

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais**

**Simone Cristina Caldato da Silva**

**ENSAIOS COMPARATIVOS DE MISTURA ASFÁLTICA PRÉ-  
MISTURADO A FRIO COM ADIÇÃO DE BORRACHA DE PNEU**

Bauru  
2008

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Simone Cristina Caldato da Silva**

**ENSAIOS COMPARATIVOS DE MISTURA ASFÁLTICA PRÉ-  
MISTURADO A FRIO COM ADIÇÃO DE BORRACHA DE PNEU**

Dissertação apresentada ao programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais da Universidade Estadual Paulista - Curso de Mestrado, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais, sob a orientação do Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi e co-orientação Prof. M.Sc. Emílio Shizuo Fujikawa.

Bauru  
2008

## DEDICATÓRIA

*Ao Osvaldo, meu grande amor, marido, companheiro, amigo, paciente e compreensivo em todas as horas, um presente que Deus colocou em minha vida.*

*A nossa filha Allanis, o maior presente de Deus, que chegou ao mundo no meio do ano passado, conquistou comigo todas as minhas vitórias, é a minha inspiração.*

*Aos meus pais, Jovanildo e Aparecida, meus maiores educadores, exemplos de caráter, perseverança e amor incondicional.*

*Aos meus irmãos, Domingos e Marcos, meus amores, sempre me deram forças para lutar pela vida e a superar os obstáculos.*

*Amo muito vocês todos!*

## AGRADECIMENTO

*Em primeiro lugar, agradeço a Deus por estar presente em todos os momentos da minha vida.*

*Agradeço a toda a minha família, por sempre estarem ao meu lado. Em especial ao meu marido Osvaldo e a nossa filha Allanis pela ajuda incondicional.*

*Ao Professor Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pela orientação neste trabalho, amizade, incentivo, dedicação, apoio e por acreditar nesta concretização.*

*Ao Professor M.Sc. Emílio Shizuo Fujikawa pela amizade, incentivo e co-orientação neste trabalho.*

*Ao Professor M.Sc. João Carlos de Campos pela confiança e incentivo.*

*À UNILINS pelo auxílio em todos os momentos.*

*Em nome do diretor Professor Enaldo Pires Montanha, agradeço ao Centro Tecnológico da Fundação Paulista, pelo auxílio, confiança e disponibilização do LEM - Laboratório de Ensaios de Materiais para a realização de todos os ensaios deste trabalho.*

*A todos os funcionários e estagiários do LEM, em especial ao José Paulo e Edvaldo, pelo apoio, auxílio e incentivo na execução deste trabalho.*

*Meu agradecimento em especial a minha querida amiga e companheira a Professora Aurea Beatriz Perón, pela amizade, incentivo, dedicação, auxílio e por acreditar que juntas venceríamos este obstáculo.*

*Agradeço também a todas as funcionárias da secretaria da Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, pelo auxílio em todos os momentos.*

## RESUMO

A mistura asfáltica, pode ser usinado a quente e pré-misturado a frio. A mistura denominada “pré-misturado”, empregada no revestimento de pavimento é a mistura a frio, tendo como composição agregado mineral graduado, material de enchimento e emulsão asfáltica espalhada e comprimida a frio. Esse trabalho irá abordar a mistura asfáltica pré-misturado a frio, tendo como objetivo comparar os resultados baseados em ensaios da mistura asfáltica e a caracterização do comportamento da mistura quando preparada com a adição de borracha reciclada de pneus usados. A pesquisa visa qualificar e otimizar o desempenho da mistura asfáltica que receberá a borracha moída com adições de 3 %, 4 % e 5 % em relação à massa total de agregados minerais, comparando-as com a mistura de referência, sem a adição da borracha. A destinação final da borracha constitui em todo o mundo em um grande desafio, em virtude de suas peculiaridades, como seu tempo de degradação, estimado em aproximadamente 600 anos. Além da quantidade gerada nos dias de hoje, volume, peso e principalmente grande dificuldade de alternativas consideradas ecologicamente corretas e economicamente viáveis. Os ensaios realizados baseiam-se em uma faixa de pré-misturado a frio, onde os corpos de prova foram produzidos em laboratório com emulsão asfáltica catiônica. A adição da borracha moída e os teores de emulsão asfáltica foram definidos e analisados após ensaio de Dosagem Marshall a Frio. As características e comportamento das misturas foram avaliados pela densidade da mistura asfáltica, estabilidade e fluência Marshall. Dessa forma, buscando uma alternativa a atender as normas brasileiras e resultados de desempenho dessas misturas asfálticas, conclui-se que os benefícios da adição da borracha são consideráveis, onde o traço com adição de 3% de borracha apresentou o menor índice de vazios, a menor fluência, a maior estabilidade Marshall, a maior densidade aparente, a maior relação betume-vazios e o menor teor de emulsão asfáltica.

**Palavras chave:** borracha moída, pavimentos de asfalto, misturas de emulsão asfáltica, desempenho.

## ABSTRACT

The asphalt paving mixture can be produced in the heat and premixed in cold. The mixture called premixed, having as mineral aggregate composition graduated, stuffing material and the asphalt emulsion compressed in cold. This work will go to approach the premixed in cold of the asphalt mixture, having as objective to compare the results based on assays of the asphalt mixture and the behavior mixture characterization when it prepared with the recycled rubber of old tires. The research seeks to qualify and optimize the performance of the asphalt mixture that will receive the crushed rubber with additions of 3 %, 4 % and 5 % in relation to the total aggregate mineral mass, comparing them with the reference mixture, without the rubber addition. The final destination of the rubber to consist of a great challenge all over the world, in virtue of its peculiarities, as its time of degradation, approximately esteemed in 600 years. Beyond the generated amount nowadays, volume, weight and mainly great difficult of considered alternatives correct ecologically and viable economically. The accomplishment rehearsals based on in a strip premixed in cold, called dense strip, where the specimens were produced on the lab with the cationic asphalt emulsion. The crushed rubber addition and the asphalt emulsion texts had been defined and analyzed after rehearsal of in cold Marshall Dosage. The mixture characteristics and behaviour had been evaluated by the stability, Marshall fluency and asphalt mixture density. In the way, looking for an alternative to attend the Brazilians rules and results of performance of these asphalt paving mixture, it follows that the rubber addition benefits are considerable, where the line with 3 % addition rubber it presented the smallest index of emptiness, to smallest fluency, the biggest stability Marshall, the biggest apparent density, the biggest relationship polish-emptiness and the smallest tenor of emulsion asphalt.

Words key: crushed rubber, asphalt pavements, mixtures asphalt emulsion, performance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Moinho coloidal. ....	29
Figura 2 - Glóbulo de asfalto envolto por íons de emulsificante catiônico.....	30
Figura 3 - Esquema básico de produção de emulsão asfáltica catiônica. ....	32
Figura 4 - A emulsão entra em contato com o agregado. ....	33
Figura 5 - Adsorção do agente emulsificante livre e atração das partículas de asfalto.....	33
Figura 6 - Formação do filme de ligante asfáltico sobre o agregado.....	33
Figura 7 - Trinca na estrutura do pavimento.....	46
Figura 8 - Milhões de pneus dispostos inadequadamente. ....	47
Figura 9 - Esquema da absorção das frações leves de asfalto pela borracha. ....	51
Figura 10 - Ilustração de asfalto modificado por borracha pelo processo via seca ...	52
Figura 11 - Tanques de armazenamento. ....	57
Figura 12 - Coleta da emulsão RL-1C.....	57
Figura 13 - Armazenamentos de agregados graúdo e miúdo da Pedreira Ubarana. ....	58
Figura 14 - Amostra da borracha moída.....	60
Figura 15 - Exemplo de uma análise granulométrica de agregado graúdo. ....	62
Figura 16 - Equipamento utilizado para o ensaio de abrasão Los Angeles.....	63
Figura 17 - Exemplo de agregado para o ensaio de índice de forma.....	64
Figura 18 - Crivo utilizado no ensaio de índice de forma. ....	64
Figura 19 - Amostra para o ensaio de análise granulométrica da borracha. ....	67
Figura 20 - Equipamentos usados no ensaio de análise granulométrica	

dos agregados.....	71
Figura 21 - Amostras de agregado para o ensaio de avaliação da durabilidade.....	74
Figura 22 - Amostras de agregado para o ensaio de adesividade. ....	76
Figura 23 - Representação da composição granulométrica dos materiais.....	79
Figura 24 - Composição granulométrica dos materiais com a adição de 3 % de borracha moída. ....	80
Figura 25 - Composição granulométrica dos materiais com a adição de 4 % de borracha moída. ....	82
Figura 26 - Composição granulométrica dos materiais com a adição de 5 % de borracha moída. ....	83
Figura 27 - Identificação dos corpos-de-prova moldados (1 a 5) do traço de referência. ....	84
Figura 28 - Identificação dos corpos-de-prova moldados (7 a 11) do traço com adição de 3% de borracha.....	85
Figura 29 - Identificação dos corpos-de-prova moldados (12 a 16) do traço com adição de 4 % de borracha.....	85
Figura 30 - Identificação dos corpos-de-prova moldados (17 a 21) do traço com adição de 5 % de borracha.....	86
Figura 31 - Aplicação da parafina fluidificada nos corpos-de-prova.....	86
Figura 32 - Gráfico da densidade aparente dos corpos-de-prova do traço de referência. ....	88
Figura 33 - Densidade aparente dos corpos-de-prova com adição de 3 % de borracha moída. ....	89
Figura 34 - Densidade aparente dos corpos-de-prova com adição de 4 % de borracha moída. ....	91

Figura 35 - Densidade Aparente dos corpos-de-prova com adição de 5 % de borracha moída. ....	92
Figura 36 - Adição do ligante ao agregado. ....	93
Figura 37 - Adição da mistura asfáltica no molde de compactação. ....	93
Figura 38 - Molde de compactação. ....	94
Figura 39 - Compactação do corpo-de-prova. ....	94
Figura 40 - Identificação do corpo-de-prova. ....	95
Figura 41 - Ruptura do corpo-de-prova. ....	95
Figura 42 - Estabilidade Marshall dos corpos-de-prova do traço de referência. ....	96
Figura 43 - Fluência dos corpos-de-prova do traço de referência. ....	97
Figura 44 - Estabilidade Marshall dos corpos-de-prova com a adição de 3 % de borracha moída. ....	98
Figura 45 - Fluência dos corpos-de-prova com a adição de 3 % de borracha moída. ....	99
Figura 46 - Estabilidade Marshall dos corpos-de-prova com a adição de 4 % de borracha moída. ....	100
Figura 47 - Fluência dos corpos-de-prova com a adição de 4 % de borracha moída. ....	101
Figura 48 - Estabilidade Marshall dos corpos-de-prova com a adição de 5 % de borracha moída. ....	102
Figura 49 - Fluência dos corpos-de-prova com a adição de 5 % de borracha moída. ....	103
Figura 50 - Índice de vazios dos corpos-de-prova do traço de referência. ....	105
Figura 51 - Relação Betume Vazios dos corpos-de-prova do traço de referência. .	105
Figura 52 - Índice de vazios dos corpos-de-prova com a adição de 3 % de	

borracha moída. ....	107
Figura 53 - Relação Betume Vazios dos corpos-de-prova com a adição de 3 % de borracha moída. ....	108
Figura 54 - Índice de vazios dos corpos-de-prova com a adição de 4 % de borracha moída. ....	109
Figura 55 - Relação Betume Vazios dos corpos-de-prova com a adição de 4 % de borracha moída. ....	110
Figura 56 - Índice de vazios dos corpos-de-prova com a adição de 5 % de borracha moída. ....	111
Figura 57 - Relação Betume Vazios dos corpos-de-prova com a adição de 5 % de borracha moída. ....	112
Figura 58 - Resultados dos ensaios de índice de vazios de acordo com a norma do DNER 107 (1994). ....	113
Figura 59 - Resultados dos ensaios de fluência de acordo com a norma do DNER 107 (1994). ....	114
Figura 60 - Resultados dos ensaios de estabilidade Marshall de acordo com a norma do DNER 107 (1994). ....	115
Figura 61 - Resultados dos ensaios de densidade aparente de acordo com a norma do DNER 107 (1994). ....	115
Figura 62 - Resultados dos ensaios de relação betume-vazios de acordo com a norma do DNER 107 (1994). ....	116
Figura 63 - Resultados dos ensaios de relação betume-vazios de acordo com a norma do DNER 107 (1994). ....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações das Emulsões Catiônicas – Ensaio sobre a emulsão. ....	37
Tabela 2 - Especificações das Emulsões Catiônicas – Ensaio sobre o resíduo.....	38
Tabela 3 - Classificação do PMF.....	41
Tabela 4 - Granulometria do material de enchimento. ....	44
Tabela 5 - Composição do pré-misturado a frio e suas tolerâncias.....	44
Tabela 6 - Condições para a mistura a frio.....	45
Tabela 7 - Relação entre as terminologias de CRM.....	49
Tabela 8 - Aplicação da Taxa de uso de borracha.....	49
Tabela 9 - Resultado da análise granulométrica dos agregados miúdo.....	72
Tabela 10 - Resultado da análise granulométrica dos agregados graúdo. ....	72
Tabela 11 - Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles do agregado.....	73
Tabela 12 - Resultado do ensaio de índice de forma do agregado.....	74
Tabela 13 - Resultado do ensaio de avaliação da durabilidade do agregado.....	75
Tabela 14 - Análise granulométrica da borracha moída.....	77
Tabela 15 - Composição granulométrica dos materiais do traço de referência.....	78
Tabela 16 - Composição granulométrica dos materiais com a adição de 3 % de borracha moída. ....	80
Tabela 17 - Composição granulométrica dos materiais com a adição de 4 % de borracha moída. ....	81
Tabela 18 – Composição granulométrica dos materiais com a adição de 5 % de borracha moída. ....	83

Tabela 19 - Densidade aparente dos corpos-de-prova do traço de referência. ....	87
Tabela 20 - Densidade aparente dos corpos-de-prova com adição de 3 % de borracha moída. ....	89
Tabela 21 - Densidade aparente dos corpos-de-prova com adição de 4 % de borracha moída. ....	90
Tabela 22 - Densidade aparente dos corpos-de-prova com adição de 5 % de borracha moída. ....	92
Tabela 23 - Estabilidade Marshall e fluência dos corpos-de-prova do traço de referência. ....	96
Tabela 24 - Estabilidade Marshall e fluência dos corpos-de-prova com a adição de 3% de borracha moída. ....	98
Tabela 25 - Estabilidade Marshall e fluência dos corpos-de-prova com a adição de 4 % de borracha moída. ....	100
Tabela 26 - Estabilidade Marshall e fluência dos corpos-de-prova com a adição de 5 % de borracha moída. ....	102
Tabela 27 - Características da mistura dos corpos-de-prova do traço de referência. ....	105
Tabela 28 - Valores especificados por norma e valores obtidos nos ensaios do traço de referência.....	106
Tabela 29 - Características da mistura dos corpos-de-prova com a adição de 3 % de borracha moída. ....	107
Tabela 30 - Valores obtidos nos ensaios do traço com adição de 3 % de borracha moída. ....	108
Tabela 31 - Características da mistura dos corpos-de-prova com a adição de 4 % de borracha moída. ....	109

Tabela 32 - Valores obtidos nos ensaios do traço com adição de 4 % de borracha moída. ....	110
Tabela 33 - Características da mistura dos corpos-de-prova com a adição de 5 % de borracha moída. ....	111
Tabela 34 - Valores obtidos nos ensaios com adição de 5 % de borracha moída. .	112

## LISTAS DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

#	malha
%	porcentagem
”	polegada
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMP	asfalto modificado por polímero
ABNT MB	Associação Brasileira de Normas Técnicas – Método Brasileiro
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
Art.	artigo
ASTM	American Society of Testing Materials
ATR	afundamento de trilha de rodas
CAP	cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	concreto betuminoso usinado a quente
CRM	crumb rubber modifier
cm/min	centímetro por minuto
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	corpo-de-prova
CPA	camadas porosas de atrito
CS <sub>2</sub>	sulfeto de carbono
DECEX	Departamento de Operações de Comércio Exterior
div.	divisões
DMC	dimensão máxima característica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNER-ES	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Especificação de Ensaio
DNER-ME	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de

	Ensaio
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
EA	emulsão asfáltica
ex	exemplo
g	grama
g/cm <sup>3</sup>	grama por centímetro cúbico
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IRI	índice de irregularidade
ISSA	International Sturry Surfacing Association
kg	quilo
kgf	quilograma-força
LA-1C	emulsão asfáltica catiônica para lama asfáltica (tipo 1C)
LA-2C	emulsão asfáltica catiônica para lama asfáltica (tipo 2C)
LA-E	emulsão asfáltica não-iônica para lama asfáltica
m <sup>2</sup>	metro quadrado
Máx.	máximo
mL	mililitro
Mín.	mínimo
mm	milímetro
MR	módulo de resiliência
NBR	norma brasileira
Nº.	número
°C	grau Celsius
PETROBRÁS	Petróleo Brasileiro Sociedade Anônima
pH	potencial hidrogeniônico
PMF	pré-misturado a frio
pol	polegada
R.B.V.	relação betume-vazios
RCD	resíduo de construção e demolição
RL	ruptura lenta
RL-1C	emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (tipo 1C)
rpm	rotações por minuto

RM	ruptura média
RM-1C	emulsão asfáltica catiônica de ruptura média (tipo 1C)
RM-2C	emulsão asfáltica catiônica de ruptura média (tipo 2C)
RR	ruptura rápida
RR-1C	emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida (tipo 1C)
RR-2C	emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida (tipo 2C)
RT	resistência à tração
s	segundo
SAMI	stress absorbing membrane interlayer
SBR	borracha butadieno-estireno
SBS	copolímero estireno-butadieno-estireno
SSF	viscosidade saybolt-furol
TEC	tarifa externa comum
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
V.A.M.	vazios de agregado mineral
V.C.B.	volume cheio betume
Vv	volume de vazios
$\Sigma$	somatória

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	22
<b>2. OBJETIVO</b> .....	26
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	27
3.1 Emulsões Asfálticas .....	29
3.1.1. Processo de Emulsificação .....	31
3.1.2. Classificação das Emulsões.....	32
3.1.3. Tipos de Emulsões.....	34
3.1.4. Vantagens das Emulsões Catiônicas .....	38
3.2. Pré-misturado a Frio.....	39
3.3. Agregados.....	42
3.3.1. Agregado Graúdo.....	42
3.3.2. Agregado Miúdo .....	43
3.3.3. Material de Enchimento.....	43
3.4. Composição da Mistura .....	44
3.5. Borracha Moída .....	45
3.5.1. Processo Via Úmida.....	50
3.5.2. Processo Via Seca .....	52
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	56
4.1. Materiais .....	56
4.1.1. Emulsão Asfáltica.....	56
4.1.2. Agregados .....	57

4.1.3. Borracha .....	58
4.2. Métodos .....	60
4.2.1. Ensaios .....	60
4.2.1.1. Agregados .....	61
4.2.1.1.1. Análise granulométrica .....	61
4.2.1.1.2. Abrasão Los Angeles .....	62
4.2.1.1.3. Índice de forma .....	63
4.2.1.1.4. Avaliação da durabilidade .....	65
4.2.1.1.5. Adesividade .....	65
4.2.1.2. Borracha.....	66
4.2.1.2.1. Análise granulométrica .....	66
4.2.1.3. Mistura asfáltica a frio .....	67
4.2.1.3.1. Ensaio Marshall .....	68
4.2.1.3.2. Densidade aparente.....	68
4.2.1.3.3. Estabilidade Marshall e fluência.....	69
<b>5. RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>71</b>
5.1. Agregados.....	71
5.1.1. Análise Granulométrica .....	71
5.1.2. Abrasão Los Angeles .....	73
5.1.3. Índice de Forma .....	73
5.1.4. Avaliação da Durabilidade.....	74
5.1.5. Adesividade.....	75
5.2. Borracha .....	76
5.2.1. Análise Granulométrica .....	76
5.3. Composição Granulométrica dos Materiais .....	77
5.3.1. Traço de Referência.....	77

5.3.2. Traço com Adição de 3 % de Borracha Moída.....	79
5.3.3. Traço com Adição de 4 % de Borracha Moída.....	81
5.3.4. Traço com Adição de 5 % de Borracha Moída.....	82
5.4. Mistura Asfáltica a Frio.....	84
5.4.1. Densidade Aparente .....	86
5.4.1.1. Traço de referência .....	87
5.4.1.2. Traço com adição de 3 % de borracha moída.....	88
5.4.1.3. Traço com adição de 4 % de borracha moída.....	90
5.4.1.4. Traço com adição de 5 % de borracha moída.....	91
5.4.2. Estabilidade Marshall e Fluência .....	92
5.4.2.1. Traço de referência .....	96
5.4.2.2. Traço com adição de 3 % de borracha moída.....	98
5.4.2.3. Traço com adição de 4 % de borracha moída.....	100
5.4.2.4. Traço com adição de 5 % de borracha moída.....	102
5.4.3. Características da Mistura .....	104
5.4.3.1. Traço de referência .....	104
5.4.3.2. Traço com adição de 3 % de borracha moída.....	107
5.4.3.3. Traço com adição de 4 % de borracha moída.....	108
5.4.3.4. Traço com adição de 5 % de borracha moída.....	110
5.5. Comparação dos Resultados.....	113
5.5.1. Índice de Vazios .....	113
5.5.2. Fluência.....	114
5.5.3. Estabilidade Marshall .....	114
5.5.4. Densidade Aparente.....	115
5.5.5. Relação Betume-Vazios (R.B.V.) .....	116
5.5.6. Teor Ótimo de Emulsão .....	116

<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>119</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>122</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>124</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>132</b>



*CAPÍTULO 1*

***INTRODUÇÃO***

---

# 1. INTRODUÇÃO

Os materiais são partes integrantes da vida do ser humano, uma vez que os produtos são feitos dos materiais que competem entre si na conquista dos mercados atuais e futuros.

Segundo Bertollo (2000) o volume de pneus descartados e estocados nas cidades de Araçatuba, Bauru, Botucatu, Campinas, Limeira, Piracicaba, Presidente Prudente, Ribeirão Preto, Santos, São José do Rio Preto, São Paulo e Sorocaba, concluindo que a geração média anual per capita de pneus/habitante é de aproximadamente seis milhões de pneus que são descartados anualmente no Estado de São Paulo. Pode ser que este número esteja subestimado, pois está abaixo das médias de outros países, nos Estados Unidos, por exemplo, presume-se que 188 milhões de pneus por ano sejam descartados inadequadamente, o que corresponde a 65 % do total de pneus (ANIP, 2007).

Sabendo-se do problema conhecido mundialmente do descarte de pneus inservíveis no meio ambiente, a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), entidade que representa os fabricantes de pneus novos instalados no País, atingiu a marca de 100 milhões de pneus destinados de forma ambientalmente correta em 2005. A marca corresponde a aproximadamente 500 mil toneladas de pneus velhos ou inservíveis que foram coletados e destruídos de forma ambientalmente correta (SOARES, 2007).

Na década de 80, nos Estados Unidos, grandes incêndios de pneus causaram a contaminação do ar, da água e do solo. Com esse problema, surge o interesse no desenvolvimento de pesquisas visando à reutilização de borracha proveniente de pneus inservíveis em obras de engenharia. Em 1991, a Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície obrigou os Departamentos de Transportes Estaduais (DOT) e a Agência de Proteção Ambiental (EPA), em cooperação, a desenvolver mais estudos visando à utilização de pneus na construção de pavimentos asfálticos (ODA, 2002). Dessa forma, os americanos começaram a construir pavimentos asfálticos com adições de borracha moída de pneus descartados: em 1994, cerca de 5 % de pavimentos asfálticos foram

construídos com borracha de pneus descartados moída, em 1995, 10 %; em 1996, 15 % e a partir de 1997, 20% (ODA, 2002).

