

**ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS A
FRIO PRODUZIDAS COM INCORPORAÇÃO DE
BORRACHA DE PNEUS**

Danielle de Souza Clerman

Porto Alegre

Agosto 2004

DANIELLE DE SOUZA CLERMAN

**ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS A
FRIO PRODUZIDAS COM INCORPORAÇÃO DE
BORRACHA DE PNEUS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia na modalidade Acadêmica

Porto Alegre

Agosto 2004

CLERMAN, Danielle de Souza

Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas a Frio
Produzidas com Incorporação de Borracha de Pneus /
Danielle de Souza Clerman – Porto Alegre:
PPGEC/UFRGS, 2004.

125 p.

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

1. Pavimentação 2. Misturas Asfálticas I. Título

CCAA2

DANIELLE DE SOUZA CLERMAN

**ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS A
FRIO PRODUZIDAS COM INCORPORAÇÃO DE
BORRACHA DE PNEUS**

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

Porto Alegre, 06 de Agosto de 2004.

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

Prof. D.Sc. Américo Campos Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a. Liedi Légi Bariani Bernucci (EPUSP)
D.Sc. pela EPUSP

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

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

Dedico este trabalho aos meus pais
pelo amor, carinho e dedicação
de sempre.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, a empresa Midas Elastômeros que patrocinou esta pesquisa. Uma empresa que investe em pesquisa, considerando estes custos como parte de um processo de desenvolvimento, deve ser reconhecida. Em especial ao Eng. André Anton de Souza que idealizou e acreditou neste projeto. E, acima de tudo, sempre esteve presente e bem disposto a colaborar. Muito obrigado.

Agradeço também à empresa Ipiranga Asfaltos que forneceu o ligante asfáltico que, através do Eng. Leonardo Trieguer, sempre se mostrou disposto a ajudar e a solucionar as eventuais dúvidas.

Agradeço pelo auxílio e pela oportunidade única de ter como orientador o professor Jorge Augusto Ceratti, por quem tenho respeito e admiração.

Não poderia deixar de agradecer a três pessoas importantes que tiveram grande influência na continuidade deste trabalho e que juntos souberam sempre me mostrar os melhores caminhos a serem percorridos.

Ao Prof. Washington Peres Núñez pelo interesse e sabedoria que sempre me serviram de exemplo e impulsionaram-me a seguir em frente. Um professor presente, preocupado com o aprendizado dos alunos e por fim, meu bom orientador durante os créditos do mestrado.

Ao Prof. Luciano Specht que durante todo este trabalho foi um guia e uma referência para mim. Que, durante o início da pesquisa, soube me amparar e ajudar com todas as dúvidas de um aluno recém entrado na pós-graduação. Muito obrigado pela atenção e pelo interesse em ajudar.

Ao Eng. Rafael Reis pela ajuda e pela atenção. Pelo tempo dispensado, pela paciência e pelos ensinamentos, pela amizade.

Agradeço a todos os professores do Mestrado em Geotecnia, que ao longo de poucos meses, tiveram a importante tarefa de nos passar muitos novos conhecimentos.

Agradeço a todos os colegas do LAPAV: aos professores, mestrandos e doutorandos, bolsistas e laboratoristas.

Em especial gostaria de agradecer aos laboratoristas Vinícius da Silva Alves, Carlos Ivan Ribas e Croaci Souza de Melo. Ao Vinícius, que me acompanhou nos árduos e longos dias de moldagem de corpos de prova. Ao Ivan e Croaci pelo constante bom humor e simpatia com que atendem aos alunos.

Não poderia deixar de agradecer aos meus grandes colegas de mestrado no PPGECC. Com certeza, a amizade de vocês tornou a realização deste trabalho menos difícil. À minha brilhante amiga Carolina Feuerharmel. Aos meus queridos amigos: Alexandre Knop, Rodrigo Silveira, Rodrigo Caberlon Cruz, Leandro Scheffer, Rafael Mena Barreto, Diego Vendramin, Raimundo Ferreira e Eli da Costa.

E como não poderia deixar de dar destaque, aos meus colegas, companheiros e, acima de tudo, amigos especiais que também seguiram a pavimentação e que estiveram ao meu lado em trabalhos, congressos e reuniões: Diana Azambuja, Rodrigo Lovato, Rodrigo Malysz, Cláudio Dias e Lucimari da Cruz. A vocês todos, um imenso muito obrigado pela força, pela confiança, pelo apoio, pela parceria, pela amizade.

À Diana Azambuja, minha grande parceira e confidente de todas as horas. Com certeza, tua amizade foi uma grande conquista.

À minha amiga Raquel Mariano da Rocha que, mesmo distante, sempre esteve presente... E sempre soube me orientar e ajudar.

Aos meus padrinhos que sempre torceram por mim. Da mesma forma que meus primos:, Alessandra, André e Maurício.

A meu namorado, Marcelo Bruxel, que foi paciente quase todos os dias com os meus longos estudos. Um obrigado muito especial pelo teu amor.

Gostaria de agradecer às pessoas mais importantes e especiais. Aos meus pais, Susana e Fernando, minha irmã, Fernanda, e minha avó, Dinóra, muito obrigado pelo suporte em todas as horas. Sem o amor, o carinho e a confiança de vocês com certeza não conseguiria alcançar este título.

Por fim, muito obrigado a todos aqueles que de certa forma contribuíram para que este trabalho existisse.

Se as coisas são inatingíveis - Ora, não é motivo para não
querê-las - que tristes os caminhos se não fora a mágica
presença das estrelas.

Mário Quintana

RESUMO

CLERMAN, D.S. **Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas a Frio Produzidas com Incorporação de Borracha de Pneus**. 2004. Tese (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A adição de polímeros a misturas asfálticas tem sido utilizada por muitos anos viabilizando aplicações asfálticas e melhorando suas características. Com o aumento da preocupação ambiental com resíduos sólidos, a borracha obtida de pneus velhos, considerados um passivo ambiental, passou a ser utilizada como aditivo para misturas asfálticas a quente, apresentando excelentes resultados. No entanto, poucos estudos investigaram o efeito da adição de borracha de pneus em misturas a frio. Estas misturas com emulsões asfálticas aparecem como uma alternativa de pavimentação para vias de baixo e médio volume de tráfego, demonstrando os benefícios desta tecnologia, bem como as vantagens ecológicas e a economia energética que se originam no emprego destes materiais. Esta pesquisa teve como objetivo investigar a utilização da borracha de pneu como agregado em misturas a frio. Ensaios laboratoriais de resistência à tração e módulo de resiliência à compressão diametral, realizados em corpos de prova curados durante dois períodos diferentes, foram responsáveis pela caracterização do comportamento destas misturas asfálticas produzidas a frio com emulsão asfáltica convencional e modificada por polímero virgem, do tipo SBR. Foram utilizados dois tipos de misturas: densas e semi-densas. A borracha de pneu foi incorporada às emulsões como porção da massa de agregado; em 1% e 2% e em duas granulometrias: 0,18 mm e 0,42 mm. Este processo é conhecido como via seca para misturas a quente. Esta pesquisa seguiu o procedimento de dosagem Marshall para estabelecer o teor de projeto de ligante. As misturas densas apresentaram aumento dos teores de ligante com a adição da borracha. Nas misturas semi-densas, houve uma grande queda na estabilidade para as misturas com borracha. Com o acréscimo da borracha mais fina, valores superiores de resistência à tração foram obtidos para ambas misturas. A deformabilidade elástica aumentou com o teor e tamanho das partículas de borracha. As misturas densas, em geral, apresentaram melhores resultados com o acréscimo de borracha que as misturas semi-densas. A inclusão de borracha de pneus a pré-misturados a frio mostrou-se viável e exequível, consumindo grande quantidade de pneus resultando em benefícios ambientais.

Palavras-chave: emulsão asfáltica; misturas a frio; borracha de pneu; via seca.

ABSTRACT

CLERMAN, D.S. **Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas a Frio Produzidas com Incorporação de Borracha de Pneus**. 2004. Tese (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Laboratorial Study of Cold Asphalt Mixes with Tire Rubber Addition

The addition of polymers into asphaltic mixes has been used for many years, becoming possible asphaltic applications and getting better its characteristics. For many years, with an increasing discussion about environmental conservation regarding solid residues, the addition of old tires rubber as an additive for hot asphalt mixes has been accepted as a viable methodology for pavements with great results. However, few studies have been conducted in order to investigate the performance of rubber asphalt in cold mixes. Cold mixes are an alternative for low and medium volume road construction. This work aims to investigate the use of tire recycled rubber as an aggregate in cold mixes, demonstrating the benefits of this technology and results as ecological advantages and energetic saves. Laboratorial mechanical tests such as dynamic indirect tensile test (resilient modulus) and indirect tensile test (tensile strength), carried out in two cure times, are responsible for the characterization of mixes with conventional cationic asphaltic emulsion and SBR type. Dense and open graded mixes have been used. The crumb rubber has been incorporated in emulsion as part of the weight of aggregate, 1% and 2% in two gradations 0,18 mm and 0,42 mm. This process is known as dry process for hot mixes. This work follows the Marshall procedure to establish the minimum asphalt content. The dense mixes showed higher asphalt contents than conventional mixes. However, stability decreased with rubber contents addiction for open graded mixes. Adding the thinnest rubber, superior tensile strengths were obtained for all mixes. The resilient modulus decreased as higher and larger rubber contents were added. Usually, dense mixes showed better results than open mixes for adding tire rubber. Crumb rubber modifier appears to be performing satisfactorily in cold mixes showing to be a viable technology with environmental saves.

Key-words: asphaltic emulsion; cold mixes; tires rubber;dry process.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	15
LISTA DE EQUAÇÕES.....	16
ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	17
1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	19
1.2 OBJETIVO.....	22
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 EMULSÕES ASFÁLTICAS.....	25
2.1.1 Classificação das Emulsões Asfálticas.....	28
2.1.2 Variáveis que Afetam as Emulsões Asfálticas.....	33
2.1.2.1 Asfalto.....	33
2.1.2.2 Água.....	34
2.1.2.3 Agentes Emulsificantes.....	35
2.2 ADITIVOS PARA ASFALTOS.....	35
2.2.1 Polímeros.....	36
2.2.2 Borracha Reciclada.....	38
2.2.2.1 Processo Via Úmida.....	42
2.2.2.2 Via Seca.....	45
2.2.2.3 Aspectos Relevantes para Misturas Borracha-Emulsão Asfáltica.....	48
2.3 MISTURAS ASFÁLTICAS À FRIO.....	51
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	58
3.2 EMULSÃO ASFÁLTICA.....	58
3.2.1 Ensaio de caracterização das Emulsões Asfálticas.....	60
3.2.1.1 Densidade da Emulsão Asfáltica.....	60
3.2.1.2 Viscosidade Brookfield.....	60
3.2.1.3 Resíduo por evaporação.....	62
3.2.1.4 Peneiração.....	62
3.2.1.5 Sedimentação.....	63
3.2.1.6 Desemulsibilidade.....	64

	12
3.2.1.7 Cobrimento	65
3.2.2.7 Adesividade	66
3.2.3 Resultados dos ensaios de Caracterização das Emulsões Asfálticas	67
3.2.3.1 Emulsões Asfálticas RL 1C e RM 1C	67
3.2.3.2 Emulsões Asfálticas RL 1C e RM 1C modificadas com SBR	68
3.3 AGREGADOS	69
3.3.1 Ensaio de caracterização dos Agregados	69
3.4 BORRACHA	71
3.5 MISTURAS ASFÁLTICAS	74
3.4.1 Teor Ótimo de Umidade das Misturas Asfálticas	77
3.4.1.1 Umidade de Compactação para as Misturas Densas	78
3.4.1.2 Umidade de Compactação para as Misturas Semi-densas	80
3.4.2 Interação Ligante-Borracha Regenerada	81
3.4.2 Ensaio das Misturas Asfálticas	83
3.4.2.1 Metodologia Marshall	83
3.4.2.2 Resistência à Tração	91
3.4.2.3 Módulo de Resiliência	93
4. RESULTADOS E ANÁLISE	95
4.1 MISTURAS ASFÁLTICAS	95
4.1.1 Pré-Misturados a Frio Densos	96
4.1.1.1 Propriedades da Metodologia Marshall	96
4.1.1.2 Resistência à Tração e Módulo de Resiliência	103
4.1.2 Pré Misturados a Frio Semi-densos	106
4.1.2.1 Propriedades da Metodologia Marshall	106
4.1.2.2 Resistência à Tração e Módulo de Resiliência	114
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	117
5.1 CONCLUSÕES	117
5.2 SUGESTÕES	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Glóbulo de asfalto envolto por íons de emulsificante catiônico.....	26
Figura 2.2- Representação da camada dupla (Holleran e Reed ⁴ , 2004).....	27
Figura 2.3- a) Glóbulo de asfalto com emulsificante b) Ensaio de carga de partícula.....	29
Figura 2.4- Processo de formação do filme asfáltico (Serfass et al, 2003).....	30
Figura 2.5- Flocculação dos glóbulos de asfalto (EA em estado estável para um estado floculado).(Holleran e Reed ^D , 2004).	31
Figura 2.6- Coalescência (Holleran e Reed ^D , 2004).....	31
Figura 2.7- Formação de filme asfáltico (Holleran e Reed ^D , 2004).	32
Figura 2.8- Reação entre agregado e asfalto(Holleran e Reed ^D , 2004).....	33
Figura 2.9- Esquema da absorção das frações leves de asfalto pela borracha (Holleran e Reed, 2000) ^B	43
Figura 2.10- Ilustração de asfalto modificado por borracha pelo processo via seca (a borracha são as partículas em branco) (Fonte: Takallou e Hicks, 1988)	46
Figura 3.1- Viscosímetro Brookfield.....	61
Figura 3.2- Ensaio de Sedimentação	64
Figura 3.3- Ensaio de Adesividade.....	66
Figura 3.4- a) Amostra de corpo de prova antes do ensaio b) Após o ensaio	67
Figura 3.5- Ilustração do ensaio com balão volumétrico para obtenção do peso específico dos agregados miúdos	71
Figura 3.6- Granulometrias das borrachas.....	73
Figura 3.7- Fotografia das borrachas #80 e #30 respectivamente.	73
Figura 3.8- Composição Granulométrica das misturas Densas- Faixa C DNER-Es 313/97....	76
Figura 3.9- Composição Granulométrica das misturas Semi-densas Faixa A DNER-ES 313/97	77
Figura 3.10- Teor de umidade versus estabilidade para PMFD	79
Figura 3.11- Teor de umidade versus densidade para PMFD	79
Figura 3.12- Teor de umidade versus volume de vazios para PMFD	80
Figura 3.13- Teor de umidade versus Estabilidade para PMFsD	80
Figura 3.14- Teor de umidade versus densidade para PMFsD.....	81
Figura 3.15- Teor de umidade versus volume de vazios para PMFsD.....	81
Figura 3.16- Mistura de agregados secos	84
Figura 3.17- Perda de umidade com o tempo.....	85

Figura 3.18- Ruptura da Emulsão Asfáltica	85
Figura 3.19- Compactação dos corpos-de-prova.....	86
Figura 3.20- Corpos-de-prova durante cura na estufa	87
Figura 3.21- Corpos-de-prova com fita	88
Figura 3.22- Corpo-de-prova com fita e parafina.....	88
Figura 3.23- Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall	89
Figura 3.24- Representação do equipamento para ensaio de Módulo de Resiliência (Fonte: Specht, 2000).....	91
Figura 3.25- a) Ensaio de Resistência à Tração b) Detalhes do posicionamento do corpo de prova	92
Figura 3.26- a) Câmara para ensaio de Módulo de Resiliência b) Detalhe do pórtico para o corpo de prova	93
Figura 4.3- Misturas Densas: Teor de Ligante Asfáltico a) EA b) CAP.....	97
Figura 4.2- Misturas Densas: a) Estabilidade e b) Fluência.....	99
Figura 4.3- Misturas Densas: a) Volume de Vazios b) Massa Específica Aparente.....	100
Figura 4.4- Misturas Densas: a) VAM b) RBV.....	102
Figura 4.5- Misturas Densas: a) Módulo de Resiliência b) Resistência à Tração.....	103
Figura 4.6- Misturas Semi-densas: Teor de Ligante a) EA b) CAP	107
Figura 4.7- Gráficos das misturas semi-densas convencionais (RM 1C) a) Estabilidade b) Fluência.....	109
Figura 4.8- Misturas Semi-densas a) Estabilidade b) Fluência	111
Figura 4.9- Misturas Semi-densas a) Volume de Vazios b) Massa Específica Aparente	112
Figura 4.10- Misturas Semi-densas a) VAM b) RBV	113
Figura 4.11- Misturas Semi-densas a) Módulo de Resiliência b) Resistência à Tração	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Relação entre as terminologias de CRM (Adaptado de Heitzman, 1992).....	41
Tabela 2.2- Quantidade de borracha usada em diferentes aplicações em pavimentação (Commonwealth Department of Environment, Austrália, 2001)	41
Tabela 3.1- Intervalo de teores de ligante utilizados nas misturas densas	59
Tabela 3.2- Intervalo de teores de ligante utilizados nas misturas semi-densas.....	59
Tabela 3.3- Ensaio de Caracterização das EAs RL 1C e RM 1C	68
Tabela 3.4- Ensaio de Caracterização das EAs Emulex RL 1C e Emulex RM 1C	68
Tabela 3.5- Granulometria dos Agregados para Mistura Densa	69
Tabela 3.6- Granulometria dos Agregados para Mistura Semi-Densa.....	70
Tabela 3.7- Características dos agregados a) utilizados nas misturas densas b) utilizados nas misturas semi-densas.	70
Tabela 3.8- Características dos agregados para Britas 3/4 e 3/8	70
Tabela 3.9- Granulometria das borrachas.....	72
Tabela 3.10- Composição da Mistura Densa.....	74
Tabela 3.11- Faixa C DNER e Mistura Densa	75
Tabela 3.12- Composição da Mistura Semi-densa	75
Tabela 3.13- Faixa A DNER e Mistura Semi-densa	76
Tabela 3.14- Valores indicados para Pré-Misturados a Frio (Santana, 1993)	90
Tabela 4.1- Misturas Densas: Teor de Ligante.....	96
Tabela 4.2- Misturas Densas: Parâmetros Marshall a 5 dias de cura	98
Tabela 4.3- Misturas Densas: Parâmetros Marshall a 60 dias de Cura	98
Tabela 4.4- Misturas Densas: Módulo de Resiliência e Resistência à Tração	103
Tabela 4.5- Misturas Semi-densas: Teor de Ligante	106
Tabela 4.6- Misturas Semi-densas: Propriedades Marshall a 5 dias de cura.....	110
Tabela 4.7- Misturas Semi-densas: Propriedades Marshall a 60 dias de cura.....	110
Tabela 4.8- Misturas Semi-densas: Módulo de Resiliência e Resistência à Tração.....	114

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	28
Equação 2.2	54
Equação 2.3	55
Equação 3.1	60
Equação 3.2	63
Equação 3.3	63
Equação 3.4	65
Equação 3.5	89
Equação 3.6	92
Equação 3.7	94

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ADEBA: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto

ADOT: Arizona Department of Transportation

ANIP: Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos

ASTM: American Society for Testing and Materials

ATR: Afundamento de Trilha de Rodas

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CALTRANS: Califórnia Department of Transportation

CBUQ: Concreto betuminoso usinado a quente

cp: corpo de prova

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente

CRM: Crumb Rubber Modifier

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

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

EA: emulsão asfáltica

EVA: Copolímero Etileno-Acetato de Vinila

h_{EA} : umidade trazida pela emulsão asfáltica

h_m : umidade de molhagem

h_T : umidade total

Ic: Índice de instabilidade coloidal

IRI: International Roughness Index

ISO: International Organization for Standardization

LAPAV: Laboratório de Pavimentação

LCPC: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

M_R : Módulo de resiliência

PETROBRAS: Petróleo Brasileiro S.A.

PMF: Pré-misturado a frio

PMFD: Pré-misturado a frio denso

PMFsD: Pré-misturado a frio semi-denso

RBV: Relação betume-vazios

RL: Ruptura lenta

RM: Ruptura média

RR: Ruptura rápida

R_T : Resistência à tração

s: segundo

SAM: Stress Absorving Membrane

SAMI: Stress Absorving Membrane Interlayer

SBR: Borracha Butadieno-Estireno

SBS: Copolímero Estireno-Butadieno-Estireno

SUPERPAVE™: Superior Performance Asphalt Pavements

t: tempo

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VAM: Vazios de Agregado Mineral

Vv: Volume de vazios

μ : coeficiente de Poisson

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No último século, a humanidade venceu grandes barreiras tecnológicas, como a informática, a genética e a industrialização. Experimentou-se um acelerado avanço industrial que antes jamais se imaginara. Novas tecnologias, novas descobertas fizeram com que o mundo desse um salto rumo ao desenvolvimento.

Contudo, se é inegável que tamanho desenvolvimento trouxe grandes melhorias para qualidade de vida de todos, não se ignora, por outro lado, que tal fenômeno também trouxe como consequência sérios danos ambientais. Somente nas últimas décadas, a preocupação com o meio ambiente passou a se fazer presente. Diante dessa realidade, teve início um processo de conscientização ecológica, fazendo com que hoje os diversos problemas ambientais existentes se tornem o foco de atenção e preocupação de muitas organizações e países.

Iniciativas de empresas na busca de ações, tais como Sistemas de Qualidade Total (ISO 14000), reciclagem de produtos, preocupação com o desperdício, entre outras, têm-se tornado práticas cada vez mais comuns e valorizadas pela sociedade. A conscientização da população em comprar e usar produtos que preservem a natureza é um fator diferenciador de competitividade. Portanto, neste momento, o desafio do ser humano é continuar crescendo, porém sem causar danos ao meio ambiente.

Entre muitos problemas que ocorrem atualmente, o acúmulo de resíduos não degradáveis ou de degradação muito lenta representa um sério problema a ser enfrentado. Sabe-se que os pneus, itens insubstituíveis na nossa sociedade, quando descartados, na natureza, são de difícil degradação, tendo hoje se constituído, em países mais desenvolvidos e naqueles em via de desenvolvimento, num enorme passivo ambiental.

As montanhas de pneus formadas em áreas desertas são uma ameaça de devastadores incêndios, uma vez que cada pneu possui o potencial energético equivalente a 10 litros de

óleo combustível (ANDRIETTA, 2002). Quando ocorrem tais incêndios, há a liberação de gases tóxicos na atmosfera. A disposição em aterros sanitários tem se mostrado inadequada, por diversas razões. Os pneus contêm substâncias tóxicas que podem ser liberadas contaminando o solo, o lençol freático e os cursos de água. A água acumulada no interior destes pneus serve de veículo para a propagação de vetores. Os pneus usados demoram mais de 150 anos para degradarem-se.

Os Estados Unidos são o maior produtor mundial de pneus. São descartados cerca de 150 milhões de pneus ao ano, sendo que outros 180 milhões de pneus são descartados nos países da Comunidade Econômica Européia anualmente. No Brasil, são produzidos 45 milhões de pneus, dos quais 30 milhões são descartados ao ano, segundo a ANIP (Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos). Estes números tendem a multiplicar-se com o aumento da indústria automobilística.

Diante desse quadro, vários países passaram a adotar medidas para que se tenha destinação mais adequada aos pneus descartados. Novas utilizações economicamente viáveis para estes rejeitos são necessárias e urgentes, uma vez que legislações restritivas aos descartes já são uma realidade, inclusive no Brasil.

Em 26 de Agosto de 1999, a Resolução nº 258 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) determinou que as indústrias fabricantes e importadoras de pneus seriam responsáveis pela destinação final desse resíduo. A partir de 1º de Janeiro de 2002, para cada quatro novos pneus produzidos, um pneu inservível deveria ser descartado do mercado e, ano a ano, esta proporção deve aumentar até alcançar a marca de cinco pneus retirados para cada quatro novos a partir de 1º de Janeiro de 2005.

Na busca de solução para o problema, a moagem de borracha de pneu já vem sendo desenvolvida e utilizada em outros países, como Estados Unidos, Canadá, Portugal, Espanha e outros (FERNÁNDEZ DEL CAMPO, 1998). Nesse processo de regeneração do pneu, a borracha é separada dos outros componentes e a malha de aço e o nylon são recuperados como sucata qualificada. O pneu reduzido a pó, por já haver sofrido processo de vulcanização, não pode ser utilizado como substituto da borracha crua. A borracha vulcanizada é um produto relativamente inerte, de difícil combinação ou ligação com outras substâncias. No entanto, pesquisas e experimentos científicos encontraram usos alternativos para estes pneus: como estruturas de contenção, produção de artefatos de borracha, barreiras de inércia,

concreto de baixo desempenho, entre outras. Até este momento, porém, somente duas alternativas têm se mostrado viáveis e práticas para utilização de grandes volumes de pneus: o uso como material de queima em indústrias cimenteiras e termoelétricas e o uso em rodovias como aditivo ao ligante asfáltico ou como parte da fração de agregados.

O uso de borracha como fonte energética é uma alternativa bastante questionável sob o ponto de vista econômico, uma vez que se pretende substituir o óleo combustível, produto cerca de 10 vezes mais barato que a borracha (VARZAVAND et al, 1991). Além disso, a queima não é uma solução ideal do ponto de vista ambiental, pois não faz uso dos componentes poliméricos presentes nos pneus, requer alto investimento em infraestrutura e produz materiais finais nocivos (AIREY e RAHMAN, 2003; AIREY et al, 2003). Daí ser crescente o interesse em estudar-se o comportamento desse material associado à construção de rodovias, procedimento conhecido, no Brasil, como asfalto ecológico.

Com este foco, outras pesquisas já iniciaram o entendimento do também chamado “asfalto-borracha” ou “borracha-agregado”. As melhorias resultantes desses estudos estimulam a contínua e crescente pesquisa do tema. No Brasil e no mundo, já foram executados trechos rodoviários com asfalto de ligante modificado por borracha, encontrando-se bons resultados de desempenho. Da mesma forma, pesquisas que visam a substituição de parte dos agregados por borracha vêm demonstrando a viabilidade desta tecnologia, contribuindo também para a redução de utilização de agregados virgens (THANAYA, 2002)^B. Dessa forma, a utilização de borracha em pavimentação é capaz de proporcionar outros benefícios fora aqueles ambientais. A adição de borracha a materiais asfálticos realmente resulta em melhorias nas propriedades reológicas e mecânicas destes.

A maior quantidade de estudos nesta linha de pesquisa enfatizou, no entanto, o concreto asfáltico usinado a quente (CBUQ) com ligante asfáltico modificado por borracha (MORILLA e DANTAS, 2002). A utilização em maior escala não significa, porém, que se trate da única opção vantajosa.

Assim compreendendo, a partir da década de 70, Estados Unidos, França, Espanha dentre outros países, deram início a estudos mais avançados sobre emulsões asfálticas, resultando no desenvolvimento do tema devido à crise energética da época (Crise do Petróleo em 1974). Diversos fatores contribuíram para que se buscasse alternativa para o CBUQ. Pode-se salientar principalmente dois fatores ambientais: a conservação energética (a maioria das

emulsões asfálticas podem ser utilizadas sem o uso de calor, isto é, contribuindo para economia de energia) e a preservação atmosférica (não há emissão de hidrocarboneto, o que reduz a poluição atmosférica).

Nos Estados Unidos, esses fatores ambientais levaram ao consenso de que ações deveriam ser tomadas. A preocupação era que o uso excessivo de energia poderia ser maior que as reservas disponíveis e a capacidade de produção, a menos que leis de proteção fossem criadas. Constatou-se que a economia de solventes de petróleo é significativa quando se utilizam misturas com emulsões asfálticas ao invés de misturas produzidas a quente.

Segundo Chazal (2003), na França, há muitos anos, houve um grande desenvolvimento dos revestimentos a frio para vias com tráfegos médio e baixo. E atualmente, estão em evidência os usos de *gravel* emulsão e dos microrrevestimentos a frio como camada de rolamento por oferecerem segurança (devido a macrotextura) e durabilidade (devido a melhor impermeabilização).

Assim, muitas organizações estão substituindo ou permitindo a substituição de asfaltos a quente por emulsões asfálticas. E com o progresso das emulsões asfálticas, nas últimas décadas, o antigo conceito de que uma mistura a frio não possa se igualar a uma mistura a quente está abalado, segundo Santana (1993).

A busca de vias alternativas assumiu crescente expressão no contexto mundial inclusive no Brasil, sendo práticas já em utilização o uso de emulsões asfálticas e de borracha de pneu. Estudos e pesquisas de caráter científico, como a que se descreve neste trabalho, visam justamente a auxiliar o maior desenvolvimento desta realidade.

