0,311	0,250
	7-4D	0,345	0,260
Média		0,320	0,252

5,5%			
Ligante	Ensaio	RR DNER	RR NCHRP
82-18-0	1-6C1	0,207	0,201
	2-6C	0,213	0,203
	3-6C	0,230	0,208
	4-6C1	0,277	0,217
	5-6C1	0,251	0,180
	6-6C1	0,211	0,195
	7-6C	0,318	0,230
Média		0,244	0,205

77-9-14	1-5C	0,396	0,265
	2-5C1	0,369	0,269
	3-5C	0,387	0,273
	4-5C1	0,365	0,274
	5-5C1	0,367	0,279
	6-5C1	0,370	0,271
	7-5C	0,390	0,266
Média		0,378	0,271

75-18-7	1-7C1	0,308	0,262
	2-7C1	0,340	0,267
	3-7C	0,316	0,265
	4-7C1	0,304	0,258
	5-7C	0,344	0,272
	6-7C	0,316	0,257
	7-7C1	0,341	0,261
Média		0,324	0,263

68-18-14	1-8C1	0,348	0,258
	2-8C1	0,350	0,285
	3-8C	0,340	0,283
	4-8C1	0,346	0,269
	5-8C	0,377	0,273
	6-8C1	0,362	0,269
	7-8C	0,393	0,270
Média		0,359	0,273

6,0%			
Ligante	Ensaio	RR DNER	RR NCHRP
82-18-0	1-6D1	0,232	0,170
	2-6D	0,262	0,223
	3-6D1	0,255	0,222
	4-6D1	0,292	0,224
	5-6D	0,283	0,239
	6-6D	0,302	0,233
	7-6D	0,312	0,249
Média		0,277	0,223

77-9-14	1-5D1	0,389	0,259
	2-5D1	0,393	0,261
	3-5D1	0,375	0,259
	4-5D	0,413	0,274
	5-5D1	0,401	0,263
	6-5D1	0,399	0,266
	7-5D1	0,409	0,277
Média		0,397	0,265

75-18-7	1-7D	0,275	0,236
	2-7D	0,284	0,236
	3-7D	0,278	0,241
	4-7D	0,296	0,244
	5-7D	0,316	0,258
	6-7D1	0,309	0,255
	7-7D	0,344	0,252
Média		0,300	0,246

68-18-14	1-8D	0,347	0,273
	2-8D	0,321	0,264
	3-8D	0,338	0,256
	4-8D1	0,333	0,263
	5-8D	0,331	0,269
	6-8D1	0,334	0,276
	7-8D1	0,347	0,269
Média		0,336	0,267

6,5%			
Ligante	Ensaio	RR DNER	RR NCHRP
100-0-0	1-1E	0,366	0,282
	2-1E1	0,357	0,277
	3-1E1	0,369	0,257
	4-1E	0,364	0,265
	5-1E	0,373	0,264
	6-1E	0,377	0,255
	7-1E1	0,379	0,266
	Média	0,369	0,267

93-0-7	1-2E	0,436	0,279
	2-2E	0,419	0,272
	3-2E	0,441	0,270
	4-2E	0,494	0,297
	5-2E	0,429	0,283
	6-2E	0,501	0,296
	7-2E	0,517	0,288
	Média	0,462	0,284

86-0-14	1-3E	0,458	0,272
	2-3E	0,478	0,287
	3-3E	0,480	0,283
	4-3E	0,526	0,292
	5-3E	0,504	0,283
	6-3E	0,463	0,278
	7-3E	0,475	0,294
	Média	0,488	0,286

91-9-0	1-4E1	0,296	0,259
	2-4E1	0,320	0,250
	3-4E1	0,297	0,229
	4-4E1	0,314	0,239
	5-4E1	0,316	0,245
	6-4E	0,287	0,251
	7-4E1	0,321	0,255
	Média	0,307	0,247