No Brasil, não há ainda uma lei semelhante que obrigue a utilização de uma porcentagem mínima de pneus descartados em obras de pavimentação. Mas, já ocorreram avanços com a Resolução Nº. 258 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), de 26 de Agosto de 1999, que estabelece o conceito de que o produtor é o responsável pelo destino final do produto. Por exemplo, no caso de pneus, a carcaça voltaria para a montadora.

Pela Resolução Nº. 258 a partir de 1º de janeiro de 2002, produtores e importadores de pneus são obrigados a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional e a partir de 2005 começou a redução do passivo ambiental. Vide resolução do CONAMA (Anexo A).

O reaproveitamento de pneus inservíveis se constitui em todo o mundo em um desafio muito difícil, dadas as suas peculiaridades de degradabilidade (em torno de 600 anos), quantidade, volume e peso e, principalmente, grande dificuldade de lhes propiciar uma nova destinação ecológica e economicamente viável (GRECA, 2003).

A reciclagem é uma alternativa para esta destinação ecológica, que consiste em reutilizar determinado rejeito de forma útil e economicamente viável. No caso em estudo, a borracha misturada ao asfalto não é apenas um produto a mais, inerte, colocado apenas para recheiar, na realidade a borracha é reconhecida mundialmente como um grande melhorador do asfalto.

Segundo Clerman (2004) para a obtenção da borracha, o pneu passa por um processo chamado de regeneração. Nesse processo a borracha é separada dos outros componentes e a malha de aço e o nylon são recuperados como sucata qualificada. Depois desta separação, o pneu é reduzido a pó, isto ocorre, por já haver ocorrido o processo de vulcanização, não podendo ser utilizado como substituto da borracha crua. A borracha vulcanizada é um produto relativamente inerte, de difícil combinação ou ligação com outras substâncias.

Há diversas pesquisas científicas com usos alternativos para estes pneus, tais como, na utilização em concreto de baixo desempenho, estruturas de contenção, produção de artefatos de borracha e sistema de drenagem para aterros sanitários.

De acordo com as pesquisas de Clerman (2004), há estudos realizados em Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) adicionando o ligante asfáltico ou modificado por polímero com adição de borracha. Porém, o uso de concreto betuminoso usinado a quente, vem sendo substituído por emulsões asfálticas, que possibilita estocar a produção em locais para a futura utilização e aplicação.

Segundo a CNT (2007), no Brasil, 52 % das cargas movimentadas são transportadas por rodovias. Com o aumento do volume de transporte e do tráfego, além dos recursos econômicos disponíveis, é interessante buscar alternativas que atendam as especificações de projeto e atinjam um produto final com desempenho satisfatório e que também, seja viável economicamente.

Com isto, surge uma grande preocupação econômica e ambiental, pois todo o descarte de pneus vem se tornando um problema mundial.

Assim, buscando uma alternativa para atender as normas brasileiras quanto aos resultados de ensaios de misturas asfálticas, esse estudo tem o intuito de verificar uma possível alternativa de aplicação do pré-misturado a frio com adição de borracha de pneu em ruas de baixo a médio tráfego.

*CAPÍTULO 2*

**OBJETIVO**

---

## **2. OBJETIVO**

O objetivo desse trabalho é avaliar os resultados dos ensaios da mistura asfáltica com a adição de borracha moída proveniente de pneus usados, com uma mistura de referência sem adições, comparando-as com as especificações vigentes por meio do Método de Ensaio Marshall.

*CAPÍTULO 3*

***REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

---

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada a seguir compreende os temas relacionados ao estudo realizado como a utilização de misturas asfálticas com aplicação de borracha.

#### 3.1. EMULSÕES ASFÁLTICAS

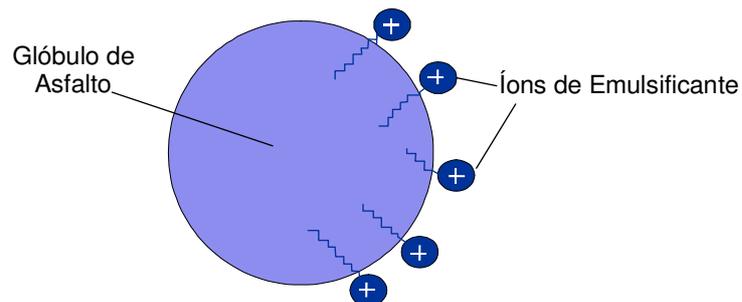
A emulsão asfáltica é uma dispersão coloidal de uma fase asfáltica em uma fase aquosa (direta), ou então, uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica (inversa), com ajuda de um agente emulsificante (DNER, 1996). Normalmente são produzidos por processo mecânico com equipamentos de alta capacidade de cisalhamento como, por exemplo, moinhos coloidais.

O moinho coloidal, ilustrado na figura 1, consiste de um rotor de alta velocidade que gira entre 1000 rpm a 6000 rpm num estator. O espaçamento entre o rotor e o estator é tipicamente de 0,25 mm a 0,50 mm, ajustável (PETROBRÁS e ABEDA, 2008).



**Figura 1** - Moinho coloidal.  
Fonte: PETROBRÁS e ABEDA, (2008).

Nesse 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 (ABEDA, 2001). Assim, quando dois glóbulos de asfalto tentam aproximar-se são repelidos.



**Figura 2** - Glóbulo de asfalto envolto por íons de emulsificante catiônico.  
Fonte: ABEDA, (2001).

Os tamanhos do glóbulo de asfalto dispersos na água variam entre 0,001 mm a 0,020mm de diâmetro. A aparência varia de um líquido de baixa consistência (ex. leite) até a consistência cremosa (ex. mel), a coloração da emulsão é marrom (ABEDA, 2001).

Os glóbulos de asfalto 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 alta, imperando o movimento browniano de partículas.

Segundo ABEDA (2001), pode-se dizer que a produção em escala industrial das emulsões asfálticas, teve início na cidade de Lutterbach, em 1905, com o químico Emile Feigel. Mas foi em 1951, que a Esso de Petróleo, na França deu um passo importante na utilização deste produto, quando colocou à disposição do mercado as emulsões catiônicas.

Atualmente, o maior consumidor mundial de emulsões asfálticas para pavimentos são os Estados Unidos com 2.300.000 toneladas métricas anuais,

seguido da França 1.010.000 toneladas métricas, correspondendo seu emprego a 27 % dos serviços rodoviários. (ABEDA, 2001). Segundo Santana (1993), a produção média anual brasileira nos últimos anos é de 750.000 toneladas de cimento asfáltico de petróleo (CAP), sendo que cerca de 30 % em forma de emulsões catiônicas (único tipo especificado e utilizado no país).

### 3.1.1. Processo de Emulsificação

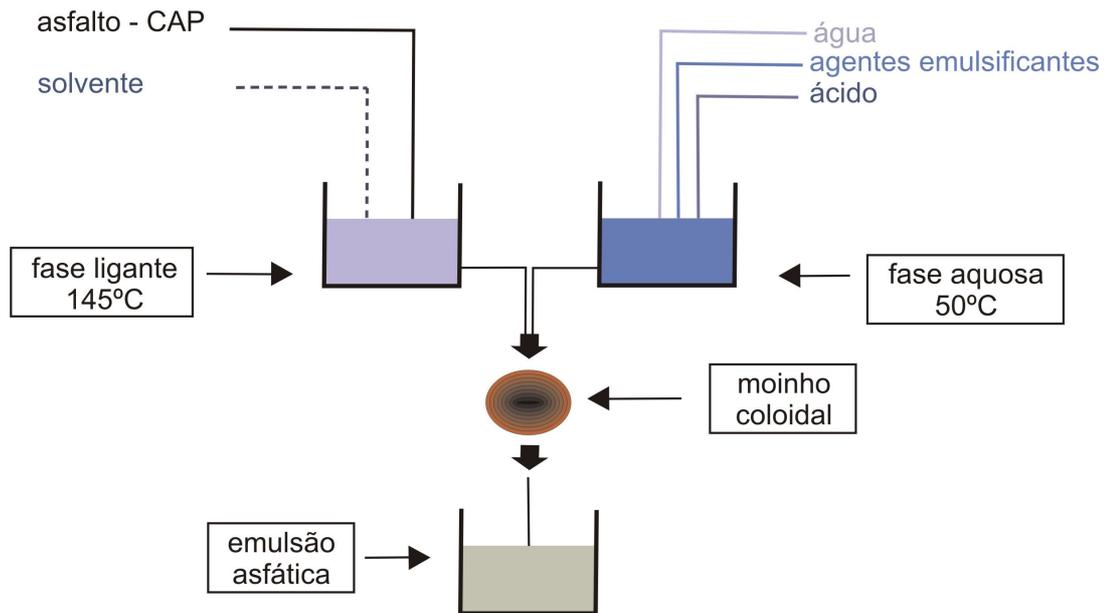
Nesse processo, é necessário que se promova a quebra de cimento asfáltico de petróleo (CAP) em partículas micrométricas e que o mesmo fique disperso no meio aquoso.

Para ocorrer o cisalhamento do cimento asfáltico de petróleo (CAP), ou seja, obter a tensão de cisalhamento do CAP deve ser aplicado uma energia térmica e mecânica através do moinho coloidal, onde se obtém uma emulsão de asfalto em água.

Segundo ABEDA (2001), o cimento asfáltico é aquecido a uma temperatura que varia entre 140 a 145 °C e a fase água, a uma temperatura que varia entre 50 a 60 °C, na qual já se encontram previamente dissolvidos os agentes emulsificantes, cujo principal propósito é evitar que as partículas de asfalto se aglomerem, mantendo as duas fases de equilíbrio durante um período de tempo que pode variar de algumas semanas a alguns meses.

Os agentes emulsificantes são substâncias adicionadas às emulsões para aumentar a sua estabilidade cinética tornando-as razoavelmente estáveis e homogêneas (ABEDA, 2001).

A figura 3 apresenta um esquema simplificado de produção da emulsão asfáltica catiônica.



**Figura 3** - Esquema básico de produção de emulsão asfáltica catiônica.  
Fonte: ABEDA, (2001).

Os agentes emulsificantes conferem cargas elétricas positivas ou negativas, e em alguns casos não conferem ionicidade às emulsões e classifica-as em atômicas, aniônicas e não-iônicas (ABEDA, 2001).

### 3.1.2. Classificação das Emulsões

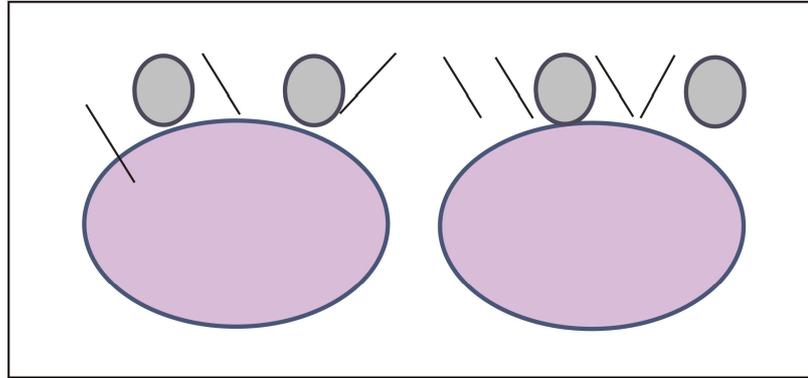
As emulsões são classificadas em função do tempo necessário para que ocorra a separação da fase aquosa da fase asfalto (ruptura), do teor de asfalto contido nas mesmas e da carga iônica.

A ruptura ocorre quando a emulsão entra em contato com o agregado. A velocidade que ocorre esta separação depende (ABEDA, 2001):

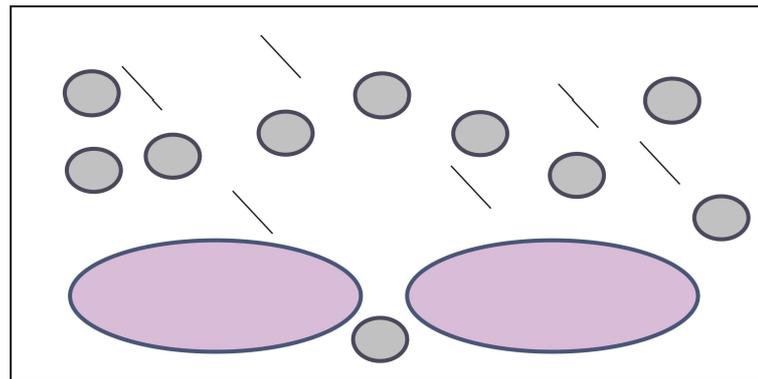
- Do tipo de emulsão;
- Da reatividade em contato com a superfície específica dos agregados;
- Do teor de umidade;
- Da temperatura dos materiais; e,

- Do ambiente.

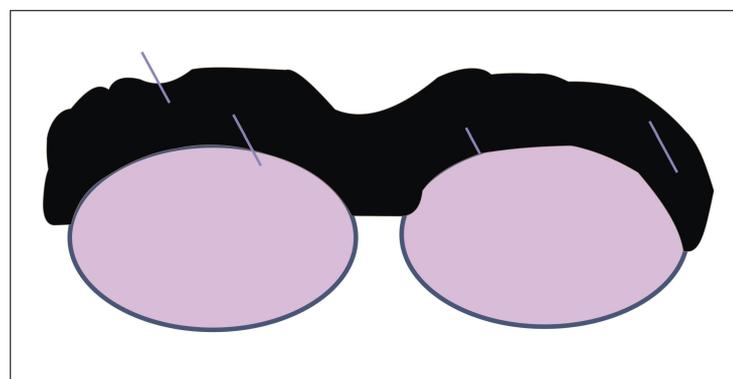
As figuras 4, 5 e 6 ilustram de uma forma esquemática, o efeito da ruptura da emulsão catiônica, quando a mesma entra em contato com o agregado.



**Figura 4** - A emulsão entra em contato com o agregado.  
Fonte: ABEDA, (2001).



**Figura 5** - Adsorção do agente emulsificante livre e atração das partículas de asfalto.  
Fonte: ABEDA, (2001).



**Figura 6** - Formação do filme de ligante asfáltico sobre o agregado.  
Fonte: ABEDA, (2001).

### 3.1.3. Tipos de Emulsões

Segundo a norma do DNER – EM 369 (1997) - Emulsões Asfálticas Catiônicas, as emulsões asfálticas catiônicas têm os símbolos RR, RM e RL, seguidos de uma indicação e da letra C, conforme sua ruptura, viscosidade “*Saybolt-Furol*” e teor de solvente.

Por exemplo, a emulsão com o símbolo RR é do tipo rápida, sua ruptura ocorre imediatamente ou em pouco tempo após seu contato com os agregados.

A emulsão com o símbolo RM é do tipo média, sua ruptura ocorre quando o tempo de exposição é maior que a de ruptura rápida. E a emulsão com o símbolo RL é a do tipo lenta, sua ruptura ocorre de modo prolongado em relação aos dois tipos, podendo ser misturada com agregados em presença de material fino (pó-de-pedra).

Dependendo da quantidade de cimento asfáltico envolvido na fabricação das emulsões, elas podem se classificar em 1C e 2C, onde a terminologia C indica o tipo de emulsão catiônica e os números 1 e 2 estão associados à viscosidade relativa e a quantidade de cimento asfáltico empregado na fabricação.

De acordo com as normas brasileiras do DNER, pode-se resumir a classificação das emulsões asfálticas nos seguintes tipos e classificações:

- a) RR-1C - emulsão asfáltica catiônicas de ruptura rápida, que apresenta no mínimo 62 % de teor de cimento asfáltico e viscosidade “*Saybolt-Furol*” (50 °C) entre 20 e 90 segundos, ou seja, apresenta baixa consistência. Seu maior campo de aplicação está no serviço de pintura de ligação entre camadas asfálticas, seguindo de tratamentos superficiais por penetração;
- b) RR-2C - emulsão asfáltica catiônicas de ruptura rápida, que apresenta no mínimo 67 % de teor de cimento asfáltico e viscosidade “*Saybolt-Furol*” (50 °C) entre 100 e 400 segundos, ou seja, apresenta alta consistência. Seu maior campo de aplicação está nos serviços de tratamentos superficiais seguido de pintura de ligação entre camadas asfálticas;

- c) RM-1C - emulsão asfáltica catiônicas de ruptura média, que apresenta no mínimo 62 % de teor de cimento asfáltico e viscosidade “*Saybolt-Furol*”(50 °C) entre 20 e 200 segundos, ou seja, apresenta baixa consistência. Seu maior campo de aplicação está na produção de pré-misturado a frio (PMF) seguido de pintura de ligação entre camadas asfálticas e areia-asfalto a frio;
- d) RM-2C - emulsão asfáltica catiônicas de ruptura média, que apresenta no mínimo 65 % de teor de cimento asfáltico e viscosidade “*Saybolt-Furol*” (50 °C) entre 100 e 400 segundos, ou seja, apresenta alta consistência. Seu maior campo de aplicação está na produção de pré-misturado a frio (PMF) aberto seguido de pintura de ligação entre camadas asfálticas e areia-asfalto a frio;
- e) RL-1C - emulsão asfáltica catiônicas de ruptura lenta, que apresenta no mínimo 60 % de teor de cimento asfáltico e viscosidade “*Saybolt-Furol*” (50 °C) no máximo de 70 segundos, ou seja, apresenta baixa consistência. Seu maior campo de aplicação está na produção de pré-misturado a frio (PMF) denso seguido de lama asfáltica, areia-asfalto a frio e estabilização solo-emulsão;
- f) LA-1C e LA-2C - emulsão asfáltica catiônicas para lama asfáltica, que apresenta no mínimo 58 % de teor de cimento asfáltico e viscosidade “*Saybolt-Furol*” (50 °C) no máximo de 100 segundos, ou seja, apresenta baixa consistência. Seu maior campo de aplicação está na produção de lama asfáltica e estabilização solo-emulsão;
- g) LA-E - emulsão asfáltica não-iônica para lama asfáltica, que apresenta no mínimo 58 % de teor de cimento asfáltico e viscosidade “*Saybolt-Furol*” (50 °C) no máximo de 100 segundos, ou seja, apresenta baixa consistência. Seu maior campo de aplicação está na produção de lama asfáltica e estabilização solo-emulsão;
- h) Emulsão Asfáltica com Polímero SBS (DNER-EM 396, 1999) - emulsão catiônica modificada, contendo, no mínimo 62 % de asfalto modificado por polímero (AMP) com SBS a qual contém no mínimo 3 % de polímero em peso de AMP e viscosidade SSF (25 °C) entre 20 e 100

segundos. O polímero é incorporado diretamente no asfalto a altas temperaturas antes da emulsificação em condições tecnológicas específicas. Seu maior campo de aplicação está na produção de micro revestimento asfáltico a frio com emulsão de asfalto modificado por polímero SBS, segundo as especificações do DNER;

- i) Emulsão Asfáltica com Polímero SBR (DNER-EM 396, 1999) - emulsão catiônica modificada, contendo, no mínimo 62 % de asfalto modificado por polímero (AMP) SBS com no mínimo 3 % de polímero em peso de AMP e viscosidade SSF (25 °C) entre 20 e 100 segundos. Seu maior campo de aplicação está na produção de micro revestimento asfáltico a frio segundo as especificações da ISSA – *International Sturry Surfacing Association*;
- j) Emulsão Asfáltica com Polímero SBS para pintura de ligação (DNER-ES 395,1999) - emulsão catiônica modificada por polímero SBR ou SBS, contendo, no mínimo 50 % de asfalto modificado por polímero e viscosidade SSF (25 °C) entre 20 e 100 segundos. Empregada em pintura de ligação sobre a superfície imprimada, ou revestimento betuminoso anterior à execução de uma camada betuminosa qualquer; e,
- k) Emulsões para Reciclagem a Frio – são agentes de reciclagem emulsionados catiônicos (com exceção do ARE-1, sobre o qual não se aplica o ensaio de carga de partícula), com, no mínimo, 60 % de agentes de reciclagem, contendo ou não polímeros, e viscosidade SSF (25 °C) no máximo de 70 segundos. Seu emprego é na reciclagem a frio dos revestimentos asfálticos para recuperar as características físico-químicas originais do ligante asfáltico e formuladas de acordo com o projeto, específico para cada obra.

As emulsões asfálticas devem ser homogêneas, não devem apresentar separação da fase asfáltica após uma vigorosa agitação, dentro de trinta dias da data de carregamento.

As emulsões asfálticas devem atender as condições específicas apresentadas nas tabelas 1 e 2.

**Tabela 1** - Especificações das Emulsões Catiônicas – Ensaio sobre a emulsão.

Características	Métodos de Ensaio	Tipos				
		Ruptura Rápida		Ruptura Média		Ruptura Lenta
		1C	2C	1C	2C	1C
a) Viscosidade Saybolt-Furol: SSF a 50° C	NBR 14491	20-90	100-400	20-200	100-400	Máx. 70
b) Sedimentação, 5 dias, % em peso máximo por diferença	DNER ME 006	5	5	5	5	5
c) Peneiração (retido na peneira 0,84 mm) % máximo, em peso	DNER ME 005	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
d1) Resistência à água, % mínimo de cobertura: Agregado seco	DNER	80	80	80	80	80
d2) Resistência à água, % mínimo de cobertura: Agregado úmido	ME 059	80	80	60	60	60
e) Mistura com cimento % máximo	DNER ME 007	-	-	-	-	2
ou mistura com fíler silício	DNER ME 008	-	-	-	-	1,2-2,0
f) Carga da partícula	DNER ME 002	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva
g) pH, máximo	DNER ME 149	-	-	-	-	6,5
h1) Destilação: Solvente destilado, % em volume sobre o total da emulsão	NBR 6568	0-3	0-3	0-20	0-12	-
h2) Destilação: Solvente destilado, Resíduo, % mínimo, em peso		62	67	62	65	60
i1) Desmulsibilidade, % peso mínimo	DNER	50	50	-	-	-
i2) Desmulsibilidade, % peso Máximo	ME 063	-	-	50	50	-

Fonte: DNER EM 369, (1997).

**Tabela 2** - Especificações das Emulsões Catiônicas – Ensaio sobre o resíduo.

Características	Métodos de Ensaio	Tipos				
		Ruptura Rápida		Ruptura Média		Ruptura Lenta
		1C	2C	1C	2C	1C
a) Penetração a 25 °C, 100 g, 5s, 0,1 mm	DNER ME 003	50-250	50-250	50-250	50-250	50-250
b) Teor de betume, % mínimo em peso	DNER ME 010	97	97	97	97	97
c) Ductibilidade a 25°C, 5 cm/min, cm, mínimo	DNER ME 163	40	40	40	40	40

Fonte: DNER EM 369, (1997).

As emulsões asfálticas são utilizadas a frio, proporcionando ganhos de logística e redução de custos de estocagem, aplicação e transporte. Sua utilização é compatível com praticamente todos os tipos de agregados, obtendo ótimos resultados. Pode também ser aplicada com agregados úmidos, sem necessidade de aditivos melhoradores de adesividade (PETROBRÁS, 2006).

De acordo com a PETROBRÁS (2006), a verificação da cor das emulsões asfálticas é uma característica que se transforma em elemento auxiliar para inspeção visual e constatação rápida das boas condições do produto. Após a ruptura prevalece a cor preta do CAP.