1.2 OBJETIVO

É de interesse, neste trabalho, investigar o reaproveitamento de pneus inservíveis ligados à pavimentação asfáltica para vias de médio a baixo volumes de tráfego. Deseja-se utilizar a borracha moída destes pneus em misturas produzidas a frio.

Para isso, emulsões asfálticas, produzidas a partir da emulsificação do CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), foram utilizadas como ligante, demonstrando uma possível melhora de

tecnologia, bem como as vantagens ecológicas e a economia energética que se originam no emprego destes materiais.

É objetivo conhecer e analisar o efeito da adição de pó de borracha regenerada de pneu a pré-misturados a frio (PMF), de faixas densa e semi-densa. Para cada tipo de PMF foram utilizadas duas granulometrias de borracha: 0,42 mm e 0,18 mm. Desejando-se assim avaliar a influência do tamanho do grão de borracha.

Os aspectos: método de produção e dosagem dos pré-misturados a frio, a mistura borracha-emulsão, o tempo de cura antes da compactação com diferentes umidades e diferentes períodos de cura pós- compactação são também objetivos deste estudo.

Também foi necessário conhecer o comportamento de misturas asfálticas a frio convencionais e modificadas por polímero virgem comercial, do tipo SBR, para que tenhamos resultados que sirvam como referência.

A borracha foi utilizada como parte do agregado. Este processo é conhecido como mistura via seca para as misturas asfálticas a quente. O estudo da adição de borracha como parte do processo via seca vêm evoluindo nos últimos anos. Embora se trate de um estudo mais recente que aquele por via úmida, onde o ligante é modificado, já se apresenta como uma alternativa interessante de uso. Este tipo de procedimento já possui trechos experimentais no Brasil, inclusive no Rio Grande do Sul, executados em concreto asfáltico a quente. No entanto, há pouca experiência quanto ao uso de borracha de pneu como agregado de misturas a frio.

É importante enfatizar que ações que visam conservação do meio ambiente devem ser uma obrigação de todos. No entanto, tais ações resultam em um tipo de benefício muito difícil de ser quantificado. Sendo assim, objetiva-se que esta pesquisa gere melhorias sociais, econômicas e tecnológicas, onde custos adicionais serão absorvidos pela qualidade das propriedades de asfaltos modificados e pelo valor da proteção do meio ambiente.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este capítulo inicial, denominado Introdução, inicia o estudo fornecendo um breve histórico da importância da reciclagem e reaproveitamento de pneus usados e do também importante uso de emulsões asfálticas. Além disso, o capítulo esclarece os objetivos desta pesquisa.

O capítulo 2, Revisão Bibliográfica, traz uma revisão dos conceitos necessários para compreensão dos materiais e métodos utilizados. Este capítulo está dividido em itens selecionados como temas principais a serem abordados.

O capítulo a seguir, Materiais e Métodos trata sobre como foram executados os ensaios de caracterização dos materiais e seus respectivos resultados assim como o projeto de dosagem.

Os resultados encontrados serão analisados e comentados no Capítulo 4, Resultados e Análise.

Por fim, o Capítulo 5, denominado Conclusões e Sugestões, apresenta as principais conclusões deste trabalho de pesquisa, juntamente com as sugestões de continuidade deste.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EMULSÕES ASFÁLTICAS

A produção de emulsões asfálticas em escala industrial teve início em 1905, na Europa, pelo químico Emile Feigel. Entretanto, somente anos mais tarde, em 1951, a empresa Esso, na França, colocou este produto no mercado.

Até a década de 80, segundo Serfass (2002), o uso de emulsões era muito restrito. O maior interesse de uso desse material surgiu anos mais tarde, levando a seu desenvolvimento com o objetivo principal de estender o uso de emulsões misturadas a frio para situações em campo que apresentassem tensões mais severas.

As emulsões asfálticas tiveram como antecessor os asfaltos diluídos, pois estes também eliminam a necessidade do aquecimento do cimento asfáltico de petróleo (CAP) ou utilizam aquecimento moderado. Segundo DNER (1996), os asfaltos diluídos ou recortados são diluições de cimentos asfálticos em solventes e as emulsões asfálticas são uma dispersão coloidal de uma fase asfáltica em uma fase aquosa (dispersa) com ajuda de um agente emulsificante. Em asfaltos diluídos, após sua aplicação, o solvente evapora, deixando o CAP exercer sua função. Em função da evaporação do solvente, as regulamentações ambientais começaram a proibir ou restringir o uso de asfaltos diluídos. Assim, os asfaltos emulsificados, por terem pequena ou nula quantidade de solvente, estão substituindo a maioria dos usos dos asfaltos diluídos (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

No Brasil, segundo Santana (1993), com o advento das emulsões catiônicas, os asfaltos diluídos ficaram com um campo de aplicação muito restrito. São usados, juntamente com os cimentos asfálticos mais moles, para a fabricação de emulsões asfálticas (DNER, 1996); (SANTANA, 1993).

Silva Junior e Sória (2000) salientam algumas vantagens das emulsões asfálticas sobre os asfaltos diluídos, entre elas: menor teor de solvente (em alguns casos esse teor é nulo), a possibilidade de serem usados agregados umedecidos (dispensando o uso de secador), a

eliminação de problemas de incêndio e explosões, entre outras. Porém, o uso das emulsões como ligantes asfálticos também traz algumas dificuldades, decorrentes do processo de perda da água que compõe a emulsão.

Atualmente, os maiores consumidores de emulsão asfáltica no mundo são os Estados Unidos (2.300.000 toneladas cúbicas anuais: ton^3/ano) e a França (1.010.000 toneladas cúbicas anuais: ton^3/ano) (ABEDA, 2001). Segundo Santana, a produção média anual brasileira nos últimos anos é de 750.000 toneladas de CAPs, sendo que cerca de 30% em forma de emulsões catiônicas (único tipo especificado e utilizado no país).

A emulsão asfáltica é uma dispersão coloidal de uma fase asfáltica em uma fase aquosa (direta), ou então, uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica (inversa), com ajuda de um agente emulsificante (DNER, 1996). Normalmente são produzidos por processo mecânico com equipamentos de alta capacidade de cisalhamento como, por exemplo, moinhos coloidais. Neste equipamento, o asfalto em estado líquido (aquecido) é disperso no meio aquoso por cisalhamento em pequenas gotículas que são envolvidas por agentes emulsificantes formando uma emulsão estável, ilustrada na figura 2.1 (ABEDA, 2001). Assim, quando dois glóbulos de asfalto tentam aproximar-se são repelidos.

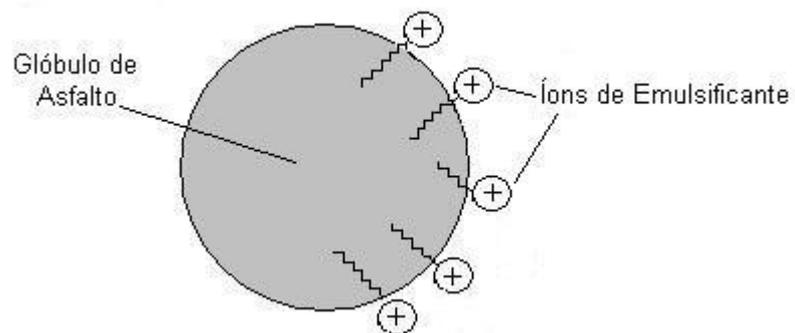


Figura 2.1- Glóbulo de asfalto envolto por íons de emulsificante catiônico

Esta é uma maneira simples de representar os glóbulos de asfaltos com o emulsificante, porém sabe-se que as partículas de asfalto não existem em um estado carregado. (HOLLERAN e

REED, 2000)^B. O acúmulo de cargas acontece na interface do glóbulo de asfalto com a fase aquosa, formando uma camada dupla como a representada na figura 2.2.

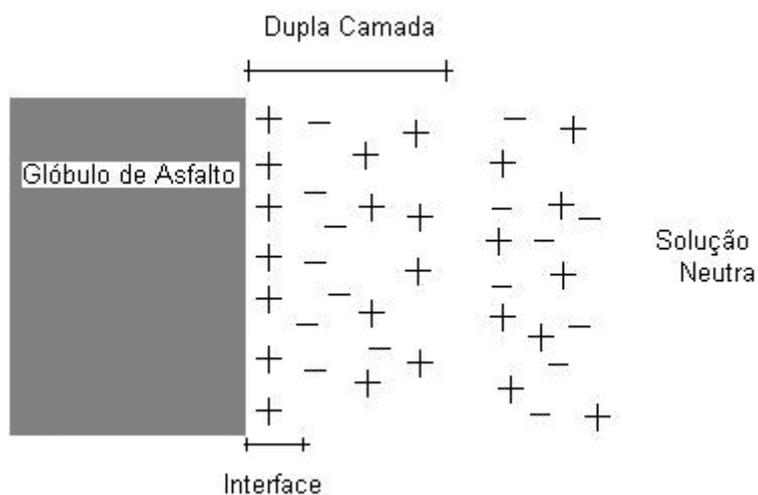


Figura 2.2- Representação da camada dupla (Holleran e Reed⁴, 2004)

Na interface destes glóbulos, a densidade das cargas, que é medida pelo potencial zeta, determina a estabilidade da emulsão, e a espessura da dupla camada é determinada pelo peso molecular do emulsificante escolhido. Além disso, a espessura da dupla camada e a densidade das cargas serão funções do tempo decorrido desde a formação da emulsão. (HOLLERAN E REED^B, 2000).

Os glóbulos de asfalto dispersos na água variam de tamanho: de 0,001 a 0,02 mm de diâmetro (ABEDA, 2001). Estes são mantidos separados pelo agente emulsificante até que a emulsão seja depositada ou na superfície de solo ou no pavimento existente, ou nas partículas de agregados (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

O diâmetro das partículas na emulsão asfáltica utilizada em rodovias é importante, pois, com diâmetros maiores, a emulsão é muito grosseira e tende a sedimentar-se; com diâmetros menores, a estabilidade é muito alta, imperando o movimento browniano de partículas. A emulsão asfáltica tem cor marrom, e sua aparência varia de um líquido de baixa consistência (mais aguado) para um líquido de consistência cremosa (ABEDA, 2001).

Versatilidade de uso, manuseio à temperatura ambiente e facilidade de armazenamento são características que representam as emulsões asfálticas.

Os maiores usos de emulsões asfálticas ocorrem em:

Tratamentos Superficiais;

Pinturas de Ligação;

Pré-Misturados a Frio;

Estabilização de Solos;

Areia-Asfalto a Frio;

2.1.1 Classificação das Emulsões Asfálticas

As emulsões asfálticas podem ser divididas em três categorias: aniônicas, catiônicas (as mais comuns) e não iônicas (somente utilizadas em situações especiais). As classes catiônica e aniônica referem-se à carga elétrica em torno das partículas de asfalto. Esta carga elétrica é fornecida pelo emulsificante utilizado na produção da emulsão. Segundo Santana, o emulsificante catiônico é geralmente o produto da reação de ácidos inorgânicos fortes, tipo HCl, com aminas graxas- que têm uma molécula do tipo R-HClNH₃- que se dissocia em água:



O radical R tem uma grande afinidade pelo asfalto, penetrando em seus glóbulos que ficam eletrizados positivamente, evitando que se unam (que haja ruptura), e o anion Cl⁻ fica na água. No ensaio de carga de partícula, DNER-ME 002/98, o glóbulo de asfalto se dirige para o cátodo, conforme mostra a figura 2.3. Caso se utilize um emulsificante aniônico, a partícula fica eletrizada negativamente e vai para o ânodo.

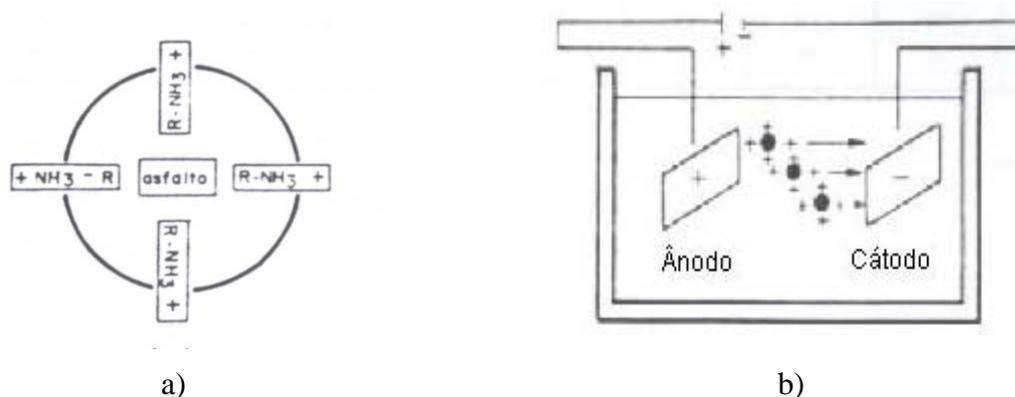


Figura 2.3- a) Glóbulo de asfalto com emulsificante b) Ensaio de carga de partícula.

De acordo com Santana (1993) os emulsificantes catiônicos são os mais utilizados no Brasil, não só porque aqui preponderam os agregados eletronegativos (quartzito, areias quartzosas, granito, gnaiss, arenito, entre outros), mas também porque estas emulsões também apresentam boa adesividade com agregados eletropositivos (basalto, calcáreo, diabásio, etc). As emulsões aniônicas são as mais antigas e apresentam boa adesividade e resistência aos agregados que se ionizam positivamente ao umedecimento (ABEDA, 2001), porém sua média de utilização mundial é de apenas 10% da média de utilização das emulsões catiônicas.

A fim de utilizar-se emulsões para construção de vias, elas deverão permanecer fluidas o suficiente para possibilitar sua aplicação. Como o asfalto deve desempenhar funções de cimentar e tornar impermeável o pavimento, a fase asfáltica deve se separar da fase aquosa. Isso ocorre através da neutralização das cargas eletrostáticas e/ou pela evaporação da água.

Os glóbulos de asfalto devem se separar da fase aquosa para que produzam um filme contínuo de asfalto sobre os agregados no pavimento. O tempo no qual os glóbulos de asfalto se aglutinam é chamado de ruptura. A maneira e velocidade com que as emulsões rompem dependem largamente da quantidade e propriedades do agente emulsificante usado na produção desta emulsão e da relação de proporção entre água e asfalto (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

Para Fernádes Del Campo, 1998, diz-se que a emulsão se rompe quando as partículas de betume tornam a juntar-se para constituir uma camada contínua de asfalto.

Segundo a ABEDA, 2001, a ruptura é o fenômeno de separação das fases constituintes da emulsão. A ruptura pode ocorrer por evaporação de água, por um desequilíbrio eletroquímico (provocado pelo aumento da acidez ou alcalinidade) ou pela ação do agregado, que atrai para si os glóbulos de asfalto (adsorção). Visualmente, verifica-se esse processo quando a cor da emulsão muda de marrom para preto. A ruptura depende de vários fatores: composição e tipo de emulsão, natureza do agregado, temperatura ambiente, entre outros.

Segundo Serfass (2002), pode-se dividir em 6 passos diferentes o processo de formação do filme asfáltico contínuo: concentração, floculação, densificação, coalescência, interdifusão e formação do filme definitivo como ilustra a figura 2.4. As propriedades da emulsão mudam de um estado inicial disperso para um estado último fortemente atrelado como resultado desses processos.

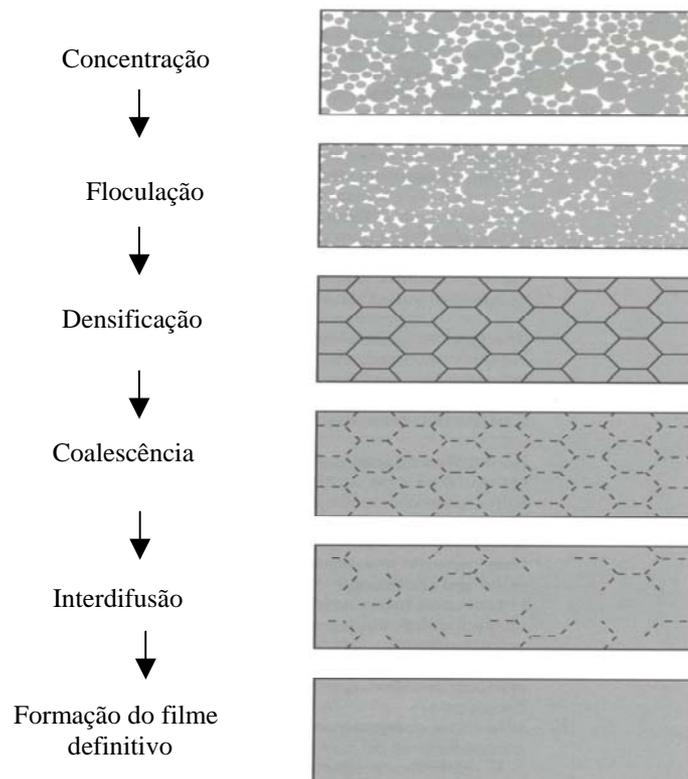


Figura 2.4- Processo de formação do filme asfáltico (Serfass et al, 2003).

Este processo até formação de um filme contínuo ainda não é completamente dominado.

Na concentração ou coagulação e floculação, as partículas de asfalto se aproximam, colidindo umas com as outras. Uma vez próximas, a colisão entre partículas faz com que suas respectivas duplas camadas se invadam, tornando as partículas unidas. A colisão é eficiente, primeiramente, se formar uma agregação e, após, se esta possuir resistência. A partir daí, as partículas floculadas comportam-se como partículas maiores, densificando-se ao longo do tempo (HOLLERAN e REED, 2004)^C. A figura 2.5 ilustra o processo de floculação.

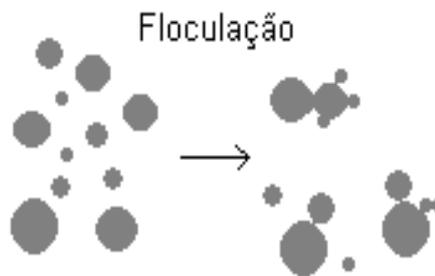


Figura 2.5- Floculação dos glóbulos de asfalto (EA em estado estável para um estado floculado).(Holleran e Reed^D, 2004).

O próximo passo é a coalescência das partículas floculadas. A coalescência é função de vários fatores, entre eles, a temperatura, a cinética das partículas e a carga na superfície de cada partícula. A água é drenada, podendo ainda permanecer dentro de algumas partículas, e o emulsificante já rompido permite a fusão dos glóbulos de asfalto. O formato irregular dos glóbulos floculados começa a mudar para um formato mais arredondado como pode ser observado na figura 2.6 (AKZO NOBEL, 1999).



Figura 2.6- Coalescência (Holleran e Reed^D, 2004).

Na interdifusão, com o efeito da evaporação da água, há a inversão das partículas de asfalto dispersas em água para glóbulos de água dispersos no asfalto. A formação do filme asfáltico

depende da habilidade da emulsão coalescer sem manter muitas gotículas de água presas no asfalto.

Durante este processo de desestabilização da emulsão, a viscosidade é aumentada em dez vezes devido à forte interação entre os glóbulos de asfalto (TAKAMURA, 2003).

A figura 2.7 mostra o processo final de formação do filme asfáltico.

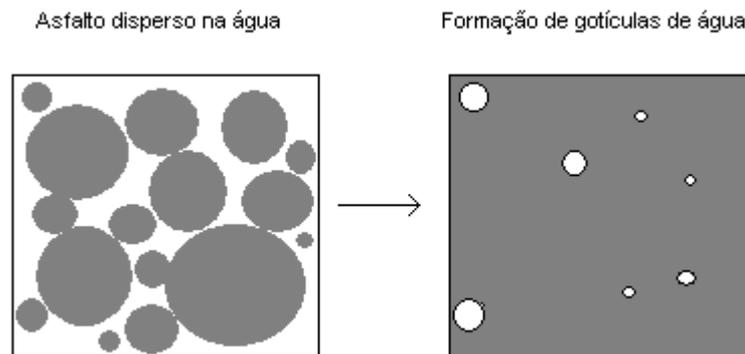


Figura 2.7- Formação de filme asfáltico (Holleran e Reed^D, 2004).

Assim, outro aspecto para a classificação de emulsões é o quão rápido a emulsão irá aglutinar-se, fenômeno conhecido como ruptura. Para Holleran e Reed^D, 2004, a ruptura consiste na destruição da dupla camada.

As emulsões catiônicas, as mais empregadas em pavimentação, têm como característica a ruptura ocorrer através da reação de neutralização das cargas negativas dos agregados de natureza ácida (ABEDA, 2001), como ilustra a figura 2.8. Nas emulsões aniônicas a ruptura ocorre em grande parte devido à evaporação da água (SANTANA, 1995).

Nas emulsões catiônicas, primeiramente os agregados irão atrair os emulsificantes livres na fase aquosa para depois atrair o CAP para a superfície dos agregados.

A velocidade de formação do filme asfáltico ao redor dos agregados determinará a adesão, e a formulação do emulsificante determinará a velocidade da ruptura (AKZO NOBEL, 1999).

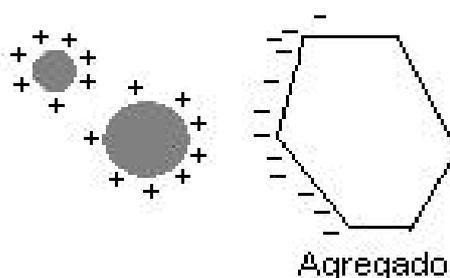


Figura 2.8- Reação entre agregado e asfalto(Holleran e Reed^P, 2004).

Esta ruptura pode ser rápida (RR), média (RM) ou lenta (RL). Essa tendência à ruptura está relacionada à mistura da emulsão com os agregados. Quanto maior a superfície específica dos agregados, menor deverá ser a velocidade de ruptura da emulsão. Uma emulsão de ruptura rápida tem pouca ou nenhuma capacidade de ser misturada com agregado. Uma emulsão de ruptura média pode ser misturada com agregados grossos, mas não com os finos. E, por fim, uma emulsão de ruptura lenta é desenvolvida para mistura com agregados finos (ABEDA, 2001).

O tempo de ruptura da emulsão é um fator decisivo na hora de aplicação em campo: de acordo com o tipo de tratamento escolhido, a resistência obtida nas primeiras horas, o tempo para abertura ao tráfego, a compactação, a sensibilidade à chuva, entre outras (ABEDA, 2001).

As emulsões asfálticas também se classificam quanto a sua viscosidade. Segundo Santana, 1993, as emulsões catiônicas podem ser de dois tipos: 1 (menos viscosa) e 2 (mais viscosa), sendo que a RL é somente do tipo 1.

2.1.2 Variáveis que Afetam as Emulsões Asfálticas

2.1.2.1 Asfalto

O cimento asfáltico (CAP) é o elemento básico para produção da emulsão asfáltica. Na maioria dos casos, ele representa 55 a 70% da emulsão. Entende-se que, muito embora o comportamento de uma emulsão dependa de sua formulação, fabricação e aplicação, o que realmente importa é o produto final que fica no pavimento, o CAP. (SANTANA, 1993). Todo

desempenho e características das EAs dependerão da natureza química e porcentagem das frações de asfalto e de como estas se relacionam entre si. A complexa interação entre essas diferentes frações faz com que seja quase impossível prever o comportamento do asfalto emulsificado. Por esta razão, um alto controle de qualidade deve ser mantido durante a produção de emulsões.

Segundo a ABEDA, 2001, a maioria das emulsões, incluindo aquelas modificadas por polímeros, é produzida com asfaltos de penetração entre 50 (mais duro) e 250 (mais mole). Este aspecto é bastante variável. Condições climáticas variáveis podem determinar a dureza necessária de asfalto a ser usado.

2.1.2.2 Água

A água é o segundo maior ingrediente presente nas emulsões asfálticas; portanto, sua contribuição para as características finais das emulsões não pode ser desprezada. As emulsões asfálticas, dependendo do tipo, podem possuir até 50% de água na sua composição e esta característica, em alguns casos, pode dificultar o seu emprego, principalmente nas etapas de mistura com o agregado, compactação e após a compactação. Logo, este material asfáltico necessita de cuidados adicionais em relação a outros ligantes betuminosos (SILVA JUNIOR E SÓRIA, 2000), (BLACKLIDGE EMULSIONS, 2003).

A água é um componente essencial de misturas a frio com emulsões desempenhando um importante papel durante o início da vida desse material, porém é prejudicial subsequente. É um elemento básico para produção da emulsão, permitindo a coalescência e a ruptura. Facilita a aplicação em campo no caso de ligantes de baixa viscosidade e lubrifica o agregado, facilitando a compactação. Entretanto, pode atrasar a formação do filme asfáltico e o crescimento da coesão, acrescentando fragilidade à mistura nas primeiras idades (SERFASS, 2002).

Água contendo impurezas não deve ser utilizada na produção de emulsões. A presença destas pode afetar as propriedades e o desempenho das emulsões podendo causar uma ruptura prematura (ABEDA, 2001).

2.1.2.3 Agentes Emulsificantes

As características da emulsão asfáltica dependerão significativamente da composição química do emulsificante. Será ele que determinará a classificação da emulsão como aniônica, catiônica ou não iônica, manterá o asfalto estável em suspensão e controlará o tempo para a ruptura.

Segundo a ABEDA, 2001, o emulsificante produz a redução da tensão interfacial entre as fases asfalto e água. Além disso, ele fixa-se na periferia dos glóbulos dispersos de asfalto impedindo sua aglomeração (coalescência), o que provocaria a ruptura da emulsão.

Os agentes emulsificantes fornecem estabilidade ao bombeamento, transporte e armazenamento em temperatura ambiente durante semanas ou até meses (ABEDA, 2001). Entretanto, as emulsões não poderão ser estocadas por longos períodos de tempo. Portanto, é essencial que haja comunicação entre o usuário e o responsável pela execução do serviço (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

Existem diversos tipos de emulsificantes disponíveis no mercado. Cada um deve ser avaliado quanto à compatibilidade com o cimento asfáltico que será usado.

As principais funções do agente emulsificante, segundo Blacklidge Emulsions, 2003, são facilitar a dispersão; evitar posterior aglomeração de partículas ao carregá-las eletricamente com mesma polaridade; e, favorecer a adesividade entre o ligante e o agregado.

Com o aumento da demanda por emulsões asfálticas, novos e mais eficientes agentes emulsificantes foram criados, estando comercialmente disponíveis atualmente.

2.2 ADITIVOS PARA ASFALTOS

Desde o início da década de 70, nos Estados Unidos e na Europa, são utilizados aditivos capazes de modificar o material asfáltico a fim de melhorar suas propriedades. A modificação de um material betuminoso não tem o propósito de corrigir um asfalto de pobre qualidade, mas sim de elevar as características e propriedades de um asfalto já qualificado e aceitável.

No Brasil, de acordo com a Petrobrás Distribuidora (1996), os aditivos mais comercializados para produtos asfálticos visam, basicamente, a:

- Aumentar a adesividade (DOPE);
- Rejuvenescer o asfalto em serviços de reciclagem (Agentes rejuvenecedores de asfaltos); e,
- Aumentar a resistência à oxidação e flexibilidade (Polímeros).

A escolha do aditivo adequado dependerá de alguns fatores, em geral do binômio custo *versus* desempenho, pois diferentes aditivos fornecerão diferentes propriedades.

2.2.1 Polímeros

Entre as classes de aditivos existentes, apenas os polímeros têm capacidade de modificar plenamente os materiais asfálticos. Certos aditivos, como aminas ou hidrocarbonos, não oferecem impactos à estrutura molecular do asfalto, enquanto que os polímeros realmente modificam essa estrutura, melhorando a qualidade do asfalto “virgem” (TOSAS, 2000).

Entre os polímeros, podemos subdividi-los em 2 classes: os elastômeros (Borracha reciclada de pneus, Copolímero tribloco de estireno-butadieno-estireno -SBS, Borracha de estireno-butadieno -SBR e borracha natural) e os plastômeros (copolímero etileno-acetato de polivinila - EVA e Estireno Éster).

Segundo Specht (2003), várias pesquisas têm demonstrado que a inclusão de polímeros aos ligantes asfálticos melhora, de maneira geral, as propriedades mecânicas e de envelhecimento da mistura. A adição de polímeros modifica a estrutura e a visco-elasticidade do asfalto, levando ao melhoramento de (Tosas, 2000; Holleran e Reed^B, 2000; Silva et al, 2002): resistência à fadiga, resistência ao fissuramento, susceptibilidade térmica, resistência ao impacto, viscosidade em altas temperaturas, ductilidade, durabilidade e ruptura frágil, entre outras.