6,5%			
Ligante	Ensaio	RR DNER	RR NCHRP
82-18-0	1-6E1	0,339	0,253
	2-6E1	0,330	0,251
	3-6E	0,326	0,243
	4-6E1	0,299	0,239
	5-6E	0,324	0,260
	6-6E	0,312	0,250
	7-6E1	0,335	0,256
	Média	0,324	0,250

77-9-14	1-5E1	0,407	0,268
	2-5E1	0,392	0,266
	3-5E1	0,385	0,259
	4-5E	0,411	0,273
	5-5E	0,436	0,289
	6-5E1	0,411	0,275
	7-5E	0,407	0,274
	Média	0,407	0,272

75-18-7	1-7E	0,339	0,263
	2-7E1	0,350	0,263
	3-7E	0,322	0,270
	4-7E	0,361	0,271
	5-7E	0,366	0,260
	6-7E1	0,355	0,267
	7-7E	0,346	0,271
	Média	0,348	0,266

68-18-14	1-8E	0,366	0,266
	2-8E	0,381	0,276
	3-8E	0,357	0,277
	4-8E1	0,362	0,278
	5-8E	0,378	0,276
	6-8E	0,397	0,297
	7-8E1	0,340	0,281
	Média	0,369	0,278

Tabela G1: Módulo de Resiliência condicionados das misturas estudadas

LIGANTE 1 (100-0-0)				LIGANTE 5(77-9-14)			
Teor (%)	Corpo-de-prova	MR_I - NCHRP (MPa)	MR_T - NCHRP (MPa)	Teor (%)	Corpo-de-prova	MR_I - NCHRP (MPa)	MR_T - NCHRP (MPa)
4,5	5-1A	14895	11172	4,5	2-5A	12634	9263
	6-1A	18072	13415		4-5A	10140	7443
	7-1A	15238	10992		5-5A	9493	6923
5,0	1-1B	19433	14412	5,0	1-5B	7183	5132
	3-1B	18671	13835		3-5B	7556	5450
	4-1B	16902	12370		7-5B	7618	5440
5,5	5-1C	33465	19317	5,5	4-5C	*	*
	6-1C	23564	17647		5-5C	6885	4950
	7-1C	25721	19803		6-5C	7656	5457
6,0	3-1D	26319	18821	6,0	3-5D	*	*
	4-1D	21474	15882		5-5D	*	*
	6-1D	22013	15724		7-5D	*	*
6,5	4-1E	16941	12511	6,5	3-5E	*	*
	5-1E	19821	14539		4-5E	*	*
	6-1E	15263	11241		5-5E	6192	4367
LIGANTE 2 (93-0-7)				LIGANTE 6(82-18-0)			
Teor (%)	Corpo-de-prova	MR_I - NCHRP (MPa)	MR_T - NCHRP (MPa)	Teor (%)	Corpo-de-prova	MR_I - NCHRP (MPa)	MR_T - NCHRP (MPa) (cond)
4,5	1-2A	13201	9696	4,5	5-6A	10198	7752
	3-2A	12327	8934		6-6A	11825	9109
	4-2A	13434	9698		7-6A	12249	9250
5,0	3-2B	16507	12044	5,0	1-6B	9294	6850
	4-2B	17844	13221		3-6B	10444	7678
	6-2B	18412	13632		4-6B	8711	6329
5,5	1-2C	*	*	5,5	1-6C	16134	12266
	3-2C	*	*		2-6C	*	*
	7-2C	*	*		5-6C	*	*
6,0	2-2D	*	*	6,0	2-6D	*	*
	5-2D	*	*		5-6D	*	*
	6-2D	*	*		6-6D	*	*
6,5	4-2E	*	*	6,5	1-6E	*	*
	5-2E	*	*		6-6E	*	*
	7-2E	*	*		7-6E	*	*

LIGANTE 3 (86-0-14)