#### 3.1.4. Vantagens das Emulsões Catiônicas

Segundo ABEDA (2001), as principais vantagens das emulsões catiônicas estão sendo apresentadas a seguir:

- a) Representam uma alternativa para economia de energia, uma vez que, na maioria dos casos, pode ser empregada sem necessidade de aquecimento;

- b) Apresenta excelente afinidade com todos os tipos de agregados eliminando o uso de aditivos “dopes”, normalmente empregados para melhorar a adesividade do cimento asfáltico de petróleo (CAP) em misturas a quente com agregados;
- c) Possibilitam a utilização de agregados úmidos evitando a necessidade de combustíveis para a secagem dos mesmos;
- d) Permitem estocagem à temperatura ambiente em instalações simples que não requerem fonte de aquecimento, combustíveis derivados de petróleo e isolamento térmico;
- e) Eliminam os riscos de incêndio e explosões, uma vez que não são utilizados solventes de petróleo em seu emprego;
- f) Evitam os riscos de acidentes por queimaduras;
- g) Não geram vapores tóxicos e poluentes preservando o meio ambiente (produto ecologicamente correto); e,
- h) Possibilitam a produção de grandes volumes de misturas de equipamentos de baixo custo e de fácil operação / distribuição.

Além desses parâmetros técnicos, operacionais, econômicos e ambientais, o avanço na tecnologia de modificação dos asfaltos tem favorecido o aumento do seu consumo em nível mundial, principalmente em tratamentos de superfícies de rolamento, empregando emulsões com polímeros para a melhoria do desempenho dos pavimentos frente às ações do tráfego e do clima.

### 3.2. PRÉ-MISTURADO A FRIO

Pré-misturado a frio é a mistura executada a temperatura ambiente em usina apropriada, composta de agregado mineral graduado, material de enchimento (fíler) e emulsão asfáltica espalhada e comprimida a frio (DNER ES 317,1997).

O pré-misturado a frio pode ser empregado como revestimento, base, regularização ou reforço de pavimento e é de fácil produção, sendo muito utilizados por prefeituras municipais na pavimentação de ruas, em serviços de rotina de conservação, denominados de “tapa-buracos”.

Os materiais constituintes do pré-misturo a frio são o agregado mineral e a emulsão asfáltica e devem satisfazer às especialidades aprovadas pelo DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

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).

Nos Estados Unidos, até hoje, demonstra-se pouco interesse na utilização de misturas a frio com Emulsão Asfáltica como uma alternativa às misturas a quente em áreas de tráfego intenso ou onde há usinas de misturas a quente disponíveis. Isto é uma conseqüência das limitações das misturas a frio com respeito às condições climáticas e de lenta cura. Em áreas rurais, onde não há usinas de mistura a quente e onde altos custos de transporte de combustível e outros materiais seriam esperados, misturas com Emulsão Asfálticas oferecem boas vantagens (AIKMAN, 2006).

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

No Brasil, segundo a ABEDA (2001) a classificação do Pré-Misturado a Frio (PMF) abrange a granulometria (quantidade de argamassa e de agregados) e a quantidade de vazios. Tradicionalmente, os PMF são classificados em três classes quanto a seu volume de vazios ( $V_v$ ), como pode ser observado na tabela 3.

**Tabela 3 - Classificação do PMF.**

<b>Denominação</b>	<b>% Vazios</b>
Aberto	22 a 30
Semi Densos	15 a 22
Densos	5 a 15

Fonte: ABEDA, (2001).

De acordo com 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) e com o início do tráfego, haverá uma maior diminuição no volume de vazios das misturas a frio do que nas misturas a quente.

Segundo a ABEDA (2001), o PMF aberto pode ser armazenado por períodos maiores que o PMF denso, (em geral, até 30 dias, desde que devidamente estocado em pilhas e protegido com lonas impermeáveis). Essa característica proporciona flexibilidade na programação do serviço, ou seja, pode-se priorizar a fase de produção da massa asfáltica e, posteriormente, a aplicação na pista. Além disso, apresenta a vantagem de liberação imediata da camada executada ao tráfego, permitindo a construção da obra por etapas.

Já as emulsões de ruptura lenta são responsáveis pela produção de PMF do tipo denso, com aparência de concreto asfáltico a quente (ABEDA, 2001).

Devido ao baixo índice de vazios, este revestimento apresenta excelente comportamento estrutural e funcional para vias de médio volume de tráfego, conferindo bom desempenho tanto do ponto de vista mecânico como de acabamento de superfície, proporcionando excelente conforto ao rolamento (ABEDA, 2001).

De acordo com as normas do DNER, entre os diversos métodos de dosagens existentes, salienta-se a dosagem Marshall como o mais utilizado no Brasil (DNER ME 107, 1994). Esse método foi adaptado para misturas a frio sendo conhecido como Marshall Modificado.

Waller Jr. (1980) recomenda que o teor de emulsão asfáltica utilizado pertença aos seguintes intervalos:

- De 5 a 10 % para misturas densas; e,
- De 5 a 8 % para misturas abertas.

A norma DNER ME 107 (1994) recomenda 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).

Outra recomendação da DNER 107 (1994) - Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica - Ensaio Marshall, é a cura de duas a seis horas antes da compactação para emulsões dos tipos RR e RM e de no máximo uma hora para as do tipo RL.

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).

As vantagens do uso de misturas a frio com emulsões asfálticas são: fácil estocagem, elevada capacidade de suporte e é menos agressiva ao meio ambiente por não necessitar de aquecimento.

As utilizações de misturas a frio vêm sendo cada vez mais difundidas no meio da tecnologia de materiais. Apresentando como solução alternativa na execução de bases e revestimentos asfálticos, devido principalmente a rapidez de execução.

### 3.3. AGREGADOS

#### 3.3.1. Agregado Graúdo

Segundo o DNER-ES 317 (1997), o agregado graúdo pode ser de pedra britada, seixo rolado, britado ou não, devendo ser constituído por fragmentos sãos,

duráveis, livres de torrões de argila e substâncias nocivas e devem apresentar as seguintes características:

- a) Segundo a norma DNER-ME 035 (1998), o desgaste Los Angeles deve ser igual ou inferior a 40 %, admitindo agregados com valores maiores, no caso de emprego anterior terem apresentado desempenho satisfatório;
- b) Segundo a norma DNER-ME 086 (1994), o índice de forma deve ser superior a 0,5 %;
- c) Segundo a norma DNER-ME 089 (1994), a durabilidade dos agregados deve apresentar perda inferior a 12 %;
- d) Segundo a norma DNER-ME 083 (1994), a granulometria dos agregados deve obedecer às faixas especificadas na tabela 5; e,
- e) Segundo as normas DNER-ME 059 (1994), mantendo a adoção pelo processo de referência da norma ABNT NBR 6300 (2001), a adesividade deve ser superior a 90 %.

### 3.3.2. Agregado Miúdo

O agregado miúdo pode ser areia, pó-de-pedra ou a mistura de ambos. As suas partículas individuais devem ser resistentes, apresentar moderada angulosidade, estarem livres de torrões de argila e de substâncias nocivas e apresentar: o equivalente de areia igual ou superior a 55 %. (DNER-ME 054, 1997).

### 3.3.3. Material de Enchimento

Deve ser constituído por materiais finamente divididos, não plásticos, tais como: cimento Portland, cal extinta, pó calcário, etc., e que atendam a seguinte granulometria (tabela 4), quando ensaiados pelo método DNER-ME 083 (1994).

**Tabela 4** - Granulometria do material de enchimento.

Peneiras nº.	mm	% mínima passando
40	0,42	100
80	0,175	95
200	0,075	65

Fonte: DNER EM 083, (1994).

### 3.4. COMPOSIÇÃO DA MISTURA

De acordo com a norma DNER ES 317 (1997), a composição do pré-misturado a frio deve satisfazer aos requisitos, com as respectivas tolerâncias, no que diz respeito à granulometria e aos percentuais de ligante betuminoso, conforme a tabela 5.

**Tabela 5** - Composição do pré-misturado a frio e suas tolerâncias.

Peneiras		% mínima passando				Tolerâncias da faixa de projeto
Pol.	mm	A	B	C	D	
1"	25,4	100	-	100	-	±7%
3/4"	19,1	75-100	100	95-100	100	±7%
1/2"	12,7	-	75-100	-	95-100	±7%
3/8"	9,5	30-60	35-70	40-70	45-80	±7%
Nº. 4	4,8	10-35	15-40	20-40	25-45	±5%
Nº. 10	2,0	5-20	10-25	10-25	15-30	±5%
Nº. 200	0,075	0-5	0-5	0-8	0-8	±2%
<i>Betume solúvel no CS<sub>2</sub></i>		4-6	4-6	4-6	4-6	±2%

Fonte: DNER ES 317, (1997).

Deverá ser utilizado o Método Marshall modificado (DNER ME 107, 1994) para as misturas a frio, para verificação das condições de vazios, estabilidade e fluência, atendendo os valores demonstrados na tabela 6.

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

Os resultados obtidos desse ensaio são: a estabilidade Marshall e a fluência Marshall.

A estabilidade Marshall é definida como sendo a resistência máxima à compressão radial, apresentada pelo corpo-de-prova, quando moldado e ensaiado de acordo com o processo estabelecido neste método, sendo expressa em Kgf e a fluência Marshall é definida como sendo a deformação total apresentada pelo corpo-de-prova, desde a aplicação de carga inicial nula até a aplicação da carga máxima, expressa em milímetros.

**Tabela 6** - Condições para a mistura a frio.

<b>Porcentagem de Vazios (%)</b>	<b>Estabilidade mínima (Kgf)</b>		<b>Fluência Marshall (mm)</b>
5 a 30	250 (75 golpes)	150 (50 golpes)	2,0 – 4,5

Fonte: DNER ES 317, (1997).

### 3.5. BORRACHA MOÍDA

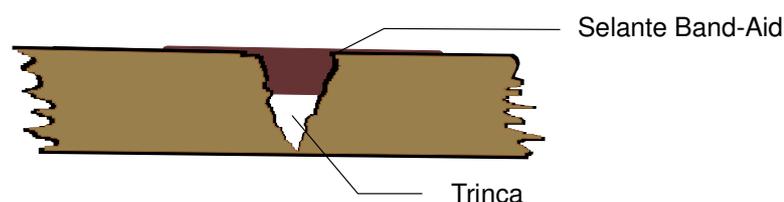
O processo de vulcanização da borracha foi descoberto casualmente por Charles Goodyear, em 1839, ao deixar cair enxofre em uma amostra de borracha

que estava sendo aquecida. Com isto foi descoberto em material mais resistente e elástico, cuja demanda se multiplicou no mundo todo (GOODYEAR, 1999).

A idéia do uso de borracha de pneu iniciou na Inglaterra por volta de 1898, originando um produto chamado de “*rubber-bitumen*” (SPECHT, 2004). 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.

Historicamente, a utilização do asfalto borracha começou na década de 40, quando a Companhia de Reciclagem de Borracha, *U.S. Rubber Reclaiming Company*, introduziu no mercado um produto composto de material asfáltico e borracha desvulcanizada reciclada denominada “*Ramflex*” (GRECA, 2003).

Charles H. MacDonald, é considerado o pai do Asfalto Borracha nos Estados Unidos. Em 1963, ele desenvolveu um material altamente elástico para ser utilizado na manutenção de pavimentos asfálticos. O produto era composto de ligante asfáltico e 25 % de borracha moída de pneu (de 0,6 a 1,2 mm), misturados a 190 °C durante 20 minutos, para ser utilizados em remendos, conhecidos como “*band-aid*” (GRECA, 2003). Esse “*band-aid*” também foi utilizado como selante de trincas (figura 7) e como camada de reforço (através do processo denominado *Stress Absorbing Membrane Interlayer, SAMI*). A primeira aplicação foi feita em uma rua na cidade de Phoenix, onde se pôde verificar que após seis anos, o pavimento não apresentava a formação de trincas de reflexão. MacDonald continuou seu trabalho experimental na cidade de Phoenix, juntamente com a empresa *Atlos Rubber Inc.*, onde foram construídos trechos no *Phoenix Sky Harbor International Airport*, em 1966 (ODA, 2002).



**Figura 7** - Trinca na estrutura do pavimento.  
Fonte: Oda, (2002).

A partir da década de 80, a adição de borracha de pneus usados em misturas asfálticas passou a ser considerada também uma alternativa excelente para diminuir os problemas ambientais causados pela disposição de resíduos sólidos (figura 8). Até o início da década de 90 já existia m cerca de 16.000 quilômetros de rodovias construídas com o asfalto-borracha. Em 1991, foi formulada a Lei sobre a Eficiência do Transporte Intermodal de Superfície (Section 1038 - *Intermodal Surface Transportation Efficiency Act - Public Law 102-240*), que obrigava os Departamentos de Transportes e de Proteção Ambiental a desenvolverem estudos para utilizar borracha de pneus descartados em materiais para pavimentação (ODA, 2002).



**Figura 8** - Milhões de pneus dispostos inadequadamente.  
Fonte: Oda, (2001).

Segundo dados divulgados por Echimenco (2001), no início deste século havia um passivo ambiental em torno de 100 milhões de pneumáticos inservíveis abandonados no país, querem estocados ou relegados em áreas abertas, ao qual, este autor previu anualmente, seriam somados cerca de 17 milhões de unidades.

Em 2006, segundo a ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, o Brasil produziu 54,5 milhões de pneus e o volume de vendas chegou

a 57,2 milhões de pneus, este valor inclui a quantidade de pneus importados no ano de 2006 (ANIP, 2007).

Atualmente, há interesse por misturas de asfalto, não com massa, mas com fragmentos de borracha, que consistem de partículas de borracha vulcanizada. O processo de vulcanização converte uma massa de moléculas linear a uma rede tridimensional, o que confere conformação permanente aos objetos (CLERMAN, 2004).

A borracha constituinte do pneu possui excelentes propriedades físico-químicas para ser incorporada ao ligante convencional, trazendo uma série de melhorias que se refletem diretamente na durabilidade do pavimento, a saber: a incorporação de agentes anti-oxidantes e inibidores da ação de raios ultravioleta que diminuem, sensivelmente, o envelhecimento do CAP, o aumento da resistência à ação química de óleos e combustíveis, a diminuição da suscetibilidade térmica e o aumento da deformação de tração admissível (melhorando o comportamento à fadiga), GRECA (2003).

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. De acordo com Clerman (2004), conflitos entre terminologias causaram dificuldades para compreensão e comparação de dados entre órgãos rodoviários.

Segundo GRECA (2003) duas são as maneiras mais empregadas de adição da borracha de pneus às misturas asfálticas:

- **Via seca**, a borracha é introduzida diretamente no misturador da usina de asfalto. Neste caso a borracha entra como um agregado na mistura. A transferência de propriedades importantes da borracha ao ligante é prejudicada, embora seja possível agregar melhorias à mistura asfáltica, desde que na sua fabricação seja possível obter uma mistura homogênea; e,
- **Via úmida**, a borracha é previamente misturada ao ligante, modificando-o permanentemente. Nesta modalidade ocorre a transferência mais efetiva das características de elasticidade e resistência ao envelhecimento para o ligante asfáltico original.

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 7 sintetiza estas definições.

**Tabela 7 -** Relação entre as terminologias de CRM.

Material	Processo	Tecnologia	Produto
CRM	Via úmida	McDonald	Ligante modificado (asfalto borracha)
		Contínuos Blending	
	Via seca	Plus Ride	Borracha Agregado (concreto asfáltico modificado por borracha)
		Genérico	
		Chunk Rubber	

Fonte: Adaptado de Heitzman, (1992).

Na tabela 8 é apresentada a aplicação da taxa de uso da borracha de e sua respectiva quantidade.

**Tabela 8 -** Aplicação da Taxa de uso de borracha.

Local de Aplicação	Quantidade
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 <sup>2</sup>
Ligante-asfalto-borracha (via úmida)	5 % a 25 % sobre a porcentagem de ligante asfáltico
Agregado-borracha (via seca)	3 % a 5 % de borracha moída, em relação à massa total de agregados minerais

Fonte: Adaptado de Oda et.al, (2005).

### 3.5.1. Processo Via Úmida

Para melhor compreender a interação ligante-asfalto-borracha são necessários alguns conceitos que facilitam a compreensão 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.

Segundo Clerman (2004), o fracionamento químico denominado SARA separa os componentes do CAP em quatro grandes grupos:

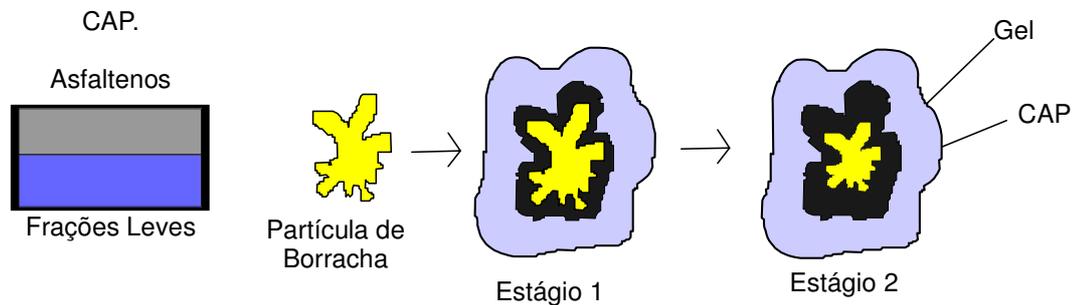
- Os hidrocarbonetos Saturados: representam 5 a 20 % do asfalto e constitui a fração menos susceptível à oxidação;
- Os hidrocarbonetos Aromáticos: possuem o menor peso molecular e formam a maior proporção de asfalto: 40 a 65 %. Possuem uma baixa polaridade e formam um líquido que age como um dispersante para os asfaltenos;
- 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; e,
- 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 três primeiras frações formam os maltenos.

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 (TREOLAR, 1975).

Com o amolecimento da borracha, o CAP irá se difundir dentro de cada partícula de borracha, aumentando a dimensão das redes de borracha até atingir o equilíbrio. 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 asfalto, alterando as propriedades reológicas e de coesão do asfalto residual (SINGLETON *et al*, 2000). A figura 9 esquematiza o processo.



**Figura 9** - Esquema da absorção das frações leves de asfalto pela borracha.  
Fonte: Holleran e Reed, (2000).

A 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. Dependendo da compatibilidade entre esses dois materiais, a borracha, por ser um material elástico, possibilita modificar as propriedades do ligante asfáltico (HEITZMAN, 1992).

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. Sendo observado:

- A redução significativa na reflexão de trincas, mesmo nas estradas com tráfego pesado e intenso;
- A redução de ruído em áreas urbanas; e,
- Um desempenho excelente quanto ao fissuramento e afundamento de trilhas de roda levando a um aumento de durabilidade do pavimento.

Além desses, o asfalto borracha apresenta uma ótima relação custo versus tempo. Esses projetos exigiram menos manutenções que aqueles de asfalto convencional, mesmo após dez anos de serviço.

### 3.5.2. Processo Via Seca

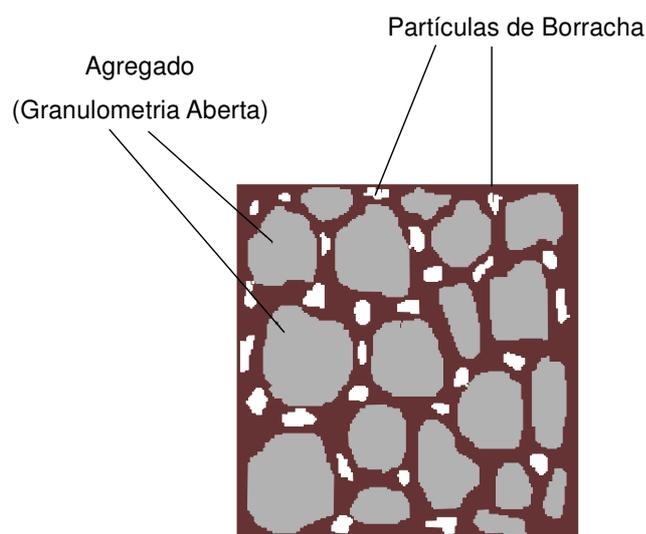
Para Heitzman (1992), o processo seco é definido como qualquer método de adicionar borracha diretamente na mistura a quente, ou seja, pré-misturando a borracha ao agregado aquecido antes da mistura com o asfalto.

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

Segundo 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.

Segundo Clerman (2004), 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.

A figura 10 ilustra a mistura asfáltica com adição de borracha como parte do agregado.



**Figura 10** - Ilustração de asfalto modificado por borracha pelo processo via seca, onde a borracha são as partículas em branco, presentes na mistura.

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).

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, conforme CLERMAN (2004).

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, segundo PINHEIRO e SOARES (2003).

Em 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 emulsão asfáltica. 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 (CLERMAN, 2004).

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 Módulo de Resiliência (MR) e Resistência a Tração (RT) e desempenho em campo para misturas asfálticas a quente executadas em Louisiana, Estados Unidos. De acordo com a classificação do PMF, as misturas abertas com borracha (que possui de 22 a 30 % de vazios) apresentam valores de fluência maiores que os das misturas de controle, enquanto que as misturas densas (que possui de 5 a 15 % de vazios) apresentam 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 RT e MR

para as misturas convencionais que para as misturas com borracha para as temperaturas de 5, 25 e 40 °C. As seções construídas com borracha apresentaram melhor desempenho quanto ao afundamento de trilha de rodas (ATR), fissuramento, e Índice de Irregularidade (IRI) que as seções correspondentes mesmo após cinco a sete anos de tráfego.

*CAPÍTULO 3*

***MATERIAIS E MÉTODOS***

---

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo deverá ser executada uma faixa de pré-misturado a frio, onde os corpos-de-prova serão produzidos em laboratório com emulsão asfáltica catiônica. A adição da borracha moída e os teores de emulsão asfáltica serão definidos e analisados após ensaio de Dosagem Marshall a Frio, segundo DNER-ME 107 (1994).

As características e o comportamento das misturas serão avaliados por meio da densidade da mistura asfáltica, da estabilidade e da fluência Marshall.

Todos os ensaios serão realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais do Centro Tecnológico da Fundação Paulista, na cidade de Lins/SP, seguindo as normas pertinentes descritas a seguir.

### 4.1. MATERIAIS

#### 4.1.1. Emulsão Asfáltica

A emulsão asfáltica será fornecida pela empresa Asfaltos Califórnia Ltda. A emulsão utilizada escolhida nesse trabalho será a catiônica de ruptura lenta (RL-1C).

Nas figuras 11 e 12 têm-se os tanques de armazenamento da emulsão RL-1C.



**Figura 11** - Tanques de armazenamento.



**Figura 12** - Coleta da emulsão RL-1C.

#### 4.1.2. Agregados

Os agregados que serão utilizados nessa pesquisa são derivados de basalto, oriundos de uma pedreira próxima à cidade de Lins, denominada de Pedreira Ubarana.

A figura 13 ilustra o armazenamento dos agregados: miúdo e graúdo na Pedreira Ubarana. As coletas dos agregados serão realizadas por um técnico do Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro Tecnológico da Fundação Paulista.



**Figura 13** - Armazenamentos de agregados graúdo e miúdo da Pedreira Ubarana.

#### 4.1.3. Borracha

A regeneração da borracha envolve sua separação em estado vulcanizado dos demais componentes, e a sua digestão com vapor e produtos químicos, cujo produto é refinado em moinhos até a obtenção de uma manta uniforme, ou ainda extrudado para obtenção de material granulado. A regeneração é realizada por vários processos degradativos - alcalino, ácido, mecânico e vapor superaquecido. Na regeneração, os resíduos passam por modificações que os tornam mais plásticos e aptos a receber nova vulcanização, mas não têm as mesmas propriedades da borracha crua original sendo, geralmente, misturado a ela para a fabricação de artefatos. No processo de regeneração, utilizado para pneus, a borracha é separada dos outros componentes, o arame e a malha de aço são recuperados como sucata de ferro e o tecido de nylon também é recuperado (NOHARA, *et al* 2005).