A modificação da composição química do ligante asfáltico por um polímero implica modificação de suas propriedades físicas e reológicas. A correlação entre a estrutura do polímero e a composição química do asfalto permite prever se haverá ou não compatibilidade e estabilidade na mistura asfalto-polímero. Estes fatores são de extrema importância para preparação, estocagem e propriedades do ligante modificado (SILVA et Al, 2002).

A compatibilidade entre um determinado ligante e um polímero pode ser quantificada pelo índice de instabilidade coloidal (I_c) de um asfalto. Este índice é calculado a partir do teor de frações químicas SARA (saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos) de um determinado asfalto. A variação na proporção entre estas frações origina asfaltos com diferentes composições químicas. (GOOSWILLIGEN E VONK, 1994).

A compatibilidade da mistura asfalto-polímero depende das características do asfalto (aromaticidade, teor de asfaltenos e de óleos naftênicos) e do polímero (peso molecular, estrutura química, teor de butadieno/estireno – no caso do SBS- e morfologia). (SILVA et Al, 2002)

Atualmente, segundo a PETROBRÁS DISTRIBUIDORA SA, 1996, o SBS é o mais utilizado polímero para modificação de asfaltos, fornecendo melhor recuperação elástica e redução da susceptibilidade térmica (apresentam boas propriedades tanto quanto a altas quanto a baixas temperaturas).

Em 1993, foi criada a norma SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements). Esta norma sugere uma nova especificação e análise para asfalto polímero, avaliando o desempenho destes ligantes modificados.

Para Takamura, 2003, o procedimento SUPERPAVE para análise de fadiga de misturas a frio e micro revestimentos a frio executados com emulsão asfáltica pode não ser aplicável. Segundo este autor, um novo ensaio de reômetro de cisalhamento dinâmico desenvolvido para avaliar resistência do asfalto residual da emulsão deve ser utilizado.

No uso de emulsões asfálticas como ligante, a modificação com polímeros fornece diversas vantagens para a mistura final. Em pavimentos com emulsão asfáltica, as repetidas tensões e deformações provocadas pelo tráfego causam fissuras que se propagam através dos limites dos glóbulos de asfalto. Em emulsões asfálticas modificadas por polímero, a estrutura formada é capaz de absorver essas tensões externas sem causar fissuras mesmo a baixas temperaturas. (TAKAMURA, 2003).

Com o uso de SBR, além da modificação do asfalto, as partículas deste polímero também permanecem dispersas na fase aquosa. Com a expulsão do excesso de água através da coalescência dos glóbulos de asfalto, essas partículas acumulam-se e formam uma estrutura

alveolar (*honeycomb*) em volta dos glóbulos de asfalto. A estrutura final é altamente elástica (TAKAMURA, 2003).

Na utilização do SBS, não há a formação desta estrutura alveolar. Devido às diferenças no processo de incorporação, este polímero fica inteiramente misturado ao ligante asfáltico. Segundo Takamura, 2003, as emulsões com SBR apresentam melhor desempenho que as com SBS. Apesar de ambos polímeros apresentarem aumentos similares na resistência à fadiga, o SBR é mais eficaz ao formar uma estrutura ao redor do ligante capaz de suportar altas tensões repetidas.

A observação com microscópio óptico indica que o processo de cura das emulsões asfálticas não altera a formação da rede polimérica (TAKAMURA, 2000).

Nesta pesquisa, utilizou-se emulsão asfáltica modificada por polímero SBR, produto com nome comercial de Emulex.

Takamura, em 2003, investigou a utilização de emulsões modificadas com SBR para recapes asfálticos. Os resultados demonstraram vantagens de uso como aumento da resistência ao deslocamento e aumento do desenvolvimento de resistência inicial. Quanto à resistência à tração, somente mínimo aumento dessa propriedade pôde ser observado.

O uso de emulsões modificadas por polímero do tipo SBR já é uma tecnologia dominada atualmente. Os bons resultados fornecidos por este polímero nos levam a estudar outros polímeros, como o uso de borracha reciclada como polímero de EA.

2.2.2 Borracha Reciclada

A idéia do uso de borracha de pneu iniciou na Inglaterra por volta de 1898, originando um produto chamado de *rubber-bitumen* (SPECHT, 2003). Desde lá, durante anos, engenheiros e químicos tentaram misturar borracha natural e sintética (polímeros) a ligantes asfálticos a fim de melhorar suas propriedades de resiliência. O crescente interesse na utilização de borrachas, fez com que seu uso em pavimentação, assim como em outras alternativas, fosse estudado e desenvolvido. No entanto, muitas tentativas de utilizações desta borracha não apresentaram resultados instigantes.

O maior interesse no estudo deste material, suas aplicações e desenvolvimento, iniciou-se, por volta de 1960, após a utilização de uma mistura de pó de borracha de pneu, pelo engenheiro de materiais Charles McDonald, para selar trincas no teto do seu veículo. Este engenheiro observou que com o passar do tempo a mistura, embora rachada, não oxidava. O produto causou interesse, pois, sinalizava ser um possível modificador de asfalto. E, em poucos anos, em 1964, o Departamento de Transportes do Arizona (ADOT) já realizava as primeiras manutenções e conservas utilizando este material. Em 1968, os primeiros trechos com asfalto de ligante modificado por borracha para redução da reflexão de trincas eram executados no estado (HEITZMAN, 1992), (WAY, 2000).

Somente anos mais tarde, na década de 70 e início da década de 80, a CalTrans (Califórnia Department of Transportation) começou a utilizar borracha como modificador de misturas asfálticas a quente (SHATNAWI E HOLLERAN, 2003).

O estado do Arizona, nos Estados Unidos, merece atenção quanto ao histórico pioneiro de estudo e aplicação de misturas asfálticas com borracha. Atualmente, possui uma significativa malha rodoviária com utilização de borracha, geralmente usada como revestimento para pavimentos flexíveis e de concreto, totalizando mais de 4000 quilômetros de asfalto com borracha desde 1988. Para os pavimentos de concreto, as juntas são limpas e re-seladas com a mistura de asfalto-borracha. O processo típico do Arizona, segundo Way (2000), aplicado nos dias de hoje é o via úmida, com um teor de 20% de borracha em pedaços enquadrados em uma faixa granulométrica que varia de 2mm a 75 μ m. Esta borracha é acrescida ao ligante asfáltico aquecido a 190°C e misturados por no mínimo uma hora. Após reação, a mistura é mantida por 175°C até ser introduzida na planta de mistura.

Paralelamente as pesquisas de McDonalds e dos engenheiros rodoviários do Arizona, no final da década de 60, na Suécia, foi desenvolvido o processo onde a borracha era utilizada como parte do agregado da mistura asfáltica a quente. A este foi dado o nome comercial de *Rubit*. Esta tecnologia foi patenteada nos Estados Unidos sob o nome de *PlusRide*. Sendo o estado do Alaska o pioneiro a utilizar esta tecnologia e tornando-se a principal agência rodoviária que desenvolveria este tipo de mistura (HEITZMAN, 1992).

A nomenclatura *crumb rubber modifier*, inicialmente utilizada pelos americanos, indica que esta borracha é derivada de pneus e é utilizada em pavimentação asfáltica. No processo de regeneração do pneu, a borracha é separada dos outros componentes e o arame, a malha de

ação e o nylon são recuperados como sucata qualificada. A borracha de pneu é composta basicamente de borrachas natural e sintética e negro de fumo (*carbon black*). E embora existam variações entre pneus, a composição de uma amostra dessa borracha é razoavelmente uniforme (CALIFÓRNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2003)

A *crumb rubber modifier* (CRM) é uma borracha reciclada reduzida a pequenas partículas, através de diferentes processos, entre eles destacam-se o cisalhamento mecânico e o processo de criogenia (congelamento com nitrogênio). Os diferentes métodos de produção da borracha em pó transmitem diferentes características de tamanho, formato e textura para cada partícula. Estes três aspectos apresentam um significativo efeito no desempenho dos pavimentos asfálticos, segundo a Blacklidge Emulsions.

De acordo com o processo de produção, a borracha poderá ser mais ou menos reativa. Partículas com menor granulometria, em pó, apresentam maior área superficial, sendo, portanto, mais reativas ao ligante asfáltico. Além disso, as borrachas podem ser obtidas em formato cúbico (similar aos agregados) ou em formato lamelar (como raspas de pneu). O tamanho, a forma e a textura da partícula de borracha para obtermos o produto final variam de acordo com a aplicação desejada.

Embora existam algumas curvas granulométricas indicadas para misturas asfálticas modificadas com borracha, cada país ou região pode adaptar esse parâmetro para a borracha disponível na região.

Desde a década de 60, laboratórios de pesquisa e agências rodoviárias de diferentes países estão avaliando a aplicação destas tecnologias. Conseqüentemente, muitos meios de incorporar borracha ao asfalto foram testados. Publicações dos últimos 20 anos utilizam uma variedade de termos para definir processos e produtos que envolvem esta tecnologia. Conflitos entre terminologias causaram dificuldades para compreensão e comparação de dados entre órgãos rodoviários.

Assim, definiram-se dois processos diferentes para a incorporação desta borracha ao asfalto: a mistura seca, onde a borracha é utilizada como agregado, e a mistura úmida, onde o ligante asfáltico é modificado pela borracha. No primeiro caso, a mistura é chamada de Borracha-Agregado ou Concreto asfáltico modificado por borracha enquanto que no segundo caso, de Asfalto-Borracha (HEITZMAN, 1992). Atualmente, também é possível o processo misto, onde as duas categorias são utilizadas. A tabela 2.1 sintetiza estas definições.

Tabela 2.1- Relação entre as terminologias de CRM (Adaptado de Heitzman, 1992)

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

O desempenho destes produtos é observado a partir de parâmetros como: fadiga, envelhecimento, resistência à derrapagem, grau de fissuramento, entre outros.

A borracha pode ser utilizada em diversos projetos de pavimentação. Entre eles, o Commonwealth Department of Environment, Austrália, 2001, apresenta, na tabela 2.2, aplicações rodoviárias com incorporação de borracha reciclada de pneus como incentivo de utilização deste rejeito.

Tabela 2.2- Quantidade de borracha usada em diferentes aplicações em pavimentação (Commonwealth Department of Environment, Austrália, 2001)

Aplicação	Taxa de uso de borracha
Revestimento delgado anti reflexão de trincas com asfalto borracha	0,2 kg borracha/ kg
Capa de selagem com asfalto borracha	0,6 kg borracha/ m ²
SAMI ou SAM	0,6 kg borracha/ m ²
Asfalto borracha (processo úmido)	3% a 20%

2.2.2.1 Processo Via Úmida

Para compreendermos melhor a interação borracha-asfalto, antes são necessários alguns conceitos que facilitam o entendimento do comportamento do CAP baseado em sua composição química. Pois se sabe que o asfalto é uma mistura complexa de moléculas orgânicas que variam em composição química e peso molecular.

O fracionamento químico denominado SARA separa os componentes do CAP em quatro grandes grupos: os hidrocarbonetos Saturados, os hidrocarbonetos Aromáticos, as Resinas e os Asfaltenos. As três primeiras frações formam os maltenos.

Os asfaltenos são materiais complexos com alto peso molecular que tipicamente constituem 5 a 25% do CAP. O aumento do teor desta fração altera a consistência do asfalto, produzindo um ligante mais duro.

As resinas correspondem a 5 a 30% do CAP. Devido a sua alta polaridade, são muito adesivas, agindo como um agente de ligação para os asfaltenos, assim aumentando a fluidez do asfalto.

Os hidrocarbonetos Aromáticos possuem o menor peso molecular e formam a maior proporção de asfalto: 40 a 65%. Possuem uma baixa polaridade e formam um líquido que age como um dispersante para os asfaltenos.

Por fim, os hidrocarbonetos Saturados representam 5 a 20% do asfalto e constituem a fração menos susceptível à oxidação.

A borracha adicionada ao asfalto funciona como um polímero, absorvendo líquidos e inchando. A quantidade que absorve é dependente do tipo de polímero e da natureza, temperatura e viscosidade do asfalto, que age como um solvente orgânico (TRELOAR, 1975). Essa absorção trata-se de um processo de difusão (SINGLETON ET AL, 2000).

Com a borracha amolecida, o CAP se difunde dentro de cada partícula de borracha, aumentando a dimensão das redes de borracha até que o equilíbrio seja atingido, processo onde a borracha aumenta de volume. Esse elastômero, através de suas cadeias poliméricas, absorve todas as frações asfálticas com exceção dos asfaltenos. Isto indica que os maltenos são absorvidos deixando ao asfalto residual, aquele que não se difundiu na borracha, uma alta

proporção de asfaltenos. Dessa forma, alterando as propriedades reológicas e de coesão deste asfalto residual (SINGLETON et al, 2000). A figura 2.9 esquematiza o processo.

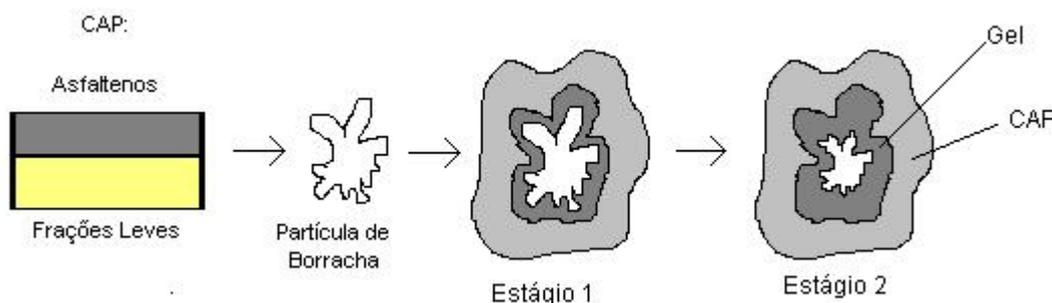


Figura 2.9- Esquema da absorção das frações leves de asfalto pela borracha (Holleran e Reed, 2000)^B

A taxa de reação entre esta borracha e o asfalto pode ser acelerada pelo aumento da área superficial de borracha, que pode ser aumentada pela redução de sua granulometria. A habilidade da borracha em modificar as propriedades do ligante asfáltico dependerá da compatibilidade entre esses dois materiais (HEITZMAN, 1992). Acredita-se que, quanto menor o peso molecular do solvente- frações do CAP-, mais rapidamente este irá se difundir na borracha (SINGLETON et al, 2000).

Além da compatibilidade entre a borracha e o CAP a nível molecular, a quantidade de ligante que se difundirá também dependerá da quantidade de ligações cruzadas (*cross-links*) que possuir a borracha (TRELOAR, 1975, AIREY et al, 2003).

As ligações cruzadas são as responsáveis pela rigidez da borracha. E quanto em maior número, mais rígida será a borracha (AIREY et al, 2003). Este processo é feito pelo enxofre ou pelo oxigênio, dependendo do modo de vulcanização utilizado. Normalmente, em pneus, é usado o enxofre e, então, é dito que a borracha é vulcanizada; contendo, conseqüentemente, um grande número de ligações cruzadas.

Portanto, quanto maior o número de ligações cruzadas, menor a extensão média das cadeias de borracha entre ligações cruzadas e menor a taxa de difusão (SINGLETON et al, 2000; AIREY et al, 2003).

Holleran e Reed^A (2000), analisaram os sistemas asfalto-polímero concluindo que estes sistemas devem ser isotrópicos em micro e até mesmo em molecular escala. E quanto ao sistema mais específico asfalto-borracha de pneu, segundo os autores, esta isotropia pode ser muito difícil de ser atingida, devido ao grande número de ligações cruzadas presentes neste tipo de borracha. Portanto, esta borracha não pode ser adicionada ao asfalto de maneira tão simples como os polímeros sintéticos. Para estes autores, a borracha de pneu deve ser pré-misturada em granulometria muito fina, livre de qualquer metal.

Segundo Way, 2000, nos últimos 20 anos, o Departamento de Transporte do Arizona verificou que as misturas de asfalto-borracha, para seus materiais e clima, são ótimos e duráveis revestimentos. Foi observada redução significativa na reflexão de trincas, mesmo nas estradas com tráfego pesado e intenso, redução de ruído em áreas urbanas além de um desempenho excelente quanto ao fissuramento e afundamento de trilhas de roda levando a um aumento de durabilidade do pavimento. Além desses, os revestimentos de asfalto borracha, mesmo acarretando em um aumento da espessura do revestimento em 19 a 36 mm, apresentaram uma ótima relação custo *versus* tempo. Esses projetos exigiram menos manutenções que aqueles de asfalto convencional, mesmo após dez anos de serviço.

A modificação do ligante é atingida pela interação do cimento asfáltico com o CRM. Como já comentado, o grau de modificação do ligante depende de muitos fatores: tamanho e textura dos grãos de borracha, tempo e temperatura da reação, o uso de aditivos, proporção de cimento asfáltico, entre outras. Entre estas, salienta-se a importância do estabelecimento de uma proporção adequada do percentual de borracha. Segundo Takallou e Hicks (1987), o aumento do teor de borracha faz com que haja necessidade de aumentar-se o teor de ligante asfáltico. Este fator encarece o processo.

Além disso, assim como para as misturas asfálticas convencionais, para as misturas com borracha também se deve avaliar com cuidado a relação Módulo de Resiliência e Resistência a Tração (M_r/R_t). Segundo Specht (2002), valores de M_r/R_t em torno de 3000 são os mais adequados para misturas a quente.

No Brasil, Leite et al (2000), produziram amostras de misturas a quente com ligante modificado por borracha de pneu no teor de 20%, por SBS no teor de 4% e por EVA no teor de 4%. Demonstraram com este estudo a eficácia do acréscimo de borracha de pneu obtendo resultados de aumento da resistência ao trincamento e a fadiga das misturas.

Segundo, Specht, 2004, pode-se afirmar que teores entre 12 e 18% de borracha como modificador de ligante para CBUQ leva à produção de misturas com maior resistência à fadiga e a deformações permanentes e maior durabilidade.

No Rio Grande do Sul, já foram executados projetos em asfalto-borracha. Embora recentes, estão sendo monitorados pelos órgãos competentes e já apresentam bons resultados.

2.2.2.2 Via Seca

O processo via seca onde a borracha é utilizada como agregado é uma alternativa mais recente de uso no reaproveitamento deste material.

Para Heitzman, 1992, o processo seco é definido como qualquer método de adicionar borracha diretamente na mistura a quente, tipicamente pré-misturando a borracha ao agregado aquecido antes da mistura com o asfalto.

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

Usualmente, segundo Houssain et al, 1995, utiliza-se 2 a 3% de borracha em relação ao peso de agregados, o que resulta em um consumo maior de borracha que o processo via úmida.

Os benefícios da adição de borracha a seco, além do ambiental, são o aumento da flexibilidade, redução de ruído, aumento da vida de fadiga e controle da reflexão de trincas. Além desses, o aumento da resposta elástica desse material melhora o desempenho do pavimento nos ciclos de gelo e degelo sob carga de veículos (TAKALLOU E HICKS, 1988).

A figura 2.10 ilustra a mistura asfáltica com adição de borracha como parte do agregado.

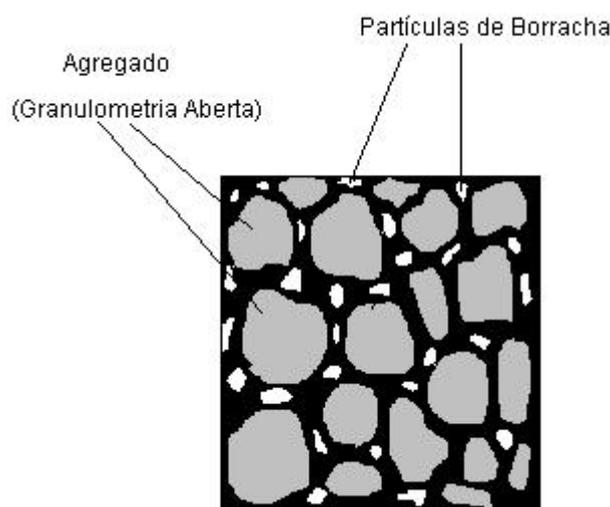


Figura 2.10- Ilustração de asfalto modificado por borracha pelo processo via seca (a borracha são as partículas em branco) (Fonte: Takallou e Hicks, 1988)

A experiência do estado do Alaska tem mostrado que um fator importante para sucesso das misturas a quente via seca é um baixo teor de volume de vazios. Estes variam de 0 a 4% de acordo com o nível de tráfego. (NARUSCH, 1982).

Takallou e Hicks, em 1988, reuniram as principais características e informações práticas de concreto asfáltico modificado com borracha com base no estudo de trechos executados num período de 1979 a 1987 nos Estados Unidos.

Além da granulometria e do formato das partículas de borracha, outro aspecto parece ser muito importante para as misturas via seca: o tempo de reação com o ligante asfáltico.

O tempo de reação (ou tempo de digestão) da borracha com o ligante asfáltico parece ser um parâmetro muito importante para o desempenho final da mistura. Pesquisas recentes salientam tempos de reação entre uma a duas horas como sendo adequados. Durante este período, a borracha pode reagir com o asfalto melhorando suas propriedades finais. (PINHEIRO E SOARES, 2003).

Para Spetch et al^B (2003), os valores de módulo de resiliência e resistência à tração são fortemente influenciados pelo tempo de digestão da borracha para misturas a quente. Uma hora é o tempo indicando como sendo adequado e viável para aplicação deste tipo de material em campo.

No caso de misturas a frio, não há consenso quanto ao tempo de reação. Muitos autores acreditam que não há possibilidade de acontecer reação entre a borracha e o cimento asfáltico presente na EA. No entanto as misturas a frio já possuem um tempo chamado de tempo de cura para a compactação, onde a borracha se mantém em contato com o CAP.

Singleton et al, 2000, avaliaram o efeito da composição do asfalto, a interação com a borracha e as mudanças nas propriedades mecânicas no processo seco a altas temperaturas. Observaram que o inchamento da borracha aumenta com o tempo de maneira logarítmica em aproximadamente 100% e que o teor de aromáticos presentes no CAP parece ter um efeito limitado na taxa de interação com a borracha. O que indica que a borracha absorve facilmente as frações aromáticas e saturadas, aquelas de menor peso molecular. Também observaram que a composição asfáltica não tem um significativo efeito na velocidade de interação, entretanto, irá afetar as propriedades do asfalto residual.

Airey et al (2003) estudaram, através do processo seco, a interação entre asfaltos de várias penetrações e borracha reciclada em termos de absorção das frações leves do asfalto pela borracha, a composição química e as propriedades reológicas do asfalto residual. O aumento da massa da borracha foi utilizado para determinar a perda de voláteis e frações leves que foram absorvidos pelos diferentes asfaltos.

Para estes autores, a taxa de adsorção é diretamente relacionada à viscosidade do ligante e composição química do asfalto, mas principalmente a quantidade de frações adsorvidas é função da natureza da borracha.

Specht (2004) observou que a incorporação de borracha via seca melhora as características de resistência à fadiga e ao trincamento térmico, devido à menor sensibilidade a variações de temperatura do CBUQ. Este autor também realizou ensaios em campo, verificando através de leituras de macrotextura, que o revestimento tipo borracha-agregado possui características funcionais melhores que as do trecho comparativo em concreto asfáltico convencional.

Huang et al, 2002, investigaram os processos via seca e via úmida avaliando estabilidade e fluência Marshall, ensaios de M_R e R_T e desempenho em campo para misturas asfálticas a quente executadas em Louisiana, Estados Unidos. As misturas abertas com borracha apresentaram valores de fluência maiores que os das misturas de controle, enquanto que as misturas densas apresentaram valores similares. Todos os trechos com borracha, da mesma forma, apresentaram maiores deformações que os revestimentos convencionais, indicando

maior resistência ao fissuramento. As análises também mostraram valores muito superiores de R_T e M_R para as misturas convencionais que para as misturas com borracha para as temperaturas de 5° e 25° e 40°C. As seções construídas com borracha apresentaram melhor desempenho quanto a ATR, fissuramento, e Índice de Irregularidade (IRI) que as seções correspondentes mesmo após cinco a sete anos de tráfego.

Segundo Heitzman, 1992, a borracha-agregado é um produto possível de ser aplicado somente em misturas a quente. Este produto, segundo o autor, não é adequado para outras aplicações asfálticas. Da mesma forma, a CalTrans, 2003, condiciona que este método é aplicável somente às misturas a quente.

Para Holleran^E (2000), o processo via seca é completamente exequível para misturas a frio. A borracha irá comportar-se basicamente como um fíler, um agregado, podendo ou não haver alguma reação entre esta borracha e o CAP. Tal fato irá depender da compatibilidade entre estes dois materiais.

Da mesma forma, este mesmo autor realizou diversos estudos sobre a emulsificação de asfalto borracha. Segundo ele, também é possível a realização de uma emulsão asfáltica modificada com borracha pelo processo via úmida. Porém este procedimento ainda requer muito cuidado e conhecimento sobre tema.

2.2.2.3 Aspectos Relevantes para Misturas Borracha-Emulsão Asfáltica

A mistura de borracha de pneu com emulsões asfálticas ainda é um tema em desenvolvimento. Para que haja uma compreensão sobre este, é necessário um entendimento mais aprofundado de alguns aspectos sobre a borracha e sobre a química das EA.

Sabe-se que a borracha natural é formada por duas cadeias de hidrocarbonetos com algumas insaturações (ligações duplas) paralelas. Esta não possui ligações cruzadas e, portanto, as cadeias podem se mover à vontade. Ao amarrarmos uma cadeia a outra com enxofre, colocando em uma insaturação de uma cadeia e na de outra, as duas já não podem se mover facilmente, pois foram criadas ligações cruzadas. A borracha, portanto, tornou-se rígida. A borracha vulcanizada esta aparentemente com as ligas duplas superficiais saturadas de enxofre.

Acredita-se que alguns processos alternativos de desmonte de pneus são capazes de quebrar algumas ligações de enxofre e expor as ligações duplas que estavam escondidas e sem acesso, devido à vulcanização, criando assim uma borracha com novas ligações disponíveis para o enxofre. Acredita-se que esta nova borracha, dita regenerada, poderá então ter maior adesividade (KIROSKI et al, 1996).

Memon e Franco, 2003, apresentaram em uma conferência sobre asfalto borracha, um novo produto chamado de *chemically modified crumb rubber asphalt*. Segundo os autores, este produto é baseado em uma borracha completamente desvulcanizada (regenerada) e quimicamente aderida ao asfalto, produzindo um ligante homogêneo e estável. Para isso, utilizou-se um agente de ligação química que ao ser adicionado promovia uma união entre as ligações químicas livres da borracha às moléculas de asfalto a altas temperaturas. Este produto foi apresentado como sendo de simples fabricação e utilização de equipamentos laboratoriais convencionais.

Assim compreendendo, o uso de compostos de borracha como absorvedores de óleos é uma tecnologia em desenvolvimento. Estes compostos podem apresentar-se a granel ou em formato de cordas ou almofadas. Embora a maioria dos materiais absorventes ainda seja de polipropileno, de lã ou de compostos orgânicos (Schatzberg, 1971), empresas que lidam com petróleo e produtos derivados (óleos, etc.) já utilizam compostos de polímeros em situações como em casos de derramamento de petróleo no mar, por exemplo, a fim de absorver o material do vazamento. Absorvedores de óleos operam como esponjas, captando óleos líquidos ou semi-sólidos por um processo de difusão. Para Ghalambor (1995) os absorvedores sintéticos feitos com materiais poliméricos apresentam alta capacidade de absorção. Compostos de borracha são capazes de absorver petróleo em alto mar a temperatura ambiente.

Diante desta realidade, é viável acreditar que mesmo em um processo a frio, a temperatura ambiente, uma borracha poderia ser reativa a um asfalto emulsificado, desde que o tamanho dos glóbulos de asfalto seja inferior em magnitude ao das partículas de borracha. Porém, muitos estudos adicionais precisam ser realizados até que se possa provar tal fato.

É claro que tal processo seria diferente daquele para misturas a quente. Isto porque, a altas temperaturas, a reação entre a borracha e o asfalto é aumentada. A temperatura eleva a energia entre moléculas, aumentando assim o espaçamento entre poros do grão de borracha. No

entanto, mesmo a baixas temperaturas, estes poros, embora menores, continuam a existir na borracha.

Para Holleran e Reed^B, 2000, o acréscimo de borracha na emulsão com simples mistura parece não afetar as características finais de EA, com exceção do resíduo de sedimentação que é aumentado.

Para condições normais de temperatura e pressão, a borracha moída é um material não reativo. Onde seu principal componente químico é uma mistura de borracha natural e sintética, incluindo outros componentes como negro de fumo, óleos, parafinas, pigmentos, etc.