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR _I - NCHRP (MPa)	MR _T - NCHRP (MPa) (cond)
4,5	1-3A	5191	3677
	3-3A	6607	4660
	7-3A	7120	5094
5,0	2-3B	10120	7252
	4-3B	10252	7347
	5-3B	10314	7430
5,5	2-3C	*	*
	5-3C	*	*
	6-3C	*	*
6,0	2-3D	*	*
	4-3D	*	*
	7-3D	*	*
6,5	2-3E	*	*
	4-3E	*	*
	6-3E	*	*

LIGANTE 4(91-9-0)

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR _I - NCHRP (MPa)	MR _T - NCHRP (MPa) (cond)
4,5	2-4A	9062	6605
	3-4A	9757	6996
	7-4A	8310	6024
5,0	2-4B	13077	9665
	3-4B	12521	9286
	5-4B	16673	12276
5,5	2-4C	12872	9566
	3-4C	13981	10405
	6-4C	17554	12924
6,0	2-4D	*	*
	3-4D	*	*
	4-4D	*	*
6,5	2-4E	*	*
	3-4E	12477	9233
	6-4E	11163	8120

LIGANTE 7(75-18-7)

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR _I - NCHRP (MPa)	MR _T - NCHRP (MPa) (cond)
4,5	2-7A	8264	6145
	3-7A	9406	7042
	5-7A	8906	6536
5,0	5-7B	*	*
	6-7B	8183	6076
	7-7B	8973	6580
5,5	1-7C	*	*
	3-7C	6787	4872
	7-7C	6964	5024
6,0	1-7D	*	*
	3-7D	*	*
	4-7D	*	*
6,5	2-7E	*	*
	4-7E	*	*
	7-7E	*	*

LIGANTE 8(68-18-14)

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR _I - NCHRP (MPa)	MR _T - NCHRP (MPa) (cond)
4,5	4-8A	2482	1792
	5-8A	4174	3020
	6-8A	4356	3138
5,0	4-8B	2991	2154
	6-8B	3690	2726
	7-8B	3340	2411
5,5	1-8C	6279	4559
	3-8C	6601	4709
	4-8C	5449	4013
6,0	2-8D	6971	4982
	5-8D	5562	4027
	7-8D	5849	4193
6,5	2-8E	5814	4187
	3-8E	5622	4055
	4-8E	6483	4656

Tabela G2: Relação dos módulos de resiliência das misturas estudadas
LIGANTE 1 (100-0-0)

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR _T - NCHRP (MPa)	MR _T - NCHRP(MPa) (cond)
4,5	5-1A	16675	11172
	6-1A	17178	13415
	7-1A	16806	10992
5,0	1-1B	18096	14412
	3-1B	20191	13835
	4-1B	17570	12370
5,5	5-1C	15778	19317
	6-1C	16384	17647
	7-1C	17549	19803
6,0	3-1D	17231	18821
	4-1D	15931	15882
	6-1D	16412	15724
6,5	4-1E	13682	12511
	5-1E	13719	14539
	6-1E	12121	11241

LIGANTE 2 (93-0-7)

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR _T - NCHRP (MPa)	MR _T - NCHRP(MPa) (cond)
4,5	1-2A	12466	9696
	3-2A	12015	8934
	4-2A	12537	9698
5,0	3-2B	13092	12044
	4-2B	13014	13221
	6-2B	11946	13632
5,5	1-2C	*	*
	3-2C	*	*
	7-2C	*	*
6,0	2-2D	*	*
	5-2D	*	*
	6-2D	*	*
6,5	4-2E	*	*
	5-2E	*	*
	7-2E	*	*

LIGANTE 3 (86-0-14)

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR _T - NCHRP (MPa)	MR _T - NCHRP(MPa) (cond)
4,5	1-3A	7668	3677
	3-3A	6950	4660
	7-3A	6664	5094

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR _T - NCHRP (MPa)	MR _T - NCHRP(MPa) (cond)
5,0	2-3B	7519	7252
	4-3B	6886	7347
	5-3B	7388	7430
5,5	2-3C	*	*
	5-3C	*	*
	6-3C	*	*
6,0	2-3D	*	*
	4-3D	*	*
	7-3D	*	*
6,5	2-3E	*	*
	4-3E	*	*
	6-3E	*	*