Segundo Greca (2003), um pneu normalmente é composto por:

- Estrutura em aço, nylon, fibra de aramid, rayon, fibra de vidro e/ou poliéster;
- Borracha natural e sintética, incorporando aí centenas de tipos diferentes de polímeros;
- Reforçadores químicos, como carbono preto, sílica e resinas;
- Anti-degradantes: ceras de parafina antioxidantes e inibidoras da ação do gás ozônio;
- Promotores de adesão: sais de cobalto, banhos metálicos nos arames e resinas;
- Agentes de cura: aceleradores de cura, ativadores, enxofre; e,
- Produtos auxiliares no processamento dos pneus como óleos.

Um pneu típico, como o modelo P195/75R14, para veículos de passeio possui (GRECA, 2003):

- 2,50 kg de 30 diferentes tipos de borracha sintética;
- 2,05 kg de 8 tipos diferentes de borracha natural;
- 2,27 kg de 8 tipos de carbono preto;
- 0,68 kg de aço para o cinturão;
- 0,45 kg de poliéster e nylon;
- 0,23 kg de arame de aço; e,
- 1,36 kg de 40 tipos diferentes de componentes químicos, ceras, óleos, pigmentos, etc.

Verifica-se, do total de 9,54 kg aproximados de um pneu, praticamente a metade é borracha natural ou sintética.

A borracha moída que será utilizada nesse trabalho é oriunda de uma empresa do interior do Estado de São Paulo. Essa borracha é proveniente de pneus descartados, sendo 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 de alta pressão. A borracha cisalhada é obtida com o término de um processo de secagem. O material obtido trata-se de uma borracha granular, sendo este coletado conforme mostra a figura 14.



**Figura 14** – Amostra da borracha moída.

## 4.2. MÉTODOS

Esse trabalho será desenvolvido baseado numa metodologia de experimentação, para a determinação e análise dos diversos parâmetros envolvidos no processo. Uma série de ensaios preliminares serão realizados para comparar os resultados de ensaio de uma mistura asfáltica com adição de pneu com a de uma mistura de referência, sem a adição de borracha moída.

Os ensaios laboratoriais serão realizados de acordo com as normas do DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem publicado pelo DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes.

### 4.2.1. Ensaios

Atendendo a norma do DNER ES-317 (1997) - Pavimentação – pré-misturado a frio, segue a relação de todos os ensaios realizados nesse estudo, tais como: análise granulométrica, abrasão Los Angeles, índice de forma, avaliação da durabilidade, adesividade, ensaio Marshall (estabilidade e fluência) e densidade aparente.

#### 4.2.1.1. Agregados

Nos sub-itens: 4.2.1.1.1, 4.2.1.1.2, 4.2.1.1.3, 4.2.1.1.4 e 4.2.1.1.5, são descritos os ensaios a serem realizados nos agregados.

##### 4.2.1.1.1. Análise granulométrica

Os ensaios de granulometria de agregados serão realizados de acordo com a norma DNER ME 83 (1998) - Agregados - Análise Granulométrica que fixa o procedimento para a análise de agregados miúdos e graúdos, por peneiramento.

Primeiramente as amostras serão reduzidas conforme prescreve a norma DNER PRO 199 (1996) e em seguida serão secas em estufa na temperatura de  $110 \pm 5$  °C, esfriadas à temperatura ambiente e determinada as suas massas.

O peneiramento será realizado manualmente, aplicando inicialmente na peneira de maior abertura, e subsequentemente nas demais peneiras da série (em ordem decrescente).

As massas retidas em cada peneira, nas tolerâncias permitidas, são aplicadas nos cálculos para a obtenção dos resultados.

A figura 15 ilustra o ensaio de análise granulométrica do agregado graúdo, ou seja, brita de 16 mm.



**Figura 15** - Exemplo de uma análise granulométrica de agregado graúdo.

#### 4.2.1.1.2. Abrasão Los Angeles

Para a realização desse ensaio será utilizada a norma DNER ME 035 (1998) que prescreve o método para a determinação da abrasão Los Angeles de agregados.

A abrasão Los Angeles é o desgaste do agregado, quando colocado na máquina Los Angeles juntamente com uma carga abrasiva submetido a um determinado número de revoluções desta máquina à velocidade de 30 rpm a 33 rpm (DNER ME 035, 1998).

Após o ensaio de granulometria e a obtenção da graduação da amostra na Faixa C, será determinada a massa da amostra seca.

Para esse ensaio a carga abrasiva utilizada será de oito esferas. O procedimento para a execução do ensaio deve seguir as operações: verificar a limpeza interna do tambor, colocar a amostra e a respectiva carga abrasiva, fechar o tambor e girar com velocidade de 30 rpm a 33 rpm até completar 500 rotações, retirar todo o material do tambor, separar as esferas, fazer a limpeza e passar a amostra na peneira de 1,7 mm, rejeitando o material passante. Em seguida lava-se o material retido na peneira, seca em estufa entre 105 e 110 °C, durante no mínimo 3

horas. Logo após retira-se o material da estufa, esfria-se e determina-se a massa da amostra lavada e seca.

A figura 16 ilustra o equipamento utilizado para a realização do ensaio de abrasão Los Angeles.



**Figura 16** - Equipamento utilizado para o ensaio de abrasão Los Angeles.

#### 4.2.1.1.3. Índice de forma

O ensaio de determinação do índice de forma deverá ser realizado segundo a norma DNER ME 086 (1994). Essa norma apresenta o procedimento para a determinação do índice de forma de agregados e fixa o modo pelo qual se determina a variação dos eixos multidirecionais das partículas que compõem o agregado.

Inicialmente procede-se a análise granulométrica do material. Escolhida a graduação, inicia-se o ensaio por meio do equipamento denominado crivo redutor.

O resultado do índice de forma será a soma das percentagens retidas nos crivos, divididos por cem vezes o número de frações que compõem a graduação escolhida.

A figura 17 apresenta um exemplo de amostras de agregados que serão submetidas ao ensaio de índice de forma, e a figura 18 ilustra os equipamentos necessários para serem utilizados durante a execução do ensaio.



**Figura 17** - Exemplo de agregado para o ensaio de índice de forma.



**Figura 18** - Crivo utilizado no ensaio de índice de forma.

#### 4.2.1.1.4. Avaliação da durabilidade

A norma utilizada nesse ensaio será a DNER ME 089 (1994) - Agregados - avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio.

O método fixa o modo pelo qual se determina a resistência à desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo, pelo ataque de soluções saturadas de sulfato de sódio ou de magnésio.

No caso em estudo será utilizado o emprego de sulfato de magnésio.

Antes de iniciar o ensaio, faz-se a análise granulométrica da amostra representativa do agregado. Em seguida a amostra deverá ser imersa em solução de magnésio por um período de 17 horas.

Após o período de imersão a amostra será retirada da solução, será drenada em 15 minutos e depois colocada em estufa à temperatura de 110 °C até a constância de massa. Durante a secagem, serão tomadas precauções que evitarão a perda de partículas retidas nas peneiras. Depois da secagem a amostra será esfriada até a temperatura ambiente.

O processo de imersão e secagem alternadas constitui um ciclo, que deve ser repetido até que o número desejado de ciclos seja completado.

Depois de completo o ciclo final e após o resfriamento da amostra, esta será lavada em solução de cloreto de bário a 10 %, para que fique livre de excessos de sulfato de magnésio. Lava-se a amostra em água corrente. Livres da solução, as frações da amostra serão secas até a constância de massa. Em seguida deve peneirar o material conforme prescreve a norma.

#### 4.2.1.1.5. Adesividade

Em 2001 a norma DNER ME 059 (1986) necessitou ser adaptada, a partir de então, utiliza-se a adoção pelo processo de referência da norma da ABNT a NBR

6300 (2001) – Emulsões asfálticas catiônicas – determinação da resistência à água (adesividade).

A adesividade de asfalto residual é a propriedade de o agregado ser aderido por material betuminoso, verificada pelo não deslocamento da película asfáltica que o recobre, quando a mistura agregado-asfalto residual, após a devida cura, é imersa em água a 40 °C durante 72 horas.

Para a emulsão em estudo (RL-1C) a amostra pode ser ensaiada à temperatura ambiente.

Segue a descrição do procedimento utilizado para esse ensaio: inicialmente a amostra é pesada, umedecida com água potável. Em seguida é adicionada a emulsão asfáltica tipo RL-1C, até ocorrer o recobrimento de toda a superfície ( $25 \pm 1$ ) g. A amostra permanece em repouso durante 1 hora na temperatura ambiente, e depois é levada a estufa à ( $60 \pm 2$ ) °C durante 24 horas para a obtenção da cura completa. Transfere-a para o cesto e aguarda-se até atingir a temperatura ambiente. Logo após coloca-se 400ml de água potável no béquer e transfere-se a amostra resfriada para o béquer. Para finalizar coloca-se o béquer com a amostra em estufa ( $40 \pm 1$ ) °C, mantendo-a nesta temperatura durante 72 horas. Com isto, procede-se à análise visual do agregado e estima-se a porcentagem da área que se mantém recoberta por película asfáltica.

#### 4.2.1.2. Borracha

##### 4.2.1.2.1. Análise granulométrica

Os ensaios de granulometria da borracha também serão realizados de acordo com a norma DNER ME 83 (1998) - Agregados - Análise Granulométrica que fixa o procedimento para a análise de agregados miúdos e graúdos, por peneiramento.

A figura 19 ilustra um exemplo de borracha moída, retida na malha 10 e que deverá ser utilizada para a execução desse estudo.



**Figura 19** - Amostra para o ensaio de análise granulométrica da borracha.

#### 4.2.1.3. Mistura asfáltica a frio

A faixa granulométrica para a mistura asfáltica escolhida nesse estudo é determinada a partir da norma DNER ES 317 (1997) - Pavimentação - Pré-misturados a frio. A faixa de trabalho adotada é a Faixa C.

A adição da borracha de pneus às misturas asfálticas varia de 3 a 5 % de borracha moída, em relação à massa total de agregados minerais (via seca). Essa escolha é baseada de acordo com a pesquisa de ODA (2005).

Para esse estudo foram realizados quatro traços, sendo:

- Traço referência – sem adição de borracha moída;
- Traço 1 – adição de 3 % de borracha moída;
- Traço 2 – adição de 4 % de borracha moída; e,
- Traço 3 – adição de 5 % de borracha moída.

#### 4.2.1.3.1. Ensaio Marshall

A norma DNER ME 107 (1994) - Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica - ensaio Marshall fixa o modo pelo qual se determina a estabilidade e a fluência de mistura betuminosa usinada a frio, com emulsão asfáltica, utilizando o equipamento Marshall.

Pela norma, devem-se moldar cinco corpos-de-prova por traço. Para a confecção dos corpos-de-prova, inicialmente deve ser conhecidas às porcentagens em peso, em que os materiais serão misturados. Em seguida, calcula-se a quantidade de cada um deles para um corpo-de-prova pesando cerca de 1200 g, com altura de 63,5 mm + 1,3 mm.

Após a adição do ligante, a mistura deve ser rápida até a completa cobertura dos agregados. A seguir, o material irá para a cura à temperatura ambiente por 60 minutos. Passado este tempo, será iniciada a compactação.

Após a compactação, os corpos-de-prova com o molde devem ser colocados em estufas a 60 °C por 24 horas. Após esse período os mesmos são retirados da estufa até que atingirem a temperatura ambiente.

Em seguida, os corpos-de-prova são extraídos dos moldes e colocados sobre uma superfície lisa e plana, tomando-se o cuidado no manuseio para evitar fratura ou deformação. Com isto, os corpos-de-prova são medidos e pesados para a determinação da densidade aparente.

#### 4.2.1.3.2. Densidade aparente

A norma DNER-ME 117 (1994) para Mistura betuminosa - Determinação da densidade aparente, fixa o modo pelo qual se determina a densidade de mistura betuminosa em corpos-de-prova moldados em laboratório ou obtidos na pista (in loco).

Densidade aparente é a relação entre o peso da mistura ao ar e a diferença entre o peso ao ar e o peso da mistura em suspensão na água.

Para a realização do ensaio são necessários: parafina fluidificada por aquecimento, fita adesiva e pincel.

Para dar início ao ensaio os corpos-de-prova devem ser pesados, envolvidos com fita adesiva e aplicados parafina fluidificada.

#### 4.2.1.3.3. Estabilidade Marshall e fluência

A norma DNER ME 107 (1994) - Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica - ensaio Marshall fixa o modo pelo qual se determina a estabilidade e a fluência de mistura betuminosa usinada a frio, com emulsão asfáltica, utilizando o equipamento Marshall.

Após a realização do ensaio de densidade aparente, os corpos-de-prova deverão ser desparafinados e colocados em estufa a 40 °C pelo período de duas horas.

Em seguida, os mesmos serão colocados no molde de compressão e levados à prensa para ruptura.

*CAPÍTULO 4*

***RESULTADOS E DISCUSSÕES***

---

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. AGREGADOS

A figura 20 ilustra os equipamentos usados nos ensaios de granulometria dos agregados.



**Figura 20** - Equipamentos usados no ensaio de análise granulométrica dos agregados.

#### 5.1.1. Análise Granulométrica

Os materiais foram ensaiados de acordo com a norma do DNER ME 83 (1998) - Agregados - Análise granulométrica, citados no capítulo anterior.

Nas tabelas 9 e 10 constam os resultados das análises granulométricas dos agregados miúdo (pedrisco e pó-de-pedra) e graúdo (brita 12 e 16 mm). Os valores apresentados estão em porcentagem passante nas peneiras.

**Tabela 9** - Resultado da análise granulométrica dos agregados miúdo.

Material		Pedrisco			Pó-de-Pedra		
Peneiras		Peso (g)		%	Peso (g)		%
mm	Pol.	Retido	Passando	Passando	Retido	Passando	Passando
		0,0	2089,3	100,0	0,0	1059,4	100,0
50,0	2	0,0	2089,3	100,0	0,0	1059,4	100,0
38,0	1 1/2	0,0	2089,3	100,0	0,0	1059,4	100,0
25,4	1	0,0	2089,3	100,0	0,0	1059,4	100,0
19,1	3/4	0,0	2089,3	100,0	0,0	1059,4	100,0
12,5	1/2	0,0	2089,3	100,0	0,0	1059,4	100,0
9,5	3/8	0,0	2089,3	100,0	0,0	1059,4	100,0
4,8	Nº. 4	817,3	1272,0	60,9	1,2	1058,2	99,9
2,0	Nº.10	1201,4	70,6	3,4	124,9	933,3	88,1
0,42	Nº. 40	9,7	60,9	2,9	492,0	441,3	41,7
0,18	Nº. 80	7,1	53,8	2,6	126,7	314,6	29,7
0,075	Nº. 200	12,9	40,9	2,0	118,4	196,2	18,5
Totais		2089,3		Totais	1059,4		

Quanto aos materiais pedrisco e pó-de-pedra, observa-se na tabela 9, que na peneira de 4,8 mm os materiais passantes de 1272,0 g (60,9 %) e 1058,2 g (99,9 %), apresentando a dimensão máxima característica (DMC) de 4,8 mm.

**Tabela 10** - Resultado da análise granulométrica dos agregados graúdo.

Material		Brita 16 mm			Brita 12 mm		
Peneiras		Peso (g)		%	Peso (g)		%
mm	Pol.	Retido	Passando	Passando	Retido	Passando	Passando
		0,0	5337,0	100,0	0,0	5164,0	100,0
50,0	2	0,0	5337,0	100,0	0,0	5164,0	100,0
38,0	1 1/2	0,0	5337,0	100,0	0,0	5164,0	100,0
25,4	1	0,0	5337,0	100,0	0,0	5164,0	100,0
19,1	3/4	0,0	5337,0	100,0	0,0	5164,0	100,0
12,5	1/2	1778,0	3559,0	66,7	0,0	5164,0	100,0
9,5	3/8	2919,8	639,2	12,0	364,8	4799,2	92,9
4,8	Nº. 4	554,9	84,3	1,6	4674,3	124,9	2,4
2,0	Nº.10	28,1	56,2	1,1	70,4	54,5	1,1
0,42	Nº. 40	8,2	48,0	0,9	8,3	46,2	0,9
0,18	Nº. 80	5,2	42,8	0,8	2,3	43,9	0,9
0,075	Nº. 200	15,4	27,4	0,5	16,7	27,2	0,5
Totais		5337,0		Totais	5164,0		

Na tabela 10, pode-se verificar que o material brita 16 mm, da peneira de 12,5 mm, possui uma amostra passante de 3559,0 g (66,7 %) e para a brita de 12 mm observa-se na peneira de 9,5 mm um material passante de 4799,2 g (92,9 %), apresentando respectivamente as dimensões máximas características (DMC) de 12,5 mm e de 9,5 mm.

Assim, os resultados apresentados nas tabelas 9 e 10 atendem a norma do DNER 83 (1998), cujos valores obedecem às faixas especificadas na Tabela 11, apresentada no capítulo 3.

### 5.1.2. Abrasão Los Angeles

Na tabela 11 é apresentado o resultado do desgaste Los Angeles, seguindo as recomendações da norma do DNER ME 035 (1998), descrita anteriormente.

**Tabela 11** - Resultado do ensaio de abrasão Los Angeles do agregado.

Ensaio	Abrasão (%)	Média (%)
01	15,6	<b>15,5</b>
02	15,4	

De acordo com a norma, DNER ME 035 (1998), o desgaste Los Angeles deve ser igual ou inferior a 40 %. Conforme apresentado na tabela 11, o resultado do ensaio de abrasão Los Angeles do agregado foi de 15,5 %, e atende assim, a norma do DNER ME 035 (1998).

### 5.1.3. Índice de Forma

Os resultados do ensaio de índice de forma estão apresentados na tabela

**Tabela 12** - Resultado do ensaio de índice de forma do agregado.

Graduação	Crivo circular (mm)		Peso Inicial da Fração	Crivos redutores correspondentes			
	Passando	Retido		Crivo I (mm)	% Retida	Crivo II (mm)	% Retida
D	12,7	9,5	1000,5	6,3	57,0	4,2	30,2
	9,5	6,3	1000,0	4,8	33,4	3,2	44,6
<b>Índice de Forma</b>			<b>0,64 %</b>				

De acordo com a norma DNER ME 086 (1994), o índice de forma deve ser superior a 0,5 %. Assim, na tabela 12, é apresentado o resultado do ensaio de índice de forma, obtendo-se 0,64 %, ou seja, atende as especificações da norma do DNER ME 086 (1994).

#### 5.1.4. Avaliação da Durabilidade

A figura 21 ilustra os materiais que foram ensaiados segundo a norma DNER ME 089 (1994) – Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio.

**Figura 21** - Amostras de agregado para o ensaio de avaliação da durabilidade.

Para a execução do ensaio de durabilidade, a norma do DNER ME 089 (1994) recomenda o emprego de sulfato de sódio ou sulfato de magnésio. Nesta pesquisa foi utilizado o sulfato de magnésio.

Na tabela 13 tem-se o resultado da avaliação de durabilidade do agregado.

**Tabela 13** - Resultado do ensaio da avaliação da durabilidade do agregado.

Composição granulométrica da amostra original			Amostra de ensaio	% de perda de cada fração da Amostra		Média ponderada
Passando	Retido	%	Massa Inicial	Massa Final	% Perda	% de Perda Corrigida
mm	mm	Retido				
19,1	12,5	33,8	670,7	631,9	6,1	1,82
12,5	9,5	55,6	330,9	299,1	10,6	5,91
9,5	4,8	10,6	300,2	264,6	13,5	1,43
	Totais	100,0	1301,8	1195,6	-	9,15
<b>Perda Total</b>				<b>9,2 %</b>		

De acordo com a norma do DNER ME 089 (1994) a durabilidade dos agregados deve apresentar perda inferior a 12 %.

Verifica-se, na tabela 13, que a perda total do agregado foi de 9,2 % e atende ao disposto na norma do DNER ME 089 (1994).

#### 5.1.5. Adesividade

A figura 22 apresenta as amostras de agregado após o ensaio de adesividade.



**Figura 22** - Amostras de agregado para o ensaio de adesividade.

Segundo a norma do DNER ME 059 (1994), a adesividade deve ser superior a 90 %. O agregado analisado recoberto com película asfáltica, após 72 horas de imersão apresentou uma estimativa visual de 98 % de adesividade à emulsão utilizada, assim, esse resultado atende a norma do DNER ME 059 (1994).

## 5.2. BORRACHA

### 5.2.1. Análise Granulométrica

Os materiais foram ensaiados de acordo com a norma do DNER ME 83 (1998) - Agregados - Análise granulométrica.

Para a execução desse ensaio, o tempo de peneiramento foi de aproximadamente duas horas. Essa duração é em função do tipo de material (elástico).

Na tabela 14 está apresentado o resultado da análise granulométrica da borracha moída de malha 10 (dimensão máxima característica de 2 mm).

**Tabela 14 - Análise granulométrica da borracha moída.**

Material		Borracha # 10			Borracha # 10		
Peneiras		Peso (g)		%	Peso (g)		%
mm	Pol.	Retido	Passando	Passando	Retido	Passando	Passando
4,8	Nº. 4	0,0	206,8	100,0	0,0	226,4	100,0
2,0	Nº. 10	1,61	205,2	99,2	1,92	224,5	99,2
0,42	Nº. 40	203,66	1,6	0,8	222,46	2,0	0,9
0,18	Nº. 80	0,54	1,0	0,5	0,76	1,2	0,5
0,075	Nº. 200	0,54	0,5	0,2	0,72	0,5	0,2
Totais		206,84	Totais		226,37		

Quanto à borracha moída, observa-se que na peneira de 2,0 mm o material passante foi de 205,2 g (99,2 %) e 224,5 g (99,2 %). Desta forma, estes resultados atendem a norma do DNER ME 83 (1998).

### 5.3. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS

Após os resultados das caracterizações dos materiais foram definidos os traços a serem estudados. Esses traços já foram apresentados no sub-itens: 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4.

#### 5.3.1. Traço de Referência

A tabela 15 e a figura 23 apresentam a composição granulométrica dos materiais utilizados nesse trabalho do traço de referência (sem a adição da borracha moída). Essa composição granulométrica atende a norma do DNER-ES 317 (1997) - Pavimentação - pré-misturado a frio.

O critério para a adoção desse traço foi em função dos resultados obtidos dos agregados: miúdo e graúdo e da borracha de pneu moída, ou seja, o enquadramento dos materiais na graduação C do DNER-ES 317 (1997).