Portanto, é provável que não haja problemas de ruptura prematura da EA causada pelo contato com a borracha durante a mistura. Sabe-se que a EA catiônica, utilizada neste trabalho, rompe principalmente devido à diferença de cargas entre o emulsificante e os agregados. E a borracha é um material com pH aproximadamente neutro. Isto é verdadeiro para concentrações que não excedam de 20% do peso de ligante. Por isso, teores muito altos de borracha são extremamente difíceis de serem alcançados, mesmo quando a borracha é pré-misturada ao emulsificante. (HOLLERAN E REED^B, 2000)

Houssein et Al (1995) avaliaram o efeito da adição de partículas maiores de borracha (maiores que 4,75 mm) em misturas a frio produzidas com emulsões asfálticas catiônicas para vias com baixo tráfego. Para este estudo tanto as EA como os agregados foram aquecidos a temperatura de 66°C a 71°C para mistura. Foram feitas adições de 2%, 4% e 6% de borracha sobre o peso de agregado. Os autores observaram que o aumento no teor de borracha acarretava em um aumento no teor de EA. Os resultados Marshall apresentaram valores baixos para estabilidade a medida que o teor de borracha aumentava. O estudo constatou ser uma boa alternativa para vias rurais com alto consumo de pneus. Segundo estes autores, não se pode esperar nenhuma reação entre a borracha e a emulsão asfáltica nas misturas a frio, ao contrário das misturas a quente.

Segundo Holleran e Reed^B (2000), borracha de pneu sólida pode ser adicionada em misturas como um componente seco, processo similar ao via seca para as misturas a quente. Nesse caso, a borracha torna-se parte do agregado e age principalmente como um fíler. Este processo é comum no Estados Unidos.

Na busca de maior entendimento para este tema, Holleran e Reed são autores responsáveis por uma longa pesquisa neste tema. Desde 2000, estes estudam a adição de borracha reciclada de pneu em emulsões asfálticas com um processo referido como via úmida adaptado para uso em emulsões. Já foram obtidos resultados que demonstram uma melhora de desempenho dessas misturas, como por exemplo, quanto à resistência ao trincamento, quando comparadas com misturas de emulsão asfáltica convencional. (Holleran e Reed^B, 2000),

É importante considerar que quase todos os procedimentos, caracterização e propriedades das misturas relacionadas ao tema asfalto e borracha de pneus são definidos para misturas asfálticas a quente. As nomenclaturas via seca e via úmida também são definições para misturas a quente. O estudo para desenvolvimento do uso de borracha em EA ainda é muito restrito. É necessário considerar, portanto que novos conceitos e serão criados ou adaptados para que haja um real desenvolvimento deste tema.

2.3 MISTURAS ASFÁLTICAS À FRIO

A utilização de misturas a frio vem sendo cada vez mais difundida no meio técnico mundial como solução alternativa na execução de bases e revestimentos asfálticos, graças à sua simplicidade e rapidez de execução a frio (BROSSEAUD, 2002). No entanto, no Brasil, seu maior emprego ainda se destina à execução de camada de regularização e reforço da estrutura do pavimento (binder) e de serviços rotineiros de conserva tipo tapa buracos (ABEDA, 2001).

Até hoje, os departamentos de transportes, nos Estados Unidos, demonstraram pouco interesse na utilização de misturas a frio com EA como uma alternativa às misturas a quente em áreas de tráfego intenso ou onde há plantas de misturas a quente disponíveis. Isto é uma consequência das limitações das misturas a frio com respeito às condições climáticas e de lenta cura. Além disso, longa durabilidade e estabilidade desse tipo de pavimentos ainda necessitam ser avaliadas. Entretanto, em áreas rurais, onde não há plantas de mistura a quente e onde altos custos de transporte de combustível e outros materiais seriam esperados, misturas com EA oferecem boas vantagens (AIKMAN, 1981).

As misturas a frio são realizadas comumente com emulsões asfálticas catiônicas, caracterizando misturas sempre espalhadas e compactadas na temperatura ambiente (SANTANA, 1993). Segundo Potti et al. (2002), a qualidade do revestimento, assim como a

densidade e as propriedades mecânicas finais desejadas, dependem do comportamento de ruptura da emulsão. Além disso, o tempo de ruptura da emulsão, segundo a ABEDA, 2001, é um fator decisivo na hora de aplicação destas misturas. Portanto, segundo o Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1989), o elemento essencial para misturas a frio reside na escolha de uma emulsão apropriada com a reatividade do agregado selecionado.

Muitas literaturas apresentam as misturas a frio produzidas com emulsões asfálticas como sendo mais adequada a utilização destas em climas quentes e para tráfegos leves a médios (THANAYA^B, 2002).

No Brasil, segundo Santana, 1993, as misturas asfálticas usinadas constituídas por agregado miúdo são chamadas de argamassas asfálticas e as constituídas por agregados graúdos e argamassa asfáltica são denominados Pré-misturados (PM). A classificação dos Pré-misturados a Frio (PMF) envolve a granulometria (quantidade de argamassa e de agregados) e a quantidade de vazios. Tradicionalmente, os PMFs são classificados em três classes quanto a seu volume de vazios (V_v): Aberto ($V_v > 22\%$), Semi Denso ($15 < V_v < 22\%$) e Denso ($V_v < 15\%$). Não há concordância internacional quanto a estes valores.

Segundo Santana, 1993, os valores mais altos de volume de vazios se devem a dois fatores:

- As misturas a frio exigem mais vazios que as misturas a quente, pois, após a compactação, é necessário que haja a evaporação da água e do solvente (caso haja).
- Com o início do tráfego, haverá uma maior diminuição no volume de vazios das misturas a frio do que nas misturas a quente.

Enquanto a densidade das misturas a quente muda pouco durante os primeiros meses ou anos, a densidade das misturas a frio aumenta consideravelmente como resultado da cura e adensamento pelo tráfego. Esse aumento no adensamento pode ser igual, ou até superior, a 5% (SERFASS, 2002).

Para Shatnawi e Holleran (2003) revestimentos com alto teor de vazios, entre 15% e 25%, comportam-se como uma superfície permeável. Esta é capaz de drenar água reduzindo spray e poças de água. Da mesma forma, esta estrutura aberta parece colaborar para a redução de barulho, tornando o pavimento mais silencioso. Também a rugosidade da superfície aumenta a resistência à derrapagem e, graças a sua flexibilidade, promove características de resistência à reflexão de trincas.

Quanto à aplicação, em geral, os equipamentos de espalhamento e compactação das misturas a frio não são tão sofisticados quanto aqueles requeridos pelas misturas a quente. Sempre que adequados materiais estão disponíveis, uma planta de mistura pode funcionar com alta produção e baixo custo (ASPHALT INSTITUTE, 1989). Portanto, a facilidade para obtenção da massa asfáltica, bem como aplicação em pista, faz com que o serviço de PMF seja uma alternativa viável para órgãos que desejam pavimentar vias e não dispõem de grandes recursos financeiros e grandes equipes técnicas (ABEDA, 2001).

Entretanto, este tipo de pavimento não é menos importante, uma vez que, nos Estados Unidos e em outros países, uma grande quantidade de bases e revestimentos são construídos com misturas a frio. (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

Segundo Silva Junior e Sória (2000) as misturas de emulsão-agregado requerem alguns cuidados adicionais em relação às misturas de concreto asfáltico e com asfaltos diluídos, tanto na fase de projeto (dosagem) quanto na fase de construção. Estas misturas possuem algumas peculiaridades que estão ligadas diretamente à tecnologia empregada na produção das emulsões asfálticas.

Para Mamlouk et al (1980), esforços maiores são necessários para o controle e tratamento das misturas a frio que aqueles necessários nas tradicionais misturas a quente. Isto porque são muitos os fatores que afetam o desempenho das misturas a frio durante a mistura e confecção dos corpos de prova. Quando comparadas às misturas a quente, podem-se salientar como principais problemas encontrados nas misturas a frio a alta porosidade, as baixas resistências nas primeiras idades e o longo tempo requerido para que se atinja cura total e conseqüentemente resistência última (THANAYA^A, 2002).

Os principais fatores a serem avaliados que proporcionam um adequado método de preparação e teste de misturas a frio com EA são: cobertura do agregado, trabalhabilidade na mistura e o teor de umidade retido nas amostras antes e depois da compactação (MAMLOUK et AL, 1980).

Entre os diversos métodos de dosagens existentes, salienta-se a dosagem Marshall como o mais utilizado no Brasil. Este método foi adaptado para misturas a frio sendo conhecido como Marshall Modificado.

Existem sérias restrições internacionais quanto à adaptação de métodos de dosagem de misturas a quente serem utilizados em misturas a frio. Potti et. al (2002) afirmam que o menor desenvolvimento das misturas a frio é justamente pela inexistência de um método eficaz de dosagem e mistura.

O teor mínimo de ligante residual, e conseqüente teor de emulsão, para mistura a frio, podem ser estimados a partir da área superficial dos agregados segundo a fórmula de Duriez, equação 2.2 (SANTANA, 1993; GALLEGO et. al 2000):

$$p = k.(\Sigma)^{0,2} \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

p = % de asfalto residual

k= módulo de riqueza

Σ = área específica dos agregados

Waller Jr. (1980) recomenda que o teor de EA utilizado pertença aos seguintes intervalos: 5-10% para misturas densas e 5-8% para misturas abertas.

Para Momlouk et. al (1980), a compatibilidade entre o agregado e a emulsão asfáltica pode ser avaliada de acordo com a capacidade da emulsão em cobrir as partículas de agregados. Para este autor, o cobrimento dos agregados, a trabalhabilidade da mistura e os teores de umidade retida nas amostras, antes e após a compactação, são os principais fatores para avaliação das misturas a frio.

Embora não seja obrigatório na norma DNER ME 107/94, é recomendável que haja um umedecimento dos agregados antes da mistura com a emulsão. Este acréscimo de água, chamado de umidade de molhagem, auxilia na obtenção de um bom envolvimento do agregado (SANTANA, 1993) e impede o descobrimento dos finos (MAMLOUK ET AL, 1980). Além disso, a água usada na molhagem do agregado tem efeito considerável na trabalhabilidade dessas misturas (SILVA JUNIOR E SÓRIA, 2000).

Mamlouk et al, 1980, estipularam um critério onde a quantidade total de água presente na mistura não deveria exceder 4,5% do peso de agregado seco para que a mistura fosse compactada. A umidade total (h_t) é dada pela equação 2.3.

$$h_t = h_m + h_{EA} \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde:

h_t = umidade total

h_m = umidade de molhagem dos agregados

h_{EA} = umidade trazida pela emulsão

Em 1980, foi sugerido por Mamlouk et al que as amostras deveriam ser curadas durante uma hora a temperatura de 60°C e após remisturadas durante trinta segundos antes da compactação.

A norma DNER 107/94, Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica- Ensaio Marshall, recomenda cura de duas a seis horas antes da compactação para emulsões dos tipos RR e RM e de no máximo 1 hora para as do tipo RL.

Tuchumantel, 1990, assim como Silva Junior e Sória, 2000, demonstraram a importância do teor de umidade na compactação dos PMFDs e PMFsDs. Estes autores identificaram a existência de um teor ótimo de umidade que acima deste a umidade torna-se crítica. Segundo Silva e Junior e Sória, o teor de água adicionado à molhagem dos agregados e o percentual de água presente na mistura no início da compactação afetam claramente o desempenho das misturas com emulsões asfálticas nos resultados de ensaios Marshall. Estes autores observaram que a perda de umidade para a compactação não deve ser superior a 50% da umidade total (h_t), sendo que valores superiores podem comprometer os resultados e valores inferiores a 30% da umidade total não favorecem o processo de compactação. Portanto, o teor de umidade de compactação tem um valor ótimo que se localiza entre $0,3 h_t$ e $0,5 h_t$.

A maior desvantagem do uso de misturas a frio com emulsões asfálticas é o lento desenvolvimento de resistência, fenômeno controlado pela perda de umidade da mistura

(MAMLOUK et al, 1980). Segundo Waller (1980), a estabilidade última assim como propriedades finais não são alcançadas até que toda água da mistura tenha evaporado.

Portanto, outra característica muito importante dessas misturas é a cura pós compactação, ou seja, o processo de perda de água da mistura, que pode ocorrer antes ou depois da compactação. Não se deve confundir o processo de ruptura, o CAP se separa da água e adere ao agregado, com o de cura, quando acontece evaporação da água e do solvente (SANTANA, 1993).

A perda de água dessas misturas acontece pela evaporação e também pela drenagem através das camadas inferiores do pavimento.

Para uma mistura a frio pode levar até seis meses de cura para que suas características finais sejam atingidas (dependendo do clima e do tráfego da região). Sendo que em idades jovens estas misturas apresentam uma pobre coesão. Este aspecto, porém, é muito difícil de ser reproduzido em laboratório, sendo necessário um método acelerado de cura (SERFASS et al, 2003; CARBONNEAU et al, 2002).

Um estudo apresentado pela Chevron Resarch Company, na Califórnia, conclui que o cura total de misturas com EA, em campo, podem ocorrer entre 2 e 24 meses dependendo das condição climáticas (LEECH, 1994).

Para Carbonneau et al (2002), ao ensaiar-se misturas com EA é necessário avaliar-se sempre duas condições: no estado fresco (primeiras idades) e em estado maduro (após determinado tempo de cura).

Segundo Houssein et al (1995), é comum a adição de algum fíler, como cimento ou cinza, a fim de aumentar a resistência destas misturas nas primeiras idades.

Parece não haver consenso, entre diversos autores, sobre a maneira ideal de reprodução do processo de cura das misturas a frio para corpos-de-prova em laboratório.

Mamlouk et al (1980) recomendam cura pós-compactação com amostras extraídas dos moldes durante três dias em estufa a temperatura de 49°C.

A norma DNER 107/94 recomenda cura no molde durante 24horas a temperatura de 60°C.

O método de Arizona e de Illinois, segundo Waller Jr, 1980, recomenda cura dos corpos-de-prova no molde durante três dias a temperatura de 25°C.

No trabalho experimental realizado por Thanaya^A, 2002, foi realizada cura dos corpos-de-prova de um dia no molde e outro desmoldados ambos a 40°C.

Para Takamura, 2003, a melhor simulação do processo de cura em campo é a cura das amostras compactadas durante três dias: o primeiro dia a temperatura ambiente e os próximos dias em estufa a 60°C.

Parece muito importante a necessidade do estabelecimento de uma normalização adequada para esse tipo de mistura. Somente assim poderá ser possível a comparação dos resultados de ensaios laboratoriais entre entidades de pesquisa distintas.

O Curso de Emulsões Asfálticas, segundo Quimi-Kao S.A., 1993, comenta sobre o possível aparecimento de fissuras nos corpos de prova quando curados a temperaturas maiores que 50°C.

Para Waller Jr, 1980, não é necessariamente obrigatório um cobrimento completo dos agregados para se obter uma mistura satisfatória, desde que a área coberta seja superior ou igual a 90%.

A resiliência dessas misturas, estudada por Carbonneau et. al (2002), dependerá do estado dos corpos de prova; isto é, teor de água e grau de compactação, além do carregamento ao qual ele é submetido. Sabe-se que não existe consenso quanto ao tempo e à temperatura ideal de cura para obtenção dos valores de módulo de resiliência e resistência à tração. Portanto, é recomendada a especificação destes parâmetros junto dos resultados de módulo de resiliência.

Para Santana, os PMFDs e PMFDs são utilizados praticamente apenas como revestimentos, devendo-se verificar tanto a fadiga quanto a estabilidade podendo-se ir até $N \leq 10^7$ ($N' \leq 5 \times 10^7$), devendo-se usar CBUQ acima destes valores.

Entretanto, com o desenvolvimento da tecnologia de ligantes modificados por polímeros e por borracha, o campo de aplicação das misturas a frio se estendeu para rodovias com maior volume de tráfego. Segundo Hérítier et. al (2002), a formação do filme asfáltico em torno do agregado e a eliminação da água de ruptura e de umedecimento são partes das condições essenciais para obtenção de uma mistura a frio de alto desempenho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Foram executadas duas faixas de pré-misturados a frio: uma densa e outra semi-densa. Estes corpos de prova foram produzidos em laboratório com emulsão asfáltica catiônica. A adição de borracha, assim como os teores ideais de emulsão asfáltica e de asfalto residual, foram definidos e analisados após ensaio de Dosagem Marshall a Frio, segundo DNER-ME 107/94.

As características e comportamento das misturas serão avaliados por:

Estabilidade e fluência Marshall;

Densidade da mistura asfáltica;

Determinação do módulo de resiliência na compressão diametral;

Resistência à tração na compressão diametral;

Análise do efeito do tempo de cura para o módulo de resiliência e a resistência a tração;

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.2 EMULSÃO ASFÁLTICA

O ligante asfáltico foi fornecido pela empresa Ipiranga Asfaltos S.A. Para os ensaios laboratoriais, foram analisadas misturas asfálticas a frio dos tipos densa (PMFD) com volume de vazios menores que 15%, produzidas com emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta RL-1C e Emulex RL-1C (EA comercial modificada com polímero SBR), e semi-densa (PMFsD) com volume de vazios entre 15% e 22%, produzidas com emulsão asfáltica de ruptura média RM-1C e Emulex RM-1C (EA comercial modificada com polímero SBR).

As emulsões asfálticas foram qualificadas a partir dos seguintes ensaios laboratoriais de consistência (densidade do ligante e viscosidade Brookfield), composição (resíduo por evaporação e peneiração), e estabilidade (sedimentação, desemulsibilidade, cobrimento e adesividade).

O intervalo de teores de ligante utilizados no ensaio Marshall foram resultantes da fórmula de Duriez (SANTANA, 1993), conforme revisão bibliográfica, considerando uma amostra de agregados de 1200g. O teor ideal de emulsão calculado pela fórmula para as misturas densa e semi-densa foram, respectivamente, 9,2% e 8,0%. Variando-se estes valores em 0,5% obteve-se os intervalos mostrados nas tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 - Intervalo de teores de ligante utilizados nas misturas densas

EA RL 1C (%)	CAP (%)
8,5	5,10
9	5,40
9,5	5,70
10	6,00
10,5	6,30

Tabela 3.2 - Intervalo de teores de ligante utilizados nas misturas semi-densas

EA RM 1C (%)	CAP (%)
6,5	4,03
7	4,34
7,5	4,65
8	4,96
8,5	5,27

3.2.1 Ensaios de caracterização das Emulsões Asfálticas

3.2.1.1 Densidade da Emulsão Asfáltica

A densidade do material asfáltico foi realizada segundo norma DNER ME 193/96, Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos: determinação da densidade. Este parâmetro é utilizado no cálculo das propriedades volumétricas das misturas asfálticas.

Para realização deste ensaio com materiais líquidos deve-se primeiramente homogeneizar a EA a 25°C durante 30 minutos em banho Maria. Após, verte-se a emulsão nos picnômetros (duas amostras) tendo o cuidado para evitar a inclusão de bolhas de ar. O picnômetro é tampado e todo o excesso de material é limpo com um pano limpo e seco. O peso do picnômetro com emulsão é registrado.

A densidade do material betuminoso líquido é dada pela equação 3.1.

$$D_l = \frac{c - a}{b - a} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

D_l = Densidade da EA

a = Massa do picnômetro vazio com tampa (g)

b = Massa do picnômetro vazio com tampa cheio de água destilada (g)

c = Massa do picnômetro vazio com tampa cheio com amostra de EA (g)

3.2.1.2 Viscosidade Brookfield

A viscosidade de uma emulsão é influenciada pela consistência da fase dispersante (água e solvente, caso haja) e pelo teor de resíduo asfáltico existente. A viscosidade tem importante

significado para emulsões asfálticas, pois é uma propriedade que afeta a utilização deste material. Em vários tipos de construção, este material deve ser uniformemente aplicado através de spray. Portanto, a emulsão deve-se manter pouco espessa a fim de poder ser bombeada durante sua aplicação. Para mistura, a viscosidade pode afetar a trabalhabilidade e a espessura final de filme sobre o agregado.

O ensaio de viscosidade aparente mede o torque necessário para girar um *spindle* imerso numa amostra de ligante. Para a ASTM D 4402-87, o coeficiente de viscosidade é a razão entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de cisalhamento. A velocidade do ensaio foi mantida constante a 20 rpm. O ensaio foi realizado à temperatura de 25°C e com *spindle* 21 em um viscosímetro Brookfield do tipo RVDV II, como ilustrado na figura 3.1.

Este ensaio está normalizada pela norma ASTM D 4402.



Figura 3.11- Viscosímetro Brookfield

3.2.1.3 Resíduo por evaporação

O ensaio de resíduo por evaporação ou destilação determina quantitativamente o resíduo asfáltico presente na emulsão. Este ensaio foi realizado segundo a norma NBR 6568.

Neste método, duas amostras de 50 ± 1 g de emulsão são colocadas em recipientes e levadas à estufa a temperatura de $163 \pm 3^\circ\text{C}$ durante 2 horas. Ao final deste período, retiram-se as amostras do forno e mistura-se até homogeneização do resíduo. As amostras são então recolocadas no forno por mais 1 hora a fim de garantir a completa evaporação da fase aquosa. Ao final deste tempo, retiram-se as amostras da estufa e após resfriamento a temperatura ambiente, pesa-se os resíduos finais (CAP residual presente na emulsão asfáltica). Este resíduo é a porcentagem em relação à massa inicial e a massa do resíduo final.

Para cada tipo de EA existem valores mínimos de asfalto residual recomendados por norma. Para as emulsões de ruptura lenta este valor é fixado em mínimo de 60% de CAP e para as de ruptura média em mínimo 62% de CAP.

3.2.1.4 Peneiração

O ensaio de peneiramento identifica a presença de glóbulos de asfalto em grandes dimensões, que podem ocorrer caso a emulsão seja grosseira ou caso o processo de coalescência já tenha iniciado ou pela presença de outras partículas sólidas na emulsão provenientes de alguma contaminação do tanque, ou no transporte ou a outro.

A presença de quantidade excessiva de partículas retidas na peneiração indica que problemas podem ocorrer durante aplicação do material.

Durante o ensaio, 1000ml de emulsão são passados pela peneira de 0,841 mm. Logo após, é determinada a porcentagem, em peso, retida na peneira. Este ensaio é normalizado pelo DNER ME 005/94 Emulsões Asfálticas - Determinação da peneiração. A porcentagem máxima admitida de material retido na peneira é de 0,10%.

O resíduo de peneiração é obtido a partir da equação 3.2.

$$\% P = \frac{M}{1000} \times 100 \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

P = Resíduo de Peneiração (%)

M = Massa do resíduo retido (g)

3.2.1.5 Sedimentação

O ensaio de sedimentação representa a capacidade de uma emulsão asfáltica apresentar estabilidade à estocagem prolongada sem que haja separação das fases constituintes. Este ensaio é normalizado pela norma DNER ME 006/2000 Determinação da Sedimentação.

Neste ensaio, utiliza-se duas provetas graduadas contendo 500 ml de emulsão. Após um período de cinco dias à temperatura ambiente, retira-se amostras de 50 g do topo e do fundo de cada proveta. Estas amostras devem ser agitadas vigorosamente. Levam-se os resíduos, à estufa por duas horas, para que a água total contida na emulsão evapore. Ao fim deste processo, mede-se somente o peso de CAP. Com estes valores é calculado, pela diferença entre topo e base, o resíduo por sedimentação.

A percentagem máxima admitida de diferença entre a massa de resíduo retirado do topo e da base deve ser igual ou inferior a 5%. Estes valores caracterizam emulsões de boa estabilidade à estocagem em obra.

O resíduo de sedimentação (5 dias) é dado pela seguinte equação 3.3:

$$R_{Sed} = \frac{A - B}{50} \times 100 \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

R_{Sed} = Resíduo de Sedimentação (%)

A = Resíduo do Fundo (g)

B = Resíduo do Topo (g)

Na figura 3.2, detalhe do ensaio de Sedimentação.



Figura 3.2- Ensaio de Sedimentação

3.2.1.6 Desemulsibilidade

A medida da desemulsibilidade se propõe a determinar a velocidade de ruptura de uma emulsão. Este ensaio é aplicável somente em EA catiônicas e aniônicas de ruptura rápida ou média. Ele é utilizado para identificar ou classificar uma emulsão como ruptura rápida (RR) ou ruptura média (RM). Este ensaio foi realizado seguindo-se a norma NBR 6569.

A ruptura de uma determinada massa de emulsão catiônica é acelerada através da adição de 35% de Aerosol OT. O CAP residual é separado por peneiramento (material retido em peneira de 1,4mm) e seu peso é determinado. O resultado do ensaio é a relação percentual entre a

massa de CAP obtida pelo peneiramento e a massa de CAP obtida a partir da destilação de uma amostra de mesmo volume, conforme equação 3.4.

$$D = \frac{P_1}{P_2} \times 100 \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

D = Desemulsibilidade (%)

P₁ = Massa de CAP retida na peneira (g)

P₂ = Massa de CAP obtida por destilação de uma segunda amostra (g)

Os valores do ensaio de desemulsibilidade foram fornecidos pela empresa fabricante das EA. Não há especificação deste ensaio para EAs de ruptura lenta.

3.2.1.7 Cobrimento

Este ensaio é aplicável para emulsões que se pretende misturá-las com os agregados. Este teste, portanto, não é aplicável para emulsões do tipo RR, utilizadas principalmente para serviços de tratamentos.

O objetivo do teste de cobrimento é assegurar que uma emulsão é estável à mistura com uma determinada composição granulométrica por um determinado tempo fornecendo um cobrimento uniforme. Este ensaio foi realizado seguindo-se a norma ASTM D244-97c Standard Test Methods and Practices for Emulsified Asphalts: Coating Test.

O ensaio consiste em misturar vigorosamente 35±1g de emulsão com 465±1g de agregados (já na composição granulométrica a ser utilizada) com uma espátula metálica durante 3 minutos. Após ruptura da emulsão, separação da fase aquosa, observar qual a percentagem de agregado que se encontra coberta pela emulsão.

3.2.2.7 Adesividade

Este ensaio consiste em submeter uma amostra da mistura já curada à água em ebulição por três minutos, como ilustra a figura 3.3. Este ensaio é um método expedito do ensaio W.S.T. (Wet Stripping Test), normalizado pela ISSA TB-109.



Figura 3.3- Ensaio de Adesividade

A superfície do agregado, recoberta com asfalto, é expressa em porcentagem da superfície total de agregados. Valores acima de 90% são considerados satisfatórios, valores entre 75% e 90% são razoáveis e abaixo de 75%, insatisfatórios.

Este ensaio foi realizado com amostras de corpos de prova já rompidos com cura de 60 dias. A amostra era remexida a fim de permitir que a água entrasse em contato com todas as partículas de agregado envoltas por ligante.

Na figura 3.4, detalhe da amostra de uma mistura densa.

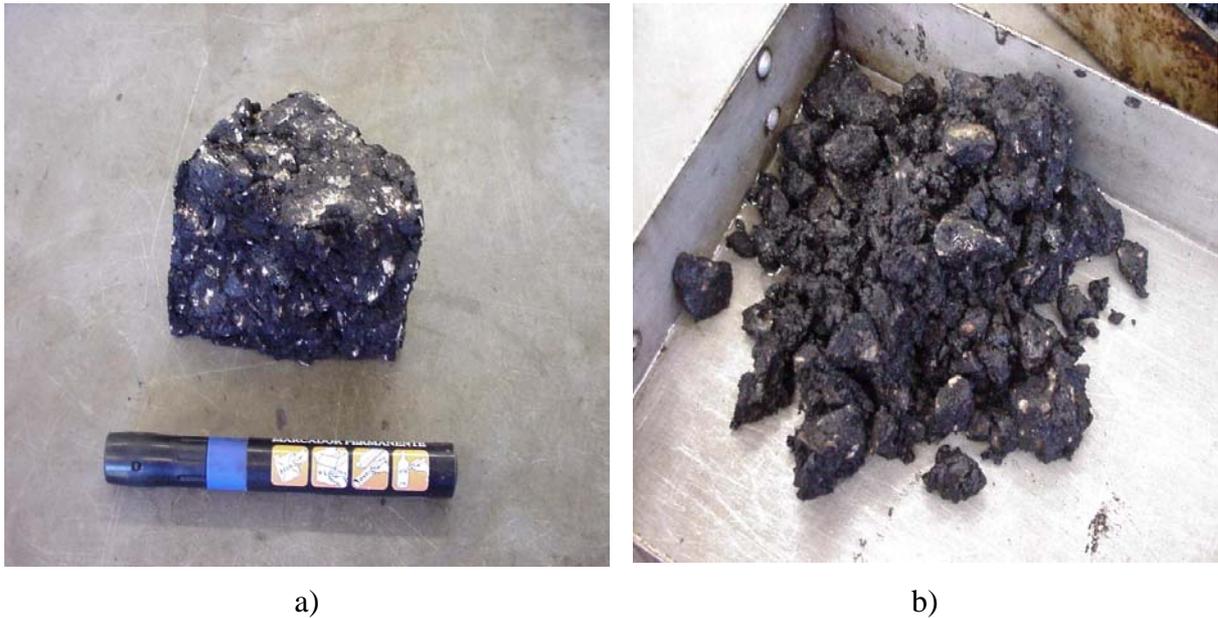


Figura 3.4- a) Amostra de corpo de prova antes do ensaio b) Após o ensaio

3.2.3 Resultados dos ensaios de Caracterização das Emulsões Asfálticas

3.2.3.1 Emulsões Asfálticas RL 1C e RM 1C

A tabela 3.3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização para as EAs RL1C e RM1C.