LIGANTE 4(91-9-0)

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR _T - NCHRP (MPa)	MR _T - NCHRP(MPa) (cond)
4,5	2-4A	13238	6605
	3-4A	11996	6996
	7-4A	11540	6024
5,0	2-4B	16538	9665
	3-4B	16484	9286
	5-4B	16650	12276
5,5	2-4C	15964	9566
	3-4C	14131	10405
	6-4C	15097	12924
6,0	2-4D	*	*
	3-4D	*	*
	4-4D	*	*
6,5	2-4E	*	*
	3-4E	12869	9233
	6-4E	13139	8120

LIGANTE 5(77-9-14)

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR _T - NCHRP (MPa)	MR _T - NCHRP(MPa) (cond)
4,5	2-5A	10829	9263
	4-5A	12242	7443
	5-5A	11862	6923
5,0	1-5B	10433	5132
	3-5B	10435	5450
	7-5B	10275	5440
5,5	4-5C	*	*
	5-5C	8966	4950
	6-5C	9987	5457

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR _T - NCHRP (MPa)	MR _T - NCHRP(MPa) (cond)
6,0	3-5D	*	*
	5-5D	*	*
	7-5D	*	*
6,5	3-5E	*	*
	4-5E	*	*
	5-5E	6377	4367

LIGANTE 6(82-18-0)

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR _T - NCHRP (MPa)	MR _T - NCHRP(MPa) (cond)
4,5	5-6A	20549	7752
	6-6A	19262	9109
	7-6A	19478	9250
5,0	1-6B	11707	6850
	3-6B	9960	7678
	4-6B	11221	6329
5,5	1-6C	14669	12266
	2-6C	*	*
	5-6C	*	*
6,0	2-6D	*	*
	5-6D	*	*
	6-6D	*	*
6,5	1-6E	*	*
	6-6E	*	*
	7-6E	*	*

LIGANTE 7(75-18-7)

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR _T - NCHRP (MPa)	MR _T - NCHRP(MPa) (cond)
4,5	2-7A	12172	6145
	3-7A	13199	7042
	5-7A	11890	6536
5,0	5-7B	*	*
	6-7B	8812	6076
	7-7B	8941	6580
5,5	1-7C	*	*
	3-7C	8309	4872
	7-7C	9286	5024
6,0	1-7D	*	*
	3-7D	*	*
	4-7D	*	*
6,5	2-7E	*	*
	4-7E	*	*
	7-7E	*	*

LIGANTE 8(68-18-14)

Teor (%)	Corpo-de-prova	MR_T - NCHRP (MPa)	MR_T - NCHRP(MPa) (cond)
4,5	4-8A	5165	1792
	5-8A	6005	3020
	6-8A	6052	3138
5,0	4-8B	4630	2154
	6-8B	4613	2726
	7-8B	4733	2411
5,5	1-8C	6368	4559
	3-8C	6163	4709
	4-8C	6642	4013
6,0	2-8D	6875	4982
	5-8D	6753	4027
	7-8D	6084	4193
6,5	2-8E	5015	4187
	3-8E	4956	4055
	4-8E	4694	4656