**Tabela 15** - Composição granulométrica dos materiais do traço de referência.

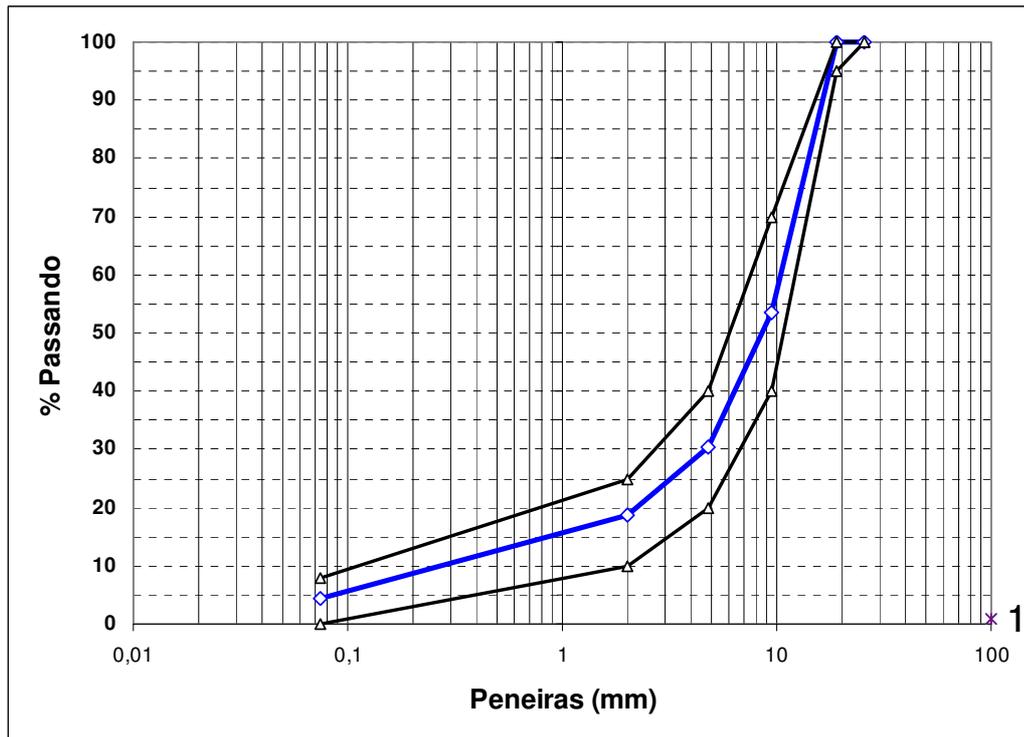
Peneiras		Material								Gradação/Faixa: C		
		Brita 16mm		Brita 12mm		Pedrisco		Pó-de-Pedra		$\Sigma$ %	Limites Especificados	
mm	Pol.	100%	35%	100%	30%	100%	15%	100%	20%	100%	Mín.	Máx.
25,4	1	100,0	35,0	100,0	30,0	100,0	15,0	100,0	20,0	100,0	100	100
19,1	3/4	100,0	35,0	100,0	30,0	100,0	15,0	100,0	20,0	100,0	95	100
9,5	3/8	12,0	4,2	92,9	27,9	10,0	1,5	100,0	20,0	53,6	40	70
4,8	Nº. 4	1,6	0,6	2,4	0,7	60,9	9,1	99,9	20,0	30,4	20	40
2,0	Nº.10	1,1	0,4	1,1	0,3	3,4	0,5	88,1	17,6	18,8	10	25
0,075	Nº.200	0,5	0,2	0,5	0,2	2,0	0,3	18,5	3,7	4,3	0	8

De acordo com os resultados apresentados na tabela 15, verifica-se a composição granulométrica do traço de referência, sendo:

- 35 % de brita de 16 mm;
- 30 % de brita de 12 mm;
- 15 % de pedrisco; e,
- 20 % de pó-de-pedra.

A somatória percentual desses materiais se encaixa na faixa C (gradação) da norma do DNER-ES 317 (1997) - Pavimentação - pré-misturado a frio.

A figura 23 mostra através de um gráfico ilustrativo, a faixa C (faixa de trabalho), limitados pelas linhas pretas, e a linha azul apresenta a somatória percentual do traço de referência utilizado nesse estudo.



**Figura 23** - Representação da composição granulométrica dos materiais.

### 5.3.2. Traço com Adição de 3 % de Borracha Moída

A tabela 16 e a figura 24 apresentam a composição granulométrica dos materiais utilizados do traço com a adição de 3 % de borracha moída.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 16 verifica-se, que os materiais compostos para esse traço são:

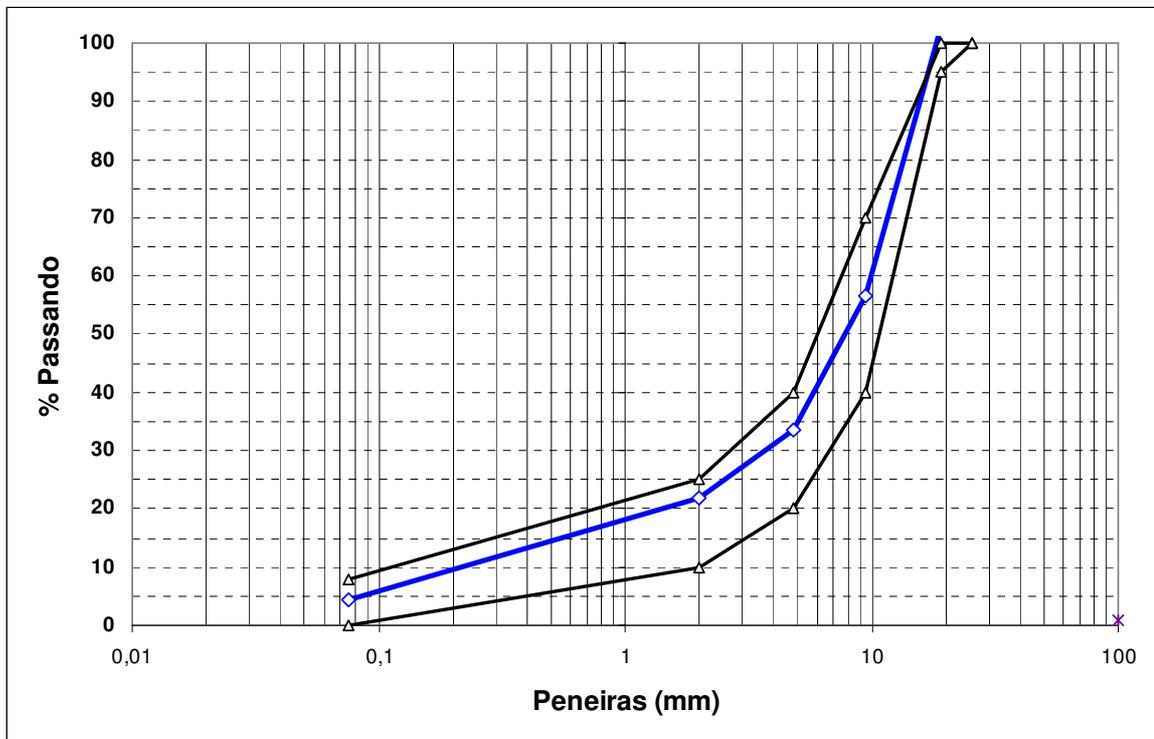
- 35 % de brita de 16 mm;
- 30 % de brita de 12 mm;
- 15 % de pedrisco;
- 20 % de pó-de-pedra; e,
- 3 % de borracha moída.

A somatória percentual desses materiais se encaixa na faixa C (graduação), da norma do DNER-ES 317 (1997) - Pavimentação - pré-misturado a frio.

A figura 24 ilustra através de um gráfico a faixa C (faixa de trabalho), limitados pelas linhas pretas e a linha azul apresenta a somatória percentual do traço com a adição de 3 % de borracha moída utilizado nesse estudo.

**Tabela 16** - Composição granulométrica dos materiais com a adição de 3 % de borracha moída.

Peneiras		Material										Gradação/Faixa: C		
		Brita 16mm		Brita 12mm		Pedrisco		Pó-de-Pedra		Borracha		Σ %	Limites Especificados	
mm	Pol.	100%	35%	100%	30%	100%	15%	100%	20%	100%	3%	100%	Mín.	Máx.
25,4	1	100,0	35,0	100,0	30,0	100,0	15,0	100,0	20,0	100,0	3,0	103,0	100	100
19,1	3/4	100,0	35,0	100,0	30,0	100,0	15,0	100,0	20,0	100,0	3,0	103,0	95	100
9,5	3/8	12,0	4,2	92,9	27,9	10,0	1,5	100,0	20,0	100,0	3,0	56,6	40	70
4,8	Nº. 4	1,6	0,6	2,4	0,7	60,9	9,1	99,9	20,0	100,0	3,0	33,4	20	40
2,0	Nº. 10	1,1	0,4	1,1	0,3	3,4	0,5	88,1	17,6	99,2	3,0	21,8	10	25
0,075	Nº. 200	0,5	0,2	0,5	0,2	2,0	0,3	18,5	3,7	0,2	0,0	4,3	0	8



**Figura 24** - Composição granulométrica dos materiais com a adição de 3 % de borracha moída.

### 5.3.3. Traço com Adição de 4 % de Borracha Moída

A tabela 17 e a figura 25 apresentam a composição granulométrica dos materiais utilizados do traço com a adição de 4 % de borracha moída.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 17 verifica-se, que os materiais compostos para esse traço são:

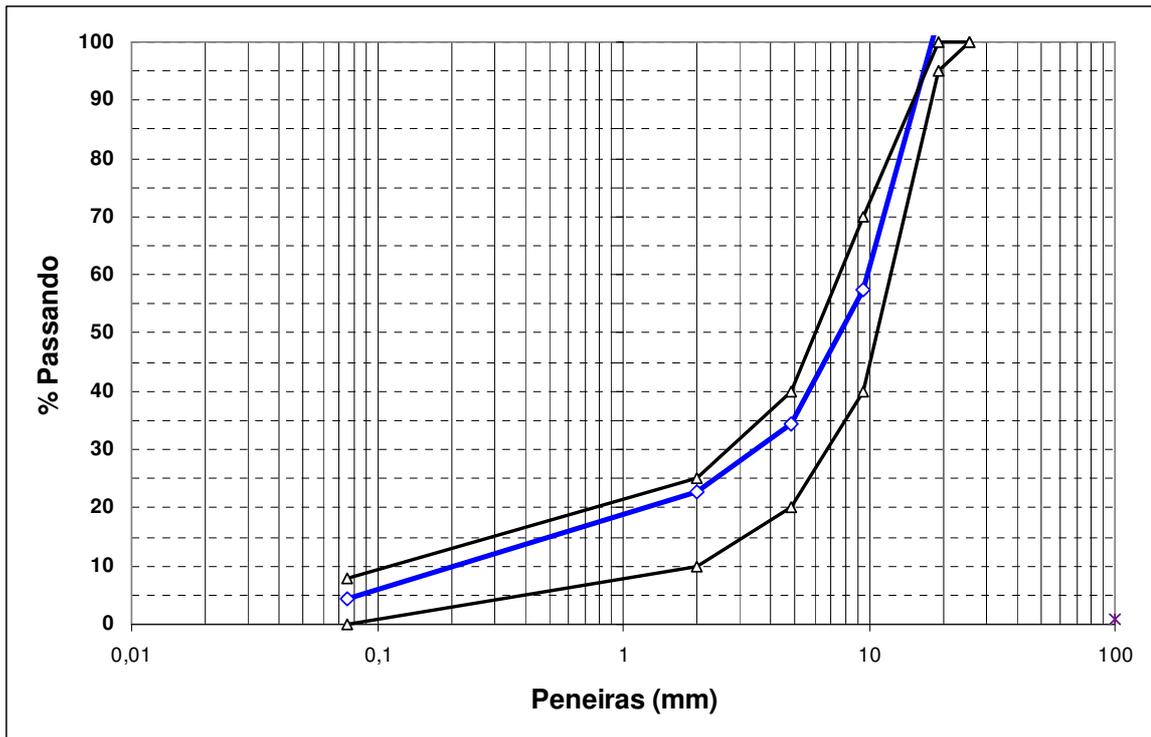
- 35 % de brita de 16 mm;
- 30 % de brita de 12 mm;
- 15% de pedrisco;
- 20 % de pó-de-pedra; e,
- 4 % de borracha moída.

A somatória percentual desses materiais se encaixa na faixa C (graduação), da norma do DNER-ES 317 (1997) - Pavimentação - pré-misturado a frio.

A figura 25 ilustra através de um gráfico a faixa C (faixa de trabalho), limitados pelas linhas pretas e a linha azul apresenta a somatória percentual do traço com a adição de 4 % de borracha moída utilizado nesse estudo.

**Tabela 17** - Composição granulométrica dos materiais com a adição de 4 % de borracha moída.

Peneiras		Material										Graduação/Faixa: C		
		Brita 16mm		Brita 12mm		Pedrisco		Pó-de-Pedra		Borracha		Σ %	Limites Especificados	
mm	Pol.	100%	35%	100%	30%	100%	15%	100%	20%	100%	4%	100%	Mín.	Máx.
25,4	1	100,0	35,0	100,0	30,0	100,0	15,0	100,0	20,0	100,0	4,0	104,0	100	100
19,1	3/4	100,0	35,0	100,0	30,0	100,0	15,0	100,0	20,0	100,0	4,0	104,0	95	100
9,5	3/8	12,0	4,2	92,9	27,9	10,0	1,5	100,0	20,0	100,0	4,0	57,6	40	70
4,8	Nº. 4	1,6	0,6	2,4	0,7	60,9	9,1	99,9	20,0	100,0	4,0	34,4	20	40
2,0	Nº.10	1,1	0,4	1,1	0,3	3,4	0,5	88,1	17,6	99,2	4,0	22,8	10	25
0,075	Nº.200	0,5	0,2	0,5	0,2	2,0	0,3	18,5	3,7	0,2	0,0	4,3	0	8



**Figura 25** - Composição granulométrica dos materiais com a adição de 4 % de borracha moída.

#### 5.3.4. Traço com Adição de 5 % de Borracha Moída

A tabela 18 e a figura 26 apresentam a composição granulométrica dos materiais utilizados do traço com a adição de 5 % de borracha moída.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 18 verifica-se, que os materiais compostos para esse traço são:

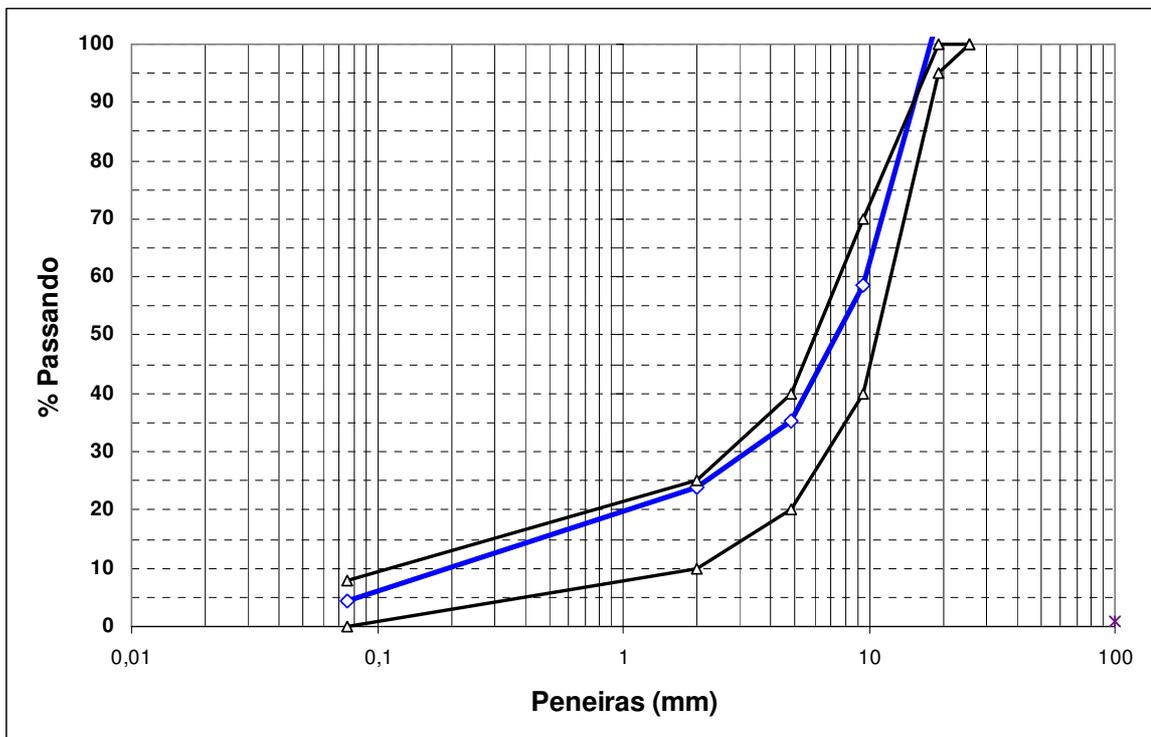
- 35 % de brita de 16 mm;
- 30 % de brita de 12 mm;
- 15 % de pedrisco;
- 20 % de pó-de-pedra; e,
- 5 % de borracha moída.

A somatória percentual desses materiais se encaixa na faixa C (graduação), da norma do DNER-ES 317 (1997) - Pavimentação - pré-misturado a frio.

A figura 26 ilustra através de um gráfico a faixa C (faixa de trabalho), limitados pelas linhas pretas e a linha azul apresenta a somatória percentual do traço com a adição de 5 % da borracha moída utilizado nesse estudo.

**Tabela 18** - Composição granulométrica dos materiais com a adição de 5 % de borracha moída.

Peneiras		Material										Gradação/Faixa: C		
		Brita 16mm		Brita 12mm		Pedrisco		Pó-de-Pedra		Borracha		$\Sigma$ %	Limites Especificados	
mm	Pol.	100%	35%	100%	30%	100%	15%	100%	20%	100%	5%	100%	Mín.	Máx.
25,4	1	100,0	35,0	100,0	30,0	100,0	15,0	100,0	20,0	100,0	5,0	105,0	100	100
19,1	3/4	100,0	35,0	100,0	30,0	100,0	15,0	100,0	20,0	100,0	5,0	105,0	95	100
9,5	3/8	12,0	4,2	92,9	27,9	10,0	1,5	100,0	20,0	100,0	5,0	58,6	40	70
4,8	Nº. 4	1,6	0,6	2,4	0,7	60,9	9,1	99,9	20,0	100,0	5,0	35,4	20	40
2,0	Nº.10	1,1	0,4	1,1	0,3	3,4	0,5	88,1	17,6	99,2	5,0	23,8	10	25
0,075	Nº.200	0,5	0,2	0,5	0,2	2,0	0,3	18,5	3,7	0,2	0,0	4,3	0	8



**Figura 26** - Composição granulométrica dos materiais com a adição de 5 % de borracha moída.

#### 5.4. MISTURA ASFÁLTICA A FRIO

No total foram moldados vinte corpos-de-prova que receberam as seguintes identificações:

- Corpos-de-prova de números: 1, 2, 3, 4 e 5 – Traço referência (figura 27);
- Corpos-de-prova de números: 7, 8, 9, 10 e 11 – Traço com adição de 3 % de borracha (figura 28);
- Corpos-de-prova de números: 12, 13, 14, 15 e 16 – Traço com adição de 4 % de borracha (figura 29); e,
- Corpos-de-prova de números: 17, 18, 19, 20 e 21 – Traço com adição de 5 % de borracha (figura 30).



**Figura 27** - Identificação dos corpos-de-prova moldados (1 a 5) do traço de referência.



**Figura 28** - Identificação dos corpos-de-prova moldados (7 a 11) do traço com adição de 3% de borracha.



**Figura 29** - Identificação dos corpos-de-prova moldados (12 a 16) do traço com adição de 4 % de borracha.



**Figura 30** - Identificação dos corpos-de-prova moldados (17 a 21) do traço com adição de 5 % de borracha.

#### 5.4.1. Densidade Aparente

O ensaio de densidade aparente foi realizado de acordo com a norma do DNER ES 317 (1997).

Para a execução do ensaio é necessária a aplicação da parafina fluidificada nos corpos-de-prova, sendo ilustrada na figura 31.



**Figura 31** - Aplicação da parafina fluidificada nos corpos-de-prova.

#### 5.4.1.1. Traço de referência

Segue a tabela 19 e a figura 32 com os resultados de densidade aparente dos corpos-de-prova do traço de referência (sem a adição de borracha moída).

De acordo com a norma do DNER ES 317 (1997), para a faixa C a quantidade de teor da emulsão deve ser de 4 a 6 %.

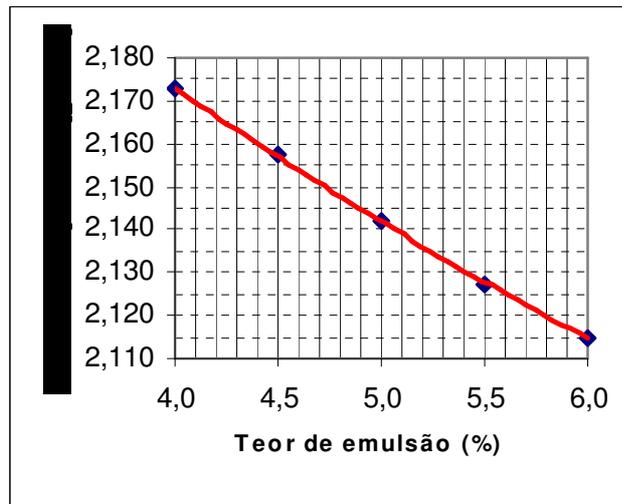
Para a determinação da densidade aparente foram determinados:

- O peso imerso (g), onde o corpo-de-prova parafinado imerso em água, à temperatura ambiente;
- De acordo com a norma do DNER-ME 117 (1994), a densidade da fita adotada é de  $0,97 \text{ g/cm}^3$ ; e,
- De acordo com a norma do DNER-ME 117 (1994), a densidade da parafina adotada é de  $0,89 \text{ g/cm}^3$ .

Os resultados da densidade aparente dos corpos-de-prova (01 a 05) estão em destaque na última linha da tabela 19, ou seja,  $2,173 \text{ g/cm}^3$ ,  $2,157 \text{ g/cm}^3$ ,  $2,142 \text{ g/cm}^3$ ,  $2,127 \text{ g/cm}^3$  e  $2,115 \text{ g/cm}^3$ .

**Tabela 19** - Densidade aparente dos corpos-de-prova do traço de referência.

CP nº.	01	02	03	04	05
Teor de Emulsão sem água (%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Dimensões (mm)	72,2	74,6	74,8	75,3	73,8
	72,1	74,6	75,0	75,7	73,4
	72,7	74,6	74,9	76,2	72,8
	73,2	74,6	74,6	75,3	72,8
Média das Dimensões	72,6	74,6	74,8	75,6	73,2
Peso ao ar (g)	1245,4	1258,6	1270,5	1275,6	1248,2
Peso ao ar + fita (g)	1248,6	1261,8	1273,1	1278,1	1251,1
Peso ao ar+fita+parafina (g)	1255,9	1265,9	1281,9	1286,5	1262,7
Peso Imerso (g)	671,2	674,6	676,2	674,8	656,5
Densidade Fita ( $\text{g/cm}^3$ )	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Densidade Parafina ( $\text{g/cm}^3$ )	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Densidade Aparente ( $\text{g/cm}^3$ )	2,173	2,157	2,142	2,127	2,115



**Figura 32** - Gráfico da densidade aparente dos corpos-de-prova do traço de referência.

#### 5.4.1.2. Traço com adição de 3 % de borracha moída

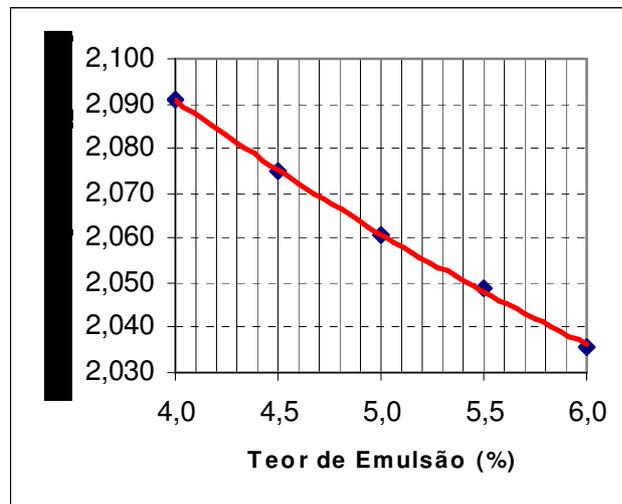
Na tabela 20 e na figura 33 são apresentados os resultados de densidade aparente dos corpos-de-prova do traço com a adição de 3 % borracha moída.