Tabela 3.3- Ensaio de Caracterização das EAs RL 1C e RM 1C

Ensaio	RL 1C		RM 1C	
	Norma	Valor Obtido	Norma	Valor Obtido
Densidade	-	0,993	-	0,982
Viscosidade (cP)	-	105	-	106
Resíduo por Evaporação (%)	Mín 60	76,1	Mín 62	75,3
Peneiração (%)	Max 0,1	0,0	Max 0,1	0,0
Sedimentação (%)	Max 5	0,08	Máx 5	0,06
Cobrimento (%)	-	99	-	97
Adesividade (%)	-	90	-	92

3.2.3.2 Emulsões Asfálticas RL 1C e RM 1C modificadas com SBR

A tabela 3.4 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização para as EAs Emulex RL1C e Emulex RM1C.

Tabela 3.4- Ensaio de Caracterização das EAs Emulex RL 1C e Emulex RM 1C

Ensaio	Emulex RL 1C		Emulex RM 1C	
	Norma	Valor Obtido	Norma	Valor Obtido
Densidade	-	1,0070	-	1,003
Viscosidade (cP)	-	205	-	90
Resíduo por Evaporação (%)	Mín 60	63,8	Mín 62	62,4
Peneiração (%)	Max 0,1	0,0	Max 0,1	0,0
Sedimentação (%)	Max 5	0,04	Max 5	1,3
Cobrimento (%)	-	98	-	95
Desemulsibilidade (%)	Max 5	0,04	Max 50	26,6
Adesividade (%)	-	94	-	95

3.3 AGREGADOS

Os agregados utilizados neste trabalho são derivados de basalto, material proveniente de uma pedreira próxima a Porto Alegre. Também foi utilizada uma areia grossa de rio.

Na pedreira, os agregados foram coletados diretamente da esteira. No laboratório, estes foram peneirados, lavados, secos em estufa e estocados em sacos plásticos impermeáveis.

3.3.1 Ensaio de caracterização dos Agregados

Foram utilizadas duas granulometrias para execução das misturas. Nas tabelas 3.5 e 3.6, os resultados do ensaio de granulometria para os agregados utilizados nas misturas densas e semi-densas. Os valores apresentados, nestas tabelas, são em porcentagem de material passante nas peneiras.

Tabela 3.5- Granulometria dos Agregados para Mistura Densa

GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS – Mistura Densa					
Peneira	Mm	Brita 1	Brita 0	Pó-de-pedra	Areia
1"	25	100	100	100	100
¾"	19,1	96,8	100,0	100,0	100,0
½"	12,7	33,0	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,50	2,3	94,0	100,0	100,0
n 4	4,76	0,4	15,0	98,6	100,0
n 10	2,00	0,4	1,2	66,7	99,3
n 200	0,074	0,3	1,0	17,1	0,5

Tabela 3.6- Granulometria dos Agregados para Mistura Semi-Densa

GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS – Mistura Semi-densa					
Peneira	mm	Brita 1	Brita 0	Pó-de-pedra	Areia
1"	25	100	100	100	100
¾"	19,1	85,0	100,0	100,0	100,0
½"	12,7	33,0	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,50	2,3	77,0	100,0	100,0
N 4	4,76	0,4	15,0	98,6	100,0
n 10	2,00	0,4	1,2	66,7	99,3
N 200	0,074	0,3	1,0	17,1	0,5

As demais características estudadas dos agregados encontram-se nas tabelas 3.7 e 3.8. A areia foi utilizada em ambas misturas. A massa específica dos agregados foi obtida através do método do Balão Volumétrico para os agregados miúdos (DNER ME 084/95) e do Cesto Metálico para os agregados graúdos (DNER ME 083/98).

Tabela 3.7- Características dos agregados a) utilizados nas misturas densas b) utilizados nas misturas semi-densas.

	Norma	a)	b)
Absorção (%)	DNER ME 081/98	1,748	1,506
Densidade Efetiva	-	2,881	2,899

Tabela 3.8- Características dos agregados para Britas 3/4 e 3/8

	Norma	3/4	3/8
Perda à Abrasão LA	DNER 035/98	10,6%	
Índice de Lamelaridade (%)	DAER 108/01	5	9

A densidade efetiva é a média das densidades Real e Aparente dos grãos.

A areia apresentou massa específica aparente de $15,89 \text{ kN/m}^3$.

A figura 3.5 ilustra o ensaio de peso específico dos agregados miúdos.

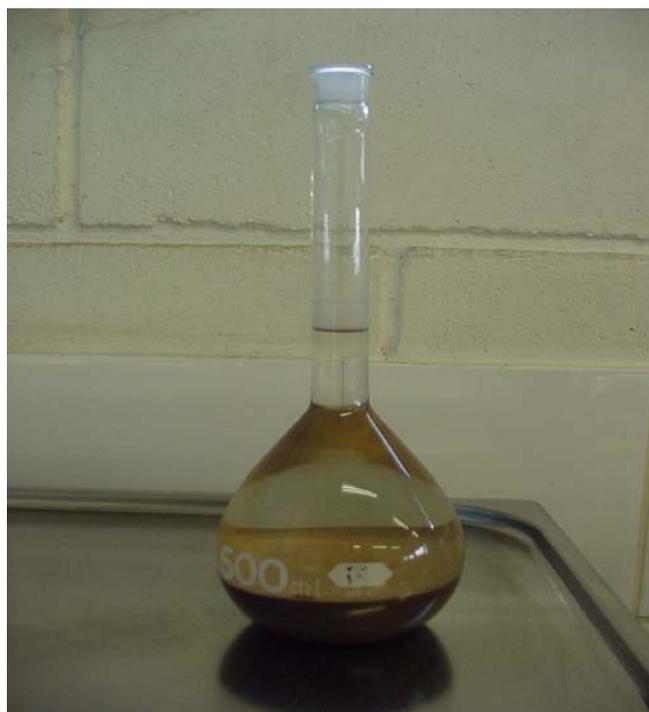


Figura 3.5- Ilustração do ensaio com balão volumétrico para obtenção do peso específico dos agregados miúdos

3.4 BORRACHA

A borracha utilizada neste trabalho foi fornecida pela empresa Midas Elastômeros. Esta borracha, proveniente de pneus descartados, é produzida através de intumescimento em produto químico orgânico de origem aromática seguido de moagem mecânica, onde são retirados os metais e as fibras presentes nos pneus. Logo após, a borracha é introduzida em um processo de regeneração catalítica a alta pressão. A borracha cisalhada é obtida com o término de um processo de secagem. O material final trata-se de uma borracha em pó regenerada; isto é; com a quebra de ligações de enxofre responsáveis pela vulcanização.

Trabalhou-se com duas granulometrias: # 30 (0,42 mm) e # 80 (0,18 mm). A tabela 3.9 e a figura 3.6 mostram a granulometria das borrachas pela porcentagem de material passante pelas peneiras.

As duas borrachas podem ser visualizadas na figura 3.7.

Tabela 3.9- Granulometria das borrachas

Peneira	mm	Borracha # 30	Borracha # 80
1"	25	100	100
3/4"	19,10	100	100
1/2"	12,70	100	100
3/8"	9,50	100	100
N 4	4,76	100	100
N 10	2,00	100	100
N 40	0,42	13,14	89,2
N 80	0,18	2,58	4,57
n 200	0,07	0	0

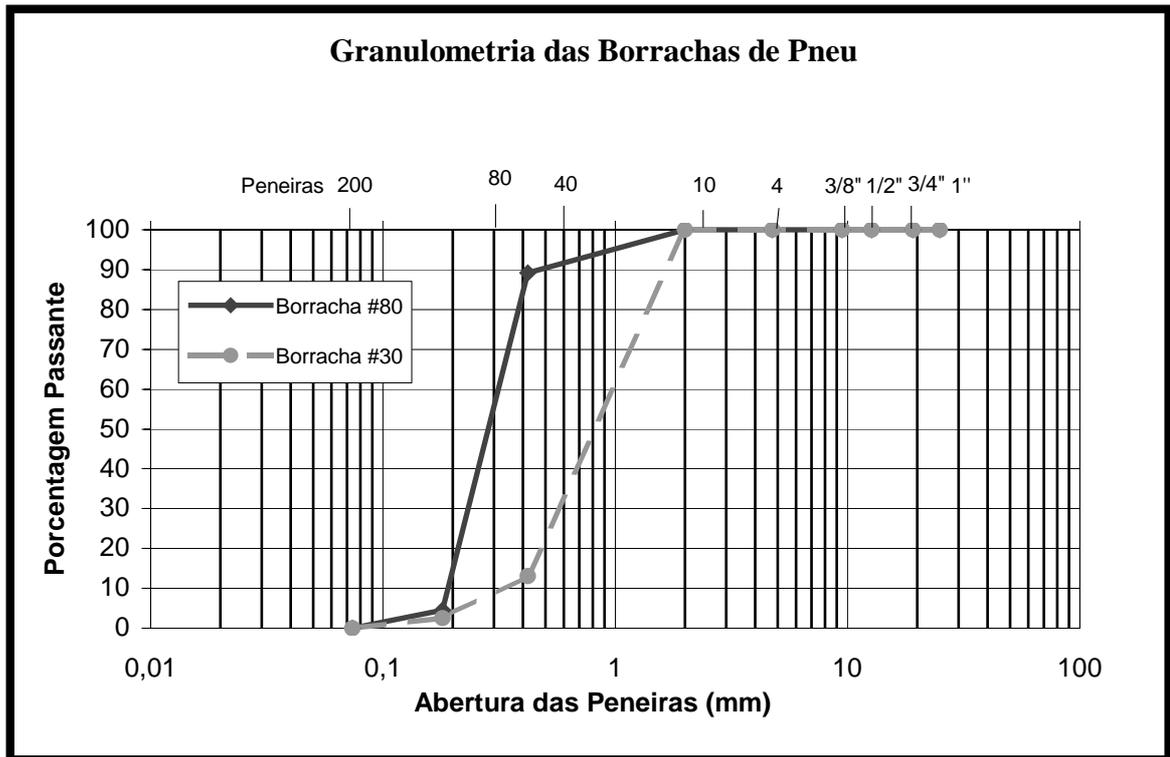


Figura 3.6- Granulometrias das borrachas

As borrachas #30 e #80 apresentaram massa específica aparente, respectivamente, de $4,53 \text{ kN/m}^3$ e $4,30 \text{ kN/m}^3$.



Figura 3.7- Fotografia das borrachas #80 e #30 respectivamente.

3.5 MISTURAS ASFÁLTICAS

Segundo Tuchumantel Jr, 1990, o tamanho das partículas de agregados utilizados é um fator significativo na escolha da EA. Da mesma forma, a composição granulométrica é importante, pois esta deve permitir a evaporação da água.

As faixas granulométricas para as misturas asfálticas foram escolhidas a partir da norma DNER ES 317/97- Pavimentação- Pré-misturados a frio. As faixas de trabalho que melhor se ajustaram a granulometria encontrada foram a faixa A para a mistura semi-densa e a faixa C para mistura densa, conforme mostram as figuras 3.8 e 3.9. As tabelas 3.10 a 3.13 mostram as especificações das misturas através da porcentagem de material passante nas peneiras.

Tabela 3.10- Composição da Mistura Densa

COMPOSIÇÃO DA MISTURA					
PENEIRA	mm	BRITA 1	BRITA 0	PÓ-DE-PEDRA	AREIA
1"	25	44	31	20,0	5,0
3/4"	19,1	42,6	31,0	20,0	5,0
1/2"	12,7	14,5	31,0	20,0	5,0
3/8"	9,50	1,0	29,1	20,0	5,0
N 4	4,76	0,2	4,7	19,7	5,0
N 10	2,00	0,2	0,4	13,3	5,0
N 200	0,07	0,1	0,3	3,4	0,0
TOTAL	Frações	BRITA 1	BRITA 0	PÓ-DE-PEDRA	AREIA
100	%	44%	31%	20%	5%

Tabela 3.11- Faixa C DNER e Mistura Densa

ESPECIFICAÇÃO E MISTURA PMFD					
Peneira	mm	Centro faixa	Faixa de Trabalho		MISTURA
1"	25	100	100	100	100,0
3/4"	19,1	98	100,0	95,0	98,6
1/2"	12,7	71,0	79,8	62,3	70,5
3/8"	9,50	55,0	70,0	40,0	55,2
N 4	4,76	30,0	40,0	20,0	29,6
N 10	2,00	17,5	25,0	10,0	18,9
n 200	0,07	4,0	8,0	0,0	3,9

Tabela 3.12- Composição da Mistura Semi-densa

COMPOSIÇÃO DA MISTURA					
PENEIRA	Mm	BRITA 1	BRITA 0	PÓ-DE-PEDRA	AREIA
1"	25	49	35	11,0	5,0
3/4"	19,1	41,7	35,0	11,0	5,0
1/2"	12,7	16,2	35,0	11,0	5,0
3/8"	9,50	1,1	27,0	11,0	5,0
N 4	4,76	0,2	5,3	10,8	5,0
N 10	2,00	0,2	0,4	7,3	5,0
N 200	0,07	0,1	0,3	1,9	0,0
TOTAL	Frações	BRITA 1	BRITA 0	PÓ-DE-PEDRA	AREIA
100%	%	49%	35%	11%	5%

Tabela 3.13- Faixa A DNER e Mistura Semi-densa

ESPECIFICAÇÃO E MISTURA PMFsD					
PENEIRA	mm	Centro faixa	Faixa de Trabalho		MISTURA
1"	25	100	100	100	100,0
¾"	19,1	88	100,0	75,0	92,7
½"	12,7	62,4	76,2	48,7	67,2
3/8"	9,50	45,0	60,0	30,0	44,1
N 4	4,76	22,5	35,0	10,0	21,3
N 10	2,00	12,5	20,0	5,0	12,9
N 200	0,07	2,5	5,0	0,0	2,4

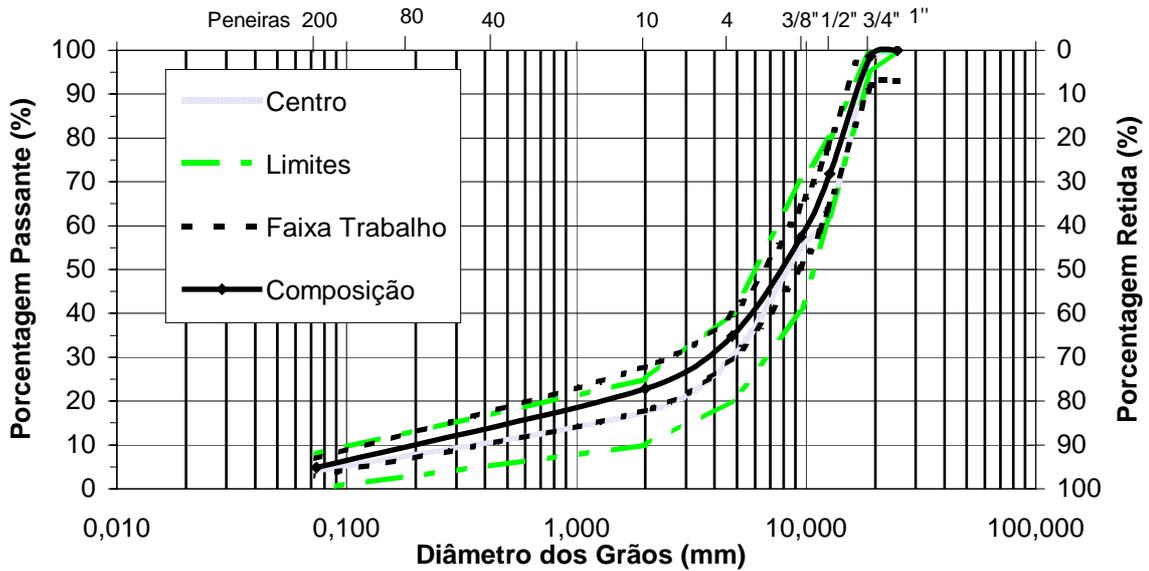


Figura 3.8- Composição Granulométrica das misturas Densas- Faixa C DNER-Es 313/97

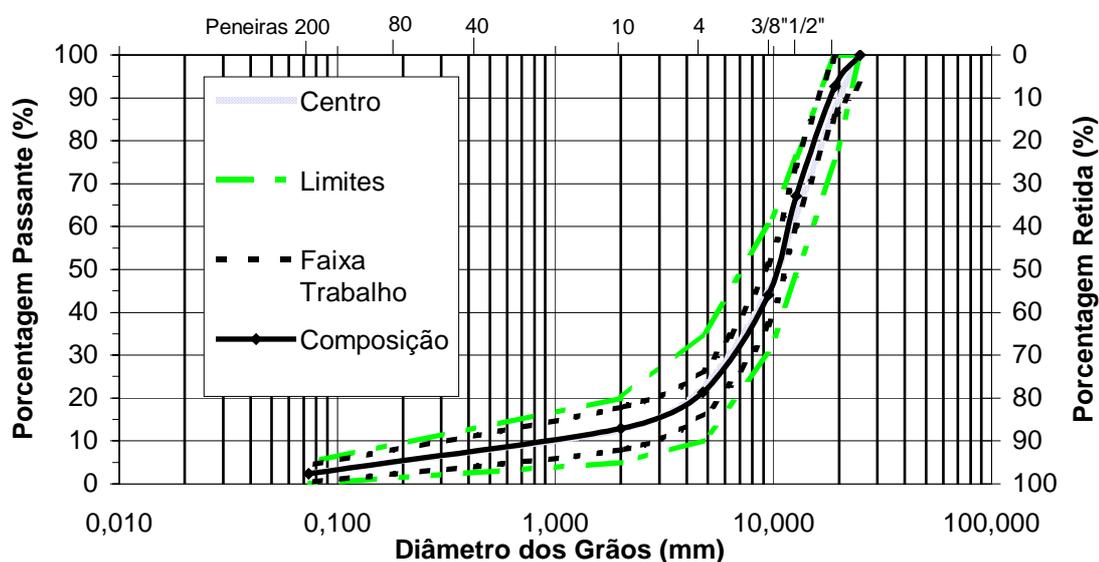


Figura 3.9- Composição Granulométrica das misturas Semi-densas
Faixa A DNER-ES 313/97

3.4.1 Teor Ótimo de Umidade das Misturas Asfálticas

A fim de se obter boas características de um Pré-misturado a frio, é necessário encontrar-se uma adequada composição de agregado, água e ligante. Segundo Tuchumantel (1990), cada mistura tem sua relação característica entre teor de umidade e grau de envolvimento do agregado. Portanto é de extrema importância a escolha do teor de água de molhagem e do teor de umidade para a compactação de cada mistura. Segundo este mesmo autor, a umidade de compactação influi na densidade, teor de vazios e estabilidade.

Alguns valores de água de molhagem são sugeridos na bibliografia.

Tuchumantel (1990): 2,5% PMFD e 2% PMFsD

Mamlouk et al (1980): 0 a 4,5%

Waller Jr (1980): Mínimo 1%. Acrescentar teores de água variando em 1% até que toda amostra esteja umedecida.

Método de Illinois: Iniciar com 3%

Para Quimi-Kao S.A.,(1993): EA RM iniciar com 0% e EA RL iniciar com 3% (Para ES RM: 50% da amostra umedecida já é aceitável).

Santana (1993): Determinação experimental.

A partir destes intervalos, escolheu-se trabalhar com os seguintes valores de água de molhagem:

2,5% do peso dos agregados secos para misturas Densas;

1,5% do peso dos agregados secos para misturas Semi-densas.

Com um teor intermediário de emulsão asfáltica, 9,5% para as misturas densas e 7,5% para as misturas semi-densas, produziu-se corpos de prova com diferentes teores de umidade na compactação. A estabilidade Marshall, o volume de vazios e a massa específica serviram como parâmetros para escolha do teor ótimo de umidade.

As misturas densas produzidas a partir de EA RL-1C possuem como umidade total a soma da água de molhagem, valor estipulado acima, e de 40% do teor de emulsão utilizado. Enquanto que as misturas semi-densas, produzidas a partir de EA RM-1C têm como umidade total a soma da água de molhagem e de 38% (água e solvente) do teor de emulsão utilizado.

Para ambas as misturas, realizou-se a compactação em quatro teores de umidade: 30%, 40%, 50% e 60% da umidade total (ht). Estes teores correspondem a 1,89%, 2,5%, 3,15% e 3,8% em relação ao peso de agregados secos para as misturas densas e 1,3%, 1,74%, 2,2%, 2,6% em relação ao peso de agregados secos para as misturas semi-densas.

Os gráficos abaixo ilustram os resultados encontrados para Estabilidade, Densidade e Volume de Vazios para as misturas densas e semi-densas respectivamente.

3.4.1.1 Umidade de Compactação para as Misturas Densas

As figuras 3.10 à 3.12 mostram os resultados de estabilidade, volume de vazios e massa específica aparente para as misturas densas nas umidades ensaiadas.

Verificou-se que o mais elevado valor de estabilidade ocorre com o teor de umidade 2,5%, o que corresponde a 40% da umidade total (0,4 ht). Este mesmo teor apresenta a maior densidade e o menor volume de vazios. Portanto, os corpos de prova serão moldados seguindo-se esta indicação de teor de umidade ótimo.

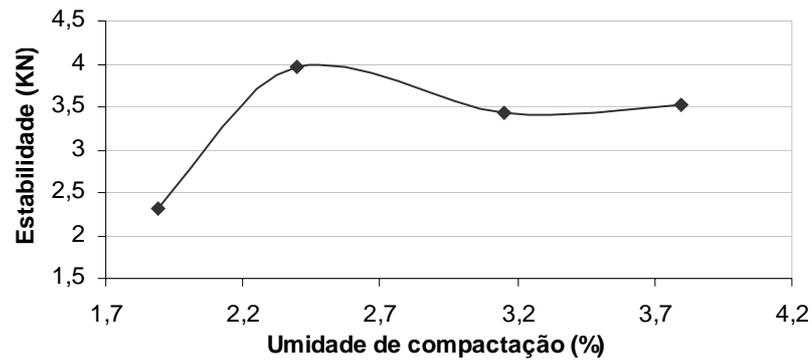


Figura 3.10- Teor de umidade versus estabilidade para PMFD

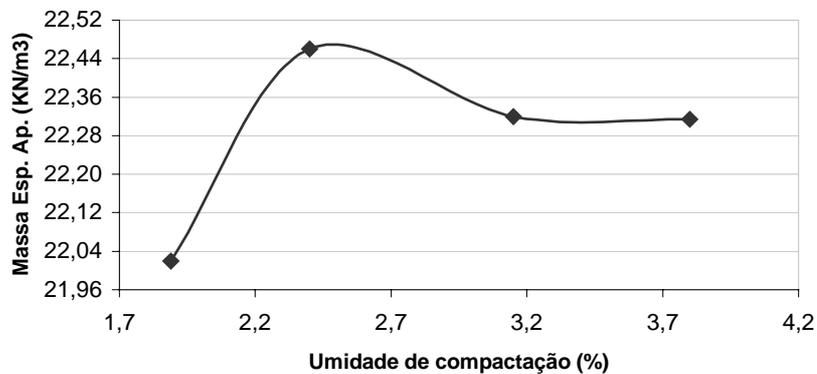


Figura 3.11- Teor de umidade versus densidade para PMFD

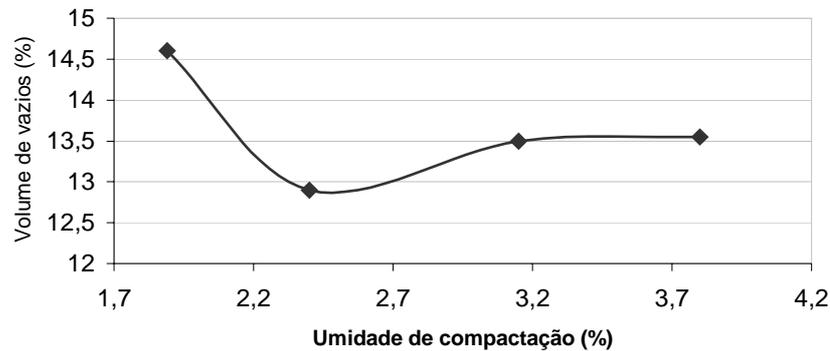


Figura 3.12- Teor de umidade versus volume de vazios para PMFD

3.4.1.2 Umidade de Compactação para as Misturas Semi-densas

As figuras 3.13 à 3.15 apresentam os resultados de estabilidade, volume de vazios e massa específica aparente para as misturas semi-densas.

O teor de umidade correspondente a 50% da umidade total (0,5 ht) ou 2,2%, apresentou os melhores resultados quanto aos três parâmetros analisados: maior estabilidade, maior massa específica aparente e menor volume de vazios. Portanto, para as misturas semi-densas este será o teor de umidade ótima para compactação dos corpos de prova.

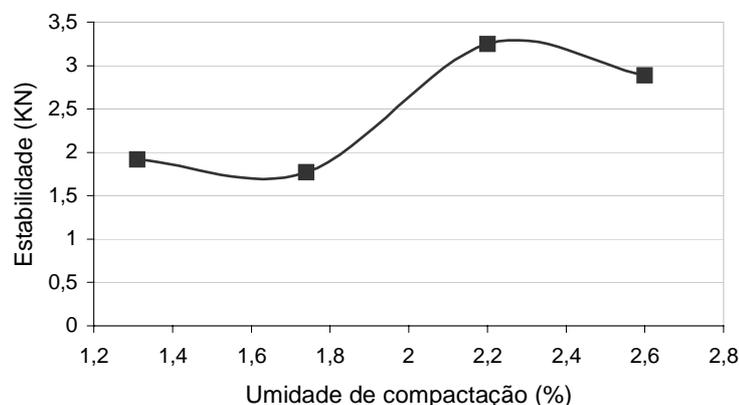


Figura 3.13- Teor de umidade versus Estabilidade para PMFsD

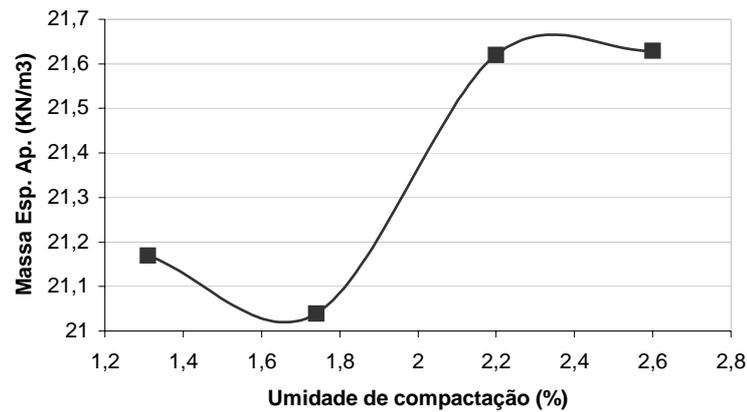


Figura 3.14- Teor de umidade versus densidade para PMFsD

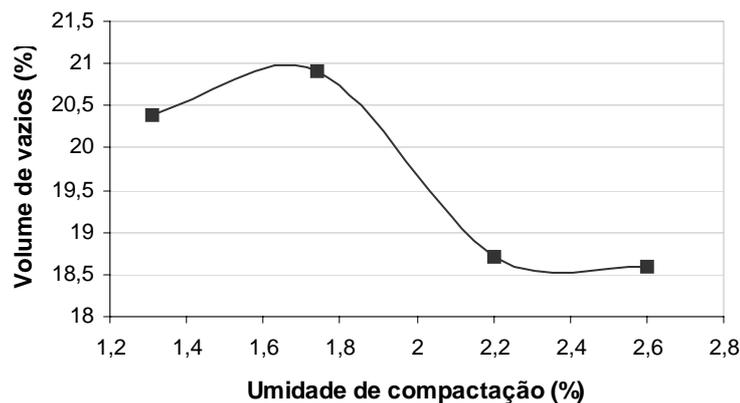


Figura 3.15- Teor de umidade versus volume de vazios para PMFsD

3.4.2 Interação Ligante-Borracha Regenerada

A fim de verificar a compatibilidade entre a borracha e o ligante executou-se misturas testes em laboratório adaptando o ensaio realizado por Airey et. al em 2003.