Tabela G3: Resistência à tração condicionada das misturas estudadas

Ligante	Corpo-de-prova	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Carga (Kg)	Carga (N)	RT (MPa)	Média RT
100-0-0	5-1A	10,18	6,18	1864	18286	1,85	
	6-1A	10,17	6,20	2018	19797	2,00	1,90
	7-1A	10,18	6,18	1875	18394	1,86	
	1-1B	10,15	6,17	2310	22661	2,30	
	3-1B	10,17	6,13	2345	23004	2,35	2,36
	4-1B	10,17	6,14	2428	23819	2,43	
	5-1C	10,17	6,05	3053	29950	3,10	
	6-1C	10,18	5,98	2960	29038	3,04	3,09
	7-1C	10,17	6,06	3081	30225	3,12	
	3-1D	10,16	6,02	2972	29155	3,04	
	4-1D	10,16	6,01	3216	31549	3,29	3,10
	6-1D	10,16	6,11	2945	28890	2,96	
	4-1E	10,16	5,93	2766	27134	2,87	
	5-1E	10,15	5,99	2832	27782	2,91	2,88
	6-1E	10,16	5,87	2734	26821	2,86	
93-0-7	1-2A	10,19	6,02	2161	21199	2,20	
	3-2A	10,18	6,00	2230	21876	2,28	2,29
	4-2A	10,17	6,01	2326	22818	2,38	
	3-2B	10,17	6,03	2514	24662	2,56	
	4-2B	10,16	6,03	2429	23828	2,48	2,48
	6-2B	10,17	6,00	2359	23142	2,42	
	1-2C	10,17	5,98	*	*	*	
	3-2C	10,16	6,03	*	*	*	-

	Corpo-de-prova	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Carga (Kg)	Carga (N)	RT (MPa)	Média RT
	7-2C	10,18	5,95	*	*	*	
	2-2D	10,14	5,95	*	*	*	
	5-2D	10,15	5,93	*	*	*	-
	6-2D	10,16	5,90	*	*	*	
	4-2E	10,16	5,96	*	*	*	
	5-2E	10,15	5,94	*	*	*	-
	7-2E	10,14	5,96	*	*	*	
86-0-14	1-3A	10,18	6,11	1168	11458	1,17	
	3-3A	10,19	6,16	1334	13087	1,33	1,24
	7-3A	10,17	6,15	1213	11900	1,21	
	2-3B	10,18	6,04	1552	15225	1,58	
	4-3B	10,18	6,07	1499	14705	1,52	1,59
	5-3B	10,16	6,04	1636	16049	1,67	
	2-3C	10,16	5,96	*	*	*	
	5-3C	10,17	5,88	*	*	*	-
	6-3C	10,16	5,98	*	*	*	
	2-3D	10,15	5,91	*	*	*	
	4-3D	10,15	5,90	*	*	*	-
	7-3D	10,17	5,89	*	*	*	
	2-3E	10,13	6,00	*	*	*	
	4-3E	10,16	5,93	*	*	*	-
	6-3E	10,15	5,80	*	*	*	
91-9-0	2-4A	10,18	6,20	1142	11203	1,13	
	3-4A	10,16	6,20	1161	11389	1,15	1,12
	7-4A	10,18	6,20	1085	10644	1,07	
	2-4B	10,19	6,13	1793	17589	1,79	
	3-4B	10,17	6,11	1898	18619	1,91	1,98
	5-4B	10,18	6,04	2205	21631	2,24	
	2-4C	10,17	6,04	1894	18580	1,93	
	3-4C	10,17	6,10	1792	17580	1,80	1,80
	6-4C	10,19	6,14	1661	16294	1,66	
	2-4D	10,14	5,99	*	*	*	
	3-4D	10,17	5,95	*	*	*	-
	4-4D	10,15	5,98	*	*	*	
	2-4E	10,17	6,04	*	*	*	
	3-4E	10,17	6,06	2432	23858	2,47	2,34
	6-4E	10,17	6,03	2171	21298	2,21	
77-9-14	2-5A	10,16	6,12	1586	15559	1,59	
	4-5A	10,17	6,07	1673	16412	1,69	1,71
	5-5A	10,18	6,06	1805	17707	1,83	
	1-5B	10,17	6,07	1515	14862	1,53	
	3-5B	10,18	6,03	1486	14578	1,51	1,53
	7-5B	10,18	5,96	1490	14617	1,53	
	4-5C	10,18	5,95	*	*	*	
	5-5C	10,17	6,02	1431	14038	1,46	1,50
	6-5C	10,18	5,95	1489	14607	1,54	
	3-5D	10,15	5,90	*	*	*	