De acordo com a norma do DNER ES 317 (1997), para a faixa C a quantidade de teor da emulsão deve ser de 4 a 6 %.

Os resultados da densidade aparente dos corpos-de-prova (07 a 11) são apresentados na tabela 20, sendo: 2,091 g/cm<sup>3</sup>, 2,075 g/cm<sup>3</sup>, 2,061 g/cm<sup>3</sup>, 2,049 g/cm<sup>3</sup> e 2,036 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabela 20** - Densidade aparente dos corpos-de-prova com adição de 3 % de borracha moída.

CP nº.	07	08	09	10	11
Teor de Emulsão sem água (%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Dimensões (mm)	65,1	65,9	65,4	66,8	65,9
	64,7	65,4	65,3	67,4	66,7
	64,9	65,0	64,7	66,7	66,5
	65,0	65,7	65,2	65,5	66,2
Média das Dimensões	64,9	65,5	65,2	66,6	66,3
Peso ao ar (g)	1064,2	1070,6	1076,0	1081,4	1086,1
Peso ao ar + fita (g)	1067,3	1073,0	1078,7	1084,0	1089,0
Peso ao ar+fita+parafina (g)	1072,7	1078,9	1090,4	1089,6	1094,3
Peso lmerso (g)	554,5	553,8	552,3	552,8	551,9
Densidade Fita (g/cm <sup>3</sup> )	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Densidade Parafina (g/cm <sup>3</sup> )	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,091	2,075	2,061	2,049	2,036

**Figura 33** - Densidade aparente dos corpos-de-prova com adição de 3 % de borracha moída.

#### 5.4.1.3. Traço com adição de 4 % de borracha moída

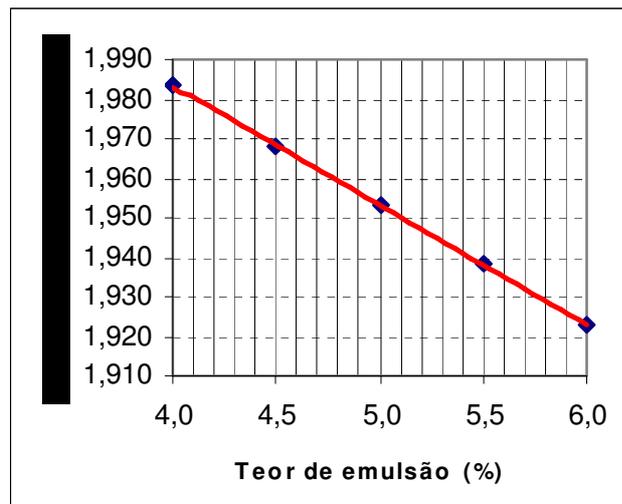
Segue na tabela 21 e na figura 34, os resultados de densidade aparente dos corpos-de-prova do traço com a adição de 4 % borracha moída.

De acordo com a norma do DNER ES 317 (1997), para a faixa C a quantidade de teor da emulsão deve ser de 4 a 6 %.

Os resultados da densidade aparente dos corpos-de-prova (12 a 16) são apresentados na tabela 21, ou seja, 1,983 g/cm<sup>3</sup>, 1,968 g/cm<sup>3</sup>, 1,953 g/cm<sup>3</sup>, 1,938 g/cm<sup>3</sup> e 1,923 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabela 21** - Densidade aparente dos corpos-de-prova com adição de 4 % de borracha moída.

CP nº.	12	13	14	15	16
Teor de Emulsão sem água (%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Dimensões (mm)	61,2	60,5	62,3	61,8	61,5
	59,9	60,7	61,9	61,2	61,6
	61,1	61,0	62,2	61,9	62,5
	62,6	60,5	61,0	61,6	61,9
Média das Dimensões	61,2	60,7	61,9	61,6	61,9
Peso ao ar (g)	931,2	967,7	969,1	978,7	986,1
Peso ao ar + fita (g)	934,4	970,0	972,1	981,7	989,1
Peso ao ar+fita+parafina (g)	944,8	979,1	979,3	994,9	994,7
Peso Imerso (g)	460,3	474,8	472,0	472,1	472,5
Densidade Fita (g/cm <sup>3</sup> )	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Densidade Parafina (g/cm <sup>3</sup> )	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,983	1,968	1,953	1,938	1,923



**Figura 34** - Densidade aparente dos corpos-de-prova com adição de 4 % de borracha moída.

#### 5.4.1.4. Traço com adição de 5 % de borracha moída

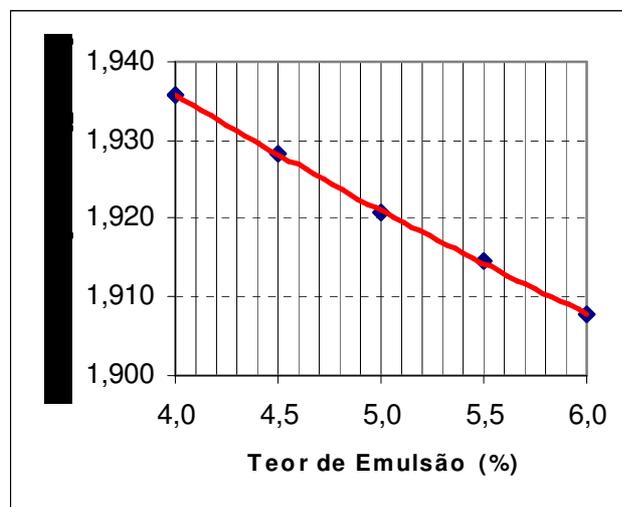
Segue na tabela 22 e na figura 35, os valores encontrados no ensaio de densidade aparente dos corpos-de-prova do traço com a adição de 5 % borracha moída.

De acordo com a norma do DNER ES 317 (1997), para a faixa C a quantidade de teor da emulsão deve ser de 4 a 6 %.

Os resultados da densidade aparente dos corpos-de-prova (17 a 21) são respectivamente: 1,936 g/cm<sup>3</sup>, 1,928 g/cm<sup>3</sup>, 1,921 g/cm<sup>3</sup>, 1,915 g/cm<sup>3</sup> e 1,908 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabela 22** - Densidade aparente dos corpos-de-prova com adição de 5 % de borracha moída.

CP nº.	17	18	19	20	21
Teor de Emulsão sem água (%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Dimensões (mm)	61,2	63,4	63,5	61,2	62,9
	62,1	63,6	63,5	62,1	63,1
	61,9	62,0	63,3	62,3	63,2
	61,2	63,0	64,1	61,7	63,1
Média das Dimensões	61,6	63,0	63,6	61,8	63,1
Peso ao ar (g)	972,2	975,1	981,4	988,4	987,3
Peso ao ar + fita (g)	974,7	978,0	984,2	991,4	990,6
Peso ao ar+fita+parafina (g)	982,1	983,0	993,9	1000,6	996,2
Peso Imerso (g)	469,0	468,7	469,2	470,9	469,0
Densidade Fita (g/cm <sup>3</sup> )	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Densidade Parafina (g/cm <sup>3</sup> )	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,936	1,928	1,921	1,915	1,908

**Figura 35** - Densidade Aparente dos corpos-de-prova com adição de 5 % de borracha moída.

#### 5.4.2. Estabilidade Marshall e Fluência

Os ensaios de estabilidade Marshall e fluência foram realizados de acordo com a norma do DNER ME 107 (1994).

As figuras 36, 37, 38, 39 e 40 ilustram respectivamente, a adição do ligante ao agregado, a adição do material a ser colocado no molde de compactação, o molde em posição de ensaio no suporte de compactação, a compactação e a identificação do corpo-de-prova.



**Figura 36** - Adição do ligante ao agregado.



**Figura 37** - Adição da mistura asfáltica no molde de compactação.



**Figura 38** - Molde de compactação.



**Figura 39** - Compactação do corpo-de-prova.



**Figura 40** - Identificação do corpo-de-prova.

É apresentada na figura 41, a ruptura do corpo-de-prova para a obtenção do resultado da estabilidade e a fluência.



**Figura 41** - Ruptura do corpo-de-prova.

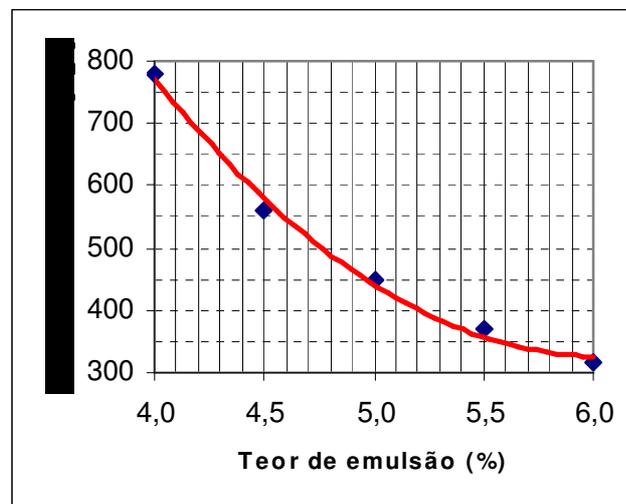
#### 5.4.2.1. Traço de referência

Os resultados dos corpos-de-prova do traço de referência (sem a adição de borracha moída) encontrados da estabilidade Marshall e da fluência, estão apresentados na tabela 23 e nas figuras 42 e 43.

A carga em Kgf, necessária para produzir o rompimento do corpo-de-prova é a estabilidade lida. Esse valor é corrigido para a espessura do corpo-de-prova ensaiado, multiplicando-o por um fator que é em função da espessura do corpo-de-prova. Assim o resultado obtido é a estabilidade corrigida.

**Tabela 23** - Estabilidade Marshall e fluência dos corpos-de-prova do traço de referência.

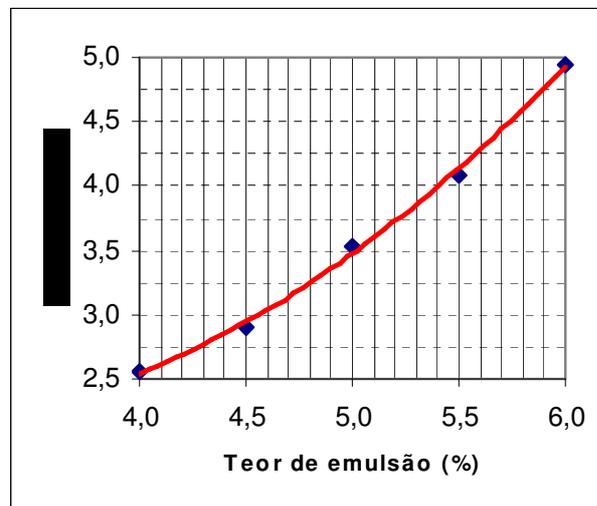
CP nº.	01	02	03	04	05
Teor de Emulsão sem água (%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
L.I.Fluência (mm)	2,13	2,25	1,42	2,05	0,71
L.F.Fluência (mm)	4,68	5,15	4,96	6,14	5,65
Leitura Defletômetro (div.)	568	428	343	287	235
Estabilidade Lida (kgf)	950	716	574	480	393
Fator de Correção	0,82	0,78	0,78	0,77	0,81
Fluência (mm)	2,6	2,9	3,5	4,1	4,9
Estabilidade Corrigida (kgf)	779	559	448	370	318



**Figura 42** - Estabilidade Marshall dos corpos-de-prova do traço de referência.

Observa-se na tabela 23 e na figura 42 os resultados da estabilidade Marshall dos corpos-de-prova (1 a 5) são respectivamente:

- Para o teor de emulsão 4,0 % a estabilidade Marshall é de 779 kgf;
- Para o teor de emulsão 4,5 % a estabilidade Marshall é de 559 kgf;
- Para o teor de emulsão 5,0 % a estabilidade Marshall é de 448 kgf;
- Para o teor de emulsão 5,5 % a estabilidade Marshall é de 370 kgf; e,
- Para o teor de emulsão 6,0 % a estabilidade Marshall é de 318 kgf.



**Figura 43** - Fluência dos corpos-de-prova do traço de referência.

Conforme tabela 23 e figura 43 seguem os resultados para o ensaio de fluência:

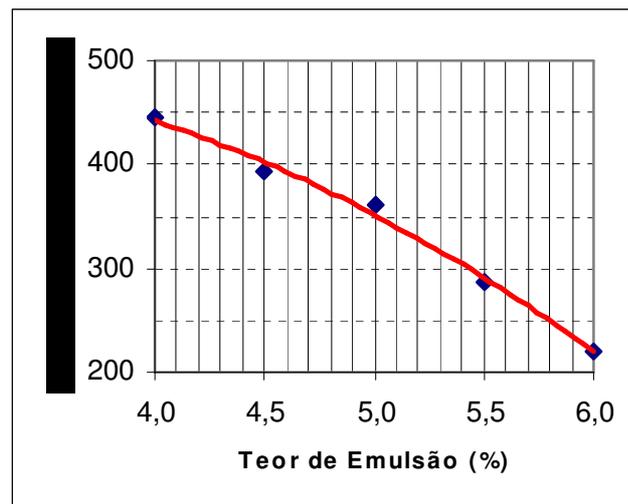
- Para o teor de emulsão 4,0 % a fluência é de 2,6 mm;
- Para o teor de emulsão 4,5 % a fluência é de 2,9 mm;
- Para o teor de emulsão 5,0 % a fluência é de 3,5 mm;
- Para o teor de emulsão 5,5 % a fluência é de 4,1 mm; e,
- Para o teor de emulsão 6,0 % a fluência é de 4,9 mm.

#### 5.4.2.2. Traço com adição de 3 % de borracha moída

A tabela 24 e as figuras 44 e 45 apresentam os resultados da estabilidade Marshall e fluência dos corpos-de-prova do traço com a adição de 3 % borracha moída.

**Tabela 24** - Estabilidade Marshall e fluência dos corpos-de-prova com a adição de 3% de borracha moída.

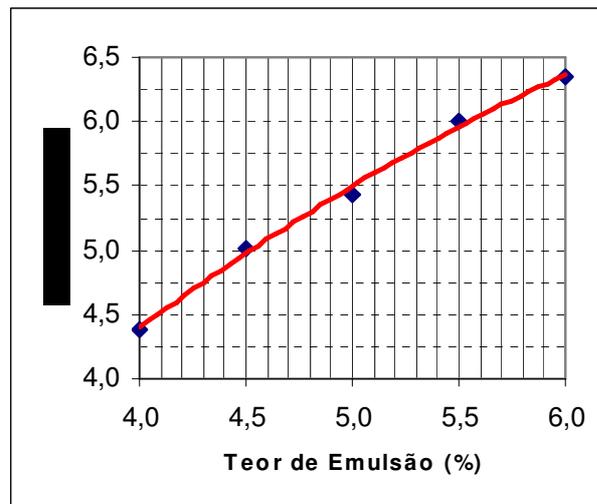
CP nº.	07	08	09	10	11
Teor de Emulsão sem água (%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
L.I.Fluência (mm)	3,01	2,12	2,49	2,63	2,53
L.F.Fluência (mm)	7,40	7,13	7,93	8,63	8,88
Leitura Defletômetro.(div.)	277	247	225	185	140
Estabilidade Lida (kgf)	463	413	376	310	234
Fator de Correção	0,96	0,95	0,96	0,93	0,94
Fluência (mm)	4,4	5,0	5,4	6,0	6,4
Estabilidade Corrigida (kgf)	445	393	361	288	220



**Figura 44** - Estabilidade Marshall dos corpos-de-prova com a adição de 3 % de borracha moída.

Verifica-se na tabela 24 e na figura 44 os resultados da estabilidade Marshall dos corpos-de-prova (07 a 11), sendo:

- Para o teor de emulsão 4,0 % a estabilidade Marshall é de 445 kgf;
- Para o teor de emulsão 4,5 % a estabilidade Marshall é de 393 kgf;
- Para o teor de emulsão 5,0 % a estabilidade Marshall é de 361 kgf;
- Para o teor de emulsão 5,5 % a estabilidade Marshall é de 288 kgf; e,
- Para o teor de emulsão 6,0 % a estabilidade Marshall é de 220 kgf.



**Figura 45** - Fluência dos corpos-de-prova com a adição de 3 % de borracha moída.

De acordo com a tabela 24 e a figura 45 verificam-se os resultados para o ensaio de fluência:

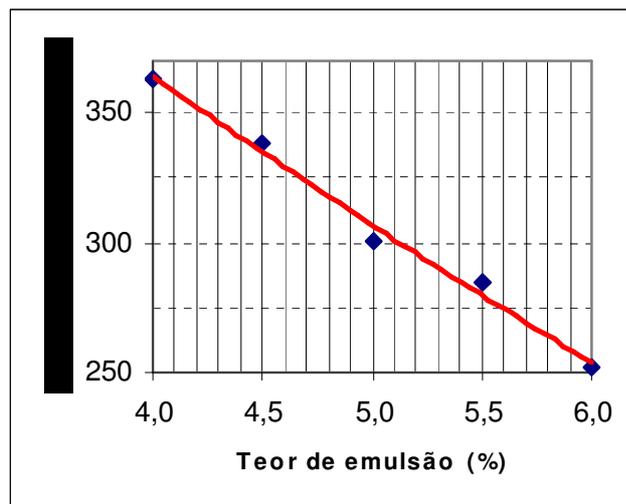
- Para o teor de emulsão 4,0 % a fluência é de 4,4 mm;
- Para o teor de emulsão 4,5 % a fluência é de 5,0 mm;
- Para o teor de emulsão 5,0 % a fluência é de 5,4 mm;
- Para o teor de emulsão 5,5 % a fluência é de 6,0 mm; e,
- Para o teor de emulsão 6,0 % a fluência é de 6,4 mm.

#### 5.4.2.3. Traço com adição de 4 % de borracha moída

Segue a tabela 25 e as figuras 46 e 47 com os resultados da estabilidade Marshall e fluência dos corpos-de-prova do traço com a adição de 4 % borracha moída.

**Tabela 25** - Estabilidade Marshall e fluência dos corpos-de-prova com a adição de 4 % de borracha moída.

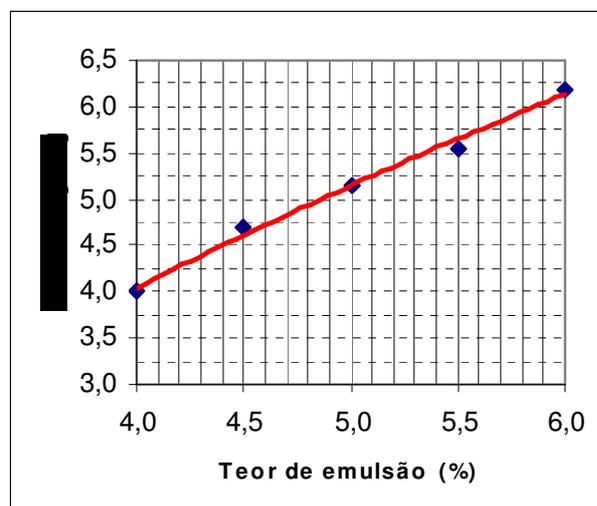
CP nº.	12	13	14	15	16
Teor de Emulsão sem água (%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
L.I.Fluência (mm)	2,03	2,71	2,93	2,74	2,44
L.F.Fluência (mm)	6,03	7,41	8,09	8,29	8,62
Leitura Defletômetro.(div.)	213	187	173	162	145
Estabilidade Lida (kgf)	356	313	289	271	243
Fator de Correção	1,02	1,08	1,04	1,05	1,04
Fluência (mm)	4,0	4,7	5,2	5,6	6,2
Estabilidade Corrigida (kgf)	363	338	301	285	252



**Figura 46** - Estabilidade Marshall dos corpos-de-prova com a adição de 4 % de borracha moída.

Observa-se na tabela 25 e na figura 46 os resultados da estabilidade Marshall dos corpos-de-prova (12 a 16), sendo respectivamente:

- Para o teor de emulsão 4,0 % a estabilidade Marshall é de 363 kgf;
- Para o teor de emulsão 4,5 % a estabilidade Marshall é de 338 kgf;
- Para o teor de emulsão 5,0 % a estabilidade Marshall é de 301 kgf;
- Para o teor de emulsão 5,5 % a estabilidade Marshall é de 285 kgf; e,
- Para o teor de emulsão 6,0 % a estabilidade Marshall é de 252 kgf.



**Figura 47** - Fluência dos corpos-de-prova com a adição de 4 % de borracha moída.

Conforme tabela 25 e figura 47 observam-se os resultados do ensaio de fluência:

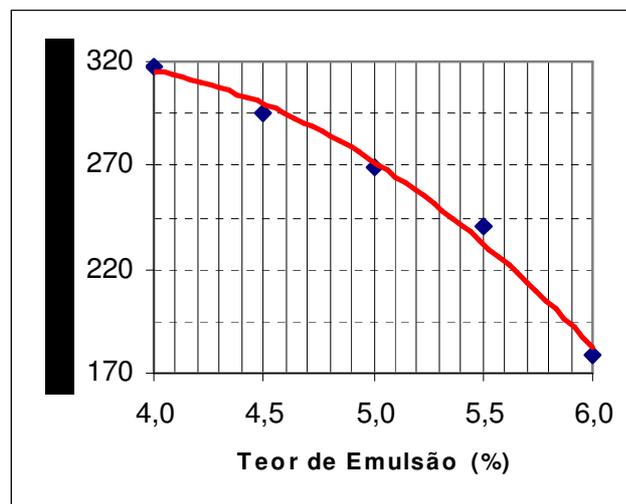
- Para o teor de emulsão 4,0 % a fluência é de 4,0 mm;
- Para o teor de emulsão 4,5 % a fluência é de 4,7 mm;
- Para o teor de emulsão 5,0 % a fluência é de 5,2 mm;
- Para o teor de emulsão 5,5 % a fluência é de 5,6 mm; e,
- Para o teor de emulsão 6,0 % a fluência é de 6,2 mm.

#### 5.4.2.4. Traço com adição de 5 % de borracha moída

A tabela 26 e as figuras 48 e 49 apresentam os resultados da estabilidade Marshall e fluência dos corpos-de-prova do traço com a adição de 5 % borracha moída.

**Tabela 26** - Estabilidade Marshall e fluência dos corpos-de-prova com a adição de 5 % de borracha moída.

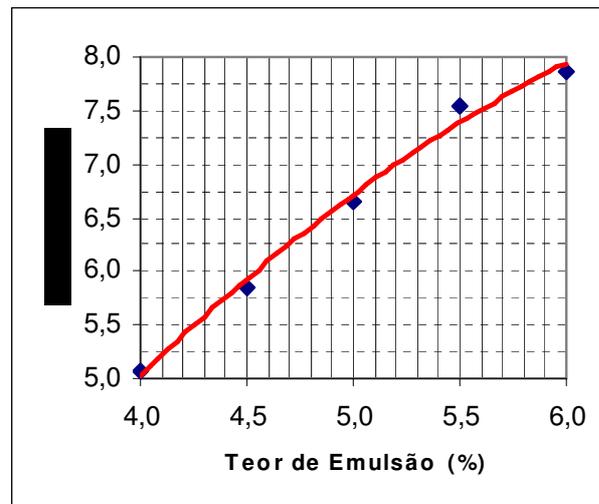
CP nº.	17	18	19	20	21
Teor de Emulsão sem água (%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
L.I.Fluência (mm)	2,34	2,54	3,03	2,54	3,17
L.F.Fluência (mm)	7,42	8,39	9,68	10,09	11,04
Leitura Defletômetro.(div.)	181	175	161	138	106
Estabilidade Lida (kgf)	303	293	269	231	177
Fator de Correção	1,05	1,01	1,00	1,04	1,01
Fluência (mm)	5,1	5,9	6,7	7,6	7,9
Estabilidade Corrigida (kgf)	318	296	269	240	179



**Figura 48** - Estabilidade Marshall dos corpos-de-prova com a adição de 5 % de borracha moída.

Verifica-se na tabela 26 e na figura 48 os resultados da estabilidade Marshall dos corpos-de-prova (17 a 21) são respectivamente:

- Para o teor de emulsão 4,0 % a estabilidade Marshall é de 318 kgf;
- Para o teor de emulsão 4,5 % a estabilidade Marshall é de 296 kgf;
- Para o teor de emulsão 5,0 % a estabilidade Marshall é de 269 kgf;
- Para o teor de emulsão 5,5 % a estabilidade Marshall é de 240 kgf; e,
- Para o teor de emulsão 6,0 % a estabilidade Marshall é de 179 kgf.