Estes autores realizaram um experimento com borracha avaliando o valor do inchamento desta, chamando de ensaio de absorção de asfalto. Sabe-se que o valor do inchamento da borracha (adsorção de asfalto) pode ser calculado medindo a massa de borracha antes e depois da interação com o ligante. Medidas da variação de massa são de fácil obtenção e são consideradas mais acuradas que medidas de volume.

Esta adaptação consiste em um ensaio muito simples onde foram utilizados somente a granulometria de borracha 0,18 mm (#80) e o ligante EA RL 1C. O objetivo foi de verificar se havia compatibilidade entre o asfalto e a borracha.

Utilizou-se uma peneira com abertura de 0,15 mm, capaz de reter a borracha, mas não o ligante. A quantidade de borracha foi 20 gramas e a proporção de ligante (EA) para borracha foi fixado em 1:8. Esta verificação foi realizada em duas etapas denominadas: a frio (temperatura ambiente) e a quente (temperatura próxima a 90°C).

No processo a frio, passou-se pela peneira a emulsão pura. Imediatamente, toda o volume de emulsão escoou. Após, passou-se pela peneira a mistura borracha e emulsão, previamente realizada com misturador mecânico. A mistura manteve-se na peneira por mais de 20 minutos (tempo máximo estabelecido para verificação visual) sem haver drenagem do ligante. O propósito desta verificação foi de determinar se a massa de ligante era capaz de cobrir as partículas de borracha. O fato da mistura com borracha não escorrer é um indicativo de compatibilidade entre estes materiais. A simples mistura com o ligante, durante o período de tempo observado, não causou a ruptura da emulsão.

No processo denominado a quente, colocou-se a mistura emulsão com borracha na peneira sobre uma bandeja metálica em um forno a 90°C. A temperatura foi utilizada para provocar a ruptura da emulsão com a evaporação da fase aquosa. As partículas de borracha dentro da peneira estavam submersas no asfalto. Passada uma hora e meia a água presente na emulsão havia escoado juntamente com o asfalto residual. Observou-se que as partículas de borracha ficaram retidas na peneira. A temperatura ambiente realizou-se a pesagem desta borracha. O recipiente metálico e a peneira já haviam sido previamente tarados. Verificou-se que o peso da borracha aumentou em 160 %.

Esta magnitude de valor é similar àqueles observados por Airey et al, 2003. Estes autores encontraram valores na ordem de 140% de aumento da massa da borracha a 160°C, avaliando que a borracha é fisicamente capaz de absorver uma proporção de sua própria massa. Estes resultados mantêm a teoria de que há uma interação entre o solvente (asfalto) e o polímero (borracha) até que o equilíbrio seja alcançado, como ocorre nas misturas com o polímero virgem SBS.

3.4.2 Ensaios das Misturas Asfálticas

3.4.2.1 Metodologia Marshall

O método de dosagem Marshall, além de amplamente utilizado no mundo, é o mais usado no Brasil. É um método que dimensiona uma mistura asfáltica através da análise de estabilidade/fluência e densidade/vazios.

Basicamente, se estabelece uma composição granulométrica de agregado que se enquadre numa faixa especificada. Logo após, determina-se a quantidade de asfalto residual que, misturada ao agregado, proporcione uma mistura que satisfaça as condições desejadas.

Trata-se de um método cuja análise assegura a obtenção de uma proporção volumétrica adequada dos constituintes da mistura, levando a um pavimento durável.

Esta metodologia foi concebida para misturas a quente densas, determinando-se a força que, a 60°C, rompe um corpo de prova. A força que causa a ruptura é denominada Estabilidade e a deformação sofrida no momento da ruptura é denominada Fluência.

No entanto, o parâmetro de resistência utilizado, estabilidade Marshall, não reflete corretamente a resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica (ASPHALT INSTITUTE, 1995).

Nesta pesquisa, para cada mistura, foram moldados 3 corpos de prova, seguindo a norma DNER ME 107/94 - Mistura Betuminosa a frio com emulsão asfáltica- ensaio Marshall com exceção do tempo de cura para compactação e pós compactação.

Para cada mistura utilizou-se agregados secos, com massa em torno de 1200g como ilustra a figura 3.16.



Figura 3.16- Mistura de agregados secos

As misturas foram realizadas para confecção de dois corpos de prova juntos. Acrescentava-se a água de molhagem diretamente na composição de agregados secos. Após mistura, acrescenta-se o ligante ao agregado úmido e logo após, executou-se a mistura manual a temperatura ambiente durante um minuto.

Para as misturas com borracha, o ligante era previamente misturado à borracha, com misturador mecânico durante cinco minutos, e logo depois acrescido à mistura de agregados úmidos. Visualmente, observa-se o aumento de volume do ligante com a incorporação da borracha na mistura mecânica.

Todas as misturas (de referência, com borracha e com polímero) foram realizadas à temperatura ambiente.

Os demais passos para a moldagem foram realizados da mesma forma para as misturas com e sem borracha.

Devido à alta umidade do ar e as baixas temperaturas no inverno gaúcho, os corpos de prova quando curados à temperatura ambiente demoravam muito tempo para atingir a umidade ótima. A figura 3.17 exemplifica duas amostras de misturas com emulsão de ruptura lenta, cuja norma DNER indica apenas uma hora de cura a temperatura ambiente. Ao passar uma hora a temperatura ambiente, as amostras haviam perdido muito pouca umidade.

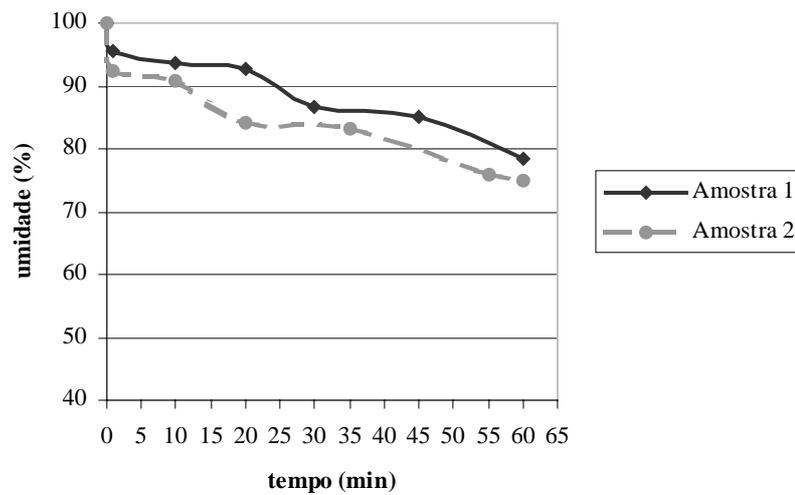


Figura 3.17- Perda de umidade com o tempo

Portanto, as misturas foram curadas em estufa até que atingissem a umidade para compactação. A perda de umidade foi controlada por pesagens ao longo do tempo. A umidade de compactação para as misturas semi-densas e para as misturas densas foi estabelecida após ensaio de três amostras para cada teor de umidade testados. A temperatura de cura foi estabelecida em 40°C. Segundo Serfass e outros (2003), temperaturas de cura abaixo de 50°C são adequadas para misturas a frio. O uso de temperaturas acima deste valor podem acarretar no surgimento de fissuras nos corpos de prova devido à rápida evaporação da água.

A figura 3.18 ilustra a ruptura da emulsão após mistura com o agregado.



Figura 3.18- Ruptura da Emulsão Asfáltica

Foram utilizados 75 golpes por face para compactação dos corpos-de-prova a temperatura ambiente. Na figura 3.19, o equipamento de compactação.



Figura 3.19- Compactação dos corpos-de-prova

Após moldagem, as dimensões dos corpos de prova encontravam-se com de 10,16 cm de diâmetro e 6,35 cm de altura.

A cura pós compactação seguiu os procedimentos segundo a Quimi-Kao S.A., 1993, 48 horas de cura, sendo as primeiras 24 horas no molde à temperatura de 50°C e o restante fora do molde a 40°C. Embora Mamlouk et. al, 1980, recomendem que toda a cura seja fora do molde, este procedimento não foi possível, devido à baixa coesão, alguns corpos de prova muito úmidos não resistiam a temperatura, desmanchando-se dentro da estufa. Muito cuidado deve ser tomado principalmente com as amostras com altos teores de umidade ou baixo teor de ligante.

A figura 3.20 mostra os corpos de prova nos moldes durante cura na estufa.



Figura 3.20- Corpos-de-prova durante cura na estufa

Ao final do processo de cura, determinava-se a altura e a densidade dos corpos de prova. Para a densidade, utiliza-se fita e parafina, procedimento recomendado pela norma DNER ME 107/94 para amostras com volume de vazios superior a 10%. As figuras 3.21 e 3.22 mostram os corpos-de-prova com fita e parafina.

Utilizou-se como referência os seguintes valores de densidade para os materiais:

Fita:0,97

Parafina:0,89



Figura 3.21- Corpos-de-prova com fita



Figura 3.22- Corpo-de-prova com fita e parafina

A ruptura dos corpos-de-prova era efetuada após duas horas na estufa a 40°C. Tal procedimento é realizado em uma prensa, com um molde à compressão, aplicando-se uma carga diametral nos corpos de prova. O valor da estabilidade deve ser corrigido para a altura obtida do corpo de prova multiplicando-se por um fator de correção, apresentado na equação 3.5.

$$f = 927 \cdot h^{-1,64}$$

Equação 3.5

Onde:

f = Fator de Correção

h = altura medida do corpo de prova

Assim, obtém-se a Estabilidade Marshall. A figura 3.23 mostra o equipamento de Estabilidade e Fluência.



Figura 3.23- Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall

A partir da Metodologia Marshall obtém-se além da estabilidade e fluência, o volume de vazios, a massa específica aparente, a relação betume-vazios e os vazios de agregado mineral dos corpos de prova ensaiados.

O teor ótimo de ligante a ser adotado, ao fim da metodologia Marshall, será a média aritmética dos teores que atenderem aos seguintes aspectos:

Máxima estabilidade;

Máxima massa específica aparente;

Menor fluência;

A média dos limites de Vv; e,

A média dos limites de RBV.

Os valores mínimos de Estabilidade e Fluência, para 75 golpes de compactação, estipulados pela norma DNER ME 107/94, são respectivamente 2,50 kN e 2 a 4,5 mm (8 a 18 –1/100 in-).

Santana, 1993, indica, na tabela 3.14, os intervalos recomendáveis para as propriedades de pré-misturados a frio na metodologia Marshall.

Tabela 3.14- Valores indicados para Pré-Misturados a Frio (Santana, 1993)

	Mistura Densa	Mistura Semi-densa
Volume de Vazios (%)	8 a 15	15 a 22
VAM	Min 14	Min 14
RBV	40 a 70	40 a 70

Onde:

VAM- Vazios de agregado mineral

RBV- Relação Betume-Vazios

Este valor de VAM é indicado para tamanho máximo dos granulares de 19 mm.

3.4.2.2 Resistência à Tração

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral é conhecido como o “ensaio brasileiro”, desenvolvido pelo professor Luiz Lobo Carneiro para a determinação da compressão diametral de corpos de prova em concreto de cimento Portland. Atribuiu-se a Schmidt, na Califórnia, a adaptação deste ensaio para misturas asfálticas (MEDINA, 1997).

Seguiu-se a norma DNER ME 138/94 para realização do ensaio. O equipamento de ensaio utilizado está esquematizado na figura 3.24.

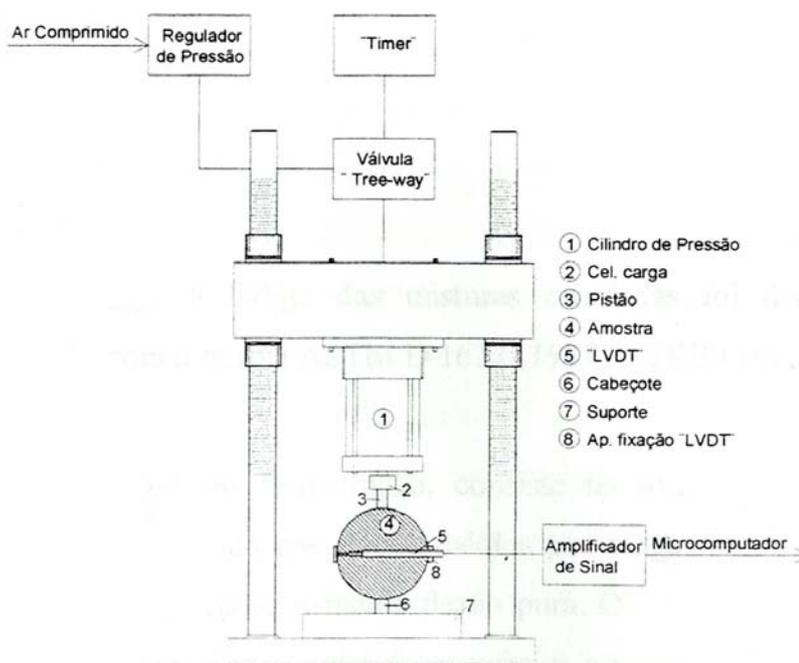


Figura 3.24- Representação do equipamento para ensaio de Módulo de Resiliência (Fonte: Specht, 2000)

A carga aplicada causa compressão na direção vertical e tração na horizontal. A taxa de aplicação da carga é de 0,8 mm/s. Este ensaio de compressão diametral também é utilizado para o ensaio de Módulo de Resiliência e para o estudo de fadiga de misturas asfálticas.

Este ensaio foi realizado a temperatura de 25°C com corpos de prova de 116 mm de diâmetro e 63,5 cm de altura.

O cálculo da resistência à tração é realizado a partir da equação 3.6:

$$R_T = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times h} \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde:

R_T = Resistência à Tração na Compressão Diametral (MPa)

F = Carga aplicada (N)

D = Diâmetro do corpo de prova (mm)

h = altura do corpo de prova (mm)

A figura 3.25 mostra detalhes do posicionamento dos corpos-de-prova no ensaio de resistência à tração.



a)



b)

Figura 3.25- a) Ensaio de Resistência à Tração b) Detalhes do posicionamento do corpo de prova

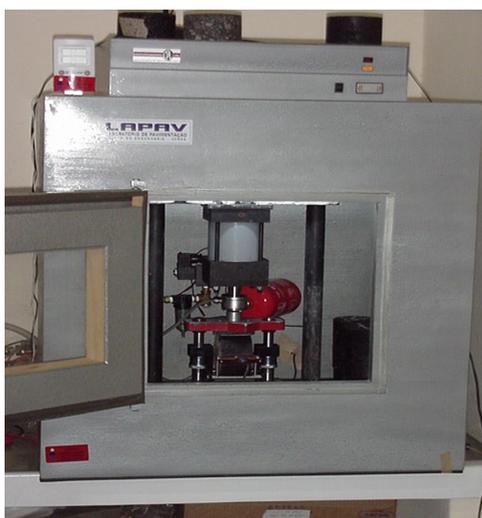
3.4.2.3 Módulo de Resiliência

A deformabilidade dos materiais asfálticos é estudada a partir do módulo de resiliência. O termo resiliência refere-se às deformações elásticas. Segundo os autores Medina (1997); Pinto e Preussler (2002), o termo resiliência significa a energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando as tensões causadoras das deformações cessam. Este termo é preferível ao termo deformação elástica uma vez que as deformações nos pavimentos são muito maiores do que aquelas obtidas em sólidos elásticos com concreto, aço, etc.

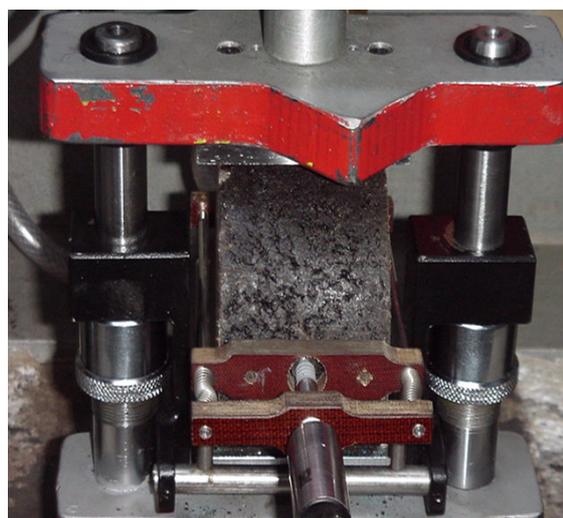
Os módulos de resiliência foram obtidos a partir do ensaio de compressão diametral de cargas repetidas de acordo com a norma DNER ME 133/94. Neste ensaio, ilustrado na figura 3.26, a carga é distribuída num friso curvo e o deslocamento horizontal é medido por transdutores do tipo LVDT. A aplicação da carga ocorre em 0,1segundo e 0,9 segundo de repouso.

O ensaio é realizado em duas direções, distintas de 90°.

A câmara que contém o equipamento garante um isolamento térmico. A temperatura de ensaio foi fixada em 25^o C.



a)



b)

Figura 3.26- a) Câmara para ensaio de Módulo de Resiliência b)
Detalhe do pórtico para o corpo de prova

O módulo de resiliência foi calculado a partir da equação 3.7.

$$M_r = \frac{P}{\Delta \cdot h} \times (0,9976 \times \mu + 0,2692) \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde:

M_r = Módulo de Resiliência (MPa)

P = é a carga aplicada (N)

Δ = deformação elástica ou resiliente, medida no ciclo particular de repetição de carga (cm)

h = altura do corpo de prova (mm)

μ = coeficiente de Poisson (0,30 para 25°C)

Observa-se que as misturas com emulsão asfáltica, com pouco tempo de cura, apresentam maior deformação permanente que as misturas convencionais a quente.

Os módulos de resiliência foram obtidos com duas idades de cura: corpos-de-prova recém moldados e com dois meses de cura.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas realizadas com emulsões asfálticas convencionais (EA RL-1C e EA RM-1C) são consideradas como misturas de referência para as misturas com borracha.

A escolha do teor de ligante para os projetos estudados deu-se a partir dos parâmetros Marshall, principalmente atendendo aos seguintes critérios: maior estabilidade, máxima massa específica e intervalo de volume de vazios (8% a 15% para as misturas densas e 15% a 22% para as misturas semi-densas).

Existem sérias restrições quanto à estabilidade e à fluência aparecerem como critério de resistência e deformação para escolha do teor ótimo de ligante. Entretanto, a metodologia Marshall ainda é a mais utilizada no Brasil.

O volume de vazios aparece como um item muito relevante para as misturas asfálticas. Estes vazios presentes nos pavimentos permitem que o ligante sofra deformações, permitem um acomodamento das partículas de agregado devido ao tráfego e especialmente para as misturas com emulsão asfáltica, permitem a evaporação da água presente no ligante.

Nas misturas a frio, com emulsão asfáltica, o alto teor de vazios sofre uma grande redução devido à compactação gerada pelo tráfego.

Os resultados estão apresentados em dois tempos de cura: 5 dias e 60 dias para os dois tipos de mistura: densa e semi-densa. Foram escolhidas diferentes idades de cura a fim de obter a representação dos estados fresco e curado dos corpos-de-prova.

Para os parâmetros da metodologia Marshall, a 60 dias de cura, apresenta-se somente a massa específica e o volume de vazios. Os parâmetros RBV e VAM são pouco modificados pelo processo de cura, embora haja uma pequena mudança na densidade e no volume de vazios das misturas.

4.1.1 Pré-Misturados a Frio Densos

4.1.1.1 Propriedades da Metodologia Marshall

A tabela 4.1 expõe os teores de ligante asfáltico escolhidos para as misturas densas.

Tabela 4.1- Misturas Densas: Teor de Ligante

		TEOR EA (%)	TEOR CAP (%)
RL 1C		9,00	5,40
EMULEX RL 1C		9,50	5,70
Borracha # 80	1%	9,50	5,70
	2%	9,75	5,85
Borracha #30	1%	9,75	5,85
	2%	10,00	6,00

A tabela 4.1 é melhor visualizada através de um gráfico de colunas apresentado na figura 4.1.

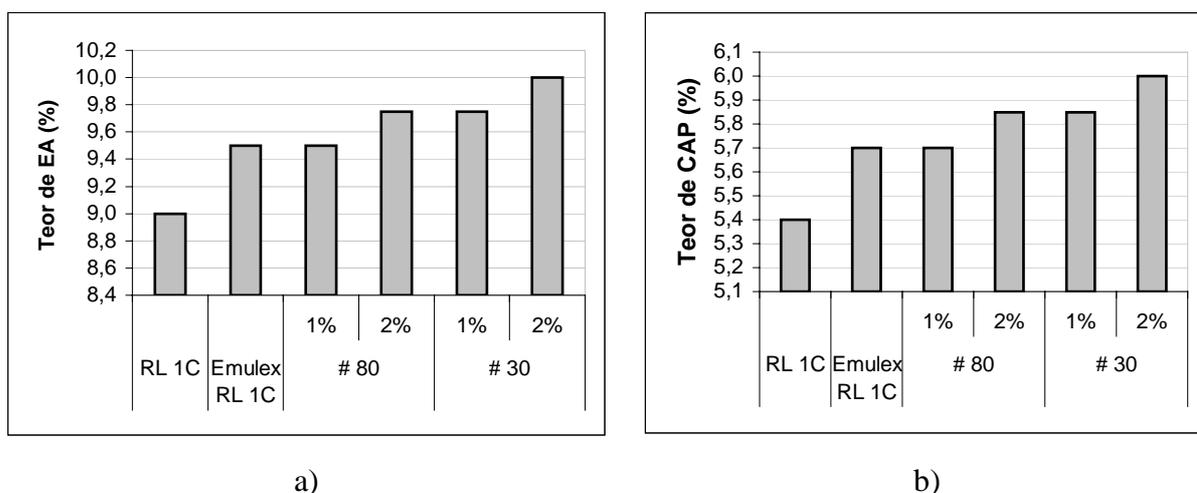


Figura 4.1- Misturas Densas: Teor de Ligante Asfáltico a) EA b) CAP

A figura 4.1 demonstra o aumento no consumo de ligante com o aumento do teor de borracha e com a mudança do ligante para aquele modificado com polímero SBR. Muito embora a borracha de menor granulometria, #80, apresente maior área específica, as misturas com borracha de tamanho maior, #30, consumiram mais ligante asfáltico.

A princípio, teores mais altos de ligante são benéficos, pois contribuem para o aumento da película ao redor dos agregados e contribui para a diminuição da desagregação entre os agregados. Entretanto, além do aumento do custo, teores muito altos podem levar a problemas como exsudação e afundamentos de trilha de rodas.

Sabe-se que para as misturas a quente produzidas pelo processo seco de incorporação de borracha, o aumento do teor de ligante é normalmente observado devido à absorção de frações do ligante pela borracha. Da mesma forma, para estas misturas densas, acredita-se que alguma reação entre a borracha e emulsão possa ter ocorrido. Principalmente para as misturas com a borracha mais fina, que apresenta maior reatividade devido ao tamanho das partículas e ao processo de regeneração sofrido pelos pneus.

Para misturas a frio o grande obstáculo para a incorporação de borracha é sempre a reatividade da borracha e sua compatibilidade com o asfalto.

A tabela 4.2, apresenta os resultados da metodologia Marshall para as misturas densas a cinco dias de cura de acordo com os teores de ligante apresentados na tabela 4.1. E a tabela 4.3

apresenta as propriedades volume de vazios e massa específica aparente com cura de sessenta dias.

Tabela 4.2- Misturas Densas: Parâmetros Marshall a 5 dias de cura

5 DIAS DE CURA							
		Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	M.Esp.(kN/m ³)	Est.(kN)	Flu.(mm)
RL 1C		10,0	22,8	56	23,40	5,70	2,62
Emulex RL 1C		14,4	27,0	47	22,20	3,25	3,20
Borracha #80	1%	13,3	26,2	49	23,30	5,10	1,90
	2%	14,0	27,0	48	22,23	5,00	2,40
Borracha #30	1%	15,0	27,9	47	21,95	3,30	2,60
	2%	16,3	29,6	45	21,50	3,36	3,30

(Onde: Vv= Volume de Vazios; VAM = Vazios de Agregado Mineral; RBV = Relação Betume -Vazios; M. Esp. = Massa Espacífica; Est.= Estabilidade; e, Flu.=Fluência)

Tabela 4.3- Misturas Densas: Parâmetros Marshall a 60 dias de Cura

60 DIAS DE CURA			
		Vv (%)	M.Esp.(KN/m ³)
RL 1C		13,0	22,70
Emulex RL 1C		16,0	21,70
Borracha #80	1%	13,3	22,50
	2%	14,0	22,30
Borracha #30	1%	14,3	22,20
	2%	15,7	21,90

A figura 4.2 mostra a relação entre as diferentes misturas densas e os valores de estabilidade e fluência. As misturas com borracha e com ligante modificado apresentam menor estabilidade que a mistura convencional sem borracha (RL 1C).

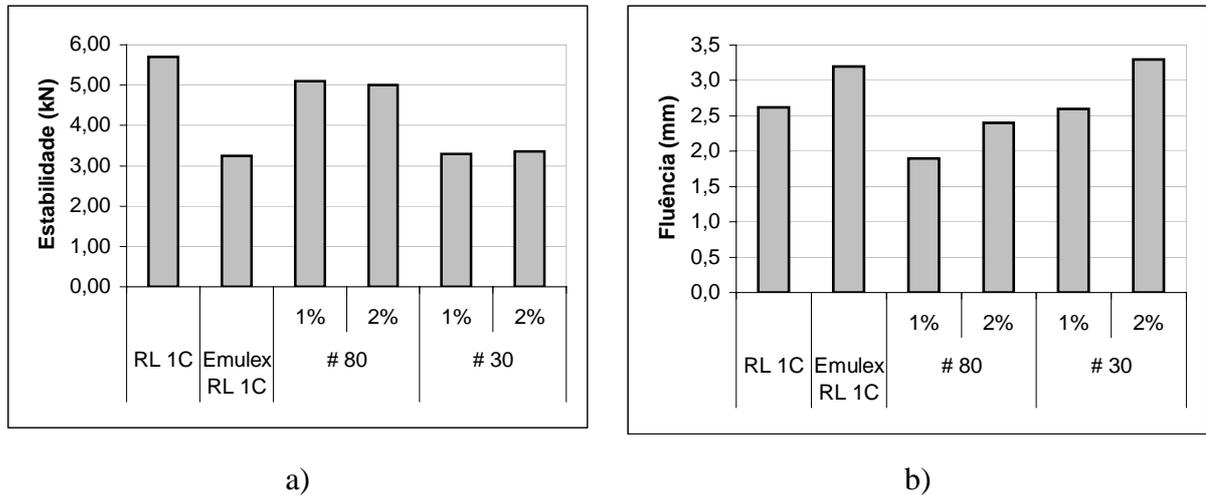


Figura 4.2- Misturas Densas: a) Estabilidade e b) Fluência

As misturas com borracha #80 apresentam valores de estabilidade muito próximos aqueles encontrados para a mistura convencional, indicando pequena queda de resistência nas primeiras idades. Muito embora, a estabilidade não seja um parâmetro confiável de resistência e sim apenas um parâmetro para o processo de escolha de teor. Quanto às misturas executadas com a borracha de partículas maiores (#30), há uma maior queda na estabilidade, igualando-se à mistura com ligante modificado.

Houssein et al (1995) e Thanaya (2002) também observaram queda na estabilidade com o acréscimo de borracha e fíler para misturas a frio.

Todas as misturas estudadas apresentaram valores superiores de estabilidade que aquele definido por norma DNER ME 107/94 (2,50 kN para 75 golpes de compactação).

Quanto à fluência, as misturas com maiores deformações na ruptura foram a mistura modificada com polímero e a com acréscimo de 2% de borracha #30. Todas as misturas mantiveram-se dentro do intervalo de fluência recomendado pela norma: 2,0 a 4,5 mm.

O aumento na fluência pode indicar maior flexibilidade em campo em termos da capacidade de deformação, mas também um potencial para deformações permanentes.

As misturas densas com a incorporação da borracha #30 comportaram-se como a mistura de ligante modificado: com menores valores de estabilidade e maiores deformações que as outras misturas.

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

Da mesma forma, o ligante modificado é menos rígido que o ligante convencional, contribuindo então para a queda da estabilidade e aumento da fluência nas misturas com Emulex RL-1C.

A figura 4.3 apresenta a mudança no volume de vazios e na massa específica das misturas. Estes gráficos apresentam o mesmo padrão de comportamento. A cinco dias de cura, o aumento do volume de vazios para as misturas com polímero e com borracha concorda com a diminuição da massa específica destas misturas para as mesmas definições.