	Corpo-de-prova	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Carga (Kg)	Carga (N)	RT (MPa)	Média RT
	5-5D	10,17	5,93	*	*	*	-
	6-5D	10,16	5,92	*	*	*	
	3-5E	10,17	5,99	*	*	*	
	4-5E	10,15	5,98	*	*	*	1,22
	5-5E	10,18	6,03	1197	11743	1,22	
82-18-0	5-6A	10,18	6,21	1531	15019	1,51	
	6-6A	10,17	6,22	1650	16187	1,63	1,56
	7-6A	10,16	6,20	1563	15333	1,55	
	1-6B	10,18	6,16	1559	15294	1,55	
	3-6B	10,15	6,15	1394	13675	1,40	1,43
	4-6B	10,19	6,30	1372	13459	1,34	
	1-6C	10,16	6,19	2249	22063	2,23	
	2-6C	10,16	6,18	*	*	*	2,23
	5-6C	10,18	6,03	*	*	*	
	2-6D	10,17	5,99	*	*	*	
	5-6D	10,15	6,07	*	*	*	-
	6-6D	10,16	6,15	*	*	*	
	1-6E	10,17	6,07	*	*	*	
	6-6E	10,19	6,08	*	*	*	-
	7-6E	10,17	6,09	*	*	*	
75-18-7	2-7A	10,19	6,18	1455	14274	1,44	
	3-7A	10,18	6,12	1493	14646	1,50	1,49
	5-7A	10,18	6,17	1530	15009	1,52	
	5-7B	10,19	6,02	*	*	*	
	6-7B	10,17	6,12	1552	15225	1,56	1,60
	7-7B	10,18	6,10	1624	15931	1,63	
	1-7C	10,17	6,10	*	*	*	
	3-7C	10,16	6,14	1403	13763	1,41	1,38
	7-7C	10,18	6,10	1338	13126	1,35	
	1-7D	10,16	6,05	*	*	*	
	3-7D	10,17	5,96	*	*	*	-
	4-7D	10,17	6,06	*	*	*	
	2-7E	10,17	6,05	*	*	*	
	4-7E	10,15	6,03	*	*	*	-
	7-7E	10,15	6,08	*	*	*	
68-18-14	4-8A	10,17	6,28	597	5857	0,58	
	5-8A	10,18	6,24	675	6622	0,66	0,65
	6-8A	10,18	6,25	711	6975	0,70	
	4-8B	10,19	6,26	665	6524	0,65	
	6-8B	10,17	6,30	684	6710	0,67	0,66
	7-8B	10,18	6,30	693	6798	0,68	
	1-8C	10,17	6,13	1154	11321	1,16	
	3-8C	10,18	6,12	1085	10644	1,09	1,12
	4-8C	10,18	6,11	1113	10919	1,12	
	2-8D	10,17	6,09	1259	12351	1,27	
	5-8D	10,17	6,12	1169	11468	1,17	1,19
	7-8D	10,16	6,20	1150	11282	1,14	
	2-8E	10,16	6,08	1212	11890	1,23	

	Corpo-de-prova	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Carga (Kg)	Carga (N)	RT (MPa)	Média RT
	3-8E	10,17	6,16	1175	11527	1,17	1,22
	4-8E	10,15	6,15	1258	12341	1,26	