**Figura 49** - Fluência dos corpos-de-prova com a adição de 5 % de borracha moída.

Conforme tabela 26 e figura 49 segue os resultados para o ensaio de fluência:

- Para o teor de emulsão 4,0 % a fluência é de 5,1 mm;
- Para o teor de emulsão 4,5 % a fluência é de 5,9 mm;
- Para o teor de emulsão 5,0 % a fluência é de 6,7 mm;
- Para o teor de emulsão 5,5 % a fluência é de 7,6 mm; e,
- Para o teor de emulsão 6,0 % a fluência é de 7,9 mm.

### 5.4.3. Características da Mistura

Nos sub-itens: 5.4.3.1, 5.4.3.2, 5.4.3.3 e 5.4.3.4 são apresentadas as características das mistura dos traços estudados: de referência, com adições: de 3 %, 4 % e 5 % de borracha moída.

#### 5.4.3.1. Traço de referência

Segue a tabela 27 e as figuras 50 e 51 com os resultados individuais da densidade média da mistura, dos vazios de agregado mineral, do volume cheio de betume, da densidade teórica, do volume de vazios e da relação betume vazios dos corpos-de-prova do traço de referência (sem a adição de borracha moída).

A densidade média da mistura é a média dos cinco corpos-de-prova das densidades encontradas individualmente.

Os vazios de agregado mineral (V.A.M.) é a soma dos vazios não preenchidos, ou seja, é o volume total de vazios da mistura.

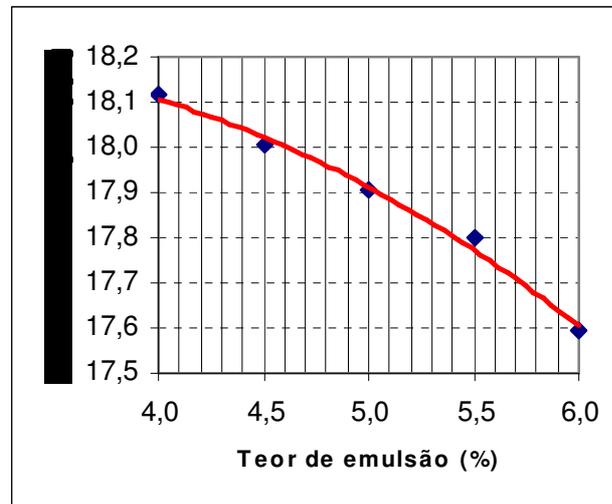
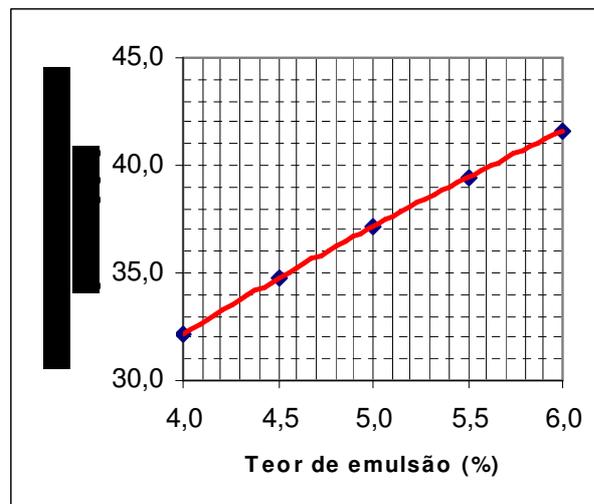
A densidade teórica é a densidade da mistura suposta sem vazios.

O volume de vazios é o volume de vazios existente na mistura em relação ao volume total da mistura.

A relação betume vazios (R.B.V): é a relação entre o volume de betume e o volume total de vazios.

**Tabela 27** - Características da mistura dos corpos-de-prova do traço de referência.

CP nº.	01	02	03	04	05
Densidade Média da Mistura (g/cm <sup>3</sup> )	2,846				
Vazios de Agregado Mineral (V.A.M.) (%)	26,7	27,6	28,5	29,4	30,1
Volume Cheio Betume (V.C.B.) (%)	8,6	9,6	10,6	11,6	12,6
Densidade Teórica (g/cm <sup>3</sup> )	2,653	2,631	2,609	2,588	2,567
Volume de Vazios (%)	18,1	18,0	17,9	17,8	17,6
Relação Betume Vazios (R.B.V.) (%)	32,2	34,8	37,2	39,4	41,6

**Figura 50** - Índice de vazios dos corpos-de-prova do traço de referência.**Figura 51** - Relação Betume Vazios dos corpos-de-prova do traço de referência.

Na tabela 28 são apresentados respectivamente os valores especificados por norma e os valores obtidos nos ensaios do traço de referência.

**Tabela 28** - Valores especificados por norma e valores obtidos nos ensaios do traço de referência.

<b>Valores Especificados (DNER ME 107, 1994)</b>	
Índice de Vazios (V.V.) (%)	5 ----- 30
Fluência (mm)	2 ----- 4,5
Estabilidade à 40°C (kgf)	Mínimo: 250
<b>Valores Obtidos no ensaio</b>	
Índice de Vazios (V.V.) (%)	17,9
Fluência (mm)	3,5
Estabilidade à 40°C (kgf)	448
Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,142
Relação Betume Vazios (R.B.V.) (%)	37,2
Teor Ótimo de Emulsão (%)	5,0

Conforme resultados apresentados na tabela 28 dos ensaios do traço de referência observam-se que todos os valores atendem a especificação da norma do DNER 107 (1994).

Em atendimento a norma do DNER 107 (1994), tem-se:

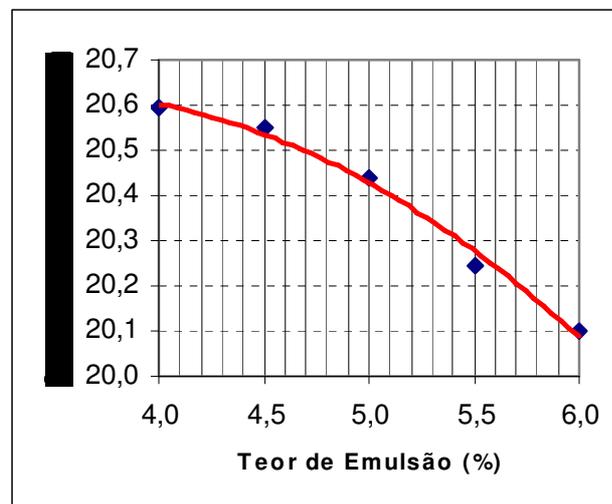
- Para a determinação do teor ótimo da emulsão, calcula-se a média dos teores, sendo igual a 5,0 %;
- Para a determinação do índice de vazios, calcula-se a média do intervalo (valores especificados por norma), sendo igual a 17,5 %;
- Para a determinação da fluência, calcula-se a média do intervalo (valores especificados por norma), sendo igual a 3,25 %; e,
- Para a estabilidade, o mínimo valor em atendimento a norma é de 250 kgf.

#### 5.4.3.2. Traço com adição de 3 % de borracha moída

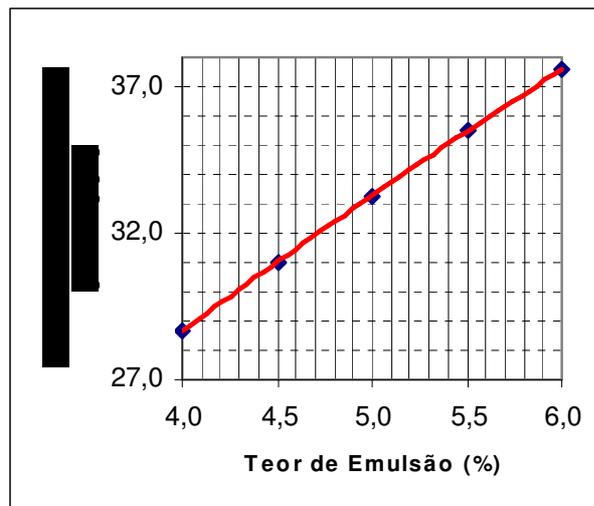
São apresentados na tabela 29 e nas figuras 52 e 53 os resultados individuais da densidade média da mistura, dos vazios de agregado mineral, do volume cheio de betume, da densidade teórica, do volume de vazios e da relação betume vazios dos corpos-de-prova do traço com a adição de 3 % borracha moída.

**Tabela 29** - Características da mistura dos corpos-de-prova com a adição de 3 % de borracha moída.

CP nº.	07	08	09	10	11
Densidade Média da Mistura (g/cm <sup>3</sup> )	2,822				
V.A.M - Vazios de Agregado Mineral (%)	28,9	29,8	30,6	31,4	32,2
V.C.B. – volume cheio betume (%)	8,3	9,2	10,2	11,1	12,1
Densidade Teórica (g/cm <sup>3</sup> )	2,633	2,611	2,590	2,569	2,548
Volume de Vazios (%)	20,6	20,6	20,4	20,2	20,1
Relação Betume Vazios (R.B.V.) (%)	28,7	31,0	33,3	35,5	37,5



**Figura 52** - Índice de vazios dos corpos-de-prova com a adição de 3 % de borracha moída.



**Figura 53** - Relação Betume Vazios dos corpos-de-prova com a adição de 3 % de borracha moída.

Na tabela 30 são apresentados respectivamente os resultados dos ensaios obtidos do traço com adição de 3 % de borracha moída.

**Tabela 30** - Valores obtidos nos ensaios do traço com adição de 3 % de borracha moída.

Valores obtidos no ensaio	
Índice de Vazios (V.V.) (%)	20,6
Fluência (mm)	4,4
Estabilidade à 40°C (kgf)	445
Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,091
Relação Betume Vazios (R.B.V.) (%)	28,7
Teor Ótimo de Emulsão (%)	4,0

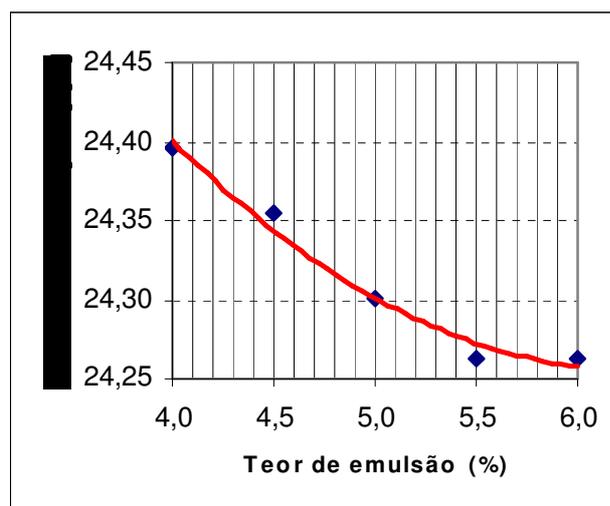
Verifica-se na tabela 30 que todos os resultados encontrados dos ensaios do traço com a adição de 3 % de borracha moída atendem a especificação da norma do DNER 107 (1994).

### 5.4.3.3. Traço com adição de 4 % de borracha moída

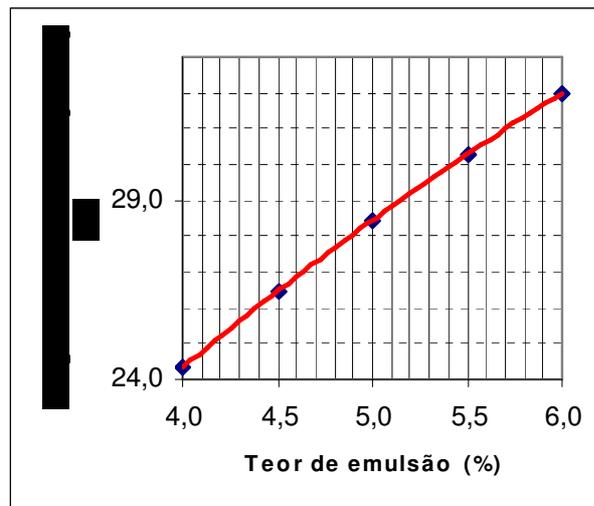
Na tabela 31 e nas figuras 54 e 55 seguem os resultados individuais obtidos dos ensaios da densidade média da mistura, dos vazios de agregado mineral, do volume cheio de betume, da densidade teórica, do volume de vazios e da relação betume vazios dos corpos-de-prova do traço com a adição de 4 % de borracha moída.

**Tabela 31** - Características da mistura dos corpos-de-prova com a adição de 4 % de borracha moída.

CP nº.	12	13	14	15	16
Densidade Média da Mistura (g/cm <sup>3</sup> )	2,810				
Vazios de Agregado Mineral (V.A.M.) (%)	32,2	33,1	34,0	34,8	35,7
Volume Cheio Betume (V.C.B.) (%)	7,8	8,8	9,7	10,5	11,4
Densidade Teórica (g/cm <sup>3</sup> )	2,623	2,602	2,580	2,560	2,539
Volume de Vazios (%)	24,4	24,4	24,3	24,3	24,3
Relação Betume Vazios (R.B.V.) (%)	24,3	26,5	28,4	30,3	32,0



**Figura 54** - Índice de vazios dos corpos-de-prova com a adição de 4 % de borracha moída.



**Figura 55** - Relação Betume Vazios dos corpos-de-prova com a adição de 4 % de borracha moída.

A seguir, na tabela 32 são demonstrados os resultados dos ensaios obtidos do traço com adição de 4 % de borracha moída.

**Tabela 32** - Valores obtidos nos ensaios do traço com adição de 4 % de borracha moída.

Valores Obtidos no ensaio	
Índice de Vazios (V.V.) (%)	24,3
Fluência (mm)	4,7
Estabilidade à 40°C (kgf)	338
Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,968
Relação Betume Vazios (R.B.V.) (%)	26,5
Teor Ótimo de Emulsão (%)	4,5

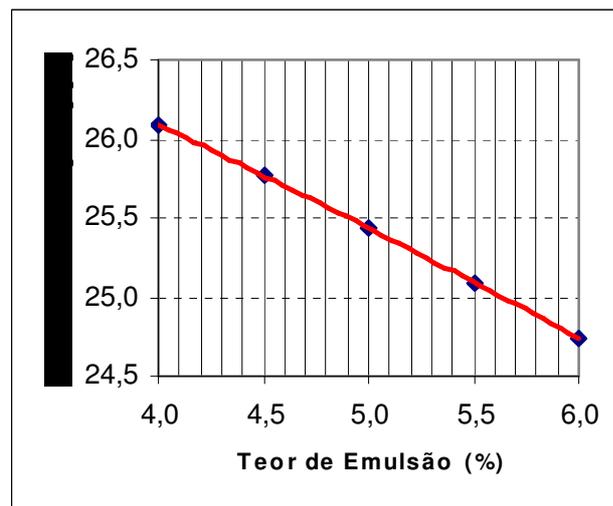
Verifica-se que os resultados atendem a especificação da norma do DNER 107 (1994), com exceção do ensaio de fluência que apresentou o resultado de 4,7 mm. Esse valor é superior ao estabelecido pela norma do DNER 107 (1994).

#### 5.4.3.4. Traço com adição de 5 % de borracha moída

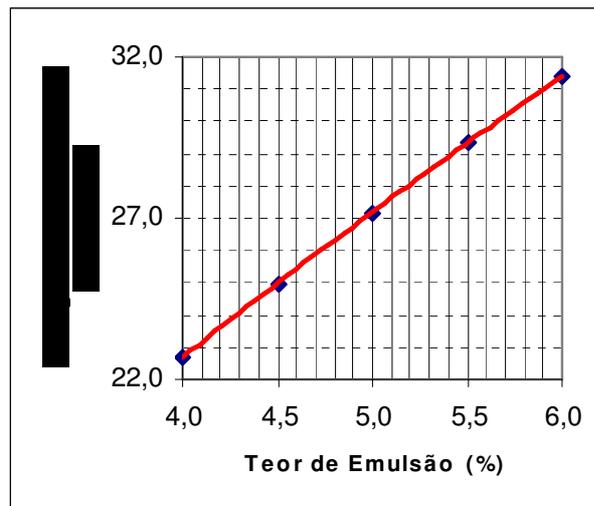
Na tabela 33 e nas figuras 56 e 57 seguem os resultados das características da mistura com a adição de 5 % de borracha moída, no que se referem aos seguintes ensaios: densidade média da mistura, vazios de agregado mineral, volume cheio de betume, densidade teórica, volume de vazios e relação betume vazios.

**Tabela 33** - Características da mistura dos corpos-de-prova com a adição de 5 % de borracha moída.

CP nº.	17	18	19	20	21
Densidade Média da Mistura (g/cm <sup>3</sup> )	2,805				
Vazios de Agregado Mineral (V.A.M.) (%)	33,7	34,4	34,9	35,5	36,1
Volume Cheio Betume (V.C.B.) (%)	7,7	8,6	9,5	10,4	11,3
Densidade Teórica (g/cm <sup>3</sup> )	2,619	2,598	2,576	2,556	2,535
Volume de Vazios (%)	26,1	25,8	25,4	25,1	24,7
Relação Betume Vazios (R.B.V.) (%)	22,7	25,0	27,2	29,3	31,4



**Figura 56** - Índice de vazios dos corpos-de-prova com a adição de 5 % de borracha moída.



**Figura 57** - Relação Betume Vazios dos corpos-de-prova com a adição de 5 % de borracha moída.

A tabela 34 demonstra os resultados finais dos ensaios obtidos do traço com adição de 5 % de borracha moída.

**Tabela 34** - Valores obtidos nos ensaios com adição de 5 % de borracha moída.

Valores Obtidos no ensaio	
Índice de Vazios (V.V.) (%)	26,0
Fluência (mm)	5,0
Estabilidade à 40°C (kgf)	320
Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,936
Relação Betume Vazios (R.B.V.) (%)	22,7
Teor Ótimo de Emulsão (%)	4,0

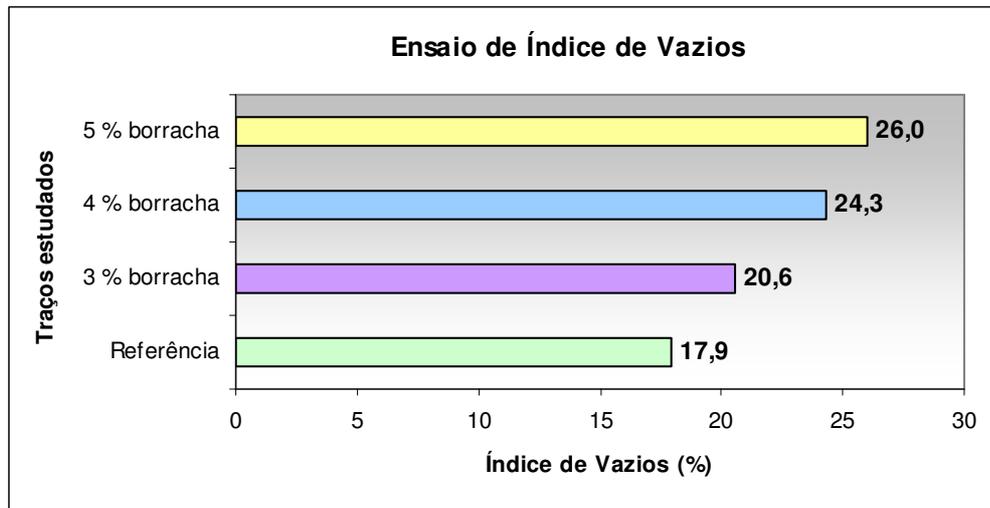
Observa-se na tabela 34 que todos os resultados atendem a especificação da norma do DNER 107 (1994), com exceção do ensaio de fluência que apresentou resultado maior do que o valor estabelecido por norma (intervalo de 2 a 4,5 %).

## 5.5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A seguir são apresentadas as comparações dos resultados dos ensaios de todos os traços estudados: de referência, adições de 3 %, 4 % e 5 % de borracha moída.

### 5.5.1. Índice de Vazios

A figura 58 apresenta os resultados obtidos do ensaio do índice de vazios em relação ao traço de referência (sem a adição de borracha moída) e pode-se observar que o melhor traço que atende o menor índice de vazios é o traço com a adição de 3 % de borracha moída.

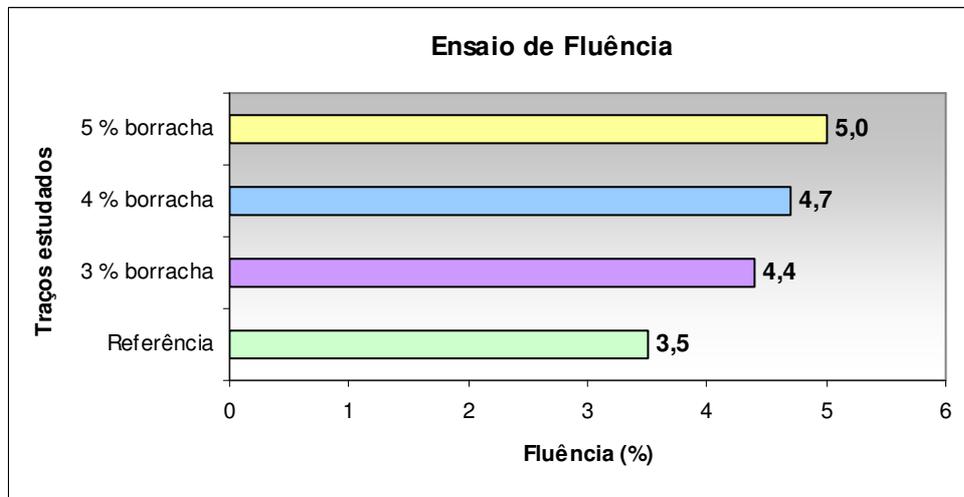


**Figura 58** - Resultados dos ensaios de índice de vazios de acordo com a norma do DNER 107 (1994).

De acordo com a tabela 58 todos os resultados atendem a especificação da norma do DNER 107 (1994), cujos valores devem estar entre 5 e 30 % (média 17,5 %).

### 5.5.2. Fluência

Comparando os resultados obtidos do ensaio de fluência em relação ao traço de referência (sem a adição de borracha moída) observa-se que o melhor traço que atende a menor fluência é o traço com a adição de 3 % de borracha moída, conforme se pode observar na figura 59.



**Figura 59** - Resultados dos ensaios de fluência de acordo com a norma do DNER 107 (1994).

Verifica-se que o traço com adição de 3 % de borracha atende a especificação da norma do DNER 107 (1994), cujos valores devem estar entre 2 e 4,5 % (média 3,25 %). Já os traços com adições de 4 e 5 % de borracha não atendem a especificação da norma do DNER 107 (1994).

### 5.5.3. Estabilidade Marshall

Os resultados obtidos da estabilidade Marshall em relação ao traço de referência (sem a adição de borracha moída) são apresentados na figura 60, onde pode-se observar que o melhor traço que atende a maior estabilidade Marshall é o traço com a adição de 3 % de borracha moída.