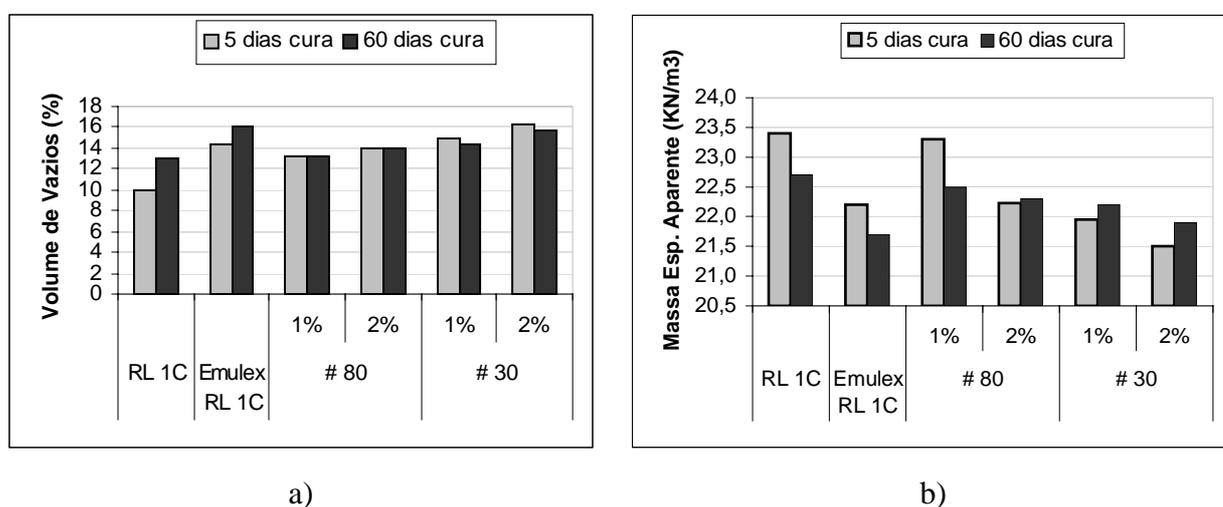


Figura 4.3- Misturas Densas: a) Volume de Vazios b) Massa Específica Aparente

É representativo o aumento de vazios de ar para as misturas com borracha a cinco dias de cura, principalmente para aquela com 2% de borracha #30, assim como sua massa específica muito baixa.

Houssain et al, 1995, também verificaram aumento no volume de vazios de misturas a frio com o aumento do tamanho dos grãos de borracha.

Com exceção da mistura com 2% de borracha #30, as misturas enquadraram-se na categoria de misturas densas para pré-misturados a frio, segundo Santana, 1993. Observa-se que, a 5 dias de cura, a mistura com 2% de borracha #30 obteve como volume de vazios um valor superior a 15%.

Com o tempo de cura, espera-se que haja um pequeno ou nenhum aumento no volume de vazios para amostras de laboratório. Isto é observado nas amostras convencionais, com polímero virgem e com borracha #80. O processo de cura faz com que parte da água ainda presente no ligante evapore, aumentando os vazios de ar.

Na prática, embora haja a evaporação da água e a drenagem feita pelas camadas inferiores, o tráfego responsabiliza-se por uma grande redução nos vazios. Para Santana, 1993, a compactação, em campo, principalmente nos primeiros seis meses, pode levar a um decréscimo entre 10% e 60% do valor inicial de volume de vazios.

Segundo Santana, 1993, é comum haver um decréscimo na massa específica aparente, juntamente com aumento da estabilidade com o tempo de cura.

As misturas com borracha #30 apresentaram redução no volume de vazios, conseqüente do aumento da massa específica. Este comportamento não condiz com o processo de cura. Provavelmente isto tenha ocorrido devido ao ensaio de módulo de resiliência a cura inicial realizado nestas amostras. Com pouco tempo de cura, os corpos de prova encontram-se com baixa resistência. É possível que tenham sofrido uma pequena compactação causada pelo ensaio.

A figura 4.4 apresenta os resultados de VAM e RBV para as misturas densas.

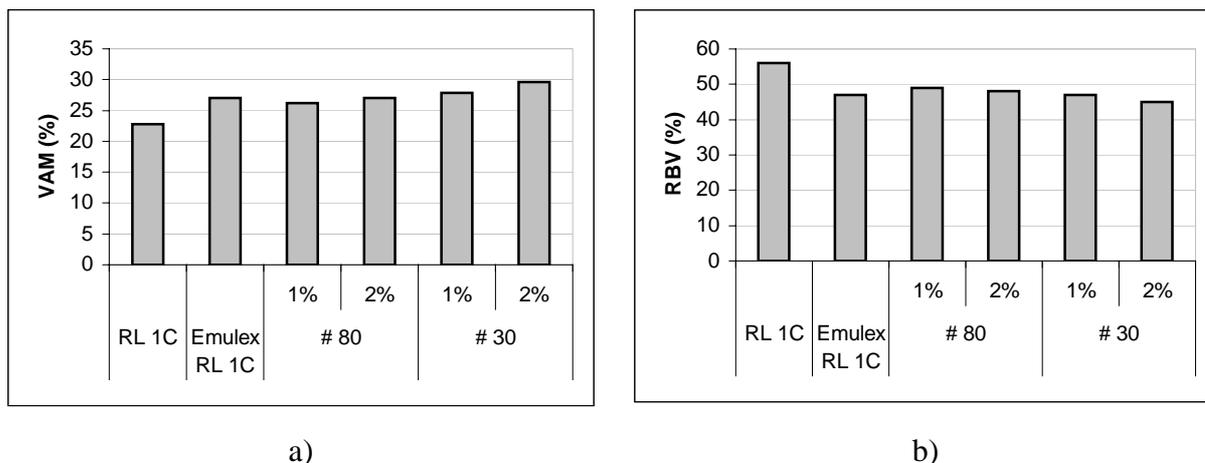


Figura 4.4- Misturas Densas: a) VAM b) RBV

O VAM (Vazios de Agregado Mineral) representa o espaço intergranular do esqueleto mineral.

Os vazios de agregado mineral aumentaram com o aumento do teor de borracha e com o uso de ligante modificado. Destaca-se um aumento maior para a mistura com 2% de borracha #30. Specht, 2004, também verificou aumento de VAM para o aumento do teor de borracha no processo via seca para misturas a quente.

A relação betume/vazios indica a porcentagem de vazios do agregado que é preenchida pelo asfalto. Em geral, as misturas a frio apresentam valores de RBV menores que as misturas a quente. Valores acima de 40% são considerados adequados para misturas com emulsão asfáltica.

A figura 4.4 b) mostra o decréscimo da RBV com a incorporação de borracha. Isto é, há menos vazios preenchidos por ligante. O que é esperado uma vez que o volume de vazios de agregado mineral aumentou. No entanto, esta diferença é considerada pequena.

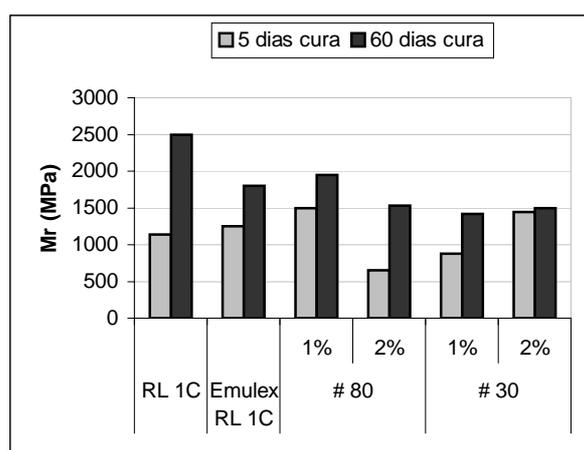
Todas as misturas com borracha e aquela com polímero apresentaram valores de RBV muito próximos.

4.1.1.2 Resistência à Tração e Módulo de Resiliência

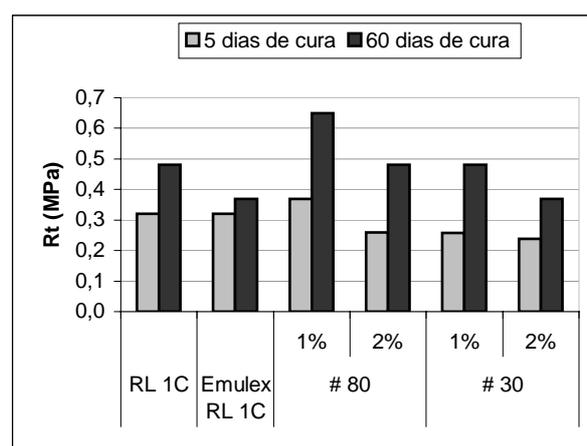
A tabela 4.4 e a figura 4.5 apresentam os resultados dos ensaios de resistência à tração e de módulo de resiliência a cinco dias e sessenta dias de cura.

Tabela 4.4- Misturas Densas: Módulo de Resiliência e Resistência à Tração

		5 DIAS DE CURA		60 DIAS DE CURA		
		Mr (MPa)	Rt (MPa)	Mr (MPa)	Rt (MPa)	Mr/Rt
RL 1C		1140	0,32	2500	0,48	5000
EMULEX RL 1C		1250	0,32	1800	0,37	4600
Borracha #80	1%	1500	0,37	1950	0,66	3000
	2%	650	0,26	1530	0,48	3010
Borracha #30	1%	880	0,26	1420	0,48	2990
	2%	1440	0,24	1500	0,37	4000



a)



b)

Figura 4.5- Misturas Densas: a) Módulo de Resiliência b) Resistência à Tração

Os ensaios de módulo e resistência à tração são de difícil obtenção para as misturas com baixas idades. A baixa coesão e o excesso de água ainda presente no ligante prejudicam a leitura dos valores destas propriedades.

Na figura 4.5 a, têm-se a variação do módulo de resiliência com o tempo de cura para as diferentes misturas.

A cinco dias de cura, há uma variação pequena entre os módulos das misturas densas. Assim como a umidade interfere no comportamento resiliente de solos, nas misturas com emulsão asfáltica também há queda na deformabilidade para altos teores de umidade. Este é responsável por baixos valores de módulo de resiliência.

A sessenta dias de cura, percebe-se uma tendência clara: o aumento do teor de borracha leva a uma diminuição no módulo de resiliência. A mistura com ligante modificado também apresenta valores abaixo da mistura convencional.

Valores menores de módulo de resiliência representam materiais mais flexíveis.

Outros autores, como Huang et al (2002) e Specht (2004) também observaram valores de módulo de resiliência, a 25°C, para misturas a quente com borracha, menores que aqueles das misturas sem borracha.

O preenchimento do espaço intergranular com borracha contribui para o decréscimo do parâmetro M_R . Assim como o preenchimento com ligante modificado com polímero virgem. Nas misturas convencionais estes espaços encontram-se preenchidos por ligante, e como este é mais rígido, os valores de módulo de resiliência são maiores.

A cinco dias de cura, obtém-se valores de resistência à tração muito baixos. Sabe-se que estes valores não refletem a realidade em campo, pois a mistura sofre grandes variações nas primeiras idades. Por este motivo também optou-se em avaliar a relação M_R / R_T com os valores já curados a sessenta dias.

Observa-se a elevação dos resultados de resistência à tração com o tempo de cura. Em algumas misturas esse valor chega quase ao dobro do valor inicial. Mais uma vez, sinalizando a importância da cura para as misturas com emulsão asfáltica.

A mistura com 1% de borracha #80 salienta-se sobre as demais. Sua resistência à tração aparece como a mais alta entre todas as misturas. As demais misturas apresentam valores de resistência à tração muito próximos à mistura convencional, com exceção da mistura com 2% de borracha #30 que apresentou resistência menor. Tal comportamento sugere que a borracha pode ter interagido com o ligante asfáltico, melhorando as características de resistências das misturas.

Com as misturas a quente, processo via úmida, Specht (2004) encontrou acréscimos de resistência à tração com a incorporação de borracha. No entanto as misturas produzidas a frio diferenciam-se muito daquelas produzidas a quente.

Holleran e Reed^B (2000) realizaram pesquisas com a produção de emulsão asfáltica modificada por borracha por um processo via úmida modificado. Estes autores observaram que as misturas produzidas com essa emulsão tiveram aumentos na coesão inicial da mistura, podendo levar a aumentos na resistência destas.

A mistura com ligante modificado por SBR apresenta a menor resistência à tração. Sabe-se que o polímero não contribui para aumento das propriedades de resistência e sim para as propriedades de resiliência da mistura.

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

Entretanto, também se deve levar em conta o parâmetro resistência à tração. Portanto, deve-se observar a relação M_R/R_T . Busca-se por misturas com capacidade de absorver as tensões no pavimento e apresentar boa resistência à tração.

Segundo Leite et al (2000), valores acima de 3000 indicam materiais flexíveis e com boa resistência à tração para misturas a quente densas. Não há referências quanto a esta relação para misturas a frio.

Com exceção da mistura com 2% de borracha #30, as demais misturas com borracha apresentaram a relação M_R/R_T próxima 3000. Este valor é semelhante aos encontrados para misturas a quente densas.

A adição de 1% e 2% de borracha #80 e 1% de borracha #30 apresenta uma relação bastante desejável entre esses parâmetros quando comparada à mistura convencional. Apresenta uma resistência à tração superior e uma deformabilidade maior, compreendida através do baixo módulo de resiliência.

4.1.2 Pré Misturados a Frio Semi-densos

4.1.2.1 Propriedades da Metodologia Marshall

A tabela 4.5 e a figura 4.6 apresentam os teores de ligante de projeto para as misturas semi-densas.

Tabela 4.5- Misturas Semi-densas: Teor de Ligante

		TEOR EA (%)	TEOR CAP (%)
RM 1C		7,00	4,34
EMULEX RM 1C		7,50	4,65
Borracha # 80	1%	6,75	4,22
	2%	7,00	4,34
Borracha #30	1%	6,50	4,03
	2%	6,70	4,15

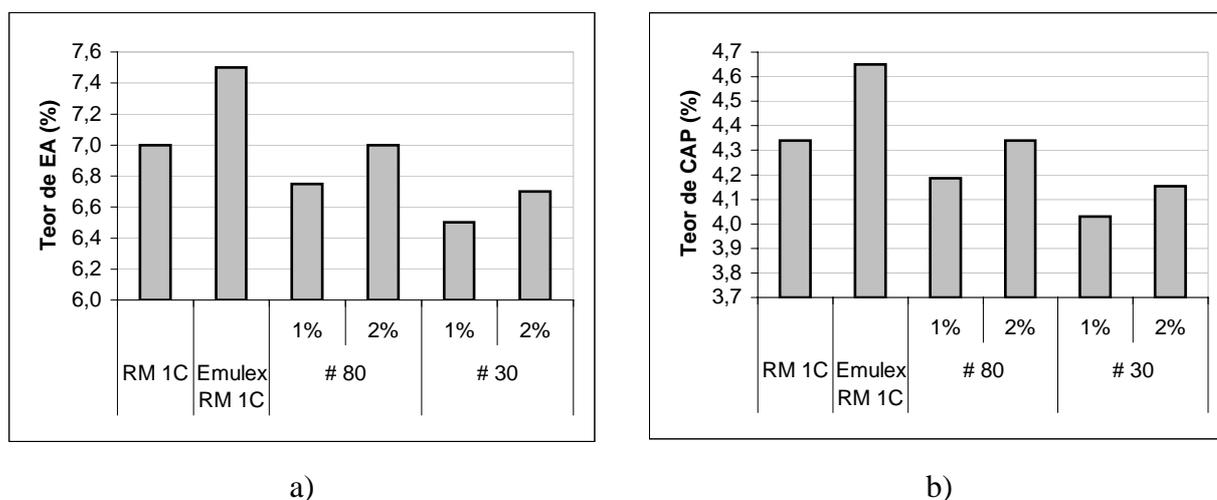


Figura 4.6- Misturas Semi-densas: Teor de Ligante a) EA b) CAP

O teor de ligante apresenta diferenças de comportamento para as diferentes misturas semi-densas. A relação entre a mistura convencional (RM 1C) e a modificada por polímero (Emulex RM 1C) é similar às misturas densas: há um aumento no teor de ligante.

A escolha do teor ótimo de projeto para as misturas com borracha foi muito delicada, pois tais misturas apresentaram valores muito abaixo da estabilidade mínima exigida por norma. Para a mistura de 1% #30, por exemplo, o único teor com estabilidade de 2,50 kN foi o de 6,5%.

Há dúvidas se é possível chamar os teores escolhidos para todas as misturas de teores “ótimos”. Pois nenhuma mistura com borracha, e mesmo aquelas sem borracha, apresentaram resultados de todos parâmetros Marshall adequados com as especificações em uso no país.

Este tipo de problema pode ser causado por dois aspectos:

O método de escolha de teor de ligante de misturas a frio deva ser readaptado para misturas a frio com borracha.

Segundo Takallou e Hicks (1988) muitos engenheiros utilizam a estabilidade, a fluência, o volume de vazios e a densidade para escolha do teor ótimo de projeto. No entanto, em misturas com borracha via seca, os valores de estabilidade são inferiores aos da mistura convencional e os de fluência são superiores podendo ultrapassar o limite máximo de norma. Portanto, diferentes critérios deveriam ser utilizados para escolha do teor que indica o melhor desempenho da nova mistura. Ainda segundo estes autores, a experiência em misturas a

quente tem indicado que a melhor alternativa é a escolha de teores que levem a baixos volumes de vazios.

Há pouco estudo sobre a incorporação de borracha via seca em misturas a frio. Enquanto, para as misturas a quente, é usual a escolha de volume de vazios de 4% e 5% para misturas com borracha, não há tal referência para as misturas a frio.

Se a escolha do teor de projeto para as misturas semi-densas, deste trabalho, fosse realizada com base, primeiramente, em um intervalo de volume de vazios baixos, provavelmente teríamos teores diferentes destes encontrados.

Outro aspecto seria, provavelmente, porque as misturas semi-densas comportam-se como misturas abertas ou, na verdade, porque são misturas abertas.

O intervalo de volume de vazios para classificação das misturas adotado neste trabalho não é de consenso geral. Alguns pesquisadores e engenheiros da área já consideram misturas com volume de vazios superior a 20% como sendo misturas abertas. Além disso, a pouca quantidade de material de pó-de-pedra utilizado também já caracteriza misturas abertas segundo a prática em pavimentação.

Malysz, 2004, estudou pavimentos permeáveis com base de pré misturados a frio, utilizando volume de vazios de projeto em torno de 23%. Este tipo de magnitude de vazios é similar àqueles encontrados para as misturas aqui estudadas.

Segundo Santana, 1993, as misturas semi-densas gozam do mesmo comportamento a fadiga das abertas. E sabe-se que, para misturas abertas, a dosagem do teor ótimo de projeto se dá em função da superfície específica, com as devidas especificações de emulsão e agregados. Para as misturas abertas não é necessário a verificação da estabilidade nem de fadiga.

Além disso, para misturas abertas, a estabilidade é função do atrito entre partículas e pequena contribuição da película de ligante. A pressão de confinamento, existente no pavimento e não no ensaio Marshall, é muito importante para sua estabilidade, tornando sem sentido esse ensaio.

Além destes aspectos que agravaram os resultados na metodologia Marshall, salienta-se que o intervalo de teores adotado, para ensaio, foram mal arbitrados. A fórmula de Duriez, utilizada

e indicada para todos os tipos misturas, apresentava teores em torno de 7,5% de ligante para as misturas semi-densas. Logo, o intervalo de teores foi arbitrado a partir deste valor.

No entanto os gráficos da metodologia Marshall para estas misturas parecem apresentar o ramo úmido da curvas. A figura 4.7, para mistura semi-densa com ligante convencional, RM 1C, exemplifica tal fato.

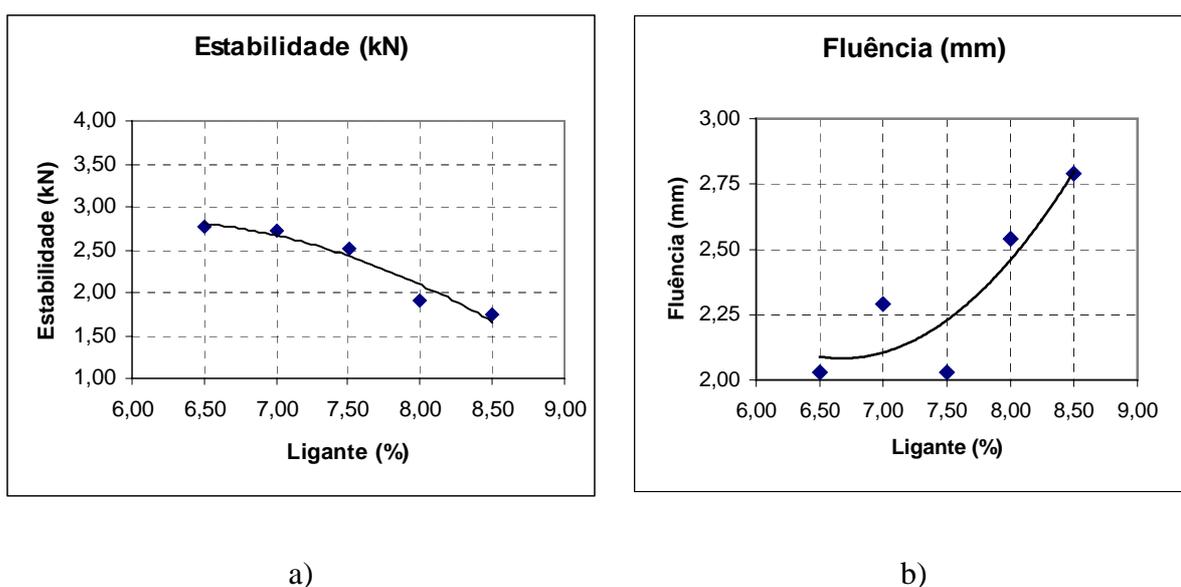


Figura 4.7- Gráficos das misturas semi-densas convencionais (RM 1C) a) Estabilidade b) Fluência

Provavelmente, teores abaixo destes ensaiados forneceriam melhores características às misturas. Na prática de pavimentação, misturas a frio com volume de vazios próximos a 20% dificilmente ultrapassam teores de projeto acima de 6%, sendo comum o uso de teores próximos a 5%. Esta constatação é válida para todas as misturas semi-densas trabalhadas nesta pesquisa.

As tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os resultados dos parâmetros Marshall para os dois tempos de cura ensaiados.

Tabela 4.6- Misturas Semi-densas: Propriedades Marshall a 5 dias de cura

5 DIAS DE CURA							
		Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	M.Esp.(kN/m ³)	Est.(kN)	Flu.(mm)
RM 1C		21,0	30,4	31,0	21,1	2,70	2,03
Emulex RM 1C		18,7	28,7	35,0	21,5	2,50	2,11
Borracha #80	1%	21,5	30	31,0	21,1	2,60	2,41
	2%	20,3	29,7	31,7	21,2	2,60	2,03
Borracha #30	1%	20,7	29,4	29,0	20,8	2,50	2,80
	2%	22,0	30,8	28,6	20,8	2,50	3,60

(Onde: Vv= Volume de Vazios; VAM = Vazios de Agregado Mineral; RBV = Relação Betume -Vazios; M. Esp. = Massa Espécífica; Est.= Estabilidade; e, Flu.=Fluência)

Tabela 4.7- Misturas Semi-densas: Propriedades Marshall a 60 dias de cura

60 DIAS DE CURA			
		Vv (%)	M.Esp.(KN/m ³)
RM 1C		20,6	21,3
Emulex RM 1C		19,3	21,4
Borracha #80	1%	21,8	21,0
	2%	19,0	21,5
Borracha #30	1%	24,0	20,4
	2%	23,0	20,5

As misturas semi-densas apresentaram valores menores de estabilidade e maiores de fluência que as misturas densas.

Principalmente nas misturas ditas semi-densas, sente-se a necessidade de outro parâmetro além de Estabilidade e Fluência para escolha do teor de ligante de projeto. Pois a maioria dessas misturas apresentam estabilidades extremamente baixas e fluências muito altas. Somente a prática será capaz de viabilizar um método de dosagem adequado.

A figura 4.8 apresenta os resultados de Estabilidade e Fluência para as misturas semi-densas.

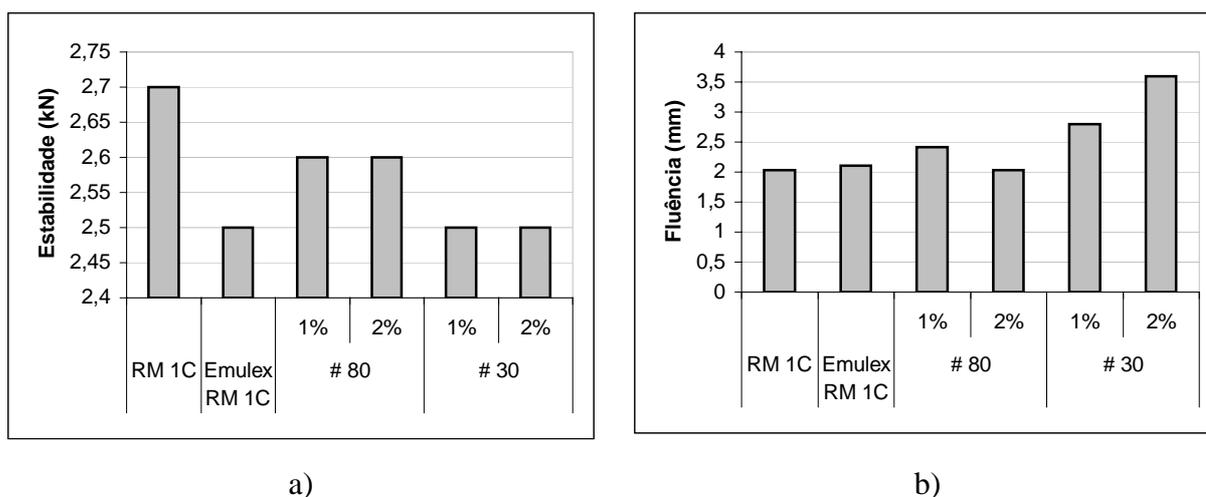


Figura 4.8- Misturas Semi-densas a) Estabilidade b) Fluência

Sabe-se que ao contrário das misturas densas que comportam-se como um CBUQ, as misturas semi-densas possuem pouca argamassa e, portanto, atingem a ruptura principalmente devido a desagregação provocada pela abrasão dos agregados graúdos. (SANTANA, 1993).

Observou-se muita dificuldade na leitura dos valores de estabilidade para essas misturas com poucos dias de cura. Durante a aplicação da carga, o ponteiro de leitura não parava quando o corpo de prova atingia a ruptura. Acredita-se que, devido ao alto volume de vazios, as amostras sofriam um acomodamento. Este rearranjo dos agregados fazia com que a leitura de estabilidade fosse mascarada. A leitura real de estabilidade foi definida como sendo a primeira pausa do ponteiro. Dias (2004) também observou este mesmo tipo de comportamento para misturas areia asfalto a frio com emulsão asfáltica catiônica.

Optou-se pela escolha de teores baixos de ligante por serem os únicos a fornecer estabilidade mínima exigida por norma. Embora não plotados aqui, para as misturas semi-densas com borracha, principalmente com acréscimo da borracha #30, a média dos valores de estabilidade

para os cinco teores ensaiados foi muito baixa. Os teores de projeto escolhidos para as misturas de 1% e 2% com esta borracha foram os únicos que apresentaram estabilidade mínima exigida por norma. Os demais teores apresentaram-se muito abaixo de 2,50 kN.

No entanto, visualmente, essas misturas com menos de 7% de ligante aparentavam ter coesão. Como já comentado, é provável que os teores ensaiados estejam distantes dos teores ideais para estas misturas.

Quanto à fluência, ambas misturas com borracha #30 apresentaram valores muito altos, pois estas amostras sofreram grandes deformações na ruptura. Destaca-se a mistura com 2% de borracha #30 que atingiu valor de fluência muito próximo ao máximo permitido por norma.

O aumento do teor de borracha e o aumento do tamanho da partícula de borracha também acarretaram em valores maiores de fluência. O acréscimo de borracha fez com que os valores de Estabilidade Marshall fossem menores que aquele encontrado para a mistura convencional com EA RM 1C.

A figura 4.9 apresenta os resultados de volume de vazios e massa específica para as misturas semi-densas.