Tabela G4: Relação da resistência à tração condicionada das misturas estudadas

Teor (%)	Ligante	RT (cond) (MPa)	RT (cond) Média	RT (MPa)	RRT (%)	RRT (%) médio
4,5	(100-0-0)	1,85				
		2,00	1,90	2,58	73,82	73,82
		1,86				
	(93-0-7)	2,20				
		2,28	2,29	2,21	103,47	103,47
		2,38				
	(86-0-14)	1,17				
		1,33	1,24	1,48	83,63	83,63
		1,21				
	(91-9-0)	1,13				
		1,15	1,12	1,86	60,15	60,15
		1,07				
	(77-9-14)	1,59				
		1,69	1,71	1,93	88,35	88,35
		1,83				
	(82-18-0)	1,51				
		1,63	1,56	2,18	71,77	71,77
		1,55				
	(75-18-7)	1,44				
		1,50	1,49	2,03	73,29	73,29
		1,52				
	(68-18-14)	0,58				
		0,66	0,65	1,03	62,99	62,99
		0,70				
5,0	(100-0-0)	2,30				
		2,35	2,36	2,66	88,78	88,78
		2,43				
	(93-0-7)	2,56				
		2,48	2,48	2,59	95,94	95,94
		2,42				
	(86-0-14)	1,58				
		1,52	1,59	1,62	97,92	97,92
		1,67				
	(91-9-0)	1,79				
		1,91	1,98	2,39	82,89	82,89
		2,24				
	(77-9-14)	1,53				

	1,51	1,53	1,92	79,52	79,52
	1,53				
	1,55				
(82-18-0)	1,40	1,43	2,01	71,05	71,05
	1,34				

	Ligante	RT (cond) (MPa)	RT (cond) Média	RT (MPa)	RRT (%)	RRT (%) médio
		*		*	*	
	(75-18-7)	1,56	1,60	2,28	70,00	70,00
		1,63				
		0,65				
	(68-18-14)	0,67	0,66	1,12	59,33	59,33
		0,68				
5,5		3,10				
	(100-0-0)	3,04	3,09	3,04	101,56	101,56
		3,12				
		*		*	*	
	(93-0-7)	*	#DIV/0!	*	*	*
		*		*	*	
		*		*	*	
	(86-0-14)	*	#DIV/0!	*	*	*
		*		*	*	
		*		*	*	
	(91-9-0)	1,46	1,50	1,83	81,87	81,87
		1,54				
		1,53				
	(77-9-14)	1,51	1,53	1,92	79,52	79,52
		1,53				
		2,23				
	(82-18-0)	*	2,23	2,59	86,27	86,27
		*		*	*	
		*		*	*	
	(75-18-7)	1,41	1,38	1,98	69,48	69,48
		1,35				
		0,65				
	(68-18-14)	0,67	0,66	1,12	59,33	59,33
		0,68				
6,0		2,87				
	(100-0-0)	2,91	2,88	2,66	108,32	108,32
		2,86				
		*		*	*	
	(93-0-7)	*	*	*	*	*
		*		*	*	

	Ligante	RT (cond) (MPa)	RT (cond) Média	RT (MPa)	RRT (%)	RRT (%) médio
6,5	(86-0-14)	*		*	*	
		*	*	*	*	*
		*		*	*	
	(91-9-0)	*		*	*	
		*	*	*	*	*
		*		*	*	
	(77-9-14)	*		*	*	
		*	*	*	*	*
		*		*	*	
	(82-18-0)	*		*	*	
		*	*	*	*	*
		*		*	*	
	(75-18-7)	*		*	*	
		*	*	*	*	*
		*		*	*	
	(68-18-14)	1,27				
		1,17	1,19	1,42	84,14	84,14
		1,14				
	(100-0-0)	3,04				
		3,29	3,10	3,02	102,55	102,55
		2,96				
	(93-0-7)	*		*	*	
		*	*	*	*	*
		*		*	*	
	(86-0-14)	*		*	*	
		*	*	*	*	*
		*		*	*	
	(91-9-0)	*		*	*	
		2,47	2,34	2,45	95,46	95,46
		2,21				
	(77-9-14)	*		*	*	
		*	1,22	*	73,84	73,84
		1,22		1,65		
	(82-18-0)	*		*	*	
		*	*	*	*	*
		*		*	*	
	(75-18-7)	*		*	*	
		*	*	*	*	*
		*		*	*	
	(68-18-14)	1,23				
		1,17	1,22	1,22	99,92	99,92
		1,26				