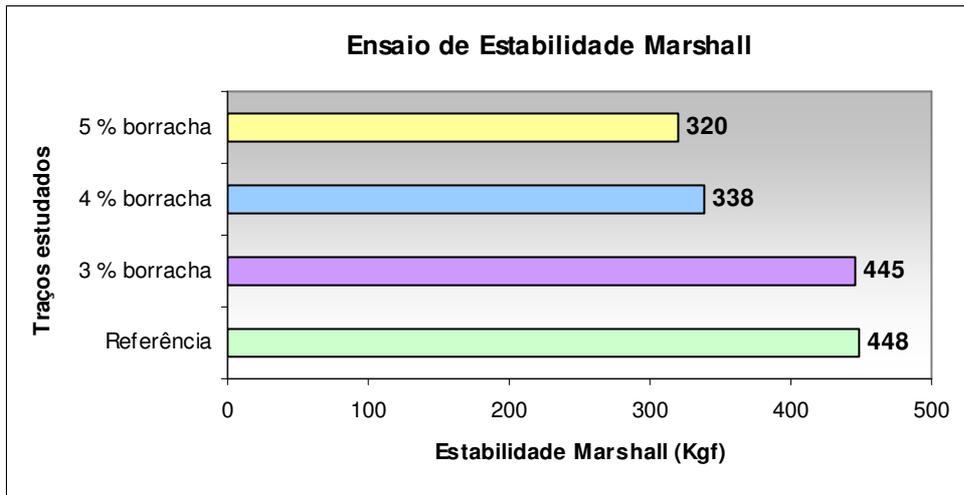


Figura 60 - Resultados dos ensaios de estabilidade Marshall de acordo com a norma do DNER 107 (1994).

#### 5.5.4. Densidade Aparente

Comparando os resultados obtidos (figura 61), da densidade aparente em relação ao traço de referência (sem a adição de borracha moída) observa-se que quanto maior o percentual de adição de borracha menor é a densidade aparente.

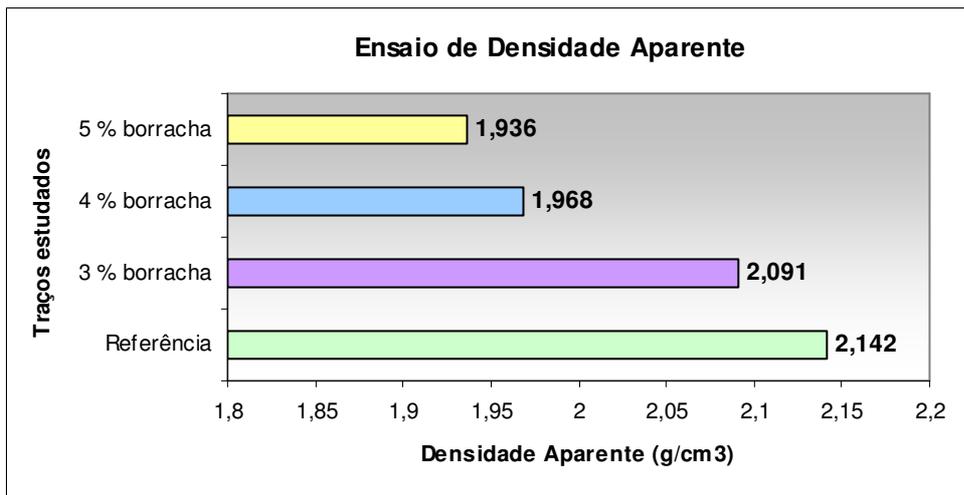
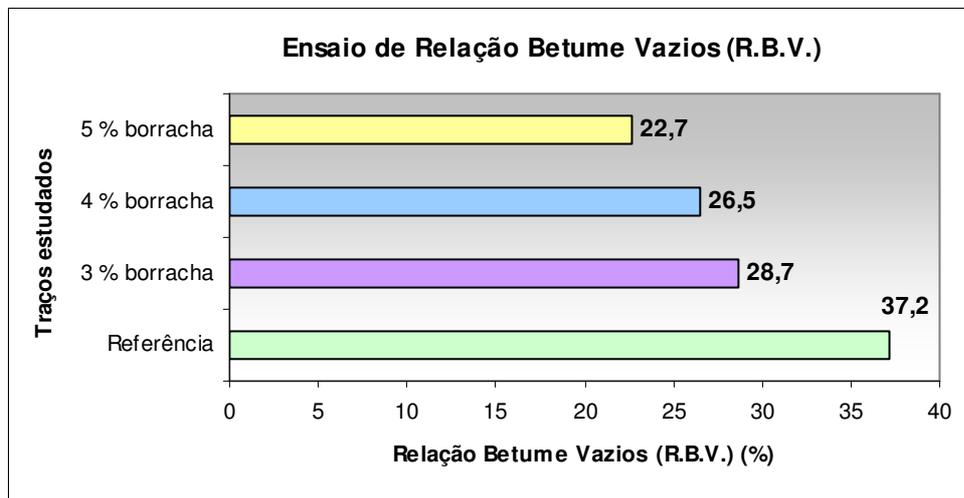


Figura 61 - Resultados dos ensaios de densidade aparente de acordo com a norma do DNER 107 (1994).

Verifica-se que o melhor traço estudado é o que possui a adição de 3 % de borracha, pois é o traço que apresenta a maior densidade aparente.

#### 5.5.5. Relação Betume-Vazios (R.B.V.)

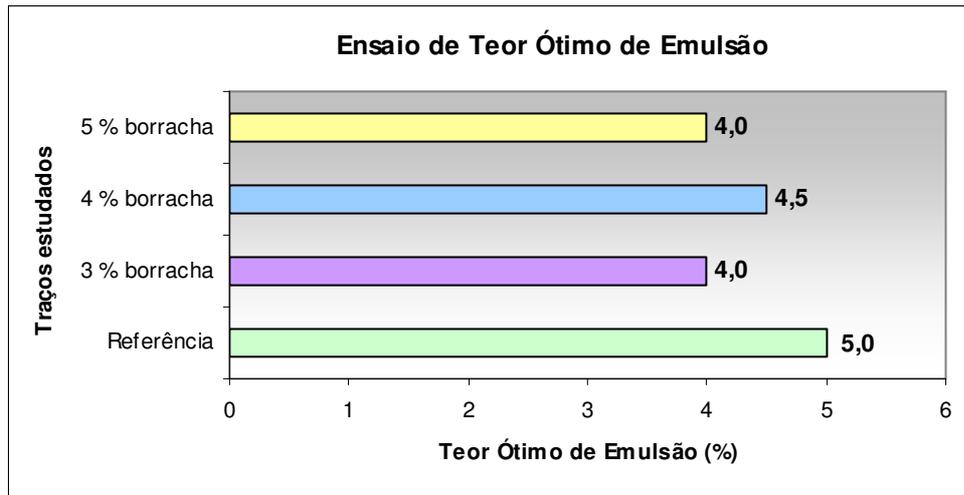
Pode-se observar um estudo comparativo do ensaio de relação betume vazios, na figura 62, em relação ao traço de referência (sem a adição de borracha moída), onde observa-se que o melhor traço que atende a maior relação betume-vazios é o traço com a adição de 3 % de borracha moída.



**Figura 62** - Resultados dos ensaios de relação betume-vazios de acordo com a norma do DNER 107 (1994).

#### 5.5.6. Teor Ótimo de Emulsão

Na figura 63 é apresentado de forma comparativa os resultados obtidos do teor ótimo de emulsão em relação ao traço de referência (sem a adição de borracha moída). Observa-se que os melhores traços que atende a menor quantidade do teor ótimo de emulsão são os traços com adições de borracha de 3 e 5 % de borracha moída.



**Figura 63** - Resultados dos ensaios de relação betume-vazios de acordo com a norma do DNER 107 (1994).

*CAPÍTULO 5*

**CONCLUSÕES**

---

## 6. CONCLUSÕES

A incorporação de borracha moída de pneus em misturas asfálticas a frio se mostrou válida. O alto consumo de pneus, nessas misturas, comprova a eficácia de sua utilização para a diminuição de pneus velhos existentes. Com isto, o uso da borracha proveniente de pneus em pavimentação asfáltica apresenta uma solução interessante e ambientalmente correta para o problema deste rejeito.

Comparando todos os resultados das misturas asfálticas em relação ao traço de referência, conclui-se:

- O traço com a adição de 3 % de borracha moída apresentou: o menor índice de vazios, a menor fluência, a maior estabilidade Marshall, a maior densidade aparente, a maior relação betume-vazios e o menor teor de emulsão asfáltica;
- O traço com a adição de 4 % de borracha moída: no ensaio de fluência apresentou resultado acima do especificado na norma do DNER 107 (1994), não atendendo as condições das normas vigentes, e portanto, descartado; e, finalmente,
- O traço com a adição de 5 % de borracha moída apresentou o menor teor de emulsão, mas no ensaio de fluência apresentou resultado acima do especificado na norma do DNER 107 (1994), não atendendo as condições das normas vigentes e, portanto, também descartado.

Baseado no traço com adição de 3 % de borracha moída, estima-se para uma produção de uma tonelada de pré-misturado a frio, a utilização de 30 Kg de borracha moída, o que corresponde há 6,29 pneus modelo P195/75R14. Para exemplificar este valor, para a execução de um trecho de pré-misturado a frio com adição de 3 % de borracha moída com dimensões de 100 m de comprimento, 7m de largura e 2,5 cm de espessura é necessário a utilização de 1097,78 Kg de borracha moída.

Dentre os traços estudados, o traço com adição de 3 % de borracha foi o melhor traço e assim escolhido como traço ideal, pois poderá garantir:

- Que não ocorra oxidação da massa asfáltica pela ação da água e/ou ar e que não ocorra exsudação, pois apresentou o menor volume de vazios;
- A máxima estabilidade uma vez que possui a maior densidade aparente;
- A maior resistência à compressão diametral, pois apresenta a maior estabilidade Marshall;
- O menor consumo de emulsão asfáltica por apresentar o menor teor ótimo de emulsão asfáltica; e,
- Que exista betume suficiente e que não ocorra a exsudação por apresentar a maior relação betume vazios.

***SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS***

---

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade desse trabalho, seguem algumas sugestões para estudos futuros de pré-misturado a frio:

- A execução de ensaios de apreciação petrográfica dos agregados;
- A execução de ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência para comparações com os outros ensaios e verificação do comportamento das misturas asfálticas;
- A construção de um trecho experimental para a realização desses ensaios avaliando as características do pavimento sob solicitações de tráfego “in loco”;
- Realizar os mesmos ensaios, trocando o agregado natural por RCD (Resíduo de Construção e Demolição); e,
- Avaliação do custo das misturas asfálticas com adições de borracha moída;

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

## 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**. Disponível em: <http://www.faa.gov>. Acesso em: 25 jan. 2006.

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.

ANIP, Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. **Indicadores de Atividades do Setor**. Disponível em: <http://www.anip.com.br> Acesso em: 10 set. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NRB 14491: **Emulsões asfálticas - determinação da viscosidade Saybolt Furol**. Rio de Janeiro: ABNT, abril 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NRB 6300: **Emulsões asfálticas catiônicas – determinação da resistência à água (adesividade)**. Rio de Janeiro: ABNT, abril 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NRB 6568: **Emulsões asfálticas – determinação do resíduo de destilação**. Rio de Janeiro: ABNT, setembro 2005.

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

BERTOLLO, S. A. M.; Fernandes Júnior, J. L.; Villaverde, R. B.; Migotto Filho, D. (2000) **Pavimentação asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados**. Revista de Limpeza Pública, ed. 54. págs. 23-30.

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

CLERMAN, D. S. **Estudo Laboratorial de Misturas Asfálticas a Frio Produzidas com Incorporação de Borracha de Pneus**. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, 2004.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - CONAMA Disponível em <[www.mma.gov.br/port/conama](http://www.mma.gov.br/port/conama)> **Resolução 258**, 26 de Agosto de 1999. Acesso em: 14 set. 2007.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Boletim CNT Junho 2007**. Disponível em <<http://www.cnt.org.br>>. Acesso em: 25 set. 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 002: Emulsão Asfáltica – Carga da Partícula**, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 003: Material Betuminoso – Determinação da Penetração**, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 005: Emulsão Asfáltica - Determinação da Peneiração (ABNT – NBR 14393)**, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 006: Emulsões Asfálticas - Determinação da Sedimentação**, 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 007: Emulsão Asfáltica - Determinação da Ruptura – Método da Mistura com Cimento (ABNT NBR 6297)**, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 008: Emulsão Asfáltica - Determinação da Ruptura – Método da Mistura com Filer Silícico (ABNT NBR 6302)**, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 010: Cimentos Asfálticos de Petróleo - Determinação do Teor de Betume (ABNT MB 166)**, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 035: Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 054: Equivalente de areia**, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 059: Emulsões asfálticas – determinação da resistência à água (adesividade) (ABNT NBR 6300)**, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 063: Emulsões asfálticas catiônicas – determinação da Desmulsibilidade**, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 083: Agregados – análise granulométrica**, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 086:**  
**Agregado – determinação do índice de forma**, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 089:**  
**Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio**, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 107:**  
**Mistura Betuminosa a Frio com Emulsão Asfáltica – Ensaio Marshall**, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 117:**  
**Mistura Betuminosa – Determinação da Densidade Aparente**, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 149:**  
**Emulsões asfálticas catiônicas – determinação do pH (ABNT NBR 6299)**, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ME 163:**  
**Materiais betuminosos – determinação da ductilidade**, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER PRO 199:**  
**Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório**, 1996

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ES 317:**  
**Pavimentação - Pré-misturados a frio**, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ES 369:**  
**Emulsões Asfálticas Catiônicas**, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER ES 395:**  
**Pavimentação – pintura de ligação com asfalto polímero**, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - **DNER EM 396: Cimento asfáltico modificado por polímero**, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM – DNER. **Manual de Pavimentação**, 1996.

ECHIMENCO, L. **Pneus usados rendem lucros**. In: Jornal o Estado de São Paulo. São Paulo, 17 abr. 2001. Painel de Negócios, p. pn. 1, 3 e 4.

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

GOODYEAR. Charles Goodyear and the Strange Story of Rubber. 1999. Disponível em <[http://www.goodyear.com/corporate\\_information](http://www.goodyear.com/corporate_information)>. Acesso em 15 fev. 1999.

GRECA, M.R.; MORILHA, A.J. **Asfalto Borracha** – Ecoflex, Curitiba, 2003.

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.

HOLLERAN, G.; REED, J. R. **Super Microsurfacing**. World Of Asphalt AAPA, Sydney. Retirado do site: [www.slurry.com/techpapers/techpapers\\_australia\\_aapa.shtml](http://www.slurry.com/techpapers/techpapers_australia_aapa.shtml) Austrália, 2000.

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

HUANG, B.; MOHAMMAD, L. N.; GRAVES, P.S.; ABADIE, C. **Lousiana Experience with Crumb Modified Hot-mix Asphalt Pavement**. Transportation Research Record. Washington, n.1789, p. 1-13. USA, 2002.

KIROSKI, D.; BURKE, B. E PACKHAM, D. **Effect Of Substrate On Adhesion In Rubber Moulding**. Disponível em:<[http:// staff.bath.cc.uk/mssdep/paper1.htm](http://staff.bath.cc.uk/mssdep/paper1.htm)>. Acesso em: 05 mai. 1996.

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.

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.

PETROBRÁS DISTRIBUIDORA S.A. **Pré-misturado a frio (PMF)**. Disponível em: <<http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf#http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf/0/09702B401A66490F03256DAD004A7381?OpenDocument&Sasfalto>> Acesso em: 10 jun. 2006.

PETROBRÁS DISTRIBUIDORA S.A; ABEDA, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. **Emulsões asfálticas, asfalto diluído e asfalto-espuma**, Bloco 2. Disponível em: <http://www.cpgec.ufrgs.br/petcivil/Download/Apoio%20adidatico/Bloco%202-aula%208-%20Emulsao%20asfaltica%20asfalto%20diluido%20asfalto.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2008.

PINHEIRO, J.H.M. E SOARES, J.B. **The Effect of Crumb Rubber Gradation and inderrubber 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.

NOHARA, J.J.; ACEVEDO, C. R.; PIRES, B.C.C.; CORSINO, R.M. **GS-40 – Resíduos Sólidos: Passivo Ambiental e Reciclagem de Pneus**. Thesis, São Paulo, 2005.

ODA, S.; NASCIMENTO, L.A.H; EDEL, G. **Aplicação de Asfalto-Borracha na Bahia**. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Bahia, 2005

ODA, Sandra, **Reutilização de pneus como alternativa para aumento de vida útil de aterros**, Universidade Estadual de Maringá, 2002.

SANTANA, H. **Manual de Pré-Misturados a Frio**. IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo. Brasil, 1993.

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.

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.

SOARES, V. **ANIP atinge a marca de 100 milhões de pneus velhos destruídos**. Acesso disponível em: <<http://www.anip.com.br/>>. Acesso em: 25 ago. 2007.

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.

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. **Utilization of Waste Materials for Cold Asphalt Mixes.** Retirado do site:[www.bibcouncil.de/ISSM2002/Proceedings/paperPDF/e02.pdf](http://www.bibcouncil.de/ISSM2002/Proceedings/paperPDF/e02.pdf) U.K., 2002.

TRELOAR, L.R.G. **The Physics of Rubber Elasticity.** 3<sup>rd</sup> Edition. Oxford. USA, 1975.

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. 15-31. Portugal, 2000.

***ANEXOS***

---

## ANEXO A



### MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA

RESOLUÇÃO CONAMA Nº. 258/99 - Texto modificado em 21.03.02

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, no uso das atribuições que lhe são conferidas pela lei nº. 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto nº. 99.274, de 06 de junho de 1990 e suas alterações, tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, e

CONSIDERANDO que os pneumáticos inservíveis abandonados ou dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental, que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública;

CONSIDERANDO que não há possibilidade de reaproveitamento desses pneumáticos inservíveis para uso veicular e nem para processos de reforma, tais como recapagem, recauchutagem e remoldagem;

CONSIDERANDO que os pneumáticos novos, depois de usados, podem ser utilizados em processos de reciclagem;

CONSIDERANDO a necessidade de dar destinação final, de forma ambientalmente adequada e segura, aos pneumáticos inservíveis;

CONSIDERANDO que a importação de pneumáticos usados é proibida pelas Resoluções CONAMA nº. 23/96 e nº. 235/98;

Considerando que se faz necessário o controle do passivo ambiental gerado pelos pneumáticos usados oriundos de veículos automotores e bicicletas;

Considerando que de acordo com a legislação vigente compete ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, o controle, a fiscalização e a edição dos atos normativos pertinentes à Resolução;

**RESOLVE:**

Art. 1º - As empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos para uso em veículos automotores e bicicletas ficam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida nesta Resolução relativamente às quantidades fabricadas e/ou importadas.

Parágrafo Único - As empresas que realizam processos de reforma ou de destinação final ambientalmente adequada de pneumáticos ficam dispensadas de atender ao disposto neste artigo, exclusivamente no que se refere à utilização dos quantitativos de pneumáticos coletados no território nacional.

Art. 2º - Para os fins do disposto nesta Resolução, considera-se:

I. pneu ou pneumático: todo artefato inflável, constituído basicamente por borracha e materiais de reforço, utilizado para rodagem em veículos automotores e bicicletas;

II. pneu ou pneumático novo: aquele que nunca foi utilizado para rodagem sob qualquer forma, enquadrando-se, para efeito de importação, no código 4011 da Tarifa Externa Comum – TEC;

III. pneu ou pneumático reformado: todo pneumático que foi submetido a algum tipo de processo industrial com o fim específico de aumentar sua vida útil de rodagem em meios de transporte, tais como recapagem, recauchutagem ou remoldagem, enquadrando-se, para efeito de importação, no código 4012.10 da Tarifa Externa Comum – TEC;

IV pneu ou pneumático inservível: aquele que não mais se presta a processo de reforma que permita condição de rodagem adicional, conforme código 4012.20 da Tarifa Externa Comum – TEC;

Art. 3º - Os prazos e quantidades para coleta e destinação final, de forma ambientalmente adequada, dos pneumáticos inservíveis resultantes de uso em veículos automotores e bicicletas de que trata esta Resolução, são os seguintes:

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

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

III A partir de 1º de Janeiro de 2004:

a. Para cada um pneu novo fabricado no País ou pneu novo importado, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível;

b. Para cada quatro pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis;

IV A partir de 1º de Janeiro de 2005:

a. Para cada quatro pneus novos fabricados no País ou pneus novos importados, inclusive aqueles que acompanham os veículos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis;

b. Para cada três pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destinação final a quatro pneus inservíveis.

Parágrafo Único - O disposto neste artigo não se aplica aos pneumáticos exportados ou aos que equipam veículos exportados pelo País.

Art. 4º - No quinto ano de vigência desta Resolução, o CONAMA, após avaliação a ser procedida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais

Renováveis – IBAMA, reavaliará as normas e procedimentos estabelecidos nesta Resolução.

Art. 5º - O IBAMA poderá adotar, para efeito de fiscalização e controle, a equivalência em peso dos pneumáticos inservíveis.

Art. 6º - As empresas importadoras deverão, a partir de 1º de Janeiro de 2002, comprovar junto ao IBAMA, previamente aos embarques no exterior, a destinação final, de forma ambientalmente adequada, das quantidades de pneus inservíveis estabelecidas no Art. 3º desta Resolução, correspondentes às quantidades a serem importadas, para efeitos de liberação de importação junto ao Departamento de Operações de Comércio Exterior – DECEX, do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.

Art. 7º - As empresas fabricantes de pneumáticos deverão, a partir de 1º de Janeiro de 2002, comprovar junto ao IBAMA, anualmente, a destinação final, de forma ambientalmente adequada, das quantidades de pneus inservíveis estabelecidas no Art. 3º desta Resolução, correspondentes às quantidades fabricadas.

Art. 8º - Os fabricantes e os importadores de pneumáticos poderão efetuar a destinação final, de forma ambientalmente adequada, dos pneus inservíveis de sua responsabilidade, em instalações próprias ou mediante contratação de serviços especializados de terceiros.

Parágrafo Único - As instalações para o processamento de pneus inservíveis e a destinação final deverão atender ao disposto na legislação ambiental em vigor, inclusive no que se refere ao licenciamento ambiental.

Art. 9º - A partir da data de publicação desta Resolução fica proibida a destinação final inadequada de pneumáticos inservíveis, tais como a disposição em aterros sanitários, mar, rios, lagos ou riachos, terrenos baldios ou alagadiços e queimas a céu aberto.

Art. 10º - Os fabricantes e os importadores poderão criar centrais de recepção de pneus inservíveis, a serem localizadas e instaladas de acordo com as normas ambientais e demais normas vigentes, para armazenamento temporário e posterior destinação final ambientalmente segura e adequada.

Art. 11 - Os distribuidores, os revendedores, os reformadores, os consertadores e os consumidores finais de pneus, em articulação com os fabricantes, importadores e Poder Público, deverão colaborar na adoção de procedimentos, visando implementar a coleta dos pneus inservíveis existentes no País.

Art. 12 - O não cumprimento ao disposto nesta Resolução implicará nas sanções estabelecidas na lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e seu regulamento.

Art. 13 - As regras desta Resolução aplicar-se-ão também aos pneus usados, de qualquer natureza, que ingressarem em território nacional por força de decisão judicial.

Art. 14 - Esta resolução entra em vigor na data de sua publicação.

*José Carlos Carvalho*  
*Presidente do Conselho*

.....  
*Secretário Executivo*

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)