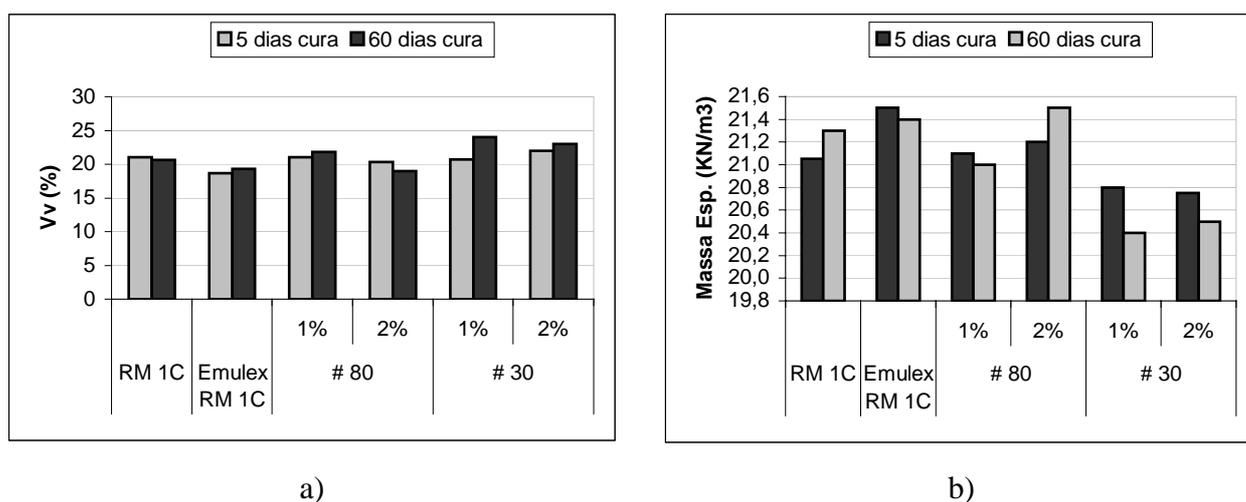


Figura 4.9- Misturas Semi-densas a) Volume de Vazios b) Massa Específica Aparente

Todas as misturas ensaiadas apresentaram volume de vazios dentro do intervalo previsto para misturas semi-densas segundo Santana, 1993, de 15% a 22%, sendo a mistura com 2% de

borracha #30 apresentou o maior volume de vazios: 22%. A média deste parâmetro foi em torno de 20%. No entanto, volumes de vazios inferiores a 20% seriam preferíveis, pois como já comentado anteriormente não há consenso entre o limite de misturas semi-densas para as abertas.

Com o tempo de cura, as amostras aumentaram o volume de vazios, com exceção de duas que diminuíram: a RM 1C e a 2% borracha #80. Conforme descrito para as misturas densas, é provável que possam ter sofrido alguma compactação decorrente do ensaio de módulo de resiliência realizado a 5 dias de cura.

Para as amostras que tiveram seu volume de vazios diminuído, a massa específica foi aumentada.

Observa-se que as misturas semi-densas apresentam valores de massa específica inferiores que aqueles encontrados para as misturas densas.

Os resultados de VAM e RBV estão apresentados na figura 4.10.

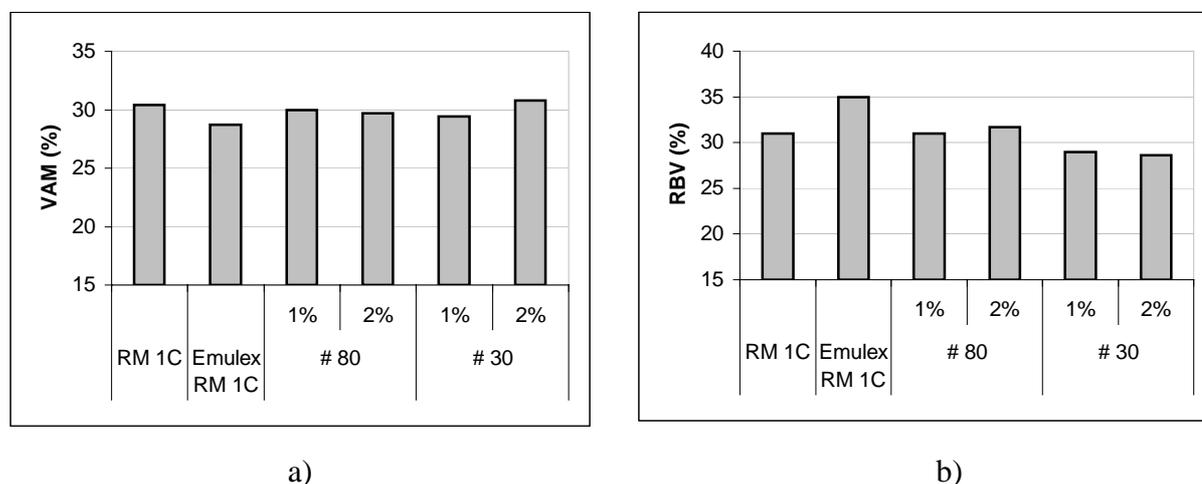


Figura 4.10- Misturas Semi-densas a) VAM b) RBV

Os valores de VAM encontrados, embora altos quando comparados com CBUQ, são considerados normais para misturas a frio. Valores mais altos de VAM interferem no intertravamento dos agregados levando a misturas com baixas resistência ao cisalhamento. (SPECHT, 2004).

Todas as misturas semi-densas apresentaram valores de RBV baixos. Sendo que as misturas com borracha #30 tiveram os menores valores. O decréscimo dos valores de RBV também foram observados nas misturas densas.

Para as misturas a frio, valores acima de 40% são ditos como satisfatórios.

Segundo Specht (2004), o RBV deve garantir um valor razoável de ligante entre os agregados e valores muito baixos de RBV comprometem a durabilidade da mistura.

4.1.2.2 Resistência à Tração e Módulo de Resiliência

As misturas semi-densas apresentaram menor magnitude dos valores de módulo de resiliência e resistência à tração quando comparados aos encontrados para as misturas densas.

Na tabela 4.8, quadro comparativo entre estas misturas. Convém salientar que as misturas com emulsão modificada por polímero não puderam ser ensaiadas devido a problemas no equipamento de ensaio do laboratório durante o desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 4.8- Misturas Semi-densas: Módulo de Resiliência e Resistência à Tração

		5 DIAS DE CURA		60 DIAS DE CURA		
		Mr (MPa)	Rt (MPa)	Mr (MPa)	Rt (MPa)	Mr/Rt
RM 1C		1115	0,20	1620	0,61	2700
Borracha #80	1%	920	0,42	1580	0,70	2250
	2%	490	0,37	740	0,80	930
Borracha #30	1%	700	0,39	800	0,46	1740
	2%	475	0,35	900	0,52	1720

A realização dos ensaios de módulo de resiliência, logo após moldagem, para as misturas semi-densas exigiu muito atenção. Essas misturas com alto volume de vazios em estado “fresco”, com alto teor de água presente no ligante, apresentavam deformações permanentes

muito grandes. A carga utilizada para ensaio, próxima a 15% da carga de ruptura, era muito baixa. E cargas de valor inferior eram insuficientes para leitura de módulo de resiliência.

A figura 4.11 apresenta os resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência e Resistência à Tração.

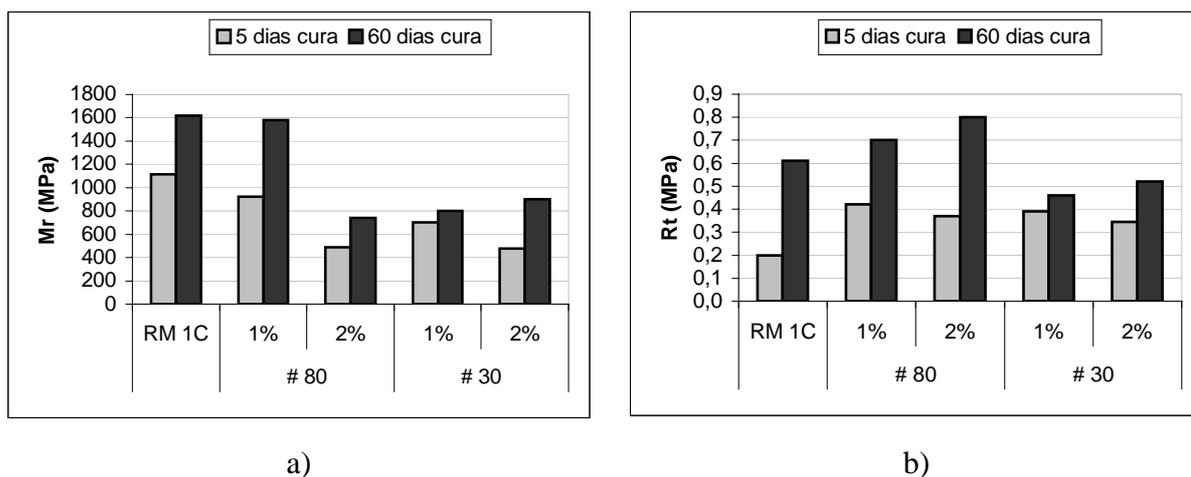


Figura 4.11- Misturas Semi-densas a) Módulo de Resiliência b) Resistência à Tração

Os valores de módulo de resiliência apresentaram-se decrescentes com o acréscimo de borracha e com o aumento da dimensão da partícula de borracha. No entanto, as misturas com borracha #30 e com 2% de borracha #80 apresentam valores de módulo significativamente mais baixos que a mistura de referência. Uma redução em torno de 50%.

A substituição de parte dos agregados minerais pela borracha faz com que a flexibilidade da mistura seja aumentada. Este comportamento também foi observado para as misturas densas.

Aos cinco dias de cura, todas as misturas com borracha apresentaram maior resistência à tração que a mistura convencional. As misturas convencionais foram as primeiras a serem executadas neste trabalho durante o inverno. É provável que devido à umidade do ar, muito alta nesta época, tenha influenciado na cura e desenvolvimento de resistência inicial dessa mistura. Pois, mesmo na primeira idade de cura, não se espera tamanha diferença entre os valores de resistência à tração.

As misturas com borracha #80 apresentaram resistência à tração maior que a mistura convencional. Este comportamento também foi verificado para as misturas densas.

Com o maior tempo de cura, a borracha com partículas maiores apresentou maior diferença no parâmetro R_T que as outras misturas, obtendo os menores valores de resistência.

Valores muito baixos do parâmetro M_R/R_T como os das misturas com borracha #30 podem indicar misturas com pouca resistentes e bastante deformáveis.

A mistura com 2% de borracha #80 apresentou o parâmetro M_R/R_T de 930. Seu valor de resistência à tração, com cura de sessenta dias, foi o mais alto entre estas misturas.

Como já comentado para as misturas densas, não há consenso sobre quais valores são considerados mais adequados para este parâmetro para misturas a frio.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

A incorporação de borracha moída de pneus em misturas asfálticas a frio como parte da fração de agregados se mostrou exequível e válida. O alto consumo de pneus, nestas misturas, comprova a eficácia desta utilização para diminuição dos pneus velhos já existentes. Assim, o uso de borracha de pneus em pavimentação sinaliza ser uma solução interessante e ambientalmente correta para o problema deste rejeito.

No entanto, ainda existem muitas dúvidas com respeito ao desenvolvimento do uso de borracha em misturas a frio. Ainda é necessário desenvolver e adaptar a experiência internacional para a realidade de nosso país. Além disso, é perceptível a necessidade de desenvolvimento de um método de dosagem adequado de misturas a frio com e sem borracha.

Principalmente nas misturas semi-densas, percebeu-se grandes diferenças com o acréscimo de borracha nos parâmetros Marshall. Não foi possível a escolha de um teor de projeto adequado as normas e especificações brasileiras.

Em termos gerais, a umidade presente nas misturas a frio é um fator decisivo no seu projeto e na aplicação. No entanto, a verificação da umidade ótima para compactação é um aspecto que ainda não é levado em consideração pela norma em vigor do DNER para pré-misturados a frio. Há uma necessidade de readaptação desta norma, pois a umidade de compactação interfere nas propriedades finais das misturas asfálticas como resistência, volume de vazios, e massa específica. Mudanças nestes aspectos podem alterar a durabilidade do revestimento ou camada a ser executada.

A execução de misturas com emulsão asfáltica em estações e climas frios pode fazer com que o desempenho final destas misturas seja prejudicado. A lenta perda de umidade, em locais com alta umidade relativa do ar ou climas frios, atrasa a compactação da mistura e liberação do tráfego. Nestes locais, deve-se optar pelo uso de agregados altamente reativos à emulsão escolhida, pois assim a ruptura é causada de forma mais rápida, liberando água que pode ser

drenada pelas camadas inferiores. Até que haja um maior desenvolvimento das emulsões asfálticas, é preferível a execução de misturas com emulsão asfáltica em climas ou em estações quentes.

A fórmula de Duriez utilizada para a escolha do intervalo de teores de ligante a ser trabalhado é uma aproximação e muitas vezes não reflete o intervalo adequado de trabalho. A escolha deste deve também levar em conta a prática de engenharia de pavimentação.

Para misturas com altos volumes de vazios, acima de 20%, não há consenso quanto a sua classificação como pré-misturados a frio. Para aplicação da metodologia Marshall e garantia de melhor desempenho das misturas semi-densas, a melhor opção é trabalhar-se com intervalo de volume de vazios de 15% a 20%.

É recomendável que a leitura dos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração sejam efetuadas a partir de um determinado tempo de cura quando se trabalha com misturas com emulsão asfáltica. No entanto é necessário que haja um consenso sobre este tempo no meio técnico. A comparação de resultados de diferentes pesquisas somente será possível se houver uma metodologia de projeto e ensaios seguidos por todos.

Com relação aos parâmetros estabilidade e fluência, as misturas densas comportaram-se melhor que as misturas semi-densas diante da incorporação de borracha.

Para os dois tipos de misturas trabalhadas, o acréscimo de borracha de maior magnitude de partícula e o aumento deste teor geram decréscimos nos valores de estabilidade e aumentos nos de fluência.

As misturas com borracha #80, densas e semi-densas, salientaram-se sob as demais no parâmetro resistência à tração. Apresentaram valores superiores às misturas de referência sinalizando a uma possível interação entre o ligante e a borracha.

O acréscimo de borracha às misturas densas é benéfico. No entanto, não foi avaliado o custo destas misturas. Além do aumento no teor de ligante para as misturas densas, outros parâmetros deveriam ser estudados para que se avaliasse a questão custo precisamente.

Salienta-se o acréscimo de 1% da borracha #80 contribui para aumento do teor de ligante, aumento da resistência à tração e aumento da deformabilidade através do decréscimo do módulo de resiliência.

As misturas semi-densas apresentaram valores muito baixos da relação betume-vazios. Tal parâmetro pode influenciar na durabilidade destes revestimentos.

5.2 SUGESTÕES

Para continuidade deste trabalho, seguem algumas sugestões para estudos futuros.

- Nova análise de misturas semi-densas. Optando-se em trabalhar com misturas com menor volume de vazios que aqueles encontrados neste trabalho. Também observando a uma nova composição granulométrica destas misturas e a utilização de um intervalo de ligantes menor.
- O estudo de misturas a frio com borracha, continuando o estudo do processo via seca, porém com acréscimo de um filler ativo. A utilização de outro material, que reagisse quimicamente, auxilia na obtenção de maior resistência inicial para as misturas asfálticas. É comum a adição de cimento e, em alguns casos, cal.
- A construção de um trecho experimental para realização de ensaios avaliando as características do pavimento sob solicitações do tráfego ou então do simulador de tráfego UFRGS-DAER/RS. A realização de ensaios, em campo, pode trazer maior confiabilidade para os estudos em laboratório.
- Além do processo via seca, há interesse em desenvolver-se o estudo da modificação do ligante emulsão asfáltica. Este processo é chamado de via úmida para as misturas a quente. Pouco desenvolvimento se deu nesta área de pesquisa. Até mesmo por falta de conhecimento da química deste tipo de ligante e restrições de uso de misturas com emulsões asfálticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDA, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos Manual Básico de Emulsões Asfálticas: Soluções para Pavimentar sua Cidade. Brasil, 2001.

AIKMAN, E. Engineering Brief No 23- Open-Graded Asphalt Emulsion Mixes. Retirado do site: <http://www.faa.gov/arp/engineering/briefs/eb23.htm> (1981).

AIREY, G. D.; RAHMAN, M. Fundamental characterisation of dry process crumb rubber modified asphalt mixtures. Texto retirado do site <http://www.nottingham.ac.uk/~evzncpe/projects/mujibs-web-page.htm> U.K., 2003.

AIREY, G. D.; RAHMAN, M.; COLLOP, A The influence of Crude Source and Penetration Grade on the Interaction of Crumb Rubber and Bitumen. Proceedings Asphalt Rubber 2003 Brasil, 2003.

AKZO NOBEL Emulsiones Asfalticas Boletin Tecnico. Uruguai, 1999.

ANDRIETTA, A. J. Pneus e Meio Ambiente: um grande problema requer uma grande solução. Texto retirado do site <http://www.reciclarepreco.hpg.ig.com.br.htm> Brasil, 2002.

Associação Nacional da Industria de Pnaumáticos- ANIP www.pneus.ubbi.com.br 2004.

ASPHALT INSTITUTE The asphalt handbook Manual Series no. 4 (MS-4) p. 43 USA, 1989.

ASPHALT INSTITUTE Mix Design Methods for Asphalt Concrete. USA, 1995.

BLACKLIDGE EMULSIONS, INC History of Crumb Rubber. Texto disponível no site: <http://www.bei-emulsions.com/rubber-1.htm>. USA, 2003.

BROSSEAUD, Y. Revestimentos Asfálticos Franceses: Panorama das Técnicas, Balanço de Comportameto. 16º Encontro do Asfalto. Brasil, 2002.

CALIFÓRNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (CalTrans) Asphalt Rubber Usage Guide. Retirado do site www.dot.ca.gov USA, 2003.

CARBONNEAU, X.; HENRAT, J.P.; LETAUDIN, F.; POIRIER, J.E. Caractéristiques mécaniques des enrobés à froid. Revue Générale des Routes et des Aérodrômes (RGRA) N° 807 Juin. France, 2002.

CHAZAL, P.Y. Entrevistas.Revista Estradas, N° 5. Brasil, 2003.

COMMONWEALTH DEPARTMENT OF ENVIRONMENT A National Approach to Waste Tyres. Australian Government. Austrália, 2001.

Conselho Nacional de Meio Ambiente- CONAMA www.mma.gov.br/port/conama Resolução 258, 26 de Agosto de 1999.

DEPARTAMENTO AUTONOMO DE ESTRADAS E RODAGEM- DAER/RS-EL 210/01- Determinação do resíduo por evaporação para emulsões asfálticas.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM- DNER (1996) Manual de Pavimentação. Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM- DNER ME 002/98: Emulsão asfáltica -Carga da partícula.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM- DNER ME 005/94: Emulsões Asfálticas -Determinação da peneiração.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM- DNER ME 006/00: Emulsões Asfálticas -Determinação da sedimentação.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM- DNER ME 107/94: Mistura betuminosa a frio com emulsão asfáltica – Ensaio Marshall.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM- DNER ME 193/96: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos – determinação da densidade

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM- DNER ES 317/97: Pavimentação- Pré-misturados a frio.

DIAS, C. Alternativas de Pavimentos Urbanos de Baixo Custo. Estabilização cinza-cal e areia asfalto. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

FERNÁNDEZ DEL CAMPO, J. A. Tratado de estabilización y reciclado de capas de firmes con emulsión asfáltica. Espanha, 1998.

GALLEGO, J.; TOMÁS, R.; NOSETTI, R.A.; DAGUERRE, L.; BIANCHETTO, H.D. (2000) Laboratory performance of several spanish asphalt paving mixes produced with asphalt-rubber. In: Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference p.319 a 329. Portugal, 2000.

GHALAMBOR, A. Evaluation and Characterization of Sorbents in Removal of Oil Spills. Technical Report Series University of Southwestern Louisiana Texto retirado do site: www.osradp.lsu.edu/1995_Deliverables/Ghalambor95/Ghalambor95.htm USA, 1995.

GOOSWILLIGEN, G. E VONK, W.C. The role of bitumen in blends with thermoplastics elastomers for roofing applications. Shell Chemicals papers TPE 6.3.2 USA, 1994.

HEITZMAN, M. Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier. Transportation Research Record. Washington, n.1339, p.1-8. 1992. USA, 1992.

HÉRITIER, A.; MARIOTTI,S.; MALOT, M. Cold Mix asphalt: new methodology of formulation and new products. European Roads Review, Special Issue. France, 2002.

HOLLERAN, G.; REED, J. R.¹ Super Microsurfacing. World Of Asphalt AAPA, Sydney. Retirado do site:www.slurry.com/techpapers/techpapers_australia_aapa.shtml Australia, 2000.

HOLLERAN, G.; REED, J. R.² Emulsification of Asphalt Rubber Blends. In: Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference p.309 a 318. Portugal, 2000.

HOLLERAN, G.; REED, J. R.³ Understanding Emulsion Products. Valley Slurry Seal Company. Retirado do site: www.slurry.com/library. USA, 2004.

HOLLERAN, G.; REED, J. R.⁴ Analysis Of Emulsion Stability And Asphalt Compatibility. Valley Slurry Seal Company. Retirado do site: www.slurry.com/library. USA, 2004.

HOLLERAN, G.⁵ Article: Rubber Hits The Road. Valley Slurry Seal Company. Retirado do site: www.slurry.com/library. USA, 2000.

HOUSSEIN, M.; SADEQ, M., FUNK, L., MAAG, R. A study of Chunk Rubber From Recycled Tires as a Road Construction Material. Proceedings of 10th annual conference on hazardous Waste Research. USA, 1995.

HUANG, B.; MOHAMMAD, L. N.; GRAVES, P. S; ABADIE, C. Louisiana experience with crumb modified hot-mix asphalt pavement. Transportation Research Record. Washington, n.1789, p.1-13. USA, 2002.

ISSA TB 109 The International Slurry Surfacing Association. Design Technical Bulletins USA, 1990.

KIROSKI, D.; BURKE, B. E PACKHAM, D. Effect Of Substrate On Adhesion In Rubber Moulding. Retirado do site [http:// staff.bath.ac.uk/mssdep/paper1.htm](http://staff.bath.ac.uk/mssdep/paper1.htm). UK, 1996.

LEECH, D. Cold Bituminous Materials for Use in the Structural Layers of Roads. Transport Research Laboratory, Project Report 75. UK, 1994.

LEITE, L.F.M.; MOTTA, L.M.G.; BERNUCCI, L.B. E SOARES, J.B. Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboratory. In: Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference p.309 a 318. Portugal, 2000.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES- LCPC Les Enduits Superficiels et les routes économiques. France, 1989.

MALYSZ, R. Comportamento Mecânico de Britas Empregadas em Pavimentação. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, 2004.

MAMLOUK, M.S.;WOOD, L.E. E GADALLAH,A. A Laboratory Evaluation of asphalt emulsion mixtures by use of the Marshall and indirect tensile tests. Transportation Research Board 754, p.17-22. USA, 1980.

MEMON, M. e FRACO, C. The Impact of Chemical Modification for Used Tire Rubber Towards Skiny Mix Design for Maintenance. Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference p. 731 a 742. Brasil, 2003.

MEDINA, J. Mecânica dos Pavimentos. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brasil, 1997.

MORILHA JR, A. E DANTAS, G.A. (2002). Aplicações Práticas de Ligantes Asfálticos Modificados por Borracha de Pneus de Alta Viscosidade. 11^a Reunião de Pavimentação Urbana.

- NARUSCH, F.P. Alaska Experience with Rubberized Asphalt Concrete Pavements, 1979-1982. Division of Design and Construction, Alaska Department of Transportation and Public Facilities, Central Region. USA, 1982.
- PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. Manual de Serviços de Pavimentação. Brasil, 1996.
- PINHEIRO, J.H.M. E SOARES, J.B. The Effect of Crumb Rubber Gradation and Binder-rubber Interaction Time on the Mechanical Properties of Asphalt-rubber Mixtures (Dry Process). In: Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference p.707 a 718. Brasil, 2003.
- PINTO, S.; PREUSSLER, E. Pavimentação Rodoviária: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Brasil, 2002.
- POTTI, J.J.; LESUEUR, D. E ECKMANN, B. Towards a rational mix design method for cold bituminous mixes. The Optel contribution. Revue Générale des Routes et des Aéroports (RGRA) N° 11048. France, 2002.
- QUIMI-KAO S.A. Curso Básico de Emulsões Asfálticas. México, 1993.
- SANTANA, H. Manual de Pré-Misturados a Frio. IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo. Brasil, 1993.
- SCHATZBERG, P. Investigation of sorbents for removing oil spills from waters. U.S. Coast Guard Report No. 724110.1/2/1, U.S. Coast Guard Headquarters, Washington, D.C., USA, 1971.
- SERFASS, J.P. Advantages, peculiarities and mysteries of cold mixes. European Roads Review, Special Issue. France, 2002.
- SERFASS, J.P, POIRIER, J.E, HENRAT, J.P., CARBONNEAU, X. Influence of curing on cold mix mechanical performance. 6th RILEM Symposium PTEBM 03. Germany, 2003
- SHATNAWI, S. e HOLLERAN, G. Asphalt Rubber Maintenance Treatments in California. In: Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference p.36 a 47 .Brasil, 2003.
- SILVA JUNIOR, C. A.P; SÓRIA, M.H.A. Influências da perda de umidade antes da compactação em misturas de areia-asfalto a frio feitas com emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta. Panorama nacional de Pesquisa em Transportes 2000. In: XIV Congresso de Pesquisa e ensino em transportes. p. 485 a 496 Brasil, 2000.
- SILVA, S.S.; FORTE, M.M.C.; SPECHT, L.P.; CERATTI, J.A. Polímeros como modificadores asfálticos Associação Nacional de Pesquisa em Transportes (ANPET) Volume 10 número 1. Brasil, 2002.
- SINGLETON, T.M.; AIREY, G.D.; WIDYATMOKO, I. E COLLOP, A.C. (2000) Residual Bitumen characteristics following Dry Process Rubber-bitumen Interaction. Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference p.309 a 318. Portugal, 2000.
- SPECHT, L.P. Exame de Qualificação de Doutorado Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, 2002.

- SPECHT, L.P. E CERATTI, J.A.P.² Asfalto Borracha e Borracha Agregado Possibilidade de Utilização de Borracha Reciclada em Misturas Asfálticas. Revista Estradas p. 18 a 26. Brasil, 2003.
- SPECHT, L.P. ; CERATTI, J.A.P. E PALUDO, I.³ Laboratorial Evaluation of Tire rubber use as Hot Mix Aggregates. In: Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference p.603 a 614 .Brasil, 2003.
- SPECHT, L.P. Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.
- TAKAMURA, K. Comparison of Emulsion Residues Recovered by the Forced Airflow and RTFO Drying. In: ISSA/AEMA Proceedings, 1-17. USA, 2000.
- TAKAMURA, K. Improved Fatigue Resistance of Asphalt Emulsion Residue Modified with SBR Látex. In: AEMA Annual Meeting in Nashville, TN, 2003.
- TAKALLOU, H. B.; HICKS, R. G. Use of Rubber-Modified Asphalt in Cold Regions Retirado do site: www.rubberpavements.org/library Presented at Workshop on Paving in Cold Areas in Ottawa, Ontario, Canada, 1987.
- TAKALLOU, H. B.; HICKS, R. G. Development of improvement mix and construction guidelines for rubber-modified asphalt pavements. Transportation Research Record. Washington, n.1171, p.113-120. USA, 1988.
- THANAYA, I N.A.¹ An alternative Design Procedure of Cold Asphalt Mixtures. Retirado do site: www.bibcouncil.de/ISSM2002/Proceedings/paperPDF/e01.pdf U.K., 2002
- THANAYA², I N.A. Utilization of Waste Materials for Cold Asphalt Mixes. Retirado do site: www.bibcouncil.de/ISSM2002/Proceedings/paperPDF/e02.pdf U.K., 2002
- TOSAS Bitumen Rubber Design Manual. USA, 2000.
- TRELOAR, L.R.G. The Physics of Rubber Elasticity. 3rd Edition.Oxford. USA, 1975
- TUCHUMANTEL JR., O. Influência da Umidade de Compactação no PMF - Denso. IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo, 10^o Encontro de Asfalto Brasil, 1990.
- VARZAVAND, S.; SHRESTHA, G.; EGGER, S. E FAHMY, M.F. Research And Development Of Flexible Pavement Infrastructure In: Asc Proceedings Of The 27th Annual Conference. Brigham Young University-Provo, Utah, pp 103-106. USA, 1991.
- WALLER JR, H.F. Emulsion Mix Design Methods: An Overview Transportation Research Board 754, p.1-9. USA, 1980.
- WAY, G.B. OGFC Meets CRM Where the Rubber meets the Rubber 12 Years of Durable Success. In: Proceedings Of The Asphalt Rubber 2000 Conference p.15 a 31. Portugal, 2000.